

应用统计 与数据科学

Applied Statistics and Data Science



ART AND DESIGN PRESS INC.

(626 810 4480)

119 S Atlantic Blvd, Suite 300D

Monterey Park, CA 91754

Copyright © 2025 by ART AND DESIGN PRESS INC.

Complimentary Copy



编委会名单

主编



王国长 (Guochang Wang), 暨南大学 (Jinan University),
邮箱: wanggc023@amss.ac.cn
研究兴趣: 函数型数据分析、时间序列、充分性降维、统计与机器学习
functional data analysis, time series, sufficiency dimension reduction, statistics and machine learning

执行副主编



张兴发 (Xingfa Zhang), 广州大学 (Guangzhou University),
邮箱: xingfazhang@gzhu.edu.cn
研究兴趣: 金融统计、环境统计、机器学习
financial statistics, environmental statistics, machine learning

编委



胡志勇 (Zhiyong Hu), 广州大学 (Guangzhou University)
邮箱: zhyhu65@163.com
研究兴趣: 大数据, 人工智能, 财务与会计
big data, artificial intelligence, finance and accounting



雷田礼 (Tianli Lei), 深圳职业技术大学 (Shenzhen Polytechnic University)
邮箱: ltl@szpu.edu.cn
研究兴趣: 数量经济、高职数学教育
quantitative economics, higher vocational mathematics education



舒连杰 (Lianjie Shu), 澳门大学 (University of Macau),
邮箱: ljshu@um.edu.mo
研究兴趣: 量化金融, 统计学习, 质量控制及管理
quantitative finance, statistical learning, quality control and management



王纬 (Wei Wang), 山东财经大学 (Shandong University of Finance and Economics)
邮箱: wangwei_0115@sdufe.edu.cn
研究兴趣: 统计机器学习、应用统计、计量经济
statistical machine learning, applied statistics, econometrics



杨凯 (Kai Yang), 长春工业大学 (Changchun University of Technology)
邮箱: yangkai@ccut.edu.cn
研究兴趣: 时间序列分析、高维数据分析、贝叶斯分析
time series analysis, high-dimensional data analysis, bayesian analysis



周彦 (Yan Zhou), 深圳大学 (Shenzhen University)
邮箱: zhouy1016@163.com
研究兴趣: 生物统计, 数据科学
Biostatistics, data science



李永明 (Yongming Li), 上饶师范学院 (Shangrao Normal University)
邮箱: lym1019@163.com
研究兴趣: 非参数统计, 金融统计, 极限理论与统计大样本性质, 小波方法
nonparametric statistics, financial statistics, limit theory and statistical large sample theory, wavelet method



刘照德 (Zhaode Liu), 广东财经大学 (Guangdong University of Finance & Economics)
邮箱: lzhaode@163.com
研究兴趣: 经济统计、多元统计、计量分析
economic statistics, multivariate statistics, econometric analysis



王小刚 (Xiaogang Wang), 北方民族大学 (North Minzu University)
邮箱: wongone@163.com
研究兴趣: 经济与社会统计
economic and social statistics



严晓东 (Xiaodong Yan), 西安交通大学 (Xi'an Jiaotong University)
邮箱: yanxiaodong@xjtu.edu.cn
研究兴趣: 统计机器学习、智能体统计学
statistical machine learning, agent statistics



朱柯 (Ke Zhu), 香港大学 (The University of Hong Kong)
邮箱: mazhuke@hku.hk
研究兴趣: 统计建模、金融时间序列分析、计量经济、金融大数据
statistical modeling, financial time series analysis, econometrics, financial big data

应用统计与数据科学

Applied Statistics and Data Science

第1卷 第5期 2025年7月刊

主办单位: ART AND DESIGN PRESS INC

(United States)

承办单位: 广州统计师事务所

指导单位: 广东省现场统计学会、广州市统计学会

主 编: 王国长

执行副主编: 张兴发

编 委: 胡志勇、李永明、雷田礼、刘照德、
舒连杰、王小刚、王 伟、严晓东、
杨 凯、朱 柯、周 彦

地 址: 119 S Atlantic Blvd, Suite 300D Monterey
Park, CA 91754

网 址: <https://www.artdesignp.com>

本刊说明:

凡向本刊所投稿件, 全体作者需签署论文著作权
转让声明书和论文发表承诺书, 声明、承诺及相关事
项如下:

- 作者将论文的复制权、发行权、网络传播权、
翻译权、汇编权、信息网络传播权、改编权等著作
权在世界范围内免费转让给本刊。
- 论文不侵犯他人著作权和其他权利, 否则作者将
承担由此产生的全部责任, 并赔偿由此给出版单
位造成的全部损失。
- 论文署名作者享有该作品的完全著作权, 署名作
者的身份真实。
- 论文未曾以任何形式公开发表过。
- 作者所投本刊稿件, 本刊编辑部拥有修改权。



市场调研 | MARKET RESEARCH

- 001 基于消费者行为数据的广州市国潮香氛品牌
市场拓展策略研究 朱心怡, 蔡威, 邱涛
Research on Market Expansion Strategies for Domestic Trendy Fragrance
Brands in Guangzhou Based on Consumer Behavior Data Zhu Xinyi, Cai Wei, Qiu Tao
- 005 南京市小区物业服务满意度影响因素
及业主需求分析 周莹莹, 高志鹄, 闫雅晴, 赵崇海, 王宁, 刘鹏飞
Factors Influencing Property Service Satisfaction and Resident Demand Analysis
in Nanjing Communities Zhou Yingying, Gao Zhihu, Yan Yaqing, Zhao Chonghai,
Wang Ning, Liu Pengfei
- 010 新能源车企激战: 价格战漩涡下广东消费者购车决策
的多维重塑 张旌旆, 张雪莹
Fierce Competition in the New Energy Vehicle Market: How Price Wars
Are Reshaping Consumer Decisions in Guangdong Zhang Jingpei, Zhang Xueying
- 018 广州市Z时代智能家居消费行为调研
与市场策略优化研究 陈宇鸿, 严冰怡, 潘宇, 姚洁莹, 潘嘉伟
Smart Living for the Future: A Research on the Consumption Behavior of the
Z-Generation in Smart Home Appliances and Market Strategy Optimization in
Guangzhou Chen Yuhong, Yan Bingyi, Pan Yu, Yao Jieying, Pan Jiawei
- 024 城市无人机配送用户使用意愿影响因素研究
——基于SEM与fsQCA方法 张佳越, 刘佳欣
Research on the Factors Influencing User Willingness to Use Urban Drone
Delivery Services—Based on SEM and fsQCA Methods Zhang Jiayue, Liu Jiaxin
- 029 消费者对共享经济中无人驾驶汽车的态度调查 徐蔚, 李佳文, 安健琼, 梁鑫
A Survey of Consumer Attitudes towards Driverless Vehicles in the
Sharing Economy Xu Wei, Li Jiawen, An Jianqiong, Liang Xin

经济与金融统计 | ECONOMIC AND FINANCIAL STATISTICS

- 036 中国制造业碳排放强度收敛趋势及其驱动因素研究 游建民
Research on the Convergence Trend of Carbon Emission Intensity in China's
Manufacturing Industry and Its Driving Factors You Jianmin
- 041 我国影子银行对货币政策传导影响研究 朱顺泉, 何晓光
A Study on the Impact of Chinese Shadow Banking on Monetary
Policy Transmission Zhu Shunquan, He Xiaoguang
- 045 基于“金融-技术-能源”耦合协调度的长江
经济带碳达峰路径研究 张甜, 徐小雅, 李翰芳
Research on the Carbon Peak Path of the Yangtze River Economic Belt Based on
"Finance-Technology-Energy" Zhang Tian, Xu Xiaoya, Li Hanfang
- 051 农业新质生产力赋能城乡融合发展的内在逻辑与作用机制 任琳
The Internal Logic and Mechanism of Agricultural New Quality Productivity
Forces Urban-Rural Integrated Development Ren Lin
- 058 新质生产力赋能制造业产业链韧性提升的作用机理 余呈先, 陆正慧
The Mechanism of Empowering Manufacturing Industry Chain Resilience
with New Quality Productivity Yu Chengxian, Lu Zhenghui
- 062 农村金融高质量发展对产业结构升级的影响 黎洋, 何光, 齐欢
The Impact of High-Quality Development of Rural Finance on
Industrial Structure Upgrading Li Yang, He Guang, Qi Huan

066	中国辣椒价格波动特征及其影响因素分析 Analysis of Fluctuation Characteristics and Influencing Factors of Chili Pepper Prices in China	包旭梅, 谢军 Bao Xumei, Xie Jun
-----	---	-------------------------------

管理统计 | MANAGEMENT STATISTICS

070	工商管理领域中 ESG 理念嵌入企业价值创造的路径与绩效评价 The Path and Performance Evaluation of Embedding ESG Concepts into Enterprise Value Creation in the Field of Business Administration	周正涛 Zhou Zhengtao
-----	--	----------------------

统计与教育教学 | STATISTICS AND EDUCATION TEACHING

074	OBE 理念驱动的工科概率统计课程教改与实践 Curriculum Reform and Practice of Engineering Probability and Statistics Driven by OBE Philosophy	袁程, 张兴发 Yuan Cheng, Zhang Xingfa
-----	---	-------------------------------------

数据科学技术、方法与应用 | DATA SCIENCE TECHNOLOGY, METHODS AND APPLICATIONS

077	复杂视频场景人群行为分析研究 Research on the Analysis of Crowd Behavior in Complex Video Scenes	胡同花, 胡紫英 Hu Tonghua, Hu Ziyi
-----	--	---------------------------------

082	大数据驱动下建设工程装饰成本动态预测与优化决策研究 Research on Dynamic Prediction and Optimization Decision-making of Construction Decoration Costs Driven by Big Data	石镇尧 Shi Zhenyao
-----	--	--------------------

085	对高速公路行程中主线门架交易数据缺失的分析与思考 Analysis and Reflection on the Missing Transaction Data of Mainline Gantries in Highway Trips	龚佑民 Gong Youmin
-----	---	--------------------

统计方法及应用 | STATISTICAL METHODS AND APPLICATIONS

089	带 L2 惩罚的张量神经网络模型及其应用研究 Tensor Neural Network Model with L2 Penalty and Its Application	向科聿, 黄靖翔, 于卓熙, 孙丛婷 Xiang Keyu, Huang Jingxiang, Yu Zhuoxi, Sun Congting
-----	---	--

097	参数估计对二项分布 CUSUM 控制图的性能影响分析 Analysis of the Influence of Parameter Estimation on the Performance of CUSUM Control Charts for Binomial Distribution	苏鑫越, 杨薇, 张久军 Su Xinyue, Yang Wei, Zhang Jiujun
-----	--	---

基于消费者行为数据的广州市国潮香氛品牌 市场拓展策略研究

朱心怡¹, 蔡威¹, 邱涛^{2*}

1. 北京师范大学 统计学院, 北京 100875

2. 北京师范大学 文理学院, 广东 珠海 519085

DOI:10.61369/ASDS.2025050001

摘 要 : 后疫情时代,“嗅觉经济”的兴起推动了香氛消费的快速增长。政策、经济与文化上的利好使国产香氛品牌进入大众视野。然而,当前香氛产业仍面临香文化传承不足、技术依赖进口、市场认知度不高等问题。为此,文章以广州市国潮香氛品牌为研究对象,从用户行为与品牌策略两个维度展开研究。在用户维度,通过百度指数分析香氛市场热度,爬取京东差评数据,结合 LDA 模型提取出“包装”“客服态度”“价格”“宣传”四个核心影响因素。采用聚类算法识别出两类实际消费者与两类潜在消费者,并运用结构方程模型探究消费者购买意愿的影响路径,发现文化认同与产品认知是关键驱动因素,其中产品性能对购买意愿的影响显著大于心理因素。在品牌维度,通过漏斗模型分析不同场景下的香氛触达与转化效果,发现住宿场景转化率最高,办公场景回报率最佳。结合逻辑回归与关联规则分析,挖掘各场景下消费者对香氛的差异化需求。基于上述分析,文章提出 PDP 策略,品牌定位上,强化平价线与高端线并行;产品设计上,优化细分市场、增强文化认同;市场推广上,聚焦高转化场景,构建品牌概念。

关 键 词 : 嗅觉经济; 聚类模型; 文本挖掘; 结构方程模型; 漏斗模型

Research on Market Expansion Strategies for Domestic Trendy Fragrance Brands in Guangzhou Based on Consumer Behavior Data

Zhu Xinyi¹, Cai Wei¹, Qiu Tao^{2*}

1.School of Statistics, Beijing Normal University, Beijing 100875

2.Faculty of Arts and Sciences, Beijing Normal University, Zhuhai, Guangdong 519085

Abstract : In the post-pandemic era, the rise of the "olfactory economy" has driven the rapid growth of fragrance consumption. Policies, economy and culture have brought domestic fragrance brands into the public eye. However, the current fragrance industry still faces problems such as insufficient inheritance of fragrance culture, reliance on imported technology, and low market awareness. Therefore, this article takes the domestic trend fragrance brands in Guangzhou as the research object and conducts the research from two dimensions: user behavior and brand strategy. From the user perspective, by analyzing the popularity of the fragrance market through Baidu Index, crawling negative review data from JD.com, and combining the LDA model, four core influencing factors – "packaging", "customer service attitude", "price", and "promotion" were extracted. Two types of actual consumers and two types of potential consumers were identified by using the clustering algorithm. The influence path of consumers' purchase intention was explored by using the structural equation model. It was found that cultural identity and product cognition were the key driving factors, among which the influence of product performance on purchase intention was significantly greater than that of psychological factors. From the brand perspective, by analyzing the fragrance reach and conversion effects in different scenarios through the funnel model, it was found that the conversion rate in the accommodation scenario was the highest, and the return rate in the office scenario was the best. Combining logistic regression and association rule analysis, explore the differentiated demands of consumers for fragrances in various scenarios. Based on these insights, a PDP strategy is proposed: reinforcing both budget-friendly and premium product lines; optimizing product design to enhance cultural resonance; and focusing on high-conversion scenarios to build brand concepts and strengthen market influence.

Keywords : olfactory economy; clustering model; text mining; structural equation model; funnel model

作者简介:

朱心怡, 北京师范大学统计学院, 硕士研究生, 研究方向为数据科学与管理;

蔡威, 北京师范大学统计学院, 硕士研究生, 研究方向为商业统计分析。

通讯作者: 邱涛, 北京师范大学文理学院, 硕士生导师, 研究方向为高维数据分析。

引言

香是中国的传统文化，后疫情时代“嗅觉经济”盛行，新的消费需求促进了香氛品牌的发展^[1]。经济方面，自改革开放以来，我国经济发展趋势向好，消费者消费观念升级^[2]；政治方面，在高质量发展和“双循环”战略的引导下，国货的持续发展成为了一个必然的趋势；文化方面，新时代的消费者从小受到互联网和社交媒体的影响，理想信念更加坚定、知识素养更高、拥有更强的自主意识和文化自信。但国产香氛品牌市场发展仍不完善。国产香氛起步较晚，国外企业垄断严重，国内供应商在原料的提取和加工方面存在一定的技术瓶颈，生产设备的更新和升级也需要较大的投入^[3]。鉴于上述背景，国产香氛企业有必要深入分析消费者的购买行为，并制定相应的市场推广策略。

一、消费者行为与购买意愿影响分析

（一）数据来源

1. 文本数据

百度指数显示2023年5月香氛搜索热度达高峰，因此本文选取2023年3月至7月的评论数据进行分析。爬取京东上以“香氛”为关键词检索得到的国内香氛产品差评，去噪后保留10381条文本数据。通过jieba分词处理，提取高频关键词。词云图显示，消费者主要不满点集中在“味道”“客服”“包装”“赠品”“发货”等方面，反映出产品质量与服务质量问题突出。进一步使用LDA模型确定四个主题：虚假宣传、包装粗糙、价格不合理、客服处理差，揭示了消费者对香氛产品整体体验的不满，为品牌优化提供方向^[4]。

2. 问卷数据

本文通过企查查平台分析各省香氛企业数量，发现广东省香氛产业最为发达，广州作为省会城市，香氛搜索指数也居全国前列，因此选取广州作为研究主体。研究对象为广州市18岁以上居民，采用分层随机抽样法，在白云、番禺、天河三区进行调查，共发放问卷573份，回收有效问卷560份，有效率达97.7%。为探究国潮香氛产品消费者购买意愿的影响因素，构建包含认同融合、能力感知、风险感知、产品认知与产品质量五个维度的分析模型，以揭示消费者心理与产品层面的决策机制。

（二）消费者的消费情况及偏好分析

在本次调查数据中，男性占比45%，女性占55%。年龄分布以18~30岁为主，占比约54.6%，60岁以上者仅占4.29%。职业方面，企业从业人员、公务员及学生群体占比较高。学历以本科和专科为主，分别占51%和13.93%。婚姻状况方面，71.79%为已婚，其余为未婚或离异。月收入主要集中在2000~10000元区间，香氛消费金额以201~400元为主，约20.5%的消费者从未使用过香氛产品。

88%的受访者认为环境气味对生活品质有重要影响，表明消费者对香氛产品有较高关注度。79.8%的消费者使用过香氛产品，而20.2%因缺乏需求而未使用。对于未使用者，主要原因是“无使用需求”和“无合适放置位置”，因此品牌可通过社交媒体提

升认知度，并优化线下体验以促进转化。

在购买香氛产品时，消费者最看重的因素依次为功效、气味和品牌，而对原料和外观的关注度较低。总体来看，消费者更倾向于选择国内品牌，43.2%的受访者表示相较于国外品牌，更偏好国产香氛。这反映出国产品牌在价格优势和市场接受度方面具有一定竞争力，但需在产品多样性与品牌影响力上进一步提升。

（三）香氛品牌的消费者群体画像构建

用户画像是从一系列数据中提炼出用户的属性特征，通过聚类，可将香氛市场中消费者划分成不同群体，每个群体具有相似的消费行为和偏好，有助于品牌更好地了解 and 满足其目标消费者群体的需求^[5]。本部分中，对已经消费过的群体进行聚类分析，以了解消费者购买行为和偏好；对未消费过的群体进行聚类分析，以了解潜在的购买意愿和需求特点。

1. 已消费香氛的群体

选取已消费香氛产品的用户特征，包括性别、年龄、月收入、职业、学历、婚姻状态、居住环境、年消费金额、获取渠道及购买香氛时看重的因素等。采用K-means算法并结合肘部函数确定聚类数量，将440个样本分为两类。聚类1群体占74%，注重品牌、寓意和易用性，偏好木香，关注助眠解压等功效。聚类2群体占26%，多为女性学生群体，追求性价比，注重气味和安全性，偏好果香类型。

2. 潜在消费者群体

选取未消费香氛产品的用户特征，包括性别、年龄、月收入、职业、居住环境、不使用香氛的原因、偏好香型及原料等。采用Consensus Cluster将110个样本分为两类。聚类3群体占43%，为男性学生群体，居住在宿舍或租房，月收入低于2000元，不使用香氛的主要原因是无需求或无合适放置位置，偏好海洋香。聚类4占57%，多为自由职业者或家庭主妇，不使用香氛的主要原因是身体过敏或价格过高，关注家庭环境的健康与清洁。

（四）购买意愿影响因素分析

本节采用结构方程模型分析消费者购买意愿的影响因素，数据满足正态性检验且各维度间存在显著相关性，量表具有良好的信度与效度，结果表明模型与数据适配良好。

将模型划分为五个维度，其中认同融合、能力感知、风险感

知可以从主观心理层面影响消费者购买意愿，产品认知和产品质量从产品性能层面影响消费者购买意愿^[6]，其中，模型路径关系的假设、结构方程模型系数及检验结果如表1。

表1：结构方程模型系数及检验结果

假设	标准化系数	C.R.	P	检验
H1：认同融合—购买意愿	0.782	9.626	0.001	接受
H2：能力感知—购买意愿	-0.082	-0.984	0.325	拒绝
H3：风险感知—购买意愿	-0.102	-2.328	0.017	拒绝
H4：产品认知—购买意愿	0.956	5.926	0.001	接受
H5：产品质量—购买意愿	-0.693	-4.651	0.001	接受

根据表1，可以判断产品性能层面对购买意愿影响程度更显著，从产品性能层面来看，尤其是国潮香氛产品认知维度，其主导了购买意愿的大小，从主观心理来看，仅有认同融合维度对购买意愿产生一定影响，能力感知和风险感知均未对购买意愿产生显著影响效果。

二、多场景获客渠道探究

本章基于问卷数据，对住宿、出行、娱乐、办公四大香氛覆盖场景进行深挖，全方位、多场景地研究获客渠道效益。一方面，使用漏斗模型拆解香氛落地场景的客群转化途径，揭示相应市场的体量与潜在增长力^[7]；另一方面，引入逻辑回归与关联规则^[8]方法，挖掘当前各大场景香氛受众的差异性与同一性。

（一）客群转化途径分析

漏斗模型是描述潜在客户从首次接触品牌到最终成交的营销过程的模型，帮助企业了解和优化各个营销阶段的用户转化情况，将用户的购买过程划分为不同的阶段，如接触品牌、表现兴趣、考虑是否购买、完成购买，采用转化率来衡量用户阶段转化情况，针对住宿、出行、娱乐、办公四种常布置香氛的封闭场景。本文选用漏斗模型以监控不同场景的渠道转化效果，达到改进消费者各场景香氛体验、辅助企业扩宽客群的目的。

针对四层漏斗，分别计算每层对应的整体转化率，并可视化如图1。

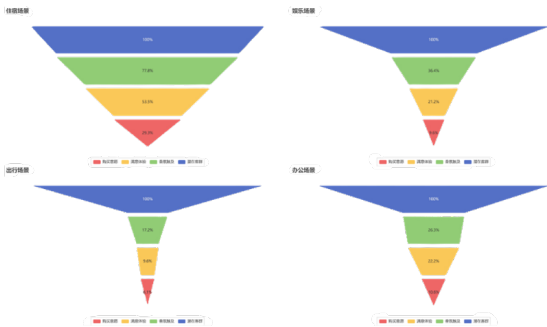


图 1：各场景顾客转化情况图

可以发现，住宿环境中，“香氛触及”环节的整体转化为77.8%，表明该消费场景的香氛采购已很成熟，总群体中53.5%的人群对香氛感到满意，厂商在该场景下提供最有力竞争力的香氛产

品，可以实现高效率的场景引流；出行环境中，香氛的覆盖率最低，“购买意愿”整体转化率仅有6.1%，考虑到出租车经营过程的个人性质很强，香氛厂商应与出租车公司协商，先发占领此市场；娱乐环境中，香氛品质、转化消费者的能力尚可，建议厂商从覆盖率方面开拓市场，追求品牌市场占有率；办公环境中，香氛覆盖率整体偏低，但“香氛触及”转化为“满意体验”的比例高达84%，考虑到较低的香氛覆盖率和较高的转化效率，办公场景具有十足的发展空间。

（二）分场景下香氛类型探寻

1. 逻辑回归

为保证满意人群与不满意人群间对于香氛的偏好有显著差异，使用逻辑回归分别对四个场景下是否满意进行回归^[9]。利用 R 语言的 glmnet 包，分别对四个场景下的目标变量进行回归，仅住宿场景、娱乐场景中有除截距项以外的显著变量，结果表明，消费者在住宿与娱乐场景中对香氛偏好具有较强区分度，而出行与办公场景的满意与否可能受随机因素影响，如网约车或办公环境的附加体验。

2. 关联规则分析

关联规则分析常用于发掘数据集项与项之间的关系，能帮助企业更细致地刻画消费者行为、更精准地制定销售策略。将关联规则分析引入分场景香氛类型调查、量化关联关系的强度和影响，挖掘市面主流采购香氛类型，引导香氛厂商针对采购方“对症下药”。本文采用 apriori 算法，挖掘潜在的关联规则^[10]。设置最小支持度为0.1、最小置信度为0.7，分别对四个场景求关联规则。

结果显示：住宿场景下，改善睡眠质量与香氛外观偏好成为关键因素，提示国潮品牌应注重产品功能与外观设计，以契合住宿场景的“精致”氛围。娱乐场景中，长留香时间与国产香氛偏好显著，与 KTV、SPA 等长消费场景的消费心理一致，国潮品牌可借此优势强化产品线。出行场景中，花香型香氛偏好突出，尽管部分消费者不关注气味，但车主审美偏好仍影响满意度，国潮品牌可借此推出高性价比花香产品。办公场景中，“提升心情”成为主要驱动因素，但满意度仍以国外品牌为主，国潮品牌需加强情绪疗愈类产品研发，以提升市场竞争力。

三、结束语

国产香氛品牌在市场中正面临从产品设计、品牌定位到多场景获客的多重挑战与机遇。由文本挖掘结果可知，消费者对国产香氛的不满主要集中在产品质量、服务和物流，因此品牌需优化产品品质与服务体验，提升消费者信任感。同时，品牌应注重文化内涵的塑造，通过社媒、品牌活动等方式传递东方美学，强化品牌国潮形象^[11]。基于消费者群体差异与用户画像细分，品牌应制定差异化产品策略。针对不同职业、年龄和香味偏好，推出

符合其情感需求的产品。另外，文化认同感显著促进购买意愿，品牌应融入中国元素，强化文化感知；在产品性能层面，注重香味、设计与性价比，提升消费者认知与信任。在市场推广方面，品牌应结合多场景制定策略。在办公场景中，可重点布局线下体验店，提升转化率；出行与娱乐场景中加强概念化营销，建立情

感联系。品牌也应注重线下门店的打造，通过试香互动、空间设计等方式增强消费者体验，提升品牌触及率与互动性。

综上，国产香氛品牌应从产品设计、品牌定位与场景营销三方面协同发力，提升市场竞争力，推动行业高质量发展^[12]。

参考文献

- [1] 刘昕. 芳香四溢，飘向“嗅觉经济”新蓝海 [N]. 国际商报, 2023-10-30(002).
- [2] 邱佳佳. 中国传统香文化的传承与应用研究 [J]. 牡丹, 2022(24): 126-128.
- [3] 易佳颖, 林显彤, 袁东颖. 制造“东方香”：国际巨头入局，国产品牌大爆发 [N]. 21世纪经济报道, 2024-02-26(011).
- [4] 董薇, 庞峰, 顾炜江. 基于 LDA 模型的大规模文本挖掘算法研究 [J]. 软件, 2020, 41(12): 58-63.
- [5] 尹健康, 梁筱雨, 刘志. 用户偏好预测模型研究与用户画像标签应用 [J]. 电子技术与软件工程, 2020, (24): 201-202.
- [6] 任俊玲, 杜惠英, 王兴芬. 面向网络零售的感知风险与购买意愿相关性 [J]. 中国流通经济, 2019, 33(07).
- [7] 孙玲. 销售漏斗模型的应用机理 [J]. 企业改革与管理, 2012 (10): 74-75.
- [8] 蔡伟杰, 张晓辉, 朱建秋. 关联规则挖掘综述 [J]. 计算机工程, 2001, 27(5): 31-33.
- [9] 陈广, 陈景武. Logistic 回归分析的判别预测功能及其应用 [J]. 数理医药学杂志, 2007, 20(3): 280-281.
- [10] 陆丽娜, 陈亚萍, 魏恒义, 等. 挖掘关联规则中 Apriori 算法的研究 [J]. 小型微型计算机系统, 2000, 21(9): 940-943.
- [11] 杨梅, 王馨悦. 文化认同视域下的青岛啤酒文创产品开发策略研究 [J]. 设计, 2024, 37(04): 6-9.
- [12] 施治. 大数据背景下企业市场营销策略研究 [J]. 老字号品牌营销, 2023, (23): 23-25.

南京市小区物业服务满意度影响因素及业主需求分析

周莹莹, 高志鹤, 闫雅晴, 赵崇海, 王宁, 刘鹏飞*

江苏师范大学 数学与统计学院, 江苏 徐州 221000

DOI:10.61369/ASDS.2025050002

摘要： 本文聚焦南京市小区物业服务满意度与业主需求研究，旨在寻求提升物业管理服务质量的有效途径，支持物业行业发展。本文通过问卷调查收集了住户基本信息、物业服务满意度、业主需求等内容，根据物业费用由低到高将小区分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ三类，运用结构方程模型揭示三类小区满意度差异：三类小区居民均认为费用管理非常重要，且Ⅰ、Ⅱ类小区居民更关注配套设施，Ⅲ类小区居民重视员工素质。基于 KANO 模型识别出业主需求的三大类型，发现不同收入群体需求存在显著分层特征。最后本文针对三类小区的共性问题 and 个性问题提出差异化改进建议。

关键词： 物业服务满意度；业主需求；结构方程模型；KANO 模型

Factors Influencing Property Service Satisfaction and Resident Demand Analysis in Nanjing Communities

Zhou Yingying, Gao Zhihu, Yan Yaqing, Zhao Chonghai, Wang Ning, Liu Pengfei*

School of Mathematics and Statistics, Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu 221000

Abstract： This paper focuses on the research on property service satisfaction and owners' needs in Nanjing, aiming to seek effective ways to improve the quality of property management services and support the development of the property industry. This paper collects the basic information of residents, satisfaction with property services, and the needs of owners through a questionnaire survey, and divides the communities into three categories according to the property cost from low to high: I., II., III., and the structural equation model is used to reveal the differences in the satisfaction of the three types of communities: the residents of the three types of communities believe that cost management is very important, and the residents of the I. and II communities pay more attention to the supporting facilities, and the residents of the III. communities attach importance to the quality of employees. Based on the KANO model, three types of owners' needs are identified, and it is found that there are significant stratification characteristics in the needs of different income groups. Finally, this paper puts forward differentiated improvement suggestions for the common problems and personality problems of the three types of communities.

Keywords： property service satisfaction; resident demands; structural equation model; KANO model

引言

物业行业的服务管理水平对于提升居民生活质量、维护社区安全和保障房产价值起着重要作用。江苏省物业企业数量目前已超 1 万家，南京市作为江苏省会，是我国东部地区的中心城市，截止 2023 年底，拥有住宅小区 6752 个，物业公司 2597 家。根据江苏省住房和城乡建设厅发布的《江苏省“十四五”物业服务发展规划》，未来 5 年，江苏省将致力于推进 500 项智慧物业项目以促进物业行业的转型升级。然而，物业作为关系基层治理和居民利益的“大民生”，仍面临诸多挑战：职责划分不清导致物业费拖欠、服务不达标、沟通障碍频发；疫情更增加了运营成本与收缴难度，降低了业主满意度^[1]。2024 年初南京明尚西苑重大火灾事故及其暴露的物业安全管理漏洞，以及机制不完善、技能不足、费用不透明等问题，严重制约了行业健康发展。因此，深入研究影响业主满意度的因素，寻求提升服

基金项目：本研究得到 2025 年度江苏省研究生科研创新项目“南京市小区物业服务满意度影响因素及业主需求分析”（KYCX25_3157）、徐州市 2024 年度统计科研重点课题“徐州科技创新与产业结构升级融合发展机制研究”（24TJKY09）、2023 年度国家自然科学基金面上项目（12371266）“潜在变量模型基于中位均值法的统计推断”的资助；以本论文为核心内容的报告曾获第十四届全国大学生市场调查与分析大赛研究生组全国总决赛一等奖。

作者简介：

周莹莹，江苏师范大学数学与统计学院，硕士研究生，研究方向为数理统计；

高志鹤，江苏师范大学数学与统计学院，硕士研究生，研究方向为非参数统计；

闫雅晴，江苏师范大学数学与统计学院，硕士研究生，研究方向为随机问题；

赵崇海，江苏师范大学数学与统计学院，硕士研究生，研究方向为随机数学；

王宁，江苏师范大学数学与统计学院，硕士研究生，研究方向为随机数学及其应用。

通讯作者：刘鹏飞，江苏师范大学数学与统计学院，副教授，硕士生导师，研究方向为非参数统计、统计建模。

务质量的途径,对行业发展至关重要。

顾客满意度研究始于 Cardozo (1965)^[1] 引入营销领域, 美国 Fornell (1989)^[22] 建立了瑞典的顾客满意度指数模型 (Sweden Customer Satisfaction Barometer, SCSB), 随后 Fornell 等 (1966)^[23] 又对 SCSB 进行修正, 提出了美国顾客满意度指数模型 (American Customer Satisfaction Index, ACSI), 强调“感知质量”和“感知价值”的作用。国内单友成等 (2010 年)^[4] 基于 ACSI 模型构建了客户满意度评价指标体系。物业管理研究方面, 张农科 (2012)^[6]、吴小晶 (2020)^[7] 指出行业存在管理系统不完善、认识不足、市场化进程慢等问题。针对物业服务满意度评价, Roar 等 (2017)^[23] 运用多元回归对影响客户忠诚的因素展开研究, 郑珊红 (2016)^[8] 提出了一套物业管理服务质量评价体系, 并用模糊综合评价进行评估, 杨国霞等 (2012)^[9] 以徐州市 37 个普通商品房住宅小区的物业服务为研究对象, 通过熵值法计算各指标权重, 实现了对满意度的定量评价。然而内地近几十年物业行业的服务开发偏重于业主的基础物质层面需求, 对业主的需求结构缺乏本质思考, 叶明婕 (2023)^[10] 基于 KANO 模型对业主需求进行分类, 构建业主需求层次模型对业主需进行分析, 指出必备型需求是最重要的业主需求类型。

综上所述,当代物业管理和顾客满意度研究涵盖了国内外多个层面,其关注点主要围绕着顾客需求、服务质量和满意度评价等方面展开。本文基于应用最为广泛的瑞典顾客满意度指数模型对江苏省南京市的小区物业服务质量和业主需求展开研究。考虑到本文关注居民对物业服务质量的满意程度,侧重于居民的感受,研究对象并非针对某一特定物业公司,因此对此模型进行了调整,舍去了顾客预期和客户忠诚因素。

由此提出物业服务满意度模型研究假设见表 1:

表 1: 物业服务满意度模型研究假设汇总表

编号	研究假设	关系
H1	整体环境→业主满意度	正向关系
H2	配套设施及安全管理→业主满意度	正向关系
H3	员工素质→业主满意度	正向关系
H4	费用管理→业主满意度	正向关系
H5	业主满意度→客户抱怨	负向关系

一、调查方案设计与实施

（一）輿情闡述

为调查社会公众对于物业服务的看法,本文采用词云图进行物业行业舆情阐述,爬取微博上和物业服务相关的评论25356条,提取出关键词信息。在正式调查期间恰巧发生了雨花台区火灾事件,故本文分别爬取了火灾前后的微博评论,处理后有效评论近两万条,将评论文本绘制成词云图(见图1)。

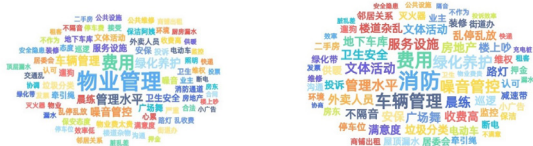


图1: 火灾前后物业服务微博评论词云统计图

图1显示,火灾前“物业管理”“费用”“车辆管理”等是大众讨论的热点词条,火灾后,“消防”一词取代了“物业管理”,但“费用”“车辆管理”等标签依然是大众评论的焦点。

（二）问卷设计

本次问卷调查对象为南京市住宅小区居民。问卷设计基于对居民和物业人员的访谈来初步确定调查问卷的设计方向,根据相关文献^{[14]—[17]}汇总满意度影响因素,并结合 KANO 双维度认知模型要求,从影响因素着手设计问题,旨在探究业主需求及其优先级。问卷设计的主要内容如下:住户基本信息(1-10题),包括

性别、年龄、学历、职业、家庭月收入、物业费费；物业服务满意度（11-24题），从整体环境、配套设施及安全管理、员工素质、费用管理等方面设计问题。业主需求（25-26题）从正反两个方向设计问题，探究业主对物业服务的需求，包括维修保养及时性、宠物管理规范、车辆停放规范等。

(三) 抽样设计

鉴于南京市经济发展的不平衡,调查采用分层抽样和三阶段抽样相结合的概率抽样方法。在三阶段抽样中,首先抽取了市辖区,然后从市辖区中抽取街道,最后从街道中抽取居民进行调查。

首先，将南京市下辖的11个区按照地理位置和功能定位划分为“主城区”和“周边城区”两个主要部分。计划从第一层级（主城区）中选取4个基础抽样单元。同时，依据第一层级和第二层级（周边城区）之间的比例关系，从第二层级中选取3个抽样单元。在这两个层级中，每一层都将独立执行一个三阶段的抽样过程。根据每层初级抽样单元所含街道比例，从主城区抽取17个街道，周边城区抽取13个街道展开调研。第三阶段是要从社区中抽取被访者，为了在有限的时间内获取足够的样本，在街道对居民进行拦截调查。

（四）调查实施

正式调查共发放1740份问卷,有效问卷1583份,其中火灾前的有效问卷324份,火灾后的有效问卷1259份。数据通过了信效度检验。除了后续的总体分析中火灾前后满意度对比外,其他分析均基于火灾后的1259份有效数据进行。

二、物业服务满意度的描述性统计分析

在被调查者中,男性占比53%,女性占比47%;年龄构成中23-35岁和36-59岁在占比分别为35%,42%;居住时长构成中,用户居住半年-5年占46%,5年-10年占比40%,居住10年以上占14%;被调查的人群中国企、行政事业单位人员占比25%,个体工商户从业人员占比21%,且大专/本科学历及以上占比60%,人均月收入在1万-2.5万元占比38%,2.5-4.5万元占比32%。在被调查的小区中,通过外聘物业公司来提供管理服务的小区占比为49%,通过房地产开发公司管理的小区紧随其后,占比18%,通过社区管理和房地产开发公司管理的小区占比相近。

(一) 总体分析

通过将火灾前后发放的问卷数据进行对比(见图2),发现火灾前后公共设施管理与维护满意度占比相差不大;但相比火灾前的数据,火灾后业主在消防通道通畅性和车辆管理方面的满意度有所上升,分别从46%上升到72%以及由42%上升到75%。这场火灾敲醒了人们对于社区消防安全的警钟,业主对消防通道通畅性及非机动车停放的要求更加严苛,物业方采取的相关措施使业主感到满意。

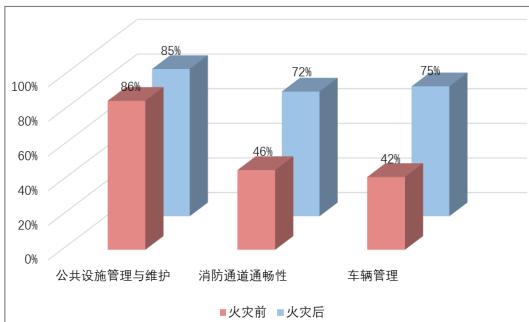


图2：火灾前后相关的物业服务内容满意度对比图

(二) 交叉分析

鉴于费用的差异可能导致满意度不同,因此本文按照这些费用范围将小区分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ三类进行交叉分析,其中,Ⅰ类指的是每月物业费用低于或等于1.2元/平方米的小区,Ⅱ类为每月物业费用在1.2-2.1元/平方米之间的小区,而Ⅲ类则代表每月物业费用高于或等于2.1元/平方米的小区。

1. 女性对车辆管理的评价低于男性

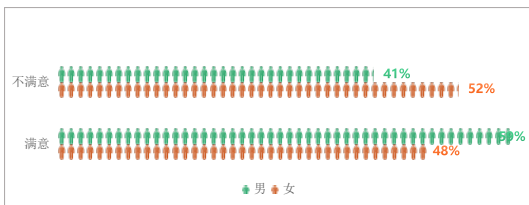


图3：性别与车辆管理交叉分析图

由图3可以看到,整体对车辆管理的评价满意与不满意基本持平,而男性对车辆管理的满意度评价比例略高于女性。具体来说,男性对车辆管理的评价达到满意的占比为59%,女性对车辆管理的满意度评价占比48%,说明女性对于车辆管理的要求较高。

2. Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ三类小区居民都认为物业服务中费用管理最重要

图4表示,对于小区的重要物业服务,费用管理几乎成为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ三类小区居民的首选;Ⅰ类小区居民认为其次重要的是设备维护和文体活动,Ⅱ类小区居民认为其次重要的是车辆管理和环卫保洁,Ⅲ类小区居民认为其次重要的是安保工作和员工素质。

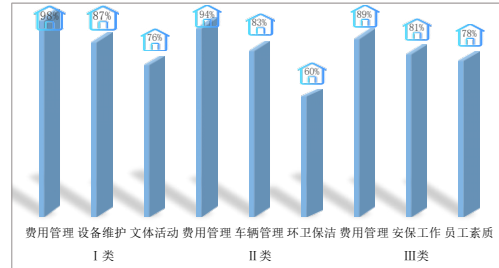


图4：物业服务重要项目分布图

三、模型假设验证——物业服务满意度影响因素分析

(一) 模型构建

本文分别对Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ三类小区的业主满意度影响因素模型进行路径分析。对于Ⅰ类和Ⅱ类小区,仪容仪表、文化活动频率这些可观测变量,初始模型标准化路径系数显著性均高于0.05,对潜变量的影响不显著。因此,本文对模型作进一步的优化。

(二) 模型修正

通过上述分析,删除对潜变量影响不显著的可观测变量,对结构方程模型进行路径优化,修正后的模型整体适配度较为理想。修正后的Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ三类小区的结构方程模型路径图见图5、图6、图7:

由图5-7可知,在Ⅰ类和Ⅱ类小区中,费用管理、配套设施及安全管理、整体环境、员工素质的影响路径排序相同,均为费用管理>配套设施及安全管理>整体环境>员工素质;而Ⅲ类小区则为费用管理>员工素质>配套设施及安全管理>整体环境。

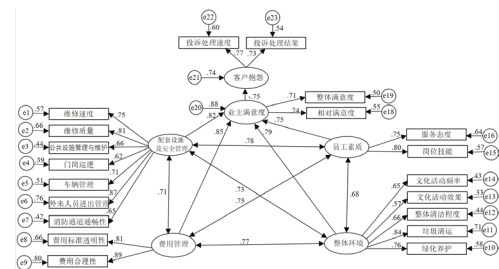


图5：Ⅰ类小区修正后模型标准化路径图

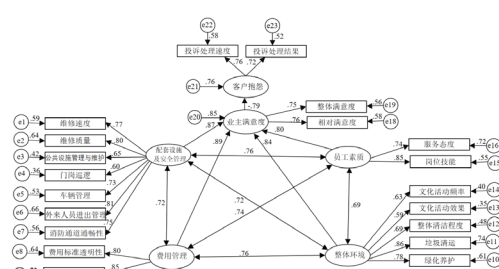


图6：Ⅱ类小区修正后模型标准化路径图

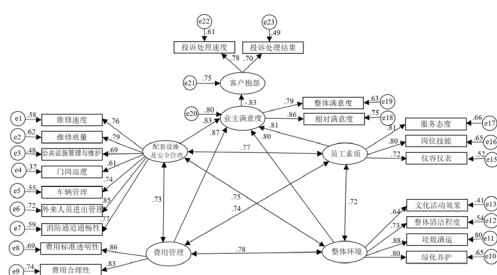


图7：III类小区修正后模型标准化路径图

四、业主需求分析——基于 KANO 模型

考虑到本次调查中获取的II类小区数据较多，因此本文以II类小区为例进行后续分析。KANO模型可以用来确认需求是否存在，明确需求的优先级。针对需求实现程度和用户满意程度的关系，设计KANO问卷，通过正向和反向问题两个方面，将用户需求分为必备型需求（M）、期望型需求（O）、魅力型需求（A）、无差异型需求（I）和逆向型需求（R）五类。

（一）KANO模型评价指标的构建

本文通过查阅资料，借鉴前人经验，选定14个指标作为小区物业的评价指标：R1（物业人员工作态度），R2（宠物管理规范），R3（物业人员仪表），R4（专业技能上岗），R5（车辆人员进出秩序规范），R6（安全巡逻），R7（垃圾清理及时且干净），R8（绿植修剪及时且美观），R9（维修养护及时性），R10（收费合理），R11（车辆停放规范），R12（收费透明），R13（文化活动丰富），R14（投诉处理及时）。

（二）Better-Worse指数分析

为了反映某一需求要素的重要性，本文采用平均满意度（ASC）指标进行满意度排序，计算公式如下：

$$Better(SI) = \frac{A+O}{A+O+M+I} \quad (11)$$

$$Worse(DSI) = \frac{-(M+O)}{A+O+M+I} \quad (12)$$

$$ASC = \frac{|Better| + |Worse|}{2} \quad (13)$$

为了更清晰直观地展现所有需求要素的分布情况，本文采取四象限图分析各需求要素的B-W数值，横坐标表示Worse系数结果的绝对值，纵坐标表示为Better系数，象限图的原点坐标为（0.42，0.44），Better-Worse象限散点图见图8：

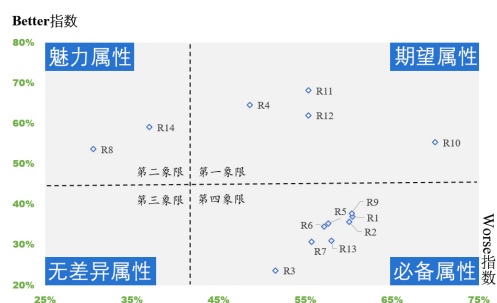


图8：业主需求要素的Better-Worse象限散点图

从图8可以看出，Better系数值高于坐标原点的项目分布是R4专业技能上岗，R8绿植修剪及时且美观，R10收费合理，R11车辆停放规范，R12收费透明，R14投诉处理及时，以上需求对业主满意度提升有显著的作用。

Worse数值的绝对值大于坐标原点的需求是R1物业人员工作态度，R2宠物管理规范，R3物业人员仪表，R4专业技能上岗，R5车辆人员进出秩序规范，R6安全巡逻，R7垃圾清理及时且干净，R9维修养护及时性，R10收费合理，R11车辆停放规范，R12收费透明，R13文化活动丰富；说明这些需求如果被满足，则能够很好地降低业主的不满意度。

（三）基于K-means聚类的人群画像

为进一步分析不同业主对服务需求的差异性，本文选取了问卷中受访者基本信息与KANO问卷指标，对不同业主的不同需求进行K-means聚类分析，以期对有不同需求的业主的特征进行精确分类，划分出“基本满足型”、“期望满足型”和“魅力追求型”三类群体。

表2：II类小区业主聚类结果表

人群类型	基本满足型	期望满足型	魅力追求型
年龄	18-22岁、60岁及以上	23-35岁	36-59岁
学历	本科及以下	本科以上	大专/本科
家庭月收入	2.5万元及以下	4.5万元以上	2.5万-4.5万元
服务指标	收费合理 车辆停放规范 维修养护及时性 物业人员工作态度 宠物管理规范 车辆人员进出秩序规范 安全巡逻 垃圾清理及时且干净	收费透明 专业技能上岗 投诉处理及时 绿植修剪及时且美观	文化活动丰富 物业人员仪表

基本满足型人群，对应必备型需求，他们的年龄主要集中在18-22岁、60岁及以上，学历主要为本科以下，家庭月收入在2.5万元及以下。这类人群主要看重日常生活的基本核心需求。期望满足型人群年龄分布大致在23-35岁，拥有本科以上的学历，家庭月收入集中在4.5万元以上，服务需求以收费透明、专业技能、投诉处理及时以及绿植修剪及时且美观为主。魅力追求型人群年龄在36-59岁，多为大专或者本科毕业，家庭月收入在2.5万元-4.5万元，为社会的重要支柱。这类人群表现出对新颖、独特和超出预期的产品或服务特性的追求和喜好，与文化活动丰富、物业人员仪表的服务内容相匹配。

五、结论及建议

通过前面的一系列分析，结合深度访谈内容，本文对分析结果以及出现这些结果的可能原因进行总结，并对此提出相应建议。

（一）主要结论

1. 共性问题

（1）火灾发生后，业主在消防通道通畅性和车辆管理方面的满意度有所上升。雨花台区的火灾敲醒了人们对于社区消防安全的警钟，促使物业加强消防设施检查维护，并实施更严格的车辆管理措施，以满足业主对安全性的更高要求。

(2) 男性和女性对车辆管理的满意度有显著差异,女性对车辆管理满意度较低。本次调查中,男性的满意度占比59%,女性比男性略低,为48%。访谈发现车辆乱停,尤其占用消防通道是普遍且顽固的管理难题。

(3) 费用管理是三类小区业主公认的满意度最重要影响因素,但侧重点不同。I、II类小区更关注费用合理性,而III类小区更重视费用标准透明性,III类小区可能属于高端社区,居民普遍收入高,因此更关注服务专业性和品质,愿意为更好的服务付费。

2. 个性问题

(1) 结构方程模型结果显示,除费用管理外,I类小区业主满意度受配套设施及安全管理影响显著。配套设施不足和管理责任不明是主要问题,受限于物业费用且老年居民较多,对文化娱乐场所等改善需求迫切。

(2) KANO 模型分析结果显示,II类小区的业主对物业收费合理这一需求更大;结构方程模型显示,II类小区中费用管理对业主满意度影响因素最大,且费用管理的影响因素中费用合理性>费用标准透明性,这两种模型的分析结果相一致。

(3) III类小区业主满意度受员工素质影响较大。业主重视安保和员工素质,然而物业存在员工效率低、态度差问题,且缺乏相应培训与监督投入,从而影响到居民的满意度。

(二) 建议

1. 针对三类小区的共同建议

(1) 设立车辆管理员岗位,夜间增加巡逻频率,防患于未“燃”。在火灾事件发生后,物业通过增加巡查频率等措施进行了

整改,并且业主的满意度有所上升。这表明,加强巡查频率等安全管理措施是有效的改进举措之一。物业可以设立车辆管理员,增加夜间巡逻,全面排查杂物堆放与违规充电;安装电梯阻车系统,并推行电动车免费停放,杜绝入户充电。

(2) 提升费用透明度与业主参与度。在物业办公室、单元门口等高流量区域,通过公示栏、电子屏等定期公示所有收费项目、标准及收支;组织业主代表参与费用审计与监督,他们的参与能够提高费用决策的公正性和合理性。

(3) 建立高效、标准的投诉响应机制。设立明确的投诉反馈处理时间标准,20分钟内响应业主,30分钟内解决一般问题,给予业主答复,不能立即解决的问题在一定时间内协调资源解决,重大问题给予书面解决方案。提供多种投诉反馈渠道,并通过工单响应率、合格率等指标考核处理质量。

2. 分别对 I、II、III 三类小区的建议

(1) I、II类小区要整合停车资源,优化内部管理。拓展外部资源,和周边停车场、附近单位或商户协商,共享其停车资源,成立停车管理委员会规划监督;优化内部非机动车停放充电管理,了解居民对充电桩需求的具体情况和位置偏好,公示充电桩的位置、收费标准、维护保养等信息。

(2) II类小区可以对不同特征的业主提供差异化服务提升体验。提供基础便民服务,完善生态绿化,引入生态元素,规范员工着装规范,举办多元文化活动等措施满足不同类型业主需求。

(3) III类小区可以通过建立导师制度、知识库和学习平台等方式提高员工的素质。实施系统培训与交叉学习;建立导师带教制度;搭建内部知识库与学习平台促进经验分享。

参考文献

- [1] 中房网. 2023 房地产企业客户满意度研究成果发布. [EB/OL] (2023-12-27)[2024-05-01]. <http://www.fangchan.com/news/132/2023-12-27/7145324154181718570.html>.
- [2] 袁爱萍. 疫情下中小物业的生存困境分析 [J]. 上海房地, 2021, (04): 26-29.
- [3] (美) 波特, 著. 竞争战略 [M]. 北京: 中信出版社, 2014.
- [4] 单友成, 李敏强, 赵红. 面向客户关系管理的客户满意度指数模型及测评体系 [J]. 天津大学学报 (社会科学版), 2010, 12(02): 119-24.
- [5] 国务院. 物业管理条例. [EB/OL] (2019-12-31)[2024-05-01]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2019/content_5468878.htm.
- [6] 张农科. 关于我国物业管理模式的反思与再造 [J]. 城市问题, 2020, (5): 2-14.
- [7] 吴小晶. 物业管理行业如何提升提升服务质量 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2020, 40: 99-100.
- [8] 郑珊红. 物业管理企业服务质量评价体系建设及应用效果 [J]. 价值工程, 2016, 35(32): 19-21.
- [9] 杨国霞, 沈山. 城市住宅小区物业服务满意度评价——以徐州市为例 [J]. 开发研究, 2012(1): 156-160.
- [10] 叶明婕. 商品房小区物业服务提升路径研究 [D]. 南昌大学, 2024.
- [11] 李金. 论业主需求管理 [J]. 现代物业, 2004(12): 58-60.
- [12] 周经建. 科技型中小企业成长问卷设计 [D]. 南京大学, 2020.
- [13] 马德超. 物业服务对业主满意度的影响研究 [D]. 东北师范大学, 2021.
- [14] 霍映宝. 基于 SERVQUAL 的物业管理服务质量评价研究 [J]. 南京财经大学学报, 2010(02): 81-83.
- [15] 廖坤仪. 广州市物业管理服务质量评价体系的构建与分析 [D]. 广州: 华南理工大学硕士学位论文, 2013.
- [16] 朱姣兰. 珠海市住宅小区物业管理服务质量调查研究 [J]. 价值工程, 2014 (11): 75-77.
- [17] 廖奇云, 胡沙沙. 住宅小区物业管理服务质量评价体系研究——以重庆为例 [J]. 建筑经济, 2017, 38 (6): 76-82.
- [18] 徐云杰. 社会调查设计与数据分析 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2011.
- [19] 刘德耀. Y.T 物业公司服务满意度评价及提升策略研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.
- [20] 焦爱英, 贾童, 屈小翠. 基于结构方程模型的物业服务满意度测评研究——以天津市某住宅小区为例 [J]. 城市住宅, 2019, 26(12): 66-6.
- [21] Cardozo RN. An experimental study of customer effort, expectation, and satisfaction[J]. Journal of marketing research, 1965, 2(3): 244-249.
- [22] Fornell C, Rust R T. Incorporating prior theory in covariance structure analysis: A bayesian approach[J]. Psychometrika, 1989, 54(2): 249-259.
- [23] Claes Fornell, Michael D. Johnson, Eugene W. Anderson, et al. The American Customer Satisfaction Index: Nature, Purpose, and Findings. 1996, 60(4):7-18.
- [24] Juznik Rotar L, Kozar M. The use of the Kano model to enhance customer satisfaction[J]. Organizacija, 2017, 50(4): 339-351.
- [25] YANG C C. The refined Kano's model and its application[J]. Total quality management & business excellence, 2005, 16 (10) : 1127-1137.

新能源车企激战：价格战漩涡下广东消费者购车决策的多维重塑

张旌旆^{1*}, 张雪莹²

1. 深圳大学 人工智能学院, 广东 深圳 518000

2. 郑州大学 新闻与传播学院, 河南 郑州 450000

DOI:10.61369/ASDS.2025050003

摘要： 在全球能源转型与产业变革背景下，新能源汽车市场竞争格局因价格战加速重构。中国作为全球最大新能源市场，2024年产销量突破千万辆，广东省以占全国26.8%的产量和领先的研发能力，成为产业生态核心区。然而，价格战引发的市场震荡导致消费者决策复杂性显著升级。基于此，本研究以广东省消费者为研究对象，聚焦价格策略对消费者决策的多维影响，融合UTAUT2理论、机器学习算法与多源数据，构建“消费者认知—行为—政策”三维分析框架。在网络评论调查上，跨平台抓取广东常住人口关于新能源汽车的评论数据，通过基于Word2Vec的双向LSTM模型情感分类法、语义网络分析法，对广东常住人口关于新能源汽车的评论数据进行分析，并以此为据，为问卷和访谈设计提供参考。在问卷设计上，基于UTAUT2模型扩展，构建多维变量量表，通过11项假设验证各维度对新能源汽车购买行为的正向影响路径、购买意愿的中介作用及驾驶经验、性别、年龄、是否有车的调节效应。在抽样方案设计上，采用三阶段PPS抽样调查的方法。正式调查中，以问卷调查为主，辅以访谈调查、实地调查等的方式。最终回收问卷1276份，其中1106份有效样本，样本有效率86.68%。在数据分析部分，首先，通过描述性统计了解广东省常住人口的新能源汽车认知现状。其次，针对消费者购买前的决策过程，构建结构方程（SEM）模型，对广东省常住人口新能源汽车购买决策影响因素进行探究；采用SHAP量化调节变量对购买决策的影响强度；对尚未购买与已经购买新能源汽车的两类消费者，利用K-Prototypes聚类方法对其进行分类。最后，利用模糊综合评价法分析新能源汽车消费者关注的核心需求及影响情况，进一步采用XGBoost预测用户购买概率，为车企提供优化的价格策略。调查结果显示：（1）消费者认知呈现显著分化。（2）消费者购车决策由多维因子驱动。（3）用户分层揭示差异化需求。（4）配套设施与用户体验是市场拓展的关键支撑。综上，本论文提出以下建议：（1）破解价值感知断层，建立透明化决策体系。（2）技术理性与情感体验的双向赋能，打造“技术易用度—情感愉悦度”双轴驱动的新型交互生态。（3）从用户分层到生态化场景重构，以精准金融方案与跨界生态打破传统竞争边界。（4）基础设施与区域文化的协同进化，打造技术普惠与人文关怀交织的基础设施网络。新能源汽车产业的突围之战，本质是工业时代规模逻辑与数字时代价值逻辑的范式碰撞。通过认知重构打通价值共识、技术赋能激活体验革命、生态协同重塑产业边界，方能将价格敏感性转化为价值共生的战略支点，为全国市场提供“技术降本—体验增值—生态共创”的广东示范。

关键词： 新能源汽车；购买行为；K-Prototypes 聚类算法；结构方程模型；XGBoost 算法

Fierce Competition in the New Energy Vehicle Market: How Price Wars Are Reshaping Consumer Decisions in Guangdong

Zhang Jingpei^{1*}, Zhang Xueying²

1. School of Artificial Intelligence, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518000

2. School of Journalism and Communication, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450000

Abstract: In the context of global energy transition and industrial transformation, the competitive landscape of the new energy vehicle (NEV) market is being rapidly reshaped by intensifying price wars. As the world's largest NEV market, China surpassed 10 million units in production and sales in 2024, with Guangdong Province contributing 26.8% of the national output and excelling in research and development (R&D) capabilities, establishing itself as a pivotal hub within the industrial ecosystem. However, the market turbulence induced by price wars has significantly heightened the complexity of consumer decision-making. This study targets consumers in Guangdong Province, investigating the multidimensional impacts of pricing strategies on their decision-making processes. By integrating the Unified Theory of Acceptance and Use of Technology 2 (UTAUT2), machine learning algorithms,

作者简介：

张雪莹，郑州大学新闻与传播学院，硕士研究生，研究方向为区块链游戏。

通讯作者：张旌旆，深圳大学人工智能学院，硕士研究生，研究方向为大数据智能与数字经济、游戏化、潮玩众筹。

and multi-source data, a three-dimensional analytical framework— “Consumer Cognition–Behavior–Policy” —is developed. For the online review survey, comments on NEVs from Guangdong residents were collected across platforms and analyzed using a bidirectional LSTM model based on Word2Vec for sentiment classification and semantic network analysis. These findings informed the design of subsequent questionnaires and interviews. The questionnaire, extended from the UTAUT2 framework, incorporated multidimensional variables and tested 11 hypotheses to confirm the positive influence of various dimensions on NEV purchasing behavior, the mediating role of purchase intention, and the moderating effects of driving experience, gender, age, and vehicle ownership. A three-stage Probability Proportional to Size (PPS) sampling method was employed for the survey. The formal investigation primarily utilized questionnaires, complemented by interviews and field studies, yielding 1,276 responses, of which 1,106 were valid (86.68% validity rate). Data analysis commenced with descriptive statistics to assess NEV awareness among Guangdong residents. Subsequently, a Structural Equation Model (SEM) was constructed to explore the factors influencing NEV purchase decisions. SHAP values were applied to quantify the impact of moderating variables, while K-Prototypes clustering classified consumers into those who had and had not purchased NEVs. Finally, the Fuzzy Comprehensive Evaluation Method identified core consumer concerns, and the XGBoost algorithm predicted purchase probabilities to provide automakers with optimized pricing strategies. The findings reveal: (1) significant divergence in consumer cognition; (2) multifaceted drivers of purchase decisions; (3) distinct user segments with differentiated needs; and (4) the critical role of infrastructure and user experience in market expansion. Based on these insights, the study proposes the following recommendations: (1) addressing value perception gaps through transparent decision-making systems; (2) dual empowerment of technical rationality and emotional experience to create a “ease of use–emotional delight” interaction ecosystem; (3) transitioning from user segmentation to ecosystem scenario reconstruction, leveraging precise financial solutions and cross-industry ecosystems to transcend traditional competitive boundaries; and (4) synergistic development of infrastructure and regional culture to build a network intertwining technological inclusivity and humanistic care. The NEV industry’ s breakthrough hinges on navigating the paradigm clash between industrial-era scale logic and digital-era value logic. By reconstructing cognition to align on value, empowering technology to revolutionize experiences, and fostering ecological synergy to redefine industry boundaries, price sensitivity can be transformed into a strategic pivot for value co-creation, offering a “cost reduction–experience enhancement–ecosystem co-creation” model for the national market, exemplified by Guangdong.

