

环境与生态

Environment and Ecology



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



Editorial Board Member

Guobin Lv

Harbin Natural Resources Comprehensive Survey Center of China
Geological Survey

Zhen Da

Ngari Prefecture Gar County Emergency Management Bureau (Natural
Disaster Prevention and Rescue Center)

Shuai Yu

Hebei Province geological mineral exploration and development
Bureau second geological brigade(Hebei Province mine environmental
remediation technology center)



环境与生态

Environment and Ecology

(双月刊)

第2卷 第6期 2025年12月刊

主管 ART AND DESIGN PRESS INC.

主办 ART AND DESIGN PRESS INC.

编辑 《环境与生态》编辑部

ISSN(O): 2998-9108

ISSN(P): 2998-9094

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:

1. 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。
2. 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。
3. 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。
4. 论文未曾以任何形式公开发表过。
5. 作者所投本刊稿件, 本刊编辑部拥有修改权。

- 001 环境监测技术在环境保护工程中的应用研究 李佩楠, 门文丽, 席晓冬
Application research of environmental monitoring technology
in environmental protection engineering Li Peinan, Men Wenli, Xi Xiaodong
- 004 大数据驱动的耕地保护动态监测与风险预警体系构建 刁云浩, 孙月
Construction of a Big Data-Driven Dynamic Monitoring and Risk
Early Warning System for Farmland Protection Diao Yunhao, Sun Yue
- 007 城市道路五角枫病害——辐照度温度和树皮灼伤调查研究 张真, 夏浩桐
Disease of five-angled maple in urban roads
— investigation of irradiance, temperature and bark burn Zhang Zhen, Xia Haotong
- 011 山西五台清水河流域水资源承载力评价与可持续
发展对策研究 王旭, 吕国斌, 赵国强, 高晓龙, 徐喆,
崔盛研, 刘飞翔, 刘昌吉
Research on the Evaluation of Water Resources Carrying Capacity and
Sustainable Development Strategies in the Qingshui River Basin
of Wutai, Shanxi Wang Xu, Lv Guobin, Zhao Guoqiang, Gao Xiaolong,
Xu Zhe, Cui Shengyan, Liu Feixiang, Liu Changji
- 014 国土资源变更国家级外业核查质量控制与误差分析策略 顾成龙, 付国猛
Quality Control and Error Analysis Strategies for National Field
Verification of Land and Resources Changes Gu Chenglong, Fu Guomeng
- 017 理化方向环境监测中 COD 测定实验的改进与创新 欧阳庆亮
Improvement and Innovation of COD Measurement Experiment in Physical and
Chemical Environmental Monitoring Ouyang Qingliang
- 020 数字化赋能基建扬尘与噪声污染精准防控技术应用 魏彬
Digital Empowerment for Precision Control Technology Applications
in Construction Dust and Noise Pollution Wei Bin
- 023 生态约束与“双碳”目标驱动下内蒙古文旅产业绿色转型的管理创新 黄晓晨
Management Innovation for the Green Transformation of Inner
Mongolia's Cultural and Tourism Industry Driven by Ecological
Constraints and the "Dual Carbon" Goals Huang Xiaochen
- 028 豆类加工废弃物资源化利用研究进展 付龙云, 王保运, 王祥峰
Research Progress on the Resource Utilization
of Legume Processing Wastes Fu Longyun, Wang Baoyun, Wang Xiangfeng
- 031 城市公园夜景照明工程施工对环境的影响及综合治理
对策研究——以鞍山市万水河公园夜景照明为例 李晓琳, 齐思龙
Research on the Environmental Impact and Comprehensive Management Strategies
of Nightscape Lighting Project Construction in Urban Parks — A Case Study of the
Nightscape Lighting in Wanshui River Park, Anshan City Li Xiaolin, Qi Silong
- 035 吐鲁番生态修复与坎儿井保护协同机制研究 周建成
Study on the Synergistic Mechanism of Ecological Restoration
and Karez Protection in Turpan Zhou Jiancheng
- 038 基于生态红线约束的国土资源管控路径研究 顾成龙, 付国猛
Research on the Path of Territorial Spatial Planning Control Based
on Ecological Red Line Constraints Gu Chenglong, Fu Guomeng
- 041 污泥焚烧工艺优化及污染物控制研究 谷奋
Research on Optimization of Sludge Incineration Process
and Pollutant Control Gu Fen

044	基于环保达标的垃圾焚烧烟气多污染物协同控制技术管理策略 Management Strategy of Multi Pollutant Collaborative Control Technology for Waste Incineration Flue Gas Based on Environmental Standards	杨智彬 Yang Zhibin
047	生态环境工程中废水处理工艺的技术管理与风险防控 Technical Management and Risk Prevention of Wastewater Treatment Processes in Ecological Environment Engineering	侯志明 Hou Zhiming
050	零散工业废水处理技术研究及工程应用 Research and Engineering Application of the Treatment Technology of Scattered Industrial Wastewater	陈梓晟 Chen Zisheng
053	生态环境工程领域生活垃圾填埋场与转运站建设运营管理的实践探索 Practical Exploration of Construction, Operation and Management of Domestic Waste Landfills and Transfer Stations in the Field of Ecological Environment Engineering	麦守廉 Mai Shoulian
056	基于环境工程视角的城市排水运维与水环境治理协同模式 Collaborative Model of Urban Drainage Operation And Maintenance and Water Environment Governance Based on Environmental Engineering Perspective	余昀 Yu Yun

环境监测技术在环境保护工程中的应用研究

李佩楠, 门文丽, 席晓冬

内蒙古第三地质矿产勘查开发有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010000

DOI:10.61369/EAE.2025060001

摘 要 : 环境监测技术是环境科学的关键部分, 运用科学方法和手段对环境要素进行定期或不定期监测, 全面、系统地收集大气、水体、土壤、噪声、振动及生态环境等多方面的环境质量数据和信息。它利用精密设备和科学方法实时或定期获取环境状况数据, 为环境保护提供坚实支撑。在环保、污染治理和可持续发展中, 环境监测技术分别扮演“守护者”“侦察兵”和“智囊团”的角色, 通过监测环境质量、追踪污染物、评估人类活动影响, 为政策制定、污染治理和可持续发展战略提供科学依据和指导。

关 键 词 : 环境监测技术; 环境保护; 大气污染; 水质监测; 土壤污染

Application research of environmental monitoring technology in environmental protection engineering

Li Peinan, Men Wenli, Xi Xiaodong

Inner Mongolia Third Geological Mineral Exploration and Development Co., LTD., Hohhot, Inner Mongolia 010000

Abstract : Environmental monitoring technology is a crucial part of environmental science. It employs scientific methods and means to conduct regular or irregular monitoring of environmental elements, comprehensively and systematically collecting environmental quality data and information across various aspects such as the atmosphere, water bodies, soil, noise, vibration, and ecological environments. Leveraging sophisticated equipment and scientific methods, it obtains real-time or periodic data on environmental conditions, providing solid support for environmental protection. In the fields of environmental protection, pollution control, and sustainable development, environmental monitoring technology serves as a "guardian," "scout," and "think tank," respectively. By monitoring environmental quality, tracking pollutants, and assessing the impacts of human activities, it offers scientific evidence and guidance for policy formulation, pollution control, and sustainable development strategies.

Keywords : environmental monitoring technology; environmental protection; atmospheric pollution; water quality monitoring; soil pollution

环境监测技术在环境保护工程中发挥着重要作用。该技术通过物理、化学和生物监测方法, 全面系统地收集大气、水体、土壤、噪声及振动等多方面的环境质量数据。在大气环境监测中, 重点监测 PM2.5、SO₂、NO_x等污染物及温室气体; 水环境监测关注水质参数如 pH 值、溶解氧和重金属离子; 土壤环境监测则聚焦于重金属和有机污染物; 噪声及振动环境监测则确保居民生活质量和建筑物安全。环境监测技术通过动态数据采集与智能分析, 为污染防控和生态评估提供了科学基础, 其应用深度直接影响环境保护工程的实效性。

一、环境监测技术的主要技术分类

环境监测技术在环境保护工程中主要可分为以下几类技术方法: 物理监测技术, 利用物理性质(如声、光、热、电等)监测环境污染物, 例如噪声监测、电磁辐射监测等。噪声监测中常用的技术包括声级计法、频谱分析法等。化学监测技术, 通过化学分析方法(如滴定法、分光光度法、色谱法、质谱法等)测定污染物的成分和含量。例如水质监测中的化学指标检测、土壤污染

监测中的痕量分析等。生物监测技术, 利用生物对环境的响应(如生物体内污染物积累、生理生化变化、群落结构改变等)评估环境质量。例如通过指示生物评估生态健康, 或利用 eDNA 技术通过水样鉴定水生生物。自动化与遥感技术, 包括传感器与自动监测系统(实时监测空气质量、水质参数等)以及遥感监测技术(用于大范围环境变化监测)。这类技术正朝着智能化、便携化、综合化的方向发展。这些技术方法覆盖了从现场快速检测到实验室精密分析, 从单一污染物监测到多要素综合评估的多种需求,

为环境保护工程提供了全面的数据支持。

二、工业排污智能监控

工业排污智能监控系统是现代环境治理的重要手段，通过集成传感器、物联网、大数据和人工智能等技术，实现了对工业排污的实时、精准和智能化管理。核心技术与功能，现代工业排污智能监控系统通常包含以下核心模块：多参数水质检测仪：可同步监测流量、pH值、溶解氧、COD、氨氮、重金属等15-20项关键指标，检测精度可达实验室级别（如COD检测精度 $\pm 2\text{mg/L}$ ，重金属检测限低至 0.001mg/L ）。VOC在线监测系统：采用气相色谱（GC）、光离子化（PID）等技术，对挥发性有机物进行实时监测，支持污染溯源和应急响应。智能闸控系统：通过联动电动阀门与水质数据，实现超标自动禁排、雨水切换等闭环控制，支持Modbus、MQTT等工业协议。边缘计算与云端平台：结合AI算法进行数据清洗、异常预警（如藻类预测准确率92%）和工艺优化，部分案例显示可降低30%污泥处理成本。应用场景与优势，工业园区：构建“水陆空”立体监测网，通过5G+北斗技术实现污染扩散模拟精度达95%，事故响应时间缩短12小时。城市管网与农业退水：覆盖全领域监测，便携式设备支持 -20°C 至 60°C 宽温工作，适用于突发污染现场。数据可信与溯源：区块链技术确保水质数据不可篡改，为环境诉讼提供可信依据。技术发展趋势，未来系统将向更高智能化、多技术融合（如光谱+生物传感）和云端物联方向发展，纳米传感器技术可使设备体积缩小至传统1/5，功耗降低70%。

三、环境监测技术在环境保护工程中的具体应用

1. 环境污染预防与评估。环境监测技术在环境保护工程中的应用贯穿于环境污染预防与评估的全过程，其核心作用体现在以下方面：环境污染预防，实时监测与预警，通过空气质量监测站、水质自动监测站等设备，对PM2.5、SO₂、NO_x、pH值、重金属等关键污染物进行实时监测，结合激光雷达和卫星遥感技术，实现污染源追踪与扩散预测。例如，工业废气排放口安装的CEMS系统可实时监控污染物浓度，防止超标排放。污染源精准管控，利用无人机搭载传感器巡检无组织排放，结合声学多普勒流速剖面仪分析水污染迁移规律，从源头减少污染产生。土壤监测中，电磁感应技术可快速定位重金属污染区域，指导修复工作。环境质量评估，多介质综合监测，覆盖大气、水体、土壤、噪声等介质，通过实验室分析（如气相色谱仪）与在线监测结合，量化污染物浓度及生态影响。例如，生物监测通过藻类变化反映水体富营养化程度。数据驱动决策支持，监测数据为环评报告（如《建设项目竣工环境保护验收技术规范》）提供依据，验证环保设施效果，并优化监测网络布局与频率^[1]。重庆市通过社会监测机构信用管理提升数据可靠性。技术优化方向，设备升级：采用新型传感器和遥感技术提高精度；数据整合：构建物联网平台实现多源数据融合分析；法规完善：强化监测标准与第三

方监督机制。

2. 环境执法与政策制定。环境监测技术在环境保护工程中的应用已形成多维度支撑体系，环境执法中的技术应用。精准溯源与证据固定，通过卫星遥感、无人机航拍、走航监测等技术手段，可快速锁定污染源位置并获取关键证据。例如利用暗管探测仪查处非法排污案件，红外成像仪精准定位隐蔽污染设施。上海市将非甲烷总烃等新型污染物纳入自动监测执法范围，依托标记规则强化排污单位主体责任。智能化执法装备体系，移动执法终端、手持式重金属分析仪等设备实现现场快速检测，结合激光雷达扫描和大气颗粒物溯源技术，提升执法效率。柳州市通过走航车实时分析污染分布，为重污染天气应对提供数据支撑。政策制定的数据支撑，监测网络与标准建设，国家推动“天空地海一体化”监测网络建设，通过人工智能、区块链等技术实现数据全流程智能化管理，确保监测数据“真、准、全、快、新”。县建成覆盖乡镇的空气质量监测站，数据直接用于考核排名和政策调整。数智化转型与决策优化，生态环境部要求加速监测体系数智化转型，利用大数据分析提升污染预警和成因研判能力，推动从现状监测向精准溯源转变。整合多平台数据构建综合执法一体化系统，实现执法全流程留痕和业务协同。典型案例与法规完善，数据造假治理：省公布多起监测数据造假案例，强化法律威慑力。技术规范更新：上海市修订自动监测数据执法应用规定，明确非甲烷总烃等新指标的法律效力。环境监测技术通过实时数据采集、智能分析和跨平台整合，已成为环境执法“利器”和政策制定的科学基石。

3. 技术融合与创新。环境监测技术在环境保护工程中的技术融合与创新主要体现在以下方面：数智化技术深度整合，5G+物联网应用：通过5G网络实现危岩体位移、倾斜等数据的实时传输与预警，构建“人防+技防”监测体系。已实现环境空气、地表水等要素的自动监测全覆盖，并运用AI实验室将样品分析效率提升5倍。AI与大数据分析：甘肃省建成生态环境监测大数据平台，整合6600万条数据支撑污染精准治理；亚运会期间通过数字孪生技术实现环境质量精准保障。新型监测技术突破，环境DNA技术：通过水体/空气采样获取生物足迹，实现无干扰生态监测。卫星遥感与无人机：国家构建“天空地海”一体化监测网络，覆盖3.3万个点位。跨领域技术融合，区块链与隐私计算：2024年国家推进数字可信技术在数据安全中的应用。高性能传感器：重庆铁塔项目采用UWB超宽带技术实现危岩体毫米级位移监测。区域创新实践，模式：开发“生态环境大脑”，集成200亿条数据，首创水质监测机器狗。建成7000余个监测点位，形成“省级统筹+市县联动”协同机制。这些创新推动环境监测从传统人工采样向自动化、智能化转型，为污染防治和生态保护提供精准支撑。

4. 人才培养与规范实施，环境监测技术在环境保护工程中扮演着至关重要的角色，其应用、人才培养与规范实施是推动环保事业发展的核心要素。环境监测技术的应用领域，环境监测技术广泛应用于环境保护工程的各个环节，主要包括：水环境监测：对地表水、地下水、废水等水质进行采样、分析及评价，为水污染治理提供数据支持。大气环境监测：监测空气质量、废气排放

等，助力大气污染防治。土壤与固废监测：评估土壤污染状况及固体废物处理效果，支撑土壤修复工程。自动监测系统运维：对环境自动监测设备进行日常运行维护，确保数据实时准确。人才培养体系，环境监测技术专业旨在培养高素质技术技能人才，其培养体系具有以下特点：培养目标：德智体美劳全面发展，掌握环境监测、污染治理及环保设施运营管理知识，具备采样、检测分析、报告编制等能力。课程体系：核心课程包括《水和废水监测》《空气与废气监测》《环境监测质量管理》等，覆盖水、气、土、噪声等关键领域。实践教学：构建“课程实践-集中实训-顶岗实习”的实践体系，强化仪器操作、样品采集及数据分析等技能。职业面向：毕业生可从事环境监测、化学检验、环保设施运维等工作，初始岗位包括采样管理、污染指标监测等，发展岗位可向环境质量管理、环保设计等方向迁移。规范实施与行业标准，规范实施是保障环境监测数据准确性和公信力的关键：技术规范：遵循《环境监测技术规范》等标准，明确采样方法、分析流程及质量控制要求。新标准应用：如 VOCs 监测、固定源废气监测等新标准的实施，推动监测技术升级^[2]。人才队伍建设：国家计划到2025年生态环境监测人才总量达20万人，本科以上学历占比超80%，以支撑先进监测预警体系建设。

四、技术发展趋势

环境监测技术在环境保护工程中的发展趋势正朝着智能化、自动化和网络化方向快速演进，为环境治理提供更精准、高效的技术支撑。

1. 智能化与自动化。现代环境监测技术正经历显著的智能化变革。通过应用人工智能、机器学习和物联网技术，监测系统已实现从数据采集到分析的全程自动化。例如，水质预警系统可实时监测管网水质，遥感技术结合机器学习能实现从天空到地面的全方位监测，大幅提升监测精度和效率。生态环境部也明确提出要加快“人工智能+”等新技术在监测领域的应用，以精准识别

问题来源。

2. 网络化与集成化。通过物联网传感器和区块链技术，环境监测正从孤立站点向集成化网络发展。整条流域的数据可实现实时共享，区块链技术则确保数据不可篡改，有效杜绝造假可能。国家政策要求到2030年建成覆盖全国的“天地空一体化”监测网络，实现环境质量、污染源和生态状况全要素监测。

3. 多参数与多尺度监测。环境监测技术正朝着多参数、多尺度的方向发展。在大气监测领域，激光雷达与卫星遥感技术使污染源从“小时级”提升至“分钟级”；水质监测中，微型光谱分析仪降低了多参数检测成本；土壤监测则采用量子点荧光传感技术提升重金属检测精度。这些技术进步支撑了从近岸到远海、从城市到乡村的全方位监测需求。

4. 政策驱动与标准提升。国家政策是技术发展的重要推动力。例如，国家明确要求到2025年地表水优良率需提升，PM2.5浓度需下降，这些硬指标倒逼监测技术升级。各地也出台了详细规范，如安徽省专门制定了变电工程监测标准，对电磁和噪声等指标进行严格监控。面临的挑战，尽管技术发展迅速，但仍面临一些挑战，包括高端设备依赖进口导致成本高昂、专业人才短缺、数据处理复杂性等。未来技术发展将致力于提升运行效能、降低经济成本并解决数据处理难题。环境监测技术的这些发展趋势，正在推动环境保护工程从传统治理向精准化、智慧化转型，为美丽中国建设提供坚实的技术保障。

总之，环境监测技术作为环境保护工程的核心支撑，通过实时、精准的数据采集与分析，正在推动环境管理从“被动治理”向“主动防控”转型。环境监测技术为环保工程提供了坚实的数据支撑，全面助力污染治理与保护决策。展望未来，该技术将持续进化，为生态文明建设与可持续发展注入更强动力。环境监测技术通过精准监测为环保工程提供科学依据，其人才培养需结合理论与实践，规范实施则依赖行业标准与技术创新。随着“双碳”目标推进，该领域将持续向智能化、绿色化发展。

参考文献

- [1] 刘浩宇. 环境监测技术在环境保护工程中的应用 [J]. 皮革制作与环保科技. 2024, 5(9)122-124.
[2] 王景阳. 环境监测技术在环境保护工程中的应用探讨 [J]. 现代装饰. 2022, 512(15)66-68.

大数据驱动的耕地保护动态监测与风险预警体系构建

刁云浩^{1,2}, 孙月^{1,2}

1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 黑龙江 哈尔滨 150086

2. 自然资源部哈尔滨黑土地地球关键带野外科学观测研究站, 黑龙江 哈尔滨 150086

DOI:10.61369/EAE.2025060002

摘 要 : 为实现耕地“数量—质量—生态”三位一体保护目标, 解决耕地利用动态监管不及时、风险预警不精准等问题, 本文构建了大数据驱动的耕地保护动态监测与风险预警体系。体系采用“数据—技术—应用—保障”四层递进式架构, 以“数据驱动—智能分析—精准预警—闭环处置”为运行机制, 通过整合遥感、地理、实地监测及多部门业务等多源异构数据, 经预处理、标准化与分级融合治理构建高质量数据资源池; 进而搭建耕地数量变化、质量演变、生态状况三维动态监测模型, 实现对耕地利用全维度精准感知; 在此基础上, 识别四大核心风险因子, 构建“目标层—准则层—指标层”三级预警指标体系, 结合多模型协同运算与分级分类预警机制, 形成全流程闭环风险防控体系。该体系打通了跨部门数据壁垒, 提升了耕地保护监测的时效性与预警的精准性, 能够为耕地保护政策制定、精准管控及科学决策提供有力的数据支撑与技术保障。

关 键 词 : 耕地保护; 动态监测; 风险预警; 大数据

Construction of a Big Data-Driven Dynamic Monitoring and Risk Early Warning System for Farmland Protection

Diao Yunhao^{1,2}, Sun Yue^{1,2}

1. Harbin Natural Resources Survey, China Geological Survey, Harbin, Heilongjiang 150086

2. Observation and Research Station of Earth Critical Zone in Black Soil, Harbin, Ministry of Natural Resources, Harbin, Heilongjiang 150086

Abstract : To achieve the trinity protection goal of "quantity-quality-ecology" for farmland and address issues such as untimely dynamic supervision of farmland utilization and imprecise risk early warning, this paper constructs a big data-driven dynamic monitoring and risk early warning system for farmland protection. The system adopts a four-tier progressive architecture of "data-technology-application-guarantee" and operates on the mechanism of "data-driven-intelligent analysis-precise early warning-closed-loop disposal". By integrating multi-source heterogeneous data from remote sensing, geography, field monitoring, and multi-departmental operations, a high-quality data resource pool is constructed through preprocessing, standardization, and hierarchical fusion governance. Subsequently, three-dimensional dynamic monitoring models for farmland quantity changes, quality evolution, and ecological conditions are established to achieve precise perception of the full dimensions of farmland utilization. On this basis, four core risk factors are identified, and a three-tier early warning indicator system of "objective layer-criterion layer-indicator layer" is constructed. Combined with multi-model collaborative computation and a hierarchical classification early warning mechanism, a full-process closed-loop risk prevention and control system is formed. This system breaks down inter-departmental data barriers, enhances the timeliness of farmland protection monitoring and the precision of early warning, and provides robust data support and technical guarantees for formulating farmland protection policies, precise management and control, and scientific decision-making.