Keywords : new energy vehicles; purchase behavior; K-Prototypes clustering algorithm; structural equation modeling; XGBoost algorithm

引言

在能源转型与技术革命驱动下，新能源汽车产业迎来结构性变革。据 IEA 统计，2023 年全球新能源汽车销量达 1400 万辆，中欧美市场占比 95%^[1]；TrendForce 数据显示，2024 年新能源汽车销量增至 1,629 万辆，年增 25%^[2]。中国作为全球最大市场，2024 年产销突破千万辆^[3]，全球销量占比持续攀升。2023 年初特斯拉全球降价引发行业价格战，加速市场格局重构与技术成本竞争。广东省以全国 26.8% 的新能源汽车产量（2023 年）、专利申请量首位的研发优势形成核心产业生态。其中，深圳贡献超 50% 的省内专利量，区域集聚效应协同市场化创新机制，持续推动产业升级。

新能源汽车市场竞争格局在价格战催化下加速重构，消费者决策体系呈现出多维度博弈的复杂态势。价格梯度超阈值时部分用户转向高性价比选项，而蔚来、理想等品牌高忠诚客群印证情感联结对价格冲击的缓冲效应；政策工具差异化加剧跨区域决策成本；技术成熟度与设施

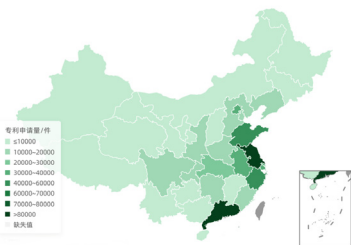


图 1：2023 年中国各省份新能源汽车专利申请量

布局持续影响消费偏好。

基于此，本研究聚焦新能源汽车价格战背景下的消费者决策机制，以广东省为样本区域，通过整合 UTAUT2 理论模型与多维度算法，系统解析价格敏感度、技术信任等核心变量对消费者购买行为的非线性影响路径。为车企制定差异化竞争策略及政府优化政策工具箱提供数据驱动的决策支持。

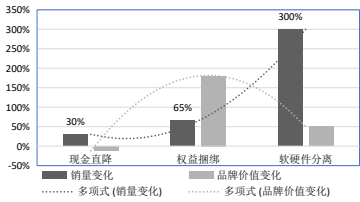


图 2：不同车企的价格策略^[4]

一、文献综述

UTAUT2 作为 UTAUT 的理论扩展^[5]，目的是提供一个综合性的理论框架，解释和预测个体接受和使用新技术的过程^[6]，整合绩效期望、努力期望、社会影响、便利条件、享乐动机、价格价值及习惯七维变量。研究选择 UTAUT2 理论，因其契合新能源汽车消费场景中技术效用与情感的交织特性。通过 UTAUT2 理论的动态观测，可系统解构价格战下的决策异质性，揭示市场演变中消费理性与感性的张力平衡机制^[7]。

然而，UTAUT2 的宽泛预测框架需结合情境化约束变量的深度刻画。对此，Ajzen 提出的计划行为理论（TPB）通过“态度－主观规范－感知行为控制”三元结构^[8]，为本研究补足了消费者行为意向与使用行为的临界分析视角。在新能源汽车领域，价格敏感决策不仅取决于技术效用评估，更受限於环境可控性感知，如充电桩覆盖率不足可能抑制低价策略的刺激效果，而社会从众压力可能加速价格共识的形成^[9]。此外，王建明（2013）在资源节约行为中的主效应验证表明，意向行为的转化需跨越实际控制门槛^[10]。在广东等高政策干预市场，这一阈值效应尤为显著，消费者对补贴退坡的耐受度、社区充电基建的适配性（PBC）共同构成价格策略落地的缓冲带，而 UTAUT2 中“价格价值”变量与此的耦合，恰恰映射了市场格局演化中“技术红利－心理承载力”的此消彼长。

因此，UTAUT2 与计划行为理论的耦合架构，为解析新能源汽车消费的决策张力提供了多维穿透力，UTAUT2 通过“技术效能－情感体验－价格博弈”的变量链，剖解消费者在价格战中的理性选择与感性偏好共存特征；而计划行为理论则锚定政策与基建约束下的心理控制阈值，揭示意向向行为转化的临界阻力。二者的协同能够突破单一理论在解释复杂场景时的局限性。

二、研究方案设计与实施

（一）研究方案设计

本研究旨在解构价格策略对消费者决策的核心影响维度，揭示市场格局重构趋势与车企竞争逻辑，深入分析消费者特征与购车行为之间的联系，构建消费者－企业－政策三维决策建议模型。研究通过 11 部分结构化问卷系统调研广东新能源汽车消费行为。研究聚焦广东省，以全省常住居民为调查单位，重点观测新

能源车企多维价格策略。通过解析消费者决策行为，为车企优化“市场驱动”阶段的差异化定价提供数据支撑。在抽样方式上，本项目主要采用三阶段 PPS 抽样调查，首阶段以广东省区域人口比例分层抽取广东 9 市；次阶段使用 Excel 中的 rand 函数，按照城市人口权重抽取 32 个区县；末阶段通过线上线下随机拦截与配额调整。在信息采集方式上，项目组主要采用网络调查法，辅以文献调查法等方法。研究按 85% 有效率计算，需回收 1265 份有效问卷，实际发放问卷 1276 份。本研究问卷设计详情见下表。

表 1：变量测量汇总表

变量	题项描述	参考文献
努力期望	我与新能源汽车的交互将清晰易懂	(Celik, 2016 ^[11] ; Venkatesh et al., 2012 ^[5] ; 李梦涵, 2023 ^[12])
	我很容易熟练使用新能源汽车的各种功能	
	我发现新能源汽车易于驾驶和操作	
	对我来说，新能源汽车的操作流程很容易掌握	
社会影响	对我很重要的人认为我应该购买新能源汽车	
	影响我购车决策的人认为我应该购买新能源汽车	
	我所重视意见的人希望我购买新能源汽车	
	我身边的同龄人都在购买或使用新能源汽车	
便利条件	以目前的知识水平，我能够轻松了解新能源汽车的相关信息	
	在购买和使用新能源汽车过程中遇到问题时，很容易获得外界帮助	
	新能源汽车的充电桩等基础设施配套很齐全	
	新能源汽车的售后服务网络很完善	
享乐动机	驾驶新能源汽车很有趣	
	使用新能源汽车令人愉快	
	新能源汽车可以为我带来新的体验和乐趣	
价值价格	我认为新能源汽车的性价比更高	
	我认为新能源汽车的品质和性能较好	
	我认为新能源汽车的使用成本更低	
购买意愿	我愿意尝试购买新能源汽车	
	我愿意继续购买新能源汽车作为我的下一辆车	
	我愿意向身边的亲友推荐购买新能源汽车	
购买行为	我会考虑购买新能源汽车作为我的下一辆车	
	我会经常关注新能源汽车的相关信息和动态	
	我会推荐给身边的亲友购买新能源汽车	

（二）研究方案实施过程

针对新能源车市场供需研究失衡现状，本研究基于 UTAUT2 模型对 20 名消费者进行扎根理论分析，发现“价格价值”与“便利条件”取代传统变量“绩效期望”与“习惯”，凸显消费者对长期成本与技术可靠性的核心关注。通过引入驾驶经验、性别、年龄、是否有车四维调节变量，揭示价格战背景下消费决策机

制，重构理论模型填补需求侧研究空白，为动态市场中的消费行为研究提供新视角。

本项目预调查阶段发放问卷55份，回收有效问卷50份，信效度均表现良好。在正式调查中，共收集到1276份问卷，经过严格的数据筛选和审核，最终保留了1106份有效问卷，有效率为86.68%。

本研究通过线上样本筛选、线下样本审核、样本代表性检查进行数据筛选。

信度检验中整体 Cronbach’s α 系数为 0.927，表明问卷内部一致性高，测量结果稳定可靠。

表 2：正式调查各变量的 Cronbach’s α 系数

变量名称	对应项	Cronbach’s α	标准差 Cronbach’s α	项数
整体量表	——	0.927	0.925	24
努力预期	Q26_1-4	0.865	0.816	4
社会影响	Q27_1-4	0.882	0.837	4
便利条件	Q28_1-4	0.847	0.784	4
享乐动机	Q29_1-3	0.835	0.789	3
价值价格	Q30_1-3	0.871	0.794	3
购买意图	Q31_1-3	0.910	0.722	3
购买行为	Q32_1-3	0.895	0.750	3

6名专家评审显示内容效度指数 I-CVI 0.82、S-CVI 0.86、Kappa 值 0.76；结构效度检验显示，问卷数据适配因子分析（KMO=0.896；Bartlett 检验 $\chi^2=7609.54$, $p<0.001$ ）。主成分分析提取 7 个特征值 >1 的因子，累积解释方差 82.34%，经旋转后各变量在对应因子上载荷显著（0.7），因子结构区分度良好，有效支撑理论构想。

表 3：正式调查各变量的效度检验情况

变量名称	对应项	KMO 值	Bartlett 球形度检验 p 值	项数
整体量表	——	0.896	0.000	24
努力预期	Q26_1-4	0.823	0.000	4
社会影响	Q27_1-4	0.753	0.000	4
便利条件	Q28_1-4	0.818	0.000	4
享乐动机	Q29_1-3	0.837	0.000	3
价值价格	Q30_1-3	0.818	0.000	3
购买意图	Q31_1-3	0.791	0.000	3
购买行为	Q32_1-3	0.767	0.000	3

三、广东消费者对于新能源汽车行业价格策略的舆情特征分析与认知现状

（一）新能源汽车车企价格策略与模式的网络评论分析

本研究通过跨平台采集 28,645 条主流平台广东新能源汽车用户评论（含跨平台去重后数据），采用 Python 的 SnowNLP 与 Jieba 库对数据进行清洗和情感分析；同时，项目严格遵守伦理合

规要求，仅输出聚合分析结果。

本文随机从数据清洗后的 25,371 条评论数据中选择 2000 条评论进行手工数据标注作为训练集，双向 LSTM 模型使用 Batchsize=25 的 AdaGrad 优化算法，学习率初始化为 0.01。借鉴唐大力^[13]、孔繁钰^[14]等人研究中的三态情感划分框架，最终得到情感分类结果图 3 所示。数据可视化显示广东居民对新能源汽车态度，52.8% 用户持积极态度（认可技术迭代与政策红利），28.6% 中性（聚焦配套设施），18.6% 消极（续航焦虑与保值率问题主导），量化消费信心差异。

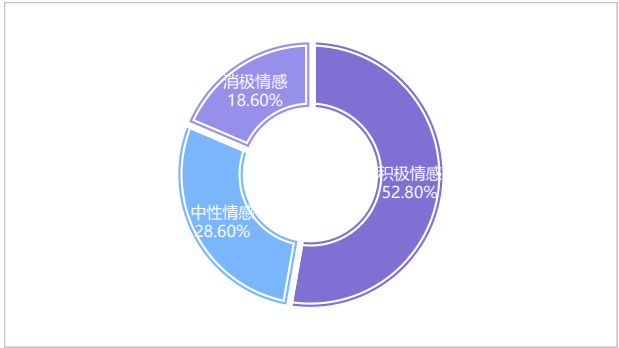


图 3：情感分析结果

基于 Python 数据可视化库，对广东新能源车评论文本进行分词及高频词分析，构建共现词网络解析消费者关注焦点与情感关联，通过语义网络图揭示核心议题的交互关系。如图 4 所示，在红色系价格策略维度中，消费者最关注价格战、补贴政策与性价比，但电池成本与保值率仍是决策关键，区域差价与权益缩水可能削弱市场信任。蓝色系产品性能层面聚焦续航焦虑、智能驾驶与充电效率，电池安全与冬季性能缺陷引发担忧，而 800V 高压平台、激光雷达等新技术持续提升竞争力，车机系统迭代与远程升级功能优化了用户体验。紫色系品牌认知格局呈现头部效应，特斯拉、比亚迪等新势力品牌占据主导，华为技术赋能加速行业洗牌，直销模式与代工生产重塑销售渠道，跨界造车与供应链本土化成为转型核心方向。橙色系消费心理层面，跟风购买、科技溢价与社交属性构成主要驱动力，尝鲜心理与国潮认同显著影响选择偏好，女性决策权提升与社群口碑传播改变传统决策路径，试驾体验与参数对比凸显用户对产品性能的务实考量。绿色系地域特征上，广东新能源汽车市场受充电基建、峰谷电价、气候适应性及粤牌政策影响，跨城需求与区域竞争加剧复杂性，推动车企强化本地化产品设计与港澳认证适配，以定制策略应对政策与需求差异。

新能源车决策语义网络图（径向聚类版）

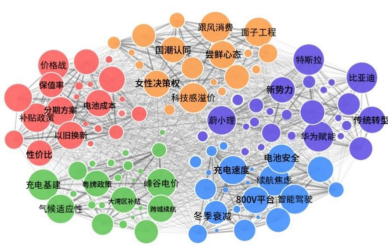


图 4：网络评论语义网络示意图

（二）基本信息与认知现状描述性统计

本项目 1106 份有效样本的基本信息与认知现状描述性统计见下表。

表 4：基本信息与认知现状描述性统计表

统计项	类别	频数	百分比
性别	男	656	59.31%
	女	450	40.69%
年龄	18-25 岁	480	43.40%
	26-30 岁	298	26.94%
	31-35 岁	178	16.09%
	36-45 岁	96	8.68%
	46 岁及以上	54	4.88%
家庭收入	5000 元以下	312	28.21%
	5000-10000 元	282	25.50%
	10001-15000 元	192	17.36%
	15001-20000 元	126	11.39%
	20001-25000 元	120	10.85%
	25000 元以上	74	6.69%
职业	企业普通职员	392	35.44%
	自由职业者 / 个体户	240	21.70%
	企业管理人员	224	20.25%
	学生	82	7.41%
	党政机关 / 事业单位工作人员	70	6.33%
	教育 / 卫生 / 科研从业人员	52	4.70%
	农民	38	3.44%
	其他	8	0.72%
是否购车	是	906	81.92%
	否	200	18.08%
驾龄	不到 1 年	408	36.89%
	1-3 年（不含 3 年）	308	27.85%
	3-5 年（不含 5 年）	228	20.61%
	5-10 年（不含 10 年）	102	9.22%
	10 年及以上	60	5.42%
了解程度	比较了解	628	56.78%
	一般	244	22.06%
	非常了解	170	15.37%
	了解较少	54	4.88%
	完全不了解	10	0.90%

四、新能源汽车消费者购买意愿与行为的影响研究——基于 SEM-SHAP 的分析

（一）基于 SEM 的新能源汽车购买意愿和行为影响因素分析

本研究基于 UTAUT2 模型构建结构方程，系统分析努力期望、社会影响、便利条件、享乐动机、价值价格自变量对新能源汽车购买行为的作用路径，揭示购买意图的中介效应及性别、年龄、驾龄、有车状态等调节变量的差异化影响机制，为新能源车市场细分策略与精准营销提供理论支撑。

1. 因子提取

主成分分析提取 7 个因子，累积方差解释率 85.36%。经最大方差旋转法（varimax）处理后，各题项因子载荷显著，与预设维度一致，验证模型结构效度良好。

表 5：各变量的因子提取情况

因子编号	特征根	旋转前方差解释率		旋转后方差解释率	
		方差解释率 %	累积 %	方差解释率 %	累积 %
1	4.25	12.88	12.88	10.56	10.56
2	3.87	11.73	24.61	9.85	20.41
3	3.26	9.88	34.49	9.23	29.64
4	2.95	13.94	48.43	18.67	48.31
5	2.68	8.12	56.55	8.02	56.33
6	2.34	7.09	63.64	12.05	63.38
7	2.01	16.02	79.66	16.98	85.36

2. 变量解释与假设确定

本研究基于 UTAUT2 模型构建理论框架，探索努力预期、社会影响、便利条件、享乐动机、价值价格对购买意图及行为的作用机制，其中购买意图作为中介变量串联决策链。模型同时引入性别、年龄、驾龄、有车状态作为调节变量，揭示不同群体在价格竞争中的差异化决策路径，为市场细分与精准营销提供理论依据。购买意愿由努力期望、社会影响等多维变量驱动，新能源车价格战中各因素交互作用，满意度提升显著增强购车行为。购买行为由购车意图与政策、基建等外部因素驱动，新能源车市场中供应稳定与政策支持促升转化率，体现环境与个体的双重塑造^[12]。

基于此，提出以下假设：

- H1：努力预期对购买意愿具有显著正向影响
- H2：社会影响对购买意愿具有显著正向影响
- H3：便利条件对购买意愿具有显著正向影响
- H4：便利条件对购买行为具有显著正向影响
- H5：享乐动机对购买意愿具有显著正向影响
- H6：价值价格对购买意愿具有显著正向影响
- H7：购买意愿对购买行为具有显著正向影响
- H8：性别对努力预期与购买意图的关系具有调节作用
- H9：年龄对社会影响与购买意图的关系具有调节作用
- H10：驾驶经验对便利条件与购买意图的关系具有调节作用
- H11：是否有车对价值价格与购买意图的关系具有调节作用

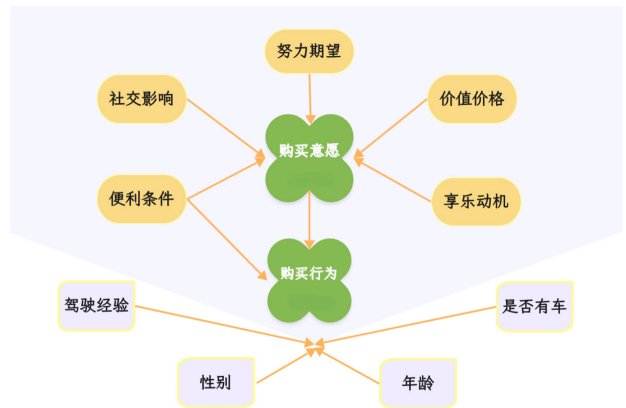


图 5：理论模型图

3. 模型适配度检验

验证性因子分析显示模型适配良好（CMIN/DF=1.85，GFI=0.86>0.8，RMSEA=0.075<0.1）。收敛效度（AVE）与组合信度（CR）检验（AVE：努力期望 0.68、社会影响 0.65；

CR：努力期望0.85、社会影响0.83）表明量表题项在对应维度上因子载荷达标，内部一致性及聚合效度优良，测量工具有效反映理论构建，为模型验证提供可靠数据支撑。模型整体适配度检验（CMIN/DF=1.78, GFI=0.88, RMSEA=0.07, CFI=0.90, NFI=0.93）验证模型能有效解释新能源车购买决策的影响机制。路径检验证实努力期望（ $\beta=0.52$ ）社会影响（ $\beta=0.38^*$ ）、享乐动机（ $\beta=0.41$ ）价值价格（ $\beta=0.45$ ）显著驱动购买意愿，其中价值价格与技术易用性作用最强；购买意图对实际行为解释力达0.62***。性别（男性 $\beta=0.18^*/$ 女性 $\beta=0.15^*$ ）与年龄（青年 $\beta=0.22^{**}/$ 年长者 $\beta=0.19^*$ ）调节效应显著。模型整体解释力 $R^2=0.71$ ，验证 UTAUT2 框架适用性。

表 6：模型路径检验

路径	Estimate	S.E.	C.R.	P
努力预期→购买意愿	0.52	0.11	4.73	**($P<0.01$)
社会影响→购买意愿	0.38	0.13	2.92	*($P<0.05$)
便利条件→购买意愿	0.25	0.12	2.08	*($P<0.05$)
便利条件→购买行为	0.26	0.13	2053	*($P<0.05$)
享乐动机→购买意愿	0.41	0.10	4.10	**($P<0.01$)
价值价格→购买意愿	0.45	0.11	4.09	**($P<0.01$)
购买意图→购买行为	0.62	0.08	7.75	***($P<0.001$)

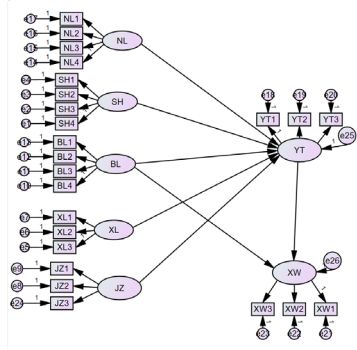


图 6：基于 UTAUT2 理论的广东消费者新能源汽车购买决策 SEM 分析模型图

分组回归分析检验性别、年龄、驾龄、有车状态的调节效应，结果如下表所示。

表 7：调节效应分析

调节变量	分组	路径	Estimate	S.E.	C.R.	P
性别	男性	努力预期→购买意愿	0.60	0.10	6.00	**($P<0.01$)
性别	女性	努力预期→购买意愿	0.45	0.12	3.75	**($P<0.01$)
年龄	18 - 25 岁	社会影响→购买意愿	0.45	0.14	3.21	**($P<0.01$)
年龄	26 - 30 岁	社会影响→购买意愿	0.45	0.14	4.31	**($P<0.01$)
年龄	31 - 35 岁	社会影响→购买意愿	0.30	0.13	2.41	*($P<0.05$)
年龄	36 - 45 岁	社会影响→购买意愿	0.30	0.13	2.31	*($P<0.05$)
年龄	46 岁及以上	社会影响→购买意愿	0.40	0.15	1.43	ns($P>0.05$)
驾驶经验	有	便利条件→购买意愿	0.32	0.12	2.67	**($P<0.01$)

驾驶经验	无	便利条件→购买意愿	0.18	0.13	1.38	ns($P>0.05$)
是否有车	是	价值价格→购买意愿	0.50	0.14	2.96	**($P<0.01$)
是否有车	无	价值价格→购买意愿	0.30	0.10	1.28	**($P>0.05$)

（二）基于 SHAP 量化调节变量对购买决策的影响强度

用户运营中，拉新与复购策略差异需基于 SHAP 分析量化购买决策影响因素。根据问卷数据进行 SHAP 预测得到的调节变量里各变量对购买决策的影响占比情况如下图。

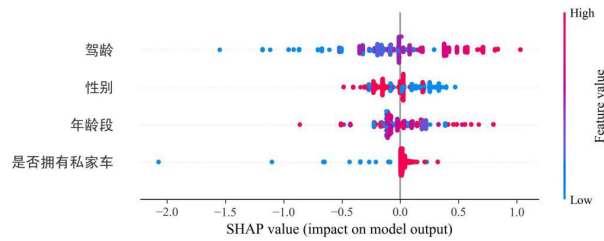


图 7：调节变量对购买决策的影响强度

基于 SHAP 分析，驾龄与年龄段显著影响预测结果，低驾龄呈负向贡献而高驾龄正向贡献，年龄段 SHAP 值分布反映用户生命周期动态影响。性别特征贡献趋近零轴且差异微弱，私家车特征 SHAP 值集中于负区但调节幅度有限，两者贡献度揭示模型对外生变量具有选择性敏感特性。

五、新能源汽车消费群体画像分析

针对问卷数据，本项目采用 K-prototypes 聚类算法，选取性别、年龄、家庭月平均收入、对新能源车了解程度等维度，以及是否购买过新能源车为依据将样本分为两组，分别分析新能源汽车消费者与潜在消费者的群体特征^[15]。人群分布较为均匀，整体说明聚类效果良好。

未购车用户 3 类群体占比分别是 45.0%，35.0%，20.0%。聚类揭示三大关键壁垒：31-35 岁男性职员的技术信任危机、同龄女性管理者的续航与设计需求断层、26-30 岁女学生的经济约束。需针对性实施技术透明化、场景定制车型、学生金融补贴破解困局。



图 8：未购买过新能源汽车的人群画像

购买过新能源汽车的 3 类群体占比分别是 42.6%，29.4%，28.0%。整体来看，3 类人群分布较为均匀，说明聚类效果较好。

新能源汽车未购车群体可归纳为三类典型用户：26-30岁企业男性管理者，热衷科技环保与车展体验；31-35岁自由职业男性，重视实用性与经济适配；26-30岁普通男性职员，关注技术动态与政策红利。其核心差异体现为科技热情驱动型、经济实用导向型、潮流政策追随型的认知分层，需针对性制定差异策略破局。



图 9：购买过新能源汽车的人群画像

本项目对8位广东省居民进行再一次深层访谈并扎根，发现已购买新能源汽车的消费者主要受技术性能、政策经济因素及品牌场景适配驱动。未购买新能源汽车的消费者阻碍集中于技术与保值疑虑、价格敏感与基础设施不足、品牌认知与设计适配。上述结果与聚类结果相符。

六、购买新能源汽车消费者洞察分析

（一）基于模糊综合评价法的用户满意度探究

根据新能源汽车消费者关注的核心需求，确定满意度评价的一级指标和二级细化指标；设定消费者对每个指标的满意度等级，采用五级语义量表；使用熵权法确定指标权重，并计算得出二级指标评价的模糊隶属度基于模糊评价量化结果，新能源汽车用户总体满意度76.4分。车辆性能维度中加速与安全指标突出，续航认可度显著；充电网络覆盖与售后响应效率为主要短板；政策支持力度与品牌科技服务仍具优化空间。

表 8：评价结果

一级指标	权重	二级指标	原始得分（1~5）	百分制得分	隶属度最高等级
价格合理性（C ₁ ）	0.18	购车价格	3.5	70	满意（35%）
		保险费用	3.2	64	一般（40%）
		维修成本	3.6	72	一般（35%）
续航与充电（C ₂ ）	0.25	续航里程	4.1	82	满意（40%）
		充电速度	3.7	74	满意（35%）
		充电桩覆盖率	3.5	70	一般（35%）
车辆性能（C ₃ ）	0.20	加速性能	4.3	86	非常满意（35%）
		驾驶舒适性	4.0	80	满意（35%）
		安全性	4.2	84	非常满意（40%）
品牌与服务（C ₄ ）	0.22	品牌信任度	3.9	78	满意（30%）
		售后服务响应	3.4	68	一般（35%）
		维修网点便利性	3.5	70	一般（30%）
政策与科技（C ₅ ）	0.15	政策补贴力度	3.8	76	满意（35%）
		智能化功能（自动驾驶）	3.6	72	一般（35%）
		车联网体验	3.7	74	满意（32%）
综合满意度	—	—	3.82	76.4	—

（二）预测用户购买概率，优化价格策略

基于用户对车企低价策略的高满意度，通过 XGBoost 模型，结合用户特征和 UTAUT2模型的五个维度，预测用户购买概率。采用均值和方差筛选有效数据，预测 1106 份样本。结果显示平均购买概率接近98.08%，标准差为0.0424，表明目标用户购买意愿高且模型预测稳定。



图 10：用户层次划分

新能源汽车企业应实施“两步走”价格优化策略。首先，聚

焦高潜人群，通过价格优惠与长周期服务实现转化，利用预测模型识别低概率用户的障碍并解决。同时，依据购买概率分层运营：高概率用户推送限时折扣或优先交付；中概率用户进行试驾体验与数据教育；低概率用户侧重认知培养，逐步扭转其意愿。其次，在此基础上深化产品－服务－反馈闭环优化，在分层触达基础上，优化产品与服务，产品侧，改进关键要素，如提升续航、降低快充时间等；运营侧，高概率用户建立专属服务，低概率群体调研拒购原因分析并迭代策略。这一递进式策略强化短期转化，挖掘用户全生命周期价值。

七、结束语

新能源汽车产业配套的智能充电站、移动供电等新型补能模式仍处推广初期，虽在环保与智能化体验上优势显著，但充电网络不均、电池续航及成本限制制约行业规模化发展。本文通过多

维度研究得出以下结论：第一，在认知层面上，动态调价、“一口价”等创新策略密集落地背景下，广东消费者的行为逻辑却显现出认知与行动的系统性错位。68.9%的受访者认可直营定价的透明度，但42.3%的用户因区域补贴差异质疑价格公平性。消费者分化为“价格敏感型”与“价值导向型”两大群体，这种认知割裂在19-30岁主力客群中尤为凸显，破除“认知-行为转换黑箱”已成当务之急。第二，本研究实证数据显示，消费者购买意图73.2%的变异可由多维因子解释，其中享乐动机、价值价格构成核心驱动力，而性别、驾龄等调节变量的介入显著改变决策路径系数，凸显市场细分的紧迫性。第三，本研究通过聚类分析的方法就未购买与已购买这2大类消费者做出6类人群画像的刻画。于购买过的消费者与潜在消费者而言，价值价格成为影响购买意愿较为重要的因素，梯度定价策略吸引他们的购买具有意义。而收入和职业则影响到了已购买消费者的购买行为，这来源于他们的自身客观条件，因为新能源汽车始终属于科技创新产品。第四，在本次研究中，许多深度访谈受访者表示，完善的基础设施和车辆的科技性能及设计美观度是他们选择新能源汽车的关键因素。因此，本研究在调研的最后对受访者的购车体验（功能体验、情感体验、服务体验、价值感知）进行了测量，并探讨其对新能源汽车购车意愿与价格策略之间的中介作用。

基于研究结论，未来需构建“技术-市场-政策-社会”四位一体的协同生态，推动行业从短期价格博弈转向长期价值共生。以下从四大维度提出系统性解决方案。第一，未来需构建“区域差异化+全周期可视化”的定价体系，在基础设施完善的核心区域推行“技术溢价+服务捆绑”策略；在基建薄弱地区实施“购车补贴-充电网络建设”联动政策。同时，开发“新能源汽车全生命周期成本计算器”，整合购车成本、电费支出、电池残值预测、碳积分收益等数据，生成个性化价值报告。充电焦虑的本质是信息不对称，可构建全国统一的智能补能平台；针对低密度区域，引入“充电桩热力图”动态标注未来规划点位并推广V2G双向充电技术。第二，基于多维驱动因子特征，建立“技术易用度-情感愉悦度”双轴体验模型。在技术维度，开发自适应交互系统，通过车载摄像头与行为传感器捕捉用户操作习惯，结合驾

龄评估结果，动态调整功能介入层级。在情感维度，创建车载娱乐生态开发者平台，允许用户通过低代码工具设计专属交互主题。针对享乐动机强烈的年轻群体，推出场景化体验订阅包。对于价格敏感群体，推行“硬件标准化+软件订阅化”柔性架构。同时建立价值弹性计算引擎，实现“千人千面”的成本效益最大化配置。第三，针对未购群体中的价格敏感型用户，创新性推出“电池资产解耦”金融方案，而针对注重美学体验的设计敏感型女性用户，车企联合奢侈品牌与传统文化IP开发联名车型，将新能源汽车从交通工具升维为承载生活方式的美学载体。在已购用户价值深挖层面，科技尝鲜型用户可通过车载系统开放生态参与功能共创，环保先锋型用户则被纳入碳积分循环体系，通过绿色出行积累的生态积分可兑换多元社会权益。这种分层运营依托OMO场景化零售生态的支撑：线下空间通过沉浸式技术展示与交互体验重构用户认知，线上平台则通过工程师深度解析技术原理，将硬核创新转化为用户可感知的价值锚点。第四，充电网络建设需从“数量达标”转向“场景价值创造”。在商业区打造“超充+休闲”复合空间，与连锁品牌等合作，建设集成超充桩的“能量驿站”；在社区推行智能私桩共享平台，业主可通过APP出租闲置时段充电桩，形成社区微循环经济。技术性能优化方面，建立“用户体验-研发迭代”敏捷通道，同步开发虚拟驾驶培训系统，将技术焦虑转化为知识储备。在设计维度实施“地域文化符号转化工程”，在珠三角地区推出“岭南窗花”主题内饰，针对川渝用户设计“山城之脊”外观套件。

综上，在广东省新能源汽车市场的激烈角逐中，价格敏感性已从单纯的市场竞争要素升维为驱动产业范式跃迁的战略性变量。当前价格战的本质，是传统工业时代“成本-规模”逻辑与数字时代“价值-体验”需求的结构性冲突。车企需跳出“以价换量”的单一逻辑，通过认知重构、决策优化、市场运营与生态共建重塑消费者价值感知。唯有将价格策略嵌入区域差异化、技术普惠化与生态协同化的全局框架，方能在竞争中实现可持续增长，为全国市场提供“广东解法”。

参考文献

- [1] 国际能源署 IEA. 全球电动汽车展望2024 (Global EV Outlook 2024) [EB/OL]. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>.
- [2] TrendForce 集邦咨询. 2024年第三季全球 PHEV 销量年增55.3%，比亚迪市占突破40% [EB/OL]. <https://www.trendforce.cn/presscenter/news/20241202-12388.html>.
- [3] 新华社. 2024年我国新能源汽车产销量均超1200万辆 [EB/OL]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202501/content_6998270.htm.
- [4] 华山路. 价格诉求驱动车市变革？易车研究院揭秘车企价格策略与影响 [EB/OL]. <https://finance.sina.com.cn/roll/2025-02-20/doc-inempez3700463.shtml>.
- [5] Venkatesh V., Thong J Y., Xu X. Consumer acceptance and use of information technology: Extending the Unified Theory of Acceptance and Use of Technology[J]. MIS Quarterly, 2012, 36(1): 157-178.
- [6] Venkatesh V., Morris M G., Davis G B., et al. User acceptance of information technology: Toward a unified view[J]. MIS Quarterly, 2003, 27(3): 425-478.
- [7] Duarte P., Pinho J. A mixed-methods UTAUT2-based approach to assess mobile health adoption[J]. Journal of Business Research, 2019, 102: 140-150.
- [8] AJZEN I. The theory of planned behavior[J]. Organizational behavior & human decision processes, 1991, 50(2): 179 - 211.
- [9] 杨智, 董学兵. 居民可持续消费行为及意向实证研究——以长沙市为例 [J]. 城市问题, 2011(3): 60 - 66.
- [10] 王建国. 资源节约意识对资源节约行为的影响——中国文化背景下一个交互效应和调节效应模型 [J]. 管理世界, 2013(8): 77 - 90,100.
- [11] Celik, H. Customer online shopping anxiety within the Unified Theory of Acceptance and Use Technology (UTAUT) framework[J]. Asia Pacific Journal of Marketing and Logistics, 2016, 28(2).
- [12] 李梦涵. 北京老年人的智能手机使用情况调查 [D]. 北京外国语大学, 2023.
- [13] 唐大力. 基于双向图卷积与注意力机制的方面级情感分析研究 [D]. 重庆理工大学, 2024.DOI:10.27753/d.cnki.gcqgx.2024.000102.
- [14] 孔繁钰, 陈纲. 基于改进双向 LSTM 的评教文本情感分析 [J]. 计算机工程与设计, 2022, 43(12).
- [15] 孙吉贵, 刘杰, 赵连宇. 聚类算法研究 [J]. 软件学报, 2008(01): 48-61.

广州市 Z 时代智能家居消费行为调研 与市场策略优化研究

陈宇鸿¹, 严冰怡², 潘宇³, 姚洁莹⁴, 潘嘉炜³

1. 广州大学 数学与信息科学学院, 广东 广州 510006
2. 广州大学 计算机科学与网络工程学院, 广东 广州 510006
3. 广州大学 管理学院, 广东 广州 510006
4. 广州大学 物理与材料科学学院, 广东 广州 510006

DOI:10.61369/ASDS.2025050004

摘要 : 近年来中国智能家居市场在技术迭代与消费升级驱动下快速发展, Z世代是潜在消费主力与市场适配性研究核心对象。本研究以广州市为调研场域, 聚焦 Z 世代对智能家居的认知、需求与购买决策行为, 采用多阶段 PPS 抽样法回收有效问卷 1246 份。通过差异化分析方法, 针对已使用人群运用 K-means 聚类划分用户画像、基于词云图分析提炼矛盾点与触点, 针对未使用人群通过 Logit 模型识别核心购买障碍, 再采用基于 ABC 态度理论的结构方程模型挖掘消费决策驱动路径。研究发现用户画像分层显著, 购买障碍突出, 功能需求分化, 消费决策受情感体验、社交推荐影响, 且存在市场反馈矛盾。依据结论, 基于 4C 营销理论, 从消费者需求、成本、便利性、沟通方面对智能家居行业提出场景化体验创新、差异定价、全渠道融合、社交化内容传播等建议。

关键词 : 智能家居; Z 世代; 用户画像; 结构方程模型; 场景化营销

Smart Living for the Future: A Research on the Consumption Behavior of the Z-Generation in Smart Home Appliances and Market Strategy Optimization in Guangzhou

Chen Yuhong¹, Yan Bingyi², Pan Yu³, Yao Jieying⁴, Pan Jiawei³

1. School of Mathematics and Information Science, Guangzhou University, Guangzhou, Guangdong 510006
2. School of Computer Science and Cyber Engineering, Guangzhou University, Guangzhou, Guangdong 510006
3. School of Management, Guangzhou University, Guangzhou, Guangdong 510006
4. School of Physics and Materials Science, Guangzhou University, Guangzhou, Guangdong 510006

Abstract : In recent years, the Chinese smart home appliance market has developed rapidly under the dual drivers of technological iteration and consumption upgrading. The Z-generation, defined as individuals born between 1995 and 2009, is a key target group for future market adaptation and a potential main consumer force. This study focuses on the consumption behavior of the Z-generation in smart home appliances, particularly their perception, needs, and purchasing decision-making processes. A multi-stage PPS sampling method was used to collect 1,246 valid questionnaires. Through differentiated analysis, the study employed K-means clustering to segment user profiles for existing users and used word cloud analysis to identify contradictions and touchpoints. For non-users, the Logit model was used to identify core purchasing barriers, and the structural equation model based on the ABC attitude theory was used to explore the driving paths of consumption decisions. The findings revealed significant user segmentation, prominent purchasing barriers, differentiated functional needs, and the influence of emotional experiences and social recommendations on decision-making, with market feedback contradictions also observed. Based on these conclusions, the 4C marketing theory was applied to propose suggestions for the smart home appliance industry, including scenario-based experience innovation, differentiated pricing, full-channel integration, and socialized content dissemination.

Keywords : smart home appliances; Z-generation; user profiling; structural equation model; scenario-based marketing

作者简介:

陈宇鸿, 男, 广州大学数学专业, 在读学生;
严冰怡, 女, 广州大学软件工程专业, 在读学生;
潘宇, 女, 广州大学工商管理专业, 在读学生;
姚洁莹, 女, 广州大学物理专业, 在读学生;
潘嘉炜, 男, 广州大学会计学专业, 在读学生。

引言

智能家居行业正经历从功能满足向场景价值的深刻变革，其核心在于围绕用户需求提供智能化服务。根据中国智能家居产业联盟（CSHIA）的定义，智能家居的本质是“一切围绕人的需求”，这一理念在实际应用中体现为通过手机、语音或手势控制全屋设备，实现“一键归家”“睡眠模式”等场景化联动，借助 AI 技术自主调节环境参数，依托大数据与云计算实现家居安全的实时监测与数据管理。然而，行业仍面临用户体验、隐私安全与兼容性难题。Z 世代（1995–2009 年出生人群）作为中国互联网原住民，正成为未来消费市场的主力军。广州作为国家首批智慧城市试点，政策支持力度大，5G、工业互联网等基础设施完善，是智能家居创新高地。Z 世代在广州的消费行为呈现出对“个性化”“智能化”“安全化”的强烈需求，这与广州务实、高效、安全的生活理念高度契合。通过深入分析广州 Z 世代的智能家居需求，企业可以更好地把握市场趋势，优化产品设计与服务模式，推动智能家居行业高质量发展。

一、文献综述

（一）智能家居市场的价值及其面临的社会阻碍

人工智能技术的突破为智能家居领域注入了强劲的发展动能。从经济维度来看，2021 年全球智能家居设备出货量突破 8.95 亿台，预计未来五年行业总价值将攀升至 3,829 亿美元^[1]。在社会价值层面，朱敏玲指出智能家居系统显著提升了居住安全性与生活舒适度，重构了现代人的时空管理模式^[2]。

然而技术与社会系统的复杂互动正逐渐显现其张力。Geels 和 Smit 关于“技术预测悖论”的经典论断——即新技术的社会影响往往超出预期，而技术承诺的兑现可能因忽视社会技术互动而落空^[3]——在智能家居领域得到印证。Balta-Ozkan 等系统揭示了智能家居普及面临的社会障碍^[4]。同时，邓力源提炼出三大交互困境^[5]。文献计量研究进一步佐证了安全与隐私的核心地位，刘峭的 CiteSpace 分析显示“security”“privacy”已成为智能家居研究的次级节点中心^[6]，王旻指出行业研究焦点正加速向系统安全方向迁移^[7]。此外，李猛警示智能家居可能诱发伦理困境^[8]。Ruyck 则揭示了技术依赖带来的社会技术困境^[9]。这些发现共同指向一个核心矛盾：技术神话与社会现实间的认知 - 行为鸿沟，直接导致消费者“购而不用”的消费困境。

为解决问题，闫保峰提出的节点自组网架构与 TLS/SSL 协议加密方案^[10]，夏金玉的系统性隐私保护对策^[11]。但更深层的突破在于价值重构，唯有实现从“技术展演”到“生活实践”的范式转换，才能推动行业完成市场渗透到价值认同的质变。

（二）Z 世代技术敏感性与智能家居市场适配性的耦合路径

X/Y/Z 世代的区隔不仅体现年龄分层，更是技术渗透度与社会价值观迭代的坐标系。张宇将 Z 世代定义为“数字原住民”，指出其成长轨迹与智能手机普及、社交网络崛起高度同步，形成独特的技术敏感性认知框架^[12]。刘莉研究表明，在新兴技术采纳周期中，Z 世代构成关键体验群体^[13]。Z 世代消费能力将以 5 倍增速在十年内突破 33 万亿美元，超越 Y 世代成为消费主力^[14]。

消费行为学视角看。Z 世代展现出显著的“创新溢价”支付意愿，戴尔科技全球调研显示中国 82% 的 Z 世代群体具有强烈的技术尝鲜倾向^[15]。这种技术消费特质与汪永涛提出的“悦己型消费”范式深度耦合^[16]，形成“智能家居 - Z 世代”的适配基础。

这种代际特征与行业特质的深层互动，构建了独特的市场动力学模型。当智能家居的技术痛点遭遇 Z 世代的技术批判能力，当行业的技术叙事碰撞数字原住民的技术祛魅意识，市场适配性的实现路径必然超越传统产品逻辑，转向技术伦理共建与消费价值共创的新范式。这种双向塑造，正在重构智能家居市场的竞争规则与创新方向。

二、研究方案

（一）调查目的

通过实证调查，系统解析 Z 世代对智能家居产品的认知水平、功能偏好及消费决策逻辑，揭示其“个性化需求”“社交驱动消费”等行为特征对智能家居市场的具体影响，揭示 Z 世代智能家居消费的内在逻辑，从而为市场优化提出针对性建议。

（二）调查方案

本研究聚焦广州市（一线城市代表，智能家居市场成熟且 Z 世代人口密集），在被调查者未购买过智能家居的情况下，问卷中的购买偏好等问题都将被跳过。同时为了节约成本，采取了线下拦截的方式邀请被调查者使用手机填写问卷，对于不方便或者不愿意扫二维码的被调查者，由调查员根据问卷内容提问并手动录入数据。

进一步，为了保证样本数据具有代表性，我们选择采用多阶段 PPS 抽样法来进行调查。

之后还会进行深度访谈以及针对三阶段 PPS 抽样的结果对样本量进行确定。

（三）问卷设计

对于使用过智能家居的人群，重点探究其使用情况，购买偏好和购买决策的影响因素；而对于未使用过智能家居人群，重点探究其未使用原因，潜在功能需求，场景偏好和服务需求。

三、数据预处理与描述性分析

在正式调查过程中，回收有效问卷 1246 份，包括使用过智能家居的问卷 1078 份，未使用过智能家居的问卷 168 份。清洗过程中，剔除了缺失值和重复答题数据。缺失的数据使用默认值进行填充，或根据情况将其删除；对于重复提交的问卷，视为无效问卷并剔除。清洗后的数据进入编码阶段，所有定性问题选项都进行了

数字化处理，对于多选题，采用二进制编码方式。对 Z 世代使用兴趣部分进行信效度检验发现三个量表的信度较好，检验通过。

四、智能家居消费需求分析

（一）用户画像描绘——基于 K-means 聚类

1. 指标提取

从人口学特征与行为特征两个角度出发，分别选取基本信息（性别、出生年份、职业、平均月收入）、功能偏好、促销方式、购买渠道、每天主动发起智能家居交互的频次等指标进行聚类。

观察问卷数据可知出生年份、平均月收入、每天主动发起智能家居交互的频次这三项指标是有序分类数据，建立有序编码表如下：

表1 解释有序变量编码

编码变量	对应解释
出生月份 = (1, 2, 3)	(1995-2000年, 2001-2005年, 2006-2009年)
平均月收入 = (1, 2, 3, 4, 5)	(1000元以下, 1000-3000元, 3001-6000元, 6001-10000元, 10000元以上)
每天主动发起智能家居交互的频次 = (0, 1, 2, 3, 4)	(1-3次, 4-6次, 7次)

同样，观察数据可知性别、职业、功能偏好、促销方式、购买渠道这五项指标的数据类型为无序分类变量。因此选择机器学习领域的“独热编码”方法。

2. 确定分类数量

聚类分析最重要的参数是分类的数量、亦即 K 值。在常见的衡量聚类好坏的评价方式中，本文选取“轮廓系数法”。

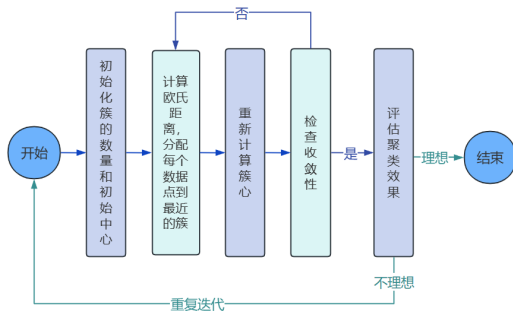


图1 聚类模型迭代过程

计算不同 K 值对应的轮廓系数，得到结果如下图：

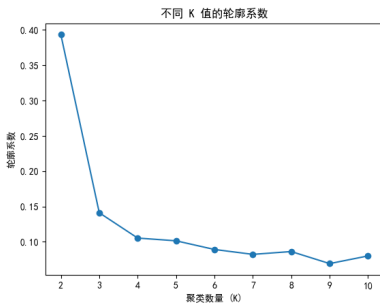


图2 K 值轮廓系数

可见当 K 值为 2 时轮廓系数最大，因此选择聚类簇数为 2。

3. 结果分析

聚类分析之后，对不同类别的人群进行可视化，探索不同类别别人群在人口学特征、行为特征等指标方面的差距。

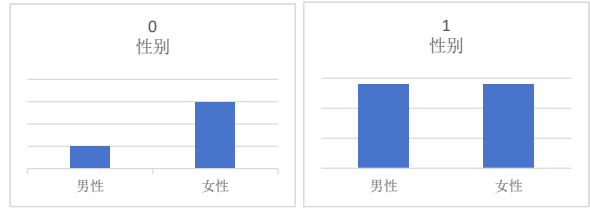


图3 两类群体性别对比

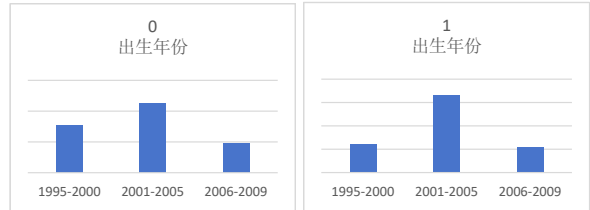


图4 两类群体出生年份对比

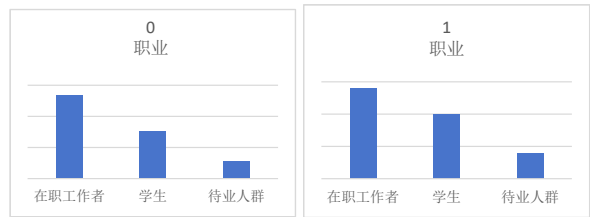


图5 两类群体职业对比

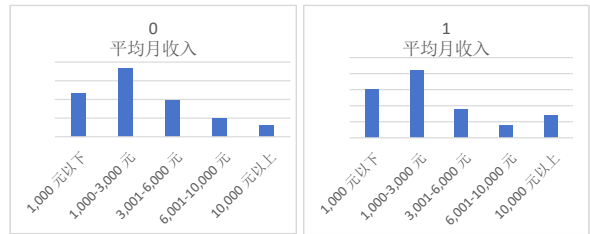


图6 两类群体平均月收入对比

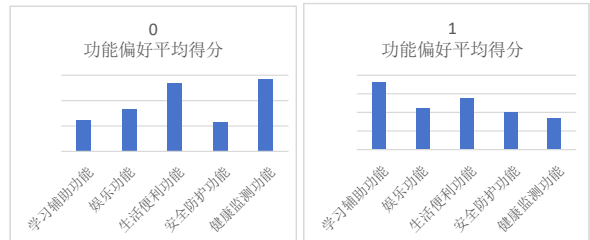


图7 两类群体功能偏好对比

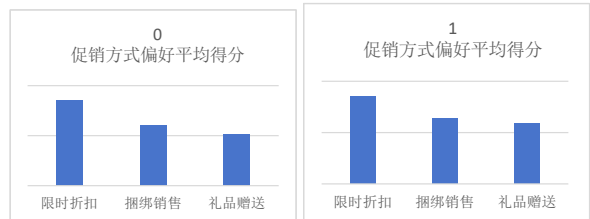


图8 两类群体促销方式偏好对比

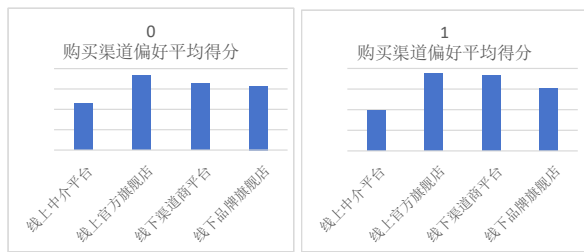


图9 两类群体购买渠道偏好对比

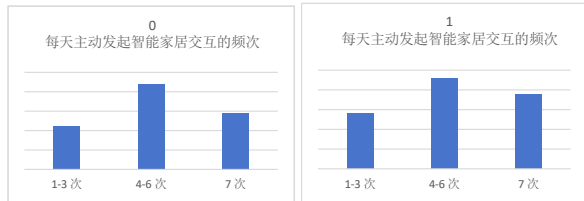


图10 两类群体每天主动发起智能家居交互频次对比

从上述结果可以看出：

聚类标签为“0”的用户：年轻女性为主，收入稳定但偏低，注重健康和安全功能，偏好官方渠道，促销方式选择均衡，交互频次适中。

聚类标签为“1”的用户：性别均衡，部分用户收入较高，注重学习和生活便利功能，价格敏感，偏好高频次交互，对第三方平台接受度较高。

综合以上特征，我们将聚类标签为“0”的用户命名为“安心生活用户”，将聚类标签为“1”的用户命名为“智慧生活用户”。

（二）用户消费情感分析——基于词云图

使用 python 爬取京东上小米智能系列产品如智能门锁、窗帘、马桶等六种类型的评论共6000条，以4、5星为正面评价，其余为反面评价，绘制词云图如下所示：



图11 京东小米智能产品好评词云图

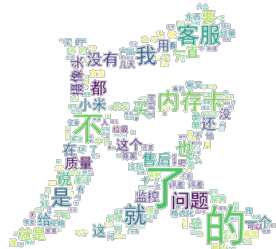


图12 京东小米智能产品差评词云图

由上图可以看出：

1. 正面评价方面：使用方便性；外观设计美观；收费合理；提供安装服务。
2. 反面评价方面：产品质量问题；客服响应不及时；配件兼容性和质量问题。

（三）用户需求敏感性分析——基于二元 Logit 回归的未覆盖市场洞察

针对未使用过智能家居的人群，通过 Logit 模型分析用户特征（如出生年份、平均月收入、职业、性别等）对产品需求（如价格、操作复杂性、隐私安全、功能实用性等）的显著影响，进一步揭露未覆盖市场的痛点与触点问题。

1. 指标提取

基于用户调研数据，分别选取出生年份、平均月收入、职业、性别等用户特征作为自变量，购买障碍、功能需求、使用场景偏好、服务需求等特征作为因变量。采用 Logit 模型，分析用户特征对产品需求的显著性影响。Logit 模型适用于二分类或多分类问题，能够有效捕捉用户特征与需求之间的非线性关系。

基于 K-means 对出生年份、平均月收入这两项有序分类指标，职业、性别这两项无序指标处理。

观察问卷数据可知，购买障碍、功能需求、使用场景偏好、服务需求为无序分类变量，基于 Logit 二分类特征，建立独热编码表。

2. 模型建立

Logit 回归通过学习输入特征和目标变量之间的关系，预测事件发生的概率，并通过逻辑函数将线性回归的输出转化为0到1之间的概率值。

回归系数是回归模型中的关键参数，它们表示自变量（特征）与因变量（预测目标）之间的关系强度和方向。

Logit 回归的模型是：

$$\log \left(\frac{P(Y=1X)}{1-P(Y=1X)} \right) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n$$

其中， $P(Y=1X)$ 是事件发生的概率， $\frac{P(Y=1X)}{1-P(Y=1X)}$ 是对数几率，表示事件发生与不发生的几率比。

回归系数 β_j 表示每增加一个单位的 X_j ，目标变量 Y 的对数几率变化量。例如：

$\beta_j > 0$ ：增加 X_j 会使事件发生的对数几率增大，即 $Y=1$ 的概率增加。

$\beta_j < 0$ ：增加 X_j 会使事件发生的对数几率减小，即 $Y=1$ 的概率降低。

下图是用户特征自变量对因变量的总体回归系数可视化结果：

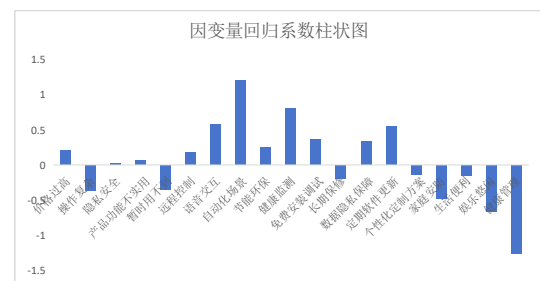


图13 用户特征对需求的影响分析

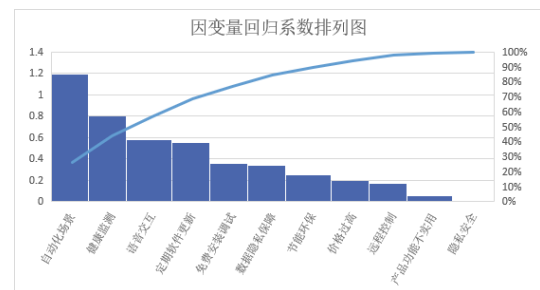


图14 部分用户特征对需求的影响排列

基于上述图形分析可知，对于全体用户而言：

正向影响显著：自动化场景、健康监测、语音交互、定期软件更新、免费安装调试。

负向影响显著：健康管理、娱乐悠闲、家庭安防、操作复杂、暂时用不到。

影响较弱：数据隐私保障、长期保修、个性化定制方案、生活便利。

（四）消费意愿分析——基于 ABC 态度理论的结构方程模型

1. 问题分析

本文以 ABC 态度理论为理论框架，运用结构方程模型（SEM），进行验证性因子分析及路径分析，以期全面揭示消费群体在智能家居选择上的偏好差异及驱动机制。

2. 模型建立

根据 ABC 态度理论，情感体验、行动倾向、认知意识是影响消费意愿的三个方面，将使用 SPSS 27 对问卷中相关潜在变量所涉及的量表题进行信效度分析，结果见下表：

表2 结构方程模型的信效度检验

潜在变量	观测变量	信度检验	效度检验
		Cronbach α 信度系数	KMO 取样适 性量数
情感体验	提升生活质量	0.791	0.838
	使用方便省事		
	对品牌有好感		
	外观符合审美		
	提高家庭安全性		
行动倾向	提供售后服务保障	0.832	0.884
	产品正在促销		
	产品可免费体验		
	线上购买方便		
	周围人都在使用		
	朋友/家人推荐		
认知意识	用户评价较高	0.841	0.884
	功能满足实际需求		
	符合日常使用习惯		
	符合环保价值观		
	价格与其功能和质量匹配		
	能与手机等设备连接		

由上表可知，各指标均通过信效度检验。根据实践经验和文献调查提出假设，上述的三个方面会对观影意愿产生直接或间接影响，同时这三个方面不是各自作用，而是相互影响的。

基于此，构建结构方程模型，利用 AMOS 28 软件对该路径假设进行验证，输入问卷数据并运行，结果如下图所示：

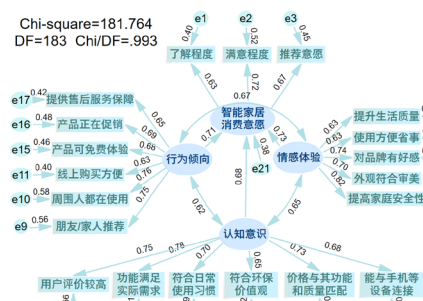


图15 智能家居消费意愿的结构方程模型

3. 模型的适配度检验

为了验证 Z 世代智能家居消费意愿的影响因素相关假设是否成立，使用 AMOS 的路径分析工具来验证理论结构模型的适配度。根据初始模型假设建立 SEM 测量模型，用标准化路径系数量化各因素间的关系大小，并对相关参数进行估计，以研究模型的模拟路径和解释能力。两个样本得到的结构方程模型拟合度检验结果见下表。

表3 智能家居消费意愿结构方程模型的拟合度检验结果

统计检验量	绝对适配度指数		增值适配度指数			简约适配度指数	
	RMR	GFI	NFI	CFI	IFI	PNFI	PCFI
参数标准 模型参数	<0.05 0.042	>0.9 0.893	>0.9 0.959	>0.9 1.0	>0.9 1.0	>0.5 0.760	>0.5 0.792

以上数值反馈智能家居消费意愿的结构方程模型具有良好的适配度，说明理论研究的路径关系与实际的测量数据比较符合。

五、结论与建议

（一）主要结论

1. 用户画像分层显著：K-means 聚类识别出两类核心群体——“安心生活用户”（女性为主，关注健康/安全功能，偏好官方渠道）与“智慧生活用户”（性别均衡，注重学习/便利功能，价格敏感）。

2. 购买障碍突出：未使用人群主要因价格过高（62.65%）、操作复杂（61.45%）及隐私顾虑（60.24%）却步；Logit 模型显示在职工作者与低收入群体对价格敏感，学生群体更关注操作便捷性。

3. 功能需求分化：自动化场景、健康监测、语音交互为核心需求；女性偏好健康功能，高收入群体注重节能环保，年轻用户倾向远程控制。

4. 消费决策驱动：结构方程模型表明，情感体验（路径系数 0.73）对购买意愿影响最大，家庭安全性宣传是关键；社交推荐（路径系数 0.76）显著推动决策，线上评论与亲友口碑作用突出。

5. 市场反馈矛盾：词云分析显示，消费者认可产品便捷性与设计，但质量稳定性、配件兼容性 & 售后服务问题频发，影响用户体验。

（二）主要建议

基于 4C 营销理论，本文以消费者需求为核心，结合智能家居市场特点，向智能家居行业提出以下营销建议：

1. Consumer Needs（消费者需求）

（1）场景化体验营销

根据 Logit 模型分析，不同群体倾向不同，对此，生产端应着力开发差异化功能。同时，通过多设备协同工作，推出离家模式，实现灯光自动关闭与安防系统启动等功能。此外，还需强化家庭安防功能。创新方面，可引入 AI 场景预测技术，使生活更加智能化。

基于 SEM 与 Logit 模型分析，建议在核心商圈或大型购物中心设立“智能家居体验角”，模拟真实生活场景，让消费者亲身

体验产品的实际价值。

（2）定制化情感体验

生产端应着重于情感化设计，同时，加强安全防护措施，此外，引入“情绪感知技术”，针对不同用户群体，提供定制化服务。

（3）隐私至上，打造安全壁垒

生产端应强化隐私保护功能，此外，可研发“隐私透明模式”，让用户实时查看数据使用情况并一键关闭数据收集功能，赋予用户对隐私的完全掌控权。确保产品符合 GDPR 等国际隐私法规，并通过第三方认证提升可信度。

在营销层面，注重围绕隐私保护功能展开宣传，将其作为核心卖点。同时，借助社交媒体和官方网站发布隐私保护相关的科普内容。通过邀请第三方权威机构进行评估并公开结果，树立品牌在隐私保护领域的专业形象。

（4）打造高品质品牌，构建用户信任

生产端应从源头把控质量，采用环保、耐用材料（如 RoHS 认证）和精密制造工艺，确保产品高可靠性。

（5）构建开放生态，强化配件兼容性

生产端应采用标准化接口如 Zigbee、Matter 等，确保与主流品牌兼容，降低使用门槛。制定严格配件质量标准，建立开放配件生态，支持第三方开发者接入，丰富配件选择。推出“智能配件订阅服务”。

2.Cost（成本）

差异定价策略：针对高收入用户捆绑终身保修与高端配件，

面向价格敏感群体实施限时折扣 + 分期付款组合。通过“以旧换新”活动降低换新成本，优化隐性消费支出。

3.Convenience（便利性）

（1）全渠道融合

建议重点强化线下体验与线上下单的无缝衔接链路。针对第三方平台如京东、天猫的运营优化，建议增设面向年轻消费群体的 Z 世代推荐专区。

（2）简化决策流程

建议在商品详情页嵌入“需求 - 功能匹配工具”，以提升用户的产品选择效率与购买体验。通过简化的交互设计，引导用户进行需求匹配。同时，可进一步提供“一键购买套装”功能，根据用户需求智能生成推荐方案。

4.Communication（沟通）

（1）KOL+UGC 双驱动，情感化内容输出

与科技类 KOL 合作测评视频，通过专业测评展示产品的核心功能和优势，吸引科技爱好者和年轻用户。激励用户发布体验短视频，参与“晒单有礼”活动，扩大社交传播效应。此外，建议围绕用户高关注的“家庭安全感”与“科技悦己”两大核心主题。同时，在社交媒体平台上策划“智能家居如何改变我的生活”主题用户故事征集活动，邀请真实用户分享其使用体验。

（2）精准触达目标用户，提高营销转化率

通过大数据技术深度分析用户行为，实现广告的精准化投放。同时，在社交媒体平台策划互动性活动，通过趣味化内容与奖励机制吸引用户参与，提升品牌曝光度与用户粘性。

参考文献

- [1]WRIGHT A. Worldwide Smart Home Device Forecast Update, 2022 - 2026: CY3Q22[EB/OL].(2022-08-01)
- [2] 朱敏玲和李宁. 智能家居发展现状及未来浅析 [J]. 电视技术, 2015, 39(04):82-85+96.
- [3]Geels F W, Smit W A. Failed technology futures: pitfalls and lessons from a historical survey[J]. Futures, 2000, 32(9-10): 867-885.
- [4]Balta-Ozkan N, Davidson R, Bicket M, et al. Social barriers to the adoption of smart homes[J]. Energy policy, 2013, 63: 363-374.
- [5] 邓力源和李栋宁. 智能家居产品显隐融合交互设计研究 [J]. 包装工程, 2023, 44(24):440-447.
- [6] 刘峒, 李妍, 叶森. 国内外智能家居研究进展与趋势——基于 2013—2023 年核心期刊文献的 CiteSpace 可视化分析 [J]. 木材科学与技术, 2024, 38(3):78-87.
- [7] 王矣, 宋波, 戚伟佳, 等. 智能家居系统中数据安全与隐私保护措施及其发展趋势探析 [J]. 电子产品世界, 2024, 31(12):16-19.
- [8] 李猛, 谭九生. 智能家居的伦理风险、成因透析及治理建议 [J]. 宁夏社会科学, 2024, (1):104-113.
- [9]De Ruyck O, Conradie P, De Marez L, et al. User needs in smart homes: changing needs according to life cycles and the impact on designing smart home solutions[C]//IFIP Conference on Human-Computer Interaction. Cham: Springer International Publishing, 2019: 536-551.
- [10] 闫保峰. 智能家居系统中的物联网数据安全性与隐私保护 [J]. 石河子科技, 2025, (1):28-30.
- [11] 复金玉. 基于物联网的智能家居隐私泄露问题分析 [J]. 保密科学技术, 2023, (6):64-68.
- [12] 张宇和金炯年. 基于“Z 世代”消费特征的企业品牌化策略研究 [J]. 科技经济市场, 2023, (5):151-154.
- [13] 刘莉. 基于 Z 世代的智能家居机器人产品设计与研究 [D]. 吉林建筑大学, 2023.
- [14] 黄瑾和陈倩. Z 世代群体消费特征对经济发展的影响 [J]. 全国流通经济, 2022, (21):4-7.
- [15] 来有为, 周海伟, 厉基巍. 理解中国“Z 世代”迎接消费新浪潮 [J]. 发展研究, 2022, 39(3):44-55.
- [16] 汪永涛. Z 世代亚文化消费的逻辑 [J]. 中国青年研究, 2021, (11):88-95.

城市无人机配送用户使用意愿影响因素研究

——基于 SEM 与 fsQCA 方法

张佳越^{1*}, 刘佳欣²

1. 广东工业大学 经济学院, 广东 广州 510520

2. 辽东学院 管理学院, 辽宁 丹东 118001

DOI:10.61369/ASDS.2025050005

摘 要 : 在国家战略性新兴产业体系布局的关键时期, 低空经济作为融合发展的立体化经济形态正加速崛起。通过构建结构方程模型 (PLS-SEM) 与模糊集定性比较分析方法探索城市无人机配送服务用户接受意愿的影响因素, 并对不同影响因素的组合效应进行组态分析。根据广州、深圳和珠海用户 1607 份调查结果, 首先应用 PLS-SEM 探究了个体创新、感知服务、感知价格和风险容忍等潜变量对接受意愿的影响。通过 fsQCA 方法析识别出 5 种高使用意愿的路径组合, 并总结出三种主要的用户接受模式: 技术补偿型、易用性驱动型与全面体验型。

关 键 词 : 无人机配送; 用户使用意愿; SEM; fsQCA

Research on the Factors Influencing User Willingness to Use Urban Drone Delivery Services — Based on SEM and fsQCA Methods

Zhang Jiayue^{1*}, Liu Jiaxin²

1. Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510520

2. Liaodong University, Dandong, Liaoning 118001

Abstract : In the critical period of the national strategic emerging industry system layout, the low-altitude economy, as a three-dimensional economic form of integrated development, is accelerating its rise. This study explores the factors influencing urban drone delivery service users' willingness to accept the service by constructing a Structural Equation Modeling (PLS-SEM) and Fuzzy-set Qualitative Comparative Analysis (fsQCA) approach. The study analyzes the combinatorial effects of different influencing factors. Based on the survey results from 1,607 users in Guangzhou, Shenzhen, and Zhuhai, the PLS-SEM method was first applied to investigate the impact of latent variables such as individual innovativeness, perceived service quality, perceived price, and risk tolerance on acceptance intention. Using fsQCA, five high willingness-to-use path combinations were identified, and three main user acceptance patterns were summarized: technology compensation type, ease-of-use driven type, and comprehensive experience type.

Keywords : drone delivery; user adoption intention; SEM, fsQCA

引言

在全球科技创新与产业升级的关键期, 低空经济的迅猛发展, 尤其是低空物流的崛起, 已成为产业转型的重要推动力。《2024 中国低空物流发展报告》显示, 低空物流市场规模自 2020 年 271.8 亿元增长至 2023 年的 581.8 亿元, 年均增长率高达 37.41%。这一增长反映了无人机技术在物流领域的深远影响, 低空物流不仅提高了配送效率, 还能在城市交通压力日益增大的背景下, 优化交通资源配置, 减少碳排放, 提升城市的整体可持续发展水平。特别是在一些资源稀缺、地形复杂或交通不便的地区, 无人机配送服务能够有效弥补传统物流配送模式的不足, 为经济和社会发展带来新的机遇。因此, 深入探讨无人机配送服务的用户使用意愿, 对于把握市场脉动、推动低空物流产业的持续发展具有重大意义。然而, 无人机配送服务的推广仍面临诸多挑战, 尤其是在用户接受度、安全性、可靠性和成本效

基金项目: 广工大省哲社重点实验室青年人才培养项目 (2024QNYPY0203); 广东省大学生创新创业训练项目 “人工智能赋能新质生产力发展的逻辑机理与实现路径研究” (xj2025118450802)。

作者简介:

张佳越, 广东工业大学经济学院, 学士, 研究方向为城市规划与管理;

刘佳欣, 辽东学院管理学院, 学士, 研究方向为城市规划与管理。

通讯作者: 张佳越, 广东工业大学经济学院, 学士, 研究方向为城市规划与管理。

益等方面的不确定性，这些因素直接决定了低空物流的普及速度与市场响应。因此，研究影响用户使用意愿的多维因素，对于理解消费者需求、优化技术与服务创新具有关键作用。本研究通过结合结构方程模型（SEM）和模糊集定性比较分析（fsQCA）方法，全面揭示影响用户意愿的因果关系和关键因素，为低空物流产业的发展提供科学依据与理论支持。随着低空物流技术的不断成熟和市场需求的快速增长，研究无人机配送服务的用户使用意愿已成为推动产业升级和经济发展的核心议题。通过对用户行为的精确分析，本研究不仅为企业在市场定位、技术创新与服务优化方面提供数据支持，还能为政府制定低空经济政策、促进产业发展提供理论指导。通过科学的分析和精准的策略，本文为低空物流产业未来的发展奠定了坚实的理论基础，并为低空经济的创新融合提供了宝贵的参考与借鉴。

一、文献综述

本研究梳理了关于无人机配送服务中使用意愿、行为和影响机制方面的研究，从研究主题、影响因素、理论依据等方面对相关研究进行总结。

从研究视角来看，现有对无人机配送服务的研究主要是探讨影响消费者对无人机配送服务的采用意向的因素。Hwang J^[1]等（2019）人基于技术接受模型，将认知创新动机，享乐动机、社交动机、功能动机作为态度的预测因子，从而预测消费者对无人机服务的行为意向。Cho A 等^[2]（2021）通过实证研究表明消费者态度、感知行为控制以及主观规范对行为意向有积极影响，并发现 COVID-19 对消费者的态度有积极的调节作用。也有学者^[3]从技术采纳视角入手，通过结构方程模型预测消费者对无人机配送服务采纳以及有愿意付费更多的行为。

在影响因素层面，现有研究证实主观规范、感知风险和创新特性构成核心解释变量。Yoo, W 等^[4]（2018）通过复杂性、性能风险的中介作用研究采纳意愿，发现城市居民采纳意愿显著高于农村群体。此外，他们认为无人机配送采纳的决定因素根消费者的居住区域而有所不同。Jinsoo Hwang 和 Ja Young Choe^[5]（2019）突破性地引入风险容忍维度，发现时间风险和心理风险对服务形象存在显著负向影响。Kim, SH^[6]（2020）利用陈述性偏好调查基于离散选择模型对无人机配送服务消费者偏好进行研究，结果表明商品的价格和类型影响消费者偏好，以及年龄越小对无人机配送服务的偏好越高。Nunkoo, R^[7]等（2024）整合行为推理与创新阻力理论，构建包含促进 / 抑制因素的双路径模型，证实绿色形象与使用障碍对采纳意愿具有差异化影响。

二、研究设计

（一）研究框架

本研究主要分3个步骤如图 1 所示，分别为数据指标汇总、结构方程分析、模糊集定性比较分析^[8]。

步骤一：数据指标汇总阶段。调研组对数据进行汇总与审查，剔除无效问卷（如缺失、矛盾、异常等）。所有变量经标准化处理，确保数据规范。数据按用户特征分组、编号，使用 Excel 格式化并通过 SPSS 初步检查，最终存入数据库。

步骤二：构建结构方程进行分析。结构方程模型（SEM）通过路径系数解析变量间的关系，并通过路径图直观展示这些关系。在分析过程中，首先对数据进行信度与效度检验，并使用验证性因子分析（CFA）评估模型拟合度，确保模型的可靠性与适用性，然后

基于模型的路径分析，验证假设并探索变量之间的内在逻辑。

步骤三：模糊集定性比较分析。首先采用直接校准法对前因变量和结果变量进行模糊集校准，将7个前因变量和1个结果变量设置为3个锚点（0.95、0.5、0.05），分别对应完全隶属、中间隶属和完全不隶属。然后，进行必要条件分析，通过逐一检验每个前因变量的必要性，确认是否为结果的必要条件，若一致性大于0.85，则认为该变量为结果的必要条件。

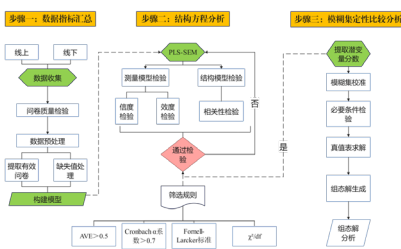


图 1：研究框架示意图

Figure1: Schematic Diagram of the Research Framework

（二）问卷设计与模型构建

调查问卷分为三个部分：一是用户个人属性的调查，二是用户对于无人机配送服务使用情况的调查和评价，三是用户对无人机配送使用意愿影响因素的调查。

本文提取技术接受模型的核心因素：感知有用性、感知易用性和使用态度^[9]，并结合现有研究加入个体创新、风险容忍、感知价格以及感知服务^{[10][11][12][13]}。因此，基于计划行为模型与服务质量理论^{[14][15]}，构建了用户无人机配送使用意愿影响因素模型，如图 2 所示。

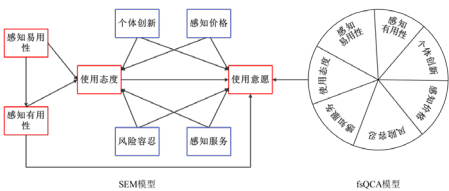


图 2：研究模型图

Figure2: Research Model Diagram

根据图 2 的研究模型，并结合现有文献中的测量方法构建了调查问卷的量表题项，所有题项的测量均采用李克特 5 级量表，1 表示“非常不认同”，5 表示“非常认同”。本文在编制初始量表时咨询了多位城市规划、交通、经济学领域专家和学者的建议，对量表题项中语意不清晰、易产生歧义和翻译生硬的题项进行了修正，形成最终量表。

（三）研究地点

《广东省推动低空经济高质量发展行动方案（2024—2026年）》明确将打造广州、深圳、珠海三核联动、多点支撑、成片发展的低空经济产业格局。广州、深圳和珠海均位于珠江三角洲，经济发达、科技创新活跃，特别是在人工智能和自动化技术的应用方面领先。这些城市的交通和物流需求量大，且政府对智能物流和无人机技术提供了积极的政策支持，同时，消费者对新兴技术的接受度较高，为研究无人机配送服务的使用意愿提供了理想的实践场景和样本群体。因此，本研究选择广州、深圳、珠海3市进行调查。

（四）数据收集与描述性统计

研究在广州、深圳、珠海3市开展调研，共回收1720份样本，剔除无效样本后有效样本1607份，有效率93.43%，本次调研结果中各个年龄、教育程度、职业、收入的阶层均有涉及，且符合人口基本特征，样本具有代表性。无人机配送服务受访者信息基本概况如表1。

表1：调查问卷有效样本基本资料

Table1: Basic Information of Valid Survey Samples

变量	类别	人数	占比	变量	类别	人数	占比
性别	男	758	47%	学历	初中及以下	643	40%
	女	849	53%		高中 / 中专	321	20%
年龄	18岁以下	64	4%		大学专科	225	14%
	18—25岁	112	7%		大学本科	305	19%
	26—35岁	498	31%		研究生及以上	113	7%
	36—45岁	723	45%	职业	政府部门	209	13%
	46—60岁	161	10%		私企	466	29%
	60岁以上	49	3%		个体工商户	643	40%
收入	1500元以下	161	10%		学生	112	7%
	1501—3000元	466	29%		农业工作者	80	5%
	3001—5000元	514	32%		已退休	97	6%
	5001—8000元	370	23%				
	80001—12000元	80	5%				
	大于12000元	16	3%				

三、基于 PLE-SEM 的用户接受意愿影响因素分析

（一）测量模型检验

研究对实证数据进行信度检验（表2），所有变量的Cronbach α系数均大于0.7的临界值，表明问卷具有较好的内部一致性，且全部题项的标准化载荷均高于0.5，平均方差提取值(AVE)高于0.5以及组合信度(CR)高于0.7，这表明了各个变量具有良好的聚合效度。

表2：信效度检验表

Table 2: Reliability and Validity Testing Table

潜变量	Cronbach α系数	平均方差 AVE 值	组合信度 CR 值
个体创新 INI	0.730	0.574	0.730

潜变量	Cronbach α系数	平均方差 AVE 值	组合信度 CR 值
风险容忍 PRK	0.755	0.507	0.755
感知价格 PPR	0.784	0.517	0.808
感知服务 PSQ	0.793	0.575	0.802
感知有用性 PUF	0.785	0.550	0.786
使用态度 UAT	0.821	0.546	0.827
感知易用性 PEU	0.871	0.630	0.872
使用意愿 UIT	0.793	0.563	0.794

区别效度的判定依据为各潜变量的 AVE 平方根显著高于与其他变量的相关系数。根据 Fornell-Larcker 准则（见表3），所有构念的 AVE 平方根值高于对应相关系数，验证了测量模型中变量的清晰区分性，满足多维度测量工具的信效度要求。

表3：潜变量区分效度（Fornell-Larcker 标准）

Table3: Latent Variable Discriminant Validity (Fornell-Larcker Criterion)

Factor	INI	PRK	PPR	PSQ	PUF	UAT	PEU	UIT
INI	0.757							
PRK	0.536	0.712						
PPR	0.566	0.615	0.719					
PSQ	0.554	0.590	0.664	0.758				
PUF	0.423	0.481	0.606	0.525	0.741			
UAT	0.561	0.586	0.645	0.637	0.530	0.739		
PEU	0.554	0.552	0.636	0.567	0.519	0.600	0.793	
UIT	0.531	0.550	0.613	0.594	0.486	0.656	0.654	0.750

（二）结构模型检验

本次建模采用 AMOS 软件，设置好因果关系路径图之后对收集的数据进行结构方程模型运算，并对运行结果进行整理分析，得到模型标准路径系数运行程序得到结果如图3。

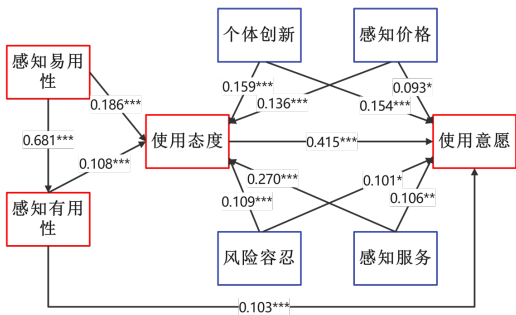


图3：结构方程检验结果

Figure3: Structural Equation Testing Results

研究结果如表4，感知有用性显著影响使用态度（β=0.108,z=3.335,p<0.001）和使用意愿（β=0.103,z=3.559,p<0.001）。感知易用性对使用态度的影响也显著（β=0.186,z=3.902,p<0.001），并通过增强感知有用性进一步提升使用意愿（β=0.681,z=21.900,p<0.001）。个人创新性对使用态度（β=0.159,z=3.455,p<0.001）和使用意愿（β=0.154,z=3.267,p<0.001）均有显著正向影响，创新性较高的用户更愿意接受无人机配送。

风险容忍度对使用态度 ($\beta=0.109, z=2.152, p<0.05$) 和使用意愿 ($\beta=0.101, z=1.917, p<0.1$) 有一定影响, 风险容忍度较高的用户更倾向于尝试无人机配送。感知价格对使用态度 ($\beta=0.136, z=2.634, p<0.001$) 和使用意愿 ($\beta=0.093, z=1.758, p<0.1$) 均有影响, 用户对价格的认可程度提升了他们的使用意愿。感知服务质量对使用态度 ($\beta=0.270, z=5.724, p<0.001$) 和使用意愿 ($\beta=0.106, z=2.091, p<0.05$) 有显著影响, 高质量的服务显著提升了用户的态度和使用意愿。最终, 使用态度对使用意愿的影响最大 ($\beta=0.415, z=8.529, p<0.001$), 用户对服务的积极态度显著提高了他们的使用意愿。

表4: 结构方程具体拟合结果

Table4: Structural Equation Model Fit Results						
X	→	Y	标准化回归系数	SE	CR	P
个体创新	→	使用态度	0.159	0.053	3.455	***
个体创新	→	使用意愿	0.154	0.051	3.267	***
风险容忍	→	使用态度	0.109	0.052	2.152	**
风险容忍	→	使用意愿	0.101	0.051	1.917	*
感知价格	→	使用态度	0.136	0.048	2.634	***
感知价格	→	使用意愿	0.093	0.046	1.758	*
感知服务质量	→	使用态度	0.270	0.042	5.724	***
感知服务质量	→	使用意愿	0.106	0.043	2.091	**
感知易用性	→	使用态度	0.186	0.045	3.902	***
感知易用性	→	感知有用性	0.681	0.037	21.900	***
感知有用性	→	使用态度	0.108	0.025	3.335	***
感知有用性	→	使用意愿	0.103	0.021	3.559	***
使用态度	→	使用意愿	0.415	0.046	8.529	***

四、基于 fsQCA 的用户接受意愿影响因素分析

结构方程模型 (SEM) 是一种用于检验变量间路径关系的多变量分析方法, 而模糊集定性比较分析 (fsQCA) 基于集合论^[16], 能够揭示结果的前因条件组合, 并识别每个组合中的核心条件、辅助条件和边缘条件。将结构方程模型与模糊集定性比较分析结合使用, 有助于更深入地分析变量之间的因果关系及其作用机制。依据以往研究, 先对变量个体创新、风险容忍、感知价格、感知服务质量、感知易用性、感知有用性、使用态度、使用意愿的题项求平均值。

(一) 数据校准

本文采用直接校准法对前因变量和结果变量校准为模糊集, 将7个前因变量与1个结果变量设定为3个锚点, 即0.95、0.5与0.05^[17], 分别对应案例样本统计的完全隶属、中间隶属和完全不隶属。

(二) 必要条件分析

在进行组态分析之前, 对各单变量进行逐一的、单独的“必要性 (Necessity)”检验是必要步骤。本研究基于 QCA 标准检验步骤, 对各单一前因变量进行逐步单独检验, 以确定使用意愿结果变量是否存在必要条件。若是存在某一变量一致性大于0.85, 证明该条件为结果的必要条件。根据结果显示 (表5), 无必要条件^[18]。

表5: 组态必要性分析结果
Table5: Necessary Condition Analysis Results

	Consistency1	Coverage1		Consistency2	Coverage2
INI	0.852380	0.827874	INI	0.665682	0.419890
~INI	0.402718	0.649717	~INI	0.727114	0.761840
PRK	0.815296	0.853143	PRK	0.615392	0.418212
~PRK	0.444021	0.639984	~PRK	0.783901	0.733778
PPR	0.811991	0.875651	PPR	0.587358	0.411358
~PPR	0.454154	0.628901	~PPR	0.822449	0.739651
PSQ	0.824811	0.860724	PSQ	0.601785	0.407839
~PSQ	0.432545	0.625824	~PSQ	0.794490	0.746529
PUF	0.756278	0.867519	PUF	0.584559	0.435476
~PUF	0.507863	0.653059	~PUF	0.822164	0.686597
UAT	0.771766	0.889193	UAT	0.557963	0.417497
~UAT	0.494416	0.632654	~UAT	0.851908	0.707952
PEU	0.835845	0.862993	PEU	0.596886	0.400231
~PEU	0.419101	0.615514	~PEU	0.795676	0.758915

(三) 组态分析

设置一致性阈值为0.9, 频数可接受的最低水平为3, 最终得到消费者对无人机配送服务使用意愿的前因条件构型结果 (表6)。

表6组态分析结果
Table6: Configurational Analysis Results

构型	使用意愿				
	1	2	3	4	5
INI	●	●	●	●	
PRK	●	●	⊗	●	●
PPR	●	●	●	●	●
PSQ	●	●	●	●	●
PUF		⊗	⊗	●	●
UAT	●				●
PEU		⊗	●	●	●
一致性	0.973	0.951	0.955	0.973	0.981
覆盖率	0.583	0.246	0.255	0.557	0.530
净覆盖率	0.028	0.007	0.022	0.027	0.012
总体一致性	0.958381				
总体覆盖率	0.667708				
●表示核心条件出现；⊗表示核心条件不出现； 空格表示无关紧要（既可出现，也可不出现）					

(四) 稳健性检验

为验证结果的稳健性, 采用改变案例频数阈值和一致性阈值的方法: 将案例频数阈值提高一个单位, 并再次进行真值表分析, 产生的组态方案与上文基本一致; 将一致性阈值从0.9下降到0.85, 结果显示产生的组态方案仍然基本一致。上述改变前后结果相似, 并未产生新的解释, 表明组态分析结果具有稳健性。

(五) 结果分析

根据 fsQCA 构型结果本研究总结出三种主要的用户接受模式。这些模式揭示了不同用户群体在面对技术新颖性、易用性、风险容忍度和服务质量等多重因素时的反应和决策过程, 具体结果如下:

1. 技术补偿型（路径2）

本研究发现，当用户感知无人机配送的技术有用性（PUF）和易用性（PEU）较低时，使用意愿仍可通过个体创新性（INI）、风险容忍（PRK）、价格合理性（PPR）和服务质量（PSQ）的协同作用得以提升。此组态挑战了技术接受模型（TAM）中“技术有用性为核心驱动”的假设，支持创新扩散理论中早期采用者“技术缺陷容忍”的特征。具体而言，创新用户倾向于将技术不完善视为探索机会，而合理定价和服务质量通过降低决策风险，促进接受。这对市场细分具有启示：在技术初期，企业可通过价格补贴和服务承诺吸引创新者群体，弥补技术短板，建立早期用户基础。

2. 易用性驱动型（路径3、5）

在这两条路径中，感知易用性（PEU）是核心驱动力，但作用机制有所不同。路径3表明，当用户风险容忍度低且感知有用性缺失时，高易用性可直接激发使用意愿，符合“隐形设计”原则：简化操作减少认知负担和风险感知。路径5则展示了易用性与感知有用性和使用态度的正反馈作用，易用性增强技术效能感知，并通过流畅体验提升用户态度。对服务设计的启示是：针对保守用户，采用“零学习成本”设计；对于技术效能敏感群体，需构建易用性与有用性的互证体系。

3. 全面体验型（路径1、4）

此构型要求同时满足高个体创新、技术有用性、易用性和积

极态度，代表了用户对无人机配送服务的高标准需求。这类“技术完美主义者”群体验证了体验双通道理论，既要求技术卓越，又追求情感愉悦。值得注意的是，这一构型突破了“创新者窘境”的预言——即使对技术缺陷零容忍，技术性能达到一定阈值时，用户仍可能依赖该技术。对此，企业应通过“技术－情感－社会价值”三位一体的超级体验，构建竞争壁垒，如开放自定义飞行路径、设计互动灯光秀和标注碳减排量。

五、结束语

本研究结合结构方程模型（SEM）与模糊集定性比较分析（fsQCA）方法，深入分析了城市无人机配送服务用户使用意愿的影响因素，研究发现个体创新、感知服务、感知易用性、感知价格和风险容忍度等因素显著影响用户的使用意愿。

基于 fsQCA 的分析揭示了三种主要的用户接受模式：技术补偿型、易用性驱动型和全面体验型。这些模式反映了不同用户群体对技术、价格、服务质量和使用体验的不同需求。

研究结果为无人机配送服务的市场推广和产品设计提供了重要启示。企业应根据用户群体的不同需求，制定个性化的推广策略，以提升技术的市场接受度和用户满意度。此外，研究方法的创新性也为未来低空经济和智能物流领域的研究提供了新的视角。

参考文献

- [1]Hwang J, Kim H, Kim W. Investigating motivated consumer innovativeness in the context of drone food delivery services[J]. Journal of Hospitality and Tourism Management, 2019, 38: 102–110.
- [2]Cho A, Hwang J. Application of Motivated Consumer Innovativeness to the Context of Drone Food Delivery Services: Focusing on the Different Test of Demographic Factors[J]. J. MICE Tour. Res, 2021, 21: 7–24.
- [3]Waris I, Ali R, Nayyar A, et al. An empirical evaluation of customers’ adoption of drone food delivery services: An extended technology acceptance model[J]. Sustainability, 2022, 14(5): 2922.
- [4]Yoo, W., Yu, E., & Jung, J. Drone delivery: Factors affecting the public’s attitude and intention to adopt. Telematics and Informatics, 2018, 35(6), 1687–1700
- [5]Hwang, J., & Choe, J. Y. Exploring perceived risk in building successful drone food delivery services. International Journal of Contemporary Hospitality Management, 2019, 31(8), 3249–3269.
- [6]Kim, S. H. Choice model based analysis of consumer preference for drone delivery service. Journal of Air Transport Management, 2020, 84, 101785.
- [7]Nunkoo, R., Pillai, R., Sivathanu, B., & Rana, N. P. Drivers and inhibitors of consumers’ adoption of AI-driven drone food delivery services. International Journal of Hospitality Management, 2024, 123, 103913.
- [8] 沈金星、李麒年、于森，等。2025，《出行链视角下地铁乘客满意度影响因素的组态效应分析》[J]. 东南大学学报（自然科学版），第1期：1–11.
- [9] 霍治方、刘刚、樊正德。2025，《中国公众对新兴技术采纳的影响机理研究——基于自动驾驶汽车社会实验调查的微观证据》[J]. 科学学研究，第43卷，第2期：311–324.
- [10] 贺育雪。2023，《基于扎根理论的无人机配送影响因素分析》[J]. 中国储运，第6期：68–69.
- [11] 陈鹏、王蓉、白佳鹭。2025，《哪些因素影响学习者的 Gen AI 采纳行为？——基于模糊集质性比较分析的发现》[J]. 现代教育技术，第35卷，第6期：36–45.
- [12] 张凯亮、臧国全。2021，《泄露概率情境下的个人数据隐私计量研究》[J]. 图书情报工作，第65卷，第9期：62–69.
- [13] 李军、宋晨鹏、叶浩彬。2023，《智能服务情境下消费者对服务型机器人使用意愿研究》[J]. 旅游学刊，第38卷，第6期：136–150.
- [14] 李磊、桂琳。2021，《后疫情背景下北京市社区生鲜农产品配送模式》[J]. 北方园艺，第22期：142–149.
- [15] 赵旭、张文举、何伟军。2020，《物流信息技术采纳对在线外卖平台消费者订购意愿的影响研究》[J]. 数学的实践与认识，第50卷，第10期：44–55.
- [16] 李凤景、朱光、吴哈逸。2025，《悖论存在与理性消解：移动健康 App 用户持续隐私披露行为影响机制研究》[J]. 现代情报，1–29.
- [17] 付卫东、张杉。2025，《国家中小学智慧教育平台学生持续使用意愿影响因素研究——基于我国东中西部7省10674名学生的调查》[J]. 河北大学学报（哲学社会科学版），1–17.
- [18] 闫绪娴、王俊丽、温恒，等。2025，《三元空间下数智赋能城市暴雨态势感知的组态路径研究》[J]. 热带地理，1–13.

消费者对共享经济中无人驾驶汽车的态度调查

徐蔚, 李佳文, 安健琼, 梁鑫*

广西师范大学 数学与统计学院, 广西 桂林 541006

DOI:10.61369/ASDS.2025050006

摘要 : 互联网产业的迅猛发展催生了共享经济, 无人驾驶技术的横空出世使之与共享经济的联合从设想逐步走进现实, 其市场前景与消费者消费意愿有着密切的联系。基于各大平台网络指数与文本数据挖掘, 结合问卷调查, 了解全国893名消费者对共享经济下的态度与消费感受, 建立结构方程模型探究无人驾驶汽车行业在共享经济中发展的影响因素和消费者使用意愿。结果显示: 学历中等偏上、中青年群体有更高接受度, 但实际体验率低; 宣传较少, 消费者对无人驾驶汽车与智能驾驶汽车的认知不够完全; 相关法律法规、无人驾驶技术的成熟度、传感技术的稳定、车辆行驶安全、消费者数据隐私与安全等是消费者重点关注的因素。由此, 提出政策协同、技术攻坚、用户体验优化、市场生态构建等建议。

关键词 : 无人驾驶汽车; 共享经济; 结构方程模型; 文本挖掘

A Survey of Consumer Attitudes towards Driverless Vehicles in the Sharing Economy

Xu Wei, Li Jiawen, An Jianqiong, Liang Xin*

School of Mathematics and Statistics, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541006

Abstract : The rapid development of the Internet industry has given rise to the sharing economy, and the emergence of driverless technology has gradually brought the union of driverless technology and the sharing economy from the idea into reality, and its market prospect is closely related to the consumer willingness to consume. Based on the network index of major platforms and text data mining, combined with the questionnaire survey, we understand the attitude and consumption feelings of 893 consumers in China under the sharing economy, and establish a structural equation model to explore the influencing factors of the development of the driverless automobile industry in the sharing economy and the consumer's willingness to use it. The results show that: middle to upper education, middle and young groups have higher acceptance, but the actual experience rate is low; there is less publicity, and consumers' knowledge of driverless cars and smart driving cars is incomplete; relevant laws and regulations, the maturity of driverless technology, the stability of sensing technology, the safety of vehicle driving, and the privacy and security of consumer data are the factors that consumers are focusing on. As a result, policy synergy, technology attack, user experience optimization, market ecology construction and other suggestions are put forward.

Keywords : driverless cars; sharing economy; structural equation modeling; text mining

引言

互联网的飞速发展催生了共享经济, 共享汽车的出现改变了人们的出行方式, 各种以“共享汽车”为主营业务的互联网网站和智能手机 App 也悄然兴起^[1]。近年来, 人工智能技术迅猛发展, 无人驾驶汽车从设想逐步走进现实。多家产业研究的无人驾驶技术与共享经济联合成果问世, 如百度 Apollo Robotaxi、萝卜快跑、文远知行无人驾驶小巴、百度阿波龙 II 等。无人驾驶技术与共享经济的完美贴合正是市场需求所在。

本研究在于了解消费者对乘坐无人驾驶汽车的需求、接受度、担忧等情况, 对全国七大地区消费者进行问卷调查, 为无人驾驶汽车产业提供市场进入和运营策略支持。

基金项目: 广西哲学社会科学课题 (23BTJ001)。

作者简介:

徐蔚, 广西师范大学数学与统计学院, 本科生, 研究方向为数学与应用数学;

李佳文, 广西师范大学数学与统计学院, 本科生, 研究方向为统计学;

安健琼, 广西师范大学数学与统计学院, 本科生, 研究方向为数学与应用数学。

通讯作者: 梁鑫, 广西师范大学数学与统计学院, 副教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向为时间序列分析、机器学习、空间计量。

一、无人驾驶汽车产业的多维探索

（一）政策法规与社会治理挑战

无人驾驶汽车侵权责任面临挑战，现有交通事故侵权责任无法完美解决共享经济下无人驾驶汽车侵权问题，需从共享汽车法律性质和不同模式法律风险出发构建责任制度^[2]。随着多地政府出台相关政策^[1-5]，不仅为该行业出行服务的法律保障提供了研究方向，还影响着消费者对其安全性和可靠性的认知。

（二）共享经济与无人驾驶技术的结合

一直践行着共享经济理论的 Uber 于 2015 年就已经为无人驾驶做好了准备，谷歌也不例外^[6]。清华大学教授吴建平在接受《交通建设与管理》时提出^[7]“随着共享经济的出现，人工智能技术的快速发展，我们的未来交通会朝着共享 + 无人驾驶的方向发展”。共享经济正改变着人们的生活方式，而无人驾驶小型共享电动汽车在使用方式、交互方式和服务场景上与传统共享汽车有着很大不同^[8]。

（三）公众接受度与使用意愿

有研究表明：不同性别、年龄以及学历的群体，在无人驾驶出租车接受度影响因素上呈现出明显的异质性^[9]。深入剖析这些群体差异能够帮助企业精准定位目标客户群体，制定差异化营销策略；同时也有助于政府部门制定更贴合不同群体需求的政策，推动无人驾驶出租车的广泛普及。

（四）社会影响与公众认知

“萝卜快跑”无人驾驶网约车在武汉因价格优势吸引了不少喜欢尝鲜的年轻人，但也存在轻微交通事故、车速慢等问题^[10-12]。此外，公众对于无人驾驶出租车冲击出租车司机职业这一现象普遍持有消极情绪，且不同省份在情感倾向和对各主题参与度上存在明显差异^[13-14]。

二、无人驾驶汽车与共享经济联合的舆情分析

通过 Python 爬虫爬取百度贴吧、微博、抖音等平台与关键词如“无人驾驶出租车”“萝卜快跑”的相关帖子与视频的评论；收集萝卜快跑平台的用户评论和评分；获取百度新闻、今日头条等相关新闻报道和评论。进一步将含有指定名词的、重复次数过多的、评论内容过短及未修改过账号昵称的评论全部剔除，最终得到 35789 条有效数据。对上述数据进行情感分析、主题挖掘、用户画像得到分析概况如表 1。

表 1 通过爬取数据进行的分析概况

分析方向	无人驾驶出租车	无人驾驶网约车	无人驾驶公交车
技术现状	特定区域实现稳定运行	技术成熟度较高，但复杂路况表现仍需优化	技术成熟度较低，主要用于封闭园区或固定路线
	技术成熟度较高，能应对日常路况		
	复杂路况表现需提升		
	需配备安全员，未完全无人化远程监控车辆实况	需配备安全员，未完全无人化远程监控车辆实况	未实现完全无人化，需配备安全员远程监控车辆；复杂路况表现较差

商业化现状		萝卜快跑等平台仅在部分城市实施试点运营	滴滴等平台处于测试阶段	商业化进程较慢，主要用于封闭园区或特定路线
		覆盖范围有限	覆盖范围有限	硬件成本高
		硬件成本高，政策限制多	硬件成本高，政策限制多	政策限制多
公众态度	正面评价 56.21%	科技感强、未来趋势	期待价格实惠、服务优质	对运营效率表示认可
	负面评价 38.1%	安全性担忧、乘坐体验不佳	安全性担忧、技术成熟度质疑	安全性担忧、适用范围有限
	中性评价 5.69%	观望态度	观望态度	观望态度
公众关注	安全性	突发情况应对能力	复杂路况表现	突发情况应对能力
	价格	与传统出租车持平或更低	与传统网约车持平或更低	与传统公交持平或更低
	其他	乘坐体验：车内空间、智能化服务	服务质量：响应速度、舒适度	运营效率：准点率、覆盖范围

由此可见，近年来无人驾驶技术在特定场景中取得了显著进展，尤其是在封闭园区和城市固定路线上，已能实现稳定运行。以百度 Apollo、萝卜快跑为代表，多数无人驾驶汽车技术成熟度较高，能应对大部分日常路况，展现出较强实用性和可靠性。但面对复杂路况（如雨雪天气、突发交通事件等）时，其表现有待提升。由于技术尚未完全成熟，目前仍需配备安全员，距离真正的“无人化”有一定距离。



图 1 用户乘坐“萝卜快跑”后评价词云图

综上，公众对无人驾驶的态度以积极为主，但对安全性和技术成熟度仍存疑虑。未来随着技术的不断进步和政策的逐步完善，无人驾驶有望在更多场景中实现商业化应用，为人们带来更加便捷、安全、舒适的出行体验。前提是要解决技术、成本、政策和社会接受度等方面的挑战。公众对无人驾驶的关注点主要集中在安全性、乘坐体验和价格方面。安全性是用户最关心的问题，尤其是在突发情况下的应对能力；同时，用户也希望无人驾驶汽车能够提供更舒适的乘坐体验，如宽敞的车内空间、智能化的服务等；此外，价格是否与传统出租车持平或更低，也是影响用户选择的重要因素。

三、调查策划与实施

（一）调查方案设计

本文通过查阅文献深入挖掘无人驾驶汽车的发展趋势，采用问卷调查、访谈等方法了解消费者对乘坐无人驾驶汽车的需求、接受度、担忧及支付意愿，为无人驾驶汽车服务商提供市场进入和运营策略支持，进一步推动无人驾驶汽车的市场发展与进步。

（二）调查内容

有出行需求的消费者（包括驾驶者和非驾驶者）的用户特征（包括性别、年龄、最高学历等）、日常出行习惯与偏好、对无人驾驶出租车 / 公交车的认知与态度、消费者认为的无人驾驶出租车 / 公交车发展影响因素、对无人驾驶出租车 / 公交车未来期望。

（三）抽样设计

本研究采用多阶段分层抽样，主要以调查问卷的形式展开进行，面对面访问调查等方法为辅。首先根据中国地理区域划分，采用分层随机抽样；再将全国划分为华北、东北、华东、华中、华南、西南、西北七大地区，在各个地区分别按照常住人口数成比例进行放回不等概率抽样；最后进行方便抽样、简单随机抽样。

（四）问卷设计

问卷共分为六大板块。第一部分为消费者的个人信息，如性别、年龄、学历、职业等基本信息。第二部分为出行习惯及偏好，如出行频率、出行方式等。第三部分为对无人驾驶出租车 / 网约车 / 公交车的认知与态度，如是否了解无人驾驶汽车、对无人驾驶汽车发展现状的认知。第四部分为无人驾驶出租车 / 网约车 / 公交车发展的影响因素，包括政策因素、技术因素、环境因素、服务质量与用户体验因素。第五部分为对无人驾驶汽车在共享经济下的期望；最后为综合比较与未来期望。

预调查于2024年12月收集到82份数据，对其进行信效度检验后优化问卷。正式调查于2025年1月开始实施，共发放1000份问卷，回收893份。其中有效问卷共888份，有效率达99.44%，调研结果有充分的有效性。

（五）信效度检验

1. 信度检验

一般情况下，信度检验中的克隆巴赫系数在0.8–0.9之间为很可信，0.9–1之间为非常可信。本研究所有变量的克隆巴赫系数如表2所示。

表2 无人驾驶汽车行业发展影响因素量表信度分析

变量	克隆巴赫系数	项数	信度评价
政策因素	0.906	3	非常可信
技术因素	0.909	4	非常可信
环境因素	0.893	3	可信
服务质量与用户体验因素	0.874	3	可信
无人驾驶汽车行业发展影响因素	0.909	13	非常可信

由上表可知，无人驾驶汽车行业发展影响因素总体及各二级维度的信度系数均>0.8，则说明本次调查所使用的量表均具有

很好的内部一致性，信度很好。

2. 效度检验

（1）结构效度

将收集到的数据选项进行变量替换，替换结果如表3所示。

表3 变量替换

维度	选项	变量
政策因素	道路准入政策	ZC1
	事故责任认定法规	ZC2
	定期检测与监管政策	ZC3
技术因素	人工智能技术的成熟程度	JS1
	传感技术的成熟度	JS2
	数据安全与隐私保护	JS3
	无人驾驶车的行驶安全	JS4
环境因素	共享出行的普及程度	HJ1
	市场需求程度	HJ2
	交通安全	HJ3
服务质量与用户体验因素	价格的高低	FW1
	平台的接单效率	FW2
	售后	FW3

进一步进行模型适配度检验得到结果表4。

表4 模型适配度检验

指标	参考标准	实测结果
CMIN/DF	1–3为优秀，3–5为良好	2.366
RMSEA	<0.05为优秀，<0.08为良好	0.039
IFI	>0.9为优秀，>0.8为良好	0.990
TLI	>0.9为优秀，>0.8为良好	0.987
CFI	>0.9为优秀，>0.8为良好	0.990

根据表结果可以看出，（卡方自由度比）=2.366，在1–3的优秀范围内，（误差均方根）=0.039，在<0.05的优秀范围内。另外、以及的检测结果均达到了0.9以上的优秀水平。

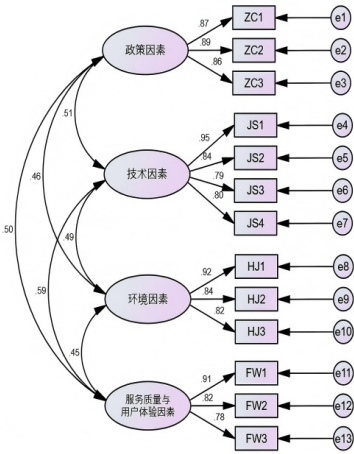


图2 无人驾驶汽车行业发展影响因素量表模型

因此，综合图2及本文的分析结果可以说明，无人驾驶汽车行业发展影响因素量表 CFA 模型具有良好的适配度。

（2）聚合效度

对无人驾驶汽车行业发展影响因素量表各个维度进行聚合效度检验，结果如表5。

表5 无人驾驶汽车行业发展影响因素量表各个维度聚合效度检验

路径关系			Estimate	AVE	CR
ZC1	<---	政策因素	0.873	0.7635	0.9064
ZC2	<---	政策因素	0.890		
ZC3	<---	政策因素	0.858		
JS1	<---	技术因素	0.951	0.7193	0.9107
JS2	<---	技术因素	0.838		
JS3	<---	技术因素	0.794		
JS4	<---	技术因素	0.800		
HJ1	<---	环境因素	0.919	0.7392	0.8945
HJ2	<---	环境因素	0.836		
HJ3	<---	环境因素	0.821		
FW1	<---	服务质量与用户体验因素	0.911	0.7040	0.8766
FW2	<---	服务质量与用户体验因素	0.816		
FW3	<---	服务质量与用户体验因素	0.785		

根据结果可以看出，在本次无人驾驶汽车行业发展影响因素量表聚合效度检验中，各个维度的 AVE 值均达到了 0.5 以上，CR 值均达到了 0.7 以上，综合可以说明各个维度均具有良好的聚合效度。

（3）区分效度

对无人驾驶汽车行业发展影响因素量表各个维度进行区分效度检验，结果如表 6 所示。

表6 无人驾驶汽车行业发展影响因素量表各个维度区分效度检验结果

变量	政策因素	技术因素	环境因素	服务质量与用户体验因素
政策因素	0.764(AVE)			
技术因素	0.509	0.719(AVE)		
环境因素	0.464	0.495	0.739(AVE)	
服务质量与用户体验因素	0.497	0.592	0.452	0.704(AVE)
AVE 值平方根	0.874	0.848	0.860	0.839

根据结果可知，在本次区分效度检验中，各个维度两两之间的标准化相关系数均小于维度所对应的 AVE 值的平方根，因此说明各个维度之间均具有良好的区分效度。

综合上述效度检验结果可知，本次调查问卷具有较高的效度。

四、发展现状认知与分析

（一）基于描述性统计的样本结构

1. 受访者基本情况

本次受访者集中为 15-24 岁的青年人，女性多于男性，最高学历集中在高中及以上。调查对象为企业员工、学生为主，月收入水平中等偏上，大多居住在华东、华南地区，超过 65% 的受访者具有驾驶经历。

表7 受访者基本情况

调查内容		频数	百分比
性别	男	401	45.16%
	女	487	54.84%

年龄	15-24 岁	296	33.33%
	25-34 岁	188	21.17%
	35-44 岁	201	22.64%
	45-54 岁	139	15.65%
	55 岁及以上	64	7.21%
最高学历	初中及以下	207	23.31%
	高中 / 中专学历	195	21.96%
	本科 / 大专学历	404	45.50%
	硕士及以上	82	9.23%
职业	企业员工 (国企, 外企, 民企)	298	33.56%
	事业单位人员 / 国家机关人员	42	4.73%
	个体经营者	113	12.73%
	学生	221	24.89%
	自由职业者	124	13.96%
	退休人员	25	2.82%
	其他 (请注明)	65	7.32%
常住地区	华北地区 (北京市, 天津市, 河北省, 山西省, 内蒙古自治区)	61	6.87%
	东北地区 (黑龙江省, 吉林省, 辽宁省)	58	6.53%
	华东地区 (山东省, 江苏省, 安徽省, 上海市, 浙江省, 江西省, 福建省, 台湾省)	222	25.00%
	华中地区 (河南省, 湖北省, 湖南省)	127	14.30%
	华南地区 (广东省, 广西壮族自治区, 海南省, 香港特别行政区, 澳门特别行政区)	296	33.33%
	西南地区 (重庆市, 四川省, 贵州省, 云南省, 西藏自治区)	83	9.35%
	西北地区 (陕西省, 甘肃省, 宁夏回族自治区, 青海省, 新疆维吾尔自治区)	41	4.62%
月收入水平 (或生活费)	1500 元以下	121	13.63%
	1500-3000 元	148	16.67%
	3001-6000 元	193	21.73%
	6001-10000 元	201	22.64%
	10001-15000 元	161	18.13%
	15000 元以上	64	7.21%
是否有驾驶经历	否	290	32.66%
	是	598	67.34%

（二）民众对无人驾驶汽车行业认知情况

1. 受访者乘坐无人驾驶汽车的情况

由图 3 所示，只有 19.8% 的受访者乘坐过无人驾驶出租车，还有 80.2% 的受访者没有乘坐过无人驾驶出租车。说明其普及程度非常小，为了推动无人驾驶汽车在出行领域的应用，后续需要提高投放范围和数量。

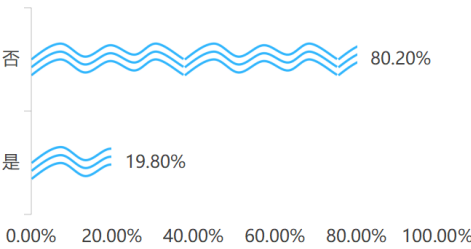


图3 受访者是否乘坐过无人驾驶汽车情况

2. 对无人驾驶汽车的了解程度

民众对无人驾驶汽车的了解程度如图4所示。其中一般了解占比最高，其次是比较了解、非常了解、不太了解、完全不了解。

受访者对无人驾驶汽车了解程度反映其对无人驾驶汽车是否感兴趣，则问卷数据会更具研究意义。

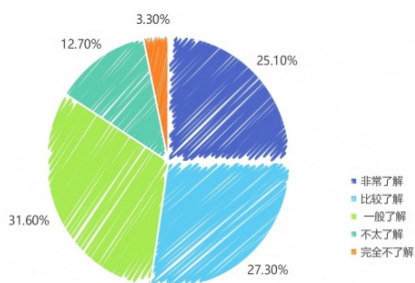


图4 受访者对无人驾驶汽车的了解程度

3. 无人驾驶汽车发展趋势的认可程度

由图5，23.8%的受访者对发展趋势的程度非常认可，30.9%的受访者比较认可，31.1%一般认可，10.0%不太认可，4.3%的受访者对发展趋势非常不认可。



图5 受访者对无人驾驶汽车发展趋势的认可程度

4. 了解无人驾驶汽车的途径

据图6，由受访者第一选项看出其主要从短视频平台、自媒体平台、新闻门户网站等平台了解无人驾驶汽车，反映了民众对无人驾驶汽车的了解主要来源于互联网。

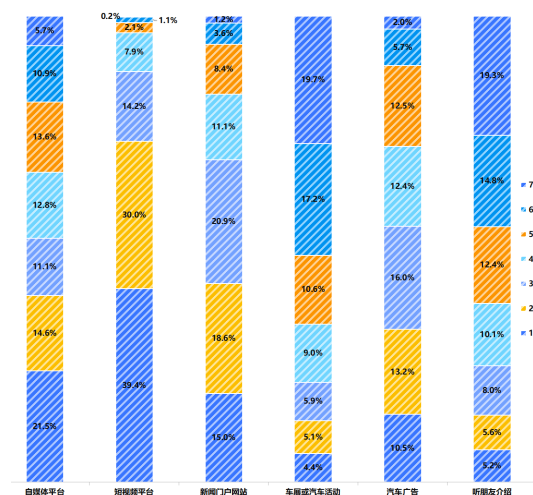


图6 受访者了解无人驾驶汽车的途径

5. 对无人驾驶汽车宣传的认可程度

由图7可知，民众所认为的无人驾驶汽车的宣传程度可以展示出该产业对无人驾驶汽车宣传是否到位，而受访者中绝大多数人认可无人驾驶汽车的宣传程度。

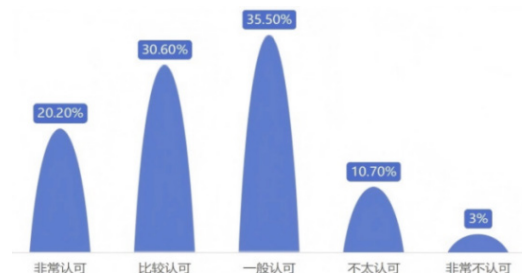


图7 受访者对无人驾驶汽车宣传的认可程度

(三) 无人驾驶汽车普及后的消费者态度 / 消费意愿

1. 消费者对无人驾驶汽车普及后的看法多元化

由图8可知，多数人认为无人驾驶汽车能“降低出行成本”“让出行更加便捷”“给物流等行业带来新发展”等，这些都体现了对其积极影响的认可。不过，也有担忧的声音，如“挤压司机的生存空间”“带来更多交通事故的责任纠纷”等。不同影响因素占比各有差异，反映出人们对无人驾驶汽车未来影响的想法多元化。

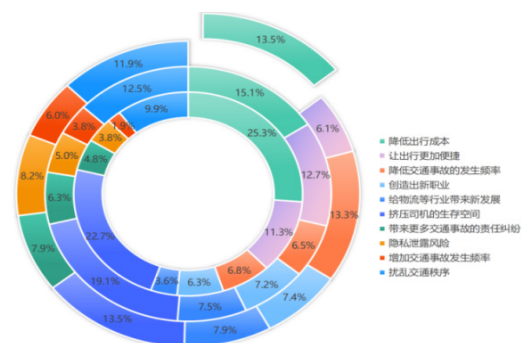


图8 受访者认为无人驾驶汽车普及后产生的影响

2. 消费者比较愿意为无人驾驶汽车花费更高的费用

由调查数据如图9所示，43.6%的受访者比较愿意为无人驾驶汽车花费更高的费用，但希望价格增加合理，且能够与服务相当；27.1%的受访者只要服务明显提升就愿意支付更高票价；24.2%的受访者希望价格基本持平；仅有5.1%的受访者不愿意，希望保持现有票价水平。

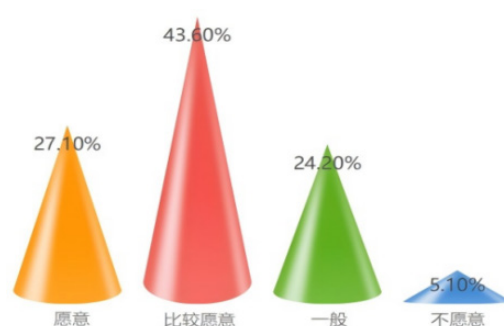


图9 受访者对无人驾驶汽车产生更高消费的意愿情况

3. 无人驾驶汽车普及后消费者会更倾向于选择无人驾驶汽车

根据该图10前3级对比分析，可以看出在受访者心中无人驾驶普及后的出行方式排序前三的几个出行方式中，占比最高的

是无人驾驶网约车，其次是无人驾驶出租车，第三是无人驾驶公交车。

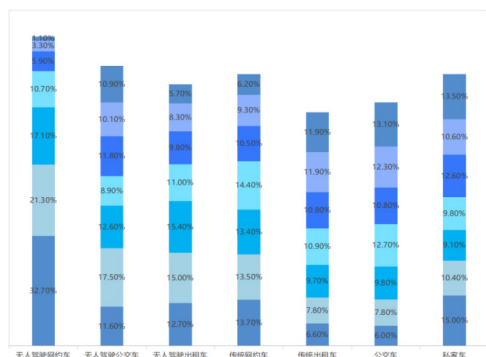


图10 受访者在无人驾驶汽车普及后会选择的出行方式

综上，无人驾驶汽车普及后将成为受访者的首选出行工具，绝大多数民众愿意去尝试新的技术，给予新技术一定支持，使无人驾驶汽车在每个地区得到发展。

（四）消费者认为促进无人驾驶汽车行业发展的背后力量

1. 相关政策的完善至关重要

如图11所示，内圈为受访者对政府应该提供什么支持排序第一的几个方式的占比。在消费者所认知及图综合来看，排在前三的依次为：制定更为严格的制度和政策、加大优化整合无人驾驶技术、加大对无人驾驶车的资金投入。

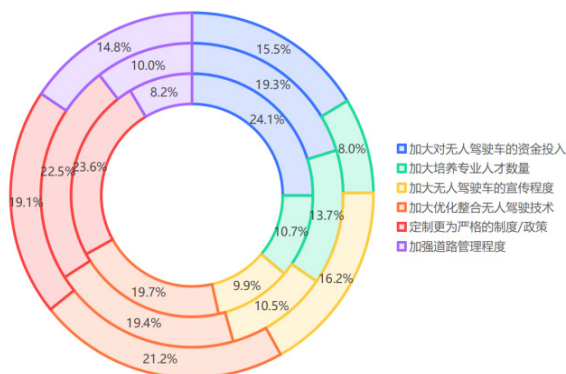


图11 受访者在无人驾驶汽车行业发展中政府应给予的支持

2. 无人驾驶汽车行业应借助互联网进行有效发展

由图12可知，消费者认为应借助数字融媒体进行有效宣传，其次是开启互动短视频、直播模式，并加大对年轻群体的推广，部分消费者认为借助名人效应或将无人驾驶技术推向国际的方式并不能有效地将无人驾驶汽车行业发展起来。

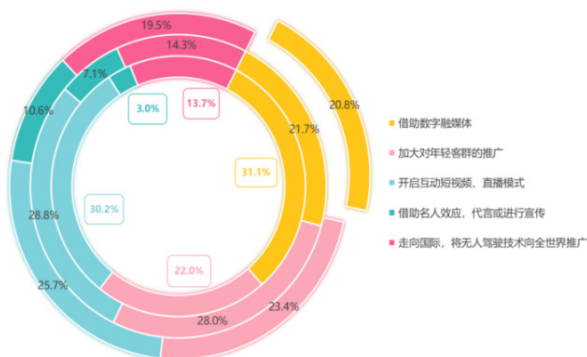


图12 受访者认为该如何借助互联网宣传无人驾驶汽车

综上所述，无人驾驶汽车若在未来能够大范围地推广，消费者很愿意为其买单，助力该产业的发展。对于该产业大范围发展政府应给予支持，如完善相关法律法规，提升消费者对无人驾驶汽车的信任度；有关部门可以借助数字融媒体，加大对年轻个体的推广，让更多对该行业感兴趣的人了解该行业，使推广更加有效。

五、对无人驾驶汽车在共享经济下发展的建议

基于上述结果及结论，从政策协同、技术攻坚、用户体验优化、市场生态构建四大维度提出针对性建议如下：

（一）政策协同：破解法规与准入瓶颈技术创新

1. 优先明确责任划分：联合政府、车企、保险机构制定 L4 级事故责任认定标准，建立多方混合保护机制，以更为严格的制度和政策消除商业化法律风险。

2. 推动区域性政策试点：在华南、华东等经济发达地区先行开放全区域路权（如广州、上海全域），可设置无人驾驶汽车专用通行道路，同时完善配套法规；在华北、东北等地区陆续开放无人驾驶汽车试点，让更多人了解并体验。

3. 加大资金投入与人才培养：联合高校培养跨学科相关人才，如涉及 AI 算法、车辆工程、交通规划等多领域的跨越，相关政策与资金支持企业联合高校实验室定向培养人才，实现技术突破、产业升级与社会效益的三重共赢。

（二）技术攻坚：聚焦核心痛点突破

1. AI 算法与安全性能升级：投入研发极端场景（如暴雨天气、行人突然闯入）的决策模型，降低极端场景误判，压缩车辆行驶时的决策响应时间。

2. 数据安全与隐私保护：构建去中心化数据交易平台，采用联邦学习技术实现数据可用不可见，并通过区块链记录数据使用轨迹，提升用户信任度，保证用户的数据安全与隐私安全^[15]。

（三）用户体验优化：构建“成本—效率—信任”三角模型

1. 灵活式定价策略：由于消费者需求场景不同，可推出“学生优惠”“特殊时段折扣”“通勤特惠”“新手礼包”等优惠策略吸引用户使用，提高体验度。

2. 智能化调度系统的升级：根据用户所在地及空闲车辆所在地，合理安排接单距离及接单时间，以优化接单效率，实现高效接单，从而提升接送乘客效率。

3. 全程服务保障：在行驶过程中面对突发事件，平台能够高效处理并给予乘客满意的处理方式，以保障客户权益，增加回头客。

（四）市场生态构建：从试点到规模化渗透

1. 共享出行企业联合发展：平台与平台之间可以构建合作模式，如“滴滴出行”“高德地图”打车平台与多家平台合作，达到企业共赢的目的。无人驾驶汽车服务平台如“萝卜快跑”可以联合多家企业，推出无人驾驶汽车服务专栏。

2. 加大宣传力度：利用数字融媒体进行有效宣传，如在抖

音、小红书等自媒体平台，微博、今日头条等新闻网站进行推广；其次是开启互动短视频、直播模式，加大对年轻群体的推广，甚至推向国际，走向世界舞台。

六、结束语

无人驾驶汽车 + 共享经济的发展正在逐步扩大市场范围，绝大多数的消费者对该行业的发展现状及前景表示认可，但也有少部分人认为该行业近年来的发展并不会迅猛增长。消费者的年

龄、学历、月收入、常驻地区等因素会影响其对该产业的认知，相关产业应根据人群特征设计出适合各个人群的消费模式。由于无人驾驶汽车目前仅在试点运行，并没有全覆盖式开通业务，导致其市场渗透率低、体验缺口显著、需求转化受阻。加大对无人驾驶汽车的投放力度或许会改善这一情况。

无人驾驶汽车行业与共享经济的联合是偶然，更是必然。无人驾驶汽车的消费需求既受技术驱动，也与社会经济、政策环境紧密相关。无论是政府、高校、企业都需通过对该行业的精准定位，实现从技术优势到市场价值的转化。

参考文献

[1] 张苏慧. 多地政策扶持加速无人驾驶出租车商业化落地 [N]. 通信信息报, 2024-07-17(007).DOI: 10.28808/n.cnki.ntxxx.2024.000288.

[2] 凌尧帆. 共享无人驾驶汽车侵权责任研究 [J]. 河北企业, 2020, (10): 147-148.DOI: 10.19885/j.cnki.hbqy.2020.10.068.

[3] 吴冬升. 2022年上半年车联网“十四五”规划大盘点 [J]. 智能网联汽车, 2022, (04): 15-19.

[4] 黄辛旭. 萝卜快跑在多个城市成功试运营无人驾驶出租车真正落地仍有挑战 [N]. 每日经济新闻, 2024-08-23(001).DOI: 10.28571/n.cnki.nmrjj.2024.002404.

[5] 程砚桥. 滴滴苹果合作开发无人驾驶技术对共享经济的影响 [J]. 全国商情, 2016, (31): 59-60.DOI: 10.16834/j.cnki.issn1009-5292.2016.31.035.

[6] 崔博. Uber 打车背后的资本乱战 [J]. 经济, 2015, (07): 68-71.

[7] 王宇. 访清华大学教授、清华大学 - 剑桥大学 - 麻省理工学院未来交通研究中心主吴建平共享 + 无人驾驶未来交通新业态 [J]. 交通建设与管理, 2017, (06): 36-37.

[8] 翟彬宏. 无人驾驶小型共享电动汽车设计研究 [D]. 东南大学, 2021.DOI: 10.27014/d.cnki.gdnau.2021.001264.

[9] 孙龄波, 唐秋生, 游宇. 基于改进 TAM 的无人驾驶出租车接受度研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(06): 1540-1549.DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.t20210822.

[10] 李嘉鹏. “智能 +” 时代背景下无人驾网约车的设计与实践 [J]. 汽车画刊, 2024, (05): 3-5.

[11] 高驰. 低价试水, 多城竞速, 无人驾驶网约车市场升温 [J]. 汽车与配件, 2024, (15): 70.

[12] 李飞. 无人驾驶技术在城市公交系统中的应用与挑战 [J]. 人民公交, 2024, (15): 72-75.DOI: 10.16857/j.cnki.cn11-5903/u.2024.15.017.

[13] 董子楠. 无人驾驶公交车公众接受度及影响因素研究 [D]. 华东交通大学, 2024.

[14] 孙慧倩, 景鹏, 贺正冰, 等. 技术革新对出租车司机职业的冲击: “萝卜快跑”事件下的公众社会认知与情感倾向 [J]. 交通运输工程与信息学报, 2024, 22(04): 13-24. DOI: 10.19961/j.cnki.1672-4747.2024.08.012.

[15] 熊波波, 程玉桂. 隐私视角下乘客对无人驾驶出租车服务的信任研究 [J]. 交通运输工程与信息学报, 2024, 22(01): 39-53.DOI: 10.19961/j.cnki.1672-4747.2023.08.005.

中国制造业碳排放强度收敛趋势及其驱动因素研究

游建民^{1,2}

1. 贵州省社会科学院 工业经济研究所, 贵州 贵阳 550002

2. 广州大学 经济与统计学院, 广东 广州 510006

DOI:10.61369/ASDS.2025050007

摘要： 推进制造业内部各细分行业碳排放强度向低水平区间收敛，对于精准施策、协同推进制造业整体降碳具有重要现实意义。本文基于2000–2021年中国制造业27个细分行业面板数据，通过构建 σ 收敛和 β 收敛模型，实证分析中国制造业碳排放强度收敛特征及其驱动因素。研究发现：整体制造业碳排放强度离散程度呈扩大趋势，不存在 σ 收敛现象。技术密集型制造业表现出明显局部 σ 收敛特征，劳动密集型和资本密集型制造业均呈现发散态势；整体制造业碳排放强度存在显著的绝对 β 收敛和条件 β 收敛特征，能源结构、能源效率和资本深化对制造业碳排放强度收敛产生正向影响，而企业平均规模和行业结构呈负向影响；三类制造业收敛模式存在显著差异，劳动密集型制造业收敛最快，资本密集型制造业收敛最慢，技术密集型制造业收敛速度居中。根据研究发现，本文针对性提出建立分类施策的政策体系和构建系统性的碳减排及收敛促进机制等政策建议。

关键词： 制造业；碳排放强度；收敛；驱动因素

Research on the Convergence Trend of Carbon Emission Intensity in China's Manufacturing Industry and Its Driving Factors

You Jianmin^{1,2}

1. Industrial Economics Research Institute, Guizhou Academy of Social Sciences, Guiyang, Guizhou 550002

2. School of Economics and Statistics, Guangzhou University, Guangzhou, Guangdong 510006

Abstract： Promoting the convergence of carbon emission intensity across various subsectors within the manufacturing industry towards lower levels holds significant practical importance for implementing targeted policies and synergistically advancing the overall carbon reduction in the sector. Based on panel data from 27 subsectors of China's manufacturing industry between 2000 and 2021, this paper empirically analyzes the convergence characteristics of carbon emission intensity and its driving factors by constructing σ convergence and β convergence models. The research findings reveal that: The overall dispersion degree of carbon emission intensity in manufacturing shows an expanding trend, indicating no σ convergence. Technology-intensive manufacturing exhibits distinct localized σ convergence, while both labor-intensive and capital-intensive manufacturing display divergence trends. The overall manufacturing carbon emission intensity demonstrates significant absolute β convergence and conditional β convergence characteristics. Energy structure, energy efficiency, and capital deepening exert a positive influence on the convergence of manufacturing carbon emission intensity, whereas average enterprise size and industry structure have a negative impact. Significant differences exist in the convergence patterns of the three types of manufacturing: labor-intensive manufacturing converges the fastest, capital-intensive manufacturing converges the slowest, and technology-intensive manufacturing exhibits a moderate convergence speed. Based on the findings, this paper proposes targeted policy recommendations, including establishing a classified policy system and constructing a systematic mechanism to promote carbon reduction and convergence.