Keywords : farmland protection; dynamic monitoring; risk early warning; big data

引言

当前我国耕地保护面临着“非农化”“非粮化”蔓延、土壤质量退化、生态风险加剧等多重挑战, 叠加跨区域、跨部门数据壁垒突

依托单位: 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心。依托项目: 全国国土变更调查国家级外业核查(哈尔滨中心), 项目编号: DD20230517; 自然资源部哈尔滨黑土地地球关键带野外科学观测研究站, 黑龙江 哈尔滨 150000。

出、传统监测手段时效性不足、风险预警精准度欠缺等问题，导致耕地动态变化难以及时捕捉、潜在风险难以提前预判，严重制约了耕地保护的精细化管控水平。基于此，本文聚焦耕地保护的现实需求与技术瓶颈，构建大数据驱动的耕地保护动态监测与风险预警体系。研究将整合多源异构耕地数据，搭建三维协同监测模型，建立科学高效的风险预警机制，旨在打破跨部门数据壁垒，提升耕地保护监测的实时性、预警的精准性与处置的闭环性，为耕地保护政策制定、精准管控及科学决策提供技术支撑与实践参考，助力筑牢国家粮食安全与生态安全双重屏障。

一、体系总体架构设计

（一）设计原则

探索实现数量、质量、生态三位一体的耕地保护格局，必要前提是全面及时地掌握耕地利用情况。实施统一标准的动态监测，监测成果既是支撑政策制定实施的数据基础，也是监督政策落实成效的考核依据^[1]。该体系以精准为导向，依托大数据、遥感等成熟技术，构建耕地“数量-质量-生态”三维协同保护平台，实现全流程精准监测与高效预警。通过打通跨部门数据壁垒来促进管理协同，同时预留灵活接口以支持动态迭代，并建立全流程安全防护机制，确保体系先进、实用、安全且可持续。

（二）体系总体框架

体系采用“数据-技术-应用-保障”四层递进式架构，构建全链条、闭环式耕地保护动态监测与风险预警系统^[2]。数据层整合遥感、地理、监测及业务等多源数据，形成统一资源池；技术层提供数据处理、动态监测、风险预警及智能分析等核心能力；应用层面向政府、基层和公众，提供监测看板、任务派发、政策宣传等场景化服务；保障层则从制度、技术和人才三方面确保体系稳定运行与持续优化。

（三）体系运行机制

体系构建“数据驱动-智能分析-精准预警-闭环处置”的全流程运行机制，确保各环节高效协同、无缝衔接。通过“实时+定期+按需”模式采集数据，结合“批量+实时+预测”方式进行分析，实现动态感知与趋势研判^[3]。建立分级分类预警机制，通过多渠道定向推送预警信息，确保责任主体快速响应。形成“预警-核查-整改-销号”的闭环管理，并持续反馈优化，不断提升体系的精准性与适应性。

二、多源异构耕地大数据融合治理

（一）数据来源与分类

多源异构耕地大数据涵盖空间、属性、实时监测等多维度信息，其来源广泛且类型多样，为耕地动态监测与风险预警提供全面的数据支撑^[4]。以卫星和无人机影像为核心的遥感数据，提供空间分布与变化信息；来自GIS平台的地理空间数据，作为统一空间基准；通过物联网和人工调查获取的实地监测数据，反映土壤、气象等实时状况与种植属性；以及来自多部门的业务管理数据，记录执法、整治等管理动态。这些数据被分类纳入结构清晰的数据库，共同构建了一个覆盖全面的耕地大数据资源池。

（二）数据预处理与标准化

为解决多源数据格式不一、尺度各异、质量参差不齐的异构问题，需通过系统的预处理与标准化流程提升数据质量与兼容

性^[5]。数据清洗环节，采用统计分析、异常检测算法剔除传感器故障、人为记录误差等导致的异常值，通过插值法、回归分析等方法填补缺失数据，修正数据采集过程中产生的系统误差与随机误差，确保数据的准确性与完整性；格式转换针对不同数据源的异构格式，采用统一的数据格式标准进行批量转换，实现数据格式的一致性；坐标统一是空间数据预处理的核心，所有空间相关数据均采用国家统一的2000国家大地坐标系与1985国家高程基准，通过坐标转换算法完成不同坐标系数据的精准匹配，保障空间数据叠加分析与空间关联挖掘的准确性；指标标准化针对不同数据源中监测指标的单位差异与尺度差异，采用极差标准化、Z-score标准化等方法将指标值转换至统一区间，消除量纲影响，为多指标综合分析与模型运算提供统一的数据基础；通过数据质量校验环节，从完整性、准确性、一致性、时效性四个维度建立校验指标体系，对预处理后的数据进行全面审核，不合格数据返回重新处理，确保进入数据资源池的所有数据均满足后续融合与分析的要求。

（三）数据融合与治理技术

多源异构耕地大数据的有效融合与规范治理是体系高效运行的核心技术支撑，通过分层融合与全流程治理构建高质量数据应用基础^[6]。数据融合采用“数据级-特征级-决策级”三级体系，通过空间配准与像素叠加形成基础数据集；运用机器学习提取并整合核心特征以提升信息有效性；再基于模糊评价等方法交叉验证决策结果，精准识别耕地“非农化”等真实情况^[7]。同时数据治理技术覆盖全生命周期，利用分布式存储与云计算处理海量数据，借助区块链建立数据溯源与安全共享机制，并通过AI算法自动优化数据质量，以标准规范体系形成“采集-应用-优化”的闭环管理，确保耕地大数据的规范、安全与高效利用。

三、耕地“数量-质量-生态”动态监测模型构建

（一）耕地数量变化动态监测

耕地数量变化动态监测模型以“空间精准识别+时序动态追踪+合规性校验”为核心，整合多源数据与先进算法实现对耕地数量增减、空间转移及利用合规性的全方位监测^[8]。模型融合高分辨率遥感影像与GIS规划数据，通过“传统算法+机器学习”技术，精准捕捉并分类耕地转为建设用地、林地或“非粮化”等变化。模型通过空间叠加分析自动比对规划，标记违规行为，并构建时序序列动态追踪演变趋势，生成包含位置、面积、类型、时间及合规状态的详细台账，实现从“静态统计”到“动态监管”的转变，为耕地保护提供精准数据支撑。

（二）耕地质量动态监测

耕地质量动态监测模型基于“多维度指标整合+时空异质性适配+动态等级更新”的设计思路，构建涵盖土壤理化属性、耕

作条件、产出能力三大维度的综合评价体系,实现对耕地质量等级演变的精准捕捉与趋势预判^[9]。模型采用层次分析法与熵权法组合赋权,以综合指数法计算得分并依据国家标准划分等级,同时利用时序数据挖掘技术精准捕捉质量演变趋势并识别关键影响因素。此外,模型内置区域适配模块,通过调整权重与标准提升不同场景下的监测精度,最终生成动态评价报告,为耕地提质改造和精准施肥等提供靶向指导。

（三）耕地生态状况监测

耕地生态状况监测模型聚焦生态系统健康、风险防控与服务价值三大目标,整合多源生态环境数据,融合RSEI、RUSLE及InVEST等生态模型,实现对耕地健康状况、水土流失强度及生态服务价值的动态评估^[10]。模型通过模糊综合评价法量化土壤污染、生物多样性减少等生态风险等级,并结合时序分析追踪关键指标演变与污染扩散趋势,从而动态识别生态规律、评估修复效果,对风险区域及时预警,为耕地生态保护与农业绿色发展提供科学依据。

四、耕地保护风险预警模型与机制

（一）风险因子识别与指标体系构建

基于耕地“数量-质量-生态”三维动态监测成果,融合政策执行与社会经济等外部因素,通过文献梳理、实地调研和专家论证,系统识别耕地保护核心风险因子,构建了多层次、量化的风险预警指标体系。体系聚焦四大核心风险维度,数量安全风险(如非农化、非粮化、撂荒)、质量衰退风险(如土壤退化、污染)、生态安全风险(如水土流失、生物多样性减少)及政策执行风险(如监管不力、协同不畅)。据此构建了“目标层-准则层-指标层”三级结构,目标层为综合风险,准则层对应四大维度,指标层则选取耕地非农化率、土壤重金属超标率等可量化指标。指标筛选遵循科学、可操作、敏感原则,通过层次分析法与熵权法组合赋权确定权重,并结合国家标准、区域特征和历史数据设定预警阈值,形成一套标准化、规范化的风险预警体系,为耕地保护风险评估提供量化依据。

（二）风险评估模型构建

依托大数据与智能算法,构建“多源数据融合-多模型协同运算-时空动态评估”的耕地保护风险评估模型,以实现风险的精准量化与趋势预判。模型整合耕地数量、质量、生态及政策等多源异构数据,采用“熵权-模糊综合评价法与BP神经网络”协同架构进行核心运算,利用熵权法与模糊综合评价法计算各维度及综合风险指数,再将结果输入BP神经网络模型进行训练优化,提升评估精准度。针对风险的时空特性,模型结合GIS技术实现

风险空间可视化与高风险区定位,并运用时间序列分析预测未来风险演变趋势。输出单维度与综合风险等级、高风险区域分布图及风险趋势预测曲线,为预警决策提供直观、科学的量化支撑。

（三）风险预警机制设计

构建“分级预警-精准推送-协同响应-闭环优化”的全流程耕地保护风险预警机制,确保预警信息高效传递、风险处置及时到位。分级预警机制基于风险评估结果,严格遵循“阈值对应-等级匹配”原则,将耕地保护风险划分为蓝色、黄色、橙色、红色四级,明确各级风险的量化阈值、判定标准及响应时效。精准推送机制依托体系应用层的多终端服务平台,按“责任主体层级+风险类型”定向推送预警信息,省级管理部门接收区域综合风险预警,县级及乡镇部门获取辖区内具体地块的风险详情,农户及经营主体接收地块级风险提示,推送内容包含风险等级、涉及地块、风险因子、处置建议及责任时限,同时通过体系平台、移动执法APP、短信、政务专线等多渠道同步发布,确保信息直达。协同响应机制建立跨部门联动体系,明确自然资源部门负责耕地数量风险处置、农业农村部门牵头质量提升与种植规范、生态环境部门主导生态污染治理,形成“监测预警-任务分派-联合处置-结果上报”的协同工作流程,针对不同等级预警制定差异化响应措施。闭环优化机制通过跟踪预警响应全过程,收集风险处置结果与后续动态监测数据,建立“预警-处置-监测-反馈”的闭环管理,定期分析预警准确率、响应及时率、处置完成率等指标,结合耕地保护政策调整与风险演变特征,动态优化预警指标阈值、模型参数及响应流程,持续提升预警机制的适配性与有效性,实现耕地保护风险的前瞻性防控与精细化管理。

五、结束语

本文围绕耕地保护精细化、智能化管控需求,针对传统监测手段滞后、风险预警不精准、跨部门协同不足等痛点,构建了大数据驱动的耕地保护动态监测与风险预警体系。研究通过整合多源异构耕地数据,搭建“数据-技术-应用-保障”四层架构与“数量-质量-生态”三维协同监测模型,建立“识别-评估-预警-处置”全流程闭环风险防控机制,实现了耕地保护从“静态统计”向“动态监管”、从“被动应对”向“主动预警”的转变,为破解耕地保护数字化难题提供了系统性解决方案。未来可基于本研究构建的体系框架,进一步深化多源数据融合的深度与广度,结合人工智能、物联网等技术升级监测与预警模型,增强对复杂场景的适应能力。

参考文献

[1] 魏媛,郑少兰,王海云.基于RS的广东省耕地保护动态监测技术体系研究[J].测绘与空间地理信息,2023,46(10):39-42,46. DOI:10.3969/j.issn.1672-5867.2023.10.012.
[2] 左建波.基于物联网及地理国情监测下的耕地保护动态监测系统研究[D].安徽:安徽农业大学,2015.
[3] 金雨泽,徐智颖,钟太洋,等.我国土地利用动态监测的耕地保护效果评价[J].地域研究与开发,2016,35(5):120-123. DOI:10.3969/j.issn.1003-2363.2016.05.021.
[4] 孙伟东.耕地质量动态监测在耕地保护中的作用[J].中国科技投资,2017(20):333. DOI:10.3969/j.issn.1673-5811.2017.20.319.
[5] 洪士林,王艳华.耕地质量动态监测在耕地保护中的作用[J].现代农业科技,2015(5):234-235,250. DOI:10.3969/j.issn.1007-5739.2015.05.146.
[6] 洪士林,王艳华.基于耕地质量动态监测的耕地保护路径思考[J].农业灾害研究,2015,5(4):36-37,57.
[7] 马俊.我国土地利用动态监测的耕地保护效果分析[J].农业科技与信息,2020(13):33-35. DOI:10.3969/j.issn.1003-6997.2020.13.014.
[8] 莫秋玉.城厢镇耕地资源动态监测与保护策略研究[J].数字化用户,2024(34):17-18.
[9] 柳阳.吉林省典型黑土区耕地动态监测研究[D].吉林:吉林农业大学,2024.
[10] 孙桂清,季宏亮,赵玉杰.耕地智能监测及耕地保护开发[J].农业工程技术,2023,43(5):55-56. DOI:10.16815/j.cnki.11-5436/s.2023.05.019.

城市道路五角枫病害 ——辐照度温度和树皮灼伤调查研究

张真, 夏浩桐*

漯河市实验中学, 河南 漯河 462000

DOI:10.61369/EAE.2025060003

摘 要 : 为揭示城市道路五角枫西面树皮病害成因, 本研究以漯河市凌云山路783株五角枫为对象, 采用野外普查、树干多部位辐照度-温度同步监测及模拟实验方法分析。结果显示: 整体患病率62.6%, 98.2%病变集中于树干西面, 路西患病率(82.0%)极显著高于路东(55.6%, $P<0.01$), 且与西面日照时长正相关($r=0.98$, $P<0.01$)。西面峰值辐照度(674.3 W/m^2)、累计辐照量(11.10 MJ/m^2)及最高树皮温度(59.7°C)均显著高于南面, 16:00–17:00为辐照度-温度响应最敏感时段(系数 $13.55^\circ\text{C}/100\text{ W/m}^2$)。研究指出, “西晒强辐射+移栽胁迫+薄树皮结构缺陷”是树皮热损伤及真菌侵染的核心机制, 沥青路面反射热加剧路侧树皮灼伤。本研究填补了树干部位热损伤研究空白, 为城市行道树防护提供量化参考。

关 键 词 : 行道树; 五角枫; 热灼损伤; 西晒; 温度监测; 辐照度监测; 防护技术

Disease of five-angled maple in urban roads — investigation of irradiance, temperature and bark burn

Zhang Zhen, Xia Haotong*

Luohe Experimental Middle School, Luohe, Henan 462000

Abstract : To investigate the causes of bark lesions in five-angled maples along the western side of urban roads, this study analyzed 783 trees on Lingyunshan Road in Luohe City using field surveys, simultaneous monitoring of trunk irradiance-temperature profiles, and controlled experiments. Results showed: an overall disease prevalence of 62.6%, with 98.2% of lesions concentrated on the western trunk side. The western side exhibited significantly higher disease rates (82.0%) compared to the eastern side (55.6%, $P<0.01$), showing a strong positive correlation with western exposure duration ($r=0.98$, $P<0.01$). Western areas recorded higher peak irradiance (674.3 W/m^2), cumulative irradiation (11.10 MJ/m^2), and maximum bark temperature (59.7°C) than southern areas. The 16:00–17:00 period demonstrated the most sensitive irradiance-temperature response (coefficient $13.55^\circ\text{C}/100\text{ W/m}^2$). The study identified "intense western sunlight + transplant stress + thin bark structure" as core mechanisms causing bark thermal damage and fungal infection, with asphalt pavement reflection exacerbating bark scorching. This research fills a critical gap in trunk-side thermal damage studies, providing quantitative references for urban street tree protection.

Keywords : street trees; five-angled maple; thermal burn damage; western exposure; temperature monitoring; irradiance monitoring; protective technology

引言

行道树是城市生态系统核心, 五角枫因观赏性强、适应广成为北方主流行道树, 但病害频发影响其生态景观价值。早期研究多聚焦病虫害侵染与机械损伤, 章丽耀(2018)虽指出日灼与高温相关, 但未量化辐照度与温度动态响应。本研究以漯河市凌云山路五角枫病害为切入点, 通过“野外普查-精准监测-统计验证-量化分析”, 揭示病害空间分布规律及辐照度、树皮温度等驱动因子的因果关系, 提出“西晒强辐射+移栽胁迫+薄树皮结构缺陷”三因子交互机制, 为城市行道树热损伤防护提供量化依据与技术方案, 填补树干热损伤研究空白。

作者简介: 张真 (1984.02-), 女, 汉族, 河南漯河人, 本科, 中学一级教师, 从事中学教育工作和研究。

通讯作者: 夏浩桐。

一、研究区域与方法

（一）研究区域概况

研究区域位于河南漯河西城区凌云山路（33° 36′ N，114° 02′ E），南北走向，2022年春季移栽12年树龄五角枫，胸径11-16cm，树高3.1-4.5m。路宽24m，东侧3行、西侧2行（株行距3m×4m），沙壤土，常规养护。属温带季风气候，夏季炎热多雨，7-8月均温27-29℃，正午太阳辐照强度800-1000W/m²，符合北方城市夏季高温强辐射特征。

（二）研究方法

1.野外调查

由指导教师设计调查方案，师生8人于2025年1月13日开展全路区域普查，覆盖行道树783棵五角枫。病害树仅统计主树干发病C级、D级植株（依据《城市绿化树木日灼伤害分级标准》[章丽耀. 2018] C级为树皮局部开裂（面积<10 cm²），D级为树皮大面积脱落（面积≥10 cm²）或木质部裸露），采用“方向标记法”记录病变方位（精准标注树干东、西、南、北），按“路东3行、路西2行”划分样区，计算不同区域患病率。

2.辐照度与温度监测

样本选择：路东靠路选取1株胸径14cm、树高3.9m的患病五角枫，生长环境开阔无遮挡，无机械损伤，树冠完整，确保数据代表性。仪器设备：温度监测用衡水创纪玻璃气温计（±0.5℃）和电子温度计（±0.1℃）；辐照度监测用台湾TES 1333太阳能功率计（±5% W/m²）；同步每10分钟自动拍照记录。监测方案：2025年8月12日（无云无风典型高温晴天）9:00-18:00每10分钟采集数据。树干1.5m高处南、西面树皮嵌入温度传感器，同步监测环境气温；辐照计分别监测阳光直射、树干南面及西面辐照度，确保数据精准。

（三）数据处理与分析

采用Excel 2016整理监测数据，记录峰值辐照度（I）、累计辐照量（H）、最高树皮温度（T）、≥45℃高温持续时间等指标。使用SPSS 26.0软件进行统计分析，进行独立样本t检验（α=0.05），比较南、西面监测指标差异；P<0.05为差异显著，P<0.01为差异极显著。

二、结果与分析

（一）五角枫病害特征、空间分布与日照时长

1.五角枫病害特征

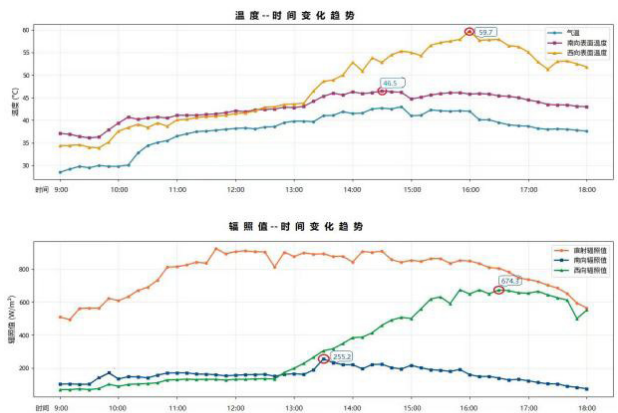
本次调查的783棵五角枫中，490棵存在主树干C级、D级树皮病变，整体患病率62.6%。病变树皮主要表现为：干枯开裂、翘起脱落，严重植株木质部裸露。半数以上（52.3%）出现木腐菌（如裂褶菌属、平菇属）感染，病变表面生长白色至浅灰色子实体，呈扇形或贝壳状，簇生或叠生，质地柔软，表面光滑

或有细小绒毛，边缘略卷曲，经鉴定为裂褶菌属（Schizophyllum commune）与平菇属（Pleurotus ostreatus）（如图）。



2.病变方位、区域差异与日照时长的关联

病变方位西侧倾向性显著：490株患病树中98.2%病变集中于树干西面，仅9株位于南面或西南面。区域分布差异明显：路西2行患病率82.0%，极显著高于路东3行平均水平55.6%（P<0.01）。路东3行患病率呈梯度分布（东→西：18.7%→57.8%→84.0%），与西侧日照时长（2h/d→3h/d→4h/d）极显著正相关（r=0.98，P<0.01）。路西2行无遮挡，西侧日照时长4.5h/d，患病率分别为84.7%（东侧靠路行）和79.6%（最西侧行），临路行高患病率推测与沥青路面反射热相关，符合“西晒强辐射+树荫遮挡差异”的病害驱动机制。



（二）树干南、西面阳光辐照度与树皮温度响应规律

1.辐照强度变化特征

连续监测数据显示，树干南、西面辐照度在日间呈现极显著差异（P<0.01），且差异具有时段特异性（表一）：

测量指标	西面数值	南面数值	差异值	统计显著性
峰值辐照度（W/m ² ）	674.3	255.2	419.1	P<0.01

测量指标	西面数值	南面数值	差异值	统计显著性
全天累计辐照量 (MJ/m ²)	11.1	5.18	5.92	P<0.01
13:00–15:00均值 (W/m ²)	369.5			P<0.01
15:00–18:00均值 (W/m ²)	621.1			
西面累计占比 (%)	85	58.9		

2. 树皮温度变化与辐照度响应

树皮温度与辐照度呈现高度同步变化趋势 ($r=0.92$, $P<0.001$) (表一), 且西面树皮温度对辐照度的响应更敏感。最高树皮温度: 西面 (16:00, 59.7℃) 较南面 (14:30, 46.5℃) 高 13.2℃ ($P<0.01$), 较环境最高气温 (14:50, 43.0℃) 高 16.7℃, 表明树皮温度升高主要受直接辐照而非环境气温影响; 高温持续时间: 西面 $\geq 45^\circ\text{C}$ 高温持续 4.7 h (13:20–18:00), 较南面 (3.2 h, 13:30–16:50) 多 1.5 h ($P<0.05$); 辐照度 – 温度响应系数: 16:00–17:00 系数最高 ($13.55^\circ\text{C} / 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$), 说明午后晚期 16:00–17:00 是树干西面树皮温度对辐照最敏感的时段, 也是树皮温度最高时段, 更是防护的关键窗口 (表二)。

时间段	辐照度变化 (W/m ²)	树皮温度变化 (°C)	响应系数 (°C / 100W / m ²)
13:00–14:00	150.6	6.4	4.25
14:00–15:00	123.4	4.4	3.57
15:00–16:00	173.9	3.6	2.07
16:00–17:00	25.1	3.4	13.55
17:00–18:00	165.8	3.8	2.29

三、讨论

城市行道树树皮灼伤与高温胁迫、真菌侵染的关联已有研究 (章丽耀, 2018; 刘卫佳, 2022), 但树干不同方位辐照度、温度及动态响应对病害空间分布的量化数据仍缺乏。本研究以漯河市凌云山路 783 株五角枫为对象, 通过连续 9 小时 (9:00–18:00, 每 10 分钟采样) 的多方位监测, 获取北方城市道路树木微观热环境核心数据, 为解析五角枫树皮灼伤成因提供直接量化支撑。

监测显示, 漯河五角枫树干西面峰值辐照度达 674.3 W/m^2 , 累计辐照量 11.10 MJ/m^2 , 最高树皮温度 59.7°C 。16:00–17:00 辐照 – 温度响应系数达 $13.55^\circ\text{C} / 100 \text{ W/m}^2$, 凸显午后西面强辐射与高温特征。热带树木热损伤阈值 $50\text{--}55^\circ\text{C}$ (Leers 等, 2025), 本研究西面树皮最高温 59.7°C 超阈值, 且 $\geq 45^\circ\text{C}$ 高温持续 4.7h (较南面多 1.5h)。数据验证了北方阔叶树热损伤机制, 并通过“方位特异性 + 时段敏感性”量化填补了城市道路树干微观热环境研究空白。

五角枫病害呈现“临路高发性”: 路东、西靠路行患病率分

别达 84.0%、84.7%, 显著高于非靠路区域, 这与沥青路面热辐射反射效应直接相关。Skelhorn 等 (2014) 指出, 夏季正午沥青路面温度 $60\text{--}70^\circ\text{C}$, 反射热可使局部环境升温 $2\text{--}3^\circ\text{C}$; 章丽耀 (2018) 亦证实硬铺装辐射热加剧树木热胁迫。本研究验证了路面热辐射的生态影响, 提出靶向防护方向——通过设置绿植缓冲带、采用透水铺装等措施削弱路面热反射, 降低树木热胁迫, 为城市行道树防护提供科学依据。

调查数据显示路东区域五角枫患病率呈现“ $18.7\% \rightarrow 57.8\% \rightarrow 84.0\%$ ”阶梯分布, 与西侧面日照时长梯度 ($2 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1} \rightarrow 3 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1} \rightarrow 4 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$) 完全吻合: 东西向叠加种植下, 午后西侧行树冠为东侧行树干遮阴, 减少西晒辐射量。这证实了“种植布局”的调控价值: 东西走向道路或带状种植更适合五角枫这类薄皮树种, 能通过相邻植株的自然遮阴降低西晒胁迫损伤。

五角枫病害真菌侵染机制显示: 高温损伤致树皮屏障破坏, 引发裂褶菌属与平菇属真菌入侵 (邓嘉茹等, 2025)。树皮损伤超 10 cm^2 + 真菌侵染时, 1 年死亡率达 80% (Terho M 等, 2007)。结合吴跃开等 (2011) “物理 + 生物防护”思路及叶广荣等 (2025) 木霉菌剂 (提升抗真菌能力 30%), 建议在 13:00–17:00 展开遮阳网, 形成“遮阴 + 生物防侵染”体系, 效果优于传统涂白。

移栽胁迫与薄树皮缺陷加剧五角枫热损伤风险: Davis 等 (2020) 指出移栽树根系损伤致水分吸收降 30%~50%, 削弱耐热性; 章丽耀 (2018) 发现移栽树树皮角质层不完整, 易受高温破坏。刘卫佳 (2022) 证实 $0.3\text{--}0.5 \text{ cm}$ 薄树皮导热系数高 25%~30%, 细胞坏死快 1.2 倍, 邓嘉茹等 (2025) 指出薄树皮木腐菌侵染率高 2~3 倍。西晒强辐射、移栽胁迫与薄树皮结构缺陷共同构成热灼损伤继发真菌侵染的核心机制, 导致五角枫易灼伤、染病。

本研究通过辐照度、温度与病害数据, 补充五角枫热损伤机制细节, 从“道路铺装影响”“种植布局调控”“精准防护实施”提供参考。后续可扩大样本验证路面反射热普适性, 细化种植分布、株行距与遮阴的量化关系, 探索木腐菌预防办法。

四、结论

病害特征与驱动因子: 漯河市凌云山路五角枫整体患病率 62.6%, 98.2% 病变集中于树干西面; 路西患病率 (82.0%) 极显著高于路东 (55.6%), 靠路行因沥青路面反射热 (局部升温 $2\text{--}3^\circ\text{C}$) 患病率达 84.0%~84.7%, 且患病率与西侧日照时长呈极显著正相关 ($r=0.98$, $P<0.01$)。

热环境关键数据: 树干西面峰值辐照强度 $674.3 \text{ W} \cdot \text{m}^2$ 、累计辐照量 11.10 MJ/m^2 、最高树皮温度 59.7°C , 16:00–17:00 为辐照 – 温度响应最敏感时段 (系数 $13.55^\circ\text{C} / 100 \text{ W} \cdot \text{m}^2$), 该数据填补北方城市道路树干微观热环境研究空白。

抵抗力下降机制：移栽胁迫（根系损伤 + 树皮角质层不完整）与薄树皮结构缺陷（0.3~0.5 cm，导热性高、抗真菌弱）协同作用，降低五角枫耐热与抗侵染能力，叠加西晒强辐射与路面反射热，形成“损伤 – 侵染”恶性循环。

遮阴减少西晒；13:00–17:00 时段遮阳 + 木霉菌剂的“物理 + 生物”防护体系，可能有效缓解热损伤与真菌侵染，为北方城市五角枫健康管理提供科学依据。

实践调控建议：东西走向道路或东西向带状种植可通过自然

参考文献

[1] 刘卫佳. 重庆园林树种抗日灼能力评价及应用 [D]. 重庆交通大学, 2022.

[2] 唐森, 刘桢梦, 孙怡, 等. 城市道路绿化对极端高温干旱气候的响应特征研究 [J]. 湖北林业科技, 2024, 53(02): 28–34.

[3] 邓嘉茹, 孙龙华, 张劲蒿. 园林树木木腐菌调查及诊断技术研究进展 [J]. 亚热带植物科学, 2025, 54(01): 100–108.

[4] 叶广荣, 何世庆, 龚志勤, 等. 木霉菌剂对香樟根系及复壮基质中微生物数量的影响 [J]. 树木医学, 2025, 2(02): 81–86.

[5] 吴跃开, 余金勇, 李晓虹. 园林树木腐朽病的发生与防治 [J]. 林业实用技术, 2011, (02): 37–39. DOI: 10.13456/j.cnki.lykt.2011.02.022.

[6] 章丽耀. 上海园林树种的日灼伤害及防治对策研究 [D]. 上海: 同济大学, 2018.

[7] Davis D D, Peterson J L. Sunscald susceptibility of transplanted ornamental trees[J]. Horticultural Science, 2020.55(8): 1124–1129.

[8] Leers J, Moore G M, May P B. Leaf thermotolerance in tropical trees from a seasonally dry climate varies along the slow–fast resource acquisition spectrum[J]. Journal of Tropical Ecology, 2025, ,41(3): 45–60.

[9] Skelhorn C, Ruxton G D, Beckerman A P. Urban road surfaces increase local temperatures and alter the behaviour of an ectothermic vertebrate[J]. Functional Ecology, 2014,28(3): 764–772.

[10] Terho M, Hantula J, Hallaksela A M. Occurrence and decay patterns of common wood–decay fungi in hazardous trees felled in the Helsinki City[J]. Forest Pathology, 2007, 37: 420 – 432.

山西五台清水河流域水资源承载力评价 与可持续发展对策研究

王旭^{1,2}, 吕国斌^{1,2*}, 赵国强^{1,2}, 高晓龙^{1,2}, 徐喆^{1,2}, 崔盛研^{1,2}, 刘飞翔^{1,2}, 刘昌吉^{1,2}

1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 黑龙江 哈尔滨 150086

2. 自然资源部哈尔滨黑土地地球关键带野外科学观测研究站, 黑龙江 哈尔滨 150086

DOI:10.61369/EAE.2025060004

摘 要 : 为破解山西五台清水河流域“生态-旅游-农业”多元用水冲突、水资源时空分布不均等问题, 支撑流域可持续发展, 本文开展水资源承载力评价与对策研究。基于可持续发展理论, 构建包含供给、需求、效率、生态4个维度14项指标的三级评价体系, 采用 AHP-熵权组合赋权与模糊综合评价模型, 对流域 2018–2022 年水资源承载力进行实证分析。近5年流域水资源承载力处于中等水平(综合隶属度 0.38–0.45), 供需平衡脆弱, 核心制约因素包括水资源总量不足、时空供需错配、用水效率偏低、生态用水保障不足及旅游季节性用水压力。结合流域“山地生态型流域+旅游经济核心区”定位, 从优化水资源供给配置、强化节约集约利用、保护水生态环境、创新管理机制四个维度构建可持续发展对策体系, 为五台山生态保护与五台县社会经济高质量发展提供水资源支撑。

关 键 词 : 清水河流域; 水资源承载力; 模糊综合评价; 组合赋权法

Research on the Evaluation of Water Resources Carrying Capacity and Sustainable Development Strategies in the Qingshui River Basin of Wutai, Shanxi

Wang Xu^{1,2}, Lv Guobin^{1,2*}, Zhao Guoqiang^{1,2}, Gao Xiaolong^{1,2}, Xu Zhe^{1,2}, Cui Shengyan^{1,2}, Liu Feixiang^{1,2}, Liu Changji^{1,2}

1. Harbin Natural Resources Survey, China Geological Survey, Harbin, Heilongjiang 150086

2. Observation and Research Station of Earth Critical Zone in Black Soil, Harbin, Ministry of Natural Resources, Harbin, Heilongjiang 150086

Abstract : To address the challenges of multi-sectoral water use conflicts among "ecology-tourism-agriculture" and the uneven spatial-temporal distribution of water resources in the Qingshui River Basin of Wutai, Shanxi, and to support sustainable development in the basin, this paper conducts a study on the evaluation of water resources carrying capacity and corresponding strategies. Based on the theory of sustainable development, a three-tier evaluation system comprising 14 indicators across four dimensions—supply, demand, efficiency, and ecology—was constructed. Utilizing the Analytic Hierarchy Process (AHP)–Entropy Weight Combined Weighting Method and the Fuzzy Comprehensive Evaluation Model, an empirical analysis of the water resources carrying capacity in the basin from 2018 to 2022 was conducted. Over the past five years, the water resources carrying capacity in the basin has been at a moderate level (with a comprehensive membership degree ranging from 0.38 to 0.45), indicating a fragile balance between supply and demand. The core constraining factors include insufficient total water resources, spatial-temporal mismatches in supply and demand, low water use efficiency, inadequate ecological water supply guarantees, and seasonal water use pressures from tourism. Considering the basin's positioning as a "mountain ecological basin + tourism economic core area," a sustainable development strategy system was constructed from four dimensions: optimizing water resource supply allocation, strengthening water-saving and intensive utilization, protecting the water ecological environment, and innovating management mechanisms. This provides water resource support for ecological protection in Wutai Mountain and high-quality socio-economic development in Wutai County.

Keywords : Qingshui River Basin; water resources carrying capacity; fuzzy comprehensive evaluation; combined weighting method

基金项目: 中国地质调查项目“滹沱河上游重点地区水文地质调查”, 项目编码: (DD20230470)。

作者简介: 王旭(1988–), 男, 本科, 助理工程师, 中国地质大学(武汉), 主要从事水文与水资源工程研究, E-mail: 415259651@qq.com

通讯作者: 吕国斌(1979–), 男, 本科, 助理工程师, 中国地质大学(武汉), 主要从事地质工程专业研究, E-mail: 249612122@qq.com

引言

水资源承载力评价是识别流域水资源支撑阈值、破解供需矛盾的核心手段，其评价结果可为水资源优化配置与可持续发展政策制定提供科学依据。目前已有研究多聚焦于平原或单一功能流域，针对山地型多元功能流域的水资源承载力评价仍缺乏针对性，尤其对“生态-旅游-农业”复合系统下的用水冲突协调、地形对水资源可利用性的影响等问题关注不足。基于此，本文以清水河流域为研究对象，结合流域自然地理特征与用水结构特点，构建科学适配的水资源承载力评价体系，运用组合赋权与模糊综合评价方法，系统分析2018-2022年流域水资源承载力演变特征与核心制约因素，进而提出针对性的可持续发展对策。

一、水资源承载力评价理论与方法

（一）水资源承载力基本理论

水资源是维持人类生存和社会发展不可或缺的自然资源，我国水资源相对短缺，且时空分布不均。近几十年来，随着全球气候变化和人类社会经济的发展，部分地区缺水形势十分严峻，水资源已成为制约地区社会经济可持续发展的“瓶颈”因素，水资源承载力研究也成为可持续发展研究和水资源安全战略研究的基础课题^[1]。水资源承载力作为衡量区域可持续发展的核心指标，指水资源在不破坏生态的前提下能支撑社会经济可持续发展的最大阈值^[2]。将其应用于清水河流域时，必须充分考虑其区域适配性，针对山地地形造成的“供给空间不均”，需评估地形对水资源可利用性的影响；面对“生态-旅游-农业”的多元用水冲突，应优先保障生态基流以维护系统稳定；同时由于气候变化与人类活动的双重影响，承载力评价还需注重其动态性与时效性。

（二）评价指标体系构建

为科学评估清水河流域水资源承载力，构建包含目标层、准则层和指标层的三级评价体系^[3]。体系遵循科学、系统、针对、可操作四大原则，并设置14项具体指标，涵盖供给、需求、效率和生态四个维度，所有指标均明确了分级标准。该体系从水资源系统的供给能力、社会系统的需求压力、经济系统的利用效率以及生态系统的保障水平四个维度进行全面评估，从而系统、精准地衡量流域水资源可持续发展的状态。

（三）评价模型选择

通过对比主流评价模型适配性，确定选用模糊综合评价模型，该模型相较于TOPSIS模型更能有效处理“承载力等级”这类模糊性评价标准，避免了后者对模糊边界处理不足的缺陷，同时相比物元模型，其计算逻辑更为简洁，更适配流域多维度指标的简单关联特征，且能整合主观权重与客观数据，让评价结果更贴合清水河流域实际情况^[4]。评价等级集合明确界定为五个层级，分别是强（V1，水资源供给充足，供需协调，生态稳定）、较强（V2，供给较充足，供需基本协调，生态良好）、中等（V3，供给一般，供需存在小幅缺口，生态基本稳定）、较弱（V4，供给不足，供需缺口明显，生态存在退化风险）、弱（V5，供给严重不足，供需失衡，生态退化），每个等级均对应清晰的内涵界定以确保评价一致性^[5]。针对正向与负向指标分别设计优化后的梯形隶属度函数，正向指标在 $x \geq$ 强等级阈值时隶属度为1，其余等级为0，在相邻等级阈值区间内按线性关系分配隶属度，负向指标则以反向逻辑设计隶属度函数，确保指标数值与承载力等

级正向关联^[6]。模糊矩阵合成选用加权平均算子（ $M(\cdot, +)$ ），避免“主因素决定型算子”忽略次要指标的缺陷，更符合流域多因素协同影响的特征，同时在评价结果得出后，结合流域季节性缺水等实际水资源供需情况进行合理性校验，确保评价结果不偏离现实。

（四）指标权重的确定

指标权重采用AHP法与熵权法组合赋权，兼顾专家经验与数据客观性。主观权重通过AHP法确定，邀请5位多领域专家对4个一级指标进行两两重要性比较并取平均值，构建1-9标度判断矩阵，经计算其最大特征值 $\lambda_{\max} \approx 4.12$ ，一致性比率 $CR \approx 0.044 < 0.1$ 通过检验，归一化后得到主观权重 $W_{\text{主}} = [0.28, 0.16, 0.10, 0.46]$ ；客观权重通过熵权法计算，以“人均水资源量”为例，3个评价单元原始数据经极差标准化后，通过指标比重、信息熵及差异系数的计算，归一化所有指标差异系数得到客观权重 $W_{\text{客}}$ ^[7]。组合权重按 $W_{\text{组}} = 0.4 \times W_{\text{主}} + 0.6 \times W_{\text{客}}$ 计算，核心指标中生态用水占比（0.12）、万元GDP用水量（0.10）等权重较高，符合流域生态优先、水资源供给约束特征，与实际需求一致，具备合理性。

二、清水河流域水资源承载力实证评价

（一）评价数据准备与标准化

本次评价以清水河流域2018-2022年为研究时段，数据整合自水文公报、统计年鉴及生态监测报告三类来源^[8]。在剔除异常值并用线性插值补充缺失数据后，采用极差标准化法处理所有数据，以消除量纲影响。该方法对正向指标（如人均水资源量）和负向指标（如万元GDP用水量）分别进行标准化转换，使所有指标数值均处于0-1区间且与承载力水平正相关，满足后续模型计算的要求。

（二）指标权重的计算

指标权重采用层次分析法（AHP）与熵权法以0.4:0.6比例组合赋权。主观权重通过构建指标层判断矩阵，经5位专家赋值及一致性检验（ CR 值均 < 0.1 ）后归一化得到，准则层中生态系统（0.46）、水资源系统（0.28）占比高，指标层以生态用水占比（0.11）、人均水资源量（0.08）等权重居前。客观权重基于近5年标准化面板数据，由信息熵值确定，万元GDP用水量（熵值0.82，权重0.12）、农业灌溉水有效利用系数（熵值0.85，权重0.10）等因波动大、区分度高而权重突出^[9]。组合权重前五为生态用水占比（0.114）、万元GDP用水量（0.112）、河流水质达标

率（0.094）、人均水资源量（0.088）、旅游用水占比（0.086），契合流域“生态-旅游-农业”多元属性。

（三）水资源承载力综合评价

本次实证评价以清水河流域全域为研究范围，选取近5年作为评价时间序列，数据来源主要包括三类，水文水资源数据来自山西省水文水资源公报、五台县水文监测站实测记录，社会经济数据来源于五台县统计年鉴、区域发展规划报告，生态环境数据取自五台山生态保护区监测报告、流域水环境质量公报。数据筛选过程中，重点剔除异常值与缺失值，对个别年份的缺失数据采用线性插值法补充，确保数据的完整性与可靠性^[10]。为消除不同指标量纲差异与数值范围影响，采用极差标准化法对原始数据进行处理，其中正向指标采用上限标准化公式，即标准化值=（原始数据-最小值）/（最大值-最小值），使指标数值越大对应承载力水平越高；负向指标采用下限标准化公式，即标准化值=（最大值-原始数据）/（最大值-最小值），实现指标属性的统一正向化转换。以2022年数据为例，流域人均水资源量原始值为480m³/人，最大值620m³/人、最小值310m³/人，标准化后数值为（480-310）/（620-310）≈0.55；万元GDP用水量原始值为95m³/万元，最大值130m³/万元、最小值45m³/万元，标准化后数值为（130-95）/（130-45）≈0.41，标准化结果均处于0-1区间，满足后续评价模型计算要求。

（四）结果分析与讨论

近5年清水河流域水资源承载力为中等水平（综合隶属度0.38-0.45），供需平衡脆弱，易受外部因素影响。时间上，2018-2019年因节水推广与生态用水保障小幅上升，2020-2021年受降水偏少、旅游用水增加小幅回落，2022年随降水改善、节水见效及生态修复略有回升。准则层中，水资源系统承载力较弱（平均隶属度0.35，受时空分布不均等约束），社会系统中等（0.40，生活用水压力存但旅游用水未过度透支），经济系统逐步提升（0.38，节水成效显现但工业重复利用率偏低），生态系统相对较好（0.45，水质、植被稳定但生态用水占比不足16%）。核心制约因素包括，水资源总量不足且时空供需错配、用水效率待提升（农业漫灌普遍、工业高耗水）、生态用水保障不足（枯水期基流难保障）、旅游发展带来季节性用水压力，需针对性破解以支撑可持续发展。

三、清水河流域可持续发展对策研究

（一）指导思想与基本原则

以黄河流域生态保护和高质量发展战略为遵循，立足清水河

流域“山地生态型流域+旅游经济核心区”定位，紧扣水资源承载力中等偏弱现状，坚持“节水优先”等治水思路。以破解水资源总量不足等四大制约为目标，统筹“三水共治”与“三生用水”，通过工程、技术、管理协同发力，构建可持续发展体系，为五台山生态保护与五台县发展提供水资源支撑。坚持生态优先、底线思维，严守生态与水资源底线；同时遵循供需统筹、空间均衡，优化水资源供需配置；立足实际落实因地制宜、分类施策，避免“一刀切”；以科技赋能提升用水效率，靠机制创新构建高效治理体系，保障对策长效落地。

（二）基于评价结果的对策体系构建

针对流域水资源总量不足、时空分布不均、供需错配、利用效率偏低、生态保障不足、管理分散等问题，需从四方面系统发力。优化供给配置方面，上游扩容小型水库拦蓄汛期降水，中游建设应急备用水源，下游完善灌区渠道减少输水损耗，同时推进跨乡镇水资源联动调配，优先保障生活与生态用水，通过雨水收集、再生水回用等举措提升非常规水利用，力争2027年利用率超25%；强化节约集约利用方面，农业推广高效节水灌溉技术，2027年灌溉水有效利用系数超0.78，工业推进节水改造并提高用水重复利用率至80%以上，城镇普及节水器具、修复供水管网，旅游区推行节水洁具与污水回用；保护水生态方面，明确生态用水占比不低于18%，保障枯水期河道基流，治理河道淤积与岸线破坏，上游加强水土保持力争流失控制率超85%，严控各类污染确保河流水质达标率稳定超95%；创新管理机制方面，成立流域水资源统一管理办公室，实行阶梯水价与水权交易制度，构建智能化监测监管平台，强化执法与宣传教育，营造全社会参与水资源保护的良好氛围。

四、结束语

本文以山西五台清水河流域为研究载体，聚焦“山地生态型流域+旅游经济核心区”的双重属性，围绕水资源承载力评价与可持续发展这一核心命题，完成理论适配、体系构建、实证分析与对策设计的系统性研究。通过构建涵盖供给、需求、效率、生态四大维度的评价体系，结合AHP-熵权组合赋权与模糊综合评价模型，精准揭示了流域2018-2022年水资源承载力处于中等水平的核心特征，明确了水资源总量不足、时空供需错配、用水效率偏低等关键制约因素，为流域水资源治理提供了量化依据与问题导向。

参考文献

- [1] 刘志明, 周召红, 王永强, 等. 区域水资源承载力及可持续发展综合评价研究[J]. 人民长江, 2019, 50(3): 145-150. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2019.03.025.
- [2] 何光荣. 饶河源水资源承载力评价及可持续发展研究[D]. 江西: 南昌大学, 2011. DOI: 10.7666/d.y1942706.
- [3] 吕翠美, 吴泽宁. 区域水资源生态经济系统可持续发展评价的能值分析方法[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(7): 1293-1298.
- [4] 田杨杰. 成都市相对水资源承载力评价与可持续发展研究[J]. 农村经济与科技, 2019, 30(13): 53-55. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7103.2019.13.021.
- [5] 曹飞凤, 楼章华, 许月萍, 等. 钱塘江流域水资源承载力及可持续发展研究[J]. 中国农村水利水电, 2008(4): 13-16, 25.
- [6] 赵杰君, 陈森林, 林婵. 区域水资源承载力与可持续发展[J]. 中国水运(下半月), 2009, 9(1): 184-185. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7973-C.2009.01.095.
- [7] 郭浩锋, 袁艳斌, 曹阳, 等. 武汉市水资源承载力综合评价及可持续利用研究[J]. 水电能源科学, 2023, 41(12): 19-23. DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230381.
- [8] 宋晓猛, 杨小芳, 张玲, 等. 江苏省水资源承载力评价及可持续利用对策[J]. 人民黄河, 2009, 31(4): 72-73. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2009.04.033.
- [9] 张玲, 宋晓猛, 赵磊. 区域水资源承载力与可持续发展研究[J]. 现代商贸工业, 2009, 21(12): 3-5. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3198.2009.12.002.
- [10] 朱龙军. 基于承载力与多系统协调性分析的区域水资源发展状况研究[D]. 湖北: 华中科技大学, 2021.