Keywords： manufacturing industry; carbon emission intensity; convergence; driving factors

引言

中国制造业在规模持续扩张、深度融入全球分工体系的过程中，长期面临“低端锁定”与“碳锁定”的双重困境挑战^[1]。这不仅制

基金项目：2023年度国家社会科学基金重点项目“传统制造业高端化低碳化发展的错位失衡与数字协同治理研究”（23CJY021）。

作者简介：游建民，贵州省社会科学院工业经济研究所，副研究员，博士，研究方向为低碳经济、绿色经济。

约了制造业向全球价值链中高端的攀升，也延缓了绿色化、低碳化转型步伐，导致能源消费量和碳排放强度长期居高不下。在此背景下，制造业形成了较为显著的“高物耗、高能耗、高碳排放、低效率”的粗放式、外延式发展模式^[2]，由能源消耗引致的碳排放量急剧攀升，对生态环境的影响日益凸显。中国制造业碳排放量在2000–2021年间从12.27亿吨激增至34.75亿吨^[3]，年均增速高达9.91%，已成为仅次于能源行业的第二大碳排放源^[4]。在制造业碳排放总量持续增长的同时，由于各细分行业在技术特征、要素密集度、发展阶段、政策响应速度以及资源禀赋利用效率等方面存在巨大差异，其碳排放强度呈现出较为明显的差异性，行业间差距及其动态演变趋势日益复杂化。这种行业内部的巨大分异，使得整体制造业绿色低碳转型面临严峻挑战。

2020年“双碳”战略目标提出后，我国逐步构建起完善的碳达峰“1+N”政策体系，明确要求“全国一盘棋”“根据各地实际分类施策”^[5]。对于制造业这一关键领域而言，实现碳达峰碳中和的核心路径在于推动产业规模增长与碳排放深度脱钩。从收敛的含义上讲，这意味着各行业的碳排放强度在达峰后能持续下降，并最终收敛至一个稳定且较低的水平区间——即行业间碳排放强度的差距不断缩小，从而实现整体向低碳高效发展模式的趋同。因此，科学识别中国制造业内部细分行业碳排放强度是否存在收敛趋势、呈现何种收敛模式（绝对收敛还是条件收敛），并深入探究驱动或阻碍了这一收敛过程的关键因素，对于精准施策、协同推进制造业整体低碳转型具有重要的现实意义。

制造业作为国民经济的重要支柱，其碳排放强度成为经济社会全面绿色转型的重要指标，逐渐成为专家学者关注的重要议题。近年来，关于中国制造业碳排放强度研究逐渐增多，并取得了较为丰富的成果，在制造业碳排放强度测算方法和特征分析方面形成了较为成熟的理论框架^[6,7]。然而，当前研究多集中于总量特征分析，并指行业间差异的存在及其与能源结构、行业结构、外资利用、技术进步等的关联^[6,8,9]，但对制造业内部细分行业碳排放强度的收敛规律及其驱动因素分析尚显不足。本文通过回答以下几个核心问题：中国制造业碳排放强度在长期内是否存在 σ 收敛和 β 收敛趋势？驱动其收敛的关键因素是什么？考虑到行业异质性，劳动密集型、资本密集型、技术密集型等类型行业的收敛路径与驱动机制是否存在显著差异？对这些问题的深入探究，将为制定差异化、精准化的制造业碳减排政策，落实全国降碳一盘棋提供坚实的科学依据。

一、研究设计

（一） σ 收敛分析

离散程度是分析检验制造业碳排放强度 σ 收敛的重要指标。如果制造业碳排放强度的离散程度虽时间的推移呈现逐年缩小的态势，则表明其存在 σ 收敛。反之，则不存在 σ 收敛。本文采用变异系数动态测度制造业内部细分行业的碳排放强度离散程度。

$$CV_t = \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\ln CI_{it} - \overline{\ln CI_t})^2}{\overline{\ln CI_t}}} \quad (1)$$

其中， i 为细分行业， CV 代表制造业碳排放强度的变异系数， CI 代表制造业碳排放强度， \overline{CI} 代表制造业碳排放强度的平均值， N 代表制造业内部细分行业总数， \ln 代表去自然对数。若

$\frac{\partial CV_t}{\partial t} < 0$ ，且通过显著性检验（ $p < 0.05$ ），则存在 σ 收敛。

（二） β 收敛分析

β 收敛分析分为两种：绝对 β 收敛分析和条件 β 收敛分析。

1. 绝对 β 收敛分析

绝对 β 收敛是指制造业内部每个细分行业的碳排放强度呈现完全一致的稳态增长趋势。高碳排放强度的行业，其碳排放增长率快于低碳排放强度的行业。具体检测公式如下：

$$\Delta \ln CI_{it} = \alpha + \beta \ln CI_{i,t-1} + \lambda_i + \mu_i + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

其中， i 为细分行业， $\Delta \ln CI_{it} = \ln CI_{it} - \ln CI_{i,t-1}$ ，表为 i 行业碳

排放强度在 t 年的平均增长率， $\ln CI_{it}$ 和 $\ln CI_{i,t-1}$ 为 i 行业在 t 和 $t-1$ 年的碳排放强度， α 为截距项， β 为碳排放强度的回归系数， $\beta < 0$ 表示存在收敛，收敛速度 $s = -\frac{\ln(1+\beta)}{\Delta t}$ ， λ_i 、 μ_i 、 ε_{it} 分别表示制造业碳排放强度的行业固定效应、时间固定效应以及其他干扰项。

2. 条件 β 收敛分析

条件 β 收敛分析是指是指在考虑行业特性和外部影响因素的基础上，制造业各细分行业的碳排放强度逐渐趋向各自的稳态水平。具体来说，行业的初始碳排放强度水平会对碳排放强度的变化产生一定影响，但这种影响会随着时间的推移逐渐减少。在绝对 β 收敛模型基础上，引入了对碳排放强度变动具有影响的条件变量，例如能源结构、研发强度、行业结构等因素，便构成了条件 β 收敛模型。具体检验公式如下：

$$\Delta \ln CI_{it} = \alpha + \beta \ln CI_{i,t-1} + \sum_{k=1}^6 r_k \ln X_{k,it} + \lambda_i + \mu_i + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

其中， $X_{k,it}$ 代表控制变量，包含能源结构（ES）、能源效率（EE）、企业平均规模（Size）、资本深化（KL）、行业结构（STR）和研发强度（RD）等6个因素，其他变量含义同上。能源结构（ES）与能源效率（EE）作为核心路径直接影响收敛。在能源结构中，煤炭占比高，将增加减排难度阻碍行业碳强度收敛，而能源利用率提升则促进低碳技术扩散，加速收敛进程。企业规模（Size）通过规模效应发挥作用，大规模企业更强的减排投资能力有助于推动收敛。资本深化（KL）对制造业碳排放收敛存在双重影响：一方面可能因技术升级（如先进设备替代）促进收敛，

另一方面也可能因高碳设备的“锁定效应”延缓转型，阻碍收敛。行业结构（STR）反映产业结构升级，高技术产业占比提高能显著降低整体排放强度，是促进收敛的关键因素。研发强度（RD）则通过驱动低碳技术创新与应用，为加速收敛提供持续动力。

（三）制造业行业类别划分

为揭示制造业碳排放强度收敛的异质性特征，依据行业的要素密度，参照钟世川和毛艳华^[10]的研究，将制造业内部27个细分行业划分为劳动密集型、资本密集型和技术密集型等3大类。其中，劳动密集型行业以劳动力投入为主，碳排放强度受产业结构升级和劳动力替代的影响较大；资本密集型行业依赖大量固定资产投入，其碳排放水平主要受到设备更新和生产效率的影响；而技术密集型行业则以高研发投入和技术创新为特征，碳排放强度变化更多取决于技术进步和能源利用效率的提升。具体标准划分如表1。

表1 制造业行业类别划分

行业类别	具体行业
劳动密集型	农副食品加工业 食品制造业 纺织业 纺织服装、鞋、帽制造业 皮革、毛皮、羽毛（绒）及其制品业 木材加工及木、竹、藤、棕、草制品业 家具制造业 文教体育用品制造业
	饮料制造业 烟草制品业 造纸及纸制品业 印刷业和记录媒介的复制 石油加工、炼焦及核燃料加工业 化学原料及化学制品制造业 化学纤维制造业 橡胶和塑料制品业 非金属矿物制品业 黑色金属冶炼及压延加工业 有色金属冶炼及压延加工业 金属制品业 通用设备制造业 交通运输设备制造业
技术密集型	医药制造业 专用设备制造业 电气机械及器材制造业 通信设备、计算机及其他电子设备制造业 仪器仪表及文化、办公用机械制造业

（四）数据来源及说明

本文采用2000–2021年中国制造业27个细分行业的平衡面板数据，核心变量构建如下：（1）碳排放强度（CI）通过行业碳排放量与可比价制造业总产值的比值计算，其中27个细分行业碳排放量来源于CEADs数据库；（2）控制变量数据中，能源结构（煤炭消费占比）与能源效率（单位总产值能耗）源自《中国能源统计年鉴》，企业平均规模（主营业务收入/企业数）、资本深化（固定资产/从业人数）及行业结构（总产值占比）来源于《中国工业统计年鉴》，R&D强度（R&D经费内部支出/主营业务收入）来源于《中国科技统计年鉴》；（3）制造业总产值统一以2000年为基期，利用行业生产者出厂价格指数（PPI）平减为实

际值。在数据处理中，行业分类依据 GB/T 4754 标准进行历史口径衔接，对零星缺失值采用线性插值法填补。

表2 变量定义及数据来源

变量类型	变量	简写	测算方法	数据来源
被解释变量	制造业碳排放强度	CI	行业碳排放量 / 制造业总产值增	CEADs数据库、《中国能源统计年鉴》
核心解释变量	滞后碳排放强度	$CI_{i,t-1}$	滞后一期对数	计算生成
控制变量	能源结构	ES	煤炭消费量占比（%）	《中国能源统计年鉴》
	能源效率	EE	能源消费总量 / 制造业总产值增（吨标煤 / 万元）	《中国能源统计年鉴》
	企业平均规模	Size	主营业务收入 / 企业数（亿元 / 家）	《中国工业统计年鉴》
	资本深化	KL	固定资产 / 从业人员数（万元 / 人）	《中国工业统计年鉴》
	行业结构	STR	行业增加值占制造业总值比重（%）	《中国统计年鉴》
	研发强度	RD	R&D经费内部支出 / 主营业务收入（%）	《中国科技统计年鉴》

二、实证结果分析

（一） σ 收敛分析

基于前文 σ 收敛分析方法，本文对制造业碳排放强度离散程度进行测度，结果显示，不同类别制造业碳排放强度的收敛态势呈现出明显的差异性（图1）。从整体制造业发展态势来看，碳排放强度离散程度（CV）由2000年的2.100逐步攀升至2021年的2.810，这一变化趋势显示出制造业碳排放强度的离散程度在不断扩大，整体上并不存在 σ 收敛现象。

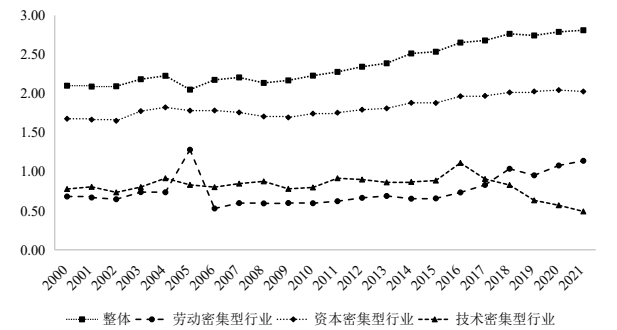


图1 中国制造业碳排放强度 σ 收敛趋势

从分行业类别分析来看。劳动密集型制造业的演变态势波动性较大。2005年 CV 值攀升至1.281，出现异常情况，之后，从2006年的0.529逐步上升至2021年的1.139，特别是2016年以来的上升趋势更为显著；资本密集型制造业则呈现出相对平稳但持续上升的态势，其 CV 值从2000年的1.677总体上升至2021年的2.026，期间虽有小幅波动但整体上升趋势明显；技术密集型制造业展现出与其他类型制造业截然不同的收敛模式。2000–2016年

期间，CV 值波动较为明显，而在2016年之后，其 CV 值再次下降，由2016年的1.112大幅下降至2021年的0.491，表现出典型的 σ 收敛特征。总的来看，在制造业各类型中，唯有技术密集型制造业内部的碳排放强度差异正在逐步缩小，呈现局部 σ 收敛，其他类型制造业均呈现出离散程度持续扩大的发散态势， σ 收敛趋势并不存在。

(二) β 收敛分析

根据 β 收敛分析方法，本文检验测度了整体制造业碳排放强度 β 收敛性。详见表3。检验结果显示，制造业碳排放强度存在显著的绝对 β 收敛特征。 $\ln CI_{i,t-1}$ 系数为 -0.111，显著为负，表明碳排放强度较高的行业确实呈现更快的下降趋势，符合绝对 β 收敛的理论预期。模型的 R^2 为0.197，Hausman 检验统计量为5.232，在5%水平上显著，表明采用固定效应模型是合适的。这一结果说明，在不考虑其他影响因素的情况下，制造业内部各细分行业的碳排放强度正朝着共同的稳态水平收敛。

从条件 β 收敛结果来看，引入控制变量后，Hausman 检验仍支持采用固定效应模型。 $\ln CI_{i,t-1}$ 系数为 -0.207，显著性和绝对值均高于绝对 β 收敛。这表明在控制其他因素后，制造业碳排放强度的收敛效应更加明显。在控制变量中，各变量的影响效应存在显著差异。从影响方向看，能源结构、能源效率和资本深化对碳排放强度收敛产生正向影响，而企业平均规模和行业结构呈负向影响，研发强度虽为负但不显著。比较来看，行业结构调整的减排效应最为显著，系数绝对值达2.317，远超其他变量，表明产业结构优化是降低碳排放强度的关键因素。其次是研发强度，尽管统计不显著但系数达 -1.427，显示技术创新的潜在重要性。能源效率的正向系数为0.304，表明当前制造业能源利用效率仍有较大提升空间。相比之下，企业规模和资本深化的影响相对较小，但资本深化的高显著性值得关注。

从 β 收敛速度来看，绝对 β 收敛速度为0.118，年收敛速度约为11.8%；条件 β 收敛速度为0.232，即年收敛速度约为0.232。条件 β 收敛速度明显高于绝对 β 收敛，这表明在考虑能源结构、能源效率、企业平均规模、资本深化、行业结构、研发强度等因素后，制造业碳排放强度的收敛进程显著加快。这意味着，通过优化能源结构、提升能源效率等政策措施，可以有效加速制造业碳排放强度向更低水平收敛的进程。

表3 整体制造业碳排放强度 β 收敛性检验结果

变量	绝对 β 收敛	条件 β 收敛
$\ln CI_{i,t-1}$	-0.111*** (-11.51)	-0.207*** (-12.47)
能源结构 (ES)	——	0.21* (1.80)
能源效率 (EE)	——	0.304*** (7.07)
企业平均规模 (Size)	——	-0.003* (-1.92)
资本深化 (KL)	——	0.001*** (-3.50)
行业结构 (STR)	——	-2.317** (-2.04)
研发强度 (RD)	——	-1.427 (-1.28)
收敛速度 (s)	0.118	0.232
行业固定效应	Yes	Yes
时间固定效应	Yes	Yes
观测值	567	567

R^2	0.197	0.272
常数项	0.01 (1.08)	-0.033 (-0.61)
Hausman test	5.232**	46.949***

注：() 内的为 t 值；*、** 和 *** 分别表示在 10%、5% 和 1% 的置信水平下显著。

三、异质性分析

(一) 劳动密集型制造业

由表4来看，劳动密集型制造业碳排放强度表现出显著的绝对 β 收敛和条件 β 收敛特征。在绝对 β 收敛检验中， $\ln CI_{i,t-1}$ 系数为 -0.516，显著为负，表明劳动密集型制造业内部细分行业存在明显的绝对收敛趋势。在控制变量中，能源效率 (EE) 系数为0.955且显著为正，这意味着能源效率的提升有助于促进收敛过程；而资本深化 (KL) 系数为 -0.001且显著为负，说明资本深化程度的差异会影响收敛速度。从收敛速度来看，得出绝对 β 收敛速度约为0.718，这意味着劳动密集型制造业各细分行业间的碳排放强度差距每年缩小约71.8%。在条件 β 收敛分析中，系数为 -0.936，同样显著为负，相比绝对收敛，其收敛速度提升至约150.8%。

(二) 资本密集型制造业

资本密集型制造业碳排放强度同样呈现显著的绝对 β 收敛和条件 β 收敛特征，但收敛模式与劳动密集型存在一定程度上的差异。从绝对 β 收敛检验结果来看， $\ln CI_{i,t-1}$ 系数为 -0.01，虽然显著为负，但系数绝对值较小，收敛速度约为0.01，远低于劳动密集型行业。这表明资本密集型制造业内部碳排放强度的收敛过程相对缓慢。从条件 β 收敛检验结果来看， $\ln CI_{i,t-1}$ 系数为 -0.177，收敛速度提升至约19.3%。在控制变量方面，能源效率 (EE) 和资本深化 (KL) 系数显著为正，企业平均规模 (Size) 系数显著为负。这表明，资本密集型制造业的收敛过程受到多重因素的复杂影响。

(三) 技术密集型制造业

技术密集型制造业表现出中等程度的收敛特征。从绝对 β 收敛检验结果来看， $\ln CI_{i,t-1}$ 系数为 -0.131，在1%水平下显著为负，收敛速度约为0.14，介于劳动密集型和资本密集型之间。从条件 β 收敛检验结果来看， $\ln CI_{i,t-1}$ 系数为 -0.363，收敛速度显著提升至约0.451。在控制变量中，能源效率 (EE) 和研发强度 (RD) 系数为正，这表明技术密集型制造业的收敛过程主要受到能源效率改进和研发投入增强的正向推动。研发强度的显著正效应体现了技术创新在促进碳排放强度收敛中的重要作用。

(四) 三类制造业碳排放强度收敛性的对比分析

综合比较三类制造业碳排放强度的收敛特征发现显著差异。从收敛速度看，劳动密集型制造业收敛最快，为0.718，技术密集型居中为0.14，资本密集型最慢为，0.01。在引入控制变量后，三类制造业的条件 β 收敛速度均有所提升，但相对排序保持不变。从收敛机制看，劳动密集型主要依靠能源效率提升和资本深化调整实现收敛；资本密集型受到企业规模、行业结构等多重因素的复杂影响，收敛过程较为缓慢；技术密集型则主要通过研发

创新和能源效率改进推动收敛。这种差异反映了不同要素密集度行业在碳减排路径和政策响应方面的异质性特征。

表 4 三类制造业碳排放强度 β 收敛性检验结果

变量	劳动密集型制造业		资本密集型制造业		技术密集型制造业	
	绝对 β 收敛	条件 β 收敛	绝对 β 收敛	条件 β 收敛	绝对 β 收敛	条件 β 收敛
$\ln CI_{i,t-1}$	-0.516*** (-7.79)	-0.936*** (-11.75)	-0.01*** (-10.12)	-0.177*** (-10.31)	-0.131*** (-5.55)	-0.363*** (-6.76)
能源结构 (ES)	——	-0.018 (-0.07)	——	0.295 (1.60)	——	0.064 (1.19)
能源效率 (EE)	——	0.955*** (4.08)	——	0.248*** (5.44)	——	0.219*** (4.14)
企业平均规模 (Size)	——	-0.028 (-0.49)	——	-0.003** (-2.02)	——	0.002 (0.71)
资本深化 (KL)	——	-0.001** (-0.79)	——	0.001*** (-3.46)	——	0 (-1.06)
行业结构 (STR)	——	0.615 (0.24)	——	-4.113** (-2.49)	——	-0.059 (0.71)
研发强度 (RD)	——	-3.862 (-2.26)	——	-4.996 (-1.44)	——	1.203** (2.37)
收敛速度 (s)						
行业固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
时间固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
观测值	168	168	294	294	105	105
R ²	0.276	0.476	0.268	0.359	0.237	0.419

常数项	0.074*** (3.86)	0.09*** (0.94)	0.008 (0.82)	0.331*** (6.15)	0.061*** (3.86)	0.150*** (4.15)
Hausman test	4.052**	16.224	1.624	0.331*** (6.15)	4.861*** (6.15)	1.561

注：（）内的为 t 值；*、** 和 *** 分别表示在 10%、5% 和 1% 的置信水平下显著。

潜在作用，而能源结构、企业规模等因素的影响相对有限。

四、研究结论与政策建议

本文基于 2000–2021 年中国制造业 27 个细分行业面板数据，构建 σ 收敛和 β 收敛模型，来实证分析中国制造业碳排放强度收敛特征及其驱动因素，并对其异质性进行分析。通过实证研究，得出以下主要结论：（1）从 σ 收敛角度看，整体制造业碳排放强度离散程度呈扩大趋势，不存在 σ 收敛现象，但技术密集型制造业在 2016 年后表现出明显的 σ 收敛特征，而劳动密集型和资本密集型制造业均呈现发散态势；（2）从 β 收敛角度看，制造业碳排放强度存在显著的绝对 β 收敛和条件 β 收敛特征，绝对收敛速度为 0.118，条件收敛速度达 0.232，表明通过政策干预可以有效加速收敛进程；（3）从三类制造业碳排放强度收敛态势来看，三类制造业收敛模式存在显著差异。劳动密集型制造业收敛最快，主要依靠能源效率提升和资本深化调整。资本密集型制造业收敛最慢，受多重因素复杂影响。技术密集型制造业收敛

根据上述研究结论，本文提出以下两方面的政策建议。首先，应建立分类施策的政策体系。针对技术密集型制造业展现出的良好收敛趋势，政策应着力加强对研发投入的支持和技术创新的激励，充分发挥该行业在整体制造业绿色转型中的引领作用。对于资本密集型制造业，鉴于其收敛进程相对较慢，应通过设备更新改造补贴、绿色金融支持等措施，帮助其突破“碳锁定”困境，推动其向低碳、绿色方向发展。而对于劳动密集型制造业，政策应注重提升能源效率和引导产业升级，避免其碳排放强度差异进一步扩展，确保其在绿色转型过程中逐步实现收敛。其次，应构建系统性的碳减排及收敛促进机制。此机制应重点推动产业结构的优化升级，进一步加大对高技术制造业的政策支持力度。同时，需建立和完善绿色技术创新体系，采取税收优惠、专项资金支持等政策工具，激励企业加大研发投入，提升绿色技术创新能力。在能源结构调整和能效提升方面，政策应进一步细化，推动形成涵盖技术标准、市场机制、财政支持的综合政策框架。通过精准施策和系统化推进，推动制造业碳排放强度的深度收敛，最终为实现“双碳”目标奠定坚实的政策基础。

参考文献

[1] 梁中，汪跃. 从“双重错位锁定”到“双元解锁”——中国传统制造业绿色转型情景与政策路径 [J]. 社会科学研究，2022，01): 68–76.

[2] 何文韬. “新常态”下制造业设备投资峰值波动及其内在机制研究——基于我国上市公司的微观视角 [J]. 产业经济研究，2016，05): 69–77.

[3] Xu J ,Guan Y ,Oldfield J , et al.China carbon emission accounts 2020–2021[J].Applied Energy, 2024, 360:122837–.

[4] 张继宏，程芳萍. “双碳”目标下中国制造业的碳减排责任分配 [J]. 中国人口·资源与环境，2021，31(09): 64–72.

[5] 中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见 [N]. 2021–10–25.

[6] Dongdong L .Convergence of energy carbon emission efficiency: evidence from manufacturing sub-sectors in China.[J].Environmental science and pollution research international, 2022, 29(21):31133–31147.

[7] Xiaomeng Z ,Chu W .Inequality of carbon intensity in the Chinese manufacturing sector: The role of information and communication technology infrastructure[J].Structural Change and Economic Dynamics, 2024, 68:194–203.

[8] 付华，李国平，朱婷. 中国制造业行业碳排放：行业差异与驱动因素分解 [J]. 改革，2021，05): 38–52.

[9] 李新安，李慧. 外资引入、技术进步偏向影响了制造业的碳排放吗？——来自我国 27 个制造行业面板数据模型的实证检验 [J]. 中国软科学，2022，01): 159–70.

[10] 钟世川，毛艳华. 数字技术偏向下制造业行业生产率的收敛效应 [J]. 科学学研究，2024，42(12): 2509–18.

我国影子银行对货币政策传导影响研究

朱顺泉^{1*}, 何晓光²

1. 广州华商学院, 广东财经大学, 广东 广州 511300

2. 广东财经大学金融学院, 广东 广州 510320

DOI:10.61369/ASDS.2025050008

摘 要 : 将我国影子银行分为金融机构类影子银行和民间融资类影子银行, 对影子银行对我国货币政策传导机制的影响进行了实证研究, 影子银行系统的发展对经济增长、货币供应量、资金借贷成本和通货膨胀变动都存在一定的影响, 影子银行的短期性波动会引起这些变量的过度反应, 除了对通货膨胀的影响外, 对其它变量的影响都存在时间长短不一的时滞, 影子银行的影响削弱了货币政策的可控性, 需要监管机构对影子银行的监管与引导。

关 键 词 : 影子银行; 物价稳定; 经济增长; 货币供应量; 脉冲效应

A Study on the Impact of Chinese Shadow Banking on Monetary Policy Transmission

Zhu Shunquan^{1*}, He Xiaoguang²

1. Guangzhou Huashang College, Guangzhou, Guangdong 511300

2. Guangdong University of Finance and Economics, Guangzhou, Guangdong 510320

Abstract : This paper divides Chinese shadow banking into two types: shadow banking of financial institution class and shadow banking of folk financing class, and selects monthly data from January 2002 to December 2016 to examines the impact of Chinese shadow banking on China's monetary policy objectives and macroeconomic operation. The results show that the development of the shadow banking system has some influence on the economic growth, the money supply, the market rate of interest and inflation, with the exception of the influence on inflation, there is a time lag for other variables. Short-term fluctuations in shadow banking will lead to excessive market effect to other variables, and weakens the effectiveness of the central bank's monetary policy. Therefore, in order to exert the positive effect of the shadow banking system, we must analyze the risk status, strengthen the supervision and guidance, encouraging and supporting the steady development of the shadow banking in our country.

Keywords : shadow banking; price stability; economic growth; money supply; impulse response function

引言

影子银行是提供流动性、期限配合和提高杠杆率等服务的信用工具、结构、企业或市场, 在不同程度上, 它替代了商业银行的核心功能, 从提供资金的最终投向的不同, 可以划分为实体支持类、金融交易类和杠杆放大类, 从提供信用路径的不同, 可以划分为金融机构渠道和非金融机构渠道。中国影子银行的快速发展, 有着明显的规避监管的倾向, 通过对社会融资结构的改变, 对传统货币政策中间目标的调控和传统的货币传导机制产生影响, 削弱中央银行的货币供给调控能力, 进而对我国宏观经济运行产生影响。

我国影子银行的发展与货币供给、市场利率、经济增长和物价等是否存在联系? 影子银行的发展是否对资金的价格造成影响、进而推动我国利率市场化的运行, 以及这些因素是否导致影子银行体系的扩大? 影子银行对经济增长的影响到底有多大? 这些都是我国影子银行、金融系统及宏观经济发展中重要的研究课题, 研究影子银行规模对我国宏观经济的影响, 进行分析影子银行对货币政策目标的影响渠道、影响程度以及影子银行监管等问题, 对我国的经济发展与政策制定具有极强的理论与现实意义。

近年来, 陆续有学者对影子银行对我国货币政策传导机制的影响进行了研究, 结论大体上分为三个方面:

一是认为影子银行的发展具有正面的促进作用。如 Barth JR 等 (2015)^[1] 认为: 影子银行业务一直是货币增长和经济增长的贡献

项目/基金信息: 本研究为广东省重点建设学科科研能力提升项目 (2024ZDJS113); 广州华商学院应用型示范专业—金融科技专业建设项目 (HS2024SFZY08); 广州华商学院金融科技专业核心课程教研室建设项目 (HS2024ZLGC43) 等阶段性成果。

作者简介: 何晓光 (1970—), 男, 河南新县人, 广东财经大学金融学院副教授, 博士, 主要研究方向: 数量经济学与金融经济学。

通讯作者: 朱顺泉 (1965—), 男, 湖南邵阳人, 广州华商学院数字金融学院与广东财经大学教授, 博士, 主要研究方向: 金融科技与数字金融。

者,而低存款利率和高存款准备金率也是推动影子银行增长的主要因素;陈剑,张晓龙(2012)^[2]认为:影子银行的发展会提高货币供给量,对经济增长具有促进作用,但对通货膨胀并无显著影响;樊晓静等(2013)^[3]研究指出:影子银行可以弥补金融市场经济危机和信贷约束的影响,对经济增长及CPI虽有影响但边际效应递减;李从文(2015)^[4]认为:影子银行具有调控的逆周期特性,削弱了紧盯货币供应量的数量型货币政策调控效果,通过对市场利率的作用,提高了价格型货币政策工具的有效性。

二是认为影子银行的发展既有积极的一面,也有不利的一面。如 Claessens S 等(2012)^[5]论述了中国影子银行的主要功能和作用,及其给金融系统带来的潜在的扭曲与系统风险;李媛,解凤敏(2014)^[6]认为:在宽松的货币政策情况下,影子银行会强化扩张性货币政策的传导效力,反之,则会显著弱化中央银行的货币供给调控能力;刘荣茂,蒋怡(2014)^[7]认为:影子银行对广义货币供应量具有一定的削弱作用,对经济增长和物价稳定有显著的影响。

三是强调影子银行的发展对经济发展的负面作用。王森,周茜茜(2016)^[8]认为:影子银行规模对物价有较强烈冲击,在一定时间内对经济增长有负面影响;胡志鹏(2016)^[9]认为:影子银行的发展改变了产出、投资、消费、广义货币和信贷面临随机冲击的脉冲响应轨迹,推高了这些变量的稳态水平;李存,杨大光(2016)^[10]认为:影子银行的过快发展会影响货币供应量的可控性,不利于货币政策最终目标的实现。

笔者认为有几点值得进一步讨论:国内GDP没有月度数据,国内外同行多采用规模以上工业企业增加值进行比例转换或者直接代替,众多研究者对影子银行指标采用的口径也多有不同,数据差异大,导致结论的可靠性存疑;少数研究没有剔除异常数据或进行季节变换,参考李从文(2015)^[2]、Li T(2014)^[11]、裴平等(2014)^[12],采用金融机构类影子银行和民间融资类影子银行之和的流量数据作为影子银行规模变量,这样就和GDP数据保持一致。对GDP季度数据进行频率转换,以月度GDP的增长率RGDP作为研究变量,为了剔除季节性虚拟变量的影响,对数据进行了季节转换。采用样本为2002年1月至2016年12月的我国影子银行、金融系统及宏观经济的数据,原始数据均来源于WIND数据库。

一、数据来源与研究方法

(一) 数据来源

在实证分析中纳入了影子银行规模变量、货币政策目标变量(中介目标、最终目标)和货币政策传导渠道变量。对每月新增的委托贷款、信托贷款、未贴现银行承兑汇票和企业债持有量进行加总,可得金融机构类影子银行信用创造规模的增量;民间融资类影子银行为全社会融资规模与其各个构成成分之和的差值,然后将这两个部分的和作为中国影子银行规模每月流量数据(SB)。因为影子银行通过信用创造向社会注入大量流动性,对货币供应量的影响最大,选择广义货币供应量(M2)作为货币政策中介目标的代理变量。

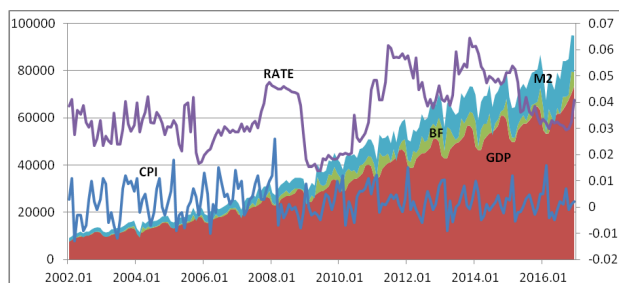


图1 原始数据 GDP、M2、RATE、SB 和 CPI 的曲线图

货币政策最终目标是经济增长与物价稳定,选取国内生产总值(GDP)代表经济增长,使用 Quadratic-match sum 方法,对GDP季度数据进行频率转换为月度数据,同时以月度GDP的增长率RGDP作为研究变量。选取居民消费价格指数作为货币政策目标和货币政策有效性的代理变量,经过多次拟合,发现采用月度CPI的环比增长率作为研究变量,模型具有良好的稳定性;选择

利率作为货币政策传导渠道变量,考虑到数据的连续性以及影子银行中的借贷期限较短等因素,选取期限为90天的中国银行间同业拆借利率(CHIBOR)加权平均利率(%)作为借贷成本,用变量RATE表示。

观察图1中原始数据曲线图,GDP、M2和SB呈缓慢上升趋势,RATE和CPI则呈水平震荡特征,运用 Census X12方法进行季节性调整,根据调整后的数据分别算出GDP、M2和SB的月度环比增长率,最终调整后的国内生产总值、货币供应量、借贷利率、影子银行规模和通货膨胀率的增长率数据分别用RGDP、RM2、RATE、RSB、CPI表示,在分析中,依据拉依达准则,去除了少数与平均值的偏差超过三倍标准差的高度异常值,最终有170个样本数据参与模型的拟合。

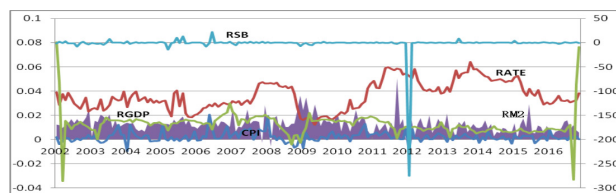


图2 没剔除异常值 RGDP、RM2、RATE、RSB 和 CPI 的曲线图

(二) 研究方法

为了对包含内生和外生变量的模型进行估计和推断,考察各变量之间的动态联系,建立无约束VAR模型和向量误差修正模型VEC,依据LR似然比检验准则、FPE最终预测误差准则、以及AIC、SC、HQ信息准则,确定最优滞后期,从而确保VAR系统稳定以及短期和长期的脉冲响应分析有效。由于仅仅有内生变量的滞后值在等式的右边,所以不存在同期相关性问题,用普通最小二乘法能得到VAR简化式模型的一致且有效的估计量,即使

扰动向量 e_t 有同期相关，OLS 仍然是有效的。

二、数据的基本特征

2002 年以来的样本数据表现出非对称性特征，其中 RGDP 表现为左偏倚（偏度 < 0 ），RM2、RATE、RSB 和 CPI 分布则都是右偏倚（偏度 > 0 ）。除了 RGDP 比较接近正态分布外，其它变量所有阶段样本的峭度（Kurtosis）都显著大于3，表明了回报的实际分布呈现厚尾特征。

表1 RGDP、RM2、RATE、RSB 和 CPI 的基本统计特征

category	RGDP	RM2	RATE	RSB	CPI
Mean	0.01215	0.01278	0.03627	-0.06221	0.00245
Median	0.01256	0.01285	0.03406	-0.11258	0.00181
Maximum	0.02299	0.03625	0.06404	22.33419	0.02072
Minimum	-0.00418	-0.00566	0.01219	-14.42296	-0.00945
Std. Dev.	0.00483	0.00622	0.01174	3.00326	0.00405
Skewness	-0.35563	0.59499	0.21852	2.41966	1.12366
Kurtosis	3.13284	4.94637	2.22066	26.09522	6.78460
Observations	170	170	170	170	170

通过分析原始数据 GDP、M2、RATE、SB、CPI 的相关图，可以发现，国内生产总值与广义货币供应量、市场利率以及影子银行规模（SB）具有较高的相关性，影子银行规模还与广义货币供应量以及市场利率有较高的相关性。

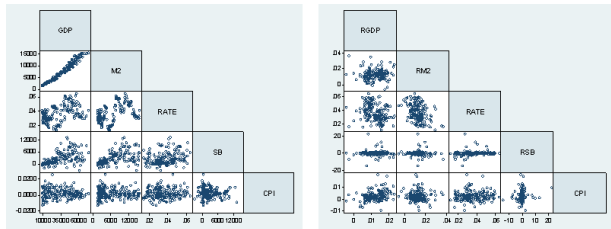


图3 GDP、M2、RATE、SB 和 CPI 相关图及增长率数据相关图

时间序列往往具有不平稳的特征，为了避免出现伪回归，采用 ADF 检验，对序列 RGDP、RM2、RATE、RSB 和 CPI 进行了平稳性检验，检验结果表明，CPI 在10% 显著性水平下满足零阶单整，其余变量都在5% 显著性水平下满足零阶单整。观察修正后的增长率数据 RSB、RM2、RATE、RSB、CPI 的散点图，不易判断出各变量之间的关系，需要通过 VAR 模型及向量误差修正模型，研究变量之间的长期稳定关系。

表2 RGDP、RM2、RATE、RSB 和 CPI 的稳定性检验

变量	检验类型	P 值	ADF 值	临界值 (5%)
RGDP	(C,0,0)	0.000	-10.756	-2.878
RM2	(C,0,0)	0.000	-12.342	-2.878
RATE	(C,0,0)	0.079	-2.681	-2.878
RSB	(0,0,0)	0.000	-92.159	-1.943
CPI	(C,0,0)	0.000	-10.970	-2.878

三、实证结果分析

（一）VAR 模型的选择

脉冲响应函数描述了在其它变量在当期以及以前各期保持不变的前提下，VAR 模型中一个内生变量随机扰动项一个标准差的

冲击对所有的内生变量当前值和未来取值的影响，根据表3中的模型最优滞后期及稳定性判定结果，建立了滞后期为1的 VAR 模型，被估计的 VAR 模型所有根的模的倒数小于1，即位于单位圆内，所以估计的结果是稳定的。

表3 VAR 模型最优滞后期及稳定性判定结果

Lag	LogL	LR	FPE	AIC	SC	HQ
0	2066.490	NA	1.30E-17	-24.68838	-24.5950	-24.6505
1	2333.439	514.737*	7.20E-19*	-27.58610*	-27.0260*	-27.3588*
2	2350.736	32.3140	7.90E-19	-27.49384	-26.4670	-27.0771
3	2365.548	26.7860	8.94E-19	-27.37183	-25.8782	-26.7656
4	2380.674	26.4482	1.01E-18	-27.25358	-25.2932	-26.4579
5	2393.900	22.3344	1.17E-18	-27.11258	-24.6854	-26.1274
6	2404.638	17.4892	1.40E-18	-26.94177	-24.0478	-25.7672

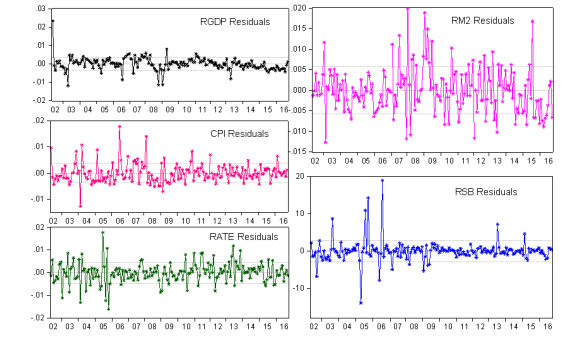


图4 VAR 模型的内生变量拟合残差图

根据 VAR 模型的内生变量拟合残差图，影子银行增长率在2005，2006年有较大的随机波动，RM2则在2003，2007，2008，2015年随机波动较大，而 CPI 在2004-2008年、市场利率在2005年的随机波动较大，GDP 的增长率则可能受到2003年的非典事件、2008-2009年的次贷危机以及2013年以来的外部及经济转型等因素导致 RGDP 在这些年份有负向随机冲击，这些随机冲击不是由模型内生变量引起的，而是由外部因素造成的。

（二）脉冲响应函数分析

分别给经济增长、货币供应量、借贷成本、影子银行、通货膨胀等变量的增长率一个标准差的影子银行信贷冲击，结果表明：对来自于影子银行规模增长率一个标准差的冲击，CPI 立即作出了响应，其变化率在第一期就达到了正向峰值，说明影子银行规模变动对通货膨胀率的影响是正相关的，且没有时滞，但第一期的反映有些过度，随后有一个反向调整，对 CPI 前四期的扰动呈现越来越弱的震荡特征，随着时间的推移影响逐渐衰退。

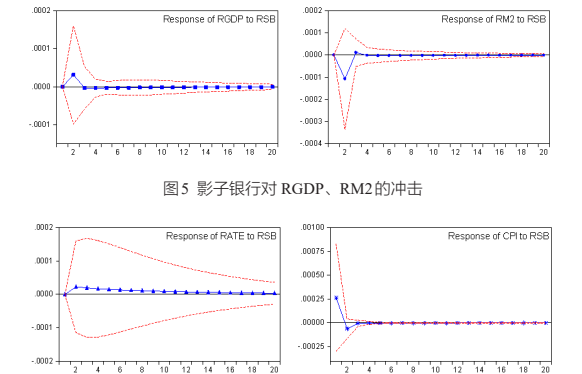


图5 影子银行对 RGDP、RM2 的冲击

在受到影子银行规模增长率一个标准差的冲击之后，GDP 增长率、货币供应量增长率和借贷成本增长率在第一期都没有反应，影子银行信贷对经济增长、货币供应量和市场利率的影响具有时滞

图6 影子银行对 RATE 和 CPI 的冲击

效应,但随后的第二期,GDP 增长率、货币供应量增长率反应过度,其中 RGDP 初始效应为正,随后迅速衰减,持续影响力较弱;RM2 的初始效应刚好相反,第二期达到了负的最大峰值,随后有一个反向的调整,但数值很小,说明影子银行的扩张对货币供应量有一定的分流效果,表现出影子银行的货币供给补充与替代效应的叠加效果。影子银行对 GDP 增长率与货币增长率的影响,说明影子银行的扩张对经济发展既有正面和负面的双重效应;影子银行的扩张,货币在向实体经济传导过程中会出现货币渗漏,资金流入资本市场和银行体系的黑洞,不能有效地作用于实体经济。从影响时效来看,借贷成本受到影子银行的冲击之后,受到的影响最持久,其影响效应都是与影子银行规模增长率的冲击成正相关,在第二期达到最大峰值之后,衰减过程很缓慢。影子银行对通货膨胀的影响没有时滞,反映迅速,并且也有过度反映。

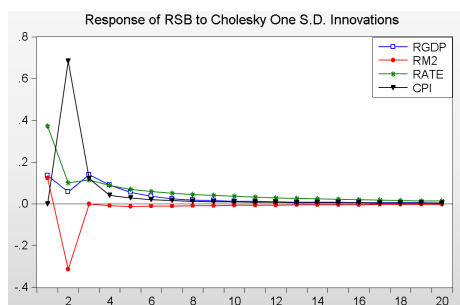


图7 RGDP、RM2、RATE 和 CPI 对影子银行的冲击

从经济系统的视角来看, RGDP、RM2、RATE、RSB、CPI 与影子银行互为反馈关系,通过图7,可以看出, RGDP、RM2、RATE 与 CPI 的短期变化,也会对影子银行规模的扩张产生影响,其中 CPI 的影响有一期的时滞,在经济增长、货币供应量、借贷成本、通货膨胀的短期冲击下,影子银行规模在初期都有一些过度反应,并且都是正相关的反应,随后随着时间的推移其影响效应逐渐趋弱,其中货币供应量的短期冲击,对影子银行规模的扩张呈现了复杂扰动的关系,货币供应量的扩张一方面会提高影子银行的货币供给,另一方面又会对影子银行的扩张有挤出效应; RATE 对影子银行规模扩张的影响,印证了 Woodford (2010) 的观点,提高利率的货币政策虽然短时间内会降低一些机构的融资需求,但是并不会降低影子银行的流动性扩张。

(三) 方差分解

方差分解是对任意一个内生变量不同时间变量的预测方差可以分解成系统中各变量冲击所作的贡献,然后计算出每一个变量冲击的相对重要性。根据 RGDP、RM2、RATE、RSB 与 CPI 的方差分解结果,影子银行对经济增长、货币供应量、通货膨胀和市场利率的贡献度不高,这可能是因为长期以来影子银行信贷规模占我国社会融资规模的比例偏低所致。对比影子银行对其他三个经济指标的贡献度,发现影子银行对各货币政策目标影响程度有差异,相对而言,影子银行对通货膨胀影响最大,其次是货币供应量,再次是经济增长,对市场利率的影响最小,影子银行对经济增长、货币供应量,以及市场利率的影响具有一期的时滞,对通货膨胀的影响则不存在时滞,说明影子银行体系的发展在一定程度上影响了通货膨胀率 CPI。

四、结论

将影子银行划分为金融机构类影子银行和民间融资类影子银行,分析了影子银行对我国货币政策传导影响研究,结论如下:

影子银行规模与经济增长、货币供应量和市场利率水平,以及影子银行规模变动与物价指数变动,都呈现出一定的正相关关系;我国影子银行系统发展波动对经济增长、物价稳定、金融稳定都存在一定的冲击效应,是经济增长、货币供应量、资金借贷成本和通货膨胀变动的原因之一,除了对通货膨胀的影响没有时滞外,对其它变量的影响都存在一定的时滞,冲击反应初期都存在反应过度;影子银行的发展不利于物价稳定,影子银行的扩张对货币供应量有一定的分流效果,会改变市场上的实际货币量,削弱货币政策的可控性。由于我国影子银行尚处于快速发展阶段,方差分解中影子银行在各影响因素中占比较小,相信随着我国影子银行规模的扩大,影子银行系统的影响会越来越大;另一方面,我国经济的发展、金融系统的发展也为影子银行健康、持续性发展提供了良好的环境。

考虑到影子银行短期性波动所引起的过度反应,通过利率或货币供给量等货币政策的中介目标,直接或间接地影响到产出、就业、物价和国际收支,对货币政策运行的不确定性增大。因此要发挥影子银行对经济和金融的促进作用,必须加强对影子银行的监管。需要科学的监测评估体系,加强对影子银行的资产结构、利率特征以及资产负债的期限结构的分析,并完善影子银行信息披露机制;建立并完善针对影子银行系统的法律法规体系,实现监管的有法可依。加强对影子银行的资金来源、资金流向等情况的分析,引导影子银行以弥补正规银行体系对金融服务提供的不足之处,形成对传统金融的有益补充,弱化影子银行对传统银行的负面影响,实现我国金融服务的多元化。

参考文献

- [1] Barth JR, Li T, Shi W, Xu P. China's shadow banking sector: beneficial or harmful to economic growth[J]. Journal of Financial Economic Policy, 2015, 7(4): 421-445.
- [2] 陈剑, 张晓龙. 影子银行对我国经济发展的影响——基2000-2011年季度数据的实证分析[J]. 财经问题研究, 2012, (8): 66-72.
- [3] 樊晓静, 龙建成, 张雄. 影子银行发展对中国经济增长的实证分析[J]. 西安电子科技大学学报(社会科学版), 2013, 23(5): 88-95.
- [4] 李从文. 中国影子银行与货币政策调控——基于时变 Copula 动态相关性分析[J]. 南开经济研究, 2015, (5): 40-58.
- [5] S Claessens, Z Pozsar, L Ratnovski, M Singh, Shadow Banking: Economics and Policy[J]. Social Science Electronic Publishing, 2012, 12(12).
- [6] 李媛, 解凤敏. 影子银行体系下货币政策传导与扭曲效应研究[J]. 财经问题研究, 2014, (51): 28-32.
- [7] 刘荣茂, 蒋怡. 影子银行对我国宏观经济运行的影响研究[J]. 价格理论与实践, 2014, (9): 98-100.
- [8] 王森, 周茜茜. 影子银行、信用创造与我国货币传导机制[J]. 经济问题, 2015, (2): 48-68.
- [9] 胡志鹏. 影子银行对中国主要经济变量的影响[J]. 世界经济, 2016, 39(1): 152-170.
- [10] 李存, 杨大光. 影子银行对我国货币政策的影响与对策[J]. 经济纵横, 2016, (7): 88-92.
- [11] Li T. Shadow banking in China: expanding scale, evolving structure[J]. Journal of Financial Economic Policy, 2014, 6(3): 198-211.
- [12] 裴平. 中国影子银行的信用创造及其规模测算[J]. 经济管理, 2014, (3): 98-107.

基于“金融－技术－能源”耦合协调度的长江经济带碳达峰路径研究

张甜，徐小雅，李翰芳*

湖北工业大学 理学院，湖北 武汉 430068

DOI:10.61369/ASDS.2025050009

摘 要： 以长江经济带作为研究对象，首先通过耦合协调度模型研究碳排放与金融、技术、能源各个系统的整体与内部关系，考虑到 11 个省市的现有协调程度差异较大，故根据耦合协调度利用 K-means 聚类对长江经济带进行了分类，依据各类别现有的协调发展水平设定相对应的政策干预情景。随后将灰色预测模型和二元回归模型相结合作为碳排放的预测模型，以此来预测在基准情景和政策干预两种情景下的长江经济带 11 个省市各自的碳达峰情况。实证结果表明：从政策干预的效果来看，相较于基准情景，政策干预下的二氧化碳排放量均得到较好的控制。从达峰情况来看，本文将 11 个省市的达峰情况分成了四类，其中第四类（两种情景下均无法在 2035 年碳达峰）城市政府应该出台更加严格的绿色金融转型、技术改革和能源产业优化的政策。

关 键 词： 碳达峰；耦合协调度模型；灰色预测模型；情景分析

Research on the Carbon Peak Path of the Yangtze River Economic Belt Based on "Finance -Technology -Energy"

Zhang Tian, Xu Xiaoya, Li Hanfang*

Hubei University of Technology, School of Science, Wuhan, Hubei 430068

Abstract： This article takes the Yangtze River Economic Belt as the research object. Firstly, the coupling coordination degree model is used to study the overall and internal relationship between carbon emissions and various systems of finance, technology, and energy. Considering the significant differences in the existing coordination degree among 11 provinces and cities, K-means clustering is used to classify the Yangtze River Economic Belt based on the coupling coordination degree, and corresponding policy intervention scenarios are set according to the existing coordinated development level of each category. Subsequently, the grey prediction model and binary regression model were combined to form a carbon emission prediction model, in order to predict the carbon peak situation of the 11 provinces and cities in the Yangtze River Economic Belt under both baseline and policy intervention scenarios. The empirical results indicate that, in terms of the effectiveness of policy intervention, compared to the baseline scenario, the carbon dioxide emissions under policy intervention have been well controlled. From the peak situation, this article divides the peak situations of 11 provinces and cities into four categories. Among them, the fourth category (both scenarios cannot achieve carbon peak by 2035) requires city governments to introduce stricter policies for green finance transformation, technological reform, and energy industry optimization.

Keywords： carbon peak; coupling coordination model; grey prediction model; scenario analysis

引言

在“中国国家自主贡献”文件中，中国宣布到 2030 年，单位国内生产总值的二氧化碳排放量将比 2005 年下降 60%–65%，非化石能源消费比重上升到 20% 左右^[1-2]。习近平总书记对长江经济带发展多次明确指出，要把修复长江生态环境摆在压倒性位置，在保护的前提下发展，实现经济发展与资源环境相适应^[3]。

基金项目：国家社科基金项目（24BTJ068）；湖北省教育厅人文社科一般项目（22Y059）。

作者简介：

张甜（2000–），女，湖北黄冈人，硕士研究生，研究方向：应用统计。邮箱：230365625@qq.com；

徐小雅（1998–），女，湖北宜昌人，硕士研究生，研究方向：应用统计。

通讯作者：李翰芳（1979–），湖北麻城人，博士，讲师，研究方向：经济统计，资源环境统计。邮箱：lifang05@sina.com。

针对碳达峰预测的研究方法主要使用情景分析法。余碧莹等（2021）^[4]根据不同情景分析得出全国碳排放量有望于2025年实现达峰，最晚于2030年达峰。张保留等（2021）^[5]从能源消费结构调整的角度，设定不同情景，分析农村居民生活的碳排放达峰路径，并提出助力达峰的对策建议。王雪同等（2025）^[6]运用 STIRPAT 扩展模型预测了中国制造业碳排放未来发展趋势。梁力军等（2025）^[7]采用岭回归方法优化参数估计，并构建7种多情景组合预测碳排放。杨青等（2025）^[8]设置低碳、基准和高碳3种情景方案，运用 CNN - LSTM - Attention 对交通运输业碳排放进行预测。

当前国内外学者对长江经济带碳排放与金融、技术、能源三者之间的问题研究较少。李庆（2020）^[9]表明长江经济带蕴藏着丰富的空间异质性。李在军（2022）^[10]针对长三角地区从经济增长与碳排放的时空关联进行了研究，表明长三角地区经济增长与碳排放具有正向关联，关联强度总体呈“V”型波动变化。邹秀清等（2025）^[11]采用 GTWR 模型全面揭示其影响因素。刘合林等（2025）^[12]基于 kaya 恒等式方法，设定3种情景对碳达峰进行预测。

一、长江经济带“金融－技术－能源”协调发展分析

（一）长江经济带碳排放核算

根据碳排放的测算方法计算出长江经济带11个省市2011-2020年的二氧化碳排放量，测算结果如表1.1所示。

表1.1 长江经济带11个省市2011-2020年二氧化碳排放量（万吨）

年份	上海	江苏	浙江	安徽	江西	湖北	湖南	重庆	四川	贵州	云南
2011	27781	77527	45569	34148	23670	41146	32755	17946	34904	25705	24755
2012	27389	79158	44210	35239	19209	41172	32265	17713	36347	28128	25707
2013	29051	81395	45474	38272	20697	35835	31382	15342	37329	29204	25436
2014	26455	80822	44953	39541	21081	36282	30471	16442	38653	28206	22872
2015	26564	83707	45584	39620	21970	34444	30349	14420	33106	28229	20711
2016	26471	87125	45243	39553	22260	34258	31037	14862	32553	29571	20486
2017	26968	86307	47384	40938	22729	35062	31338	15322	31964	29741	21761
2018	26550	85538	46476	42505	23759	36458	32037	15423	31171	27410	24186
2019	27406	87373	47477	42779	24267	38711	31947	15565	33463	28084	25297
2020	22169	77845	44123	37980	21263	29859	29979	15330	26292	26324	20488

表1.2 金融系统评价指标体系表

目标层	准则层	方案层	指标属性
金融	绿色信贷	高耗能产业利息支出占比（ X_1 ）	-
	绿色证券	高耗能产业市值占比（ X_2 ）	-
	绿色保险	农业保险保费收入占比（ X_3 ）	-
	绿色投资	节能环保公共支出占比（ X_4 ）	-
		农林水事务公共支出占比（ X_5 ）	+
		环保投资占比（ X_6 ）	-
	碳金融	碳排放贷款强度（ X_7 ）	+
	数字金融	覆盖广度（ X_8 ）	+
		使用深度（ X_9 ）	+
		数字支持服务程度（ X_{10} ）	+

金融系统可以分为绿色金融和数字金融两个部分，其中绿色金融由绿色信贷、绿色证券、绿色保险、绿色投资和碳金融构成。

表1.3 技术系统评价指标体系表

目标层	准则层	方案层	指标属性
技术	技术研发投入	研究与试验发展（R&D）人员全时当量（ Y_1 ）	+

（二）“金融－技术－能源”指标体系建立

本节旨在全面的了解长江经济带2011-2020年社会经济绿色发展历程与现状，进而系统地评价长江经济带的协调发展程度，因此采用层次分析法分别构建金融系统（表1.2）、技术系统（表1.3）和能源系统（表1.4）的协调度评价指标体系。

技术	技术研发投入	研究与试验发展（R&D）经费内部支出（ Y_2 ）	+
		有 R&D 活动单位数（ Y_3 ）	+
		科学技术财政支出 / 地方财政一般预算支出（ Y_4 ）	+
		新产品开发经费支出 / 地方财政一般预算支出（ Y_5 ）	+
		教育支出财政支出 / 地方财政一般预算支出（ Y_6 ）	+
		规上工业企业引进技术经费支出（ Y_7 ）	-
		规上工业企业购买境内技术经费支出（ Y_8 ）	-
		规上工业企业技术改造经费支出（ Y_9 ）	+
		国外技术引进合同金额（ Y_{10} ）	-
		外商直接投资实到金额（ Y_{11} ）	+
	技术研发产出	专利申请授权量（ Y_{12} ）	+
		技术市场成交额占 gdp（ Y_{13} ）	+
	技术研发环境	高新技术企业利润总额 / 工业利润总额（ Y_{14} ）	+
		高新技术企业营业收入 / 工业营业收入（ Y_{15} ）	-
		每十万人高等学校平均在校生数（ Y_{16} ）	+
		高等院校校数（ Y_{17} ）	+
		授予学位数（ Y_{18} ）	+

技术系统由技术研发投入、技术研发产出和技术研发环境三个方面来衡量。

表1.4 能源系统评价指标体系表

目标层	准则层	方案层	指标属性
能源	能源总量	人均能源生产总量 (Z_1)	-
		人均能源消费总量 / 标准煤 (Z_2)	+
		人均液化石油气用量 (Z_3)	+
		人均天然气用量 (Z_4)	+
		能源工业投资 (Z_5)	+
	能源结构	一次清洁能源产量占比 (Z_6)	+
		水电发电量占比 (Z_7)	+
		原煤生产量占比 (Z_8)	-
		化石燃料生产占比 (Z_9)	-
		煤炭消费量占比 (Z_{10})	-
		化石燃料消耗占比 (Z_{11})	-
		电力消费占比 (Z_{12})	+
		热力消费占比 (Z_{13})	+
	能源速度	能源生产弹性系数 (Z_{14})	+
		电力生产弹性系数 (Z_{15})	+
		能源消费弹性系数 (Z_{16})	-
		电力消费弹性系数 (Z_{17})	+
	能源效率	单位 GDP 能耗 (Z_{18})	-
		工业增加值碳排放强度 (Z_{19})	-
	社会环境	人均公园绿地面积 (Z_{20})	+
		建成区绿化覆盖率 (Z_{21})	+

能源系统从能源总量、能源结构、能源速度、能源效率和社会环境5个方面来评价。

（三）“金融 - 技术 - 能源” 综合发展水平

本文采用主成分分析法计算系统内各指标的权重。由于原始数据样本指标中存在不同维度的计量单位，需要先对原数据指标采用极差法进行标准化处理以消除样本量纲对模型计算结果的影响，获得合理、正确的计算结果。然后使用 R 软件对金融系统、技术系统、能源系统分别进行主成分分析计算系统指标权重，结果如表 1.5 所示。

表1.5 金融系统方差解释表

成份	初始特征值			提取平方和载入		
	合计	方差百分比 %	累积 %	合计	方差百分比 %	累积 %
1	4.51	45.103	45.103	4.51	45.103	45.103
2	1.968	19.684	64.787	1.968	19.684	64.787
3	1.061	10.609	75.395	1.061	10.609	75.395
4	0.824	8.242	83.638			
5	0.623	6.227	89.865			
6	0.488	4.882	94.747			
7	0.24	2.401	97.148			
8	0.172	1.724	98.873			
9	0.086	0.861	99.734			
10	0.027	0.266	100			

由表 1.5 知，其中3个成分的特征值大于1且累积贡献率达到75.395%，这说明这3个成分能够大致解释经济子系统中的所有信息，其特征值分别为4.51、1.968、1.061。根据计算结果绘制了2011-2020年长江经济带金融、技术、能源综合得分的时间演变图（如图 1.1 所示）。

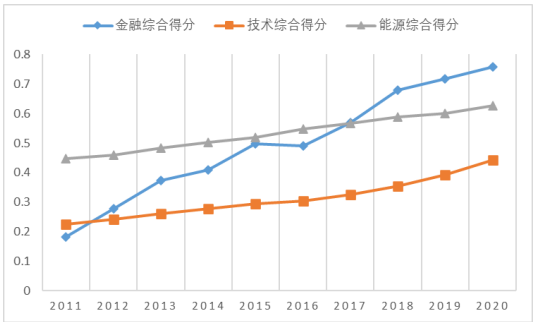


图 1.1 2011-2020 年长江经济带金融、技术、能源综合得分时间演变图

长江经济带总体的金融、技术和能源的综合得分均呈上升趋势，且趋势较为明显。在研究的初始时期，三项指标的排序为能源 > 技术 > 金融，而在研究的末期，三项指标的排序为金融 > 能源 > 技术，金融、技术和能源系统综合发展呈趋近的状态。

（四）“金融 - 技术 - 能源 - 碳排放” 系统内部耦合协调度

对2011-2020年的碳排放子系统与金融子系统、技术子系统和能源子系统分别进行耦合协调度计算，结果如下表 1.6 所示：

表1.6 2011-2020 年长江经济带 11 个省市系统内部耦合协调度结果

	年份	上海	江苏	浙江	安徽	江西	湖北	湖南	重庆	四川	贵州	云南
碳排放 - 金融	2011	0.6126	0.6750	0.6782	0.6700	0.6659	0.6624	0.7135	0.6856	0.7099	0.4860	0.6425
	2012	0.6823	0.7268	0.7482	0.7253	0.7426	0.7270	0.7638	0.7442	0.7512	0.5413	0.7022
	2013	0.7259	0.7587	0.7841	0.7656	0.7955	0.7887	0.8098	0.8046	0.7872	0.6128	0.7537
	2014	0.7687	0.7683	0.7959	0.7858	0.8068	0.7936	0.8170	0.7943	0.7944	0.6709	0.7854
	2015	0.7852	0.7919	0.8171	0.8066	0.8355	0.8322	0.8495	0.8459	0.8390	0.7149	0.8208
	2016	0.7758	0.7906	0.8237	0.8346	0.8424	0.8475	0.8498	0.8457	0.8419	0.7286	0.8256
	2017	0.7946	0.8058	0.8310	0.8243	0.8571	0.8519	0.8647	0.8622	0.8588	0.7456	0.8196
	2018	0.7979	0.8073	0.8366	0.8404	0.8605	0.8458	0.8555	0.8475	0.8503	0.7726	0.8243
	2019	0.8125	0.8165	0.8454	0.8651	0.8691	0.8536	0.8667	0.8548	0.8565	0.7848	0.8402
	2020	0.8396	0.8412	0.8596	0.8684	0.8837	0.8680	0.8761	0.8657	0.8667	0.8136	0.8637

碳排放－技术	2011	0.8178	0.8325	0.9036	0.6692	0.8654	0.8263	0.8905	0.8698	0.9062	0.5461	0.8562
	2012	0.8284	0.8322	0.8749	0.7449	0.8998	0.8455	0.8830	0.8390	0.9394	0.6187	0.8682
	2013	0.8490	0.8282	0.8163	0.8025	0.9131	0.8564	0.8823	0.9094	0.9390	0.6590	0.8504
	2014	0.8755	0.8546	0.8775	0.7984	0.9401	0.8611	0.8950	0.9280	0.8987	0.7081	0.8116
	2015	0.8371	0.8620	0.8998	0.8016	0.9386	0.8749	0.9149	0.9514	0.8470	0.7402	0.8793
	2016	0.7708	0.8726	0.9151	0.8203	0.8922	0.8938	0.9399	0.9352	0.9042	0.7565	0.9095
	2017	0.8216	0.8261	0.8945	0.8221	0.8203	0.9217	0.9450	0.9401	0.9378	0.7777	0.9181
	2018	0.8588	0.7334	0.9027	0.8399	0.8797	0.9245	0.8828	0.9427	0.9502	0.8323	0.8951
	2019	0.8638	0.7831	0.9028	0.8851	0.9085	0.8621	0.8045	0.9443	0.9319	0.8385	0.8971
	2020	0.8809	0.8616	0.9247	0.8922	0.9321	0.7764	0.8585	0.9758	0.9464	0.8137	0.9230
碳排放－能源	2011	0.7032	0.7335	0.7443	0.7286	0.7871	0.7474	0.7791	0.7713	0.8030	0.4646	0.7091
	2012	0.7056	0.7369	0.7546	0.7367	0.8127	0.7664	0.7893	0.7929	0.8083	0.5149	0.7326
	2013	0.7127	0.7412	0.7661	0.7350	0.8195	0.7960	0.7953	0.8204	0.8178	0.5568	0.7533
	2014	0.7242	0.7481	0.7725	0.7368	0.8156	0.8047	0.8149	0.8210	0.8280	0.6172	0.7939
	2015	0.7406	0.7496	0.7853	0.7393	0.8184	0.8137	0.8233	0.8333	0.8442	0.6485	0.7965
	2016	0.7502	0.7550	0.8040	0.7583	0.8251	0.8272	0.8327	0.8365	0.8576	0.6608	0.8085
	2017	0.7497	0.7660	0.8056	0.7646	0.8278	0.8351	0.8360	0.8347	0.8662	0.6821	0.8179
	2018	0.7428	0.7713	0.8194	0.7681	0.8299	0.8369	0.8375	0.8454	0.8778	0.7259	0.8215
	2019	0.7382	0.7699	0.8289	0.7765	0.8345	0.8359	0.8494	0.8417	0.8804	0.7403	0.8327
	2020	0.7870	0.7981	0.8522	0.7877	0.8485	0.8570	0.8602	0.8530	0.9043	0.7697	0.8637

二、碳排放协调发展聚类分析

在碳达峰的目标下，若长江经济带碳减排工作想要顺利开展，需要对各个省市实施对应的减排政策，故本文根据聚类分析来分析长江经济带11个省市碳排放的协调发展情况，并划分为了四类，其结果如图2.1和表2.1所示：

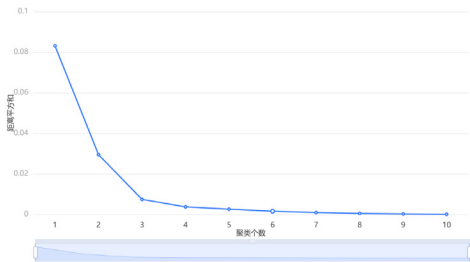


图2.1 长江经济带11个省市协调度聚类数对比图（肘部法则）

表2.1 聚类中心坐标点

聚类种类	中心值_碳排放－金融	中心值_碳排放－技术	中心值_碳排放－能源
1	0.81829	0.908073	0.829371
2	0.778768	0.825535	0.74852
3	0.687099	0.729091	0.638089
4	0.798952	0.878776	0.799432

根据方差分析的结果（表2.2）显示，“碳排放－金融”、“碳排放－技术”和“碳排放－能源”的P值均为0，在1%的显著性水平上显著，说明“碳排放－金融”、“碳排放－技术”和“碳排放－能源”在聚类分析划分的类别之间存在显著性差异。

表2.2 聚类结果差异性分析表

	聚类类别（平均值 ± 标准差）				F	P
	类别 1(n=4)	类别 2(n=3)	类别 4(n=3)	类别 3(n=1)		
碳排放－金融	0.818 ± 0.006	0.779 ± 0.02	0.799 ± 0.01	0.687 ± nan	31.799	0.000***
碳排放－技术	0.908 ± 0.016	0.826 ± 0.017	0.879 ± 0.014	0.729 ± nan	41.88	0.000***
碳排放－能源	0.829 ± 0.013	0.749 ± 0.012	0.799 ± 0.011	0.638 ± nan	78.372	0.000***

根据聚类中心坐标点和各类省市的共性特征分为四类，如表2.3所示。第一类概括为“高度协调型”，包含江西、湖南、重庆和四川；第二类概括为“协调潜力型”，包含上海、江苏和安徽；

第三类概括为“中度协调型”，包含浙江、湖北和云南；第四类概括为“协调攻坚型”，包含贵州。

表2.3 长江经济带11个省市聚类结果

类别 / 个数	类别名称	所含省市
第一类 /4 个	高度协调型	江西、湖南、重庆和、四川
第二类 /3 个	协调潜力型	上海、江苏、安徽
第三类 /3 个	中度协调型	浙江、湖北、云南
第四类 /1 个	协调攻坚型	贵州

三、碳排放政策干预路径设置

为了直观的展示长江经济带碳减排工作的工作重心，本文根据四类省市的类别特征，对四类省市的金融、技术和能源发展做了情景设定，如表3.1所示。如：“高度协调型”省市的“碳排放－金融”、“碳排放－技术”和“碳排放－能源”分别处于高度协调阶段、优质协调阶段和高度协调阶段。

表3.1 金融、技术、能源发展速度设定表

省市类别	金融	技术	能源
高度协调型	高速	基准	高速
协调潜力型	中速	高速	中速
中度协调型	高速	基准	中速
协调攻坚型	低速	中速	低速

根据各系统的发展速度，本文定义了金融系统、技术系统、能源系统的发展权重，如表3.2所示。将基准情景的权重设定为1，此后每提升一档权重增加0.5。

表3.2 系统发展权重表

发展速度	基准	低速	中速	高速
权重	1	1.5	2	2.5

四、碳达峰路径预测分析

（一）碳排放预测模型构建

基于探究长江经济带11个省市金融系统、技术系统和能源系统的发展水平对未来二氧化碳排放量的影响，故本文采用二次回归模型对未来二氧化碳排放量进行预测。模型如下所示：

$$CO_{2it} = a_i + b_i U_{it} + c_i U_{it}^2 + \varepsilon_{it}$$

其中

$$U_{it} = \alpha_i T_{Ait} + \beta_i T_{Bit} + \gamma_i T_{Cit}$$

式中： CO_2 为二氧化碳排放量（万吨）；U为金融系统、技术系统的能源系统综合发展水平； i 代表省市， t 代表年份； a_i 、 b_i 、 c_i 分别为对应变量的回归系数； ε_{it} 为随机误差； T_A 、 T_B 、 T_C 为金融系统、技术系统、能源系统的发展水平； α_i 、 β_i 、 γ_i 分别为金融系统、技术系统、能源系统的设定发展权重。其中金融系统、技术系统、能源系统的发展水平采用灰色预测模型GM（1，1）进行预测。

（二）碳排放预测可行性分析

本节以重庆为例详细说明基于构建的预测模型对碳排放进行预测的可行性。首先根据系统发展权重表，按照基准情形，计算出重庆2011–2020年金融系统、技术系统的能源系统综合发展水平U，同时为了消除二氧化碳排放量的异质性，对其进行了对数处理，得到如下结果：

$$CO_2 = 9.912 + 0.649U - 0.146U^2$$

表4.1 回归结果

ANOVA					
	平方和	df	均方	F	Sig.
回归	0.037	2	0.019	14.201	0.003
残差	0.009	7	0.001		
总计	0.046	9			
模型汇总					
R	R 方	调整 R 方	估计值的标误		
0.896	0.802	0.746	0.036		
自变量为 U。					

根据表4.1的结果显示，回归方程的拟合优度为0.802，表明该模型对二氧化碳排放量的变化有较强的解释力度。将重庆2011–2020年的综合发展水平U的数据代入模型，得到模型的拟合值，模拟结果如表4.2所示。从表中可以看出大部分年份的误差率（误差值与真实值之比）的绝对值在3%以内，个别年份的误差率绝对值为5%左右，整体误差率在合理的范围内，确保了该预测模型的准确性。

表4.2 2011–2020年重庆碳排放实际值与模拟值对比

年份	真实值	模拟值	误差值	误差率
2011	17945.75	17630.6	-315.149	-1.76%
2012	17713.05	17998.45	285.401	1.61%
2013	15341.73	15775.18	433.4537	2.83%
2014	16441.9	15524.55	-917.349	-5.58%
2015	14420.45	15206.4	785.9495	5.45%
2016	14862.15	15343.25	481.1007	3.24%
2017	15321.75	15218.7	-103.049	-0.67%
2018	15422.78	15237.81	-184.969	-1.19%
2019	15565.27	15251.2	-314.06	-2.01%
2020	15330	15167.35	-162.646	-1.06%

（三）长江经济带11个省市碳达峰路径预测结果分析

基于政策干预情景的参数设定，本文计算出了2021–2035年长江经济带11个省市在基准情景和政策干预情景下金融系统、技术系统的能源系统综合发展水平U。然后通过碳排放预测模型预测了2021–2035年长江经济带11个省市各自在基准情景和政策干预情景下的二氧化碳排放量，预测结果按长江经济下游地区（图4.1）、中游地区（图4.2）、上游地区（图4.3）分别展示如下：

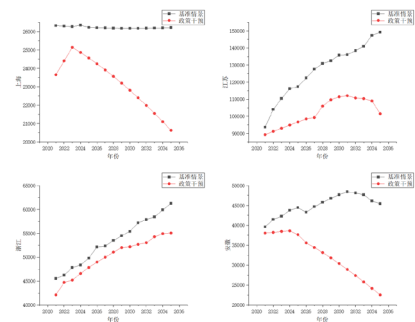


图4.1 2021–2035年长江经济带下游地区在不同情景下的碳排放预测结果

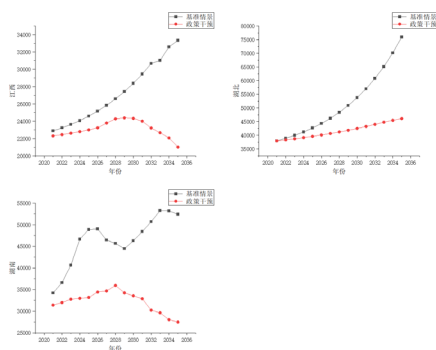


图4.2 2021–2035年长江经济带中游地区在不同情景下的碳排放预测结果

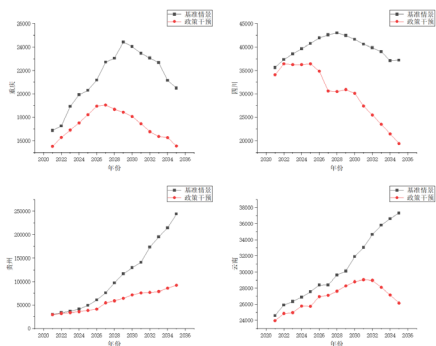


图4.3 2021–2035年长江经济带上游地区在不同情景下的碳排放预测结果

从政策干预的效果来看，可以发现相较于基准情景，政策干预下的二氧化碳排放量均得到较好的控制。从达峰情况来看，本文将11个省市的达峰情况分成了四类：

1. 在两种情景下均能在2030年碳达峰的省市：上海、四川、重庆。

上海在基准情景下二氧化碳排放量的变化幅度很小，在2024年出现了峰值；而在政策干预的情景下，达到峰值的年限提前了1年。四川在基准情景下在2028年二氧化碳排放量达到峰值42971万吨，而通过政策干预二氧化碳达峰的年份得到了提前，在2026年就达到了峰值。重庆在基准情景下到2029年可以实现碳达峰，峰值为24412万吨；在政策干预情景下，碳达峰的年份提前了两年，且峰值也有所降低，为19046万吨。

2. 仅在政策干预情景下能在2030年碳达峰的省市：安徽、湖南、江西。

安徽在基准情景下二氧化碳排放量先上升后下降，能在2031年实现碳达峰。而在政策干预的情景下，安徽能提前在2024年实现碳达峰。湖南在基准情景下到2026年出现了峰值，但是后

来先下降后增长，2033年再次达到新高峰。从政策干预情景可以看出，若是提升金融和能源水平，湖南将在2028年实现碳达峰。江西在基准情景下二氧化碳排放量呈上升趋势，在2021–2035年期间未出现峰值。通过政策干预，二氧化碳排放量的增长能够放缓，且在2029年二氧化碳排放量达到峰值。

3. 两种情景下均无法在2030年碳达峰的省市，但在2035年能达峰的省市：江苏、云南。

江苏在基准情景下二氧化碳排放量呈不断上升的趋势，说明若是按照现有水平继续发展，无法实现碳达峰。但是在政策干预的情景下，二氧化碳排放量在2031年出现了峰值。云南在基准情景下二氧化碳排放量呈现不断上涨的趋势，虽然后几年有放缓的趋势，但是在预测期内未出现峰值。而在政策干预情景下，二氧化碳排放量先升后降，在2031年出现了峰值，达到了29049万吨。

4. 两种情景下均无法在2035年碳达峰省市：浙江、湖北、贵州。

浙江在基准情景下二氧化碳排放量为缓慢上升的趋势，但无法实现2030年碳达峰的目标，而在给予政策干预下到2035年碳排放虽然稍有下降，却仍未能实现碳达峰。湖北在基准情景下二氧化碳排放量不断上升，在预测期内未出现峰值。在政策干预的情景下，仍然未出现峰值，但是从后三年增长幅度明显放缓。贵州在基准情景和政策干预两种情景下均无法实现碳达峰。在基准情景下，二氧化碳排放量上涨，未出现放缓的趋势。

五、结论

通过系统的研究，本文最终得出如下结论：

基于耦合协调度利用 K-means 聚类将长江经济带11个省市分为了四类，根据各类别特征设定了相应的政策干预情景。利用碳排放预测回归模型分别预测了长江经济带11个省市2021–2035年在基准情景和政策干预两种情景下碳排放的发展趋势。从政策干预的效果来看，可以发现相较于基准情景，政策干预下的二氧化碳排放量均得到较好的控制。

从达峰情况来看，本文将11个省市的达峰情况分成了四类：在两种情景下均能在2030年碳达峰、仅在政策干预情景下能在2030年碳达峰、两种情景下均无法在2030年碳达峰，但在2035年能达峰和两种情景下均无法在2035年碳达峰。针对第四类省市特别是贵州，政府应该出台更加严格的绿色金融转型、技术改革和能源产业优化的政策，力争实现碳达峰的目标，实现高质量协同发展。

参考文献

- [1] International Energy Agency (IEA). Energy Balance flows and the 2006 IPCC Guidelines.
- [2] 中华人民共和国国务院. 强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献 [EB/OL].
- [3] 李培林. 2018年中国社会形势分析与预测 [N]. 中国社会科学院院报, 2018–01–22(001).
- [4] 余碧莹, 赵光普, 安润颖等. 碳中和目标下中国碳排放路径研究 [J]. 北京理工大学学报 (社会科学版), 2021(2): 17–24.
- [5] 张保留, 吕连宏, 吴静等. 农村居民生活碳达峰路径及对策 [J]. 环境科学研究, 2021(5): 1–14.
- [6] 王雪同, 鲁根涛, 姚宏, 等. 中国制造业碳排放影响因素分析及碳达峰预测研究 [J]. 生态经济, 2025, 41(06): 34–40+53.
- [7] 梁力军, 马梦泽, 冯江林. 基于 STIRPAT 模型的山地城市碳达峰预测与实证：以重庆市数据为例 [J/OL]. 环境科学, 1–14.
- [8] 杨青, 江宇航, 吴婵媛, 等. 基于 CNN - LSTM - Attention 的中国省域交通运输业碳达峰预测研究 [J/OL]. 安全与环境学报, 1–12.
- [9] 王诚, 王晓娟. 长江经济带碳排放效率：测度与分析 [J]. 统计与决策, 2022, 38(17): 82–85.
- [10] 李在军, 尹上岗, 姜友雪等. 长三角经济增长与碳排放异速关系及形成机制 [J]. 自然资源学报, 2022, 37(06): 1507–1523.
- [11] 邹秀清, 杨林茵, 孙学成, 等. 长三角城市群碳达峰水平测度、时空演变及影响因素研究 [J/OL]. 软科学, 1–14.
- [12] 刘合林, 徐颖, 唐永伟, 等. 长江经济带省级行政单元碳达峰的多情景预测 [J]. 长江流域资源与环境, 2025, 34(03): 467–478.

农业新质生产力赋能城乡融合发展的内在逻辑 与作用机制

任琳

福建师范大学 数学与统计学院, 福建 福州 350000

DOI:10.61369/ASDS.2025050010

摘要： 新质生产力是党对新时代生产力的总结，农业新质生产力作为其重要组成部分，对城乡融合发展具有促进作用。本文基于2012–2023年中国30个省份数据研究农业新质生产力对城乡融合发展的影响与作用机制。结果表明，农业新质生产力总体增长显著，但区域分化突出，东中部地区和粮食主产区的生产力水平始终处于高位。基准回归证实农业新质生产力对城乡融合发展具有稳健促进作用。此外，各地理分区农业新质生产力对城乡融合发展具有不同程度的促进作用，这种促进作用在各农业功能分区呈现“产销平衡区 > 主产区 > 主销区”的态势；农民增收与农业现代化在两者的促进作用中发挥部分中介效应。

关键词： 农业新质生产力；城乡融合发展；农民增收；农业现代化

The Internal Logic and Mechanism of Agricultural New Quality Productivity Forces Urban-Rural Integrated Development

Ren Lin

School of Mathematics and Statistics, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350000

Abstract： New quality productive forces represent the Communist Party of China's theoretical summation of productive forces in the new era. As a crucial component, agricultural new quality productive forces play a promoting role in urban-rural integrated development. This paper examines the impact and mechanism of agricultural new quality productive forces on urban-rural integrated development using data from 30 Chinese provinces from 2012 to 2023. The findings demonstrate a significant overall growth in agricultural new quality productive forces, albeit with marked regional disparities. Productivity levels consistently remain high in the eastern, central regions, and major grain-producing areas. Baseline regression confirms the robust promoting effect of agricultural new quality productive forces on urban-rural integrated development. Furthermore, the degree of this promoting effect varies across geographical divisions. Among agricultural functional zones, the effect manifests as 'production-marketing balanced areas > core production areas > core consumption areas. Increased farmer incomes and agricultural modernization exert partial mediating effects in this promoting relationship.

Keywords： agricultural new quality productivity; urban-rural integrated development; increasing farmer incomes; agricultural modernization

引言

十八大以来，为解决“三农”问题，以习近平同志为核心的党中央提出众多新型城镇化战略方针，如今新型城镇化发展进入中后期，城乡融合发展成为此阶段关键命题。二十大报告提出“着力推进城乡融合和区域协调发展”的战略目标，标志着城乡关系从要素互补向制度协同转型。然而，据《2024年国民经济和社会发展统计公报》显示，城乡居民人均可支配收入分别为54188元和23119元，城乡收入比处于2.34:1的高位。这一现象折射出我国城乡二元结构仍为突出，城乡融合发展面临更深层次的挑战。2025年中央一号文件首次提出以科技创新引领先进生产要素集聚，因地制宜发展农业新质生产力。作为新质生产力的重要组成部分，农业新质生产力以科技打头阵，以绿色为底色，通过改革农业生产力三要素的作用方式，突破传统农业依赖人力资源密集的粗放型发展路径，推动农业生产率实现跨越式发展，为实现城乡融合发展提供内生动力^[1]。在此背景下探索以农业新质生产力为核心驱动的城乡融合发展路径，成为实现“大国小农”向“大国强农”跨越的关键。

一、文献综述

新质生产力是党对新时代社会主义生产力的总结，也是对经济高质量发展的战略性指导，农业新质生产力是其中的重要组成部分。目前，已有大量文献聚焦于农业新质生产力的理论研究。李晓园等（2025）将农业新质生产力定义为以农业科技创新为主导，实现关键性或颠覆性农业技术突破，优化配置农业生产要素所形成的先进农业生产力^[2]。罗必良（2024）从理论层面将农业新质生产力的要素特征涵括为新型劳动力、新型劳动工具和新型劳动对象，细致阐述农业新质生产力的发展目标和重点^[3]。高强和程长明（2024）引入生产关系要适合生产力发展的理论方法，强调应形成与农业新质生产力相适应的新型生产关系^[4]。也有学者对农业新质生产力与其他宏观变量的因果关系进行研究。其一，农业新质生产力对其他变量的影响。在中国式现代化建设的新阶段，为实现农业强国提出的农业新质生产力，对促进农村共同富裕和农村居民消费具有重要现实意义^[1-5]。其二，其他宏观变量对农业新质生产力的影响。数字普惠金融和数字技术的发展正在为破解农业新质生产力发展低下难题开辟新路径^[6-7]。

对城乡融合发展的研究，刘彦随（2018）探讨新时代城乡融合与乡村振兴的基础理论，剖析乡村发展面临的主要问题^[8]，周德（2021）从城乡融合的概念内涵、基础理论等方面开展城乡融合评价^[9]。也有学者借助莫兰指数、LISA 时空路径和分位数回归模型探索各省城乡融合的时空演变特征^[10]。此外，田蓬鹏等（2024）和张震宇（2024）更具前瞻性的研究新质生产力对城乡融合发展的影响，为厘清新质生产力赋能城乡融合的理论逻辑，探索现实路径提供理论基础^[11-12]。孙志远（2024）从数字新质生产力出发，利用固定效应和门限效应等模型，实证分析其对城乡高质量融合的作用机制^[13]。

然而，城乡融合发展旨在推动城市与乡村在经济等多维度实现协同共生，构建要素流动，功能互补的新型城乡关系。农村作为具有独立价值和发展动能的关键角色，还未见有文章将新质生产力细化至农村层面，研究农业新质生产力对城乡融合发展的影响。因此，本文基于农业新质生产力与城乡融合发展的战略需求，厘清两者内在逻辑，探讨样本期内全国省域农业新质生产力对城乡融合发展的作用机制，为各省市后期为推进城乡融合发展出台宏观应对政策提供参考。

二、研究假设

农业新质生产力以科技创新为核心驱动因素，通过智能装备和农业数字技术等要素重构农业生产方式，实现效率提升和产量跃升^[2]。城乡融合发展通过城乡之间要素双向流动与制度创新，打破城乡二元结构，实现城乡在经济、人口、社会、空间和生态五个方面协同发展。

（一）农业新质生产力与城乡融合发展

第一，对城乡经济融合的促进作用。农业新质生产力能够促进大数据和智慧物流等现代化设施下沉至乡村，促进农产品产业

链更快升级，拓宽农产品销售渠道，从而增加地区第一产业产值，促进城乡经济向上融合。第二，对城乡人口融合的促进作用。农业新质生产力催生更多例如无人机操控、智慧农场经理等新型岗位，吸引高素质农业人才返乡创业，打破机制壁垒与户籍制度局限性，使地区人口资源在城乡之间合理分配，助力城乡人口融合^[13]。第三，对城乡社会融合的促进作用。远程技术、5G 网络 and 智能服务平台等通过农业新质生产力传播至千万农户，推动农业甚至其他医疗、教育等社会行业在乡村开花，有效弥合城乡之间公共服务不平等鸿沟，使城乡居民最大限度享受医疗、教育等社会服务均等化，加速城乡社会融合。第四，对城乡空间融合的促进作用。发展农业新质生产力拓宽城乡交通运输纽带，推动农村向中心城镇集聚，形成村镇联动空间格局，加快城乡空间融合。第五，对城乡生态融合的促进作用。通过运用更节能，更环保的新型农业机械设备，推动农业向低碳化、绿色化发展，构建城乡共生的绿色循环体系，为实现城乡生态融合提供渠道。综上所述，提出如下假设：

H₁: 农业新质生产力能够促进城乡融合发展。

（二）农业新质生产力，农民增收和城乡融合发展

城乡融合发展为解决“三农”问题，打破城乡二元结构孕育生，农民问题是农业、农村、农民问题的关键，而农业新质生产力在推动农民增收的同时能够有效缓解农民问题。农业新质生产力主要通过降低农产品生产成本、收入结构多元化与提升农产品销售渠道三方面推进农民增收^[14]。其一，通过智能装备和数字技术的应用，提高农业生产函数中的技术弹性系数，有效规避农产品在生长过程中可能面临的各种风险，降低农药和化肥等资源消耗，在提升农产品亩产量的同时降低生产成本。其二，农业新质生产力通过技术嵌入重构农业的价值创造模式，拓展农业的生态、文化及服务功能，催生乡村文旅、休闲农业等新兴业态，推动农民收入结构从单一农产品销售向“生产性收入+服务性收入+资产性收入”复合结构转型。其三，农业新质生产力所提供的数字化交易平台，通过去中介化重整农产品产业链分配格局，有效解决中间商赚差价等系列难题，推进农民增收。

农村人均可支配收入增加，进而在需求侧拉动农村消费升级引致城乡市场融合发展。农民收入增长促使农村社会消费品零售额逐年增加，农村居民在生活用品等各方面需求放大，从解决温饱上升至品质生活，倒逼城市工商业向农村市场下沉，加速城乡之间融合发展。农民增收在供给侧驱动城乡融合发展。增收农民通过资产积累扩大再生产投资，推动县域小微企业发展，降低劳动力单向流动压力，促进城乡要素配置效率提升，加快城乡融合发展。综上所述，提出如下假设：

H₂: 农业新质生产力通过推进农民增收间接影响城乡融合发展。

（三）农业新质生产力，农业现代化和城乡融合发展

为建设社会主义现代化强国，核心之义在于加快建设农业强国，相较于传统农耕方式新型农业现代化占据优势，推进农业现代化的关键之举在于推进农业生产、产业体系现代化。首先，农业新质生产力通过提高农业劳动生产率、农产品质量以及拓宽农

业生产范围，促进农业生产体系现代化^[15]。主要体现在智能化农机的普及大幅降低农业劳动密度，其实质是劳动力要素从体力密集型向技术复合型转变，进而提升农业劳动生产效率；北斗系统使农机装备实现厘米级作业，土地单位面积播种误差率降低，保障农产品出土质量；农业生产范围不再局限于已有土地，还包括以科技进步发现的非实物要素和非自然资源。农业新质生产力促进农业生产体系现代化，在此基础上，生产体系助推农产品生产链向透明化发展，农产品生产可追根溯源，增强消费端信任溢价，为农村经济发展带来动力，进而促进城乡经济融合快速发展。

其次，农业新质生产力通过催生农村新业态、拓展农业多功能性和延伸产业链促进农业产业体系现代化^[15]。其一，新型劳动力接受新鲜事物的能力强，以此催生譬如农业电商等新型农业经营业态，使乡村特色产品通过电商渠道占据城市消费市场，打通城乡要素双向流动，促使城乡人口、社会向更高质量融合。其二，新型农业数字生产力通过物联网、区块链等技术的应用，实现农业多功能性，休闲农业、度假村庄的实现打破地理隔阂，形成城市消费市场反哺乡村文旅产业新格局，助推城乡空间融合。其三，新型农业绿色生产力促进农业产业链向绿色产业延伸，通过跨区域生态补偿构建城乡环境共同体，用城市技术处理农业氨氮等污染问题，为城乡生态融合发展保驾护航。综上所述，提出如下假设：

H₃: 农业新质生产力通过推进农业现代化间接影响城乡融合发展。

三、研究设计

（一）数据来源

本文选取2012–2023年中国30个省、市、自治区（不包括西藏和港澳台地区）的面板数据，主要数据来源于《中国统计年鉴》《中国科技统计年鉴》《中国农村统计年鉴》《中国环境统计年鉴》、中国研究数据服务平台和北京大学数字金融研究中心，并利用线性插值法补全个别缺失值。

（二）变量选取

1. 被解释变量

本文被解释变量为城乡融合发展（INT）。参考有关研究^[16]，选取城乡经济融合，社会融合，人口融合，空间融合和生态融合，基于熵值法构建城乡融合发展综合指标体系。具体指标与描述参见表1。

表 1：城乡融合发展综合指标体系

一级指标	二级指标	指标计算或描述	权重	属性
经济融合	城乡居民收入差距（%）	城镇居民人均可支配收入 / 农村居民人均可支配收入	0.0169	–
	城乡居民消费差距（%）	城镇居民人均消费支出 / 农村居民人均消费支出	0.0141	–
	二元对比系数（%）	（第一产业产值 / 第一产业从业人数） / （第二、三产业产值 / 第二、三产业从业人数）	0.0507	+

人口融合	非农与农业从业比重比（%）	第二、三产业从业人数 / 第一产业从业人数	0.2564	+
	城乡人口比（%）	城镇人口数 / 农村人口数	0.0121	–
	基础教育水平（%）	初中及以上受教育人数 / 6岁以上总人口数	0.0239	+
社会融合	城乡人均医疗保健对比系数（%）	城镇居民人均医疗保健支出 / 农村居民医疗保健支出	0.0076	–
	城乡失业保险覆盖率（%）	城乡居民失业保险参保人数 / 常住人口数	0.1109	+
	城乡养老保险覆盖率（%）	城乡居民养老保险人数 / 总人口数	0.0305	+
	城乡文教娱乐对比系数（%）	城镇居民人均文教娱乐服务支出 / 农村居民人均文教娱乐支出	0.0051	–
	城乡交通通讯对比系数（%）	城镇居民人均交通通讯支出 / 农村居民人均交通通讯支出	0.0074	–
空间融合	城市空间扩张（%）	农作物播种面积 / 建成区面积	0.0606	+
	公路路网密度（公里 / 万公顷）	公路运营里程 / 土地总面积	0.0495	+
	土地城镇化水平（%）	建成区面积 / 土地总面积	0.1861	+
	私人汽车拥有量（万辆）	区域内准许挂牌上路的私人汽车数量	0.0900	+
生态融合	生活垃圾无害化处理率（%）	直接数据	0.0054	+
	公共厕所普及率（%）	每万人拥有公共厕所	0.0378	+
	环境保护支出率（%）	地方财政环境保护支出 / 地方财政一般预算支出	0.0349	+

2. 核心解释变量

本文核心解释变量为农业新质生产力（AGR）。基于农业新质生产力的基本内涵，本文从数字、科技和绿色三方面构建农业新质生产力综合指标体系^[17]。同样利用熵值法得到其综合指标体系。具体指标与描述参见表2。

表 2：农业新质生产力综合指标体系

一级指标	二级指标	指标计算或描述	权重	属性
农业数字生产力	农村互联网普及率（%）	农村互联网宽带接入用户 / 农村人数	0.1203	+
	农村智能手机普及（部）	农村居民平均每百户年末移动电话拥有量	0.0155	+
	农村广播电视覆盖率（%）	（农村广播电视节目综合人口覆盖率 + 农村电视节目综合人口覆盖率） / 2	0.0047	+
	农业物联网信息技术应用（公里 / 人）	邮政业农村投递路线农村人数	0.0345	+
	数字产品与服务消费水平（%）	农村居民食品消费支出 / 农村居民总消费支出	0.0098	–
	农村网络支付规模（%）	数字普惠金融指数	0.0291	+

农业科技生 产力	农业 R&D 人 员 (人)	R&D 人员全时当量 × (农林 牧渔业总产值 / 地区 GDP)	0.0976	+
	农业 R&D 经 费 (万元)	R&D 经费 × (农林牧渔业总 产值 / 地区 GDP)	0.1063	+
	农业有效专利 数 (个)	全国有效专利数 × (农林牧 渔业总产值 / 地区 GDP)	0.1396	+
	农业技术市场 成交额 (万 元)	(技术流向地域合同金额 + 技术输出地域合同金额) × (农林牧渔业总产值 / 地区 GDP)	0.1650	+
	农业机械化水 平 (-)	农业机械总动力	0.0878	+
	农业植物新品 种权申请数 (件)	直接数据	0.0990	+
农业绿色生 产力	森林覆盖率 (%)	直接数据	0.0528	+
	农业 COD 污染排放率 (%)	农业 COD 污染排放占比 / 第 一产业产值占比	0.0041	-
	农业氨氮排放 率 (%)	农业氨氮排放占比 / 第一产 业产值占比	0.0047	-
	农用柴油使用 效率 (吨 / 亿 元)	农用柴油总量 / 农林牧渔业 总产值	0.0097	-
	化肥使用强度 (吨 / 千公顷)	化肥施用量 / 农作物总播种 面积	0.0125	-
	农药使用强度 (吨 / 千公顷)	农药使用量 / 农作物总播种 面积	0.0069	-

3. 控制变量

为探究除农业新质生产力外其他因素对城乡融合发展的重要影响,本文设定4个控制变量,分别为工业化水平(IND)、政府干预(GOV)、环境规制(ENV)和对外贸易(FOR)。其中工业化水平用各省份工业增加值与当年该省份的GDP比值测算;政府干预用地方财政一般预算支出与当年该省份GDP比值测算;环境规制用各省工业污染治理完成投资测算;对外贸易则按经营单位所在地分的进出口总额与该地区的GDP比值测算^[11]。

4. 中介变量

为分析农业新质生产力对城乡融合发展的作用机制,采用农民增收(FAR)和农业现代化(MOD)作为本文的中介变量。参考杨林和赵洪波(2022),将农民人均可支配收入作为衡量农民增收的标准^[18]。此外,实现农业现代化是中国式现代化的应有之义,也是加快建设农业强国的必由之路^[15]。因此以农业生产、产业体系现代化构建农业现代化综合指标体系。具体指标与描述参见表3。

表 3: 农业现代化综合指标体系

一级指标	二级指标	指标计算或描述	权重	属性
农业生产体 系现代化	粮食综合生产水平 (万吨 / 千公顷)	粮食总产量 / 粮食作 物播种面积	0.0824	+
	劳均有效灌溉面积 (千公顷 / 人)	有效灌溉面积 / 第一 产业从业人员	0.2480	+
农业产业体 系现代化	农产品加工业发展 水平 (%)	农产品加工业总产值 / 农林牧渔业总产值	0.2759	+
	牧、渔业发展水平 (%)	畜牧业和渔业总产值 / 农林牧渔业总产值	0.0802	+
	休闲农业发展水平 (%)	休闲农业总产值 / 农 林牧渔业总产值	0.3135	+

(三) 模型选择

1. 基准回归模型

依据王亚红等(2024),定义如下基准回归模型探究农业新质生产力对城乡融合发展的直接影响^[17]

$$INT_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 AGR_{it} + \alpha_2 C_{it} + u_i + v_t, \quad (1)$$

其中, i 表示每个省份, t 表示样本期内的年份, INT 代表城乡融合发展, AGR 代表农业新质生产力, C 代表本文所选的四个控制变量, α_0 是常数项, α_1, α_2 是回归系数, u_i 表示个体固定效应, v_t 表示时间固定效应, ε_{it} 表示随机扰动项。

2. 中介效应模型

为深入探究农业新质生产力对城乡融合发展的作用机制,在上式的基础上,根据上文选取的中介变量定义如下模型

$$\begin{aligned} FAR_{it} &= \beta_0 + \beta_1 AGR_{it} + \beta_2 C_{it} + u_i + v_t + \varepsilon_{it} \\ INT_{it} &= \gamma_0 + \gamma_1 AGR_{it} + \gamma_2 FAR_{it} + \gamma_3 C_{it} + u_i + v_t + \varepsilon_{it} \\ MOD_{it} &= \beta_0^* + \beta_1^* AGR_{it} + \beta_2^* C_{it} + u_i + v_t + \varepsilon_{it} \\ INT_{it} &= \gamma_0^* + \gamma_1^* AGR_{it} + \gamma_2^* MOD_{it} + \gamma_3^* C_{it} + u_i + v_t + \varepsilon_{it} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, i 表示每个省份, t 表示样本期内的年份, FAR 表示农民增收, MOD 表示农业现代化, $\beta_0, \beta_0^*, \gamma_0, \gamma_0^*$ 为常数项,其他参数和变量与式(1)一致。

四、实证检验与分析

(一) 农业新质生产力发展水平分析

观察图1和图2中2012–2023年我国农业新质生产力总体水平可知,农业新质生产力逐年攀升,总水平由2012年的0.1584上升至2023年的0.3554,增长了124.4%,但主要数值分布于0.1至0.3之间,且平均值仅为0.237,相较于东中部地区和粮食主产区总水平持续处于低位。

从各地理分区来看。四个地区2012–2023年农业新质生产力均实现不同程度增长。首先,东中部地区增速最快,12年间两地农业新质生产力的绝对差值都在0.2以上,这与该地区新型农业技术密集和产业链整合完整等因素密不可分。其次,东北地区受当地工业影响,容易引入先进的农业数字、科技生产力,土地生产率增幅显著,导致东北地区农业新质生产力从0.1775增长至0.3008。最后,西部地区受资源禀赋限制,长期以来农业新质生产力低于全国平均水平。从各农业功能分区来看。2012–2023年三个农业功能区的农业新质生产力得到普遍提升。首先,主产区凭借其自然资源集聚与补贴政策倾斜优势稳居首位。其次,粮食主销区一般多位于经济发达的东部地区,该地区居民对更绿色、更健康的农产品需求度较高,倒逼农产品供应链提量更提质,推动该地农业新质生产力发展。最后,产销平衡区虽在样本期末年仅增长至0.2388,不及主产区十年前的水平,但其年平均增速达11.4%,反映出该地区的后发优势,特色农业,如云南花卉、宁夏枸杞等与农业电商有机结合,带动该地区农业产业发展提升农业新质生产力水平。

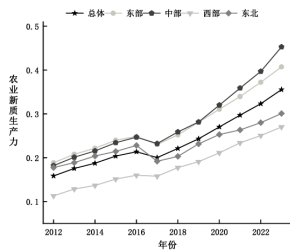


图 1: 各地理分区农业新质生产力

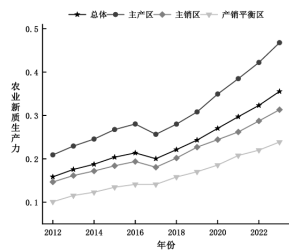


图 2: 各农业功能分区农业新质生产力

（二）描述性统计与诊断

描述性统计与诊断检验结果如表 4 所示。城乡融合发展与农业新质生产力均通过熵值法构建综合指标体系，其平均值等其他描述性统计量处于较低水平，源于多维指标降维的固有特性，符合综合指标体系的特征。观察变量分布形态发现，城乡融合发展呈现右偏尖峰特征，农业新质生产力呈现右偏平峰特征，且极差相对较大，可能存在极端观测值。此外，除工业化水平外，其他控制变量都为右偏状态。所有变量 VIF 值均低于 5，表明变量间不存在多重共线性。Hausman 检验在 1% 的水平上拒绝随机效应假设，因此基准回归模型应采用双向固定效应模型以控制个体异质性与时间趋势。

表 4: 描述性统计与诊断检验结果

变量	平均值	标准差	最小值	最大值	偏度	峰度	VIF
INT	0.243	0.086	0.127	0.653	1.792	4.075	
AGR	0.237	0.129	0.047	0.761	1.148	1.257	1.639
IND	32.580	7.732	10.014	54.184	-0.701	0.928	1.395
GOV	25.825	11.015	10.501	75.830	1.699	4.214	2.292
ENV	20.308	20.512	0.048	141.646	2.314	7.229	1.352
FOR	26.415	26.500	0.763	135.412	1.769	2.706	1.459
Hausman 检验			H 值 = 211.96		P 值 = 0.000***		
B P 检验			B P 值 = 95.82		P 值 = 0.000***		
Wooldridge 检验			F 值 = 190.05		P 值 = 0.000***		

（三）基准回归

表 5 模型（1）至模型（5）通过渐进式基准回归系统检验农业新质生产力对城乡融合发展的影响。农业新质生产力在逐步纳入工业化水平、政府干预、环境规制及对外贸易等控制变量后，系数虽从 0.332 衰减至 0.170，但始终在 1% 水平上显著为正，证实其对城乡融合发展的促进效应。模型解释力 R^2 从 0.491 提升至 0.698，表明控制变量有效捕捉 20.7% 的额外变异。据此， H_1 初步得以验证。

表 5: 基准回归结果

INT	模型（1）	模型（2）	模型（3）	模型（4）	模型（5）
AGR	0.332*** (0.019)	0.244*** (0.022)	0.185*** (0.023)	0.167*** (0.025)	0.170*** (0.021)
IND		-0.003*** (0.0004)	-0.004*** (0.0004)	-0.004*** (0.0004)	-0.003*** (0.0004)
GOV			-0.003*** (0.0005)	-0.003*** (0.0005)	-0.003*** (0.0004)
ENV				-0.0002** (0.0001)	-0.0003*** (0.0001)

FOR					-0.002*** (0.0002)
个体固定效应	控制	控制	控制	控制	控制
时间固定效应	控制	控制	控制	控制	控制
样本量	360	360	360	360	360
R^2	0.491	0.552	0.599	0.604	0.698

注：***、**、* 分别代表在 1%、5%、10% 的水平上显著（下同）。

（四）稳健性检验

本文采用以下方法验证基准回归结果的稳健性（见表 6）。

第一，对样本数据进行缩尾处理。鉴于表 4 诊断检验结果，核心解释变量可能存在极端异常值对回归结果造成影响，对全样本数据进行 1% 缩尾处理，以此检验基准回归的稳健性。模型（6）显示，农业新质生产力的系数与基于基准回归的系数相比，在大小、显著性和方向上均未发生较大改变，说明样本数据极端值未对估计产生结构性扭曲，研究结论可靠。

第二，构建动态面板模型。由于本文难以对影响城乡融合发展的因素进行全面考察，因此，为减小因遗漏变量产生的偏差，将城乡融合发展一阶滞后项纳入模型，得到动态面板模型，重新对研究对象之间的关系进行检验，模型（7）显示农业新质生产力在 1% 的水平上显著，说明基准回归结果稳健。

表 6: 稳健性检验结果

	模型（6） INT	模型（7） INT_lag1	模型（8） INT	模型（9） INT	模型（10） INT
AGR	0.181*** (0.019)	0.165*** (0.022)	0.227*** (0.015)	0.170*** (0.043)	
PC1					0.006*** (0.001)
PC2					0.016*** (0.001)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制
个体固定效应	控制	控制	控制	控制	控制
时间固定效应	控制	控制	控制	控制	控制
样本量	360	330	312	360	360
R^2	0.749	0.681	0.796	0.799	0.799

第三，缩小样本量。在剔除四个直辖市后，重新对数据进行回归分析，模型（8）显示农业新质生产力的系数上升至 0.227 且显著性未变，反向证明本文的核心结论不受特殊区域的干扰。

第四，替换标准误。表 4 中 BP 检验和 Wooldridge 检验证实数据存在显著的异方差与自相关性，若继续使用传统标准误可能导致统计推断有偏。因此模型（9）展示用聚类稳健标准误修正样本数据后的基准回归结果，核心解释变量的标准误由 0.021 扩大至 0.043，表明传统标准误可能低估了参数的波动性。

第五，更换变量测度方式。采用主成分分析法重新测算农业

新质生产力，并将第一、二主成分带入模型中再次回归，模型（10）显示，前两个主成分系数显著为正，再次证明前述研究结论具有跨方法、跨样本的强稳健性。

（五）内生性检验

本文基于区域协同发展理论，类比田蓬鹏等（2024）的工具变量构造方法，定义相同地理分区内除自身以外其他省份的农业新质生产力均值为工具变量^[11]，通过两阶段最小二乘法（2SLS）系统修正模型内生性偏误。由于同地区在经济状况与要素配置等因素上互联互通，农业新质生产力存在显著空间关联，因此符合工具变量的相关性；此外，同一区域内不同个体的农业新质生产力满足排他性约束，符合工具变量外生性要求。为剥离农业新质生产力的外生成分，构建表7模型（11），随后用农业新质生产力中仅由外生工具变量解释的部分 \hat{AGR} 与城乡融合发展进行回归，模型（12）显示 \hat{AGR} 的系数相较于模型（5）显著变大，表明内生性问题会导致影响效应被低估。

表 7：内生性检验结果

	模型（11） AGR	模型（12） INT
工具变量	0.207*** (0.020)	
\hat{AGR}		0.408*** (0.041)
控制变量	控制	控制
个体固定效应	控制	控制
时间固定效应	控制	控制
样本量	360	360
R^2	0.661	0.724

（六）机制检验

在经过内生性和稳健性检验之后，得到农业新质生产力能够显著促进城乡融合发展。为进一步检验这种促进作用的传导机制，本文选用农民增收和农业现代化作为中介变量，对两者在中介效应检验中的作用进行专项分析（见表8）。

表 8：中介效应检验结果

	模型（13） FAR	模型（14） INT	模型（15） MOD	模型（16） INT
AGR	2.999** (0.251)	0.039** (0.015)	0.079** (0.038)	0.146*** (0.018)
FAR		0.070* (0.003)		
MOD				0.311*** (0.026)
控制变量	控制	控制	控制	控制
个体固定效应	控制	控制	控制	控制
时间固定效应	控制	控制	控制	控制
样本量	360	360	360	360
R^2	0.775	0.898	0.357	0.791

模型（14）和模型（16）显示，农民增收与农业现代化对城乡融合发展的影响系数分别为0.07和0.311，且分别通过10%和1%的显著性水平。模型（13）表明农业新质生产力对农民增收的影响系数为2.999且，说明农业新质生产力可有效提升农业生产效率，推动农民可支配收入增加，农民增收进一步推动农村居民消费升级或创业投资，从而促进城乡之间要素双向流动。农民增收在农业新质生产力对城乡融合发展的影响中发挥中介作用。据

此， H_2 得以验证。其次，模型（15）表明农业新质生产力对农业现代化的影响系数为0.079且在5%的水平上显著为正。说明农业现代化在农业新质生产力对城乡融合发展的影响中同样发挥中介作用。据此， H_3 得以验证。

（七）异质性分析

1. 地理分区的异质性

为进一步揭示农业新质生产力对城乡融合发展在各地理分区上的异质性，对中国东部、中部、西部和东北地区的样本分别进行分析，表9模型（17）至（20）表明，各地理分区农业新质生产力对城乡融合发展均具有促进作用，且西部地区城乡融合发展的影响力度显著大于其他地区。东中西部地区均通过5%的显著性水平，东北地区则通过10%的显著性水平。各地区的影响力系数依次为0.097、0.052、0.126和0.067，表明农业新质生产力对城乡融合发展的影响呈现“西部>东部>东北>中部”的格局。这种差异源于经济发展阶段与产业要素禀赋差异的空间映射，东部、东北及中部地区进入工业化后期，此阶段农业创新技术已大范围覆盖，农业新质生产力对城乡融合发展的影响较低。而西部地区仍处于工业化中期，全域第一产业产值高于二三产业，农业作为地区家庭的主要收入来源，使得农业新质生产力对城乡融合发展影响偏大。

表 9：各地理分区的异质性分析结果

INT	模型（17）	模型（18）	模型（19）	模型（20）
AGR	0.097** (0.048)	0.052** (0.021)	0.126*** (0.028)	0.067* (0.048)
控制变量	控制	控制	控制	控制
个体固定效应	控制	控制	控制	控制
时间固定效应	控制	控制	控制	控制
样本量	120	72	132	36
R^2	0.783	0.931	0.863	0.858

2. 农业功能分区的异质性

为深入了解农业新质生产力对城乡融合发展在各农业功能区的异质性，对粮食主产、主销和产销平衡区样本数据进行分析，由表10模型（21）至（23），主产区 and 产销平衡区农业新质生产力的估计系数均在1%的显著性水平上为正，而主销区并未在任何显著性水平上拒绝原假设，这与各农业功能区在粮食生产过程中扮演的角色密切相关。主产区依靠智慧农业，新型农业生产工具普及等优势提升农村农民经济活力，进而缩小城乡收入差距，而产销平衡区因处于农业到非农行业转型期，更易激发像乡村旅游这种提高城乡融合的产业，使农业新质生产力对城乡融合发展的影响系数在三个功能区中最高。

表 10：各农业功能分区的异质性分析结果

INT	模型（21）	模型（22）	模型（23）
AGR	0.178*** (0.018)	0.033 (0.058)	0.332*** (0.031)
控制变量	控制	控制	控制
个体固定效应	控制	控制	控制
时间固定效应	控制	控制	控制
样本量	156	84	120
R^2	0.824	0.790	0.832

五、结束语

本文对2012–2023年农业新质生产力对城乡融合发展的影响因素和作用机制进行分析。主要研究结论为：第一，我国农业新质生产力总体水平增长显著，但区域分化突出，东中部地区和粮食主产区的生产力水平始终处于最高位置。第二，基准回归与内生性、稳健性检验证实，农业新质生产力对城乡融合发展具有稳健的促进作用。第三，异质性分析发现，各地理分区农业新质生产力对城乡融合发展均具有不同程度的促进作用，东中西部地区均通过5%的显著性水平，东北地区在10%的显著性水平显著促进；在各农业功能分区上，这种促进作用呈现“粮食产销平衡区>

粮食主产区>粮食主销区”的态势。第四，农民增收与农业现代化在农业新质生产力对影响城乡融合发展中发挥部分中介作用。

针对以上结论，本文提出如下应对政策。首先，为破解区域差异化，对粮食主产区推广智能农业技术并建立技术替代补偿基金，主销区以绿色需求倒逼供应链升级。其次，将新型农机设备操作培训与二三产业技能绑定，发展职业多元化的全能型农民，推动农民增收在促进城乡融合发展上发挥更高的中介作用；建立农业、住建和交通联合工作组，统筹农村基建与技术创新，提高农业现代化建设，强化农业现代化对城乡融合发展的中介作用。最后，构建全国监测平台，动态预警区域风险，推动城乡融合向创新、包容双轮驱动转型。

参考文献

[1] 马桔红. 2024,《农业新质生产力、数字化转型与农民农村共同富裕》[J]. 统计与决策, 第23期: 12–18.

[2] 李晓园、金雨乐和陈丽琴. 2025,《农业新质生产力影响城乡收入差距的作用机制与政策建议》[J]. 江西社会科学, 第4期: 69–84.

[3] 罗必良. 2024,《论农业新质生产力》[J]. 改革, 第4期: 19–30.

[4] 高强和程长明. 2024,《农业新质生产力与新型生产关系: 逻辑思路与改革路径》[J]. 中国农业大学学报(社会科学版), 第4期: 41–54.

[5] 杨文惠. 2025,《农业新质生产力对农村居民消费升级的影响——基于中介效应和门槛效应的实证》[J]. 商业经济研究, 第2期: 53–57.

[6] 申云、刘彦君和李京蓉. 2024,《数字普惠金融赋能农业新质生产力提升的逻辑、障碍及路径》[J]. 南京农业大学学报(社会科学版), 第5期: 158–171.

[7] 周振. 2024,《数字技术赋能农业新质生产力: 作用机理、问题障碍与应对策略》[J]. 中国农业大学学报(社会科学版), 第4期: 55–70.

[8] 刘彦随. 2018,《中国新时代城乡融合与乡村振兴》[J]. 地理学报, 第4期: 637–650.

[9] 周德、戚佳玲和钟文钰. 2021,《城乡融合评价研究综述: 内涵辨识、理论认知与体系重构》[J]. 自然资源学报, 第10期: 2634–2651.

[10] 王武林、罗婉璐和周伟健. 2025,《福建省县域城乡融合时空演变与跃迁机制》[J]. 人文地理, 第1期: 113–123.

[11] 田蓬鹏、潘子纯和朱玉春. 2024,《新质生产力对城乡融合发展的影响》[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 第6期: 12–24.

[12] 张震宇. 2024,《新质生产力赋能城乡融合: 理论逻辑与路径探索》[J]. 重庆理工大学学报(社会科学), 第2期: 11–21.

[13] 孙志远. 2024,《数字新质生产力对城乡高质量融合的影响与机制》[J]. 中国流通经济, 第5期: 28–40.

[14] 杨文溥和李照略. 2024,《农业新质生产力、农民收入增长与收入分配效应》[J]. 郑州大学学报(哲学社会科学版), 第6期: 56–63.

[15] 陈慧卿和曾福生. 2024,《农业新质生产力对农业现代化发展的影响研究》[J]. 农业经济与管理, 第3期: 27–41.

[16] 孙涛、孙斌和薛建春. 2025,《黄河流域城市群城乡融合与生态环境交互胁迫及耦合协调研究》[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 第5期: 1–12.

[17] 王亚红和韦月莉. 2024,《农业新质生产力对农民增收的影响》[J]. 农林经济管理学报, 第4期: 446–455.

[18] 杨林和赵洪波. 2022,《数字普惠金融助力农民增收的理论逻辑与现实检验》[J]. 山东社会科学, 第4期: 149–155.

新质生产力赋能制造业产业链韧性提升的作用机理

余呈先, 陆正慧

安庆师范大学 经济与管理学院, 安徽 安庆 246133

DOI:10.61369/ASDS.2025050011

摘要：当前，我国制造业产业链面临多重挑战，全球化工分深化导致产业链环节增多、跨国协作复杂度上升等外部风险，使得产业链稳定性受到严峻考验。我国制造业产业链存在“卡链”“脱链”“断链”风险，充分表明提升制造业产业链韧性的工作刻不容缓。新质生产力以技术创新为内核，通过数字化、智能化手段实现效能跃升，并催生新兴业态，成为适配高质量发展要求的新型生产力形态。在当前全球产业链重构的大背景下，提升制造业产业链韧性对于保障国家经济安全、维护产业链韧性稳定具有重要意义。本文研究利用2012—2022年全国30个省份的面板数据，采用固定效应模型、中介效应模型等计量工具，实证分析了新质生产力对制造业产业链韧性的作用路径及其影响效果。

关键词：新质生产力；制造业产业链韧性；产业技术创新

The Mechanism of Empowering Manufacturing Industry Chain Resilience with New Quality Productivity

Yu Chengxian, Lu Zhenghui

School of Economics and Management, Anqing Normal University, Anqing, Anhui 246133

Abstract：At present, China's manufacturing industry chain is facing multiple challenges. The deepening of global division of labor has led to an increase in the number of links in the industry chain and an increase in the complexity of cross-border cooperation, which poses a severe challenge to the stability of the industry chain. There are risks of "chain jamming," "disconnection," and "breakage" in China's manufacturing industry chain, which fully demonstrates the urgent need to improve the resilience of the manufacturing industry chain. New quality productivity takes technological innovation as its core, achieves efficiency leaps through digital and intelligent means, and gives birth to emerging business models, becoming a new form of productivity that meets the requirements of high-quality development. Against the backdrop of the current global industrial chain restructuring, enhancing the resilience of the manufacturing industry chain is of great significance for safeguarding national economic security and maintaining the stability and resilience of the industrial chain. This study uses panel data from 30 provinces in China from 2012 to 2022, and employs econometric tools such as fixed effects models and mediation effects models to empirically analyze the impact path and effects of new quality productivity on the resilience of the manufacturing industry chain.

Keywords：new quality productivity; resilience of the manufacturing industry chain; industrial technology innovation

引言

习近平总书记在中共中央政治局第十一次集体学习时强调“要围绕发展新质生产力布局产业链，提升产业链供应链韧性和安全水平，保证产业体系自主可控、安全可靠”。关于新质生产力的研究。许多学者从不同角度分析了新质生产力的发展，陈秀英等（2024）^[1]认为新质生产力虽然是一个新兴概念，但与之一脉相承的高质量发展和现代化产业体系、创新驱动战略等“质量”维度的表征却与之有着密切的联系和传承。郭朝先等（2024）^[2]认为新质生产力本质是创新驱动的新型生产力，要从“新”“质”“力”三个关键词解读新质生产力，“新”是新产业载体和新产业组织形式，“质”是本质、物质和品质，新质生产力就是一次质的提升，“力”是网力和算力。任保平和豆渊博（2024）^[3]认为制造业产业链韧性与新质生产力之间是相辅相成、相互促进的关系，一方面制造业产业链韧性是产业链

作者简介：

余呈先（1974—），男，河南信阳人，安庆师范大学经济与管理学院教授，硕士生导师，主要研究方向是知识创新；

陆正慧（2000—），女，安徽池州人，安庆师范大学经济与管理学院统计学硕士研究生，主要研究方向是新质生产力。

现代化的重要内容，必须以追求生产力的创新发展为目标，另一方面生产力的大发展大繁荣又会为增强制造业产业链韧性提供基础保障（刘志彪，2019）^[4]。综上所述，本文深入探讨新质生产力赋能制造业产业链韧性的机制与路径，为强化政策分析提出更具针对性的行动建议。

一、新质生产力对制造业产业链韧性的理论分析

新质生产力以科技创新为核心驱动力，摆脱传统增长路径，通过对制造业产业链的研发、生产、组织、要素配置等关键环节进行根本性重塑，使其在面对技术封锁、自然灾害、需求突变、地缘冲突等内外部冲击时，具备更强的抵抗、适应和恢复能力，从而提升产业链韧性，因此，新质生产力不仅仅是效率提升的工具，更是系统性重构制造业产业链、赋予其强大韧性的战略路径。它通过颠覆性技术创新、高级要素赋能、网络化组织重构和产业基础再造，使产业链在面对不确定性冲击时，能够更有效抵御、更灵活调整、更顺利恢复。发展新质生产力是提升中国制造业产业链韧性，保障产业安全和国际竞争力的关键战略选择。这要求政策制定者和企业管理者，不仅关注技术本身，更要关注技术如何驱动整个产业生态的系统性变革，以构建真正具备韧性的现代化产业体系。综上所述，提出以下研究假设：

- H1：新质生产力对制造业产业链韧性具有显著促进作用
H2：创新技术能够增强新质生产力对制造业的促进作用

（一）指标选取

新质生产力涵盖具备更高教育水平和技能素养提高的新质劳动者，实现数字化、信息化、智能化的劳动资料以及战略性新兴产业和未来产业为核心的劳动对象。本文参考王钰（2024）^[5]的研究，结合各省数据的可得性，从新质劳动者、新质劳动资料和新质劳动对象三个方面构建新质生产力的评价指标体系，并在此基础上使用熵值法测度新质生产力。

表1 新质生产力测度指标体系

目标层	一级指标	二级指标	单位	属性
新质生产力指数	新质劳动者	每十万人高等学生在校人数	人	+
		国家财政性教育经费投入	万元	+
		全员劳动生产率	元/人	+
	新质劳动对象	高技术产业主营业务收入	亿元	+
		第三产业增加值占比	%	+
		空气优良天数占比	%	+
		工业废水排放总量	万吨	-
		矿山环境本年恢复面积	公顷	+
	新质劳动资料	技术市场成交额	万元	+
		互联网宽带接入端口	万个	+
		光缆线路长度	公里	+

（二）指标体系构建

表2 制造业产业链韧性测度指标体系

目标层	一级指标	二级指标	单位	属性
制造业产业链韧性指数	冲击抵抗能力	制造业总产值	亿元	+
		制造业资产总额	亿元	+
		制造业利润总额	亿元	+

新质生产力指数	冲击抵抗能力	就业人数	万人	+
	冲击适应能力	地方财政支出	亿元	+
		全社会固定资产	亿元	+
		存款余额	亿元	-
	恢复重组能力	科研经费	万元	+
		研发人员投入力度	万人	+
		制造业劳动生产效率	%	+

（三）模型设定

为了检验新质生产力对制造业产业链韧性的作用效果，本研究基于省份和年份双向固定效应构建基准回归模型，具体设定如下：

$$Rels_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 Nqf_{it} + \alpha_2 X_{it} + \gamma_i + \delta_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

其中，i地区第t年对应的制造业产业链韧性指数为 $Rels_{it}$ ；i地区第t年的新质生产力发展指数为 Nqf_{it} ；控制变量的集合为 X_{it} ；个体和时间固定效应分别为 γ_i 与 δ_t ；随机扰动项为 ε_{it} 。

1. 变量说明

（1）自变量

本文的自变量为新质生产力，依据新质生产力的理论内涵，从新质劳动者、劳动对象和劳动资料三个维度选取了11个指标，构建了新质生产力指标体系，并采用熵值法进行测度。

（2）因变量

本文的因变量为制造业产业链韧性，本研究基于制造业产业链韧性的理论框架，分别从冲击性、适应性和恢复力三个维度选取了10个关键指标构，建制综合指标体系，并采用熵值法进行测度。

（3）中介变量

本文参考黄亮熊等（2023）^[6]的研究，选取规模以上工业企业专利申请数来衡量制造业的技术创新水平。

（4）控制变量

①对外开放水平（Open）。在全球化背景下，贸易开放推动了市场的不断拓展和商业体系的持续增长，这不仅能够带来更丰厚的经济收益，还能优化资源配置效率，推动产业体系优化升级，增强产业链抗风险能力。本研究采用进出口总额与国内生产总值之比作为地区对外开放水平的测度指标。

②政府干预程度（Gov）。政府通过制度供给与要素配置支持产业体系优化，有效强化产业应对外部不确定性的动态调适能力，但值得注意的是，过度干预可能诱发技术创新惰性，造成资源配置扭曲，最终弱化产业系统的内生抗风险能力。本文参考袁航和朱承亮（2018）^[7]的研究用各省财政支出占地区生产总值

比重来衡量政府干预水平。

③人力资本（Hcm）。区域人力资本积累对产业转型升级具有显著促进作用，是影响产业链完整度的关键因素。本文选取人均受教育年限作为人力资本水平的代理变量。

④人均生产总值（Rgdp）。人均 GDP 反映了一个地区的宏观经济稳定性和市场活力，都是发展新质生产力所必需的外部宏观条件，因此，本文参考刘鑫鑫和韩先峰（2023）^[8] 的研究选取地区生产总值与年末总人数的比值来衡量各省的经济发展水平。

⑤人均城市道路面积（Inf）。交通基础发展水平与制造业产业链的弹性恢复能力呈显著正相关关系，区域交通越便利，越有效加速产业系统应对外部冲击的适应性调整进程。本文参考刘鑫鑫和韩先峰（2023）^[8] 的研究选择各省人均道路面积取对数来衡量交通运输水平。

表3 各指标描述性统计分析

变量	符号	观测数	均值	标准差	最小值	最大值
制造业产业链韧性指数	Rels	330	0.170	0.150	0.020	0.870
新质生产力指数	Nqf	330	0.160	0.120	0.020	0.780
对外开放水平	Open	330	0.270	0.270	0.010	1.350
政府干预程度	Gov	330	0.110	0.030	0.060	0.250
人力资本	Hcm	330	0.020	0.010	0.010	0.040
人均生产总值	Rgdp	330	6.070	3.080	1.890	19.030
人均城市道路面积	Inf	330	16.810	5.040	4.080	28.000
专利申请发明数	Tl	330	7.680	11.970	0.050	87.220

二、基准回归分析

表4展示了模型（1）的回归估计结果。由第（1）列可知，在不加入控制变量且不考虑时间和个体效应的情况下，新质生产力（Nqf）与制造业产业链韧性（Rels）的弹性系数值为0.823，且在1%的水平上高度显著，初步证实了两者具有正向促进作用。随着控制变量和双向固定效应的引入，估计系数显著提升至1.151，并通过了1%的显著性检验，意味着新质生产力发展指数每提升一个百分点可以带动制造业产业链韧性指数增长1.203个百分点。综合上述研究结论，可以在统计层面认为新质生产力有效增强制造业产业链韧性。

表4 基准回归分析

变量	(1)	(2)	(3)
	Rels	Rels	Rels
Nqf	0.823*** (11.878)	0.844*** (12.211)	1.151*** (11.143)
Open			-0.016 (-0.398)

Gov			0.339* (1.725)
Hcm			-0.072 (-0.036)
Rgdp			-0.000 (-0.035)
Inf			0.001 (0.992)
constant	-0.010	-0.097***	-0.138 (-0.93)
时间固定效应	No	Yes	Yes
个体固定效应	No	Yes	Yes
观测值	330	330	330
R-squared	0.849	0.989	0.990

注：括号中的数值是标准误，*、**、*** 分别表示10%、5%、1%的显著性水平，下同。

（一）稳健性检验

1. 缩尾处理

由于新质生产力指数和产业链韧性指数的计算过程中可能会受到原始数据极端值的影响，导致计算结果出现偏误。本文对新质生产力指数（Nqf_w）和产业链韧性指数（Rels_w）纳入基准模型进行再次估算，表5第一列报告了缩尾处理后的回归分析表明，新质生产力对制造业产业链韧性的正向效应在1%水平上显著，从而表明基准回归结果是稳健可信的。

2. 更换样本空间

鉴于我国四个直辖市在经济发展规模、人力资源禀赋、产业构成、要素配置以及创新实力等方面具有显著特征性，其新质生产力和产业链韧性水平较其他省份存在明显优势。为控制样本异质性可能导致的估计偏差，本文剔除四大直辖市后重新进行基准回归记作 Rels_d，结果如表5列（4）-（6）所示。可以看出，在剔除特殊样本之后，新质生产力指数与制造业产业链韧性指数之间的系数值并未产生明显变化，且与基准回归结果一致均在1%的水平上高度显著，再次证明前文研究结论具有较好的可信度。

表5 稳健性检验结果

	更换计算方法			调整研究样本		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	Rels_w	Rels_w	Rels_w	Rels_d	Rels_d	Rels_d
Nqf_w	1.179*** (8.125)	0.737*** (6.153)	0.631*** (5.341)			
Nqf				1.253*** (31.812)	0.866*** (14.938)	0.723*** (11.869)
控制变量	否	否	是	否	否	是
常数项	-0.013 (-0.838)	-0.063* (3.252)	-0.175* (-1.782)	-0.013* (-1.996)	0.034*** (3.311)	-0.010 (-0.185)
时间固定效应	否	是	是	否	是	是

个体固定效应	否	是	是	否	是	是
观测值	330	330	330	286	286	286
R-squared	0.807	0.986	0.988	0.924	0.989	0.991

（二）异质性检验

由于不同区域在资源条件和工业基础方面各具特点，各区域新质生产力的发展水平和制造业产业链韧性也存在显著差异。这可能导致其对产业链韧性的影响呈现空间异质性特征。基于此，本研究拟采用区域划分的方法，将全国范围划分为东部、中部和西部三大经济地带，开展深入的差异性分析。

表6展示了我国东、中、西地区的新质生产力发展水平与制造业产业链韧性水平的比较分析，实证结果显示，新质生产力对各区域的制造业产业链韧性均存在正向显著的影响，但其影响强度呈现梯度差异；东部地区效应最强，西部次之，中部相对较弱。这一结果为区域异质性研究提供了重要依据。

表6 异质性检验结果

	(1)	(2)	(3)
	东部	中部	西部
	Rels	Rels	Rels
Nqf	0.853***	0.476***	0.526***
	(12.310)	(8.100)	(8.750)
控制变量	是	是	是
常数项	-0.008	0.013	0.024
	(-0.270)	(0.350)	(1.430)
时间固定效应	是	是	是
个体固定效应	是	是	是
观测值	110	88	121
R-squared	0.987	0.989	0.982

（三）中介机制检验

研究表明，新质生产力确实能够增强制造业产业链韧性。为深入分析其作用机制，基于相关理论框架，本研究从选取规模以上工业企业专利申请数这一视角切入，参考江艇（2022）^[9]的研究，首先验证核心解释变量对中介变量的影响效应，进而分析中介变量对被解释变量的作用机制，最终通过回归结果系统阐释解释变量对中介变量的具体影响。

根据表7第（2）列机制检验结果，可以看出，新质生产力发

展对企业技术创新具有显著促进作用，实证数据显示，新质生产力发展水平每提高一个百分点，产业技术创新水平相应提升0.696个百分点。综上所述，新质生产力通过显著促进企业技术创新进而提升制造业产业链韧性。

表7 影响机制检验结果

	(1)	(2)	(3)
	Rels	Rels	Rels
Nqf	0.823*** (0.031)	139.904*** (4.993)	0.696*** (0.060)
申请专利			0.001*** (0.009)
控制变量	是	是	是
时间固定效应	是	是	是
个体固定效应	是	是	是
观测值	330	330	330
R-squared	0.989	0.955	0.989

三、研究结论

研究发现：首先，新质生产力的发展能有效增强制造业产业链韧性水平，且随着新质生产力的发展呈提升趋势，从不同维度来看，新质生产力对制造业产业链的适应力、恢复力和重组力的作用结果都显著为正，其次，这一赋能作用在我国东中西三个区域均有效，尤其是对东部地区产业链韧性提升的促进作用最为明显。最后，企业技术创新水平在新质生产力赋能制造业产业链韧性提升的过程中发挥着重要的传导机制。

四、对策建议

强化数字技术创新应用，依托新一代信息技术与创新要素的深度融合重点支持专精特新企业在细分领域实现技术突破，增强产业链关键环节的稳定性和竞争力；完善供应链管理体系，建立科学的供应商评估与动态监测机制，系统提升生产运营的质量控制水平，为产业链韧性提供制度保障；优化关键环节数字赋能，运用大数据、人工智能等技术手段，重点提升产业链的弹性调节和自适应能力，增强应对风险的内生动力；加速全链企业协同转型，通过数智化改造全面提升企业经营效率和管理水平，促进产业链上下游企业的数字化协同发展。

参考文献

[1] 陈秀英，刘胜，沈鸿. 以数字化转型赋能提升新质生产力 [J]. 新疆社会科学, 2024, (04): 1-7.

[2] 郭朝先，陈小艳，彭莉. 新质生产力助推现代化产业体系建设研究 [J]. 西安交通大学学报（社会科学版）, 2024, (04): 1-15.

[3] 任保平，豆渊博. 新质生产力：文献综述与研究展望 [J]. 经济与管理评论, 2024, 40, (03): 5-16.

[4] 刘志彪. 产业链现代化的产业经济学分析 [J]. 经济学家, 2019, (12): 5-13.

[5] 王珏，王荣基. 新质生产力：指标构建与时空演进 [J]. 西安财经大学学报, 2024, 37(1).

[6] 黄亮雄，林子月，王贤彬. 工业机器人应用与全球价值链重构——基于出口产品议价能力的视角 [J]. 中国工业经济, 2023, (2): 74 - 92.

[7] 袁航，朱承亮. 国家高新区推动了中国产业结构转型升级吗 [J]. 中国工业经济, 2018, (8): 60 - 77.

[8] 刘鑫鑫，韩先锋. 人工智能与制造业韧性：内在机制与实证检验 [J]. 经济管理, 2023, 45(11): 48 - 67.

[9] 江艇. 因果推断经验研究中的中介效应与调节效应 [J]. 中国工业经济, 2022, (05): 100 - 120.

农村金融高质量发展对产业结构升级的影响

黎洋, 何光, 齐欢

重庆工商大学数学与统计学院, 重庆 400067

DOI:10.61369/ASDS.2025050012

摘要：为了探究农村金融高质量发展与产业结构升级的关系，本文基于中国30个省份2011–2022年的面板数据，从“量的扩张”和“质的提升”两个维度构建农村金融高质量发展指标体系，通过面板门槛模型和中介效应模型考察了农村金融高质量发展对产业结构升级的非线性关系和影响机理。研究发现：（1）农村金融高质量发展对产业结构合理化和产业结构高级化均为显著促进作用；（2）农村金融高质量发展对产业结构的升级具有非线性影响关系；（3）农村金融高质量发展可以通过区域人均消费水平间接促进产业结构合理化。因此，应加强农村金融体系建设，推动农村金融市场的深化和创新，发挥消费拉动作用，有效促进产业结构升级。

关键词：农村金融；产业结构合理化；产业结构高级化；非线性特征；影响机制

The Impact of High-Quality Development of Rural Finance on Industrial Structure Upgrading

Li Yang, He Guang, Qi Huan

School of Mathematics and Statistics, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067

Abstract： To explore the relationship between high-quality development of rural finance and industrial structure upgrading, this study constructs a high-quality development index system for rural finance based on panel data from 2011 to 2022 across 30 provinces in China, examining both dimensions of "quantitative expansion" and "qualitative improvement". By employing panel threshold models and mediation effect models, the study investigates the nonlinear relationship and impact mechanisms of high-quality development of rural finance on industrial structure upgrading. The findings reveal that: (1) high-quality development of rural finance significantly promotes both rationalization and advancement of the industrial structure; (2) there is a nonlinear impact of high-quality development of rural finance on industrial structure upgrading; (3) high-quality development of rural finance can indirectly promote the rationalization of the industrial structure through regional per capita consumption levels. Therefore, efforts should be made to strengthen the rural financial system, promote the deepening and innovation of rural financial markets, leverage the driving force of consumption, and effectively facilitate industrial structure upgrading.