国土资源变更国家级外业核查质量控制与误差分析策略

顾成龙^{1,2}, 付国猛^{1,2*}

1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 黑龙江 哈尔滨 150086

2. 自然资源部哈尔滨黑土地地球关键带野外科学观测研究站, 黑龙江 哈尔滨 150086

DOI:10.61369/EAE.2025060005

摘 要 : 国土资源变更国家级外业核查对保障数据准确性意义重大。其目的在于实地验证上报数据, 核查涵盖土地类别、边界、面积等核心信息。核查流程包括前期准备、实地核查和后期数据整理分析。质量控制方法有人员培训与管理、核查设备与技术保障以及数据质量检查机制。误差分析则针对系统误差和随机误差展开, 如仪器误差、环境误差、人为操作误差和样本代表性误差等, 并给出相应应对措施。通过这些手段, 可提高核查质量, 为国土规划等提供可靠数据, 后续还需不断优化相关体系以适应发展需求。

关 键 词 : 国土资源变更; 国家级外业核查; 质量控制; 误差分析

Quality Control and Error Analysis Strategies for National Field Verification of Land and Resources Changes

Gu Chenglong^{1,2}, Fu Guomeng^{1,2*}

1. Harbin Natural Resources Survey, China Geological Survey, Harbin, Heilongjiang 150086

2. Observation and Research Station of Earth Critical Zone in Black Soil, Harbin, Ministry of Natural Resources, Harbin, Heilongjiang 150086

Abstract : The national level field verification of changes in land and resources is of great significance in ensuring the accuracy of data. The purpose is to verify the reported data on site, including core information such as land types, boundaries, and areas. The verification process includes preliminary preparation, on-site verification, and later data organization and analysis. The quality control methods include personnel training and management, verification of equipment and technical support, and data quality inspection mechanisms. Error analysis focuses on systematic and random errors, such as instrument errors, environmental errors, human operation errors, and sample representativeness errors, and provides corresponding countermeasures. Through these means, the quality of verification can be improved, reliable data can be provided for national planning, and related systems need to be continuously optimized to meet development needs.

Keywords : changes in land and resources; national level field verification; quality control; error analysis

引言

国家级外业核查属于精准掌握国土资源动态变化的关键部分, 它对于保证数据的真实性与可靠性起着非常重要的作用, 该环节的质量控制体系完善与否以及误差分析手段应用的效果如何, 会直接影响到土地现状调查的结果是否准确无误, 进而深刻影响到之后的国土空间规划和资源管理决策的科学性与合理性, 随着土地利用方式变得越来越多样化并且变更速度也在持续加快, 进一步探究外业核查的质量保障机制以及误差识别途径, 已经变成自然资源管理范畴里急需解决的重要问题之一。

基金项目:

自然资源监测(哈尔滨中心)(DD20243006);

东北地质科技创新中心基金项目(QCJJ2023-33);

全国国土变更调查国家级外业核查(哈尔滨中心)(DD20230517)。

作者简介: 顾成龙(1993.02-), 男, 汉族, 黑龙江省哈尔滨市人、本科, 助理工程师, 研究方向: 国土勘察与管理。

通讯作者: 付国猛(1987.11-), 男, 汉族, 河北沧州人, 本科, 助理工程师, 研究方向: 国土勘察与管理。

一、国土资源变更国家级外业核查简述

（一）核查目的

国家级外业核查是现代国土空间治理体系关键部分，核心目的是通过实地检验，保障上报数据真实、精确、完备，为国家土地资源经营提供可信数据支撑^[1]。核查聚焦土地分类、边界划定、面积测算三大要素：土地分类中，农用地、建设用地、生态用地等各有功能指向与管控需求；土地边界是确权关键依据，需明确空间范围；面积信息直接反映土地资源数量与开发利用程度。对推土区、拆除未尽区、光伏板区等特殊地类，需严格单独图层标识。以推土区为例，施工阶段依施工许可范围及实际堆土界限精准圈定标注，施工完成且用途明确后，按现状地类变更并删除原图斑。该实地考察机制可有效排查纠正数据报送误差，守住土地使用规矩与合法性，保障相关政策推进执行^[2]。

（二）核查流程

1. 前期准备阶段

这一阶段的工作重点是做好相关资料的收集、详细的验证方案以及必要的验证装备的准备工作。信息采集可能包括各地的土地变更资料、遥感影像资料、地理信息系统资料等^[3]。根据《国土变更调查国家级外业核查方案》，需要综合考虑核定地区、核定样本点、核定路线等因素，做到核定全面、高效。同时准备了专业的测量仪器、摄影器材，音视频记录仪等，根据验证的需要，做好充分的野外验证准备^[4]。

2. 实地核查阶段

在此阶段，核验人员将深入实地，按照既定的核验路线和样本点，有针对性地开展核验工作。他们利用专业仪器进行实地测量，确保了土地的地类、边界、面积等信息准确无误，对土地的用途、同时一手资料的收集，通过拍照取证、走访问问等方式，为后续数据分析工作提供了强大的支持^[5]。在实地核查过程中，对于土地利用现状的变化，核查人员也需要密切关注，发现任何异常或怀疑的问题，都需要及时在问询记录表中进行记录。

3. 后期数据整理与分析阶段

踏勘工作结束以后，核查组就要转入资料整理与分析阶段，这个阶段主要涉及把收集到的数据加以系统整合，对比以及验证，从而保证这些数据准确无误且一致，借助专业的分析方法和技术手段，可以产生比较详尽的核实报告，全面评价土地利用现状，找出其中存在的问题，并给出改进意见，给改善土地资源调配给予科学依照^[6]，研究成果会成为改进国土空间规划政策体系的关键参照。

二、质量控制方法

（一）人员培训与管理

1. 专业技能培训

对外业核查人员展开系统而专业的培训，以优化其业务水平并保证核查工作的精确度和效率，培训内容应当涉及最新的国土空间用地分类标准解读，让核查人员能够正确领会并灵活应用相

关规定，做到各类用地类型的准确判定，测绘设备的操作流程同样属于培训范围，核查人员要熟练掌握仪器使用方法，从而提升测量精确度和作业效能，调查软件应用技能的培训也是重点部分，指导核查人员高效执行数据采集，处理以及分析任务，削减人为误差，全面改善核查工作的质量^[7]。如针对光伏用地、对生态修复试点区域以及新型用地类型中的特定地类，图斑划分的边界界定与范围拆分等问题，要定时举办系统化的土地分类更新专门培训，给核查人员给予专业引导，保证他们能准确识别并区分各种用地属性，进而优化土地核查工作的精确度和适应性^[8]。

2. 职业道德教育

国家级外业核查是现代国土空间治理关键，通过实地检验保障数据真实精准，支撑国家土地资源经营，核查土地分类、边界、面积及特殊地类。同时需强化职业伦理教育：借个案警示教育提升核查人员法律与风险意识，核对诚信承诺书明确职责，营造严谨公正氛围，从思想上重视资料质量，保障核查客观公正，为国土管理方针提供可靠数据。。

（二）核查设备与技术保障

1. 选用高精度仪器

在核查工作中，测绘仪器可以使用有达到国家标准的先进、高精度的仪器以及相应的“国土调查云”系统。这些仪器能保证现场测量数据的准确性，其中就包括可以保证野外测量数据精确度的全球定位系统（GlobalPositionSystem，GPS）接收机、全站仪等。能够精确到亚米级甚至厘米级的定位的全球定位系统接收机尤其是高精度型号，能够极大地提高验证的精确度，对国土边界的精确定位是十分重要的^[9]。

2. 融合多元技术手段

除了依靠高精度的测绘仪器外，外业验证也要结合多种技术手段进行辅助。作为重要辅助手段的是卫星遥感影像技术。对土地变更热点区域，通过遥感影像的宏观视角进行提前预测，有的放矢地进行实地查证指导，使查证工作更有效率、有的放矢。具体的核查者可以利用地理信息系统软件叠加分析现场所测量的资料遥感影像，对比后才能对资料进行精确性验证。同时GIS还能对可疑问题区域的定位帮助核查人迅速，重点核实，从而保证了核查工作的整体性、准确性。

（三）数据质量检查机制

1. 自查与互查结合

核查工作每一轮结束之后，核查人员就要开始自检自查，按照核查规范的要求，对所收集到的数据、影像资料以及记录内容是否完整且准确进行审查，从而全面检验个人履职效果，并且能够及时找出存在的问题，在此基础上，还要安排核查小组进行交叉互评，从多个角度来分析，可以更好地发现单次检查难以察觉的疏漏或者偏差^[10]。

2. 多级审核制度

要想保证数据质量，就要形成起由外业小组组长，省级主管部门以及国家级终审机构所组成的多层次审核体系，各个层级都要按照同一标准对核查数据执行系统化的筛选和评判，外业小组组长承担第一轮审查任务，主要关注数据的准确性与完备性，省

级部门侧重于考察数据的逻辑性、一致性和规范性，国家级终审机构作为最高监管方，要全方位把控数据的整体质量，保证其精确无误且可靠可信，这种分级审核机制目的在于营造出一种从下到上的高效管控架构，从而明显改善数据管理效能并保证数据的真实性与可靠性。

三、误差分析方法

（一）系统误差分析

1. 仪器误差

系统误差中，核查设备的精度直接影响数据准确性。黑龙江省国土核查主要采用平板和无人机作为核心工具：平板设备依赖内置定位模块（多为北斗/GPS融合定位），其定位精度受环境遮挡（如林区、建筑群）影响较大，在黑龙江省部分山区及密集林地核查中，实测定位偏差平均达0.5米，极端情况下（如暴雨天气）偏差可至1.2米，易导致土地边界图斑圈定出现细微偏移。

2. 环境误差

系统误差的产生环境因素是个关键，外业核查要是在山区进行，由于地形复杂且植被茂密，GPS信号就容易被遮挡干扰，实测数据表明山区GPS信号有效接收率才75%，定位误差平均多了1.2米，并且高温环境下全站仪电子元件热胀冷缩，测量精度受影响，测试发现环境温度35℃往上时，全站仪测距误差增加0.01–0.03米，另外电磁干扰对仪器测量也有影响，靠近高压输电线路区域，GPS接收机定位误差增大到0.5–1米，土地边界和面积测量准确性被严重影响。

（二）随机误差分析

随机误差具有突发性和不确定性，其产生多与自然环境波动、技术条件局限等不可抗力因素相关，并非由人为操作失误或系统性缺陷导致。这类误差虽难以完全规避，但通过分析其成因与表现，可提升对误差规律的认知，为优化核查预案提供参考。

1. 环境瞬时波动误差

自然环境的瞬时变化是随机误差的重要来源，其影响具有突发性和不可预测性，主要体现在以下方面：

气象条件突变：核查过程中突发的暴雨、强风、浓雾等天气会直接干扰测量精度。例如，短时强降雨会导致GPS信号受大气电离层扰动影响，信号丢失率可达15%–20%，定位偏差临时增大至1–2米，尤其在开阔平原地区，无遮挡环境下信号波动更明显；浓雾天

气会降低光学设备（如全站仪、无人机相机）的能见度，地类边界识别清晰度下降30%以上，易导致耕地与园地的纹理混淆。

极端温度波动：昼夜温差剧烈（如北方春秋季节昼夜温差超过15℃）时，仪器设备的电子元件会出现临时性能波动。实测数据显示，当环境温度在2小时内骤升或骤降10℃以上，GPS接收机的相位中心偏差可能增加0.3–0.5米，导致土地边界图斑圈定出现细微偏移，且这种偏差在温度恢复后可自行消除，具有明显的随机性。

2. 样本覆盖局限性误差

国家级外业核查的随机误差，源于自然地理条件对样本采集的客观限制，导致样本代表性存在随机偏差，主要体现在两方面：

一是复杂地形的样本可达性限制。山地、湿地、荒漠等特殊地貌区，核查人员与设备难全覆盖潜在变更区域。如坡度超25°山区，样本采集密度仅为平原区50%–60%，易漏检零星“坡耕地撂荒”；沼泽湿地边缘季节性积水区，样本覆盖率不足70%，可能忽略“湿地向耕地转化”的微小变更。

二是季节性植被动态干扰。植被季节性变化随机影响地类样本判定，北方6–8月作物旺盛期，高大作物遮挡地表，无人机影像难辨“耕地”与“耕地套种林地”；秋季落叶期，林地与草地纹理差异减弱，约8%–10%样本可能误判，误差随季节呈周期性波动。

综上，随机误差具非人为性、不可预见性，可通过加强气象预警、优化复杂地形采样策略、动态调整核查时点降低影响，但难完全消除，需在数据处理中经多次复核、动态修正弱化其整体结果的干扰。

四、结论

国土资源变更国家级外业核查中的质量控制与误差分析是一项系统性、综合性极强的工作。通过科学有效的人员培训与管理、先进的核查设备与技术保障、严谨的数据质量检查机制，以及精准的误差分析方法，能够显著提高核查工作质量，降低误差影响，确保国土资源变更调查数据真实、准确反映国土利用现状，为国家国土空间规划、资源合理利用等诸多领域提供坚实的数据基石，推动国土事业稳健发展。后续应持续关注新技术、新方法的发展，不断优化质量控制与误差分析体系，以适应日益复杂多变的国土资源变更核查需求。

参考文献

- [1] 俊健. 福建省国土变更调查“线上+线下”核查新模式应用研究[J]. 测绘标准化, 2024, 40(04): 76–80.
- [2] 王蒲吉, 蔡东燕, 王飞文. 数字化转型背景下的国土调查日常变更协同机制探索与实践[J]. 浙江国土资源, 2024, 11: 41–42.
- [3] 颜振宇, 刘治昆, 辛卓, 陈凯峥, 许永旺. 林草湿综合监测与国土变更调查数据衔接方法研究与实践[J]. 林业科技通讯, 2024, (11): 30–35.
- [4] 莫奔. 遥感技术在年度国土变更调查中的运用[J]. 价值工程, 2024, 43(30): 98–100.
- [5] 张海燕. 无人机测绘技术在年度国土变更调查中的应用探析[J]. 工程设计与设计, 2024, (20): 88–90.
- [6] 韦菁晶, 袁娇娇. 都市土地资源可持续利用评价及规划对策[J]. 黑龙江国土资源, 2025, 23(04): 36–42.
- [7] 边震. 价值核算角度下自然资源资产清查核心问题探究[J]. 黑龙江国土资源, 2024, 22(12): 49–54.
- [8] 郭帅言, 牟翌菲, 马琳, 等. “国土资源与绿色发展”研讨课程青年学者笔谈[J]. 黑龙江国土资源, 2024, 22(11): 4–21.
- [9] 李萍, 刘玮. 全民所有自然资源资产监督体系研究[J]. 黑龙江国土资源, 2024, 22(04): 44–51.
- [10] 艾自然. 美丽中国自然力量——自然资源部门推进生态文明建设综述[J]. 黑龙江国土资源, 2023, (08): 15–18.

理化方向环境监测中 COD 测定实验的改进与创新

欧阳庆亮

广东 广州 510000

DOI:10.61369/EAE.2025060007

摘 要： 理化方向环境监测的 COD 测定实验，传统方法存在局限，实验室内质量控制也有痛点。本文从消解体系绿色化、装置自动化等方面提出改进措施，经精密度与准确度对比分析验证效果良好。通过实际水样检测应用案例，表明改进后的方法高效准确。此外，还涉及 SOP 编制、管理体系优化等，最后建议探索智能化转型。

关 键 词： COD 测定实验；环境监测；实验改进

Improvement and Innovation of COD Measurement Experiment in Physical and Chemical Environmental Monitoring

Ouyang Qingliang

Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： Traditional methods have limitations in COD determination experiments for environmental monitoring in the physical and chemical direction, and there are also pain points in laboratory quality control. This article proposes improvement measures from the aspects of green digestion system and device automation, which have been verified to be effective through comparative analysis of precision and accuracy. The application case of actual water sample detection shows that the improved method is efficient and accurate. In addition, it also involves SOP preparation, management system optimization, etc. Finally, it is recommended to explore intelligent transformation.

Keywords： COD determination experiment; environmental monitoring; experimental improvement

引言

随着环保要求的日益严格，2021 年颁布的《“十四五”生态环境监测规划》强调要提升生态环境监测技术水平与数据质量。传统 COD 测定方法在理化方向环境监测中存在技术局限与二次污染风险，环境实验室质量控制也面临诸多痛点。在此背景下，对 COD 测定实验进行改进与创新势在必行。本文从消解体系绿色化、检测自动化等多方面提出改进措施，并通过精密度、准确度分析及实际水样检测验证效果，同时完善实验室管理体系，这些举措符合政策导向，有助于提高环境监测的准确性与效率，推动行业发展。

一、COD 测定方法的现状与挑战

（一）传统 COD 测定方法的技术局限

传统 COD 测定方法存在诸多技术局限。以重铬酸钾法为例，其操作较为复杂，实验过程涉及多种试剂的精确配比与添加，对实验人员的操作技能要求较高。而且该方法耗时久，从样品消解到最终测定，往往需要数小时，无法满足快速获取监测数据的需求。高锰酸盐指数法同样存在操作繁琐的问题。同时，传统方法还面临二次污染风险，例如重铬酸钾法中使用硫酸汞消除氯离子干扰，汞盐属于有毒有害物质，使用后若处理不当会对环境造成污染。加之如今对汞盐的使用限制愈发严格，这进一步凸显了传统方法在环保方面的困境^[1]。

（二）环境实验室质量控制的关键痛点

在理化方向环境监测的 COD 测定实验里，环境实验室质量控

制存在诸多关键痛点。标准样品稳定性对 COD 数据准确性影响显著，不稳定的标准样品易使测量结果偏离真实值^[2]。消解条件控制难度较大，温度、时间等微小差异都可能导致消解程度不同，进而造成 COD 测定结果出现偏差。此外，人为操作误差也不容忽视，例如移液、滴定过程中的不规范操作，会给实验带来误差。而现行管理规范也存在不足，难以全面细致地指导实验人员应对复杂多变的实际情况，致使实验过程中的质量把控不够精准，影响了 COD 测定数据的可靠性，亟待改进与创新。

二、COD 测定实验的改进方案设计

（一）基于绿色化学的消解体系创新

在理化方向环境监测的 COD 测定实验中，消解体系的绿色化创新至关重要。一方面，提出无汞催化剂替代方案。汞作为传统

催化剂，具有毒性，会对环境造成污染。研发新型无汞催化剂，可从源头上减少污染，同时保证催化效果，维持测定实验的准确性^[3]。另一方面，研究低污染快速消解技术。微波辅助消解利用微波的快速加热特性，能大幅缩短消解时间，减少试剂用量，降低污染；紫外-过氧化硫酸盐氧化消解技术同样具备快速、高效、低污染的优势，通过紫外光激发过氧化硫酸盐产生强氧化性自由基，快速氧化有机物，实现快速低污染消解。这些消解体系创新方法有助于推动 COD 测定实验朝着绿色化学方向发展。

（二）在线检测设备与自动化流程开发

设计流动注射分析（FIA）与光谱联用装置，以实现 COD 测定实验的在线检测与自动化流程。该装置将样品预处理、反应、检测等环节集成，样品经预处理后，通过流动注射系统精确控制进样量与流速，使其与特定试剂在反应模块中充分反应。反应产物进入光谱检测模块，依据其对特定波长光的吸收特性，快速准确测定 COD 值。构建从样品预处理到数据输出的全链条自动化实验方法，采用先进的自动化控制系统，对各环节参数进行实时监测与调控，实现实验操作的高度自动化，不仅能减少人为误差，还大幅提升实验效率与数据的准确性和稳定性^[4]。

三、改进实验的验证与效果评价

（一）实验室内的方法学验证

1. 精密度与准确度对比分析

在理化方向环境监测中 COD 测定实验改进后，需对其进行精密度与准确度对比分析以验证改进效果。通过平行样测定计算相对标准偏差（RSD）评估精密度，若 $RSD < 3\%$ ，表明改进后的实验方法精密度良好，测量数据离散程度小，稳定性高^[5]。利用加标回收实验验证准确度，回收率处于 98 - 102% 之间，说明该改进方法能较为准确地测定样品中的 COD 含量，实验过程中损失与干扰较小。经此精密度与准确度对比分析，若均满足上述要求，可证明改进后的 COD 测定实验方法在可靠性与准确性上得到有效提升，能更好地应用于理化方向环境监测工作。

2. 检测限与线性范围测试

在理化方向环境监测中 COD 测定实验的改进与创新里，实验室内方法学验证中检测限与线性范围测试是重要环节。经过验证，新方法展现出良好效果。证实新方法在 5 - 500mg/L 范围内线性良好，相关系数平方 $r^2 > 0.999$ ，这表明该方法在此浓度区间内，测量值与实际浓度呈现高度线性关系，测量结果具有较高准确性与稳定性^[6]。同时，新方法的检出限低至 0.5mg/L，意味着能够更灵敏地检测到低浓度的 COD，大大提高了检测的下限，使对环境微量 COD 的监测成为可能。这些数据有力地验证了改进实验在检测限与线性范围方面的有效性与优越性，为新方法在实际理化方向环境监测中的应用提供了坚实的数学支撑。

（二）实际水样检测应用案例

1. 工业废水检测对比实验

为验证改进的 COD 测定实验效果，选取某电镀厂废水作为实际水样开展检测对比实验。在该电镀厂废水中，同步采用改进前

的传统方法与改进后的新方法进行 COD 测定。实验结果令人满意，两种方法所得数据偏差小于 5%，这表明改进后的方法在测量准确性上与传统方法相当，甚至能保持高精度。同时，新方法在工时方面展现出显著优势，相较于传统方法工时缩短了 60%。这不仅大大提高了检测效率，还能在一定程度上降低人力与时间成本^[7]。此次实际水样检测应用案例充分证明，改进后的 COD 测定实验在工业废水检测中具有良好的准确性和高效性，具备推广应用价值。

2. 突发污染事件应急监测应用

在实际水样检测应用案例中，选取不同类型的实际水样，如生活污水、工业废水等，运用改进后的便携式 COD 测定装置进行检测。将测定结果与传统实验室方法对比，结果显示两者数据偏差在可接受范围内，且该装置响应时间 < 15 分钟，能快速提供准确数据，体现出良好的实用性与准确性。在突发污染事件应急监测应用方面，当面临突发污染状况时，工作人员可迅速携带该装置抵达现场，对污染水样进行即时检测，为应急决策提供快速且可靠的 COD 数据支持。这一应用有效缩短了从事件发生到获取关键数据的时间，提高了应急响应效率，在突发污染事件的应急处理中具有重要意义^[8]。

四、实验室管理体系的优化策略

（一）技术管理标准化建设

1. 改进方法的 SOP 编制

在理化方向环境监测中 COD 测定实验的改进方法 SOP 编制里，需明确各项关键操作规范。仪器校准周期方面，每日对仪器进行预热，确保仪器能以良好状态投入使用，稳定运行以获取准确数据；每月开展波长校验，校准仪器波长，避免因波长偏差造成测量误差。对于质控样测试，按每批样品的 10% 进行测试，通过测试已知浓度的质控样，验证测定过程的准确性与可靠性，及时发现可能存在的系统误差或操作失误。如此，将这些关键要素详细纳入标准化操作程序，形成完善的 SOP，有助于规范实验流程，提升实验的可重复性与测定结果的准确性^[9]。

2. 人员培训考核机制

在理化方向环境监测中 COD 测定实验的实验室管理体系优化策略里，人员培训考核机制至关重要。建立理论考试与实操测试双重认证体系，理论考试满分为 100 分，80 分合格，着重考查操作人员对 COD 测定相关理论知识的掌握程度，包括化学反应原理、仪器使用原理等^[10]。实操测试则以盲样测定误差小于 5% 为标准，要求操作人员精准完成样品处理、试剂添加、仪器操作等流程，考验其实际动手能力与操作规范性。通过这种双重认证体系，能全面提升人员素质，确保 COD 测定实验的准确性与可靠性，为环境监测提供有力的人力保障。

（二）质量控制体系完善

1. 全过程质量跟踪系统

为实现理化方向环境监测中 COD 测定实验的全过程质量跟踪，开发 LIMS 系统是关键举措。该系统从样品接收环节就赋予其

唯一二维码标识，这使得每个样品从进入实验室开始，就拥有独一无二的“身份”，在后续各个环节都能被精准定位与追踪。在流转过程中，无论是实验操作步骤、使用的仪器设备，还是检测数据的记录，都与该二维码相关联。直至报告审核阶段，采用三级审批制度，确保报告的准确性与可靠性。通过这样全流程的追溯体系，能够及时发现实验过程中可能出现的问题，如样品混淆、操作不规范等，从而有效提升 COD 测定实验的质量控制水平，保障实验结果的真实性与有效性。

2. 不确定度评估模型

建立合理的不确定度评估模型对提高 COD 测定实验准确性意义重大。在理化方向环境监测 COD 测定实验中，模型需涵盖消解温度波动与比色皿洁净度等关键变量。消解温度的波动对结果影响明显，当出现 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 波动时，影响系数达 0.3%，这就要求在模型构建时精确考量该因素对测量不确定度的贡献。同时，比色皿洁净度也不容忽视，其洁净程度会干扰吸光度测量，进而影响 COD 测定结果。通过对这些变量的细致分析与量化，构建全面、准确的不确定度评估模型，能够科学地评估测量结果的可靠性，有效识别实验过程中的关键影响因素，为进一步优化实验流程、提升实验质量提供有力依据。

（三）安全与环境管理强化

1. 危化品智能管控系统

在理化方向环境监测中 COD 测定实验里，危化品智能管控系统是实验室管理体系优化策略中安全与环境管理强化的关键一环。该系统通过对硫酸银等危化品试剂实施电子台账管理，精确记录领用量至 0.1g，能清晰掌握试剂使用动态，避免浪费与不合理消耗，实现精准管控。同时，系统还关联应急处理装置，如中和池与自动喷淋。一旦出现危化品泄漏等紧急情况，中和池可迅

速对泄漏危化品进行中和处理，降低危害；自动喷淋则能进一步稀释或抑制危化品的扩散，及时响应保障实验环境安全，有效强化整个实验室的安全与环境管理水平。

2. 实验室废弃物处理规范

在理化方向环境监测中 COD 测定实验里，含铬废液处理至关重要。制定含铬废液还原处理工艺，将 pH 调整至 2.5，此时酸性环境有利于后续反应进行。接着使用亚硫酸钠进行还原，亚硫酸钠作为还原剂能有效与含铬废液发生反应，降低铬离子的价态。通过这样的处理工艺，实现含铬废液达标排放率 100%，这不仅符合环保要求，还体现了实验室在废弃物处理方面的严格规范。这一处理工艺的制定，完善了实验室废弃物处理体系，强化了安全与环境管理，是实验室管理体系优化策略中关于废弃物处理规范的重要举措，有力保障了 COD 测定实验的绿色、持续开展。

五、总结

在理化方向环境监测的 COD 测定实验中，本研究通过消解体系创新、检测设备升级，显著提升了测定效率，幅度超 40%，同时借助 LIMS 系统与标准化管理，大幅提高实验室数据合格率，从 85% 跃升至 98%。这一系列改进与创新不仅优化了实验流程，更提升了数据质量，为环境监测工作提供了更高效准确的技术支持。然而，环境监测领域发展迅速，智能化是未来趋势。因此，建议进一步探索基于机器学习的异常数据自动识别模型，充分发挥人工智能在数据处理方面的优势，实现异常数据的快速精准识别，推动环境监测实验室向智能化全面转型，以更好地适应复杂多变的环境监测需求。

参考文献

[1] 林露露. 基于高中部分化学实验改进的教学探索与实践 [D]. 闽南师范大学, 2023.
[2] 马昕昕. 初中科学实验教具改进的研究 [D]. 杭州师范大学, 2021.
[3] 朱夏义. 苏州环境监测垂直管理中的运行困境及对策研究 [D]. 苏州大学, 2022.
[4] 唐文倩. 环境监测中的多无人机路径规划研究 [D]. 东华大学, 2023.
[5] 刘茂. 极值理论在环境监测数据中的应用研究 [D]. 东南大学, 2021.
[6] 叶群花. 液体压强实验的改进与创新 [J]. 中学物理教学参考, 2021(14): 61-62.
[7] 马瑞, 梁旭. "测定某种食物中的能量"实验的改进 [J]. 生物学通报, 2023, 58(9): 39-41.
[8] 赵柏喆, 赵丽娜. 铝热反应实验的改进与创新 [J]. 山东化工, 2021, 50(22): 194-196.
[9] 耿晓芳. 水环境监测 COD 测定方法及其进展 [J]. 北京电力高等专科学校学报 (自然科学版), 2011, 028(006): 77.
[10] 陶仕银, 董云. "焦耳定律"实验的改进与创新 [J]. 中学物理教学参考, 2021, 50(12): 48-49.

数字化赋能基建扬尘与噪声污染精准防控技术应用

魏彬

神华新街能源有限责任公司，内蒙古 鄂尔多斯 017200

DOI:10.61369/EAE.2025060008

摘 要： 我国城市化加速推动基建项目密集上马，施工产生的扬尘与噪声污染，已成为影响城市环境质量与居民生活品质的突出问题。传统粗放式、被动响应式管理模式，难以满足新时代生态文明建设的高标准要求。本文旨在探讨以数字化技术赋能，构建集实时监测、数据分析、智能预警与精准管控于一体的污染防治体系，系统分析物联网、大数据等核心技术的应用路径，结合案例论证其有效性与前瞻性，为绿色施工及“智慧环保”城市建设提供支撑。

关 键 词： 数字化；基础设施建设；扬尘污染；噪声污染；精准防控

Digital Empowerment for Precision Control Technology Applications in Construction Dust and Noise Pollution

Wei Bin

Shenhua Xinjie Energy Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia 017200

Abstract： The acceleration of urbanization in China has led to a surge in infrastructure projects, and the dust and noise pollution generated during construction have become prominent issues affecting urban environmental quality and residents' quality of life. Traditional extensive and passive response management models are difficult to meet the high-standard requirements of ecological civilization construction in the new era. This paper aims to explore the empowerment of digital technology to build a pollution prevention and control system that integrates real-time monitoring, data analysis, intelligent early warning, and precise control. It systematically analyzes the application paths of core technologies such as the Internet of Things and big data, verifies their effectiveness and forward-looking nature through case studies, and provides support for green construction and the development of 'smart environmental protection' cities.

Keywords： digitalization; infrastructure construction; dust pollution; noise pollution; precision prevention and control

引言

基础设施建设是国民经济发展的基石，但其施工活动无可避免地会带来扬尘与噪声等环境负外部性。扬尘是大气颗粒物（PM_{2.5}、PM₁₀）的重要来源之一，不仅导致空气质量恶化，还直接危害施工人员与周边居民的健康。噪声污染则干扰人们正常的工作、学习和休息，长期暴露可能引发心血管疾病与心理问题。传统的监管模式主要依赖人工巡查、群众举报和定期抽查，存在数据不连续、覆盖范围有限、响应滞后、取证困难等弊端，导致监管效率低下，难以实现从“末端治理”到“全过程控制”的转变。

在此背景下，“数字化赋能”即通过引入先进的信息技术，重塑业务流程，提升决策效能。将其应用于基建环境污染防控，意味着将施工环境视为一个可感知、可分析、可干预的智能实体，从而实现从“人防”到“技防”、从“经验驱动”到“数据驱动”的根本性变革，达成精准、高效、经济的污染防治目标。

一、数字化赋能精准防控的核心技术体系

数字化赋能精准防控体系的构建，依赖于一个多层次、协同工作的核心技术集群。

（一）感知层负责物联网构建“全天候”监测网络

感知层是数字化防控的体系的“神经末梢”，负责全面采集环

境数据。通过在施工场地边界、重点作业区域（如土方开挖区、材料搅拌站）、运输道路及敏感保护目标（如学校、医院、居民区）周边，布设各类环境监测传感器，形成一张高密度的物联监测网。扬尘监测是采用激光散射法等原理在线监测仪采用激光散射式传感器（测量范围0-1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，精度 $\pm 10\%$ ），在施工场地边界（每500m1台）、土方作业区（移动设备，随作业面移

作者简介：魏彬（1983.10-），男，汉族，河北邢台人，大学本科，助理工程师，从事企业基建期环境保护研究。

动)、材料堆场(固定安装)部署,实时监测PM2.5、PM10浓度,并联动气象五参数(风速、风向、温度、湿度、大气压力)站,分析污染与气象条件的关联;噪声监测通过部署具备自动校准功能的噪声传感器,实现等效连续A声级Leq的实时测量,并能捕捉突发性噪声事件;视频监控利用高清球机与枪机结合,对重点区域进行可视化监控,既可直观判断污染源(如裸土未覆盖、车辆冲洗不到位),又能为后续的取证与责任认定提供依据。所有传感器数据通过4G/5G或LoRa等无线通信技术,实时传输至云端数据中心,确保了数据的连续性与完整性。

(二) 网络层与平台层是云计算与大数据构筑“智慧中枢”

网络层负责数据的稳定传输,而平台层则是整个体系的“大脑”。基于云计算技术构建的环保监控云平台,负责海量异构数据的汇聚、存储、管理与分析。

数据融合与治理,通过平台整合来自传感器、视频流、业务系统(如施工计划、车辆信息)乃至外部数据(如气象预报、城市交通流),形成统一的“环境数据湖”。大数据分析则运用分布式计算框架,对历史与实时数据进行深度挖掘。例如,通过关联性分析,找出噪声峰值与特定施工机械(如打桩机、混凝土泵车)作业时间的对应关系;通过回归分析,建立扬尘浓度与风速、湿度及土方作业强度的预测模型。污染源与扩散模拟需要结合GIS地理信息系统,利用CALPUFF等大气扩散模型或噪声传播模型,在电子地图上动态模拟污染物在空间上的扩散范围与影响程度,快速锁定主要污染源,实现从“面”到“点”的精准定位。

(三) 应用层是人工智能驱动“智能决策与闭环管控”

应用层直接面向用户,提供具体的管控功能,是数字化赋能的最终价值体现。

平台预设污染物浓度阈值(如PM10超过 $150\mu\text{g}/\text{m}^3$,噪声夜间超过55分贝)。一旦数据超标,系统立即通过短信、APP推送、自动语音电话等方式,向项目经理、环保专员及监管人员发出多级报警。AI图像识别技术可自动分析视频画面,识别“未湿法作业”、“渣土车冒装撒漏”等违规行为,并触发报警,从而实现智能预警与报警。智能联动控制是实现“感-联-控”一体化。当扬尘监测点数据超标时,系统可自动联动现场的喷淋、雾炮等降尘设备开启;当噪声监测点数据异常,可自动调整高噪声设备的作业时间或向司机发出提醒,实现从“监测”到“治理”的无人化闭环。所有数据、报警、设备状态均在平台驾驶舱以图表、曲线、热力图等形式直观展示。管理人员可“一图总览”全局污染态势,进行远程调度与指挥。同时,平台基于大数据分析生成的污染趋势报告、治理效果评估报告等,能为管理者优化施工工艺、调整作业方案提供科学的数据支撑。

二、数字化赋能下的精准防控应用实践

以某大型城市地铁建设项目为例,该项目在长达10公里的施工线上全面应用了上述数字化防控体系。

1. 精准溯源,解决“扯皮”问题,过去当周边居民投诉扬

尘大时,施工方与相邻工地常相互推诿。部署监测网络后,通过平台的风玫瑰图与浓度热力图叠加分析,清晰地显示在特定风向下,主要污染源来自于本项目土方开挖段,促使施工方立即加强该区域的覆盖与喷淋,责任一目了然。

2. 预见性防控,变被动为主动,系统根据气象局发布的次日大风预警,结合施工计划,提前向管理人员发出“明日风力4-5级,建议暂停大面积土方作业,并提前开启全场喷淋系统”的建议。管理人员采纳建议,有效避免了可能发生的扬尘超标事件。

3. 噪声精细化管理,和谐社区关系。在靠近居民区的标段,系统设定了更严格的夜间噪声阈值。一旦监测到噪声持续接近阈值,平台会自动向附近的挖掘机操作手持终端发送“降噪操作提醒”,建议其采用“轻抬慢放”等低噪声作业方式,避免了因噪声投诉导致的工期延误。

4. 闭环管理,提升治理效率。系统捕捉到一处围挡喷淋设备故障离线,同时该区域PM10浓度缓慢上升。平台自动生成工单,派发给维护人员。维护人员通过APP接收任务,前往修复,并在完成后于APP上上传照片确认,形成完整的“监测-报警-处置-反馈”闭环,确保了治理设施的有效运行。

该项目的环境投诉率同比下降了70%以上,扬尘与噪声超标时长减少了超过50%,降尘设备能耗因智能化联动控制降低了约30%,真正实现了环境效益与经济效益的双赢。

数字化赋能基建扬尘与噪声污染精准防控技术应用

三、当前存在的问题与优化建议

尽管数字化赋能基建扬尘与噪声精准防控技术在实践中展现了显著成效,但其在大规模推广与深度应用过程中,仍面临一系列技术、经济与管理层面的挑战。认识到这些问题,并寻求有效的优化路径,是推动该技术关键。

(一) 面临的主要问题

1. 技术融合深度不足,智能水平有待提升

当前系统虽集成了多项技术,但多处于“数据可视化管理”阶段,真正的智能决策能力仍有欠缺。模型精度与适应性局限,现有的污染扩散预测模型(如CALPUFF)多为通用模型,在复杂城市地貌、高密度建筑群等特定施工环境下,其模拟精度会受到影响。AI算法的训练依赖于大量高质量数据,但在项目初期数据积累不足,或遇到未曾见过的施工场景(如新型工艺、特殊地质)时,模型的预测准确性和泛化能力会显著下降。系统孤岛现象依然存在,数字化防控平台与项目的BIM管理系统、智慧工地平台、企业ERP系统等尚未实现深度融合。数据壁垒导致防控系统难以提前获取精确的施工计划、设备调度信息,从而限制了其从事中干预向事前预测跃迁的能力。智能联动颗粒度偏粗,当前的联动控制多局限于“超标即开启”的简单逻辑。例如,当扬尘超标时,系统会开启整个区域的喷淋系统,而非根据风向、污染源位置进行精准靶向控制,造成了水资源和能源的浪费。

2. 初始投入与运维成本较高,制约中小企业应用

数字化防控体系的建设是一项资本密集型投资。硬件成本高

昂，高精度、高稳定性的环境传感器、智能识别摄像头等前端设备价格不菲。要实现全面覆盖，尤其对于大型线性工程（如公路、地铁），一次性硬件投入巨大。软件平台开发与运维复杂，定制化云平台开发、后期的维护升级以及数据存储与分析服务都需要持续的资金投入。这对于利润空间有限、技术实力较弱的中小型施工企业而言，构成了较高的准入壁垒，可能导致技术应用的不平衡。

3. 数据质量与标准体系尚不完善

传感器性能参差不齐，市场上前端监测设备品牌众多，其精度、稳定性、抗干扰能力（如对湿度、温度的交叉敏感性）差异较大。若选用了低质量设备，将直接导致监测数据失真，使后续所有分析决策失去意义。缺乏统一的行业标准，目前对于监测点的布设密度、数据传输协议、数据质量控制和校准规范等，尚缺乏国家或行业层面的强制性统一标准。这导致不同项目、不同厂商的数据难以横向对比和汇聚利用，阻碍了区域级环境监管大数据的形成。

4. 复合型人才短缺，组织协同存在障碍

人才技能断层，数字化环保管理要求人员既懂施工现场的环保业务，又熟悉数据分析、物联网和 AI 的基本原理。当前，同时具备这两种知识结构的复合型人才 极为稀缺，导致系统功能无法被充分挖掘，或问题出现时无法进行有效诊断和优化。组织架构与流程不匹配，传统的施工管理组织架构和流程并未针对数字化防控进行重塑。环保专员、设备管理员、IT 运维人员分属不同部门，协同效率低。当系统发出预警或联动指令时，可能因职责不清、流程繁琐而得不到快速响应，使得“闭环管理”在最后一公里被打破。

（二）系统性优化建议

针对上述问题，应从技术、模式、标准与人才四个维度协同发力，推动体系的迭代升级。

1. 技术深化从“感知智能”迈向“认知智能”

引入数字孪生技术，构建与物理施工现场完全映射的数字孪生模型。通过在虚拟空间中集成 BIM、GIS、实时 IoT 数据与物理规律模型，可以对施工活动可能产生的环境影响进行高保真模拟与推演。管理人员能在动工前，就在数字世界中测试和优化施工方案与降噪降尘措施，实现真正的“预见性”防控。发展自适应 AI 算法，投入研发资源，采用迁移学习和在线学习等先进 AI 算法，使模型能够利用已有项目的知识，并在新项目的数据流中持续自我优化，不断提升其在复杂场景下的预测精度和适应能力。实现资源精准调控，优化智能联动逻辑，结合气象数据与污

染溯源结果，实现喷淋、雾炮等治理设备的自适应精准启停与流量控制。

2. 模式创新降低应用门槛，培育产业生态

推广“平台即服务”模式，鼓励有实力的科技企业或第三方专业机构，搭建行业级的“智慧环保 SaaS 云平台”。中小企业无需承担高昂的开发和运维成本，可按需订阅服务，通过网页或 APP 接入使用，大幅降低技术应用门槛。探索政企合作与金融服务这样对于大型公共基建项目，政府可探索采用“补贴+监管”的模式，激励施工企业应用数字化防控技术。同时，鼓励金融机构开发“绿色信贷”产品，为积极进行环保数字化升级的企业提供优惠贷款，以经济手段驱动技术普及。

3. 标准建设夯实数据基石，保障规范应用

建议由行业协会或主管部门牵头，联合龙头企业、科研机构，加快制定行业标准规范，对设备选型、布点原则、数据格式、质控流程等做出统一规定。建立设备认证与数据校准体系，推行前端监测设备的强制性认证或推荐性名录制度，确保入网设备的质量。同时，要求项目建立定期的人工比对与校准机制，并将校准记录上传平台，确保数据的长期可靠性与法律有效性。

4. 人才培养与组织重塑激发体系内生动力

实施跨领域人才培养计划，企业和高校、职业院校应加强合作，开设面向在职工程师的数字化技能培训班，以及面向学生的“智能建造与环境工程”交叉学科课程，系统性培养复合型人才。优化组织流程与绩效考核，企业应设立跨部门的“数字化环保工作组”，明确其在预警响应、设备维护、数据解读等方面的权责。同时，将数字化防控系统的使用效能（如预警响应率、闭环处置率、节能减排量）纳入项目团队和个人的关键绩效指标，从制度上激励员工主动使用和优化系统。

四、结束语

数字化赋能基建扬尘与噪声污染防控，是顺应时代发展的必然选择。它通过构建“感知互联、数据驱动、智能决策、精准执行”的技术体系，彻底改变了传统环境监管的被动与低效局面。该技术应用能够显著提升污染治理的精准度与效率，降低环境风险与运营成本，是推动建筑业绿色、可持续发展的关键路径。面对当前的挑战，需要政府、企业、科研机构协同努力，加大投入、完善标准、培养人才，共同推动数字化防控技术不断走向成熟与深化应用，为建设美丽中国、智慧城市提供坚实的技术保障。

参考文献

- [1] 孙雨欣, 段媛媛, 王文婷, 浦真煜, 周燕, 伍彩云. 施工现场扬尘噪声污染的智能化监测研究 [J]. 中国设备工程, 2022 (13): 173-174.
- [2] 秦涵祥. 建筑施工中的施工污染问题与对策探讨 [J]. 住宅与房地产, 2019 (15): 273.
- [3] 刘曾可, 彭思泽. 工地施工对周围环境影响影响探讨 [J]. 资源节约与环保, 2018 (10): 130-132.