Keywords： rural finance; rationalization of industrial structure; advancement of industrial structure; nonlinear characteristics; impact mechanism

引言

随着中国城镇化和工业化的加速推进，农村经济的发展和产业结构的优化升级成为推动国家经济持续健康发展的重要议题。农村金融作为支持农村经济发展的重要力量，其高质量发展对于促进农业现代化、提高农民收入、推动区域产业结构升级具有重要意义^[1]。因此，探究农村金融高质量发展与产业结构的关系，对于构建科学的乡村金融体系和实现乡村经济长远发展具有重要的学术价值和现实意义。那么，农村金融高质量发展如何促进产业结构升级？是否存在非线性特征？内在作用机制是什么？基于我国30个省份2011–2022年的面板数据，采用门槛回归模型和中介效应模型，深入剖析农村金融高质量发展对产业结构升级的门槛特征及作用路径，为乡村振兴战略下的产业转型和经济提质增效提供理论依据和实证参考。

尽管已有大量文献探讨了农村金融与经济增长、农村金融与农户收入等方面的关系，但关于农村金融对产业结构影响的研究相对较

作者简介：

黎洋（2000–），男，四川内江人，汉族，硕士研究生学历，重庆工商大学数学与统计学院，研究方向：经济统计，邮箱：2023310096@ctbu.edu.cn；

何光（1981–），男，重庆万州人，博士，教授，从事经济金融统计建模与算法研究。

少。现有的研究主要集中在以下几个方面：一是农村金融对农业生产的直接影响，较少涉及其对整个产业结构的影响。连俊华（2022）认为农村金融数字化通过提高农村地区的金融可得性来拉动农业经济增长^[2]。二是农村金融产业结构单一的维度分析。梁杰、高强（2019）采用农村信用社贷款余额与农村 GDP 的比值来衡量农村金融发展水平，用农村二、三产业增加值与农村 GDP 的比值衡量农村产业结构发展水平^[3]；王汉杰和温涛（2018）用县域金融机构人均贷款余额来衡量农村金融发展^[4]。以上指标构建较为单一，无法全面的反映农村金融高质量发展水平，也缺乏对整体产业结构的系统分析。为了更好衡量农村金融高质量发展状态，本文从“量的扩张”和“质的提升”两个方面构建农村金融高质量发展指标体系，更为全面的反映农村金融高质量发展水平，并基于面板门槛模型和中介效应模型系统地探讨农村金融高质量发展对产业结构的影响，特别是对产业结构合理化和高级化的作用。

一、理论机制与研究假设

（一）农村金融高质量发展对产业结构的直接影响

产业结构的高级化和合理化需要许多支撑条件才能得以实现^[5]，而农村金融发展直接制约着农业资本的形成，影响着农业经济的发展，在很大程度上直接影响区域产业结构升级^[6]。农村金融通过支持落后地区的农业和小微企业，有助于缩小地区间的经济差距，使得产业分布更加均匀。对于产业结构高级化而言，农村金融可以通过提供专门针对旅游、教育、医疗等服务行业的金融产品和服务，支持这些领域的企业发展壮大，提高第三产业在整个经济中的比重。基于此，本文提出假说1：

假说1：农村金融高质量发展对产业结构合理化、高级化均有着正向促进作用。

（二）农村金融高质量发展对产业结构的非线性关系

在农村金融发展的初期，由于基础设施不完善，金融资源难以有效到达农村地区，随着农村金融的逐步发展，基础设施逐步完善，金融服务覆盖面扩大，促进农业生产和非农产业的发展，从而促进产业结构的合理化。对于产业结构高级化而言，基于边际报酬递减规律，随着农村金融市场的逐步成熟，新增加的金融资源对产业结构进一步高级化的贡献逐渐减弱。基于此，本文提出假说2：

假说2：农村金融高质量发展对产业结构升级可能存在非线性影响关系。

（三）农村金融高质量发展对产业结构的间接影响机制

依据凯恩斯的消费理论可知，区域人均消费水平会随区域人均收入水平的变化而变化，进而会影响到区域产业结构的升级。具体而言，收入水平的提高会导致区域人均消费水平的提高，促进消费结构的升级，从而引导资源向高需求的产业部门流动，优化资源配置，促进产业结构的合理化。基于此，本文提出假说3：

假说3：农村金融高质量发展通过区域人均消费水平促进产业结构合理化。

二、研究设计

（一）模型设定

为了检验上述研究假设，本文首先构建了农村金融高质量发展对产业结构合理化和高级化的固定效应模型：

$$rational_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 rural_finance_{it} + \alpha_m X_{it} + \lambda_i + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

$$structure_{it} = \beta_0 + \beta_1 rural_finance_{it} + \beta_m X_{it} + \lambda_i + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

式（1）（2）中， $rational_{it}$ 和 $structure_{it}$ 分别表示第 i 个省份第 t 年的产业结构合理化、高级化指数， $rural_finance_{it}$ 表示第 i 个省份第 t 年的农村金融高质量发展水平。 α_0 和 β_0 为截距项， λ_i 为第 i 省份不可观测的个体固定效应， ε_{it} 为随机误差， X_{it} 为控制变量。

为了检验非线性关系是否存在。在式（1）（2）的基础上构建面板门槛模型，如下所示：

$$rational_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 rural_finance_{it} \cdot I(rural_finance_{it} \leq \gamma) + \alpha_2 rural_finance_{it} \cdot I(rural_finance_{it} > \gamma) + \alpha_m X_{it} + \lambda_i + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

式（3）中， $rural_finance_{it}$ 也是门槛变量， γ 为待估计的门槛值，其他变量定义同式（1），式（3）显示了农村金融高质量发展对产业结构合理化门槛模型，对产业结构高级化的门槛模型同理，将不再展示。

进一步，为了考察他们之间的间接影响机制，参考温忠麟等（2004）中介效应分析三步法^[7]，在式（1）的基础上，引入中介变量区域人均消费水平（cost），再构建式（4）（5），如下：

$$cost_{it} = \eta_0 + \eta_1 rural_finance_{it} + \eta_m X_{it} + \lambda_i + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

$$rational_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 rural_finance_{it} + \alpha_2 cost_{it} + \alpha_m X_{it} + \lambda_i + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

（二）研究模型与指标数据说明

1. 被解释变量

被解释变量为产业结构合理化（rational）与产业结构高级化（structure）。本文借鉴于春晖等人（2011）的做法^[8]，拟从这两个维度对产业结构升级进行衡量。

产业结构合理化。借鉴于斌斌（2015）的做法^[9]，用泰尔指数的倒数来度量产业结构合理化水平，计算公式为：

$$rational_{it} = \frac{1}{TL_{it}} = \frac{1}{\sum_{j=1}^3 \left(\frac{Y_{it,j}}{Y_{it}} \right) \ln \left(\frac{Y_{it,j}}{Y_{it}} / \frac{L_{it,j}}{L_{it}} \right)} \quad (6)$$

其中， i 表示省份， t 表示年份。 $rational$ 表示产业结构合理化水平， TL 表示泰尔指数。 Y_{it} 、 $Y_{it,j}$ 、 L_{it} 和 $L_{it,j}$ 分别表示地区生产总值，第 j 产业增加值，总就业人数，第 j 产业就业人数。为了方便观察结果，进行缩小十倍处理。

产业结构高级化。借鉴李虹和邹庆的做法^[10]，用第三产业产值与第二产业比值作为产业结构高级化的度量，如果该值处于上

升状态，意味着经济在向服务化方向推进，产业结构在升级。

2. 核心理释变量

核心理释变量为农村金融高质量发展水平（*rural_finance*），根据金融高质量发展的内涵和外延的界定，基于金融大三角框架

思想并借鉴相关研究的有益元素^{[1][12][13]}，参考相关文献的做法^{[14][15]}，从“量的扩张”和“质的提升”两个方面指数的角度来衡量农村金融高质量发展评价指标体系。如表1所示，本文采用熵值法对农村金融高质量发展进行测度。

表1 农村金融高质量发展评价指标体系

总指数	方面指数	分项指标	基础指标	计算方法	属性	权重（%）
农村金融高质量发展	量的扩张	覆盖广度	主要农村金融机构网点人口覆盖率	（新型农村金融机构网点数+小型农村金融机构网点数）/农村人口数	正	5.42
			主要农村金融机构人员人口覆盖率	（新型农村金融机构服务人员数+小型农村金融机构服务人员数）/农村人口数	正	5.86
			主要农村金融 机构网点地理覆盖率	（新型农村金融机构网点数+小型农村金融机构网点数）/土地面积	正	9.81
			主要农村金融 机构人员地理覆盖率	（新型农村金融机构服务人员数+小型农村金融机构服务人员数）/土地面积	正	12.27
		覆盖深度	涉农贷款人口覆盖率	涉农贷款余额/农村人口数	正	8.78
			涉农贷款地理覆盖率	涉农贷款余额/农林牧渔业总产值	正	9.99
			农业保险密度	农业保险保费收入/农村人口数	正	13.17
			农业保险深度	农业保险保费收入/农林牧渔总产值	正	11.91
	质的提升	市场发展可持续性	农村金融聚集度	采用区位熵方法测算	正	5.31
			涉农信贷市场份额	涉农贷款余额/全部贷款余额	正	1.14
			农村金融发展效率	涉农贷款余额/年末金融机构存款余额	正	3.98
			农业保险市场份额	农业保险保费收入/全部财产保险保费收入	正	1.95
		机构经营可持续性	不良贷款率	不良贷款余额/总贷款余额	负	8.67
			农业保险赔付率	农业保险赔付支出/保费收入	负	1.73

3. 中介变量

根据前文分析，用地区生产总值与年末总人口数的比值来衡量中介变量人均消费水平（*cost*）。

4. 控制变量

基于现有文献，本文引入的控制变量包括：（1）基础设施水平（*inf*），采用公路里程数与年末总人口数的比值进行测度；（2）劳动力水平（*labor*），用区域就业总人数进行表示；（3）创新水平（*innov*），用国内专利申请授权数的对数进行测度；（4）政府干预程度（*gov*），参考谭燕芝（2023）等人的做法^[16]，用公共财政支出占地区生产总值的比重进行测度；（5）对外开放水平（*open*），参考唐文静（2019）等人的做法^[17]用进出口总额占地区生产总值的比值进行测度。

（三）数据来源与说明

以我国30个省份（不含港澳台、西藏地区）2011–2022年的面板数据作为研究样本，实证分析了农村金融高质量发展对产业结构的影响，研究数据来源于历年《中国统计年鉴》《中国金融年鉴》及 Wind 数据库。

三、实证结果分析

（一）基准回归估计结果分析

为了验证农村金融高质量发展与产业结构的关系，通过豪斯曼（Hausman）检验判断选择固定效应模型更为合适。基准回归结果如表2所示，在未加入控制变量时，模型（1）中解释变量农村金融高质量发展对产业结构合理化呈现显著正向影响，同样的，模型（3）中解释变量对产业结构高级化系数同样显著为正。在加入控制变量后，模型（2）中解释变量对产业结构合理化仍然为显著正向影响，模型（4）中解释变量对产业结构高级化同样为

显著正向影响。可以看出，是否加入控制变量，解释变量对产业结构合理化、高级化均为显著的正向促进作用，由此，假说1得到验证。

表2 基准回归结果

	(1) rational	(2) rational	(3) structure	(4) structure
rural_finance	9.29*** (0.99)	9.40*** (1.84)	4.47*** (0.22)	1.68*** (0.36)
inf		-733.2*** (141)		-16.33 (27.85)
labor		0.0013*** (0.01)		-0.002*** (0.01)
innov		1.06*** (0.28)		0.237*** (0.06)
lngov		0.49 (0.38)		0.377*** (0.08)
open		0.308 (0.23)		-0.426*** (0.01)
_cons	-4.65** (0.19)	-50.42*** (13.57)	0.51*** (0.04)	1.29*** (0.27)
N	390	390	390	390
R ²	0.195	0.305	0.533	0.681

（二）非线性分析

同时为了考察农村金融高质量发展对产业结构的非线性关系，采用面板门槛模型进行验证，门槛变量为农村金融高质量发展水平。结果如表3所示，结果表明农村金融高质量发展对产业结构合理化、高级化的促进作用显著，但这种关系并不是长期稳定的线性关系，而是非线性关系。具体来说，对于产业结构合理化而言，这种非线性关系表现为从不显著转变为显著促进作用，当农村金融高质量发展水平低于0.3414时，两者并未产生显著影响，当门槛变量值大于0.3414时，解释变量对产业结构合理化产生了显著促进作用。解释变量对产业结构高级化结果同理，呈现出先升后降的“倒U”型趋势，由此，假说2得到验证。

表3 农村金融高质量发展与产业结构升级关系的门槛回归结果

	(1) rational	(2) structure
rural_finance (rural_finance<=0.3414)	-1.09 (1.92)	—

rural_finance (rural_finance>0.3414)	5.79 ^{***} (1.66)	—
rural_finance (rural_finance≤0.2256)	—	3.785 ^{***} (0.415)
rural_finance (rural_finance≤0.2256)	—	2.440 ^{***} (0.345)
_cons	-5.33 ^{***} (1.19)	1.055 ^{***} (0.246)
控制变量	是	是
N	390	390
R ²	0.465	0.735

(三) 稳健性检验

为了验证结果的稳健性,本文通过(1)更换解释变量的测算方法;(2)剔除极端年份;(3)变换模型。可以发现,不同方法下,农村金融高质量对产业结构合理化和高级化均为显著的正向促进作用,与基准回归一致,通过稳健性检验。

表4 稳健性检验结果

	更换解释变量		剔除极端年份		变换模型	
	rational	structure	rational	structure	rational	structure
rural_finance	7.15 ^{***} (1.48)	0.79 ^{***} (0.29)	10.4 ^{***} (1.9)	1.66 ^{**} (0.39)*	10.83 ^{***} (1.4)	2.11 ^{***} (0.35)
控制变量	是	是	是	是	是	是
_cons	-5.79 ^{***} (1.34)	1.116 ^{***} (0.27)	-5.22 ^{***} (1.43)	1.249 ^{***} (0.29)	0.45 (0.76)	1.127 ^{***} (0.24)
N	390	390	330	330	390	390
R ²	0.300	0.669	0.320	0.645	0.238	0.676

(四) 影响机制分析

为了探究农村金融高质量发展对产业结构合理化的内在促进作用机制,根据表7中介效应回归结果发现,农村金融高质量发展可以通过区域人均消费水平产生的积极影响促进产业结构合理化。正如前文所述,依据凯恩斯的消费理论,区域人均消费水平会随区域人均收入水平的变化而变化,进而会影响到区域产业结构的升级。由此,假说3得到验证。同时,根据sobel检验发现间接效应占比为16.85%。

表5 中介效应回归结果

	(1)	(2)	(3)
	rational	cost	rational
rural_finance	9.4 ^{***} (1.85)	17.38 ^{***} (1.67)	4.36 ^{**} (2.04)

参考文献

[1] 李万超, 苏存, 马晓宇. 农村金融发展影响农村产业结构优化的实证研究 [J]. 金融理论与实践, 2013, (09): 25-28.

[2] 连俊华. 数字金融发展、农村普惠金融与农业经济增长——来自中国县域数据的经验证据 [J]. 中国软科学, 2022, (05): 134-146.

[3] 梁杰, 高强, 李宪宝. 农村产业结构、农村金融与农村人力资本——来自山东的经验证据 [J]. 农林经济管理学报, 2019, 18(06): 725-732.

[4] 王汉杰, 温涛, 韩佳丽. 贫困地区农村金融减贫的产业结构门槛效应 [J]. 财经科学, 2018, (09): 26-37.

[5] 黄中伟, 陈刚. 我国产业结构合理化理论研究综述 [J]. 经济纵横, 2003, (03): 56-58.

[6] 鲁剑阳, 李树. 农村正规与非正规金融发展对区域产业结构升级的影响 [J]. 财经研究, 2015, 41(09): 53-64.

[7] 温忠麟, 张雷, 侯杰泰, 等. 中介效应检验程序及其应用 [J]. 心理学报, 2004, (05): 614-620.

[8] 干春晖, 郑若谷, 余典范. 中国产业结构变迁对经济增长和波动的影响 [J]. 经济研究, 2011, 46(05): 4-16+31.

[9] 于斌斌. 产业结构调整与生产率提升的经济增长效应——基于中国城市动态空间面板模型的分析 [J]. 中国工业经济, 2015, (12): 83-98.

[10] 李虹, 邹庆. 环境规制、资源禀赋与城市产业转型研究——基于资源型城市与非资源型城市的对比分析 [J]. 经济研究, 2018, 53(11): 182-198.

[11] ZELLER M, MEYER R L. The triangle of microfinance: Financial sustainability, outreach and impact[M]. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 2002: 193

[12] 李俊玲, 戴朝忠, 吕斌, 等. 新时代背景下金融高质量发展的内涵与评价——基于省际面板数据的实证研究 [J]. 金融监管研究, 2019, (01): 15-30.

[13] 杨旭, 刘伟, 黄茂兴. 金融集聚对经济发展绩效与经济发展质量的影响——基于制度环境视角的研究 [J]. 经济问题, 2020, (01): 44-53.

[14] 张林, 李海央, 梁义娟. 农村金融高质量发展: 水平测度与时空演变 [J]. 中国农村经济, 2023, (01): 115-139.

[15] 李海央, 朱明月, 马娜. 农村金融高质量发展水平测度与时空分异 [J]. 重庆大学学报 (社会科学版), 2022, 28(03): 39-51.

[16] 谭燕芝, 王湘, 陈铭仕. 数字普惠金融、信贷供给与居民消费 [J]. 消费经济, 2023, 39(05): 78-89.

[17] 唐文进, 李爽, 陶云清. 数字普惠金融发展与产业结构升级——来自283个城市的经验证据 [J]. 广东财经大学学报, 2019, 34(06): 35-49.

cost			0.29 ^{***} (0.06)
_cons	-5.04 ^{***} (1.36)	-13.57 ^{***} (1.23)	-1.11(1.52)
控制变量	是	是	是
N	390	390	390
R ²	0.305	0.855	0.352

四、结论与建议

在理论分析的基础上,以我国30个省份2011-2022年的面板数据,对农村金融高质量发展和产业结构合理化、高级化之间的关系进行了检验,主要结论如下:(1)农村金融高质量发展对产业结构合理化、高级化均为显著促进作用,且无论是否加入控制变量,均在1%的显著性水平下存在。(2)农村金融高质量发展对产业结构升级具有非线性影响特征。农村金融高质量发展对产业结构高级化存在边际效应递减的特征,而对产业结构合理化存在边际效应递增的特征,农村金融高质量发展达到门槛值,才能显著推动产业结构合理化。(3)农村金融高质量发展可以通过提高区域人均消费水平间接对产业结构合理化产生显著积极影响,这种间接效应占比为16.85%。基于上述结论,提出以下建议:

第一,加强农村金融体系建设。通过实施政策扶持和财政激励措施,引导金融机构在乡村区域增设服务网点和分支机构,以拓展金融服务的覆盖范围。如采用移动银行、智能终端等低成本解决方案,以快速扩展服务网络。提升服务质量与效率,开发适合农村特点的金融产品和服务,例如小额信贷、农业保险、定制化储蓄计划等,满足不同层次农户的需求。

第二,推动农村金融市场的深化和创新。利用数字普惠金融平台,降低金融服务的成本和技术门槛,使更多农民能够享受到便捷的金融服务,达到突破金融门槛限制的作用。促进农业现代化和产业链延伸,设立专项基金或提供税收优惠,鼓励农业科技研发和应用,帮助农民采用先进的生产技术和管理模式。

第三,发挥消费拉动作用。改善农村基础设施建设,包括交通、通信、电力等方面,为经济发展创造良好环境。提高农民收入水平,通过职业技能培训、就业指导等方式,增强农民的创收能力。推广和完善农村社会保障制度,减少农民后顾之忧,提升其消费信心。

中国辣椒价格波动特征及其影响因素分析

包旭梅, 谢军

贵州省社会科学院农村发展研究所, 贵州 贵阳 550000

DOI:10.61369/ASDS.2025050013

摘要： 识别我国辣椒价格的演变趋势与波动规律对我国辣椒产业高质量发展具有重要意义。本文基于2010–2024年全国辣椒月度价格数据，运用Hodrick–Prescott滤波法对价格序列进行趋势分解与周期识别，系统分析了价格的阶段特征与周期性变化。结果表明：辣椒价格长期走势可划分为三个阶段，分别为平稳期（2010–2013年）、快速上升期（2014–2020年）和高位震荡期（2021–2024年）；共识别出12个完整价格周期，平均持续9.3个月，整体波动幅度呈现收敛趋势。2020–2021年周期波幅最大，主要受新冠疫情与洪涝灾害叠加影响，突显市场对外部冲击的敏感性。近年来价格在6.5元/kg附近企稳，并于2024年突破8.0元/kg，反映出供需协调与政策调控效果逐步显现。研究建议应加强市场预警机制建设，优化种植结构引导，完善风险保障体系，以稳定辣椒市场预期，提升产业抗风险能力，推动辣椒产业健康发展。

关键词： 农产品市场；辣椒价格；Hodrick–Prescott滤波；价格波动特征

Analysis of Fluctuation Characteristics and Influencing Factors of Chili Pepper Prices in China

Bao Xumei, Xie Jun

Guizhou Academy of Social Sciences, Guiyang, Guizhou 550000

Abstract： Identifying the evolution trends and fluctuation patterns of chili pepper prices in China is crucial for the high-quality development of the chili pepper industry. Based on monthly national chili pepper price data from 2010 to 2024, this study employs the Hodrick–Prescott (HP) filter to decompose the price series into trend and cyclical components, systematically analyzing the phase characteristics and cyclical changes of the prices. The results indicate that: (1) The long-term price trend can be divided into three distinct phases: a stable period (2010–2013), a rapid rise period (2014–2020), and a high-volatility period (2021–2024). (2) A total of 12 complete price cycles were identified, with an average duration of 9.3 months. The overall fluctuation amplitude showed a converging trend. The cycle between 2020 and 2021 exhibited the largest amplitude, primarily driven by the combined impact of the COVID-19 pandemic and severe flooding, highlighting the market's sensitivity to external shocks. (3) In recent years, prices have stabilized around CNY 6.5/kg and exceeded CNY 8.0/kg in 2024, reflecting the gradual effects of improved supply–demand coordination and policy interventions. The study recommends strengthening market early-warning mechanisms, optimizing planting structure guidance, and improving the risk protection system to stabilize market expectations, enhance the industry's resilience to risks, and promote the healthy development of the chili pepper industry.

Keywords： agricultural product market; chili pepper price; Hodrick–Prescott filter; price fluctuation characteristics

引言

辣椒是我国种植面积最广的蔬菜之一，广泛分布于四川、贵州、湖南、河南等主要产区，也是我国最大的单品蔬菜^[1]。2022年，我国辣椒种植面积1139.73万亩，总产量约1683.74万吨。辣椒产业在满足城乡居民鲜食与调味需求的同时，在食品加工、医药美妆、休闲农业、出口贸易等领域发挥重要作用，是加工方式最多、产业链条最完善的蔬菜作物，已形成干制、脱水、水煮等初级加工，酱制、盐制、榨油、泡制等深加工以及辣椒红素、辣椒碱等精深加工的产业链条，并涌现出2000多家规模以上辣椒育种、加工与出口企业^[2]。随

基金项目：本文系贵州省社科院青年课题（QNKT2506）阶段性研究成果。

作者简介：

包旭梅，贵州省社会科学院，研究实习员，研究方向为农产品价格波动；

谢军，贵州省社会科学院，研究实习员，研究方向为数字乡村。

着居民饮食结构的多样化和调味品消费的刚性增长,辣椒消费需求持续扩大,价格走势愈发受到市场各方的关注。近年来,我国辣椒价格呈现出明显的波动性特征,频繁的价格起伏不仅加剧了农户种植决策的不确定性,也对政府宏观调控和市场供应稳定带来了挑战。

目前,学界对经济型蔬菜的价格影响因素及其波动特征方面展开了相对丰富的研究。其中,在蔬菜价格影响因素方面,主要集中在流通体系^[3]、气候条件^[4]、种植面积^[5]、农资价格^[6]、劳动力成本^[7]等方面。部分研究还探讨了政策干预、供销渠道变化以及农户种植意愿对经济型蔬菜市场供给和价格形成机制的影响^[8-10]。在价格波动特征方面,已有研究主要从季节性变化、周期性波动、突发性波动等角度进行分析。例如,唐勇等(2016)利用时间序列方法分析了辣椒价格的季节性变化规律,发现辣椒价格的季节性变化明显,存在“过山车”式的变动^[11];郭力野(2014)通过HP滤波法和BP滤波法分析,指出我国蔬菜价格呈总体增长的线性趋势,季节性变化特征明显,无明显随机性波动特征^[12]。近年来,部分学者引入GARCH类模型等方法,对蔬菜价格的波动趋势和非线性特征进行了深入刻画,为识别价格波动的内在机制提供了理论工具^[13]。

尽管已有研究在辣椒价格波动方面取得了丰富成果,但仍存在以下不足:一是多数研究聚焦于短期价格波动或特定区域市场,缺乏对全国主要产销区的系统性分析;二是对辣椒价格周期性特征的分析相对薄弱,与对“猪周期”或“蒜你狠”等农产品周期性问题的研究深度存在差距;三是部分研究在影响因素识别方面存在变量选择单一、控制不足的问题,难以全面揭示辣椒价格形成机制。基于此,本文在已有研究基础上,结合全国主要辣椒产区数据,借助HP滤波分析方法,对我国辣椒价格的波动趋势进行分解,系统探讨其周期性特征及各阶段主要影响因素,以期稳定辣椒市场价格、优化种植结构与完善政策调控提供理论支撑和实证依据。

一、数据来源与研究方法

(一) 数据来源

本研究选取了中华人民共和国商务部市场运行监测系统发布的全国辣椒价格数据作为主要研究对象。该系统定期监测全国范围内主要农产品批发市场的价格变动情况,数据来源权威可靠、覆盖范围广泛,具备较强的代表性与可比性。研究所使用的价格数据时间跨度为2010年1月至2024年12月,涵盖了我国辣椒市场在过去十五年间的价格运行全貌,能够较为全面地反映辣椒价格的长期走势及其阶段性波动特征。

数据采集频率为周度,以全国重点批发市场的实际交易均价为基础,涵盖了北京新发地、山东寿光、贵州贵阳等主要辣椒交易市场。为提升数据的稳定性与分析的可操作性,本文将周度数据进行整合,计算得出月度平均价格,最终形成连续180期(月)辣椒平均价格序列。在数据预处理过程中,剔除了部分因节假日、极端天气等因素导致的明显异常值,采用中位数平滑法对极端离群点进行修正,确保所构建的价格序列具备较好的稳定性和真实反映市场趋势的能力。该价格序列不仅覆盖了辣椒价格相对平稳的年份,也涵盖了如干旱、物流成本剧烈波动等典型事件时期,有助于深入识别不同外部冲击背景下的辣椒价格响应机制,具备较强的拓展性,适合开展趋势分析、周期识别与影响因素回归建模等多类型实证研究。

(二) 方法介绍

为识别辣椒价格的长期趋势与周期性波动特征,本文采用Hodrick- Prescott (HP) 滤波方法对月度辣椒价格序列进行趋势分解。Hodrick- Prescott 滤波方法是将时间序列分解为平稳变化的趋势成分和周期成分,一般时间序列(Y_t)由趋势要素(Y_t^T)和周期要素(Y_t^C)组成^[14-15],具体如下:

$$Y_t = Y_t^T + Y_t^C, t = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

其中, Y_t^T 表示辣椒价格的长期变化趋势, Y_t^C 表示价格围绕趋势的短期波动部分。HP滤波的核心目标是通过求解如下最小化问题以获取平滑的趋势项:

$$\min \sum_{i=1}^n \left\{ (y_i - y_i^T)^2 + \alpha [d(L)y_i^T]^2 \right\} \quad (2)$$

式中: α 值表示趋势平滑程度的重要指标,以 $[d(L)y_i^T]^2$ 调整趋势变化,并随着 α 值增大而增大。 Y_t^T 表示时间序列中的长期趋势,短期波动以变动率(RV)描述,表示偏离长期趋势的幅度。为便于量化辣椒价格偏离趋势的程度,本文进一步计算价格相对波动率(Relative Volatility, RV)指标,公式如下:

$$RV_t = 14400 (y_t - y_t^T) / y_t^T \quad (3)$$

该指标反映了辣椒价格在某一时期相对于其长期趋势的偏离程度,数值越大,代表价格在该期波动越剧烈。通过计算和绘制RV序列,可直观揭示辣椒价格波动的强弱变化、波动高峰出现的时间及其与特定事件的对应关系。HP滤波法的优势在于其无需假设变量间因果关系或结构方程,适用于非平稳时间序列分析,尤其适合用于农产品价格等具有趋势性与波动性共存的数据分析。其结果将为后续周期性波动特征识别和影响因素建模提供基础支撑。

二、中国辣椒价格周期性波动特征分析及其影响因素

(一) 中国辣椒价格长期波动趋势

根据HP滤波分解结果可知,中国辣椒价格长期趋势呈现出明显的“三阶段演变特征”,分别对应平稳波动期、趋势加速期与高位震荡期:

第一阶段为价格平稳期(2010-2013年)。此阶段辣椒价格整体运行于3.5-5.5元/kg之间,波动幅度较小,年均增长率仅为2.3%。该阶段的价格走势与供需格局相对稳定密切相关,一方

面辣椒种植面积与市场需求增长基本保持同步，另一方面气候条件总体平稳、生产成本尚未大幅攀升，市场机制仍处于初步调整阶段。

第二阶段为趋势加速期（2014–2020年），辣椒价格进入快速上行通道，呈现出由量变到质变的跃升格局。特别是2014年价格突破6.0元/kg关口，标志着前期平台被打破，也意味着新一轮长期上涨趋势的正式开启。此阶段年均增速达到18.7%，远高于前一时期的。导致该轮价格持续上涨的因素较为复杂，包括：农业劳动力紧缺与人工成本上升；农资价格走高带来的生产成本推升；城镇化推进背景下辣椒产区缩减；局部地区气象异常事件增多；辣椒深加工与出口需求上升等。尤其是在2020年，辣椒价格达到历史峰值11.9元/kg，主要反映了多重突发事件叠加的影响：一方面，新冠疫情造成物流受阻、人工采摘延误，导致阶段性供应短缺；另一方面，长江流域的严重洪涝灾害对辣椒主产区造成较大减产冲击，加剧了市场供需失衡，引发价格非理性上涨。

第三阶段为高位震荡期（2021–2024年）。在经历前期急剧上升后，辣椒价格未继续大幅攀升，而是围绕7.0元/kg上下维持中高位运行，趋势项显示出波动性增强的特征。其原因可能在于：消费市场逐步恢复理性，价格传导机制趋于稳定；政府加强对辣椒市场的供需调控与预警系统建设；农户生产行为对前期价格刺激的滞后反应逐步显现，供应恢复增加。需要注意的是，近两年价格在6.5元/kg附近形成了较为稳固的趋势支撑位，显示出市场对于该价格水平的接受度与稳定预期。同时，2024年价格趋势突破8.0元/kg关口，可能预示着在新一轮供需变动背景下，辣椒价格中枢正在重新上移，新一轮上升趋势正在酝酿形成。

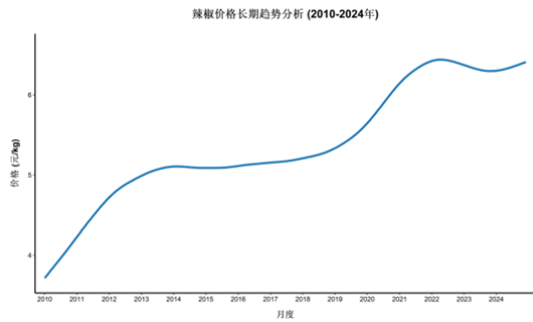


图1 我国辣椒价格长期趋势分析（2010–2024年）

Figure 1: Long-term trend analysis of chili pepper prices in China (2010–2024)

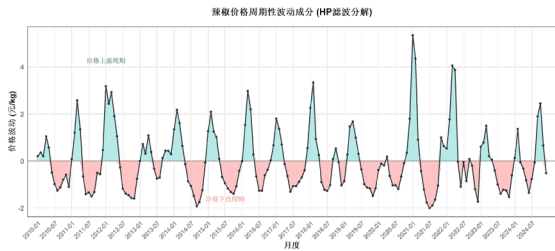


图2 我国辣椒价格周期性波动成分（HP滤波分解）

Figure 2: Cyclical component of chili pepper prices in China (HP Filter decomposition)

（二）中国辣椒周期性波动及其特征

在趋势分解基础上，本文进一步识别出2010–2024年间辣椒

价格的12个完整周期（见表1），并对各周期的持续时间与波动幅度特征进行了系统比较。结果表明，这些价格周期平均持续约9.3个月，其中最短周期为6个月（2021–2022年，周期10），最长周期达13个月，分别出现在2014–2015年（周期3）和2017–2018年（周期7）。从波动强度来看，辣椒价格的周期波动幅度在整体上呈现出逐步收敛的趋势。2010–2016年间的早期周期平均波动幅度为84.0%，显示出市场价格易受外部冲击影响、波动剧烈。而进入2020年后，随着产业链条逐渐完善、政策调控加强及信息透明度提高，周期波幅明显缩窄，2020–2024年阶段的平均波动幅度已降至65.7%。其中，2020–2021年（周期9）是本阶段最为剧烈的价格波动期，波动幅度高达108.7%，创下观测期内最高纪录，价格峰值达11.48元/kg。该周期的剧烈波动与新冠疫情期间供应链中断、农产品运输受限，以及长江流域洪涝灾害导致的减产等多重外生因素密切相关。据农业农村部数据，2020年全国多个主产区辣椒产量同比下降超过30%，加剧了供需错配，推动价格剧烈上涨。2017–2018年周期（周期7）则是持续时间最长的一个周期，历时13个月。这一阶段处于辣椒产业结构调整关键期，种植区域与流通体系正在重构，价格走势表现出反复震荡、缺乏单边趋势的特征，反映出市场对新供给结构的适应过程。相对而言，2023–2024年周期（周期12）波动幅度仅为49.0%，为观测期内最小值。这可能反映出当前辣椒市场在种植计划、库存调节、产销衔接等方面的管理能力有所提升，供需两端逐渐趋于均衡，市场成熟度稳步提高。同时，地方政府加强对极端天气预警、信息引导和价格干预等手段，也在一定程度上缓冲了短期波动风险。

表1 2010–2024年间辣椒价格周期表
Table 1: Price cycles of chili pepper in China (2010 – 2024)

编号	时间区间	持续时间	最高价	最低价	价差	均价	波幅 (%)
1	2010年12月至2011年06月	6	6.89	3.04	3.84	4.61	83.4
2	2012年02月至2012年11月	9	7.7	3.37	4.34	4.95	87.6
3	2013年12月至2014年09月	9	7.27	3.16	4.11	5.16	79.6
4	2014年09月至2015年10月	13	7.18	3.16	4.02	4.75	84.5
5	2015年10月至2016年08月	10	8.09	3.71	4.39	5.2	84.4
6	2016年08月至2017年06月	10	6.96	3.87	3.09	5.18	59.7
7	2017年06月至2018年07月	13	8.54	3.87	4.68	5.1	91.7
8	2018年12月至2019年11月	11	7.06	4.1	2.97	5.24	56.6
9	2020年08月至2021年07月	11	11.48	4.32	7.17	6.6	108.7
10	2021年07月至2022年01月	6	7.4	4.32	3.08	5.75	53.6
11	2022年12月至2023年08月	8	7.85	4.65	3.19	6.19	51.6
12	2023年11月至2024年06月	7	7.67	4.77	2.9	5.91	49

总的来看，十五年间辣椒价格呈现阶梯式上升趋势，2024年价格中枢较2010年提升118%。价格波动呈现收敛态势，由早期平均波幅84.0%降至近期65.7%。极端气候、成本推动和金融化是波动加剧的主因，而政策调控有效平抑波动。基于此，建议建立以HP周期成分超过 $\pm 1.5\sigma$ 为触发条件的预警机制，在周期转换期（波谷区域）增加战略储备，推广“保险+期货”风险对冲模式，并建设实时发布主产区种植面积和气象预警的信息平台。这些措施将有助于提升辣椒市场稳定性，保障农户收益和消费者福利。

三、结论和建议

（一）研究结论

本文基于2010–2024年我国辣椒价格的月度数据，运用Hodrick–Prescott滤波法对价格序列进行趋势分解与周期识别，系统分析了辣椒价格的长期变化趋势与周期性波动特征。研究主要得出以下结论：第一，辣椒价格长期趋势呈现“三阶段”演变特征：2010–2013年为平稳期，价格低位运行；2014–2020年进入快速上升期，2020年达峰值11.9元/kg；2021–2024年则转为高位震荡，价格中枢维持在7.0元/kg以上。第二，价格周期波动显著但趋于收敛。共识别出12个完整周期，平均持续9.3个月。早期周期波幅较大（平均84.0%），近年波幅有所收窄（降

至65.7%），反映出市场调节与稳定能力提升。第三，极端事件对价格波动影响显著。2020–2021年周期波动幅度最大（达108.7%），主要受疫情与洪涝灾害叠加影响，导致主产区减产超过30%，价格大幅上扬。第四，辣椒市场趋于成熟，价格新支撑位逐步形成。近年来价格在6.5元/kg附近企稳，并于2024年突破8.0元/kg，显示在种植调控和政策干预作用下，辣椒价格中枢可能正进入新一轮上升通道。

（二）政策建议

基于上述对我国辣椒价格长期趋势与周期波动特征的分析，本文提出如下政策建议：一是相关部门应进一步完善农产品价格动态监测系统，建立辣椒价格预警模型与快速响应机制。加强对主产区种植面积、气象条件、病虫害等变量的实时跟踪，提升对价格异常波动的预测能力和预判水平，及时引导农户合理安排种植计划，防范供需错配引发的价格剧烈波动。二是应推动辣椒种植区域合理分布，鼓励主产区因地制宜发展特色品种与高附加值辣椒产业。通过政策性引导与激励机制，避免“跟风种植”导致的集中上市与价格暴跌，提升整体生产计划的科学性 with 稳定性。三是应加快辣椒目标价格保险、种植保险和收入保险等政策工具的推广覆盖，增强农户抵御市场风险的能力。同时，完善应对极端气候、疫情等突发事件的应急物资和物流保障体系，防止外部冲击造成市场剧烈扰动。

参考文献

[1] 邹学校, 胡博文, 熊程, 等. 中国辣椒育种60年回顾与展望 [J]. 园艺学报, 2022, 49(10): 2099–2118.

[2] 乔立娟, 赵帮宏, 宗义湘, 等. 我国辣椒产业发展现状、趋势及对策 [J/OL]. 中国蔬菜, 1–7[2025–04–27].

[3] 周振亚, 李建平, 张晴, 等. 我国蔬菜价格问题及其成因分析 [J]. 农业经济问题, 2012(7): 91–95.

[4] 王丽娟, 刘桂峰, 信丽媛, 等. 天津市蔬菜价格波动规律及短期预测——基于时间序列的季节调整和预测 [J]. 中国农学通报, 2015, 31(09): 286–290.

[5] 王世尧, 王树进. 中国省区蔬菜种植面积变化中农户决策行为因素的实证分析 [J]. 经济地理, 2013, 33(09): 128–134.

[6] 李艳梅, 孙焱鑫, 邹国元, 等. 设施蔬菜经营主体施肥现状及有机肥替代化肥情况调研——基于北京市顺义区的实证分析 [J]. 中国蔬菜, 2021, 000(009): 84–90.

[7] 吴建寨, 沈辰, 王盛威, 等. 中国蔬菜生产空间集聚演变、机制、效应及政策应对 [J]. 中国农业科学, 2015, 48(08): 1641–1649.

[8] 李桂芹, 李圣军. 新时期政府调控蔬菜价格的政策选择 [J]. 安徽农业科学, 2012, 40(32): 15939–15941+15944.

[9] 王小洁. 我国蔬菜价格及流通渠道问题探析 [J]. 价格理论与实践, 2011(06): 36–37.

[10] 宋长鸣. 蔬菜价格波动背景下生产者种植意愿变化研究——兼论对Logistic模型的重新解读 [J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(01): 147–156.

[11] 唐勇, 戎宇霆, 杨珊珊. 湖北省蔬菜价格波动研究 [J]. 湖北农业科学, 2016, 55(03): 769–774+779.

[12] 郭力野. 我国蔬菜价格周期性波动规律分析 [J]. 中国蔬菜, 2014(01): 41–45.

[13] 邢聪聪. 寿光蔬菜价格指数的波动趋势与预测——基于ARMA–GARCH模型的分析 [J]. 价格理论与实践, 2016(02): 106–108.

[14] 徐经, 朱战国. 农产品价格波动原因与“菜篮子”工程保供思路探讨——以南京市为例 [J]. 江苏农业科学, 2017, 45(07): 342–346.

[15] 李伟伟. 不同种类蔬菜价格的相关关系及波动特征探析——以北京地区为例 [J]. 价格月刊, 2015(12): 36–41.

工商管理领域中 ESG 理念嵌入企业价值创造的路径与绩效评价

周正涛

西京学院, 陕西 西安 710100

DOI:10.61369/ASDS.2025050014

摘要： 本文选取一家华东地区制造型企业为案例，系统地分析了企业社会责任理念在企业价值创造中的嵌入路径和绩效评价。对社会责任和公司价值创造相关理论进行了梳理，明确了企业环境、社会与治理三维度对公司长期价值提升的影响。从节能减排、绿色供应链管理、职工权益保护、履行社会责任、完善公司治理结构、提高信息披露透明度等方面探索 ESG 理念在案例公司的实施方案。在绩效评估方面，以 2021–2024 年企业主要环境、社会和治理指标为基础，通过多个维度的指标体系，定量评价企业节能减排、员工流失减少、治理结构优化和财务绩效提升的效果。研究发现，将社会责任理念有效嵌入到公司治理中，不仅可以促进公司的环保合规和资源优化，还可以提高公司的社会责任感、员工满意度，还可以提高治理效率和资本市场认同度，进而促进企业可持续价值创造。希望通过本研究可以为制造型企业开展社会责任实践提供些许借鉴。

关键词： 工商管理；ESG 理念；企业价值；绩效评价

The Path and Performance Evaluation of Embedding ESG Concepts into Enterprise Value Creation in the Field of Business Administration

Zhou Zhengtao

Xijing University, Xi'an, Shaanxi 710100

Abstract： This paper selects a manufacturing enterprise in East China as a case and systematically analyzes the embedding path and performance evaluation of the concept of corporate social responsibility in the creation of enterprise value. The relevant theories of social responsibility and corporate value creation were sorted out, and the influence of the three-dimensional dimensions of enterprise environment, society and governance on the long-term value enhancement of the company was clarified. Explore the implementation plan of ESG concepts in the case company from aspects such as energy conservation and emission reduction, green supply chain management, protection of employee rights and interests, fulfillment of social responsibilities, improvement of corporate governance structure, and enhancement of information disclosure transparency. In terms of performance evaluation, based on the main environmental, social and governance indicators of the enterprise from 2021 to 2024, through a multi-dimensional indicator system, the effects of energy conservation and emission reduction, reduction of employee turnover, optimization of governance structure and improvement of financial performance of the enterprise are quantitatively evaluated. Research has found that effectively embedding the concept of social responsibility into corporate governance can not only promote the company's environmental compliance and resource optimization, but also enhance the company's sense of social responsibility, employee satisfaction, governance efficiency and recognition in the capital market, thereby promoting the sustainable value creation of the enterprise. It is hoped that this research can provide some references for manufacturing enterprises to carry out social responsibility practices.

Keywords： business administration; ESG concept; enterprise value; performance evaluation

引言

面对气候变化、社会责任、治理结构优化等多重挑战，企业已经不能仅仅依靠财务指标来实现价值创造，还需要考虑环境和环境因

素。国内政策层面对 ESG 信息披露和评价机制的重视程度也越来越高，严格的监管要求企业将 ESG 理念融入到战略层面^[1]。这种变革不仅改变了公司的运作逻辑，而且在公司治理、资源配置、绩效评价等方面都有了新的要求。现有研究已从多个角度探讨社会责任与公司绩效之间的关系，然而，对于社会责任如何嵌入到公司价值创造各个环节，其作用路径和绩效测度机理尚缺乏系统的研究^[2]。因此，探讨 ESG 理念嵌入公司价值的路径及绩效评估问题具有重要意义。

一、ESG 理念与企业价值创造理论概述

（一）ESG 理念

ESG 理念是一个将环境、社会、治理三者有机结合起来的系统框架。环境维度主要关注企业对资源利用，碳排放，污染控制等方面的影响；社会层面侧重于劳动权利义务、产品义务和邻里关系义务；公司治理维度主要包括董事会结构、内部控制机制和股东权益保障机制等^[3]。ESG 理念强调公司非财务业绩对公司长远发展和市场竞争能力的支持作用，是公司控制风险、维持声誉和持续成长的重要手段。

（二）企业价值创造

企业价值创造就是企业在经营过程中，通过对资源的配置与管理，获得经济利益的增长与长期价值的提高。传统的企业价值创造主要是从企业的盈利增长、资产增值和股东收益三个方面来衡量，并着重分析了企业的财务业绩和市场绩效。然而，以可持续发展与高质量发展为导向的价值创造内涵，已由单一财务导向拓展为多元协同的综合性系统^[4]。现代公司的价值创造不仅仅是资本的回报，它还涉及到顾客价值，员工发展，社会责任以及生态效应。这一过程取决于战略定位、组织治理、创新能力和风险管理等多种机制的有效协同。

二、案例分析

（一）企业概况

本文选取 2004 年成立于华东地区的一家制造业企业，主要从事机械配件的加工和配套服务，现有员工 1200 余人，年营业额稳定在 8 亿元人民币。公司主要从事出口贸易，客户主要是欧美等国家。近几年来，由于国际市场需求的波动以及环保政策的收紧，公司的经营压力逐步加大。根据 2022 年年报显示，这家公司的净利润与去年同期相比下降了 12%，资产负债率达到了 68%，单位能源消耗比工业平均水平高出了 15%。在公司治理结构方面，董事会的独立性不强，董事人数为 0，没有设置专职的环境和社会责任管理职位。在社会责任方面，员工流失率很高，员工满意度调查发现，有 40% 的员工对公司的职业发展持消极态度。

（二）案例企业 ESG 理念的必要性分析

从目前的经营状况和外部环境看，引入环境、社会责任意识是非常必要的。在环境方面，欧美国家对绿色供应链管理的重视

程度越来越高，企业在国际市场上获得订单的能力和声誉受到很大的影响。从社会层面来看，企业内部的人力资源制度不够完善，员工的满意度、归属感都不高，这会增加人力资本的流失风险，影响企业的生产效率和组织的稳定性^[5]。公司治理结构单一、缺乏独立性，使得风险管控能力减弱，战略决策科学性降低，融资和运营不确定性增加。引入社会责任理念，有助于企业从环境、社会和公司治理三个方面系统地认识和管理关键问题，提高其在供应链、资本市场和监管等方面的认知度，进而提升企业的长期价值创造能力和可持续发展潜力。

三、工商管理领域中 ESG 理念嵌入企业价值创造的路径

（一）环境维度路径

在环境维度上，把社会责任理念融入到公司价值创造中，重点在于提高公司资源使用效率和环境合规能力，从而降低运营成本、降低环境风险，提升企业可持续发展能力。结合案例企业能源消耗大、废水排放量超标等特点，可以通过技术改造来促进生产设备的更新换代，使用高效率、节能的机床和智能化的控制系统来减少单位产品的能源消耗^[6]。将清洁生产技术引入生产流程，采用水性涂料代替溶剂型涂料，优化污水资源化体系，达到源头控制与末端处理协同治理的目的。制定长远的碳排放战略目标，如建立碳排放核算和监测机制、参与区域碳交易等，为未来碳市场竞争做好准备。在绿色供应链管理方面，企业应该优化采购策略，优先选择有良好环境记录的原材料供应商，并将环境要求纳入供应商评价体系，同时推进绿色物流合作，如与第三方合作建设低碳交通体系等^[7]。在外部传导机制上，公司可以通过发布环境责任报告，公开披露关键的环境绩效数据，如碳足迹、水资源利用效率、污染物排放量等，以满足客户和监管部门对绿色合规的关注。

（二）社会维度路径

社会层面的价值创造强调企业在内部激励和外部责任履行两个层面上实现组织的长期健康发展与积极的社会影响。案例企业人力资源管理与社会责任履行能力不足，亟须将 ESG 理念嵌入员工权益保护和外部社会价值贡献两方面。重构企业人力资源管理制度，完善企业劳动合同管理机制，构建岗位等级与薪酬激励机制之间的联动机制，提高员工的工作稳定性和职业发展预

期^[9]。实施技能培训和职业生涯规划，特别是对一线技术人员进行多层次的培训，提升人力资本的质量和员工的归属感。通过建立员工满意度调查系统和反馈机制，保证管理者真正了解员工的需要，并把员工的满意度纳入绩效评价体系中。在员工的健康和安全方面，应该采取综合的职业病防护措施，建立安全生产管理系统，利用数字技术对作业环境指标进行实时监控，提高事故防范能力。在外部社会责任层面，公司应该建立与社区的长期合作机制，如设立社区基金、参与当地教育、基础设施建设等，促进区域共同发展^[9]。从消费者权益角度来看，应该加强产品的质量控制和售后服务体系，健全可追溯系统，加强消费者的反馈，并建立产品责任管理体系。

（三）公司治理维度路径

公司治理是实现社会责任理念在公司价值创造过程中的制度性保证和战略执行力的基础。目前，案例企业存在董事会结构单一，缺乏独立性、专业性及社会责任功能，严重制约了企业的治理效能和风险防控能力。需完善董事会结构和治理机制，引入具有环保、社会责任和合规管理经验的独立董事，提高其专业和独立性，保证其在战略决策、财务监管、合规管理等方面的权责划分。要建立多元化的董事会机制，引导董事会成员的性别和背景结构逐渐多元化，从而优化公司治理视角，提高决策质量，建立ESG管理委员会或责任管理岗位，明确公司战略规划、业绩监测和信息披露等职能，并将ESG议题纳入董事会会议审议日程，形成从战略制定到实施效果评价的闭环治理模式^[10]。在风险管理系统方面，建立涵盖财务、合规、环境和运作风险在内的内部控制系统，定期开展风险辨识和应对策略评价，提高公司应对外部政策变动、市场波动和内部经营问题的能力。提高信息公开的透明度，公司应该参照全球主流的ESG报告框架（如GRI、SASB等），建立完善的信息披露体系，对企业的治理结构、战略目标、主要业绩指标和改进措施进行全面披露，保证信息的及时性、完整性和可比性。通过系统地构建和实施以上治理机制，增强战略执行力，减少管理风险，提高资本市场认同度，在治理维度上形成长期价值支持，使公司的可持续价值创造和外部利益协调相结合。

四、工商管理领域中ESG理念嵌入企业价值创造后的绩效评价

（一）环境绩效变化分析

通过引入社会责任的环境维度管理机制，案例企业的能耗控制和污染治理均有显著改善。随着高效设备的更新和清洁生产过程的实施，单位产品的综合能源消耗大幅度降低，年度碳排放量也在不断下降。由表1中可以看出，在三年时间里，单位能源消耗、碳排放和废水排放分别下降了28.42%、19.01%和17.75%。与此同时，环保合规次数逐年下降，绿色采购比例不断增加，显

示企业环境绩效已由“末端治理”转向“系统治理”，抵御外部环境风险的能力明显增强。下表列出了2021–2024年企业的相关数据：

表1 案例企业2021至2024年环境绩效关键指标变化情况

年度	单位产品能耗 (kWh/件)	碳排放总量 (吨)	废水排放量 (吨)	环保合规次数 (次)	绿色采购比例 (%)
2021	18.46	4923.75	13789.50	4	22.30
2022	16.32	4650.80	12980.60	2	34.70
2023	14.95	4312.25	12110.00	1	48.55
2024	13.21	3987.60	11342.20	0	61.80

（二）社会绩效变化分析

在员工管理和社会责任两个层面上，企业通过制度重构获得了更好的绩效。通过实施员工培训项目，优化薪酬结构，建立反馈机制，提高员工的劳动关系稳定性，提高企业对外承担责任的能力。数据显示，员工离职率连续三年降低了41.58%，员工满意度提高了19.50个百分点，工伤事故减少了56.36%。社区投资逐年增加，投诉处理满意率达到91.25%，这表明企业已经形成了一种系统化的管理模式，加强了企业内部的凝聚力和对外部的信任。业绩变化如下：

表2 案例企业2021至2024年社会绩效关键指标变化情况

年度	员工流动率 (%)	员工满意度评分 (100)	工伤发生率 (%)	社区投入金额 (万元)	投诉处理满意率 (%)
2021	26.80	65.20	2.75	83.40	71.55
2022	22.45	72.35	2.18	101.60	78.90
2023	18.10	78.95	1.64	118.25	86.40
2024	15.65	84.70	1.20	133.80	91.25

（三）治理绩效变化分析

公司治理结构的优化和风险管控能力的提高对公司治理绩效的提高具有重要意义。通过引入独立董事，设立社会责任岗位，加强信息披露，进一步完善公司治理机制，提高资本市场绩效和财务稳健性。公司治理数据显示，上市公司的独立董事比例提高到35%，公司的信息披露完整性提高到91.80%。净利润和ROE持续增长，分别从负增长到了9.85%，股东回报达到了10.20%。不断提升的治理能力，对财务绩效的优化以及对外部资本的认同都有很大的促进作用，为公司的稳定经营和可持续发展提供了强大的支持。以下是与治理有关的业绩数据：

表3 案例企业2021至2024年治理绩效及财务指标变化情况

年度	独立董事比例 (%)	ESG报告发布频率 (次/年)	年度信息披露完整度 (%)	净利润增长率 (%)	ROE (%)
2021	14.30	0	61.45	-12.00	6.75
2022	22.50	1	73.10	3.25	8.10
2023	28.70	2	85.60	7.40	9.35
2024	35.00	2	91.80	9.85	10.20

五、结语

本文在深入剖析制造型企业社会责任理念导入路径的基础上，进一步论证了“环境–社会–治理”的三维协同效应对企业价值创造的促进作用。在环境维度上，通过节能减排、优化供应

链，可以有效地减少资源消耗和环境风险；社会层面上员工管理改善及社区参与对组织稳定与社会认同有正向影响；公司治理结构优化和信息披露水平的提高，可以有效地控制风险，提高资本市场的信任度。2021年至2024年，公司净利润及股东回报均持续增长，体现了嵌入环境、社会、治理的经济效应。未来研究可进一步拓展不同行业、规模企业 ESG 路径差异，并结合数字化转型深化 ESG 数据治理与风险预警机制。随着国际社会责任准则的趋

同和监管的加强，公司也需要对其 ESG 策略进行动态调整，以适应不断变化的外部环境。政策层面上，要推动建立更加可操作的社会责任评价体系与激励机制，帮助企业实现多元利益主体间的均衡发展。总体而言，社会责任已经成为提升企业竞争力、实现可持续发展的重要动力，二者的深度融合将不断塑造企业管理理论和实践的新格局。

参考文献

[1] 游战武，欧阳鹏，唐洋. 媒体关注、ESG 表现与企业价值创造——基于 A 股重污染行业的经验数据 [J]. 湖南财政经济学院学报, 2024, 40(05):63-73.

[2] 范雪飞. ESG 视角下管理会计在企业价值创造中的应用研究——基于高校办企业数据的分析 [J]. 价格理论与实践, 2024, (04):147-152.

[3] 郭华丹. ESG 对企业价值创造的影响研究——基于信息不对称视角 [J]. 福建商学院学报, 2024, (01):63-70.

[4] 王鑫，刘菁. ESG 投资在企业价值创造中的作用研究 [J]. 商业 2.0, 2024, (04):10-12.

[5] 李隆. 财务价值创造理念下的施工企业管理会计应用 [J]. 财经界, 2024, (01):123-125.

[6] 郭子豪，张永红. ESG 责任履行、商业信用融资与企业价值创造 [J]. 技术与创新管理, 2023, 44(06):735-744.

[7] 郝颖. ESG 理念下的企业价值创造与重塑 [J]. 财会月刊, 2023, 44(01):20-25.

[8] 黄贞发. EPM “四理念” “三技术” 驱动大型企业价值创造 [J]. 中国管理会计, 2022, (03):72-84.

[9] 郭鹏飞. ESG 理念下企业共享价值创造——以中国神华为例 [J]. 煤炭经济研究, 2022, 42(08):31-37.

[10] 余萍. 业财融合管理理念的价值创造方式及其对企业经营效益影响的实证研究 [J]. 投资与合作, 2022, (08):109-111.

OBE 理念驱动的工科概率统计课程教改与实践

袁程¹, 张兴发^{2*}

1. 广东工业大学 数学与统计学院, 广东 广州 510520

2. 广州大学 经济与统计学院, 广东 广州 510006

DOI:10.61369/ASDS.2025050015

摘 要 : 在新工科建设背景下, 概率论与数理统计作为支撑工程创新的核心数学工具, 其教学改革亟需实现从知识传授向能力培养的转型。本文基于成果导向教育 (简称 OBE) 理念, 聚焦三个关键维度: 构建能力产出导向的课程目标体系、开发案例和项目教学资源、建立多元化评价和考核机制, 系统探索课程教学改革路径。采用反向设计方法, 以统计建模能力与数据分析技能培养为核心, 重构教学内容体系, 深度融合统计软件应用、工程问题建模等实践环节。教学实践表明, 该改革方案显著提升了工科学生运用概率统计方法解决实际工程问题的能力, 为培养具有创新精神和实践能力的新工科人才提供了可借鉴的实践经验。

关 键 词 : OBE 理念; 工科概率统计; 课程教学改革; 创新能力培养

Curriculum Reform and Practice of Engineering Probability and Statistics Driven by OBE Philosophy

Yuan Cheng¹, Zhang Xingfa^{2*}

1. School of Mathematics and Statistics, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510520

2. School of Economics and Statistics, Guangzhou University, Guangzhou, Guangdong 510006

Abstract : Under the background of Emerging Engineering Education, the teaching reform of probability theory and mathematical statistics—a core mathematical tool supporting engineering innovation—urgently requires a shift from knowledge delivery to competency development. Guided by the Outcome-Based Education (OBE) concept, this paper focuses on three key dimensions: constructing an outcome-oriented curriculum objective framework, developing case-based and project-based teaching resources, and establishing a diversified evaluation and assessment mechanism. It systematically explores pathways for course reform through backward design, centering on cultivating statistical modeling capabilities and data analysis skills. This approach involves restructuring the teaching content system while deeply integrating practical components such as statistical software applications and engineering problem modeling. Teaching practice demonstrates that this reform significantly enhances engineering students' ability to apply probabilistic and statistical methods to solve real-world engineering problems, providing valuable experience for cultivating innovative and practice-oriented talent in emerging engineering fields.

Keywords : OBE philosophy; probability and statistics for engineering; curriculum and teaching reform; innovation capability cultivation

引言

概率论与数理统计主要研究和揭示随机现象统计规律性, 作为一个应用性和实践性很强的数学分支, 被广泛应用于自然科学、经济管理、工程建设、社会生产和生活等众多领域。概率论与数理统计课程在许多高校不仅被设置为数学和统计专业的基础必修课^[1], 也是非数学各专业的一门重要的公共基础课, 为理工、经管、医等各专业学生后续专业课程的学习和实践奠定必要的数学基础^[2]。关于概率论与数理统计课程的教学改革, 在创新教学模式和培养学生实践能力方面已形成一些具有理论支撑的实践探索^[3-6]。

近年来国家大力推进新工科建设, 以培养兼具实践能力和创新能力的应用型、技能型复合人才为主要目标^[7]。这一战略导向对工科数学基础课程的传统教学模式提出了全新的要求与挑战。本文旨在探索和实践新工科背景下的概率论与数理统计课程教学改革, 将以学

基金项目: 2023年度广东工业大学校级“本科教学工程”项目“新工科背景下概率统计课程教学探索与实践”(广工大教字[2023]51号)。

作者简介: 袁程, 广东工业大学数学与统计学院, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为概率论与数理统计。

通讯作者: 张兴发, 广州大学经济与统计学院, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为统计学。

生为本的 OBE 理念落实到课程教学中,将教学重心从教师传授概率统计知识转向学生建立随机模型解决工程问题、使用统计软件进行数据分析等能力生成。以学生在完成概率统计课程的学习后应达到的能力和素质目标为起点,反向设计课程教学内容、优化教学方法和完善课程评价体系,助力培养兼具概率统计建模思维、创新意识和实践能力的高素质工科人才。

一、概率论与数理统计课程在工科专业中的定位与现状分析

(一) 概率统计课程的课程定位及主要特点

广东工业大学是一所以工为主的省属重点高校,在学校工科专业集群化发展的背景下,概率论与数理统计作为现代工程科学的基础方法论工具,在教学体系中呈现出显著的需求特征。概率论与数理统计课程的内容涵盖概率论基础(包括随机事件和概率、一维和多维随机变量及其分布、随机变量的数字特征、大数定律与中心极限定理等)和统计推断方法(包括抽样分布、参数估计、假设检验等),旨在帮助学生建立从不确定性中挖掘统计规律的科学思维,为后续工科实践如工程优化、可靠性分析、统计质量控制等奠定必要的数学基础。

概率论与数理统计应用性强的特点,决定了该课程注重理论与实践结合。通过灵活运用概率计算、统计推断和建模等方法分析和解决工程技术、人工智能等领域中的实际问题,培养工科学生“用数学理解随机世界,用数据驱动理性决策”的能力和素养,这种能力和素养的培养对工科学生的专业发展和实践创新具有重要意义。

(二) 概率统计课程的教学现状及存在问题

概率论与数理统计课程已从传统的数学基础课演变为支撑工程技术创新的关键方法论课程,这种转变对课程建设和教学改革提出了新的要求。通过在工科专业中多年讲授概率统计课程的实践教学经验,总结目前该课程的教学现状中存在的问题,有助于应对新的要求和挑战。

1. 教学理念缺乏先进性

传统的概率统计课程教学存在以教师为主体的知识灌输倾向^[6],学生被动接受概念、定理等理论知识,却难以掌握其思想精髓,导致实际应用能力薄弱、与自身专业跨学科融合困难等。这种传统理念下,弱化了价值观引导、创新能力培养和科学精神塑造等育人功能,亟需向以学生为中心的先进教学理念转变。

2. 教学内容缺乏时代性

尽管概率统计是一门应用性很强的课程,但按数理逻辑编排的大量理论知识与相对陈旧的应用实例,使得学生在学习该课程时仍然感到枯燥无味,很难窥探到这门课程在当今新工科和人工智能时代背景下在专业领域有何重要应用,从而学习动力不足。

3. 教学方法缺乏创新性

在数智化时代背景下,成长于信息技术环境中的当代大学生具有思维活跃、数字化工具运用娴熟的特点,其知识获取方式已发生根本性变革。然而当前概率统计课程仍普遍采用“板书+PPT+讲解”的灌输式教学,这种与数字化原生代学习特征脱节的传统模式,不仅难以激发学生的学习兴趣,更导致课堂互动性差等问题,严重制约了教学效果的提升。

4. 考核方式缺乏全面性

当前概率统计课程的成绩评定体系仍以终结性评价为主导,

采用平时成绩(主要依据出勤率和作业完成情况)与期末考试成绩简单加权的方式^[6]。这种评价模式存在明显的局限:平时成绩难以反映学习过程中的思维发展和能力提升,仅能体现表面合规性;期末考试则过度聚焦基础概念和理论方法的机械考查,缺乏对实际问题解决能力和创新思维的有效评估,导致评价结果与学生真实学习成效存在偏差。

二、基于 OBE 的概率论与数理统计课程教学改革路径

OBE 作为一种先进的教学理念,主张教学设计和实施的目标是学生通过教学过程后最终所取得的学习成果,应根据学生最终能力的达成按照反向设计原则设计课程教学^[9]。OBE 要求教师教学全过程聚焦学生实际能力的培养:首先应明确在完成学习过程后能达成的学习成果,并让学生将学习目标聚焦在这些成果上;其次要以学生为中心尊重个体差异,制定个性化的学习要求并因材施教,确保学生通过学习过程能够达成学习成果;最后基于学习成果反馈来持续改进原有的课程设计与教学。

下面将从能力产出导向的课程目标体系的构建、案例和项目教学资源开发及多元化评价与考核机制的建立这三个关键维度出发,探索将 OBE 理念融入工科专业概率论与数理统计课程的教学改革路径。

(一) 能力产出导向的课程目标体系的构建

以最终能力产出为导向的概率统计课程目标体系的构建可分为三步:

首先,通过走访和调研政府、企业等用人单位,结合往届工科毕业生就业数据,对市场人才需求进行深入分析,凝练出新工科人才岗位必备的核心能力要素。

然后,根据调研和分析结果,结合新工科本科人才培养要求,明确概率论与数理统计课程目标,包括知识目标、能力目标和素质目标。着重培养学生从现实复杂工程问题中,抽象出概率统计模型或创想出科学假设并拟定统计方法检验假设的能力。

最后,依据已明确的课程目标,整合教学资源,优化教学设计。在理论教学中,突出对重点和难点的讲解,更重要的是要加大实践教学的比例,推动理论知识向实践能力的转化。

(二) 案例和项目教学资源的开发

为促进概率统计课程与工科专业的有机融合,需同步改革传统课程教学内容与方法,创新采用案例与项目驱动相结合的教学模式。

1. 案例驱动式教学

传统概率统计课程的教学长期存在理论知识与工程实践脱节的问题,导致工科学生难以建立专业关联性。为破解这一困境,建议实施“双师协同+案例驱动”相融合的教学模式:一方面由数学专业教师与各工科专业教师组建联合教研团队,系统梳理机械、电子、自动化等专业核心课程中的概率统计应用需求,如可

靠性分析、信号处理误差评估、结构应力概率模型等；另一方面基于真实工程场景开发模块化案例库，如将贝叶斯网络应用于设备故障诊断、蒙特卡洛模拟融入工程造价风险评估等，通过“问题导入—理论解析—工程验证”的教学闭环，使抽象公式转化为解决专业问题的实用工具。这种跨学科资源整合既能保持理论体系的严谨性，又能显著提升学生的知识迁移能力和学习内驱力。

2. 项目驱动式教学

当前高校青年教师普遍承担着与社会热点紧密关联的科研项目，这为概率统计教学提供了丰富的实践素材。教师可精选科研项目中的典型案例引入课堂^[10]，通过分组任务引导学生采集真实工程数据，利用统计软件建立概率模型并求解，使抽象理论转化为解决实际问题的工具，实现科研反哺教学。这种项目驱动教学的模式既能展示概率统计在智能制造等前沿领域的应用价值，又能同步提升工科学生的统计建模能力、统计软件计算能力和跨学科协作意识，实现知识传授与工程素养培养的双重目标。

（三）多元化评价与考核机制的建立

1. 考核内容的立体化重构

以 OBE 成果导向理念为核心，构建“知识 + 能力 + 素养”三维立体评价框架。知识层考查概率分布、假设检验等核心理论；能力层通过统计质量控制、通信信号处理等专业案例，评估学生建模分析与软件应用能力；素养层则依托项目式学习，从团队协作、创新思维等维度进行过程性评价。

2. 考核方式的多维度创新

构建“全过程 + 多维度”的考核体系，对学生的学习过程和学习效果进行动态跟踪和评价。在保留期末考试基础上，创新设置开放性作业、课堂互动评估、小组项目答辩和阶段性测验等动态评价环节，同时优化期末考题结构，增加案例分析与应用题型，形成贯穿学习全程、兼顾知识掌握与实践能力的多元评价机制。

3. 评价反馈机制的双向构建

建议构建双向闭环评价反馈机制。教师需在考核后一定时间内及时提供考核分析报告给学生，特别针对项目式学习需附加团队角色贡献度分析和成果优化方向建议。同步建立学生评教教师优化的通道，通过每月教学听证会收集学生对考核方式、评分标准的改进建议，最终形成“评价—反馈—优化”的良性循环，确保 OBE 教育理念下每个学生都能获得个性化成长方案。

三、教学实践与效果

（一）课程教改实施情况

在 2023 年秋季学期开始，先后在广工大多个工科专业实施

了 OBE 理念驱动的工科概率统计课程教学改革，共进行了三轮教学实践。在教改实施的过程中，采用了反向设计原则重构课程体系。首先，依据工程认证标准和各专业人才培养需求，明确学生通过概率统计课程学习应达到的专业相关能力目标，例如数据分析和统计建模等核心能力指标。其次，组建跨学科教学团队，将统计过程控制、通信信号处理等典型工程案例融入教学内容，采用“案例教学 + 项目驱动”混合式教学方法。随后同步构建包含开放性作业、课堂互动评估、项目报告、实践测试等多维度全过程的评价体系，注重对学生核心能力指标的考核。最后，将双向评价反馈机制贯穿整个实施过程，教师在阶段性考核后及时提供考核分析报告给学生，学生通过每月的教学听证会将自己对教学和考核方式的改进建议反馈给教师，教师结合学生的反馈和学习情况，及时调整和优化教学策略的实施。

（二）课程教改效果评估

通过对广工大工科专业概率论与数理统计课程教改的评估分析表明，新教学模式在提升学生专业素养和实践能力方面取得显著成效。具体表现为：期末测评中，学生在专业应用类压轴题的得分率提升明显，80% 以上学生能熟练运用概率统计理论，结合统计建模和编程工具解决实际问题；项目实践环节显示，学生的工程问题解决能力、团队协作和创新思维均有长足进步；问卷调查数据更显示，90% 以上学生认可教改对提升学习效率、自主学习和课堂参与度的积极作用，成功实现了从知识灌输到能力培养的教学范式转型。

四、结束语

在新工科建设背景下，本文基于 OBE 理念，系统探索了概率论与数理统计课程的教学改革路径。通过构建能力产出导向的课程目标体系、开发工程案例和项目教学资源、建立多元化评价机制等关键措施，采用反向设计方法重构了以统计建模能力和数据分析技能为核心的教学内容体系，深度融合统计软件应用与工程问题建模实践。教学实践表明，该改革方案有效提升了工科学生运用概率统计方法解决实际工程问题的能力。尽管在实施过程中发现教学资源更新时效性和跨学科团队协作等方面仍需完善，但这一改革为培养具有创新精神和实践能力的新工科人才提供了重要参考。未来将进一步深化课程与专业的融合创新，优化教学方法和评价体系，持续完善资源共享机制，以更好地满足新工科人才培养需求。

参考文献

- [1] 茆诗松, 程依明, 濮晓龙编著. 概率论与数理统计教程 (第三版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2019.
- [2] 盛骤, 谢式千, 潘承毅编. 概率论与数理统计教程 (第三版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2019.
- [3] 李超群, 张玉洁, 蒋良孝. 利用人工智能案例推动概率统计课程教学 [J]. 大学数学, 2020, 36(4): 43-48.
- [4] 黄敢基, 韦琳娜, 冯海珊. 以一流课程建设为导向的概率论与数理统计课程教学改革与实践 [J]. 高教论坛, 2024, 11: 25-29.
- [5] 王学军. 大数据时代下概率论课程教学实践探索 [J]. 大学数学, 2024, 40(6): 17-25.
- [6] 张慧星, 姚香娟, 许盈盈. 新工科背景下概率论与数理统计实践教学改革 [J]. 高等数学研究, 2024, 27(5): 64-68.
- [7] 钟登华. 新工科建设的内涵与行动 [J]. 高等工程教育研究, 2017, 3: 1-6.
- [8] 杨永富, 胡真, 宫奕波. 新工科导向下大学数学课程创新能力培养体系的构建与实践 [J]. 大学数学, 2022, 38(5): 45-51.
- [9] 李志义. 解析工程教育专业认证的成果导向理念 [J]. 中国高等教育, 2014, 17: 7-10.
- [10] 李超群, 付丽华. 利用科研实践提高概率统计教学质量 [J]. 高等数学研究, 2013, 16(6): 39-41.

复杂视频场景人群行为分析研究

胡同花¹, 胡紫英²

1. 永州职业技术学院 信息网络中心, 湖南 永州 425000

2. 湖南科技学院 理学院, 湖南 永州 425000

DOI:10.61369/ASDS.2025050016

摘要 : 随着人群聚集场所中异常事件频发, 研究复杂视频场景下的人群行为分析在公共安全维护、智能监控系统搭建等关键领域中愈发重要。本文提出复杂视频场景的人群行为分析方法、人群行为检测常见手段和检测方法、主要存在的问题及人群行为检测和定位模型, 并从人群计数及密度估计、人群全局异常检测及人群局部异常行为检测和定位三个角度提出解决方案及应用场景。

关键词 : 复杂视频场景; 人群行为分析; 异常检测

Research on the Analysis of Crowd Behavior in Complex Video Scenes

Hu Tonghua¹, Hu Ziying²

1.Yongzhou Vocational and Technical College Information Network Center, Yongzhou, Hunan 425000

2.Faculty of Science, Hunan University of Science and Engineering, Yongzhou, Hunan 425000

Abstract : With the frequent occurrence of abnormal events in crowded places, the analysis of crowd behavior in complex video scenes has become increasingly important in key areas such as public safety maintenance and the construction of intelligent monitoring systems. This article proposes a method for analyzing crowd behavior in complex video scenes, common methods and detection techniques for crowd behavior detection, main existing problems, and crowd behavior detection and localization models. Solutions and application scenarios are proposed from three perspectives: crowd counting and density estimation, global anomaly detection of crowds, and local anomaly behavior detection and localization of crowds.

Keywords : complex video scenes; analysis of crowd behavior; outlier detection

引言

随着人群聚集的情况频繁在各种公共场所中出现, 因人群拥挤引发的灾难性事件逐年增多。近年来因人群拥挤引发的典型人群灾难性事件造成巨大财产、生命损失, 主要包括: 2021年3月21日, 坦桑尼亚悼念活动踩踏事件、2022年10月29日, 韩国首尔梨泰院踩踏事件、2024年4月19日, 也门萨那慈善物资发放踩踏事件、2024年12月1日, 加沙代尔拜莱赫抢面饼踩踏事件、2025年2月15日, 印度新德里火车站踩踏事件等。人群灾难性事件的频繁出现, 给公共安全管理带来了新的挑战, 成为各级安全管理部门迫切需要重视和解决的现实问题。新时期下视频监控技术主要基于目标检测、跟踪、识别和分析等方法, 对公共环境中人群监控场景下个体间存在大量的遮挡和不规则运动很难适用。因此, 本文重点研究复杂环境下人群监控场景的人群行为特性, 监测并预警人群动态, 避免人群灾难性事件的发生。

一、人群行为分析方法国内外现状

现有的人群行为分析方法大致分为基于传统特征表示的方法和基于深度特征表示的方法两大类。本文主要从人群计数及密度估计、人群异常检测和人群运动建模三个方面进行国内外现状分析。

(一) 人群计数及密度估计研究

基于传统特征表示的人群计数及密度估计方法通过设计不同的时空特征表示(如: 梯度直方图、形状描述子、局部纹理特征、运动轨迹等), 采用全局/局部检测或回归模型完成行人检测、定位及计数。中国科学院操晓春研究员团队^[1]首次提出端到端的CNN回归模型对高密度人群图像进行密度估计。上海交通

基金项目: 2024年度湖南省自然科学基金科教联合项目基金(复杂视频场景人群异常行为检测研究 2024JJ8086)。

作者简介: 胡同花(1982.01-), 女, 主要研究领域为网络技术、智能应用。E-mail: yzzyhutonghua@163.com。

第二作者: 胡紫英(1974.12-), 女, 主要研究领域为嵌入式研究、生物涂层材料。E-mail: 409467800@qq.com。

大学杨小康教授团队^[2]针对已有模型应用到新的人群场景时密度估计精度急剧下降的问题，首次提出基于跨场景 CNN 模型的人群计数方法。针对人群场景的尺度变化问题，上海科技大学高盛华博士团队^[3]基于三种具有不同大小感受野的卷积核，构造出多列 CNN 网络结构估计人群密度。上海交通大学杨华博士团队^[4]采用条件 GAN 将人群图像转换为对应的人群密度图。Shen 等^[5]采用 U 型 GAN 分别对人群整体场景和人群块进行训练。为避免尺度变化引起的密度估计不一致性，引入交叉尺度一致性损失进行训练。目前急需解决具有复杂性、尺度变化、运动模式多样性等特点人群监控场景，如何提取人群场景的深度密度特征表示等问题。

（二）人群异常事件检测研究

基于传统特征表示的人群异常事件检测研究通常基于人群视频的可视特征，采用不同的统计模型（HMM 模型、贝叶斯模型等）或物理模型（社会力模型、能量模型等）完成人群异常事件检测。Yuan 等^[6]提出上下文结构描述子建模行人关系，根据结构描述子的时空变化检测人群事件是否发生。杭州电子科技大学的张旭光教授团队^[7]等根据人群场景能量分布的变化检测人群全局异常事件。

基于深度特征表示的人群异常事件检测研究通常采用深度网络学习人群常规事件的深度特征表示，再基于不同分类器判断是否出现异常事件。广东工业大学蔡瑞初博士团队^[8]对人群整体动态的时间序列建模，提出了基于多尺度时间递归神经网络的人群异常事件检测和定位方法。人群场景异常检测通常包括全局异常检测和局部异常检测，从以上各团队成功改进中可以看到，人群场景的可视运动特征的深度表示，是增强人群异常检测性能的关键。

（三）人群运动建模研究

基于传统特征表示的人群运动建模方法通常基于人群运动特征（如：光流、轨迹、时空特征等），采用聚类或流模型或概率图模型建模人群运动模式。杨华博士团队基于运动向量的局部特征及全局运动结构，提出基于卷曲和发散度的人群运动轨迹描述子。该描述子具有尺度和旋转不变性，在人群运动模式分析应用中表现出优异的性能。香港中文大学王晓刚教授团队^[9]使用 KLT 轨迹特征，基于马尔可夫链构建人群集体性转换先验器，提取人群场景的集体性、冲突性、一致性、统一性描述子建模人群运动模式。上海交通大学赵旭博士团队^[10]根据人群轨迹相似性定义人群的全局运动一致性及局部运动一致性，提出聚类算法检测人群组运动模式。山东师范大学刘弘教授团队^[10]基于社会力模型构建疏散路径集合，考虑影响行人路径选择的四种因素，提出基于疏散路径集合的路径选择和人群疏散模型。虽然这些方法在具有规则运动的人群场景中检测精度高、速度快；但在密集的复杂人群场景中，由于人群遮挡、相机运动、光照问题等引起的低级特征提取的不稳定性，造成算法检测精度不稳定。

二、人群行为检测常见手段和检测方法

复杂视频场景中人群行为检测常用手段有视频监控设备和传感器，如：分布于不同场景的监控摄像头、全景摄像头、高速摄像头等，红外传感器可检测人体的存在和移动，与视频数据结合能更准确地判断人群行为；压力传感器布置在地面等区域，可感知人群的分布和活动强度等信息。检测方法主要分为传统计算机视觉方法、机器学习方法和深度学习方法三大类，各类方法基于不同的技术原理，在检测精度、实时性和场景适应性上呈现差异化特征，对比分析如表 1 所示。

表 1 人群行为检测手段和方法对比与应用场景

方法类型	代表算法	优点	缺点	典型应用场景
传统计算机视觉	光流法（Optical Flow）	像素级运动捕捉，快速动作敏感	计算量大，抗干扰能力弱	简单场景个体动作分析
	背景建模（Background Modeling）	实时性强，异常检测效率高	动态背景适应性差	固定监控场景异常预警
机器学习	支持向量机（Support Vector Machine, SVM）	小样本泛化能力强，分类边界清晰	手工特征表征能力有限	工业动作规范性检测
	隐马尔可夫模型（Hidden Markov Model, HMM）	时序建模能力强，适合短序列动作	长程依赖建模不足	手语识别、简单动作序列分析
深度学习	卷积神经网络（Convolutional Neural Network, CNN）	自动提取时空特征，复杂场景适应性强	时序信息捕捉不足	暴力行为检测、动作分类
	循环神经网络（Recurrent Neural Network, RNN）及其变种（LSTM/GRU）	长时序动态建模，行为过程表征好	计算效率低，空间特征提取较弱	人群异常行为预测
	时空图神经网络（Spatio-Temporal Graph Neural Network, ST-GNN）	显式建模个体交互与群体动态	依赖姿态估计，密集场景建模困难	团队协作分析、群体异常检测

复杂视频场景下的人群行为检测已从传统手工特征方法逐步发展为深度学习主导的端到端模型。传统方法在简单场景中仍具实时性优势，而深度学习方法通过时空特征联合建模，在复杂场景（如拥挤、遮挡、多目标交互）中表现更优。

三、人群行为分析主要存在的问题

1. 标注成本与数据多样性矛盾。由于人群监控视频的数据标注需耗费大量人力物力，导致现有研究多针对某类数据集，缺乏针对复杂环境下多场景多类别人群场景的研究。
2. 跨域分布差异显著。不同场景（如地铁站 vs 校园）、不同

摄像头视角（俯视 vs 平视）、不同时段（白天 vs 黑夜）的数据分布差异大，模型泛化易受“域偏移”影响。

3. 隐私保护与数据采集冲突。高清视频采集涉及个体隐私（如面部、行为轨迹），公开数据集多经过脱敏处理（如模糊化），导致特征完整性受损。现有模型多为监督学习模型，在应用到新场景时，检测精度常明显下降，模型适用性受限。

四、人群行为分析检测和定位模型

（一）跨场景多尺度的复杂人群密度估计研究

基于人群场景的尺度不变性，本文设计一种多尺度的人群密度特征表示，并基于深度特征域适应模型完成跨场景人群密度估计。该模型方法如图1所示。

1. 基于 CNN 的人群场景密度先验器

针对不同监控环境下人群场景密度存在较大差异的问题，本文设计人群密度先验器为人群场景密度估计提供先验知识。将数据集集中的人群场景密度分为10类，采用卷积神经网络对人群场景进行密度分类，采用5层带有Relu激活函数的卷积层，每个卷积层后跟一个池化层。

2. 基于 GAN 的多尺度密度估计预训练模型

对已有密度标注的源域训练集采用深度网络训练，得到源域数据的特征分布。针对CNN平均卷积核引发的生成密度图模糊问题，基于人群场景的尺度不变性特征，提出基于GAN的多尺度场景密度估计预训练模型。模型训练过程如图1(a)所示。

学习三种尺度下的人群密度生成图，通过归一化不同尺度下的生成图得到场景密度生成图。模型中的判别器与生成器的网络结构如下：生成器编码器采用五个卷积层，解码器对应采用五个反卷积层；判别器则采用三个卷积层和一个全卷积层。在训练目标函数方面，除生成对抗网络的重构损失之外，为减少生成密度图与标注密度图的差异，提高密度估计精度，引入密度一致性损失。通过多轮训练求解网络参数，得到训练集中人群场景的密度特征表示。

3. 基于权值共享的域适应人群密度估计算法

针对测试集中通常只有少量标注样本或没有标注样本的实际情况，通过微调训练阶段得出的密度估计模型，基于权值共享的实现域适应的人群密度估计算法。测试模型如下：将标注样本集与未标注样本集分别输入特征编码器E，且同时使用预训练模型中的参数初始化编码器。对标注样本，计算样本场景分类损失；对所有样本，采用最小化平均偏差(MMD)定义源域特征分布与目标域特征分布的距离。测试模型如图1(b)所示，通过重新训练编码器，调整网络参数，增强编码器生成的深度特征表示的域不变性，从而实现跨场景多尺度的人群密度估计。（图1(b)仅图示了一种尺度下的测试过程）

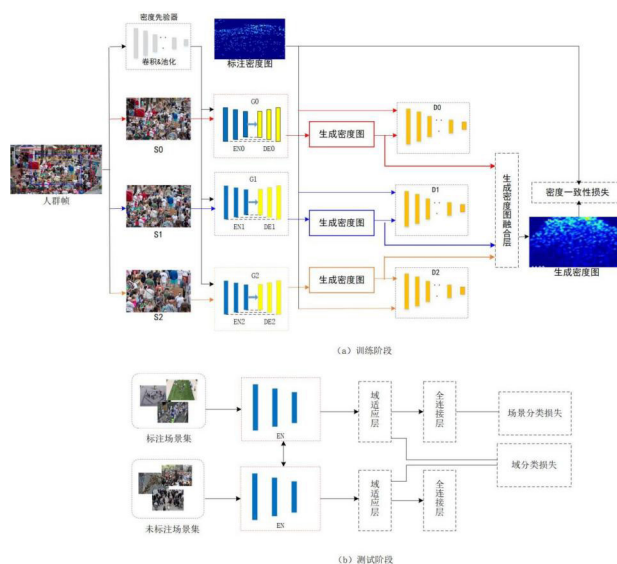


图1 跨场景多尺度人群密度估计模型

（二）无监督域适应人群全局异常检测模型

鉴于人群监控视频中场景特征的空间结构性及时序相关性，设计基于时空能量特征的域适应人群深度特征表示模型，并研究无监督的人群全局异常检测方法。

1. 基于时空能量特征的人群运动表示

由于在复杂人群监控场景中存在大量遮挡且运动变化微小，传统的光流特征不能及时捕捉局部运动变化。引入时空能量特征模型，基于高斯滤波器的三阶导数设计人群场景的时空能量特征表示，对频域内通过原点的所有平面的能量响应和进行能量归一化，获得人群时空能量特征表示。

2. 域适应的人群场景深度特征表示模型

考虑到人群视频的运动特征变化同时受到场景空间结构及时序相关性的影响，提出域适应的人群深度特征表示方法，建模人群场景的运动特征。模型方法如图2所示。对源域视频和目标域视频采用GAN网络学习深度特征表示，图中、分别表示源域特征生成器和判别器；、分别表示目标域特征生成器和判别器。为利用视频特征间的时序相关性，引入源域特征与目标域特征间的循环对抗损失。为减小源域特征分别与目标域特征分别的距离，引入特征匹配损失。此外，针对源域人群场景的类别标签，引入场景分类损失训练网络。为保持深度特征的域不变性，引入域判别器，基于域对抗损失训练网络以确保深度特征的域不变性。

模型采用的网络结构如下：与采用相同的网络结构，采用10个卷积层，每个卷积层后紧随批归一化层及ReLU激活层；且与采用相同参数进行初始化；与也采用相同的网络结构，采用6个卷积层及一个全卷积层；域判别器采用具有3个卷积层的网络结构。模型目标函数包括图2中所示的循环对抗损失、生成对抗损失、场景分类损失、特征匹配损失及域对抗损失。模型训练问题最终转化为最小最大问题求解，通过多轮训练求解网络参数，得到人群场景密度生成模型。

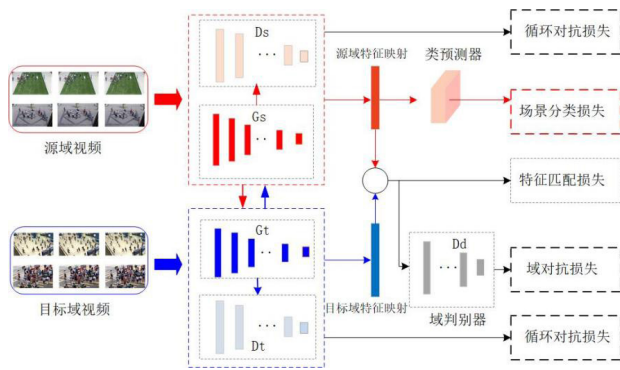


图2 基于时空相关性的域适应人群深度特征表示模型

3. 无监督人群全局异常检测算法

鉴于在一段时间内人群场景的运动变化具有连续性特点，提取滑动窗口内生成的深度运动特征表示，计算其在给定时间段内的累计变化。当特征累计变化超出给定阈值时，认为发生了全局异常事件。

（三）基于时空特征的人群局部异常行为检测和定位模型

针对现有人群数据集中只有少量像素级异常行为标注的问题，本文设计基于时空特征的人群局部异常行为检测模型，模型方法如图3所示。

1. 基于动态颗粒流的人群块分割算法

首先，基于人群序列的时空能量特征，分析并讨论人群颗粒间的时空相关性及其社会交互影响力，建立人群颗粒之间的时空交互模型，提出基于拉格朗日动态颗粒流人群运动分割模型，得到人群视频的可视特征块及能量特征块。

2. 基于时空特征的人群异常行为检测模型

基于人群视频块的时空特征建立域适应的异常行为检测模型，实现无监督/半监督的人群异常行为检测和定位。首先采用两个CNN网络建模源域人群块和目标域人群块的深度特征表示，并引入域判别器最小化源域特征分布与目标域特征分布的距离，判别器的输入为源域及目标域人群块。为更好的利用源域及目标域中的已有标注信息，引入异常判别器判别当前人群块的真伪，异常域判别器的输入仅为源域中的标注人群块。模型目标函数包括图3中定义域对抗损失及异常预测损失。模型采用的网络结构类似于图2中的网络结构，其中源域生成器与目标域生成器采用参数共享的同一网络结构，异常判别器与域判别器则都采用多层CNN结构。该网络模型适用于无监督/弱监督的人群局部异常检测与定位。

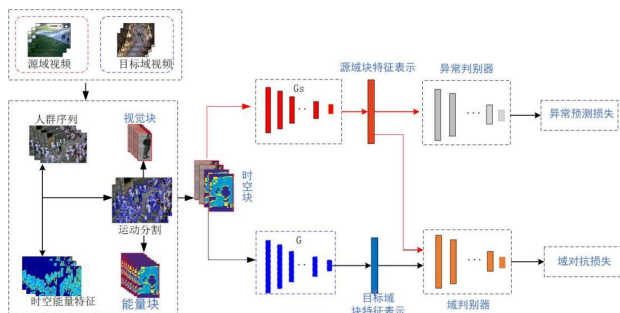


图3 基于时空特征的人群局部异常行为检测模型

跨场景多尺度人群密度估计模型优势：通过多尺度特征融合与跨场景迁移，实现不同环境下的人群密度精准统计，通用性强。局限：聚焦宏观数量估算，缺乏个体行为细节分析，计算成本较高。基于时空相关性的域适应人群深度特征表示模型优势：融合时空动态特征与域适应技术，擅长捕捉群体行为模式并跨场景迁移应用。局限：个体动作分辨率不足，对长程时序依赖和极端场景变化的适应性较弱。基于时空特征的人局部异常行为检测模型优势：利用时空注意力聚焦个体局部特征，对摔倒、暴力等异常动作的实时定位精度高。局限：缺乏全局场景理解，对新型异常模式泛化能力差，多目标交互时易误检。

五、人群行为定位模型的定位精度与误差分析

（一）跨场景多尺度的复杂人群密度估计模型

定位精度：在主流数据集（如 ShanghaiTech、UCF-QN-RF）上，平均绝对误差（MAE）为 82.4 - 98.7，均方误差（MSE）为 159.7 - 334.7。引入多尺度注意力机制后，小目标检测精度提升 30%，误检率降低 15 - 20%。主要误差源于目标粘连（密集区域像素重叠导致计数偏差）和尺度敏感性（极端尺度变化贡献约 35% 误差）。

（二）基于时空相关性的域适应人群深度特征表示模型

定位精度：跨场景域适应后定位精度提升 12 - 18%（如地铁站到机场场景），多传感器融合下定位误差达亚米级（0.8m， $\sigma=0.32m$ ）。域偏移（场景差异导致特征分布偏移）和时空失配（动态场景时序异步引发 15 - 20% 轨迹断点）是核心误差源。小样本过拟合使定位波动增加 30%，需通过流形学习和黎曼几何分析抑制分布偏移。

（三）基于时空特征的人局部异常行为检测模型

定位精度：在 UCSD 等数据集上异常检测 F1 值达 85.7 - 92.3%，基于骨架的 GCN 模型关节级定位准确率 94.2%。行为边界模糊（快速动作或遮挡导致 30% 边界偏差）和环境干扰（光照变化与遮挡引发 12% 关键点丢失）是主要挑战。个体行为差异使模型置信度波动 $\pm 18\%$ ，需结合滑动窗口和多模态融合优化。

平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE)：预测总人数与实际总人数之差的绝对值的平均值。均方误差 (Mean Squared Error, MSE)：预测总人数与实际总人数之差的平方的平均值。F1 分数 (F1 Score)：精确率和召回率的调和平均数。基于图结构的卷积网络 (Graph Convolutional Network, GCN)：处理关节拓扑关系（如人体骨架）。 σ (Sigma, 标准差)：描述误差离散程度。

表2 检测模型综合对比与对比与优化方向

模型类型	优势	典型精度 / 误差范围	误差改进方向
多尺度密度估计	高密度场景适应性	MAE 82.4 - 98.7; F1 71.2%	抑制粘连、增强尺度鲁棒性
时空域适应特征表示	跨场景泛化能力	定位误差 0.8m; 泛化误差 \downarrow 23.6%	优化域偏移补偿、时序同步
局部异常行为检测	细粒度关节级定位	F1 85.7 - 92.3%; 误报率 5.1 - 8.3%	多模态融合、边界精细化

六、总结

本文围绕复杂视频场景的人群行为分析方法、常见检测手段和方法、主要存在的问题，研究基于深度特征的人群行为检测和定位模型，研究方法从人群计数及密度估计、人群全局异常检测

及人群局部异常行为检测和定位三个角度提出解决方案，总结分析了跨场景多尺度人群密度估计模型、基于时空相关性的域适应人群深度特征表示模型、基于时空特征的人局部异常行为检测模型这3种人群行为定位模型的定位精度和误差，综合对比后给出应用场景建议，为进一步探索人群行为分析提供了重要研究基础。

参考文献

-
- [1] Wang, C., Zhang, H., Yang, L., Liu, S., Cao, X., Deep people counting in extremely dense crowds[J]. in Proceedings of the 23rd ACM international conference on Multi-media, 2015:1299–1302.
 - [2] 卢博文. 基于深度学习的监控视频中的异常行为的检测算法研究 [D]. 南京邮电大学, 2020.DOI:10.27251/d.cnki.gnjdc.2020.000865.
 - [3] 徐涛, 田崇阳, 刘才华. 基于深度学习的人群异常行为检测综述 [J]. 计算机科学, 2021, 48(09): 125–134.
 - [4] 亢洁, 田野, 杨刚. 基于改进 SSD 的人群异常行为检测算法研究 [J]. 红外技术, 2022, 44(12): 1316–1323.
 - [5] 葛文超, 魏超, 王玉涛, 鲁迎春, 易茂祥. 基于潜在空间矩阵的半监督异常检测 [J]. 计算机应用研究. 2020.37(S2):318–320.
 - [6] Yuan, Y., J. Fang, and Q. Wang, Online anomaly detection in crowd scenes via structure analysis[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2015. 45(3): 548–561.
 - [7] Zhang X, Zhang Q, Hu S, et al. Energy level-based abnormal crowd behavior detection[J]. Sensors, 2018, 18(2): 423.
 - [8] 蔡瑞初, 谢伟浩, 郝志峰等. 基于多尺度时间递归神经网络的人群异常检测 [J]. 软件学报, 2015, 26(11): 2884–2896.
 - [9] 罗朝阳. 基于深度学习的人体异常行为识别算法研究 [D]. 陕西理工大学, 2021.DOI:10.27733/d.cnki.gsxlg.2021.000168.
 - [10] 鱼春燕, 徐岩, 缙丽莎, 等. 基于单列深度时空卷积神经网络的人群计数 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(8): 143–151.

大数据驱动下建设工程装饰成本动态预测 与优化决策研究

石镇尧

广东工业大学龙洞校区, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ASDS.2025050017

摘要： 本研究聚焦于大数据技术驱动下建设工程装饰成本的动态预测与优化决策, 通过多源异构数据融合, 构建成本动态预测模型, 并结合机器学习和优化算法, 形成智能决策支持系统, 实现对成本变化的准确预测和科学调控。将专家知识和数据驱动相结合, 提高预测精度和实用性。研究成果对我国装饰装修工程成本控制精细化、资源配置效率具有重要意义, 对推动我国装饰装修工程管理向数字化转型和智能化发展具有重要意义。本文为装饰工程成本管理提供了理论支撑与技术路径, 具有重要的学术价值和工程应用意义。

关键词： 大数据; 装饰工程; 成本动态预测; 优化决策

Research on Dynamic Prediction and Optimization Decision-making of Construction Decoration Costs Driven by Big Data

Shi Zhenyao

Longdong Campus, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： This study focuses on the dynamic prediction and optimal decision-making of construction project decoration costs driven by big data technology. By integrating multi-source heterogeneous data, a dynamic cost prediction model is constructed. Combined with machine learning and optimization algorithms, an intelligent decision support system is formed to accurately predict cost changes and scientifically regulate them. The integration of expert knowledge and data-driven approaches enhances prediction accuracy and practicality. The research results are of great significance for the refinement of cost control and improvement of resource allocation efficiency in China's decoration and renovation projects, and are crucial for promoting the digital transformation and intelligent development of decoration and renovation project management in China. This paper provides theoretical support and technical paths for the cost management of decoration projects, and has important academic and engineering application value.

Keywords： big data; decoration project; dynamic cost prediction; optimal decision-making

引言

在建设工程装饰阶段, 成本控制始终是影响项目效益的关键因素。传统的成本管理方法大多依赖于经验判断和静态预算, 很难有效地应对材料价格、人工成本和设计调整等动态因素, 导致工程成本超支和资源浪费频繁发生。在大数据的推动下, 基于数据驱动的装饰工程成本动态预测和优化决策模式逐渐成为装饰工程造价管理水平提升的重要途径。通过对历史工程数据、市场行情、施工进度等多源数据的深度挖掘与建模分析, 不仅可以实时感知和预测成本变化趋势, 还可以为管理人员提供最优决策支持。该研究对促进我国装饰工程管理向数字化、精细化方向发展, 提高工程经济效益和资源配置效率, 具有重要的理论意义和现实意义。

一、建设工程装饰成本构成与动态变化特征分析

(一) 装饰工程成本构成分析

装饰工程作为建设工程的收尾环节, 其成本构成具有多样性

与分散性。人工成本作为工程成本的核心内容, 受到建设周期、劳动力市场波动、施工技术复杂性等因素的影响; 材料成本受装修设计、市场行情波动和材料损失率等因素的影响较大, 特别是高档精装修工程^[1]。机械使用费主要用于建造工程设备的租

用、运输和运行费用，虽然其所占比例不大，但是对大型工程来说却是不可忽视的。另外，间接费用，如工程管理费用，工地现场安装费用，质量安全保障费用等，都会影响到整个装修工程的成本。现代装修工程成本构成呈现集约化、精细化的发展趋势，各成本间具有高度耦合性，需要采用系统的分析方法对其结构特性进行科学辨识和度量，为后续动态成本预测和控制策略的制定提供支撑。

（二）成本动态变化的主要影响因素

建筑装饰工程成本在施工过程中呈现出明显的动态特征，其变化受到多种因素的影响。在原材料市场波动和国际供应链动荡的背景下，石材、木制品、金属构件等装饰材料的价格波动很容易受到宏观经济和政策调控的影响^[2]。劳动力成本受人力资源供求关系、区域工资差异和施工组织效率的影响，呈现出阶段性和区域性波动的特点。设计变更也是一个不可忽略的影响源，设计变更往往会伴随着额外的材料投入和建设周期的延长，从而导致成本上升。另外，工程管理水平、施工场地状况、气候环境和政策等外部因素也会对工程造价产生动态扰动。上述因素共同构成装饰工程成本变动的复杂机制，需采用多维度数据收集和建模分析方法，对装修工程成本变化机理进行系统性辨识，构建和优化动态造价预测模型。

（三）装饰工程成本变化的时序与空间特征

装饰工程成本在时间维度上呈现阶段性波动的特点，并且往往与工程进度紧密相关。在项目的初期，主要是进行前期准备和场地布置，因此，在成本方面的投入比较少。随着建设的深入，人工、材料和设备的投入也越来越大，到了高峰期之后，成本就会快速地积累起来，直到最后阶段的规模缩小，才会趋于稳定^[3]。同时，不同类型的装修操作之间存在着一定的时序交叉关系，局部的变化也会引发成本的连锁调整。从空间维度来看，装修成本受区域经济差异、原材料来源、交通运输状况和当地政策等因素的影响，呈现出显著的地域异质性。比如，在劳动力成本、材料采购成本和施工组织效率等方面，一、二线城市和中西部地区有很大的不同，从而造成单位面积成本的空间分布差异^[4]。此外，由于施工过程的复杂性和材料使用的差异，装修工程不同部位（墙面、顶棚、地面和特殊装修节点）也呈现出空间层次的成本波动特性。

二、大数据在装饰工程成本管理中的应用机制分析

（一）多源异构数据融合机制

装饰工程成本管理涉及到设计、采购、施工、财务等各个环节，会产生海量异构的数据资源，包括结构化预算清单、合同条款、供应商报价、半结构化设计图、施工方案等，以及现场视频、文字记录等。大数据技术利用数据整合平台，对异构数据进行统一收集、清洗和格式化，建立多维度、高时效性的数据仓库体系。通过 ETL 技术与数据中台框架，集成 BIM、ERP、项目管理、物联网传感等多个系统的数据，为项目成本分析提供全面、真实的数据支持^[5]。通过动态集成工期、材料消耗和人工投入等关键指标，自动识别潜在的成本风险点，使其由传统的静态数据收集向实时数据驱动的管理模式转变^[6]。多源异构数据融合机制的高效运行，将为装饰工程成本预测分析和决策优化提供可靠的数据支撑，显著提高装修工程成本管理的准确性和响应速度。

（二）成本动态预测模型构建机制

依托大数据分析技术，构建基于历史样本学习的装修工程成本动态预测模型，实现装修工程全过程造价演变趋势及关键影响因素的识别。该机制以数据挖掘、机器学习及时序建模为核心，结合回归分析、支持向量机、神经网络等算法，对历史工程案例、市场价格波动、施工进度偏差等变量进行训练和建模，生成具有较高预测精度和较好解释性的成本变化曲线^[7]。通过利用滑动窗和动态权重机制提高模型对阶段变化的敏感性，实现对突发设计变化、材料价格上涨、施工效率波动等非线性因素的适应性。项目管理人员可以根据模型输出的动态费用预测结果，对各个施工节点进行预算预警和风险提示，有效避免资金分配不当和成本失控等问题。这一机制有助于提高工程成本预测的智能化程度，实现成本控制由事后核算向事前干预和过程调控转变，大大提高工程资源配置效率和资金使用安全。

（三）决策支持与优化反馈机制

在大数据驱动下，建立有效的决策支持和最优反馈机制是闭环管理的关键。利用可视化分析平台与决策引擎，实现实时采集与预测分析结果的可视化表达，方便管理层对当前成本状况、变化趋势及风险预警信息的及时掌握。基于多目标优化算法，对施工过程、材料采购、人员调配等多维因素进行综合分析，在满足约束条件下，给出成本优化方案，辅助决策者做出科学调整^[8]。在实施过程中，系统根据实时反馈的现场数据和计划偏差信息，对预测模型参数和优化策略进行实时修正，实现成本管理策略的动态迭代和闭环优化。实现对决策实施效果的定量评价，提炼典型案例，形成知识库，不断提高模型的智能化程度和决策质量。这一机制使得装饰工程成本控制实现了从静态反映到动态调节的转变，大大提高了工程成本管理的科学性、灵活性和智能化水平。

三、建设工程装饰成本的动态预测路径研究

（一）智能化数据采集与实时监控体系构建

建筑装饰工程成本的动态预测离不开高质量的实时数据支持，智能化的数据采集和监测系统是其基础保障。通过将物联网传感设备、移动终端和 BIM 技术相结合，实现对现场物料、人员投入、设备运行和施工进度的多维度实时监测。通过传感器及 RFID 标签自动获取物料流动及存货情况，并结合移动终端进行现场输入，实现数据无缝对接。通过 BIM 模型对施工进度、设计变更等信息进行动态更新，形成数字孪生环境^[9]。实时监测平台对多源数据进行融合，通过异常检测和趋势分析等方法，及时发现潜在的成本偏差，为动态预测提供精确的输入。该体系不仅提高了数据的时效性与准确性，而且对成本的动态变化进行了详尽的时空特征描述，大大提高了预测的科学性和快速性。

（二）基于机器学习的多因子动态成本建模

动态预测模型应突破传统线性分析框架，引入先进的机器学习技术，构建多因素集成的模型体系。通过采用随机森林、梯度提升树和深度神经网络等方法，对工程造价进行多维建模。采用长短期记忆网络（LSTM）等结构与时间序列相结合，实现对周期、突发事件的适应性。在模型输入中包含了设计变更频度、材料市场行情、人力调配效率以及施工进度偏差等关键指标，以保证动态响应的全面性与准确性。通过持续引入新的工程数据进行

在线学习，使模型具有自寻优能力，以适应不同工程规模、不同地域的差异，实现个性化、智能化的动态成本预测。

（三）集成优化算法驱动的决策辅助系统

为实现预测结果向实际管理决策的转化，建立集成优化算法驱动的决策辅助系统至关重要。通过利用遗传算法、粒子群等多目标优化算法，动态生成成本控制策略。该系统支持多维方案模拟，定量评价各调整措施对项目总成本及项目进度的影响，有助于管理者科学权衡投入与产出。同时，结合实时反馈机制，根据施工现场的变化，动态调整策略，实现闭环控制。通过智能推荐和风险预警，帮助项目组提前规避超支风险，提高决策的前瞻性、科学性，从而促进我国装饰工程项目管理向数字化、精细化方向发展。

（四）融合专家知识与数据驱动的混合预测模式

为克服单一数据驱动模型解释能力不足、灵活性差的问题，融合专家经验知识和数据驱动分析相结合的混合预测模式已成为一种发展趋势。通过引入知识图谱和规则库，将装饰工程管理领域的行业规范、经验法则与机器学习模型结果相结合，提高预测结果的逻辑合理性与可操作性^[10]。通过结合数据模型的输出结果，建立了多层次、多维度的成本动态评价框架。该模型支持复杂场景的深度解析，提高系统对突发事件和不确定性的适应性。该方法实现了知识与数据的优势互补，为动态预测提供了更加全面和稳健的决策基础，推动装饰工程成本管理的智能化和科学化进程。

四、工程实践案例分析

（一）工程概况

某金融中心北塔装修总建筑面积约为18万平方米，其中办公用房、商业用房和公共场所的装修总金额为6.8亿元。超高层建筑装修工程造价管理面临着材料品种多（进口石材、定制金属件等高端材料）、施工过程复杂（涉及机电消防等多个专业）、工期紧（仅14个月有效工期）。在项目开始阶段，由于2021年全球供应链危机，进口原材料价格波动超过30%，人工成本上涨20%，导致设计变更12次，导致中期成本偏差达到15%。项目组在2022年3月引入大数据驱动的动态造价预测系统，将BIM模型、ERP系统和物联网设备等8种数据源进行整合，涵盖了材料采购、劳务考勤、进度管理等各个环节，每天处理的数据量超过50万条，为后续的动态预测和优化决策奠定了坚实的基础。

（二）具体实施过程

项目实施分三个阶段推进大数据应用。在数据集成阶段，部

署RFID物料跟踪系统和智能工牌，实现对56类主要材料进场消耗数据和800多人工时效率的实时采集；将BIM设计变更记录 and 供应商报价数据库相结合，构建包含原材料价格指数、劳动效率、变化频率等28个特征因素的数据库。在模型建立阶段，使用XGBoost算法构建成本动态预测模型，选取华南地区12个同类工程项目的3个月数据作为滑动窗口，训练集的精度达到91.7%。在决策优化阶段，开发可视化看板系统，结合遗传算法，实现材料采购批次、施工班组调配等多目标优化；针对进口石材价格上涨风险，提前3个月启动替代材料预案，实现吊顶、墙面施工顺序的动态调整，节省工期23天。在实施过程中，累计触发了137次预警，提出了49个优化方案，将关键决策的响应时间压缩到了4个小时以内。

（三）效果评估

通过第三方审计评估，项目在应用大数据动态预测系统后取得了明显的效果。在成本控制上，竣工结算费用偏差率由15%下降到3.2%，材料差价预警机制和闲置机器共享平台分别节省3200万元和450万元的设备费用。在工期管理方面，进度预测精度提高到89%，比原定计划提前38天完成。在质量安全方面，通过对生产过程进行追溯，使产品一次验收合格率达98%，比同行业平均水平高出12个百分点。这套系统形成的知识基础中，沉淀出127条成本控制规则。案例表明，大数据可有效应对装修工程动态复杂问题，被中国建筑业协会评为2023年度示范案例，并将其经验写入建筑工程数字化成本管理规程。

五、结语

本文系统探讨了大数据技术在建设工程装饰成本动态预测与优化决策中的应用，构建了基于多源异构数据融合与机器学习算法的成本预测模型，完善了集成优化算法驱动的决策支持体系，实现了成本管理的智能化和动态化。研究表明，融合专家知识和数据驱动相结合的方法，可以有效提高项目成本预测的精度和自适应能力，显著提高工程造价控制的科学性与灵活性。工程实践表明，该方法对提高成本控制精度，优化资源配置，推动数字化转型具有重要意义。未来，应进一步深化大数据与人工智能技术的融合，发展实时数据处理能力与自适应决策算法，加强跨域数据共享与协同，提升装修工程造价管理智能化决策水平，为建筑业绿色、可持续发展奠定坚实的基础。

参考文献

- [1] 陈赛. 大数据赋能工程造价市场化建设的优化路径研究 [J]. 市场周刊, 2024, 37(17): 92-95.
- [2] 战鹏宇. G公司EPC总承包项目成本控制研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2020.
- [3] 赵辉. 基于OPM3改进模型的装饰工程成本控制研究 [D]. 东北财经大学, 2020.
- [4] 裴世期. 装饰装修工程造价管理及成本控制研究 [J]. 建材与装饰, 2018, (51): 137-138.
- [5] 全毅力. 建筑装饰工程施工成本核算思考 [J]. 合作经济与科技, 2017, (13): 122-123.
- [6] 颜和平, 胡友良, 向明. 装配式建设工程与传统建设工程成本对比研究 [J]. 建筑经济, 2017, 38(06): 58-61.
- [7] 柳飞. 浅议我国建筑工程中的装饰装修造价控制与管理 [J]. 中小企业管理与科技 (中旬刊), 2017, (03): 78-79.
- [8] 周勇. 室内装饰工程施工阶段实际成本控制的主要措施 [J]. 门窗, 2015, (08): 194.
- [9] 杨靖虹, 连旭珍. 建筑装饰施工项目成本控制探讨 [J]. 江西建材, 2014, (09): 246.
- [10] 黄飞. 装饰工程实施各阶段中的成本控制 [J]. 现代经济信息, 2012, (11): 126.

对高速公路行程中主线门架交易数据缺失的分析与思考

龚佑民

广东联合电子服务股份有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ASDS.2025050018

摘 要 : 车辆通行高速公路, 无论经过几条高速公路, 只需通过安装在车辆上的 OBU 或入口领取一张 CPC 卡作为通行介质, 便可完成一次通行。目前我省 CPC 卡使用率约占高速公路通行量的三分之一, 因此对于使用 CPC 卡的车辆在高速公路出口完成交费后, 途经各条高速是否均会获得相应的通行费收入, 这是高速公路运营单位十分关心的问题。广东联合电子服务股份有限公司作为广东省收费公路联网收费结算中心, 承担着我省高速公路通行费清分结算工作, 并向省内各高速公路运营单位开放提供其收益相关的拆分结算明细数据, 这有利于高速公路运营单位通过这些数据发现各种异常情况以及管理中可能存在的问题^[1]。本文通过对一些经过筛选的 CPC 卡以及对应的车辆行程等重要数据分别进行多维度分析, 以此来确定车辆行驶时未产生主线门架交易数据的异常原因。

关 键 词 : 高速公路; 通行费; 通行介质; CPC 卡; 门架交易数据; 清分结算

Analysis and Reflection on the Missing Transaction Data of Mainline Gantries in Highway Trips

Gong Youmin

Guangdong United Electronic Services Joint Stock Co., Ltd. Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : When vehicles travel on expressways, regardless of the number of expressways they pass through, they can complete a trip by using an On-Board Unit (OBU) installed in the vehicle or obtaining a Composite Pass Card (CPC card) at the entrance as the passage medium. Currently, CPC cards account for approximately one-third of the traffic volume on expressways in our province. Therefore, whether expressway operation and management units can obtain corresponding toll revenue for each expressway section traversed by vehicles using CPC cards after completing payment at the expressway exit is a matter of great concern to these units. As the toll road network charging and settlement center in Guangdong Province, Guangdong United Electronic Services Joint Stock Co., Ltd. undertakes the clearing and settlement of expressway tolls in the province and provides open access to detailed split settlement data related to the revenue of each expressway operation unit. This helps these units identify various anomalies and potential management issues through the data. Taking the Guangming Expressway as an example, this paper conducts multi-dimensional analyses of key data such as CPC cards and corresponding vehicle trips to determine the abnormal causes of missing mainline gantry transaction data during vehicle travel.

Keywords : expressway; toll fee; passage medium; CPC card; gantry transaction data; clearing and settlement

引言

在高速公路实行全国联网收费后, 从出口收费到每条高速获得相应通行费, 中间过程非常复杂。根据交通运输部路网监测与应急处置中心 (以下简称部路网中心) 发布的《收费公路联网收费运营和服务规则 (2020)》, 《收费公路联网收费运营和服务规程 (2020)》, 《费显和清分结算系统优化工程数据传输接口规范 (V1.1-4.4)》等, 部路网中心明确了 CPC 卡的管理、持有 CPC 卡车辆形成 ETC 门架交易流水的要求、以及出口收费规则和拆分结算规则等^[2]。但实际上, CPC 卡、ETC 门架系统难免会出现一些异常情况, 而这些异常会增加高速公路运营单位 (以下统称路段) 通行费损失的概率。目前, 全国只有广东省联网收费结算中心 (以下简称省中心) 为全省路段提供拆分结算明细数据, 并与路段定期开展通行费专项校核工作。

有路段反映, 在 2024 年 12 月, 出现一些持有 CPC 卡车辆经过其高速但未获得相应通行费收益的异常情况。作者通过对该路段 (以下统称 A 路段) 提供的通行明细数据进行进一步核实, 发现这些通行介质为 CPC 卡的车辆行程都没有主线门架交易数据, 且出入口收

费站均不属于 A 路段。根据联网收费运营的相关规则，A 路段确实无法获得相应通行费收益。由于并不是所有通行介质为 CPC 卡的车辆经过 A 路段时均未产生主线门架交易数据，因此作者仅从 CPC 卡是否异常和车主是否有意屏蔽 CPC 卡两方面开展分析。

根据 A 路段提供的通行明细数据，作者根据帕累托原则筛选出 8 张 CPC 卡，再从省中心数据库中调取这 8 张 CPC 卡对应车辆行程等信息进行定量和定性分析，最后认为主要是由于 CPC 卡自身异常导致在经过 A 路段时没有产生门架交易数据。同时，希望通过本次数据分析能促进我省的 CPC 卡管理，促使路段更加重视门架系统的维护管理，减少通行费损失的概率。

由于省中心仅有本省数据，因此 8 张 CPC 卡的使用数据仅限于本省，对应 8 辆车的行程也仅限于本省。

根据 2024 年数据，我省高速公路平均每天出口车流量约为 720 万，其中通行介质为 CPC 卡的车流量约为 260 万，占比约 36%。因此车主使用 CPC 卡通行高速时，路段如没有获得相应通行费收入应当引起重视。

近期，A 路段反映，经与省中心提供的拆分结算明细数据核对，在 2024 年 12 月，有通行介质为 CPC 卡的车辆经过 A 路段时，没有产生门架交易数据^[3]，最终导致通行费损失的情况，并提供一批通行明细数据，包括 CPC 卡号、对应出口流水号、车牌等。经作者分析发现这批数据具备以下几个特征：车辆通行介质为 CPC 卡、只有上下匝道承载门架交易数据、无主线门架交易数据。作者发现，由于并不是所有通行介质为 CPC 卡的车辆经过 A 路段时均未产生主线门架交易数据，基于多年通行费校核经验，作者认为有必要将 A 路段提供的这些数据进行深度分析和挖掘，并从 CPC 卡是否异常和车主是否有意屏蔽 CPC 卡两方面开展分析，找到车辆经过 A 路段但没有主线门架交易数据的真正原因。

一、确定数据分析样本

为高效解决核心问题，根据帕累托原则，作者按以下方法筛选出重点数据，然后分别开展定量和定性分析。

（一）数据来源

以 A 路段提供的通行明细数据为来源，选取每条流水明细信息所包含的 CPC 卡号、以及对应的车牌信息进行下一步分析。

（二）CPC 卡的时间范围

其对应出口流水时间在 2024 年 12 月 1 日 -31 日。

（三）CPC 卡的空间范围

入高速和出高速收费站均为广东省路段。

（四）确定所需明细数据信息

1. 在数据库中按 CPC 卡号找到其对应的所有行程信息，包括通行 ID、路段国标编码、路段名、收费单元国标编码、门架计费时间等关键信息，一条通行 ID 对应一次行程。

2. 对每张 CPC 卡行程次数进行汇总并排序，取总行程次数最多的 8 张卡作为分析样本，同时关联当次行程（A 路段提供的车辆行程作为当次行程）的 8 辆车车牌也作为分析样本。

3. 在数据库中根据 8 辆车车牌找到相邻行程，将早于且最接近当次行程视为上次行程，晚于且最接近当次行程视为下次行程，且每次行程需包括带入口和出口信息的详细交易数据。

（五）确定分析样本

8 张 CPC 卡以及 8 辆车。

具体如表一：

表一

序号	CPC 卡卡号	总行程次数	车牌
1	*1020161001089**	27	粤 *24U**
2	*1010163001280**	22	粤 *8MM**
3	*5010161002476**	22	粤 *988**
4	*4010192003001**	20	粤 *H0J**
5	*3010172000797**	12	粤 *8YX**
6	*1010161002998**	12	苏 *56F**

7	*4010204006983**	12	粤 *3S8**
8	*6010161000800**	10	粤 *C3W**

备注：基于数据保密和车主隐私考虑，对 CPC 卡的卡号及车牌号码进行脱敏处理。

二、对 8 张 CPC 卡样本的行程开展定量分析

（一）明确分析目标

以 8 张 CPC 卡样本的行程为分析目标，通过分析无主线门架交易数据行程次数占总行程次数的比例，来确定 CPC 卡存在问题的概率^[4]。

（二）界定数据范围

对每一张 CPC 卡在 2024 年 12 月每次行程的门架交易数据进行整理，并根据是否有主线门架交易数据进行分类。考虑到数据分析的完整性，本次分析在取数时必须要有完整的上下匝道门架交易数据，同时剔除外省上或下高速的情况。

（三）选择分析方法

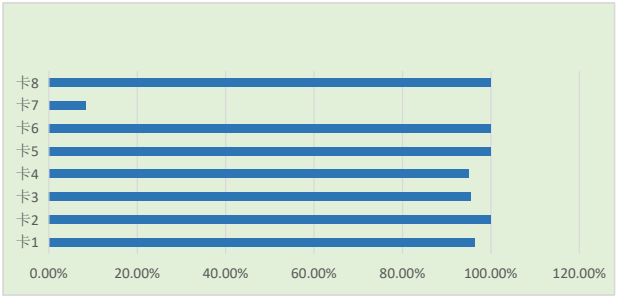
此次分析采用对大量明细数据进行分类汇总和对比，结果如下表：

表二

序号	卡号	总行程次数 (A)	无主线门架交易数据行程次数 (B)	有主线门架交易数据行程次数 (C)	占比 (D=B/A)
1	*1020161001089**	27	26	1	96.30%
2	*1010163001280**	22	22	0	100.00%
3	*5010161002476**	22	21	1	95.45%
4	*4010192003001**	20	19	1	95.00%
5	*3010172000797**	12	12	0	100.00%
6	*1010161002998**	12	12	0	100.00%
7	*4010204006983**	12	1	11	8.33%
8	*6010161000800**	10	10	0	100.00%

备注：由于全国联网收费运营对门架设置有具体要求，因此无主线门架交易数据不排除车辆途径路段确实无门架的特殊实际情况。

将每一张 CPC 卡通行出现的无主线门架交易数据行程次数占
总行程次数比例表示如下：



图一

图表数据解读：

1.CPC 卡对应总行程次数为 A，每张 CPC 卡的总行程次数分别用 A1、A2、A3、A4、A5、A6、A7、A8 表示。

2. 按是否有主线门架交易数据进行分类，无主线门架交易数据行程次数用 B 表示；有主线门架交易数据行程次数用 C 表示。

（1）每张 CPC 卡无主线门架交易数据行程次数分别用 B1、B2、B3、B4、B5、B6、B7、B8 表示^[6]；

（2）每张 CPC 卡有主线门架交易数据行程次数分别用 C1、C2、C3、C4、C5、C6、C7、C8 表示。

3. 无主线门架交易数据行程次数占总行程次数的比例为 D，每张 CPC 卡的该比例分别用 D1、D2、D3、D4、D5、D6、D7、D8 表示。

4. 从表二可以看出：

$$\begin{cases} 10 \leq A_i < 20, \forall i \in \{5,6,7,8\}, \\ 20 \leq A_j < 30, \forall j \in \{1,2,3,4\} \end{cases}$$

$$\begin{cases} 0 \leq B_7 < 10 \\ 10 \leq B_i < 20, \forall i \in \{4,5,6,8\} \\ 20 \leq B_j < 30, \forall j \in \{1,2,3\} \end{cases}$$

$$\begin{cases} 0 \leq C_i < 10, \forall i \in \{1,2,3,4,5,6,8\} \\ 10 \leq C_7 < 11 \end{cases}$$

$$\begin{cases} 0 \leq D_7 < 95\% \\ 95\% \leq D_i < 100\%, \forall i \in \{1,3,4\} \\ D_i = 100\%, \forall i \in \{2,5,5,8\} \end{cases}$$

以上8张 CPC 卡样本的数据显示，其中有7张 CPC 卡的无主线门架交易数据行程次数占总行程次数的比例超过95%，因此，可判定这7张 CPC 卡存在异常。

三、对8辆车样本的行程进行定性分析

（一）明确分析目标

以8辆车样本的连续三次行程为分析目标，通过分析其是否每次行程均出现无主线交易门架信息，来判断8辆车的车主是否存在估计屏蔽 CPC 卡的可能。

（二）界定范围

从省中心数据库中找到8辆车的上、下次行程的明细数据，并

按照是否有主线门架交易数据进行分类。考虑到数据分析的完整性，本次分析在取数时必须要有完整的上下匝道门架交易数据，同时剔除外省上或下高速的情况。

（三）选择分析方法

1. 将8辆车的连续3次行程进行分类如下：

表三

序号	车牌	上一次行程是否有主线门架交易数据	本次行程是否有主线门架交易数据	下一次行程是否有主线门架交易数据
1	粤 *24U**	无主线门架交易数据	无主线门架交易数据	无主线门架交易数据
2	粤 *8MM**	有主线门架交易数据	无主线门架交易数据	有主线门架交易数据
3	粤 *988**	有主线门架交易数据	无主线门架交易数据	有主线门架交易数据
4	粤 *H0J**	有主线门架交易数据	无主线门架交易数据	有主线门架交易数据
5	粤 *8YX**	有主线门架交易数据	无主线门架交易数据	有主线门架交易数据
6	苏 *56F**	无主线门架交易数据	无主线门架交易数据	有主线门架交易数据
7	粤 *3S8**	有主线门架交易数据	无主线门架交易数据	无主线门架交易数据
8	粤 *C3W**	无主线门架交易数据	无主线门架交易数据	有主线门架交易数据

从以上统计可以分为三大类：

- （1）第一类：1辆车连续3次行程无主线门架交易数据；
- （2）第二类：3辆车连续2次行程无主线门架交易数据；
- （3）第三类：4辆车仅1次行程无主线门架交易数据。

结合以上统计，第三类包含的4辆车车主故意屏蔽 CPC 卡信息的概率较小，下面重点分析第一类和第二类共4辆车的行程。

2. 将表三中第一类和第二类无主线门架交易数据的行程，按照出口交易数据还原路径如下：

表四

分类	车牌	上一次行程路径	本次行程路径	下一次行程路径
第一类	粤 *24U**	B 路段（1）-B 路段（2）	F 路段（6）-C 路段-B 路段（2）	B 路段（2）-B 路段（4）
第二类	苏 *56F**	B 路段（3）-C 路段-E 路段（8）	E 路段（8）-C 路段-B 路段（3）	
第二类	粤 *3S8**		F 路段（6）-C 路段-B 路段（3）	B 路段（3）-D 路段（5）
第二类	粤 *C3W**	F 路段（7）-C 路段-B 路段（3）	B 路段（3）-C 路段-E 路段（9）	

备注：出于对数据保密要求和车主隐私考虑，对途经的路段名分别用字母表示，入口和出口收费站用数字表示，相同的字母表示同一路段，相同数字表示同意收费站。

表四共涉及到5个路段^[6]，9个收费站。为了更加直观，将包括以上5个路段和9个收费站用简易路径图示意如下：



图二

据了解，B 路段目前正在扩建，其主线门架已于 2024 年 8 月下旬开始停用，预计三年扩建完成后恢复使用，因此扩建期间内任何车辆持有通行介质经过 B 路段时，均不会有门架交易数据。因此，粤*24U** 的上下两次行程无主线门架交易数据属于正常现象。

为便于了解 B 路段扩建对车辆行程的影响，作者对 B 路段 2024 年 7 月 -12 月的日均路网车流进行统计^[7]如下：

表五

所属年月	日均路网车流	当月较 7 月份车流 减少数量	当月较 7 月份车流 下降比例
2024 年 7 月	11.66 万辆	—	—
2024 年 8 月	11.02 万辆	0.64 万辆	5.49%
2024 年 9 月	8.96 万辆	2.7 万辆	23.16%
2024 年 10 月	7.42 万辆	4.24 万辆	36.36%
2024 年 11 月	8.81 万辆	2.85 万辆	24.44%
2024 年 12 月	8.81 万辆	2.85 万辆	24.44%

可以看出，B 路段 12 月较 7 月的日均路网车流下降了 24.44%，说明 B 路段扩建对其路网车流的影响非常大，也说明扩建后其通行效率大大降低，拥堵较为严重。而作为分析样本，8 辆车的本次行程无主线门架交易数据的特情均发生在 2024 年 12 月期间，因此，车主为了避开 B 路段的拥堵，绕道其他高速符合正常逻辑^[8]。

结合 B 路段扩建期间拥堵情况以及 8 辆车的三次行程，作者认为车主故意屏蔽 CPC 卡的可能性几乎不存在。

四、数据分析结果产生原因以及建议

经过以 A 路段为例对 CPC 卡和车辆行程等一系列分析，作者认为：

1.8 辆车的车主在收费站入口领取 CPC 卡后故意屏蔽 CPC 卡的可能性极小，CPC 卡本身存在问题的可能性极大。

2. 不是所有通行介质为 CPC 卡的车辆经过 A 路段时均未产生主线门架交易数据，因而本文中 CPC 卡本身存在异常的可能性极大。

3.8 张 CPC 卡中仅有 7 张 CPC 卡存在异常的可能性较大，因而 A 路段主线门架也存在个别门架不灵敏的情况。

4.A 路段的主线门架中存在个别门架不灵敏的情况，当 CPC 卡存在异常时，双重因素导致门架交互出现异常，最终 A 路段未产生相应门架交易数据。按照联网收费运营规则，最终 A 路段产生一定的通行费损失。

5. 当路段扩建时，主线门架一般会停用，建议相邻路段重视自身门架系统运维管理，避免可能发生的通行费损失^[9]。

6. 目前部路网中心的技术规范未强制要求门架系统上体现 CPC 卡的电量，建议从便于 CPC 卡管理的角度出发，全国实施统一要求，同时对 CPC 卡的制作提出更高的技术标准和质量要求。

五、作者的一点思考

本文作者基于对高速公路多年营运管理和数据分析经验，从一些特殊现象着手，对相关数据进行多维度分析。由于我省高速公路路网密集、投资主体多^[10]，在分析过程中无法考虑到更多细节或一些特殊情况，比如我省门架设置更多注重实际、路面扩建会临时停用主线门架等。因此，如需对 CPC 卡是否存在异常进行更加精准的判断，还需要提取更多的数据，需要提供更多的算法，并对数据加以更多次的验证。

从本文分析结果来看，如果 CPC 卡异常，路段扩建时又会停用部分或全部主线门架，对个别路段来说确实存在通行费损失的风险。而我省即将进入高速公路扩建高峰期，因此，作者建议采取各种措施不断提高 ETC 的使用率，既实现提高车辆通行效率的目标，也可减少路段通行费损失概率，最终实现双赢。

参考文献

- [1] 胡果，杜科. 试谈取消省界收费站 ETC 及车牌识别数据应用 [J]. 通讯世界，2020, 27(04): 48-49.
- [2] 杨璐，张素豪，党琳. 高速公路 ETC 专用车道软件设计探究 [J]. 中国交通信息化，2025, (05): 75-78.
- [3] 梁丽娟，袁红叶，何日升，等. 基于门架数据的高速公路稽核平台 [J]. 中国交通信息化，2022, (10): 101-104+108.
- [4] 许德胜. 高速公路匝道自由流预交易系统的设计——泉州南高速公路预交易系统为例 [J]. 运输经理世界，2024, (24): 56-58.
- [5] 陈铃. 基于门架车型识别的智能稽核系统构建 [J]. 中国交通信息化，2024, (S2): 51-54.
- [6] 赵文霞. 交通建设“加速跑”助力高质量发展走上“快车道” [N]. 广东建设报，2024-01-12(004).
- [7] 张航，马宝林，储泽宇，等. 基于数据驱动的快速路合流区加速车道长度的研究 [J]. 重庆交通大学学报（自然科学版），2024, 43(05): 53-60.
- [8] 万华森，陈晶晶，李秀雪，等. 基于分段数据和联合模型的交通流特性分析 [J]. 公路与汽运，2025, 41(03): 18-24+40.
- [9] 安铁兵，宋森，聂静辉，等. 高速公路复合通行卡防作弊方法探究 [J]. 中国交通信息化，2024, (04): 43-45.
- [10] 崔敏，黄丽雅，马衍军. 我国综合交通基础设施投融资现状问题及对策建议 [J]. 中国公路，2022, (22): 16-20.

带 L2 惩罚的张量神经网络模型及其应用研究

向科聿¹, 黄靖翔^{1*}, 于卓熙¹, 孙丛婷²

1. 辽宁大学 数学与统计学院, 辽宁 沈阳 110036

2. 辽宁大学 环境学院, 辽宁 沈阳 110036

DOI:10.61369/ASDS.2025050019

摘 要 : 传统的卷积神经网络由卷积层、池化层、扁平化层和全连接层组成。为了保持原线性结构, 减少过拟合的同时提高模型的泛化能力, 本文在张量链式回归网络层的训练过程中, 添加 L2 惩罚项, 提高模型的泛化性和稳定性, 并将这种方法应用于三个案例研究, 实验结果表明, 加入惩罚项后比没有惩罚项的张量链式网络, 在测试集中均方差 (MSE) 表现更好, 模型的鲁棒性得以提高。最后, 我们将模型应用到用胸部癌症 CT 扫描预测乳腺癌, 结果显示该模型表现出快速的训练速度, 这表明我们提出的方法有效。

关 键 词 : 机器学习; 张量神经网络; 张量 TT 分解; 卷积神经网络; 医疗图像处理

Tensor Neural Network Model with L2 Penalty and Its Application

Xiang Keyu¹, Huang Jingxiang^{1*}, Yu Zhuoxi¹, Sun Congting²

1.School of Mathematics and Statistics, Liaoning University, Shenyang, Liaoning 110036

2.School of Environment, Liaoning University, Shenyang, Liaoning 110036

Abstract : Traditional convolutional neural networks consist of a convolution layer, a pooling layer, a flattening layer, and a fully connected layer. To maintain the original linear structure and reduce overfitting, while enhancing the model's generalization ability, an L2 penalty is added during the training of the tensor chain regression network layer. The results of applying this method to three case studies show that, compared to tensor chain networks without the penalty term, the model with the penalty term performs better in terms of mean squared error (MSE) on the test set, improving its robustness. Finally, we applied the model to predict from chest cancer CT scans, and the breast cancer model demonstrated rapid training speed.