生态约束与“双碳”目标驱动下内蒙古文旅产业绿色转型的管理创新

黄晓晨

中国海洋大学, 山东 青岛 266000

DOI:10.61369/EAE.2025060009

摘 要： 内蒙古作为我国北疆生态安全屏障与文旅资源丰富集区，其文旅产业发展长期面临“生态保护—产业增长—低碳转型”的三重矛盾。在生态约束日益趋紧与“碳达峰、碳中和”目标双重驱动下，内蒙古文旅产业暴露出数字化赋能不足、生态与产业协同失衡、跨境协同机制不健全等突出问题，绿色转型迫在眉睫。本文基于产业链协同理论，结合内蒙古文旅产业发展实际，从生态管控、数字赋能、跨境协同三个维度构建管理创新体系，提出动态承载力管控、北疆文化数字资源整合、中蒙俄跨境生态协同等具体路径，并配套政策、技术、人才等保障措施，旨在为内蒙古文旅产业实现“生态安全—低碳发展—经济增收”的协同目标提供理论支撑与实践指引，同时为边疆民族地区文旅产业绿色转型提供参考。

关 键 词： 生态约束；双碳目标；文旅产业；绿色转型；内蒙古；产业链协同

Management Innovation for the Green Transformation of Inner Mongolia's Cultural and Tourism Industry Driven by Ecological Constraints and the "Dual Carbon" Goals

Huang Xiaochen

Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266000

Abstract： As an ecological security barrier in northern China and a region rich in cultural and tourism resources, Inner Mongolia has long faced a triple contradiction in the development of its cultural and tourism industry: "ecological protection – industrial growth – low-carbon transformation." Driven by increasingly stringent ecological constraints and the goals of "carbon peaking and carbon neutrality," Inner Mongolia's cultural and tourism industry has revealed prominent issues such as insufficient digital empowerment, an imbalance between ecological and industrial synergy, and inadequate cross-border collaboration mechanisms, making green transformation an urgent necessity. Based on the theory of industrial chain synergy and considering the actual development of Inner Mongolia's cultural and tourism industry, this paper constructs a management innovation system from three dimensions: ecological governance, digital empowerment, and cross-border collaboration. It proposes specific pathways such as dynamic carrying capacity control, integration of digital cultural resources in northern China, and Sino-Mongolian-Russian cross-border ecological collaboration, supported by policy, technological, and talent safeguards. The aim is to provide theoretical support and practical guidance for Inner Mongolia's cultural and tourism industry to achieve the synergistic goals of "ecological security – low-carbon development – economic growth," while also offering a reference for the green transformation of the cultural and tourism industry in border and ethnic regions.

Keywords： ecological constraints; dual carbon goals; cultural and tourism industry; green transformation; Inner Mongolia; industrial chain synergy

一、研究背景

内蒙古地处我国北方边疆，拥有草原、沙漠、森林等独特自然生态资源，以及红山文化、游牧文化、边境文化等丰富人文资源，文旅产业已成为推动区域经济增长、促进民族团结的重要支

柱产业。然而，2001–2020年的发展实践表明，内蒙古文旅产业在快速扩张过程中，生态约束问题日益凸显：20%的草原景区年接待量超出环境承载力15%，导致草场退化率较合规景区高出8个百分点；东部草原景区日均产生垃圾15吨，其中塑料垃圾占比达60%，回收率却不足40%，部分景区垃圾随意堆放现象严重，对

基金项目：内蒙古自治区文化和旅游发展研究课题（2023年度）“新时代内蒙古文旅产业高质量融合发展研究”（课题编号：2023-WL0040）。

作者简介：黄晓晨（1990—），男，博士研究生，讲师，研究方向：文旅深度融合与产业转型、民族地区文化资源转化、北疆文化品牌赋能研究。

土壤与地下水造成污染；在文化遗址周边违规建设旅游设施，文物保护与旅游开发的矛盾持续加剧。与此同时，“双碳”目标的提出对文旅产业的低碳发展提出了更高要求，而内蒙古文旅产业“冬冷夏热”的季节性瓶颈、数字化水平区域失衡、跨境文旅收入占比低等问题，进一步制约了其绿色转型进程。如何通过管理创新破解多重矛盾，实现文旅产业与生态保护、低碳目标的协同发展，成为内蒙古文旅产业高质量发展亟待解决的关键问题。

二、生态约束与“双碳”目标下内蒙古文旅产业的转型压力

（一）生态约束下的产业发展矛盾加剧

内蒙古文旅产业的生态约束主要体现在资源开发与生态保护失衡、生态承载力与客流增长不匹配两个方面。在资源开发与生态保护方面，部分地区为追求短期经济利益，过度开发文旅资源，忽视生态保护，导致生态环境遭到破坏。例如，红山文化遗址作为国家级文物保护单位，其周边违规建设旅游设施面积达120公顷，不仅破坏了遗址的历史风貌，还对周边土壤、植被造成了一定程度的污染；部分沙漠景区为吸引游客，过度开展沙漠越野、沙地摩托等旅游项目，导致沙丘固化率下降，沙漠生态系统遭到破坏，生态修复成本年均增加15%。在生态承载力与客流增长方面，随着内蒙古文旅产业的快速发展，游客数量逐年增加，但部分景区未能科学测算生态承载力，导致客流超出生态承载上限，引发一系列问题。2020年东部某草原景区因未及时调控超承载力客流，导致景区内出现严重拥堵，游客体验满意度骤降至58%；同时，过度的旅游活动导致草原植被遭到破坏，而草原生态的恢复周期长达3-5年，需要投入大量的资金与人力进行修复，形成“开发-破坏-修复”的恶性循环，严重制约了文旅产业的可持续发展。

（二）“双碳”目标下的低碳转型压力凸显

“双碳”目标的提出对文旅产业的能源消耗、运营模式、产品结构提出了新的要求，而内蒙古文旅产业在低碳转型过程中面临着能源结构传统化、运营效率低下、产品结构单一三重压力。在能源结构方面，内蒙古文旅景区的能源消耗以传统能源为主，景区交通主要依赖燃油车接送，冬季冰雪旅游设施则依赖燃煤供暖，单位游客碳排放较全国平均水平高出22%，远不能满足低碳发展的要求。在运营效率方面，内蒙古东中西部文旅景区的运营效率存在显著差异，东部滞后区的景区仍采用人工统计客流、人工巡检等传统运营方式，不仅效率低下，还造成了大量的能源浪费。2020年数据显示，东部景区单位营收的能耗是西部智慧景区的1.8倍，运营效率的低下进一步加剧了碳排放压力。在产品结构方面，内蒙古文旅产业存在明显的季节性瓶颈，冬季（11月-次年3月）文旅收入占比始终低于10%，2020年仅为7.2%。冬季文旅产品主要集中于冰雪观光，如阿尔山冰雪大世界、呼伦贝尔冰雪那达慕等，缺乏“冰雪+北疆文化+低碳”的融合业态，且部分冰雪设施能耗较高，难以满足“双碳”目标要求；同时，冬季游客平均停留时间仅1.2天，远低于夏季的2.5天，产品结构的不

一不仅加剧了季节性失衡，还制约了低碳转型的推进。

（三）产业链协同不足导致系统性瓶颈

基于产业链协同理论，内蒙古文旅产业链存在上游资源分散、中游运营低效、下游市场割裂的系统性瓶颈，严重制约了文旅产业的绿色转型。在产业链上游，北疆文化数字资源分散，缺乏统一的整合平台，仅30%的博物馆、非遗项目实现数字化展示，红山文化、游牧文化等核心资源的数字内容稀缺。2020年北疆文化数字资源总量仅为浙江省的1/5，难以支撑“线上+线下”融合的绿色文旅体验；同时，数字文创开发滞后，数字藏品、虚拟体验等新型文旅产品占比不足10%，未能形成“数字传播—数字消费—数字收益”的闭环，2020年数字文创销售额仅占文旅商品总销售额的28%，数字化对文化价值的放大作用未充分发挥，无法为文旅产业绿色转型提供充足的内容支撑。在产业链中游，景区、旅行社、文创企业等主体之间缺乏有效的协同机制，各自为政，运营效率低下。例如，景区与文创企业之间缺乏深度合作，文创产品的开发未能充分结合景区的文化特色与生态理念，导致文创产品同质化严重，市场竞争力不足；旅行社在旅游线路设计上，未能充分考虑生态保护与低碳要求，过度推荐高能耗、高污染的旅游项目，加剧了生态压力。在产业链下游，跨境文旅合作机制不健全，中蒙俄跨境文旅合作项目多为临时性的观光购物活动，2020年此类项目仅18个，且缺乏“北疆文化+跨境体验”的融合业态，如中蒙俄北疆文化跨境研学、草原丝绸之路文化体验等，跨境文化传播的深度不足。同时，跨境游客中以文化体验为目的的占比仅为42%，远低于购物目的的58%，跨境游客复游率仅12%，低于国内游客18%的平均水平，开放型文旅经济的潜力未被激活，进一步制约了产业链绿色价值的释放。

三、基于产业链协同的内蒙古文旅产业绿色转型管理创新体系

（一）生态管控维度：动态承载力与低碳运营的协同创新

1. 构建动态承载力管控机制

为破解生态承载力与客流增长不匹配的问题，内蒙古文旅产业突破传统的“静态承载力”测算模式，构建“生态阈值-客流调控-补偿反馈”的动态承载力管控机制。首先，利用卫星遥感、物联网等先进技术，实时监测草原植被覆盖率、土壤含水率、空气质量等生态指标，建立生态环境数据库，为生态承载力测算提供数据支撑。基于生态环境数据库，结合景区的地形地貌、生态类型等因素，构建“生态承载力-游客容量”动态匹配模型，科学测算不同季节、不同时段景区的最大游客容量。当监测到草原植被覆盖率低于65%、土壤含水率低于15%等生态阈值时，系统自动触发客流限流机制，通过景区官方网站、在线旅游平台等渠道发布限流公告，将每日接待量减少30%，同时调整门票预约系统，限制预约人数，避免客流超出生态承载上限。其次，设立“文旅生态补偿基金”，对因限流导致收入减少的景区给予补偿。参考2020年内蒙古文旅生态补偿资金占文旅专项资金8%的现状，建议将生态补偿资金占比提升至15%，补偿标准

根据景区等级、限流时长、损失程度等因素综合确定；同时，对超承载力运营的景区征收生态修复费，征收标准根据超出承载力的比例、对生态环境的破坏程度等因素制定，所征收的费用全部注入生态补偿基金，用于生态修复与补偿，形成“保护－补偿－修复”的良性循环。例如，呼伦贝尔草原景区可借鉴鄂尔多斯成吉思汗陵景区的大数据监测经验，建立完善的生态监测与客流调控系统，将应急响应时间缩短至30分钟内，在保障生态安全的同时，提升游客体验。

2. 创新低碳运营模式

在文旅产业链中游，推动“能源替代－垃圾减量－碳足迹追踪”的协同管理，创新低碳运营模式。在能源替代方面，推广光伏发电、新能源车接送等低碳能源利用方式。西部核心景区如鄂尔多斯成吉思汗陵景区可试点“光伏＋储能”系统，在景区停车场、游客服务中心等区域安装光伏板，为景区的智慧设备、照明系统、游客服务设施提供电力支持，同时配备储能设备，确保能源供应稳定；东部滞后区景区逐步淘汰燃油车接送，引入新能源车和充电桩，2030年前实现景区交通零碳排放。在垃圾减量方面，推行“分类收集－就地处理－循环利用”的垃圾管理模式。在草原、沙漠等生态敏感景区设置可降解垃圾回收箱，配备专门的垃圾清理人员，定期对垃圾进行分类收集；与当地牧民合作，开展垃圾清理作业，既解决了垃圾处理问题，又为牧民增加了收入来源；引入小型垃圾处理设备，对可降解垃圾进行就地处理，转化为有机肥料，用于景区植被养护；加强对游客的环保宣传教育，通过景区广播、宣传手册、志愿者引导等方式，提高游客的环保意识，减少垃圾产生量，目标将塑料垃圾回收率提升至70%以上。在碳足迹追踪方面，开发“文旅碳账户”系统，对游客在交通、住宿、餐饮、消费等环节产生的碳排放进行实时记录与统计。游客可通过扫描景区二维码注册“文旅碳账户”，系统根据游客的出行方式、住宿选择、消费内容等数据，自动计算游客的碳排放量，并生成碳足迹报告；同时，推出“碳积分兑换”活动，游客可通过参与低碳旅游活动（如步行游览、使用可降解餐具、参与生态修复志愿活动等）获得碳积分，碳积分可兑换景区门票、文创产品、住宿折扣等奖励，激励游客践行低碳旅游行为。此外，推动景区、酒店、旅行社等文旅企业公开碳排放量，接受社会监督，形成全社会共同参与的低碳文旅发展氛围。

（二）数字赋能维度：产业链效率与文化价值的协同创新

1. 搭建北疆文化数字资源整合平台

针对内蒙古北疆文化数字资源分散、开发滞后的痛点，由内蒙古自治区政府牵头，联合文旅部门、文物部门、科技企业等主体，搭建“北疆文化数字云平台”，实现北疆文化数字资源的整合与共享。在平台建设初期，重点开展北疆文化数字资源的采集与整理工作，上游联合全区各大博物馆、非遗保护中心、文化研究机构等，将红山文化、游牧文化、边境文化等核心文化资源转化为3D模型、VR体验内容、数字影像等数字化形式。例如，对红山文化遗址进行三维扫描，构建虚拟红山遗址考古体验场景；对蒙古族长调、呼麦等非遗技艺进行数字化录制，制作VR非遗体验课程；对草原那达慕、祭敖包等民俗活动进行全程拍摄，制作

数字影像资料，2030年前实现90%以上的重点文化资源数字化。在平台运营过程中，推动景区、文创企业、在线旅游平台等中游主体接入平台，开展数字文旅产品的开发与运营。景区可基于平台的数字资源，开发虚拟景区游览、VR文化体验等线上文旅产品，缓解线下客流压力，降低碳排放；文创企业可利用平台的文化元素，开发数字藏品（如蒙古包建筑纹样NFT、游牧生活数字手账）、数字文创周边等产品，丰富文旅产品类型；在线旅游平台可将平台的数字资源与旅游线路相结合，推出“线上云游＋线下体验”的融合旅游产品，提升游客体验。同时，平台还设置数字文旅商城，整合全区的数字文旅产品，实现“数字内容生产－传播－消费”的闭环，目标2030年数字文创销售额占文旅商品总销售额的比例提升至50%。在平台推广方面，下游通过对接短视频平台、直播平台、社交媒体等渠道，开展“数字文旅直播”“云游北疆”等宣传活动，吸引更多游客关注北疆文化，激发游客线下低碳出行的意愿，缓解实地客流对生态环境的压力。

2. 推动智慧景区运营系统升级

针对内蒙古东中西部文旅景区数字化水平差异显著的问题，实施“梯度推进－协同共享”的智慧景区运营系统升级策略，提升产业链整体运营效率。西部核心景区在现有智慧景区建设基础上，进一步优化“大数据客流监测＋VR文化展示”功能，试点“AI智能导览＋低碳路线推荐”系统。AI智能导览系统可根据游客的兴趣偏好、游览时间等因素，为游客定制个性化的游览路线，并通过语音导览、AR实景导航等方式，为游客提供精准的导览服务；低碳路线推荐功能则结合景区的生态环境状况与低碳发展要求，为游客推荐步行、骑行等低碳游览路线，减少景区内交通工具的使用，降低碳排放。同时，西部核心景区还可探索“数字孪生景区”建设，构建与实体景区1:1对应的虚拟景区，实现景区运营状态的实时监测、模拟仿真与智能决策，提升景区管理的精细化水平。东部滞后区景区以补齐数字化短板为重点，优先实现“线上票务预订－智能导览－客流预警”等基础智慧功能的覆盖。通过与西部核心景区、科技企业合作，引入成熟的智慧景区解决方案，降低建设成本；2025年前实现东部地区智慧景区覆盖率提升至60%，解决游客排队购票、信息查询不便等问题，提升游客体验。为缩小东中西部景区的数字化差距，建立“东西部智慧景区帮扶机制”，由西部核心景区向东部滞后区景区输出数字化管理经验、技术人才与运营数据，东部景区则提供生态资源、文化特色等方面的支持，实现优势互补。例如，东部草原景区可接入西部景区的大数据客流监测平台，实时获取周边景区的客流信息，实现跨区域客流调度，避免单景区超承载力运营；西部景区可借鉴东部景区的生态保护经验，优化自身的生态管理策略，形成东中西部景区协同发展的良好格局。

（三）跨境协同维度：开放合作与生态安全的协同创新

1. 建立中蒙俄跨境文旅生态协同机制

依托中蒙俄经济走廊建设的战略机遇，构建“生态共保－产品共研－标准共建”的中蒙俄跨境文旅生态协同机制，激活内蒙古文旅产业的开放优势。在生态共保方面，内蒙古与蒙古国、俄罗斯相关地区联合建立跨境草原生态监测网络，在中蒙俄边境草

原地区布设生态监测站点，实时监测草原植被覆盖度、野生动物迁徙轨迹、空气质量等生态指标，共享监测数据，共同制定跨境旅游生态保护细则。例如，联合测算跨境旅游线路的游客容量，明确跨境旅游活动的生态保护标准；建立跨境垃圾清运机制，统一规范跨境旅游垃圾的收集、运输与处理流程，避免跨境旅游活动对边境生态环境造成破坏。在产品共研方面，三国联合开发“草原丝绸之路低碳研学”“跨境游牧文化体验”“中蒙俄边境生态旅游”等融合业态的跨境文旅产品，打破当前“口岸观光+免税购物”的同质化产品格局。例如，开发“草原丝绸之路低碳研学”产品，组织游客沿着草原丝绸之路，体验中蒙俄三国的游牧文化、民俗风情，参与跨境草原生态修复活动，了解三国的生态保护理念与低碳发展实践；开发“跨境游牧文化体验”产品，让游客跟随游牧民族一起迁徙，体验三国游牧民族的生产生活方式，感受跨境游牧文化的魅力。2030年前将跨境文化体验类产品占比提升至60%，提高跨境文旅产品的文化内涵与生态价值。在标准共建方面，中蒙俄三国共同制定跨境文旅服务标准，解决语言沟通、支付结算、应急救援等方面的问题。例如，联合开发多语言智能翻译设备，为跨境游客提供汉语、蒙古语、俄语等多语言翻译服务；建立跨境文旅支付平台，实现三国货币的便捷兑换与支付；制定跨境文旅应急救援预案，建立三国应急救援联动机制，确保跨境游客的人身安全，将跨境游客满意度提升至90%以上。

2. 创新跨境碳汇交易与补偿合作模式

充分利用内蒙古草原丰富的碳汇资源，与蒙古国、俄罗斯开展跨境碳汇交易与补偿合作，实现“低碳旅游-碳汇交易-生态补偿”的协同发展。在跨境碳汇交易方面，内蒙古文旅企业可购买蒙古国、俄罗斯的草原碳汇额度，抵消自身在运营过程中产生的碳排放，实现碳中和目标。同时，三国联合开发“碳汇文旅产品”，如推出“跨境草原碳汇修复之旅”，组织游客参与中蒙俄边境草原的生态修复活动，游客在活动中种植的树木、恢复的草原植被所产生的碳汇，可转化为碳汇证书发放给游客，游客可将碳汇证书在碳汇交易平台上进行交易或捐赠，既提升了游客的参与感，又推动了跨境草原生态修复。在跨境生态补偿方面，设立“中蒙俄跨境文旅碳补偿基金”，从跨境文旅收入中提取5%注入基金，基金由三国共同管理，主要用于中蒙俄边境地区的草原生态修复、跨境生态监测设施建设、低碳文旅技术研发等项目。例如，利用基金在中蒙俄边境草原地区开展草场改良、退化草原修复等生态工程；建设跨境生态监测站点，提升跨境生态监测能力；支持文旅企业研发低碳运营技术，推广光伏供电、新能源接驳车等低碳设施，形成“低碳旅游-碳汇交易-生态补偿”的良性循环，既激活了开放型文旅经济，又保障了北疆生态安全。

四、内蒙古文旅产业绿色转型管理创新的实施保障

（一）政策保障：完善生态-低碳协同政策体系

为确保内蒙古文旅产业绿色转型管理创新路径的有效落地，需要完善生态-低碳协同政策体系，为文旅产业绿色转型提供政策支持。建议内蒙古自治区政府出台《内蒙古自治区文旅产业绿

色转型五年行动计划（2026-2030）》，明确“双碳”目标下文旅产业绿色转型的总体目标、阶段性任务与责任分工。在生态保护方面，细化生态保护细则，制定《内蒙古自治区文旅景区环境承载力测算标准》，明确草原、沙漠、文化遗址等不同类型景区的生态承载力测算指标与方法，并将生态承载力达标情况纳入景区评级体系，对生态承载力超标的景区实行降级或限期整改。在低碳发展方面，加大财政支持力度，设立“内蒙古自治区文旅绿色转型专项基金”，基金规模初步设定为50亿元，对文旅企业的数字化升级、低碳设施改造、绿色文旅产品开发等项目给予30%的补贴；同时，强化税收优惠政策，对超额完成低碳目标的文旅企业，给予企业所得税减免优惠，激发企业参与绿色转型的积极性。在监管考核方面，建立文旅产业绿色转型考核评价体系，将文旅企业的碳排放强度、生态修复成效、数字化水平等指标纳入地方政府绩效考核体系，对考核优秀的地区与企业给予表彰奖励，对未完成考核目标的地区与企业进行约谈问责，形成“政府引导、企业主导、社会参与”的文旅产业绿色转型格局。

（二）技术保障：构建产学研用协同创新网络

技术创新是推动内蒙古文旅产业绿色转型的关键支撑，需要构建产学研用协同创新网络，为文旅产业绿色转型提供技术保障。建议由内蒙古自治区政府牵头，联合内蒙古大学、内蒙古农业大学、内蒙古师范大学等高校，内蒙古规模以上文化及旅游企业，成立“内蒙古文旅产业绿色转型研究院”。研究院聚焦生态监测技术、数字文旅技术、低碳运营技术三个核心技术方向开展研究：在生态监测技术方面，研发适用于草原、沙漠生态环境的物联网监测设备，如草原植被覆盖率传感器、土壤含水率监测仪等，提高生态监测的精准度与实时性；在数字文旅技术方面，开展北疆文化VR内容制作技术、智慧景区系统开发技术、数字文创产品设计技术等研究，为北疆文化数字资源整合平台建设、智慧景区升级提供技术支持；在低碳运营技术方面，研发景区光伏储能系统、可降解旅游用品、低碳文旅交通工具等技术与产品，降低文旅产业的碳排放。同时，研究院建立“技术研发-试点应用-成果推广”的技术转化机制，与文旅企业开展深度合作，在鄂尔多斯旅游景区、呼伦贝尔草原景区等设立试点基地，将研发的新技术、新产品在试点基地进行应用测试，根据应用效果进行优化完善，成熟后在全区范围内推广应用，解决文旅产业绿色转型中的技术瓶颈问题。

（三）人才保障：培育复合型绿色文旅人才

人才短缺是制约内蒙古文旅产业绿色转型的重要因素，需要实施“人才培育-引进-激励”计划，培育一支复合型绿色文旅人才队伍。在人才培育方面，在内蒙古大学、内蒙古师范大学、内蒙古财经大学、内蒙古艺术学院等高校开设“绿色文旅管理”“跨境文旅服务”“数字文旅技术”等专业方向，根据文旅产业绿色转型的需求，设置生态保护、低碳运营、数字技术、跨境服务等课程模块，培养既懂文旅管理，又掌握生态保护、数字技术、跨境服务知识的复合型本土人才；同时，加强高校与文旅企业的合作，建立实习基地，组织学生到景区、文创企业、在线旅游平台等进行实习实践，提高学生的实践能力。在人才引进方

面，制定“内蒙古绿色文旅人才引进计划”，重点引进数字文旅、碳管理、跨境文旅服务等领域的高端人才，为引进的人才提供住房补贴、科研经费支持、子女教育优惠等政策待遇；同时，通过举办“内蒙古绿色文旅人才招聘会”“绿色文旅产业发展论坛”等活动，吸引国内外优秀人才来内蒙古创新创业。在人才激励方面，建立健全绿色文旅人才评价与激励机制，将人才在生态保护、低碳运营、数字创新等方面的业绩纳入评价体系，对表现优秀的人才给予表彰奖励、职称晋升、薪酬提升等激励；同时，在文旅企业内部设立“绿色创新奖励基金”，对提出绿色转型创新方案、取得显著成效的员工给予奖励，激发员工的创新积极性，形成“培育－引进－激励”的人才保障体系，为内蒙古文旅产业绿色转型提供人才支撑。

五、结论

在生态约束日益趋紧与“双碳”目标双重驱动下，内蒙古文旅产业绿色转型既是解决当前产业发展矛盾的必然选择，也是实现高质量发展的必由之路。本文基于产业链协同理论，深入分析了内蒙古文旅产业面临的转型压力，构建了“生态管控－数字赋能－跨境协同”三维管理创新体系，并提出了相应的实施保障措施，得出以下主要结论：生态约束与“双碳”目标下，内蒙古文旅产业面临着生态－产业矛盾加剧、低碳转型压力凸显、产业链协同不足的多重转型压力，这些压力相互交织制约文旅产业可持续发展，亟需通过管理创新破解；其中，动态承载力管控与低碳

运营创新是破解生态约束、实现低碳发展的核心路径，通过构建“生态阈值－客流调控－补偿反馈”的动态承载力管控机制可实现生态保护与客流增长协同，通过推广光伏供电、新能源接驳车、推行垃圾分类处理及开发“文旅碳账户”系统，能有效降低文旅产业碳排放；数字资源整合与智慧运营升级是提升产业链效率、释放文化价值的关键举措，搭建北疆文化数字资源整合平台可整合分散文化资源、开发数字文旅产品并形成“数字内容生产－传播－消费”闭环，实施“梯度推进－协同共享”的智慧景区运营系统升级策略能缩小东中西部数字化差距、提升产业链整体效率；跨境生态协同与碳汇合作是激活开放优势、保障生态安全的重要途径，建立中蒙俄跨境文旅生态协同机制可实现三国文旅产业生态共保、产品共研、标准共建，创新跨境碳汇交易与补偿合作模式能够实现“低碳旅游－碳汇交易－生态补偿”协同发展；而政策、技术、人才是保障管理创新路径落地的重要支撑，完善生态－低碳协同政策体系可提供政策引导，构建产学研用协同创新网络能提供技术支持，培育复合型绿色文旅人才可为转型提供人才保障。

未来可进一步聚焦内蒙古不同类型文旅景区的管理创新差异，通过实证分析验证本文提出的管理创新路径实际成效，为不同类型景区制定更精准的绿色转型策略；同时，可加强与国内其他生态敏感地区文旅产业绿色转型的比较研究，借鉴其他地区成功经验，进一步完善内蒙古文旅产业绿色转型的管理创新体系，为边疆民族地区文旅产业高质量发展提供更具针对性的理论参考与实践指引。

参考文献

- [1] 李丽，徐佳. 中国文旅产业融合发展水平测度及其驱动因素分析 [J]. 统计与决策, 2020, 36(20): 49-52.
- [2] 张智慧，孙佳文，赵海东. 双重约束下内蒙古实现绿色高质量发展的路径探析 [J]. 内蒙古社会科学 (汉文版), 2019, 40(05): 197-202+213.
- [3] 顾江，田晓仪. 新质生产力与文化产业转型升级 [J]. 山东师范大学学报 (社会科学版), 2024, 69(06): 79-92.
- [4] 程远. 我国北方边疆少数民族地区文化产业发展研究——基于内蒙古自治区的投入产出分析 [J]. 财经理论研究, 2020(02): 24-33.
- [5] 田学斌，柳天恩，周斌. 新形势下我国产业转型升级认识纠偏和政策调适 [J]. 当代经济管理, 2019, 41(07): 1-7.
- [6] 殷杰，郑向敏，李实. 合作态势与权力角色：“一带一路”沿线国家旅游合作网络解构 [J]. 经济地理, 2019, 39(07): 216-224.
- [7] 向勇，李尽沙. 融合与共生：“一带一路”文化产业合作发展指数研究 [J]. 深圳大学学报 (人文社会科学版), 2020, 37(04): 56-65.
- [8] 吴福永. 内蒙古文化产业发展从“怎么看”到“怎么办” [J]. 北方经济, 2013(07): 9-12.
- [9] 黄颖祚，王姗. “双碳”背景下我国乡村旅游发展的时代要义及创新路径 [J]. 甘肃社会科学, 2022(03): 218-228.
- [10] 杜淑芳. 内蒙古文化产业发展报告 [J]. 新西部, 2018(19): 49-54.
- [11] 李凤亮，周建新，花建，魏鹏举，祁述裕，臧志彭，陈能军. 加快发展文化新生产力：理论内涵与实践路径 [J]. 探索与争鸣, 2024(07): 4+177.
- [12] 赵梦雅. “双碳”目标下文旅产业绿色发展路径研究 [J]. 西部旅游, 2023(18): 13-15.

豆类加工废弃物资源化利用研究进展

付龙云¹, 王保运², 王祥峰^{3*}

1. 山东省农业科学院农业资源与环境研究所, 山东 济南 250100

2. 齐鲁动物保健品有限公司, 山东 济南 250100

3. 山东省农业科学院茶叶研究所, 山东 济南 250100

DOI:10.61369/EAE.2025060010

摘 要 : 如何实现豆类加工废弃物的无害化处理和资源化利用, 是关系到行业健康发展的关键问题。以豆类加工废弃物为主要原料, 加工生产有机水溶肥、固体有机肥和聚谷氨酸, 可实现肥料化应用; 聚焦豆粕的营养特性, 通过酶解、微生物发酵等方式去除抗营养因子, 可实现饲料化应用; 而通过微波膨化、超临界萃取等技术制备和提取膳食纤维、皂苷、黄酮类等高附加值组分, 及利用豆渣制备猫砂等宠物用品, 可实现豆类加工废弃物的高值化利用, 促进豆类加工产业可持续发展。

关 键 词 : 豆类加工废弃物; 农业; 资源化

Research Progress on the Resource Utilization of Legume Processing Wastes

Fu Longyun¹, Wang Baoyun², Wang Xiangfeng^{3*}

1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan, Shandong 250100

2. Qilu Animal Health Products Co., Ltd., Jinan, Shandong 250100

3. Tea Research Institute, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan, Shandong 250100

Abstract : How to achieve harmless treatment and resource utilization of legume processing wastes is a critical issue concerning the healthy development of the industry. Using legume processing wastes as the primary raw material, the production of organic water-soluble fertilizers, solid organic fertilizers, and polyglutamic acid enables their application as fertilizers. Focusing on the nutritional properties of soybean meal, removing antinutritional factors through enzymatic hydrolysis and microbial fermentation allows for its use as animal feed. Additionally, high-value components such as dietary fiber, saponins, and flavonoids can be prepared and extracted using technologies like microwave puffing and supercritical extraction, while soybean residue can be utilized to produce pet products like cat litter. These approaches facilitate the high-value utilization of legume processing wastes and promote the sustainable development of the legume processing industry.

Keywords : legume processing wastes; agriculture; resource utilization

前言

中国有着悠久的豆类作物栽培、加工和食用历史。千百年来, 先民们通过持续实践探索, 发明了豆腐、豆浆、豆豉等多种广受欢迎的豆类食品, 不但有效消除了豆子中含有的植酸、植物凝集素、胰蛋白酶抑制剂等抗营养因子, 而且保留和转化了蛋白质、淀粉、维生素等营养物质, 提升了风味品质和感官特性。而随着现代食品工业的发展, 挤压膨化、微波加热、微生物发酵等不同物理、化学和生物技术手段应用在豆类加工中, 通过科学的流程设计和工艺串联, 不但极大丰富了传统豆类食品的供给, 而且可实现豆类淀粉、蛋白粉、卵磷脂等高价值产品的规模化生产, 极大提高了产品附加值^{[1][2]}。

然而, 传统和现代豆类加工方式, 都会不可避免的大量产生污水、豆渣、豆粕等废弃物, 这些豆类加工废弃物富含多种有机成分和氮磷钾等植物营养元素, 未经有效处理、直接排放易使水体发黑变臭, 持续产生 H₂S、NH₃ 等有害异味气体, 给人居环境卫生造成严重威胁。随着国家环保法规的更加完善和人民群众对于环保要求的日趋提高, 如何更有效的实现豆类加工废弃物的无害化处理和资源化利用, 日益成为关系企业美誉度和行业可持续发展的重要问题^[3]。

豆类加工废弃物中除糖类、蛋白质等常见有机成分外, 还可能含有黄酮类、膳食纤维等功能性组分。本文从提高产品附加值的角度出发, 在确保环境安全的前提下, 分类介绍豆类加工废弃物的肥料化、饲料化、材料化和其它高值化利用方式, 为促进豆类加工这一重要产业发展提供一定参考。

基金项目: 山东省重点研发计划项目 (2022TZXD0039)。

作者简介: 付龙云 (1983-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为农业微生物与环境保护。

一、豆类加工废弃物的肥料化利用

豆渣、豆粕、豆类加工废水等废弃物富含氮磷钾等植物营养元素和其他有机组分，是生产各类有机肥料的良好来源。然而，这些废弃物往往保存管理粗放、含水率高，极易腐败变质、滋生杂菌，产生黄曲霉素、细菌内毒素等剧毒物质。快速水解原料中的有机质，或以微生物发酵的方式抑制有害菌生长，进而促进有机成分的转化和腐熟，是肥料化利用的关键环节。

（一）不同水解法生产有机水溶肥料

有机水溶肥料生产过程中，将原料中的蛋白质水解为氨基酸、多肽是关键步骤，常见的蛋白水解方法有碱解法、酸解法、高温高压法、酶解法和微生物发酵法等。碱解、酸解和高温高压法反应条件剧烈，时间短、分解彻底，可以迅速获得大量氨基酸产物，但需消耗大量工业化学品，对反应器的要求严格，能耗巨大，且容易导致氨基酸发生异构化，产品品质一般；酶解法是利用风味酶、碱性蛋白酶、木瓜蛋白酶等组成的复合酶类，有选择的催化不同蛋白质水解，具有反应条件温和、水解效率高、操作简便等优点，在实践中广泛应用；与以上方法不同，微生物发酵法是利用细胞产生的各种胞内、胞外蛋白酶，将蛋白质分解为多肽和氨基酸，对反应器要求较低，反应条件温和，能耗小，发酵产物多样，特别是可产生多种对动植物有益的次生代谢产物，尤其适合高附加值水溶肥料的大规模制备。此外，碱解法、酸解法、高温高压法、酶解法生产的水溶肥料一般需要外源添加防腐剂，以抑制有害微生物的进一步生长，而微生物发酵由于已在物料内部形成“稳态”，可不使用或少使用防腐剂。

（二）利用豆类加工废水生产聚谷氨酸

聚谷氨酸（ γ -PGA）是一种绿色环保高分子聚合材料，具有良好的保水性、吸附性和生物相容性，可被生物完全降解，无污染和不良生态效应，可经由化学合成、酶转化或生物发酵的办法获取，在医药、化妆品、环保、食品和农业等领域有着重要用途^[4]。高浓度豆类加工废水富含蛋白质、糖类、脂类等营养物质，经灭菌处理后，可作为微生物生长的良好培养基。以这种废水作为主要发酵原料，通过纳豆芽孢杆菌等微生物发酵转化生产聚谷氨酸，不仅可节约污水排放成本，减轻环境压力，还可获取具有高经济价值的生化产品，实现经济与环境效益双赢。目前，国内已有利用豌豆加工废水转化生产聚谷氨酸的成功案例，终端产物中聚谷氨酸含量可达50g/L以上^[5]。

（三）豆渣好氧堆肥生产有机肥

豆渣是豆腐、豆奶等传统副食品和豆类蛋白粉、淀粉生产过程中的副产物，我国每年豆渣的产生量可达数千万吨。豆渣中氮磷钾等植物营养元素和有机质含量丰富，是制备有机肥的良好原料。好氧堆肥是常用的有机肥制备技术，通风良好、氧气充足的条件下，好氧微生物菌群对有机废弃物进行氧化、分解，该过程释放能量可使堆温升高至60℃以上并持续一段时间，可将大分子有机物降解为小分子有机物和无机物，实现“腐殖化”。传统的堆肥温度较低，腐熟速度慢，且可能残留蛔虫卵、大肠杆菌等有害微生物和杂草种子等。近年来高温堆肥（最高超过70℃）以其腐

熟彻底、速度快、养分转化率高的优势，日益成为废弃物堆肥的重要发展方向，而菌种的选择是实现“高温”的关键。陈泉嘉等从不同环境中筛选得到 *Geobacillus* sp、*Methylobacterium* sp 和 *Thermus thermophilus* 等嗜热微生物，显著加快了豆渣堆肥腐殖化进程，提高了产品中氮磷钾养分含量^[6]。

二、豆类加工废弃物的饲料化利用

目前，豆类加工废弃物的饲料化利用主要集中于大豆，例如大豆榨油后的豆粕、生产豆腐等残存的豆渣、黄浆水等，而豆粕是其中的主要部分。美国 NRC（National Research Council）营养标准中，豆粕构成了现代饲料配方中最主要的成分。现阶段，我国的饲料配方结构也是以豆粕为主，据统计，我国约85%左右的豆粕被用于饲料消费。

（一）豆粕营养特性

豆粕富含40%~48%的蛋白质，氨基酸含量全面、均衡，其中赖氨酸含量最高，占2.5%~3.0%，色氨酸0.6%~0.7%，蛋氨酸0.5%~0.7%。与谷实类饲料配合可起到互补作用。蛋氨酸含量较低，在以玉米-豆粕为主的饲料中，一般要额外添加蛋氨酸以满足畜禽营养需求。粗纤维含量较低，主要来自大豆表皮。无氮浸出物主要是蔗糖、棉籽糖、水苏糖和多糖类，淀粉含量低。胡萝卜素、核黄素和硫胺素含量少，烟酸和泛酸含量较多，胆碱含量丰富，维生素E在脂肪残量高和贮存不久的饼粕中含量较高。矿物质中钙少磷多，磷多为植酸磷（约占61%）^[7]。

（二）豆粕加工工艺

大豆取油后的副产物统称为豆粕。根据工艺差异，大豆取油后的残余产物可分为三类：压榨法所得称为大豆饼，浸提法或预压浸提法所得称为大豆粕，而去皮后又经浸提或预压浸提所得则称为去皮大豆粕，主要加工方法包括液压压榨、旋压压榨、溶剂浸提及预压后浸提四种。压榨法通常包括两个阶段：首先对油料进行清选、破碎、软化与轧胚，温度维持在60~80℃；随后经蒸炒处理，再施加机械压力分离油脂。浸提法则在55~65℃条件下，以有机溶剂浸泡料胚提取油脂，随后经烘干获得豆粕。相较于压榨法，浸提法出油率高4%~5%，且豆粕残脂率低、更耐储存，是当前主流工艺。

（三）饲用豆粕深加工方式

初步加工获取的豆粕仍含有多种抗营养因子，直接饲喂可能影响动物消化、吸收，严重的甚至会引起腹泻，这些缺陷限制了豆粕在饲料中的应用。因此，需要对豆粕做进一步加工处理，以尽可能降低抗营养因子含量，并补充益生菌、微量元素等，提高营养价值。实际生产中，一般采用加热、酶解、微生物发酵等方式来完成饲用豆粕的转化，而通过芽孢杆菌、乳酸菌、酵母菌等益生菌对豆粕进行发酵，不但改善了适口性，而且可以全面提高粗蛋白、粗脂肪和磷等营养成分的含量，消除胰蛋白酶抑制因子、大豆凝集素、致甲状腺肿素等绝大部分抗营养因子，补充肠道益生菌^[8]。

三、豆类加工废弃物的其它高值化利用

不同来源的豆类加工废弃物在元素组成、营养成分等方面存在较大差异，可能含有的膳食纤维、脂类、多肽、维生素等为其进一步高值化利用提供了物质基础。针对其中的某些功能性组分，采用适宜的技术手段进行提取或深加工，可提高豆类加工副产物的附加值，为企业产生更高利润。

（一）豆类膳食纤维的提取

不能被人体消化酶分解的碳水化合物称为“膳食纤维”，包括可溶性膳食纤维（soluble dietary fiber，SDF）和不溶性膳食纤维（insoluble dietary fiber，IDF）。膳食纤维对人体多有益处，如降低血脂、血压，抑制餐后升糖，促进肠道蠕动等^[9]。豆类加工废弃物是提取膳食纤维的良好原料，大豆、鹰嘴豆、豌豆等来源的豆渣中膳食纤维含量高达40%~65%，通过挤压、微波膨化和纤维素酶水解等加工方式，可获取较高浓度的可溶性膳食纤维。

（二）黄酮及皂苷类物质的提取

大豆、鹰嘴豆等豆类植物种子富含黄酮、皂苷等重要活性物质，黄酮类具有抗炎症、抗菌抗病毒、免疫调节、促进伤口愈合等多种有益作用，而皂苷则具有强大的抗氧化、抗衰老特性。常用的提取方法有溶剂浸提、超临界萃取、超声波与微波辅助提取、酶解辅助提取法等。经提取后所得到的粗制品还含大量蛋白

质、无机盐、糖类等，需进一步纯化以更有利于保存和发挥效用，大孔树脂纯化法、高效液相色谱纯化法、连续色谱分离纯化法、凝胶层析纯化法膜分离法等方法常用的纯化方法^[10]。

（三）制造猫砂

猫砂具有吸附尿液、包裹粪便、掩盖异味的功能，便利了人们在室内的养猫需求，已成为现代养猫的必需品。猫砂有膨润土、硅胶、豆渣等多种原料来源，相对于前两者，用豆渣制作的猫砂具有可降解、粉尘少的突出优势，可冲入下水道，极大方便了使用。豆渣猫砂的制造首先需要将豆渣烘干，加入竹粉、沸石、活性炭等辅料，并添加生物除臭剂，可实现抑菌、除臭的功能。目前，豆渣猫砂已在我国山东、河北等地多家企业实现产业化，产品远销国外，经济效益良好。

四、总结与展望

利用豆类加工废弃物生产优质肥料、饲料和提取皂苷、黄酮等其它高附加值产品，可真正实现对“一颗豆子”的吃干榨净，促进豆类加工原料“从土地中来，到土地中去”的绿色生态循环产业链的实现，符合农业供给侧改革的迫切需要，是推动质量兴农、绿色兴农的有效途径。

本文受山东省重点研发计划项目（2022TZX0039）的支持。

参考文献

- [1]《豆制品加工工艺与配方》[J].农产品加工,2013,(08):59.
- [2]李军.不同加工方式对大豆类食品营养成分的影响[J].食品安全导刊,2024,(35):111-113.
- [3]刘娟.农业有机废弃物资源化利用对环境保护的影响及策略[J].农业灾害研究,2024,14(12):187-189.
- [4]王传海,何都良,郑有飞,等.保水剂新材料 γ -聚谷氨酸的吸水性能和生物学效应的初步研究[J].中国农业气象,2004,(02):20-23.
- [5]贾玉萍.豌豆蛋白废水生产聚谷氨酸的高产菌株选育及生产工艺优化[D].鲁东大学,2019.
- [6]陈泉嘉,李立,马新新,等.豆渣降解高温菌的筛选及应用[J].河南农业科学,2021,50(01):172-179.
- [7]熊本海,罗清尧,赵峰,等.中国饲料成分及营养价值表(2021年第32版)制订说明[J].中国饲料,2021,(23):97.
- [8]马文强,冯杰,刘欣.微生物发酵豆粕营养特性研究[J].中国粮油学报,2008,(01):121-124.
- [9]栗俊广,姜茜,望运滔,等.不同来源膳食纤维的结构和理化性质分析[J].食品与机械,2020,36(12):18-23.
- [10]海婷玉.鹰嘴豆总黄酮分离提取及其药效学研究[D].新疆农业大学,2024.