Keywords : machine learning; tensor neural network; tensor TT decomposition; convolutional neural network; medical image processing

引言

在过去的研究中, 数据分析主要关注的是低维数据, 即数据中的特征量较少。然而随着科技的发展, 数据规模逐渐扩大 (Si Y, Zhang Y, Cai Y, et al. 2022^[1]) 学者们逐渐将研究的重心放在高维数据之中。高维数据包含了更多的信息, 更加深入的了解数据集的特征, 发现其中的相关性和潜在特征, 对于提高模型的精度, 减少预测值和真实值之间的误差具有重要意义。例如, 在图像识别领域, 传统的线性分类器只能处理二维图像, 并且还会出现准确率过低, 预测效果较差的情况。对于不同的图像要重新采用特征工程并重新建模。但是, 通过使用深度学习方法, 使用卷积神经网络 (CNN) 通过卷积层处理高维图像数据, 将图像数据转化为神经网络可以学习到的数值特征, 从而实现更准确的图像识别, 如: El Sakka M, Mothe J, Ivanovici M. 2024^[2]。同样, 在自然处理领域, 传统的分类方法只能处理单词频率等简单特征, 如 TF-IDF, 而 Zhang D, Xiao B, Gao C, et al. (2024)^[3] 通过循环神经网络 (RNN), 捕获隐藏神经元, 实现长短时间序列的处理, 这样方法可以处理高维的文本数据。除此之外, 在图像分类中, 例如: An s, Oh T J, Kim S W, et al.^[4] 利用对抗神经网络 (GAN) 也获得了不错的成绩。

虽然高维数据为我们提供了更丰富的信息, 能够让我们深入了解数据集、了解数据集集中的隐藏特征等等。但是, 高维数据也带来了

基金项目: 2023年度国家自然科学基金一般项目“高维张量分位数回归模型及应用研究”(23BTJ063)。

作者简介:

向科聿, 辽宁大学数学与统计学院, 理学学士;

于卓熙, 辽宁大学数学与统计学院, 教授, 博士生导师, 研究方向为回归分析、非参数统计、计量经济、统计学习;

孙丛婷, 辽宁大学环境学院, 教授, 博士生导师, 研究方向为环境与资源统计学。

通讯作者: 黄靖翔, 辽宁大学数学与统计学院, 博士研究生, 研究方向为张量分位数回归, 通讯邮箱: huangjingxiang01@126.com。

一些挑战,如计算资源需求增加,内存、显存的增加,神经网络过度学习参数,在零样本和少样本训练中过拟合风险提高。为了充分利用高维数据的优势,我们需要采用合适的方法来降低数据维度,减少数据参数,提高模型性能。为了解决高维数据带来的问题,人们提出了很多降维的方法,其中 Turchetti C, Falaschetti L (2023)^[6] 利用主成分分析 (Programmable Counter Array) 进行降维、Zhu W, Zhang L, Jiang X, et al. (2024)^[6] 使用线性判别分析 (LDA), Kingeski R, Henning E (2024)^[7] 使用独立成分分析 (ICA), Tomov M, Sadinov S, Arsov B. (2024)^[8] 使用随机森林进行过滤特征 (RF) 等等。

张量作为高阶数据的统称,其受关注的程度在近些年逐渐增加,核心原因在于它的研究不仅仅包含了高维向量和矩阵,还在现实各种领域内有着广泛的应用。例如:音频图、光谱图可以理解为2阶张量,图像可以认为是3阶张量,其中维度对应与长度,宽度和颜色, Li X, Marcus D, Russell J, et al. (2024)^[9] 处理 MRI 图像就是3阶张量的应用,视频也可以被描述为4阶张量,并且大量的多模态信息能够被编译为张量的形式,因此对于张量的研究以及如何将张量应用于现实生活中成为了众多学者们的关注对象。

对于机器学习和神经网络方面,众多学者已经将张量数据引入其中,在此之前,高维向量数据已在这两个领域取得不错的成果。向量作为一阶张量,人们常常将张量展平成向量输入已有的模型之中,包括对多维数据进行清洗,通常采用 PCA, Bagging 等方法对多维数据中的特征进行提取,或者进行主成分分析,找出对模型和需要预测值影响力最大的维度,并进行挑选。目前张量在机器学习中的研究方法依然是将张量张开成向量或矩阵,输入机器学习的模型中,包括利用癌症数据对癌症进行预测,分析影响经济的因素等等。向量和矩阵的分解在数学理论有良好的解释性,人们在证明的模型的时候常常采用矩阵分解,例如 Aboutaleb A, Torabi M, Belzer B, et al.^[10] 矩阵奇异值分解 (SVD) 的应用。在神经网络方面,由于计算机算力的提升以及工业界对数据预测的精准度的提升,神经网络便成为当代工业界和学术界不可替代的一环。其中神经网络包括卷积神经网络 (CNN), 图神经网络 (GNN)、循环神经网络 (RNN)。时间序列与各种神经网络的结合便成为主要的模型,其中包括 Li Z, Li B, Jahng S G, et al. (2024)^[11] 使用 VGG 块, Wang S, Gai K, Zhang S. (2024)^[12] 使用 ResNet 块, Transformer。并且,在神经网络中,向量扮演着不可替代的角色,包括在卷积层,池化层,全连接层等等,这是由于矩阵可以完美的进行运算,并且能够降低运算成本,而且能够完好的识别数据中的信息,然后传递给神经网络,并作为信息进行输入和输出,最后反馈给用户。

在张量的机器学习和神经网络领域,部分学者已经取得了一定的成果。例如: Sidiropoulos N D, De Lathauwer L, Fu X, et al. (2017)^[13] 利用张量分解进行数据挖掘的融合等。在图像处理中,张量的应用更为广泛 (Chen G, Bai J, Ou Z, et al. (2024)^[14], Pashaian M, Seyedin Sz (2024)^[15]) 例如,人脸识别将图像分解和压缩,是三阶张量的应用。在图像识别中,在卷积层中的输入层和激活都使用了三阶张量,在传统的机器学习中, Zhou H, Sarkar R. (2023)^[16] 使用了张量处理分类和回归问题。在神经网络层中, Al Olaimat M, Bozdog S (2024)^[17] 利用神经网络挖掘用户的潜在信息。

对于高维数据我们首先想到的处理方法是降维,张量自然也有其独特的降维方式——张量分解,发展到目前,张量分解的方法已经有好多种: CP 分解、Tucker 分解等等,本文主要采用的是张量链式分解 (Tensor Train decomposition, TT decomposition)。张量链式分解是 SVD 矩阵分解的一种形式,其将高维张量分解为多个低维张量,再反解 SVD 矩阵分解,这样的做法使得张量链式分解保护了原本张量的链式结构,实现了端到端的多模态结构。但是过去的研究中,人们更多的是关注如何通过 CP 分解和 Tucker 分解来解决张量问题,并将这些方法融入深度学习之中,取得了显著的效果。Bharadwaj V, Malik O A, Murray R, et al. (2023)^[18] 利用随机 CP 分解来对分解进行加速; Yuan S, Huang K. (2023)^[19] 利用 CP 分解提高了计算精度; Baghersshahi P, Hosseini R, Moradi H. (2023)^[20] 将 CP 分解融合到图神经网络中 (GNN) 中提高了信息结合的效率; Xiang L, Yin M, Zhang C, et al. (2023)^[21], 将 Tucker 分解引入到卷积神经网络之中,并在 gpu 上实现加速过程。Zhang Y, Zhu Y N, Zhang X. (2024)^[22] 利用 Tucker 分解和压缩实现了高效储存信息。Novikov A, Podoprikhin D, Osokin A, et al. (2015)^[23] 使用 TT 分解,对全连接层采用低秩张量结构,以便用来压缩。Kossaifi J, Lipton Z C, Kolbeinsson A, et al. (2020)^[24] 对 TT 分解进行改良,实现了端到端的网络架构。Liu Y, Chakraborty N, Qin Z S, et al. (2023)^[25] 将张量回归网络在遗传学中提高了模型的精度, Liu Y, Liu J, Long Z, et al. (2023)^[26] 将张量回归网络运用到各个方面。

现如今的研究中,大部分的卷积神经网络都聚焦于对卷积核、池化层进行优化,来提高模型的准确率和减少真实值和预测值之间的误差,如: Zhou Y, Tan K, Shen X, et al. (2024)^[27] 利用扁平层对张量进行压缩,改变了其原有的结构,舍弃大量的线性结构,丢失了多模态信息。由于全连接层需要将张量展平成向量,此时通过全连接层的参数便有了几倍的增长,此时就会有一个不可避免的问题,即: 维度爆炸问题,影响了模型的精度和增加了计算机算力的难度。再加上逐渐增多的数据集和数据样本,如何提高模型的精度,使得模型的预测值尽可能接近原始数据,如何使得模型更加具有泛化性,如何减少错误率,如何减少模型的误差,也是需要考虑的地方。因此,如何提高精准度,如何节省数据资源,减少卷积网络中的参数就成为了要解决的问题。

已有的相关研究中,通常是利用线性回归对数据进行处理,随着数据集规模的不断扩大,参数个数的增多,模型的拟合效果差强人意,这时就需要适当的选择加入惩罚项来提高模型的泛化能力。

本文主要的贡献是采用张量链式回归层 (TTRL) 代替传统卷积网络的扁平层和全连接层,即采用张量链式分解 (TT decomposition) 来分解高维张量,这样保持模型原有的多模态结构,减少由于扁平层张量压缩所带来的过多的参数,并且在原有的张量链式回归层 (TTRL) 基础上,加入 L2 惩罚项,加速模型的训练速度,并且减少模型的过拟合情况,提高模型的泛化性。我们将模型应用于胸部平面 CT 数据集中进行预测,获得了良好的结果。

一、方法与模型介绍

我们现在假设一个张量 $X \in R^{I_0 \times I_1 \times \dots \times I_N}$ ，将此时的张量展开为一个矩阵为 $X_{[n]} \in R^{I_n \times J_n}$ （其中 $I_n = \prod_{k=0, k \neq n}^N I_k$ ），将这个张量做一个映射，将 (i_0, \dots, i_N) 映射到 (i_0, j) ，其中 $j = \sum_{k=1}^N i_k \times \prod_{l=k+1}^N I_l$ 。（Kossaifi J, Lipton Z C, Kolbeinsson A, et al. (2020)^[24]）。

我们假设一个张量， $X \in R^{I_0 \times I_1 \times \dots \times I_N}$ ，和一个矩阵 $M \in R^{R \times I_n}$ ，如果一个 n 维张量的模的大小为 $(I_0 \times \dots \times R \times \dots \times I_N)$ ，之后我们可以将 $X \times_n M$ 表示为 $M X_{[n]} \in R^{I_0 \times \dots \times I_{n-1} \times R \times I_{n+1} \times \dots \times I_N}$ 。

如果张量 $X, Y \in R^{I_0 \times I_1 \times \dots \times I_N}$ ，且具有相同大小的形状，我们可以定义

$$\langle X, Y \rangle = \sum_{i_0=0}^{i_0-1} \sum_{i_1=0}^{i_1-1} \dots \sum_{i_n=0}^{i_n-1} x_{i_0} \dots x_{i_n} y_{i_0} \dots y_{i_n}, \quad (1.1)$$

其中 $X \in R^{I_0 \times I_1 \times \dots \times I_N}$ ， $Y \in R^{I_0 \times I_1 \times \dots \times I_N}$ ，其中 $\langle X, Y \rangle$ 称为广义内积。

（一）张量向量化

张量向量化是张量重塑为不同矩阵的操作，其中有两种矩阵化形式，包括模式矩阵化和顺序矩阵化。模式矩阵化是将第 s 个模式设置为行，然后列举其余的模式。让 $P_{-s} = \prod_{i=1, i \neq s}^d P_i$ ，这时张量 X 被重塑为 P_{-s} -by- P_s 矩阵，用 $[X]_{(s)}$ 来表示其中的元素，其中元素 $X_{i_1 i_2 \dots i_d}$ 被映射为 $[X]_{(s)}$ 中的 (i_s, j) -th 元素，

$$j = 1 + \sum_{k=1, k \neq s}^d (i_k - 1) J_k, J_k = \prod_{l=1, l \neq s}^{k-1} P_l, \quad (1.2)$$

顺序矩阵化是将张量 X 重塑为 $\prod_{i=1}^s P_i$ 矩阵，用 $[X]_s$ 来表示，其中我们行从 1 到 s 进行列举，列从 $s+1$ 到 d 进行列举，其中元素 $X_{i_1 i_2 \dots i_d}$ 被映射为 $[X]_{(s)}$ 中的 (i_s, j) -th 元素，有：

$$i_{s+1} = (i_s - 1) P_1 \dots P_{s-1} + (i_{s-1} - 1) P_1 \dots P_{s-2} + \dots + i_1. \quad (1.3)$$

$$j = (i_d - 1) P_{s+1} \dots P_{d-1} + \dots + i_{s+1}. \quad (1.4)$$

（二）张量链式分解

张量链式分解与 Tucker 分解一样稳定，同时可以像 CP 分解一样压缩空间。我们假设一个张量 $X \in R^{P_1 \times P_2 \times \dots \times P_d}$ ，能分解为：

$$X_{i_1 i_2 \dots i_d} = G_1(i_1) G_2(i_2) \dots G_{d-1}(i_{d-1}) G_d(i_d), \quad (1.5)$$

其中 G_k 是 $r_{k-1} \times r_k$ 的矩阵， $1 \leq k \leq d$ ， $r_0 = r_d = 1$ 。

当 $2 \leq k \leq d-1$ ，我们将这些矩阵 $G_k(i_k)$ 叠加为一个张量 $G_k \in R^{r_{k-1} \times P_k \times r_k}$ ，这样可以定义 $[G_k]_{(3)} = (G_k^1(1), \dots, G_k^1(P_k))$ 。

此外，我们令 $G_1 = G_1^T(1) \dots G_1^T(P_1)^T \in R^{P_1 \times r_1}$ ，和 $G_d = G_d^T(1) \dots G_d^T(P_d)^T \in R^{P_d \times r_{d-1}}$ ，我们将 $G_1, G_2, \dots, G_{d-1}, G_d$ ，当作 TT 分解的核心。

将 G_1 的 i_1 -th 向量、 G_2 的 i_2 -th 矩阵、 G_{d-1} 的 G_2, \dots, i_{d-1} -th 矩阵与 G_d 的 i_d -th 矩阵依次相乘得到 X 元素。

此外，TT 分解的行列可以被定义为 (r_1, \dots, r_{d-1}) ，其中使得 $r_i = \text{rank}([X]_i)$ 其中 $1 \leq i \leq d-1$ 。它的顺序变化还有另一种变换形式：

$$[X]_i = (I_{r_{i-1}} \otimes G_i) \dots (I_{r_i} \otimes [G_{i+1}]_i) [G_i]_i ([G_{i+1}]_i \otimes I_{r_{i+1}}) \dots (G_i^T \otimes I_{r_{i-1}-P_{i-1}}), \quad (1.6)$$

Sidiropoulos N D, De Lathauwer L, Fu X, et al. (2017)^[21]

证明 TT 分解能够应用于张量回归。

（三）张量链式回归

我们考虑张量输入值和输出值：

$$Y_i = \langle A, X_i \rangle + \varepsilon_i, 1 \leq i \leq N, \quad (1.7)$$

其中， $Y_i \in R^{q_1 \times q_2 \times \dots \times q_n}$ ， $X_i \in R^{p_1 \times p_2 \times \dots \times p_m}$ ， $A \in R^{q_1 \times q_2 \times \dots \times q_n \times p_1 \times p_2 \times \dots \times p_m}$ 作为系数张量， $\varepsilon_i \in R^{q_1 \times q_2 \times \dots \times q_n}$ 作为随机误差项， N 为样本大小。对于所有的 $1 \leq j \leq n-1$ ，其中 Y_i 是具有嵌套或层次结构，其中第 j 个模块是能被 $(j+1)$ 个模块进行嵌套的。

我们假设系数张量 A 的秩 $R = (r_1, r_2, \dots, r_{m+n-1})$ 。使得 $r_i = \text{rank}([A]_i)$ ，对于所有的 i ， $1 \leq i \leq m+n-1$ ，参数空间可以表示为：

$\theta_1(R) = \{A \in R^{q_1 \times q_2 \times \dots \times q_n \times p_1 \times p_2 \times \dots \times p_m} : \text{rank}([A]_i) \leq r_i, 1 \leq i \leq m+n-1\}$ ，其中，我们有：

$$A = \left[[G_1; G_2, \dots, \sum, \dots, G_{m+n-1}, G_{m+n}] \right], \quad (1.8)$$

$$[A]_n = (I_{q_2 \dots q_n} \otimes G_1) \dots (I_{q_n} \otimes [G_{n-1}]_n) [G_n]_n ([G_{n+1}]_n \otimes I_{p_1}) \dots (G_{n+m}^T \otimes I_{p_{n-m+1}}), \quad (1.9)$$

其中 $G_i^T G_i = I_{q_i}$ ， $[G_i]_i [G_i]_i^T = I_{q_i}$ ， $2 \leq i \leq n$ ， $[G_i]_i [G_i]_i^T = I_{q_i}$ 。

对于 $n+1 \leq i \leq m+n-1$ ，

$$G_{n+m}^T G_{n+m} = I_{r_{n+m-1}}, \quad (1.10)$$

其中， $\sum \in R^{r_n \times r_n}$ 为对角线，并且 $\text{vec}(Y_i) = [A]_n \text{vec}(X_i) + \text{vec}(\varepsilon_i)$ ，

所以对于模型 $Y_i = \langle A, X_i \rangle + \varepsilon_i, 1 \leq i \leq N$ 能被改写为：

$$[G_n]_n^T (I_{q_n} \otimes [G_{n-1}]_n^T) \dots (I_{q_2 \dots q_n} \otimes G_1^T) \text{vec}(Y_i) = \sum \{ [G_{n+1}]_n ([G_{n+2}]_n \otimes I_{p_1}) \dots (G_{n+m}^T \otimes I_{p_{n-m+1}}) \text{vec}(X_i) \} + [G_n]_n^T (I_{q_n} \otimes [G_{n-1}]_n^T) \dots (I_{q_2 \dots q_n} \otimes [G_{n-1}]_n^T) \text{vec}(\varepsilon_i) \quad (1.11)$$

以上模型称为张量回归模型。

在第一阶段，对 Y_i 沿着第一种方式，通过 G_1 将 q_1 转变为 r_1 因子，然后压缩堆叠第一个模组和第二个模组，通过 G_2 将 $r_1 q_2$ 转变为 r_2 的因子。依此类推，直到我们所提取的 r_k 因子。相反 X_i 的因子的提取顺序遵循相反的原则，从最后一个行、列依次迭代到第一个行、列。最后预测器中提取到 r_k ，第二阶段将 r_k 当作预测器的响应器，系数矩阵 Σ 为对角因子，因此只涉及 r_k 参数。

（四）张量链式分解回归网络层

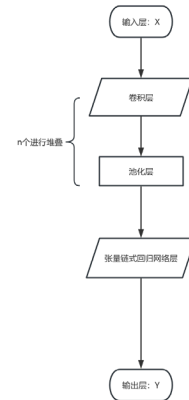


图1 神经网络模型构建

接下来, 我们改变传统卷积神经网络网络的堆积情况, 如图1、2中, 我们分别采用卷积层, 池化层, 卷积层, 进行堆叠, 之后再采用张量链式回归层输出结果, 最后构成我们主体的模型, 改变了传统卷积神经网络 (CNN) 的结构, 利用张量链式回归层 (TTRL) 来替换最后一个池化层, 扁平层和全连接层, 最大程度的保留了原有的线性结构。其中张量回归网络作为新的层, 是具有学习能力的, 能够学习数据集的特征, 识别和输出数据。

通过上述流程图, 我们可以发现, 在传统卷积网络中, 我们将张量线性网络替换了原有的扁平层, 全连接层, 由于我们之前在引言中讨论过, 当一个张量经过扁平层后, 会损失原有线性性质和指数级增加神经网络参数, 然而, 当通过张量链式回归层 (TTRL) 的神经网络将会避免这一情况发生。对于此模型的参数, 我们采用反向传播进行调节参数。

每一个回归的权重和每一个因素梯度的核心:

$$\frac{\partial W}{\partial U^{(K)}} = \frac{\partial G \times_0 U^{(0)} \dots \times_{(N+1)} U^{(N+1)}}{\partial U^{(K)}}, \quad (1.12)$$

我们对回归权重进行张开, 并对梯度的核心进行矢量化可得到:

$$\frac{\partial v(W)}{\partial v(G)} = \frac{\partial (U^{(0)} \otimes \dots \otimes U^{(N+1)}) v(G)}{\partial v(G)}. \quad (1.13)$$

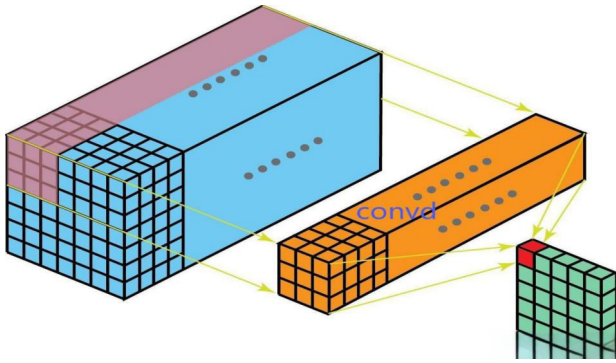


图2 利用卷积层进行卷积

二、模型构建与算法设计

(一) 模型构建

基于张量链式分解作为回归层的启发, 我们对张量链式回归层添加惩罚项, 用来减少模型的复杂度和减少模型过拟合情况。

我们假设输入的张量为 $X \in R^{M \times I_0 \times I_1 \times \dots \times I_N}$, 这一个张量对应着一批具有的 M 维的样本, 即 (x_1, \dots, x_m) , 此时存在一个 y , 使得 $y \in R^{s \times o}$, 其中 O 代表的是输入样本中的标题, 我们创建这个回归网络层的权重, 然后在这个网络层中加入惩罚项。我们设权重为 W , 且有 $W \in R^{I_0 \times I_1 \times \dots \times I_N \times O}$, b 为随机误差项, L 为损失函数, 使得:

$$\begin{cases} Y = \langle X, W \rangle_N + b, \\ L = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \|Y_i - \bar{Y}_i\|^2 + \lambda \|W\|_2^2, \\ W = \left[\left[G; U^{(0)}, \dots, U^{(N)}, U^{(N+1)} \right] \right]. \end{cases} \quad (2.1)$$

我们将这个张量链式回归层 (TTRL) 作为神经网络层中的可训练层, 在原有的基础上, 对原本张量回归网络的回归迭代中, 加入 L2 正则化项。我们允许这一层可以进行学习 (其中包括卷积层和张量回归) 潜在特征。我们直接将这个作用于高阶输入张量中的应用, 我们利用张量链式回归层 (TTRL) 来代替原有最后一层池化层, 扁平层和全连接层, 保留了线性结构, 直接实现端到端的操作, 并且由于正则化的原因, 减少了此模型过拟合的风险, 增加了模型的稳健性。

(二) 张量链式分解算法 (TT decomposition)

张量链式分解可以分为 2 个步骤。

第一步, 我们将输入的张量设为 A ,

$$A \in R^{q_1 \times q_2 \times \dots \times q_n \times p_1 \times \dots \times p_m}, \quad p = \prod_{i=1}^m p_i, \quad (2.2)$$

我们将张量的维数设为 ranks, $\text{ranks} = (r_0, \dots, r_{m+n})$, 有 $r_0 = r_{m+n} = 1$, $W = A$ 。将张量 A 初始化, 并令 $C = A$ 。之后遍历 i , 其中 $i=1, 2, \dots, n-1$, 使用奇异值矩阵分解 (SVD) 对张量 C 进行分解, 可以得到:

$$M_1(C) = U_i \sum_i V_i^T, \quad (2.3)$$

重塑, $U_i \in R^{(r_{i-1}) \times q_i}$, 将其的维数改变为 $G_i \in R^{(r_{i-1}) \times q_i \times r_i}$,

重塑 $\sum_i V_i^T \in R^{r_i \times (\prod_{j=i+1}^n q_j) \times p}$, 将其的维数改变为

$$C \in R^{(r_i q_{i+1}) q_{i+2} \times \dots \times q_n \times p_1 \times \dots \times p_m}, \quad (2.4)$$

最后, 可以得到我们经过初始化的张量 C 的维数可以改变为:

$$C \in R^{(r_i q_{i+1}) q_{i+2} \times \dots \times q_n \times p_1 \times \dots \times p_m}, \quad (2.5)$$

第二步, 之后我们反解矩阵, 对于 $i = m+n, m+n-1, \dots, n+2$, 我们依然采用矩阵分解, 可以得到 $M_{-1}(C) = U_i \sum_i V_i^T$ 和 $\text{rank } r_{i-1}$,

重塑 $V_i^T \in R^{(r_{i-1}) \times p_i r_i}$, 将其的维数改变为 $G_i \in R^{(r_{i-1}) \times p_i \times r_i}$,

重塑 $U_i \sum_i \in R^{r_{i-1} \times (\prod_{j=i}^n p_j) \times r_{i+1}}$,

将其的维数改变为 $C \in R^{r_{i-1} \times q_n \times p_1 \times \dots \times p_{i-n-2} \times (p_{i-n-1} r_{i-1})}$,

最后, 经过初始化的张量 C 转变为 $C \in R^{r_{i-1} \times q_n \times p_1 \times \dots \times p_{i-n-2} \times (p_{i-n-1} r_{i-1})}$ 。我们对整体进行奇异值矩阵分解, 可以得到 $C = U \sum V^T$, $\text{rank} = r_n$,

重塑 $U \in R^{r_{i-1} \times q_n \times r_n}$ 矩阵, 可以转变为 $G_i \in R^{(r_{i-1}) \times q_i \times r_i}$

重塑 $V^T \in R^{(r_{i-1}) \times p_i r_i}$ 矩阵, 可以转变为 $G_i \in R^{(r_{i-1}) \times p_i \times r_i}$,

最后我们可以得到:

$$\left[\left[G_1, G_2, \dots, G_n, \sum, G_{n+1}, \dots, G_{m+n-1}, G_{m+n} \right] \right]. \quad (2.6)$$

(三) 交替方向乘法 (ADMM)

首先我们输入的张量为 $\{(Y_i, X_i), 1 \leq i \leq N\}$, 训练数据为: $\{(Y_i, X_i)\}_{i=1}^M$

张量链式分解的行列为: $R = (r_1, \dots, r_{m+n-1})$, 迭代 K 次。

首先初始化张量值: $W^0 = A^0 = \theta$, $\Lambda^{(0)} = 0$

遍历 $k = 1, 2, \dots, K$.

$$W^{(k+1)} = \underset{W}{\operatorname{argmin}} \left(\sum_{i=1}^I \left(Y_i - \langle X_i, W \rangle_N - b \right)^2 + \lambda \|Z^k\|_2 + \Lambda^{(k)} (W - Z^k) \right. \\ \left. + \frac{\rho}{2} \|W - Z^k\|_2^2 \right), \quad (2.7)$$

$$W^{(k+1)} = \underset{W}{\operatorname{argmin}} \left(\sum_{i=1}^I \left(Y_i - \langle X_i, W^k \rangle_N - b \right)^2 + \lambda \|Z^k\|_2 + \Lambda^{(k)} (W - Z^k) \right. \\ \left. + \frac{\rho}{2} \|W^k - Z\|_2^2 \right), \quad (2.8)$$

$$\Lambda^{(k+1)} = \Lambda^{(k)} + \rho (W^{(k+1)} - Z^{(k+1)}), \quad (2.9)$$

其中 Λ 是拉格朗日算子, ρ 为惩罚项。

(四) 适应性矩估计算法 (ADAM)

适应性矩估计算法结合了适应性梯度算法和均方根算法的优点, 能够为不同的参数设计独立的自适应率。由于对于图像集的优化算法, 并非为凸优化算法。然而传统的梯度下降算法会出现局部最优解, 因此传统的梯度下降便不适用于非凸优化, 因此我们将采用 Dereich S, Jentzen A. (2024)^[28] 的 Adam 算法进行优化, Adam 算法的关键部分来源于指数加权平均值来估计梯度动量和二阶矩,

$$v_t \leftarrow \beta_1 v_{t-1} + (1 - \beta_1) g_t, \quad (2.10)$$

$$s_t \leftarrow \beta_2 s_{t-1} + (1 - \beta_2) g_t^2, \quad (2.11)$$

其中 β_1, β_2 是非负加权参数。

由于方差估计的运算速度远远慢于动量估计的移动速度。可以初始化 v, s , 但是会得到初始偏差, 因此需要进行标准化。

$$v_hat_t = \frac{v_t}{1 - \beta_1^t}, s_hat_t = \frac{s_t}{1 - \beta_2^t}, \quad (2.12)$$

有了正确的估计方式, 就可以写出更新方程。

$$g' = \frac{\eta v_hat_t}{\sqrt{s_hat_t + \hat{\epsilon}}}, \quad (2.13)$$

通常在优化参数的时候, 选择 $\hat{\epsilon} = 1e-6$, 为了数值的稳定。

三、数值模拟

由于加入惩罚项之后, 我们无法从理论上做出决断, 来判断添加惩罚项后与未添加惩罚项之前, 在精度和损失值上是否有提升。因此, 在这个部分, 为了验证所做的惩罚项是有效的, 我们分别对我们的模型和原模型在随机数组中进行实验, 查看这个数组在已添加惩罚项的张量回归网络和未添加张量回归网络中 MSE

的情况。

(一) 随机数组和随机矩阵的生成

为了验证我们加入惩罚项的张量回归网络是否有效, 我们利用 python 中的 numpy 库, 随机生成高维整数数组, 由于像素点的取值范围在 0-255 之间, 为了模拟真实的效果, 其中我们将 x 的大小限制在 0-255 之间, 以大小为 (28,28) 生成张量。对于图像, 有彩色图像和灰度图像之分, 为了模拟更多的噪声, 我们将数值的通道设置为 3, 即 x 的维度为 (3,28,28) 目, $x \in R^{n \times x^{28} \times x^{28} \times x^3}$ 。之后, 我们对生成的 x 进行归一化, 使得其被限制在 0-1 之间, 然后再对 y 进行独热编码, 对于 y, 我们将 y 分为 10 个类别, 即 (10,) 最后把这个数组放入未添加惩罚项和已添加惩罚项的模型之中, 分别比较在 2 种张量网络下的 MSE 好坏。

(二) 数值模拟结果

为了使得模型更具稳健性和泛化性, 我们改变输入模型样本量, 查看不同的数据样本下, 添加惩罚项是否对张量链式分解网络有效。我们采用相同的 epochs 和 batch_size 进行训练模型。在这些样本量中, 如果添加惩罚项后的张量链式网络均好于未添加惩罚项的张量链式网络, 则说明我们添加的惩罚项是有效的, 并且可进一步采用此模型进行实际情况的应用, 如图 3 及表 1 所示。

表 1 随机数组中添加 12 惩罚后与未添加惩罚的张量链式回归网络的 MSE 比较

样本数量	添加惩罚项后的张量链式分解回归网络的训练集	添加惩罚项后的张量链式分解回归网络的测试集	未添加惩罚项后的张量链式分解回归网络的训练集	未添加惩罚项后的张量链式分解回归网络的测试集
100	0.593933	0.812683	0.593871	0.812829
200	0.728827	0.564313	0.728750	0.564389
500	0.313030	0.299911	0.312977	0.299944
1000	0.126347	0.123470	0.126343	0.123487
2000	0.100025	0.099998	0.100045	0.100002
5000	0.100082	0.099987	0.100000	0.100000
10000	0.100004	0.099998	0.099999	0.100001

不同样本数量下的 MSE 对比

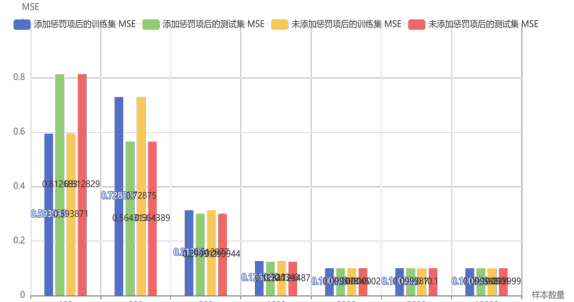


图 3 不同样本下两种模型的 MSE

为了验证添加惩罚项后的张量链式网络比未添加惩罚项的张量链式网络, 我们分别比较了 2 种模型在不同样本下的 MSE 的情况。如图 4、5 所示:

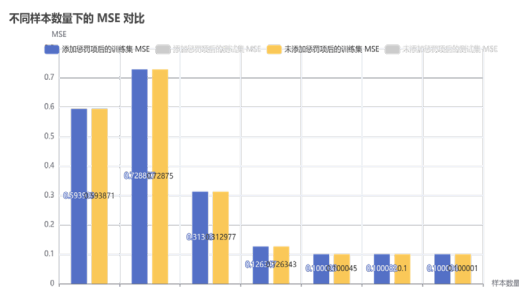


图4 不同样本量下两种模型在训练集上的 MSE

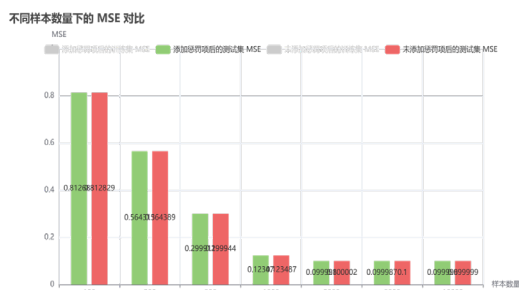


图5 不同样本量下两种模型在测试集上的 MSE

模拟结果表明，在训练集中，添加惩罚项后的张量链式网络在各个样本中的 MSE 均高于未添加惩罚项的张量链式网络，在测试集中，添加惩罚后的张量链式网络均好于未添加惩罚项的网络。说明添加惩罚项之后，虽然增加了训练集上的 MSE，但是提高了模型的泛化能力，减少了测试集中真实值与预测值之间的误差。为了探究，实验是否出现过拟合的情况，我们分别比较添加惩罚项的张量链式网络中的训练集和测试集中的 MSE。如图6、图7所示。

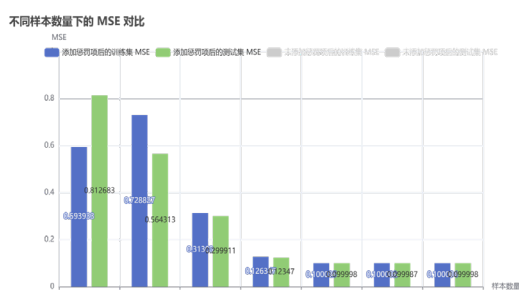


图6 不同样本量下添加 L2 惩罚项的张量链式网络在训练集和测试集上的 MSE

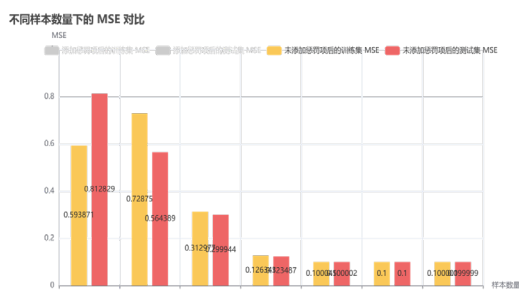


图7 不同样本量下未添加惩罚项的张量链式网络在训练集和测试集上的 MSE

实验结果表明，在添加惩罚项的张量链式网络和未添加惩罚

项的张量链式网络均未出现过拟合的情况。并且，在测试集中，加入惩罚项的 MSE 比未加入惩罚项 MSE 要好，在样本数据中，尤其是在样本量为100、200、500、1000、2000中均有巨大的提升，其中在100样本集中，在训练集上增加了0.000062的 MSE，在测试集上减少了0.000146的 MSE，减少了模型的过拟合情况。并且在数据集中可以表明，在样本量越小的模型中，使用惩罚项越有效，在大量的样本集中数据差距较小。这是由于神经网络能够通过大量的数据集不断的学习产生的结果，说明在张量链式回归层加入 L2 惩罚项是有效的，并且很好的提高了模型在训练集和测试集中的 MSE，使得模型更加具有泛化性，减少了预测值与真实值之间的误差，说明经过 L2 惩罚之后，原模型可以很好的减少由于神经网络过度学习模型的噪声所带来的过拟合的问题，使得模型更加稳定，因此我们所添加的惩罚项是有效的。

四、张量链式分解在胸部 CT 扫描数据集中应用

为了验证我们在上一部分模拟数据的准确性，以及加入惩罚项之后张量回归网络在实际情况中的可行性，我们将加入惩罚项的张量回归网络用于胸部癌症的预测，并且查看预测值和原数据集的值偏差大小。

数据集来源 kaggle，其中具体的数据集来源于：<https://www.kaggle.com/datasets/mohamedhanyyy/chest-ctscan-images>。

数据集中包含腺癌、大细胞癌、鳞状细胞癌 3 种肺癌类型，正常细胞，其中包含训练集0.7，测试集0.2，验证集0.1，其中训练集有613张图片，测试集有215张图片，验证集有72张图片。

肺腺癌：肺腺癌是最一种肺癌形式，在胸部 CT 扫描的数据集中，肺腺癌图像集占有图像集的30%，约占所有非小细胞肺癌发病率的40%。腺癌存在于几种常见的癌症中，包括乳腺癌、前列腺癌和结直肠癌。肺腺癌位于肺的外部区域，位于分泌粘液并帮助我们呼吸的腺体中。患者的症状包括咳嗽、声音嘶哑、体重减轻和虚弱。

大细胞未分化癌：大细胞未分化癌肺癌生长和扩散迅速，可以在肺部的任何部位发现。在日常的胸部癌症中，这种类型的肺癌通常占有非小细胞肺癌病例的10%至15%。

鳞状细胞癌：这种类型的肺癌位于肺部中心，较大的支气管将气管连接到肺部，或位于主要气道分支之一。鳞状细胞肺癌约占有非小细胞肺癌的30%，通常与吸烟有关。

首先我们对图片集中的训练集中的腺癌、大细胞癌、鳞状细胞癌，正常细胞进行编码，将图片以数据形式输入神经网络层中，使得神经网络可以更好的学习图像方面。由于原数据集是灰度图像，我们首先对灰度图像进行处理，利用图像增广，包括：随机裁剪，随机翻转，中心翻转来剪切图像集如图8所示。

为了更好的提高模型的精度和减少模型的损失 (loss)，我们采用 opencv 对图像集进行处理，首先我们对灰度图像的通道改为 RGB 通道3通道，我们将 RGB 颜色通道改为 HSV 颜色通道，并且为灰度图像集随机上色，用来强化数据集。我们对图像集进行随机裁剪，随机翻转，中心翻转来剪切图像集，增加图像集噪声，在训练神经网络时，我们固定随机种子，卷积核大小，池化层大小使得模型可以复现，最后我们比较测试集中的损失值的大小用来测试带 L2 惩罚项的张量链式回归层是否有效，是否能够避免过拟合情况，如图8、图9所示。

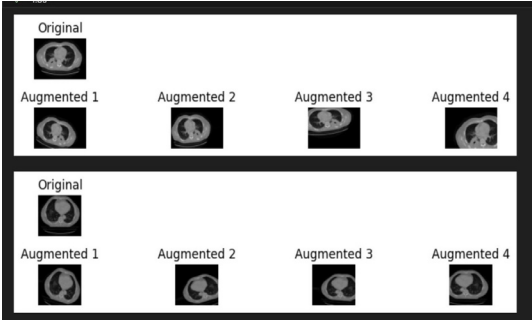


图8 数据增强后的图像 (灰度图像)

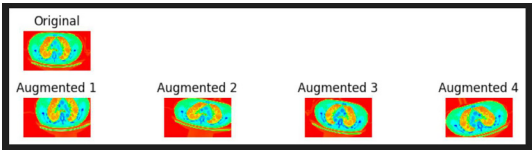


图9 数据增强后的图像 (HSV) 图像

由于图像集的优化过程并非全为凸优化，而且梯度下降 (SGD) 等方法在非凸优化中表现较差，因此，我们将使用 Adam 为优化器进行训练。在训练过程中，我们采用交叉熵作为我们函数的损失函数进行评估模型的好坏程度以及真实值与预测值之间的误差，如表2，图10所示。

表2 添加 L2 惩罚项后的张量链式网络模型下的胸部扫描 CT 的损失值和训练时间

模型的值	训练集中的损失	验证集中的损失	训练时间
添加 L2 惩罚项的张量链式网络	0.8537	0.9761	45.17s

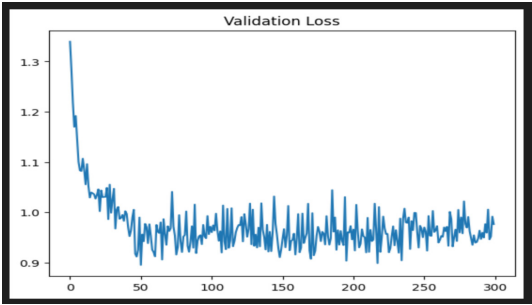


图10 张量链式回归 (TTRL) 在胸部 CT 平面扫描数据集训练过程

实验结果表明，我们的模型在训练速度上和参数，以及在 loss 上都表现良好，在训练集和验证集中的损失值分别为 0.8537，0.9761。在训练集和验证集中的损失值都比较小，说明添加惩罚

项后的张量链式网络在 CT 平面扫描中表现良好。

由于在训练集中的损失值和测试集中的损失值之间相差较小，并且由模型拟合图像可以得到模型是未出现维度爆炸的情况。实验表明模型没有出现拟合和欠拟合的情况，并且拟合程度较好，说明我们的模型是有效的，并且我们的模型训练时间较少，能够及时的对数据集进行分析。

五、结论与展望

(一) 结论

在本文中，我们利用张量回归网络层代替卷积网络中原有的扁平层和全连接层，实现了端到端的操作，通过实验表明，张量回归网络具有学习标签等特征的能力，完全有能力替代传统的扁平层和全连接层，并且张量链式网络保证了原有的线性结构。我们对已有的张量回归网络层中的回归层，加入了 L2 惩罚项，使得模型更加具有泛化性和稳健性。为了验证我们加入 L2 惩罚项是有效的，我们采用计算机随机生成高维张量，并且将这些张量带入原有的模型和我们更新过后的模型进行比较，发现在评价指标 MSE 上，在测试集中的 MSE 有提升，说明我们的模型在数值模拟的过程中是有效的。

我们将模型应用到 CT 图像中，进行癌症的预测。由于 CT 扫描数据集的大小限制，这对神经网络更具有挑战，如何在较少的数据集中获得更好的训练速度和更小的损失值，便成为了我们需要探讨的问题。我们添加 L2 惩罚项之后，实验表明，TTRL 模型在训练集上的损失值为 0.8537，并未发现过拟合的情况，在验证集上的损失值为 0.9761，说明 TTRL 在验证集中表现良好，并且预测值与真实值之间的差距较小，说明在 TTRL 回归层中添加 L2 惩罚项是有效的。

由于计算资源的不足，我们只是进行了卷积层、池化层进行堆叠，并没有考虑在卷积层和池化层进行别的优化，譬如，采用残差神经网络进行处理卷积层和池化层，来提高神经网络的精度和计算时间等等。因此，我们采用堆叠情况会导致模型的精度下降，并且会导致模型的运算时间加快。其次，我们并没有采用多个 GPU 进行小规模训练，因此，我们提出的模型在计算速度会偏低。

(二) 展望

由于计算机算力问题，我们只是将输入层，卷积层，池化层，和张量网络层进行简单的堆叠。我们只说明了加入惩罚项后的张量链式网络比未添加惩罚项后的张量链式网络更好，能够避免过拟合的情况。为了更好的提高神经网络的准确率，可以采用目前比较流行的多模态模型，如 Transformer，自注意力回归，VGG 块和 ResNet 模型。

如果采用这样的框架，会提高模型的复杂程度。但是，在提高模型的复杂程度的同时，也会提高神经网络学习图像的效率

和精度，更好地提升模型的精度和减少预测值与真实值之间的误差。

在未来的工作中，可以采用更加复杂的数据集，或者采用大型数据集，添加更多的噪声来评判此模式是否比未添加惩罚项的张

量回归网络更具有泛化性，也可以采用 L1 正则化项改变此模型的惩罚项，利用弹性网络或许也是一种不错的方法。当然，不断调整卷积层，池化层，张量回归网络层的层数，使模型能够深层次的学习数据集中的特征，提高模型的准确率也是一种不错的方法。

参考文献

- [1]Si Y, Zhang Y, Cai Y, et al. An efficient tensor regression for high-dimensional data[J].arXiv e-prints, 2022, arXiv:2205.13734.
- [2]El Sakka M, Mothe J, Ivanovici M. Images and CNN applications in smart agriculture[J]. European Journal of Remote Sensing, 2024, 57(1): 2352386.
- [3]Zhang D, Xiao B, Gao C, et al. Modeling Bilingual Sentence Processing: Evaluating RNN and Transformer Architectures for Cross-Language Structural Priming[C]//Proceedings of the Fourth Workshop on Multilingual Representation Learning (MRL 2024). 2024: 127–136.
- [4]An S, Oh T J, Kim S W, et al. Self-clustered GAN for precipitation nowcasting[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 9755.
- [5]Turchetti C, Falaschetti L. Tensor PCA from basis in tensor space[J]. arXiv e-prints, 2023, arXiv:2305.02803.
- [6]Tomov M, Sadinov S, Arsov B. Impedance Matching Optimization of RF Networks[J]. Engineering Proceedings, 2024, 70(1): 46.
- [7]Dereich S, Jentzen A. Convergence rates for the Adam optimizer[J]. arXiv e-prints, 2024, arXiv:2407.21078.
- [8]Li Z, Li B, Jahng S G, et al. Improved vgg algorithm for visual prosthesis image recognition[J]. IEEE Access, 2024, 12: 45727–45739.
- [9]Li X, Marcus D, Russell J, et al. Weibull parametric model for survival analysis in women with endometrial cancer using clinical and T2-weighted MRI radiomic features[J]. BMC Medical Research Methodology, 2024, 24(1): 107.
- [10]Aboutaleb A, Torabi M, Belzer B, et al. Deep Learning-based Auto-encoder for Time-offset Faster-than-Nyquist Downlink NOMA with Timing Errors and Imperfect CSI[J].IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2024, 18(7): 1178–1193.
- [11]Li Z, Li B, Jahng S G, et al. Improved vgg algorithm for visual prosthesis image recognition[J]. IEEE Access, 2024, 12: 45727–45739.
- [12]Wang S, Gai K, Zhang S. Progressive feedforward collapse of resnet training[J]. arXiv e-prints, 2024, arXiv:2405.00985.
- [13]Sidiropoulos N D, De Lathauwer L, Fu X, et al. Tensor decomposition for signal processing and machine learning[J]. IEEE Transactions on signal processing, 2017, 65(13): 3551–3582.
- [14]Chen G, Bai J, Ou Z, et al. PSFHS: intrapartum ultrasound image dataset for AI-based segmentation of pubic symphysis and fetal head[J]. Scientific Data, 2024, 11(1): 436.
- [15]Pashaian M, Seyedin S. Speech Enhancement Using Joint DNN - NMF Model Learned with Multi - Objective Frequency Differential Spectrum Loss Function[J]. IET Signal Processing, 2024, 2024(1): 8881007.
- [16]Zhou H, Sarkar R. Leveraging Graph Machine Learning for Moonlighting Protein Prediction: A PPI Network and Physiochemical Feature Approach[J]. bioRxiv, 2023: 2023.11.13.566879.
- [17]Al Olaimat M, Bozdog S, Alzheimer' s Disease Neuroimaging Initiative. TA-RNN: An attention-based time-aware recurrent neural network architecture for electronic health records[J]. Bioinformatics, 2024, 40: i169–i179.
- [18]Bharadwaj V, Malik O A, Murray R, et al. Distributed-memory randomized algorithms for sparse tensor cp decomposition[C]//Proceedings of the 36th ACM Symposium on Parallelism in Algorithms and Architectures. 2024: 155–168.
- [19]Yuan S, Huang K. Exploring Numerical Priors for Low-Rank Tensor Completion with Generalized CP Decomposition[J]. arXiv e-prints, 2023, arXiv: 2302.05881.
- [20]Baghersshahi P, Hosseini R, Moradi H. Efficient relation-aware neighborhood aggregation in graph neural networks via tensor decomposition[J]. arXiv e-prints, 2022, arXiv:2212.05581.
- [21]Xiang L, Yin M, Zhang C, et al. Tdc: Towards extremely efficient cnns on gpus via hardware-aware Tucker decomposition[C]//Proceedings of the 28th ACM SIGPLAN Annual Symposium on Principles and Practice of Parallel Programming. 2023: 260–273.
- [22]Zhang Y, Zhu Y N, Zhang X. Compressing MIMO Channel Submatrices with Tucker Decomposition: Enabling Efficient Storage and Reducing SINR Computation Overhead[J]. arXiv e-prints, 2024, arXiv:2401.09792.
- [23]Novikov A, Podoprikin D, Osokin A, et al. Tensorizing neural networks[J]. Advances in neural information processing systems, 2015, 28.
- [24]Kossaifi J, Lipton Z C, Kolbeinsson A, et al. Tensor regression networks[J]. Journal of Machine Learning Research, 2020, 21(123): 1–21.
- [25]Liu Y, Chakraborty N, Qin Z S, et al. Integrative Bayesian tensor regression for imaging genetics applications[J]. Frontiers in Neuroscience, 2023, 17: 1212218.
- [26]Liu Y, Liu J, Long Z, et al. Tensor regression[M]. Springer International Publishing, 2022.
- [27]Zhou Y, Tan K, Shen X, et al. A protein structure prediction approach leveraging transformer and CNN integration[C]//2024 7th International Conference on Advanced Algorithms and Control Engineering (ICAACE). IEEE, 2024: 749–753.
- [28]Dereich S, Jentzen A. Convergence rates for the Adam optimizer[J]. arXiv e-prints, 2024, arXiv:2407.21078.

参数估计对二项分布 CUSUM 控制图的性能影响分析

苏鑫越¹, 杨薇², 张久军^{1*}

1. 辽宁大学 数学与统计学院, 辽宁 沈阳 10036

2. 鞍山师范学院 数学院, 辽宁 鞍山 114007

DOI:10.61369/ASDS.2025050020

摘 要 : 传统控制图大都是基于参数已知的假设, 当参数未知时需要通过历史数据来进行估计, 但估计的误差会对控制图的性能产生一定影响. 基于此, 本文考虑了参数估计对检测二项分布的 CUSUM 控制图的性能影响, 通过蒙特卡洛模拟方法, 得到在不同的历史样本数量条件下的平均运行长度. 考查了受控与失控下控制图的性能表现, 并通过调整控制线得到给定的平均运行长度。

关 键 词 : CUSUM 控制图; 样本量; 二项分布; 参数估计

Analysis of the Influence of Parameter Estimation on the Performance of CUSUM Control Charts for Binomial Distribution

Su Xinyue¹, Yang Wei², Zhang Jiujun^{1*}

1.School of Mathematics and Statistics, Liaoning University, Shenyang, Liaoning 110036

2.School of Mathematics, Anshan Normal University, Anshan, Liaoning 114007

Abstract : Traditional control charts are typically based on the assumption of known parameters. When these parameters are unknown, historical data are required for estimation. However, estimation errors can affect the performance of the control charts. In view of this, this paper investigates the impact of parameter estimation on the performance of a Cumulative Sum (CUSUM) control chart for monitoring binomially distributed data. Using the Monte Carlo simulation method, the average run length under different numbers of historical samples is obtained. The performance of the control chart under both in-control and out-of-control conditions is evaluated, and the control limits are adjusted to achieve a specified average run length.

Keywords : cumulative sum control chart; sample size; binomial distribution; parameter estimation

引言

控制图作为统计过程控制 (Statistical Process Control, SPC) 的一种重要工具, 已经在制造业中得到广泛应用。1924 年, Shewhart^[1] 提出了 Shewhart 控制图, 其易于实施且对过程参数大漂移的检测比较敏感。1954 年, Page^[2] 提出了累积和 (cumulative sum, CUSUM) 控制图。1959 年, Roberts^[3] 提出了指数加权移动平均 (exponentially weighted moving average, EWMA) 控制图。CUSUM 控制图和 EWMA 控制图对于检测过程参数的小漂移十分有效。

在 SPC 中, 通过对生产过程中的缺陷数或不合格品率进行监控, 可及时识别过程参数漂移, 提高产品的质量。为了监控不合格品数的波动, Lucas^[4] 详细介绍了二项分布 CUSUM 控制图的原理和设计过程。Gan^[5] 进一步提出了二项分布 CUSUM 控制图优化参数的具体方法。理论上, 检测漂移的控制限需由过程参数确定, 但在实际中, 受控过程的参数一般都是未知的, 需要通过受控状态下的样本数据对参数进行准确的估计, 构造控制限, 以使控制图的统计性能可靠。在 SPC 中, 这个过程称为阶段 I, 对生产过程进行在线监控的过程称为阶段 II。

参数估计对控制图的性能有重要影响, Jensen^[6] 和 Psarakis^[7] 对这一领域进行了详细综述。Does 等^[8] 在 I 阶段中对比了多种估计量对 CUSUM 控制图性能的影响, 为阶段 II 提供更优的参数估计策略。Tao^[9] 在阶段 I 用 8 个估计量在 6 种污染环境下估计过程标准差, 并分析了不同估计量对控制图运行长度分布。Yi 和 Qiu^[10] 提出了自适应 CUSUM 控制图并通过递归更新参数估计, 实现控制限的修正调整, 使控制图 II 阶段有效监控过程异常。因此, 本文在已有研究的基础上, 系统分析参数估计对二项分布的 CUSUM 控制图性能的影响, 同时对控制限进行修正, 以提升控制图的监控性能。

基金项目: 辽宁省教育厅基金基本项目 (LNYJG2024012); 辽宁省研究生教学改革研究项目 (JYTMS20230768)。

作者简介:

苏鑫越 (2002—), 女, 河南安阳人, 辽宁大学数学与统计学院在读硕士生, 研究方向: 质量控制;

杨薇 (1983—), 女, 辽宁鞍山人, 鞍山师范学院副教授, 研究方向: 质量控制。

通讯作者: 张久军 (1978—), 男, 辽宁兴城人, 辽宁大学数学与统计学院教授, 博士, 博士生导师, 研究方向: 质量控制, 邮箱: zjjly790816@163.com。

一、基本原理

在 SPC 中, 不合格品的数量 X 服从参数为 n 和 p 的二项分布, 其中 n 为进行独立试验的总数, p 为不合格品率。即 $X \sim b(n, p)$ (其中 $p \in (0, 1)$)。当不合格率在可接受的范围内波动时, 认为该过程是受控的。反之, 若不合格率超出可接受的范围, 即不合格品数发生较大波动, 则认为过程是失控的。

假设过程处于受控状态, 则

$$P(X = x; p) = \binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x}, \quad x = 0, 1, 2, \dots, n$$

均值为 $E(X) = np$, 方差为 $Var(X) = np(1-p)$ 。则 X/n 的均值和方差分别为 $E[X/n] = p$, $Var[X/n] = \frac{p(1-p)}{n}$ 。

受控状态下 $p = p_0$ 。失控状态下 $p = p_1$, $p_1 = p_0 + d\sqrt{\frac{p_0(1-p_0)}{n}}$, 其中 d 为漂移幅度, $d = \delta\sqrt{\frac{np_0}{1-p_0}}$ 。 $d > 0$ 意味着不合格率增加, 产品质量的下降, 生产过程能力需要提高。本文设 $d \in (0, 3]$ 。

二、CUSUM 控制图设计

(一) 参数 p 已知

由于在实际生产中, 管理者更注重不合格率 p 增加所带来的损失, 因此本文研究用于监测参数 p 向上漂移的单边 CUSUM 控制图。其监测统计量为

$$C_t^+ = \max(0, C_{t-1}^+ + X_t - k) \quad t = 1, 2, \dots$$

其中 k 为参考值。初始值 $C_0^+ = 0$ 。控制限为 h , 本文在蒙特卡罗模拟中应用二分查找法计算得到 h 。若 $C_t^+ > h$, 则表明过程失控, 发出报警信号。参数 k 的计算过程如下:

利用二项分布的分布列构造序贯概率比检验 (SPTR)。令原假设为 $H_0: p = p_0$, 备择假设为 $H_1: p = p_1$ 其中, $p_1 > p_0$ 。似然比定义为

$$\Lambda_t = \frac{\prod_{i=1}^t P(X = x_i; p_0)}{\prod_{i=1}^t P(X = x_i; p_1)} \quad t = 1, 2, \dots$$

似然比取对数, 对于二项分布 $b(n, p)$, $\ln(\Lambda_t)$ 可表示为:

$$\ln(\Lambda_t) = \sum_{i=1}^t (X_i - k) = \ln(\Lambda_{t-1}) + X_t - k$$

则

$$k = \frac{n \ln((1-p_0)/(1-p_1))}{\ln((1-p_0)/(1-p_1)) - \ln(p_0/p_1)}$$

(二) 参数 p 未知

参数 p 未知时, 应进行 I 阶段研究, 以估计受控状态下的参数 p 。极大似然估计值为

$$\hat{p} = \frac{\bar{x}}{n}$$

这里 $\bar{x} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i$, m 为估计参数时所需样本量。 k 由估计值 \hat{p} 确定, $\hat{k} = \frac{n \ln((1-\hat{p}_0)/(1-\hat{p}_1))}{\ln((1-\hat{p}_0)/(1-\hat{p}_1)) - \ln(\hat{p}_0/\hat{p}_1)}$ 。这意味着对指定的 ARL_0 , 不同的 \hat{p} 对应不同的 \hat{k} 。

三、CUSUM 控制图的性能分析

平均运行长度 (Average Run Length, ARL) 是监控控制图中常用的性能评估指标之一, 表示绘制控制图统计量直至发出报警信号所需的期望样本数。受控平均运行长度记为 ARL_0 , 失控平均运行长度记为 ARL_1 。运行长度的标准差记为 $SDRL$ 。本文运用蒙特卡罗模拟方法, 分别固定参数 n 和 p , 探究 I 阶段样本量对 CUSUM 控制图性能的影响。预先指定 $ARL_0 = 370$ 。

(一) 参数 n 固定时, 控制图的性能分析

本节考虑 I 阶段样本量对具有固定参数 n 的 CUSUM 控制图性能的影响。不失一般性, 考虑样本量 $m = \{100, 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000\}$, 参数 $n = 10$, $p = \{0.01, 0.05, 0.1\}$ 。参数已知时 CUSUM 控制图的 $h = \{4.81, 8.78, 10.41\}$, 使得 $ARL_0 = 370$ 。

表 1 参数未知条件下二项分布 $b(10, p)$ 的 CUSUM 控制图在不同 I 阶段参考样本下的运行长度分布 ($p_0 = 0.01, h = 4.81; p_0 = 0.05, h = 8.78; p_0 = 0.1, h = 10.41$)

p_0		0.01					0.05					0.1				
m	δ	ARL	SDRL	10th	50th	90th	ARL	SDRL	10th	50th	90th	ARL	SDRL	10th	50th	90th
100	0	666.6	1206.5	60	247	1599	740.7	1359.4	50	224	1873	721.2	1334.3	48	249	1717
	0.2	293.4	555.8	42	130	630	147.1	251.4	28	78	305	93.7	152.6	22	56	187
	0.4	152	235.6	32	88	315	58.5	59.1	19	43	110	35.6	28.2	14	29	64
	0.6	98.9	119.8	26	65	198	35.6	25.4	15	29	62	21.8	11.6	10	19	36
500	0	419.5	493.6	69	262	939	423.0	519.7	61	255	963	428.1	529.3	56	257	980
	1	199.4	199.5	45	137	424	107.9	96	30	80	215	72.8	58.4	23	56	142
	2	120.4	104.1	34	91	240	52.4	34.9	20	43	96	33.5	19.4	14	29	57
	3	84.3	63.7	27	67	160	33.9	18.6	15	30	58	21.3	10.1	11	19	35

1000	0	396.4	432.8	67	262	875	386.9	419.2	62	256	868	402.2	437.4	58	259	909
	1	193	177.6	45	141	406	103.1	84.3	30	79	204	72.2	54.7	23	57	141
	2	115.7	91.6	34	90	231	51.2	32.4	20	43	92	33.1	18.7	14	29	57
	3	82.5	59.1	27	67	157	33.7	18.1	15	30	57	21.2	10	11	19	34
1500	0	390.7	396.9	70	271	857.1	383.3	392.6	62	260	853	387.3	397.4	60	263	876
	1	188.1	162.5	46	139	392	101.4	78.4	30	79	203	70.4	50.9	23	56	137
	2	117.1	90.7	35	92	228	51.3	32.3	20	43	92	33.2	18.5	15	29	57
	3	82.1	58.2	27	66	157	33.6	18.2	15	30	57	21.2	10	11	19	34
2000	0	377.1	373.1	68	263	831	375.6	365.7	65	262	825	376.5	377.1	60	260	853
	1	187.5	159.6	47	140	391	101.5	78.1	30	79	202	70.5	52.3	23	55	137
	2	117.6	91.2	35	92	233	50.8	31.4	20	43	91	32.8	17.8	15	29	56
	3	80.8	56	27	66	152	33.2	17.4	15	29	56	21.3	10	11	19	34
2500	0	375.8	357.6	69	266	827	374.3	368.7	63	255	837	376.3	375.6	59	260	836
	1	186.8	158.9	46	140	391	100.6	77.6	30	78	199	69.9	50.8	23	56	137
	2	115.5	89.4	46	140	391	51.4	31.9	20	44	92	32.8	18.2	14	29	57
	3	81.1	57.1	27	66	153	33.3	17.9	15	30	57	21.3	9.9	11	19	34
3000	0	373	355.3	70	263	822	373.7	359.7	64	263	814	374.4	368.7	61	263	827
	1	184.5	158.1	45	137	386	101.1	77.3	31	79	202	70	50.3	23	56	134
	2	115.4	88.6	34	91	229	51	31.9	20	43	93	33.1	18.2	15	29	57
	3	81.5	57.1	27	66	154	33.6	17.9	15	30	57	21.1	9.9	11	19	34

表1展示了二项分布 $b(10, p)$ ， $p=\{0.01, 0.05, 0.1\}$ 的CUSUM控制图的运行长度分布。结果表明，参数估计所用的I阶段样本量对CUSUM控制图II阶段受控状态下的 ARL 值产生了不同程度的影响。随着 m 的增加， $p=\{0.01, 0.05, 0.1\}$ 对应的CUSUM控制图的 ARL 整体呈下降趋势，并逐渐趋于370。例如，当样本量 $m=100$ 时， $ARL=\{666.6, 740.7, 721.2\}$ 远大于370。而 $m=3000$ 时， $ARL=\{373, 373.7, 374.4\}$ 与目标值370非常接近，控制图表现出较为理想的性能。这表明样本量不足会显著影响参数估计的准确性，进而降低控制图的性能。因此应基于样本量动态调整控制限。

此外，随着样本量 m 的增加， $SDRL$ 逐渐减小，表明运行长度分布的变异性降低。运行长度分布的第10、50和90百分位数也表明，分布具有右偏性，但随着 m 的增加，分布逐渐趋于对称。

(二) 参数 p 固定时，控制图的性能分析

本节考虑I阶段样本量对具有固定参数 p 的CUSUM控制图性能的影响。不失一般性，考虑样本量 $m=\{100, 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000\}$ ，参数 $p=0.05$ ， $n=\{5, 10, 20\}$ 。参数已知时CUSUM控制图的 $h=\{6.81, 8.78, 10.86\}$ ，使得 $ARL_0=370$ 。

表2 参数未知时，二项分布 $b(n, 0.05)$ 的CUSUM控制图在不同第一阶段参考样本下的运行长度分布 ($n=5, h=6.81$; $n=10, h=8.78$; $n=20, h=10.86$)

n		5					10					20				
m	δ	ARL	SDRL	10th	50th	90th	ARL	SDRL	10th	50th	90th	ARL	SDRL	10th	50th	90th
100	0	726.1	1348.4	55	244	1790	740.7	1359.4	50	224	1873	716	1354.8	48	236	726.1
	0.2	212	415.3	35	101	436	147.1	251.4	28	78	305	93.7	135.6	22	57	212
	0.4	94.2	120.6	25	60	186	58.5	59.1	19	43	110	37	29.7	14	29	94.2
	0.6	56.1	53.6	20	43	102	35.6	25.4	15	29	62	22.4	12.3	11	20	56.1
500	0	434.5	550.5	65	265	962	423.0	519.7	61	255	963	411.4	498.5	55	250	434.5
	1	143.9	137.1	37	103	296	107.9	96	30	80	215	74.4	60.8	23	57	143.9
	2	77	58.2	26	61	147	52.4	34.9	20	43	96	34.2	20.1	14	29	77
	3	51.4	32.2	20	44	92	33.9	18.6	15	30	58	21.9	10.9	11	20	51.4
1000	0	401.9	436.1	70	267	903	386.9	419.2	62	256	868	382.7	417.9	57	251	401.9
	1	141.2	121.5	38	105	287	103.1	84.3	30	79	204	73.7	57.1	23	57	141.2
	2	74.1	50.9	26	61	140	51.2	32.4	20	43	92	34.1	19.5	15	30	74.1
	3	50.1	30.4	20	43	89	33.7	18.1	15	30	57	22	10.7	11	20	50.1

1500	0	386	393.7	67	260	862	383.3	392.6	62	260	853	375.8	400.2	57	254	386
	1	135.3	12.1	37	103	273	101.4	78.4	30	79	203	71.7	53	23	57	135.3
	2	75.5	52.3	26	62	143	51.3	32.3	20	43	92	33.9	19.2	15	29	75.5
	3	50.2	30.3	20	43	90	33.6	18.2	15	30	57	21.7	10.4	11	20	50.2
2000	0	379.1	372.5	67	264	828	375.6	365.7	65	262	825	374.8	368.4	58	252	379.1
	1	137.6	113.2	38	105	278	101.5	78.1	30	79	202	72.1	53.5	23	57	137.6
	2	74	49.4	26	62	137	50.8	31.4	20	43	91	33.4	18.7	15	29	74
	3	50.2	30.2	20	43	89	33.2	17.4	15	29	56	21.8	10.4	11	20	50.2
2500	0	378.8	373.9	67	261	833	374.3	368.7	63	255	837	373.8	358.4	60	251	378.8
	1	136.3	109.1	38	105	274	100.6	77.6	30	78	199	71.6	52.9	23	57	136.3
	2	74.7	51.3	26	61	141	51.4	31.9	20	44	92	33.2	18.8	15	29	74.7
	3	49.7	29.7	20	43	88	33.3	17.9	15	30	57	21.7	10.3	11	20	49.7
3000	0	375.5	363.2	68	264	824	373.7	359.7	64	263	814	372.9	356.0	59	254	375.5
	1	136.9	110.7	38	106	273	101.1	77.3	31	79	202	71.4	52.2	23	57	136.9
	2	74.8	50.5	26	61	139	51	31.9	20	43	93	33.7	18.8	14	29	74.8
	3	50	29.9	20	43	89	33.6	17.9	15	30	57	21.8	10.5	11	20	50

表2展示了二项分布 $b(n, 0.05)$, $n = \{5, 10, 20\}$ 的 CUSUM 控制图的运行长度分布, 可以看出:

(1) 样本量增加有利于 ARL 趋于 370。随着 m 的增加, $n = \{5, 10, 20\}$ 对应的 CUSUM 控制图的 ARL 整体呈下降趋势, 并逐渐趋于 370。例如, 当 $m=100$ 时, $ARL = \{726.1, 740.7, 716\}$ 明显偏离 370。而样本量 $m=3000$ 时, $ARL = \{375.5, 373.7, 372.9\}$ 与目标值 370 非常接近。

(2) n 的增大对 ARL 达到 370 有积极影响。例如 $m=1500$ 时, $n = \{5, 10, 20\}$ 对应的 $ARL = \{386, 383.3, 375.8\}$ 而 $m=2000$ 时 $ARL = \{379.1, 375.6, 374.8\}$ 。因此, 较大的试验次数 n 可以在相对较小的样本量 m 下, 使 ARL 更接近目标值 370。

(3) 从运行长度分布的其他指标来看, 随着 n 和 m 的增加, $SDRL$ 同样逐渐减小, 反映出运行长度分布的变异性降低,

过程更加稳定。运行长度分布的第 10、50 和 90 百分位数也表明, 分布具有右偏性, 不过随着 n 和 m 的增加, 右偏程度逐渐减弱, 分布逐渐趋于对称。

四、CUSUM 控制图的修正控制限

由于参数估计对控制图性能有显著影响, 若采用基于已知参数的控制限, 将可能导致误报警或不报警, 进而降低过程监控的有效性。因此, 为确保控制图能够在受控状态下仍达到 ARL_0 , 需要对控制限进行适当调整。本节通过 50000 次蒙特卡洛模拟计算样本量 $m = \{30, 50, 75, 100, 500, 1000, 1500, 2000\}$ 下, 参数 $n = \{5, 10, 20\}$ 和 $p = \{0.01, 0.05, 0.1\}$ 不同组合对应的修正控制限, 以确保 $ARL_0 = 370$ 。

表 3 参数未知条件下 CUSUM 控制图的修正控制限

(n,p)	(5,0.01)	(5,0.05)	(5,0.1)	(10,0.01)	(10,0.05)	(10,0.1)	(20,0.01)	(20,0.05)	(20,0.1)
30	2.5588	4.4234	5.3766	3.3412	5.6392	6.9438	4.2987	7.2318	8.7830
50	2.7299	4.9233	6.0861	3.6098	6.2861	7.6923	4.6946	8.0345	9.7133
75	2.8956	5.2834	6.4725	3.8121	6.7700	8.2751	5.2007	8.6333	10.3389
100	3.0025	5.4917	6.8168	4.0102	7.0721	8.6283	5.2014	8.9735	10.7773
500	3.3535	6.4305	7.9703	4.5484	8.2724	9.9432	6.0455	10.3656	12.1621
1000	3.4096	6.6002	8.1842	4.6661	8.4943	10.1705	6.2300	10.5795	12.4188
1500	3.4443	6.6751	8.2697	4.7195	8.5691	10.2373	6.2594	10.6650	12.6758
2000	3.4577	6.7085	8.3072	4.7316	8.6092	10.2801	6.3128	10.7078	12.6848
h	3.5005	6.8154	8.4622	4.8061	8.7832	10.4084	6.4091	10.8575	12.6888

表3展示了 (n, p) 不同组合下, 样本量 m 对应的修正控制限, 并展示了基于已知参数计算得到的理想控制限 h , 如表3最后一行所示。模拟结果表明, I 阶段进行参数估计产生的误

差导致修正后的控制限普遍低于理想控制限。同时, 随着样本量 m 的增加, 修正后的控制限逐渐增大, 并逐步接近理想控制限。这一趋势表明, 样本量的增加显著提升了参数估计的准确

性，从而缩小了修正控制限与理想控制限之间的差距。

五、结论

由于在实际生产质量监控中，过程参数通常是未知的。因此系统研究了参数估计对二项分布的 CUSUM 控制图性能的影响，

并提出修正控制限。研究结果表明，I 阶段样本量增加时，参数估计的准确性相应增加，并且修正控制限逐步接近已知参数条件下的控制限。在未来的研究中可以考虑参数估计对二项分布 EWMA 控制图的影响，并计算修正控制限。

参考文献

- [1]Walter A Shewhart. Some applications of statistical methods to the analysis of physical and engineering data. Bell System Technical Journal, 3(1):43 – 87, 1924.
- [2]Ewan S Page. Continuous inspection schemes. Biometrika, 41(1/2):100 – 115, 1954.
- [3]Stuart W Roberts. Control chart tests based on geometric moving averages. Technometrics, 42(1):97 – 101, 2000.
- [4]James M Lucas. Cumulative sum (cusum) control schemes. Communications in Statistics.
- [5]FF Gan. An optimal design of cusum control charts for binomial counts. Journal of.
- [6]Willis A Jensen, L Allison Jones–Farmer, Charles W Champ, and William H Woodall. Effects of parameter estimation on control chart properties: A literature review. Quality control and applied statistics, 52(3):245 – 248, 2007.
- [7]Stelios Psarakis, Angeliki K Vyniou, and Philippe Castagliola. Some recent developments on the effects of parameter estimation on control charts. Quality and Reliability Engineering International, 30(8):1113 – 1129, 2014.
- [8]Ronald JMM Does, Rob Goedhart, and William H Woodall. On the design of control charts with guaranteed conditional performance under estimated parameters. Quality and Reliability Engineering International, 36(8):2610 – 2620, 2020.
- [9]陶桂洪, 宋赞, 刘强. 基于参数估计的 CUSUM 质量控制图性能分析 [J]. 大连工业大学学报, 2018, 37(06):489–496.
- [10]Fan Yi and Peihua Qiu. An adaptive cusum chart for drift detection. Quality and Reliability Engineering International, 38(2):887 – 894, 2022.