城市公园夜景照明工程施工对环境的影响及综合治理 对策研究——以鞍山市万水河公园夜景照明为例

李晓琳，齐思龙

辽宁科技大学 建筑与艺术设计学院，辽宁 鞍山 114051

DOI:10.61369/EAE.2025060011

摘 要： 夜景照明工程作为提升城市形象的重要举措，其施工阶段的生态环境影响不容忽视。本文以鞍山市万水河公园夜景照明工程为案例，系统剖析了工程施工对区域生态、光、声环境及空气质量的复合性影响。针对夜景照明施工造成的影响，从多维度提出针对性解决措施，旨在为该公园及类似环境夜景照明工程的可持续建设提供参考。

关 键 词： 夜景照明；工程施工；环境影响；生态保护

Research on the Environmental Impact and Comprehensive Management Strategies of Nightscape Lighting Project Construction in Urban Parks — A Case Study of the Nightscape Lighting in Wanshui River Park, Anshan City

Li Xiaolin, Qi Silong

School of Architecture and Art Design, University of Science and Technology Liaoning, Anshan, Liaoning 114051

Abstract： Nightscape lighting projects, as an important measure to enhance the urban image, have an ecological environmental impact during their construction phase that cannot be overlooked. Taking the nightscape lighting project in Wanshui River Park, Anshan City as a case study, this paper systematically analyzes the compound impacts of project construction on the regional ecological, light, acoustic environments, and air quality. In response to the impacts caused by nightscape lighting construction, targeted solutions are proposed from multiple dimensions, aiming to provide references for the sustainable construction of nightscape lighting projects in this park and similar environments.

Keywords： nightscape lighting; project construction; environmental impact; ecological protection

随着我国城市化进程的深入推进，夜景照明已从单一的功能性需求，演变为塑造城市夜间形象、激发夜间经济活力、增强市民归属感的重要载体。城市和公众对于夜晚景观的鉴赏需求日益增长，这使得城市景观照明成为城市文化建设中不可或缺的一部分。它不仅为城市增添了璀璨的光彩，更在塑造城市形象、传承历史文化、提升居民生活品质等方面发挥着重要作用。照明工程项目主要包括了城市照明和亮化灯饰两部分，分别代表了城市的民生服务和形象装点，和城市的发展息息相关。然而，在追求景观美学与经济效益的同时，夜景照明工程，尤其是其施工阶段对自然生态环境和居民生活环境的潜在负面影响，往往被忽视^[1]。过度或不科学的施工行为可能导致植被破坏、野生动物惊扰、光污染、噪音污染等一系列环境问题，背离了城市绿色发展的初衷。

鞍山市万水河公园是城市核心的生态廊道与公共休闲空间，其夜景照明工程的实施对提升城市品位具有重要意义。因此，在工程建设中，如何平衡景观提升与环境保护的关系，实现生态效益与社会效益的协同增长，成为一个亟待解决的现实课题。本研究旨在通过系统评估该工程施工的环境影响，深挖问题根源，并提出一套具有可操作性的综合治理方案，以期为鞍山市万水河公园及类似项目的环境友好型建设提供科学参考。

一、工程概况与研究方法

（一）工程概况

鞍山万水河公园夜景照明工程覆盖公园核心区域，总面积约18万平方米。主要施工内容包括：沿河岸、步道及关键景观节点

安装庭院灯320盏、地埋灯400盏、投光灯240盏；配套敷设供电电缆约4.8千米，并建设基于10套智能终端的集中控制系统。工程施工体量庞大，涉及土方开挖约5000立方米，各类基础设施共计1000处。除灯具基础外，亦包含配电、控制系统等设备基础^[2]。

基金项目：辽宁科技大学 2025年大学生创新训练项目““双碳”引领：建筑立面照明节能技术创新与能耗优化研究”。

作者信息：李晓琳（2004.05-），辽宁科技大学 建筑与艺术设计学院 建筑学专业本科生。

（二）研究方法

本研究采用多源数据融合的分析框架：

实地监测：对施工区域及周边进行植被样方调查、土壤理化性质检测（容重、孔隙度）、水体水质监测（COD、石油类、悬浮物）、环境噪音监测（等效连续A声级）及空气颗粒物（PM_{2.5}、PM₁₀）浓度监测。

生态调查：结合公园已有的鸟类监测数据与布设的红外相机，记录施工前后野生动物种类、数量及活动规律的变化。

社会调查：采用随机抽样方式，对工程周边300米范围内的居民进行问卷调查（共发放问卷500份，有效回收率95%），评估光污染与噪音污染对居民生活的主观影响。

二、工程施工对环境的影响分析

（一）生态环境影响

1. 植被与土壤破坏

施工活动，特别是灯具基础开挖与电缆沟槽敷设，对地表植被造成了直接且显著的破坏。据统计，直接损毁的植被面积约3000平方米，涉及乔灌木500余株、草本植物2500平方米。典型案例显示，某片银杏林因电缆施工导致约20株银杏根系受损，占该区域总数的10%。土壤物理结构亦遭破坏，监测点数据显示，施工后土壤容重由1.2 g/cm³升至1.5 g/cm³，孔隙度由45%降至30%，土壤透气性与持水能力明显恶化，制约植物后续生长。

2. 野生动物干扰

施工期间产生的噪音、震动与人工光源对公园内野生动物构成了强烈干扰。鸟类监测数据表明，施工期记录到的鸟类种类较施工前减少15%，个体数量下降约20%。例如，常见鸟种画眉的日观测数量从约20只降至14-16只。红外相机监测显示，松鼠等小型哺乳动物的活动范围缩小约30%，活动频率降低约25%。夜行性动物如刺猬，其觅食行为因灯光干扰而发生改变，觅食成功率下降约15%，对其生存与繁殖构成潜在威胁。

3. 水体污染隐患

施工物料管理疏漏增加了周边水体的污染风险。期间共记录3起小规模油漆、油料泄漏事件。虽经应急处置，但泄漏点周边水体水质仍出现恶化：化学需氧量（COD）从10 mg/L升至15 mg/L（仍符合Ⅲ类标准限值，《地表水环境质量标准》（GB 3838-2002）Ⅲ类水质标准中，COD限值为≤20 mg/L，石油类限值为≤0.05 mg/L）；石油类含量从0.05 mg/L升至0.3 mg/L，超出《地表水环境质量标准》（GB 3838-2002）Ⅲ类水质标准（石油类≤0.05 mg/L）^[3]。此外，约50立方米建筑垃圾未及时清运，经雨水冲刷后部分入河，导致水体悬浮物浓度由20 mg/L升至50 mg/L，透明度降低约30%，对水生生态系统产生不利影响。

（二）光环境影响

1. 光污染问题

初期灯具安装角度不合理导致眩光问题突出。对周边居民问卷调查显示，约80%的居民表示受到夜间灯光眩光干扰。部分居民反映，卧室夜间光照强度高达30 lux，远超适宜睡眠的光照强

度（通常低于5 lux）^[4]。对过往车辆驾驶员调查发现，因眩光导致瞬间视觉障碍发生率达10%，增加了交通事故风险。此外，过量照明使公园夜间光照强度比自然状态下提高了5-10倍，严重干扰天文观测活动，星等观测极限从6等降至4等。

2. 光生态失衡

昆虫趋光性受人工光源影响显著。诱虫实验表明，安装照明灯具区域昆虫捕获量比未安装区域增加2-3倍。以蛾类昆虫为例，其在夜间正常飞行轨迹被打乱，影响交配和产卵行为，导致种群繁殖率下降约20%。以昆虫为食的鸟类、蛙类等生物受食物链变化影响。鸟类食物来源减少约30%，部分鸟类因觅食困难，表现出体重下降趋势，幼鸟成活率亦受到观测到的不利影响。蛙类数量在施工区域周边减少约25%，生态系统平衡受到扰动。

（三）声环境影响

1. 施工噪音产生

施工机械是主要噪音源。监测数据显示，距声源50米处，挖掘机运行噪音为75 dB(A)，发电机为80 dB(A)，电锯瞬间噪音可达90 dB(A)，均大幅超过《建筑施工场界环境噪声排放标准》（GB 12523-2011）夜间55 dB(A)的限值^[5]。

2. 社会与生态后果

噪音对周边社区居民造成了广泛困扰。90%的受访居民反映日常生活受影响，70%出现烦躁情绪，50%居民睡眠质量下降。长期暴露于高噪音环境中的居民，约有10%报告出现耳鸣等早期听力损伤症状。公园内部，游客对噪音的投诉率激增5倍，平均游览时长缩短约30%，游憩体验显著降低。

（四）其他环境影响

1. 空气质量影响

施工扬尘在干燥、大风天气下污染严重。扬尘监测数据表明，土方开挖和材料运输高峰期，施工区域周边PM₁₀浓度从50 μg/m³升至200 μg/m³；PM_{2.5}浓度从30 μg/m³升至100 μg/m³；超过《环境空气质量标准》（GB 3095-2012）二级标^[6]。施工人员和周边居民佩戴普通口罩情况下，可吸入颗粒物摄入量较正常情况增加约50%，对呼吸道和肺部健康构成潜在威胁。

2. 固体废弃物污染

施工产生建筑垃圾约1000立方米，其中废弃灯具包装材料300立方米、混凝土碎块500立方米、金属废料200立方米。未及时清理的废弃物占用公园公共空间约2000平方米，影响公园景观美观度。部分废弃物有害物质渗入土壤，导致周边土壤重金属含量增加，如铅含量从1.0 mg/kg升至3.0 mg/kg（仍低于国家风险筛选值），但需关注长期累积对土壤生态的潜在影响。

三、环境问题成因深度剖析

（一）生态保护在规划阶段的缺口

项目前期规划过度聚焦景观效果，缺乏系统的生态影响预评估。未运用GIS等技术划定生态敏感区与保护红线，导致施工布局直接侵入重要生境。灯具布设仅考虑视觉效果，未利用专业软件（如DIALux）进行光污染模拟优化，是造成后期居民区眩光严

重的根本原因。

施工场地布置时，未充分考虑噪音传播规律，高噪音设备集中放置在靠近居民区和公园核心游览区位置，未设置有效的隔音缓冲区域^[7]。

（二）环境管理体系的松散与失效

施工单位环境管理意识薄弱，缺乏成文的环境管理手册与明确的责任体系。对施工人员的环保培训流于形式（人均不足2小时），导致违规操作频发。施工进度计划刚性过强，缺乏环境缓冲时间，为赶工期而进行的20次夜间违规施工，更是加剧了噪音扰民等问题。

（三）绿色施工技术应用滞后与不足

照明技术方面，选用灯具光学性能差，光效控制能力弱。部分灯具光通量利用率仅为60%，光线散射严重，无法精准控制光线投射范围。在技术选型上，未能优先选用低污染、低能耗的先进设备。初期安装的灯具光学性能差，遮光角普遍小于30°，远低于45°的行业建议值。在降噪降尘方面，未能广泛应用低噪音设备、高效隔音屏障与全自动喷淋系统，技术措施的缺失直接放大了环境影响。施工现场围挡设置高度不足（平均高度1.5米，标准要求2米以上），喷淋系统覆盖率低（仅覆盖30%施工区域），无法有效抑制扬尘。

四、综合治理对策与实施路径

（一）以生态优先为导向的精细化规划

1. 生态基底评估与红线划定

引入专业生态团队，利用地理信息系统（GIS）与遥感（RS）技术，对公园植被、动物栖息地等进行详细调查和评估，划定生态保护红线，确定禁止施工区域10万平方米、限制施工区域20万平方米。制定植被保护和恢复方案，对施工区域内植被进行分类登记^[8]。对于可移栽植物，在施工前完成移栽，共移栽乔灌木300株、草本植物1500平方米。

采用土壤改良技术，对受破坏土壤施加有机肥和微生物菌剂，恢复土壤肥力和结构。施工结束后，预计植被恢复面积达2500平方米，植被覆盖率恢复至施工前的90%。

2. 光环境模拟与智能调控

运用专业照明设计软件（如DIALux）进行灯具布局模拟。结合公园地形、景观特点和周边居民分布，进行多轮模拟优化，最终确定灯具最佳布局方案，通过光环境模拟，预计光污染区域面积减少达5万平方米。全面选用高光效（120 lm/W）、大遮光角（ $\geq 45^\circ$ ）的LED灯具。集成智能控制系统，实现分时分区调光（如夜间10点后亮度自动降低30%），预计可节能20%并有效控制光污染^[9]。

3. 声环境优化与公共沟通

根据声学原理，利用地形和建筑物等自然屏障，将高噪音

机械设备布置在距离居民区和公园核心游览区至少200米外的位置。并设立总长1000米、高2.5米的吸隔声屏障，预计降噪效果达10-15 dB(A)。严格限定高噪音作业时间（22:00至次日6:00禁止施工），确需夜间施工时，履行提前申请与社区公告程序，保障公众知情权。

（二）构建全过程、可考核的环境管理体系

1. 制度化管

编制项目《环境管理手册》，设立量化管理目标（如植被破坏率 $<5\%$ ，噪音达标率 $>90\%$ ）。将环境绩效纳入施工考核体系，权重不低于20%。成立环境监督小组，实行每周不少于3次的巡查制度，对违规行为进行纠偏与处罚。

2. 系统化培训

将施工人员环境培训时长提升至人均8小时，内容涵盖生态保护、法规标准及实操规范，实施培训后考核（通过率 $>95\%$ ）。通过现场宣传栏、知识竞赛等形式，营造全员环保的文化氛围。

3. 弹性化进度管理

运用项目管理软件（如Microsoft Project）制定弹性进度计划，充分考虑环境因素对施工进度的影响。预留足够时间用于环境恢复和保护工作，如植被恢复阶段预留2个月时间。

加强与周边居民和相关部门沟通协调。建立月度居民沟通会机制，及时回应公众关切，动态调整施工安排。根据实际情况动态调整施工计划，确保工程进度与环境保护协调推进。

（三）推动绿色低碳技术的集成应用

1. 照明技术升级

全面采用长寿命（ $>50,000$ 小时）、高节能（较传统灯具节能60%以上）的LED灯具，并应用精准配光技术（光束角误差控制在 $\pm 5^\circ$ 内）。引入智能调光调色系统，根据不同季节、节日和活动需求，自动调节灯光色彩和亮度。如春季采用暖色调灯光，营造温馨氛围；夏季采用冷色调灯光，给人清凉感觉。实现灯光场景与季节、节庆的适应性变化。

2. 降噪降尘技术强化

优先选用低噪音机械设备（噪音降低10-15 dB(A)），并对现有高噪音设备安装消声器、减震装置等降噪设施，降噪效果达5-10dB(A)。

施工现场设置全封闭围挡，高度2.5米，围挡覆盖率达100%。安装喷淋系统，每隔5米设置一个喷头，实现施工区域全覆盖。在土方作业、材料运输等易产生扬尘环节，定时开启喷淋系统，有效降低扬尘浓度约60%。

五、结论与展望

本研究通过对鞍山万水河公园夜景照明工程的实证分析，系统揭示了其施工过程对生态环境、光环境、声环境等产生的多维度的负面影响。研究表明，规划缺失、管理松散与技术滞后

是导致上述环境问题的深层次原因。

对此，本文构建了以“生态规划为先导、精细管理为核心、绿色技术为支撑”的综合治理体系。该体系强调在项目全生命周期中贯彻生态优先原则，通过科学的规划预判、严密的过程控制和先进的技术手段，能够有效减轻施工活动带来的环境负外部性。

展望未来，城市夜景照明工程的建设应超越单一的景观美学

追求，转向对生态友好、社区和谐、资源节约的综合价值追求。建议在后续工程及类似项目中，将本研究所提出的综合治理策略制度化、标准化，并引入长期的生态监测与后评估机制，持续优化施工实践，最终实现城市夜景“亮起来”与生态环境“好起来”的有机统一，为推进美丽中国与城市可持续发展提供坚实支撑。

参考文献

[1] 郝洛西. 景观照明设计 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2010.

[2] 吴蓉娟, 张茹茹, 初锐, 等. 浅谈滨水景观带的夜景设计策略——以鞍山市万水河公园为例 [J]. 艺术科技, 2019(8): 49. DOI: 10.3969/j.issn.1004-9436.2019.08.030.

[3] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法 (第四版) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.

[4] 朱一字, 刘灵芝. 城市夜景照明光环境质量评价与提升对策 [J]. 建筑与文化, 2025, (08): 153-155. DOI: 10.19875/j.cnki.jzywh.2025.08.047.

[5] 刘艳峰, 王登甲, 武云飞等. 基于生态理念的城市夜景照明能耗分析与评价 [J]. 照明工程学报, 2014, 25(6): 1-6.

[6] 赵荣义, 范存养, 薛殿华等. 空气调节 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.

[7] 周红卫, 唐辉, 李自力等. 城市景观照明工程建设对生态环境的影响及对策 [J]. 中国园林, 2012, 28(12): 85-88.

[8] 洪永胜. 浅析城市夜景照明工程建设管理中的质量控制 [J]. 中国设备工程, 2025, (12): 66-68.

[9] 李铁楠. 城市夜景照明中的光污染问题及对策 [J]. 照明工程学报, 2006, 17(1): 1-6.

吐鲁番生态修复与坎儿井保护协同机制研究

周建成

新疆维吾尔自治区地质局昌吉地质大队，新疆 昌吉 831100

DOI:10.61369/EAE.2025060012

摘 要： 新疆吐鲁番地区面临的生态修复与坎儿井文化遗产保护的双重挑战，以“政策激励—金融支持—产业融合—全程监管”四个维度的社会资本参与路径模型，将坎儿井保护作为刚性约束贯穿于社会资本参与项目的设计、施工与管护全流程，并提出了构建“政府监管+专业指导+群众监督”三位一体协同治理框架的具体建议。系统剖析了吐鲁番地区生态治理的复合型需求与现有资金投入的局限性，为吐鲁番乃至整个干旱区探索一条生态效益、经济效益与文化效益协同共进的治理新路，为实现生态治理体系现代化提供可复制的实践样本。

关 键 词： 社会资本；生态修复；坎儿井保护；协同机制；产业融合

Study on the Synergistic Mechanism of Ecological Restoration and Karez Protection in Turpan

Zhou Jiancheng

Changji Geological Brigade, Bureau of Geology and Mineral Resources of the Xinjiang Uygur Autonomous Region,
Changji, Xinjiang 831100

Abstract： The Turpan region of Xinjiang faces the dual challenges of ecological restoration and the preservation of the Karez cultural heritage. A social capital participation pathway model is proposed across four dimensions: "policy incentives – financial support – industry integration – full-process supervision," positioning Karez protection as a rigid constraint throughout the design, construction, and management processes of projects involving social capital. Specific recommendations are also made for establishing an integrated governance framework of "government supervision, professional guidance, and public oversight." The study systematically analyzes the complex ecological governance needs of the Turpan region and the limitations of existing financial investment, aiming to explore a new governance approach that simultaneously advances ecological, economic, and cultural benefits for Turpan and the broader arid regions, providing a replicable practical model for modernizing ecological governance systems.

Keywords： social capital; ecological restoration; karez protection; collaborative mechanism; industry integration

引言

新疆吐鲁番坎儿井不仅是吐鲁番绿洲经济的命脉，更是活态的文化遗产，其水系的稳定与结构的完好，是衡量区域生态修复成效的关键标尺。面对全域性的治理需求，单纯依靠政府资金仍显杯水车薪。创新投融资机制，积极引导和撬动社会资本参与，以国家资金为引导、以市场化机制为核心、以产业融合发展为动力的社会资本参与路径，将坎儿井保护与社会资本参与的生态修复项目深度捆绑，实现“治山”与“护水”的协同，深入探索一条并构建相应的保障体系，以期为推动吐鲁番地区生态、经济与文化的协调发展提供理论参考与实践指南^[1]。

一、吐鲁番地区生态修复与坎儿井保护的紧迫性与现实困境

吐鲁番盆地深处内陆，属极端干旱的暖温带大陆性气候，年

均降水量稀少而蒸发量巨大，这种独特的自然禀赋塑造了其极其脆弱且敏感的原生生态系统。历史上，人类活动，特别是矿产资源的开采，在推动区域工业化的同时，也留下了深刻的生态伤痕。大量历史遗留废弃矿山不仅直接导致地形地貌的严重损毁、

作者简介：周建成（1985.03-），男，汉族，云南大姚人，本科，中级工程师，从事水文地质、工程地质、环境地质和地质灾害的研究。

地表植被的大规模退化，更深层次地干扰了区域水文的自然循环过程。

（一）复合型生态危机的交织叠加

吐鲁番的生态问题并非孤立存在，而是呈现出矿山地质环境破坏、水资源短缺与坎儿井遗产衰败三者相互交织、互为因果的复杂局面。矿山开采活动往往破坏山体结构，形成大量裸露的创面，加剧了水土流失。更严重的是，采矿活动可能截断或污染地下含水层，直接导致依赖地下水补给的坎儿井水源枯竭或水质恶化。据相关数据显示，吐鲁番市曾累计投入近亿元资金用于加固维修165条坎儿井，但仍有大量坎儿井因水源补给不足、结构失稳等原因面临断流甚至废弃的风险。坎儿井系统的衰退，反过来又加剧了农业灌溉用水紧张，威胁到绿洲生态系统的稳定，形成恶性循环。这使得吐鲁番的生态修复不能是单一的复绿工程，而必须是统筹解决矿山治理、水资源保护与文化遗产传承的综合性、系统性问题^[2-3]。

（二）政府单一投入的局限性与资金缺口

“东天山南麓示范工程”覆盖修复面积达1599.63公顷，计划通过系统性的工程技术手段新增林地278.13公顷、草地168.41公顷，其示范意义和生态价值毋庸置疑。然而，该工程主要聚焦于重点区域的矿山环境问题治理，对于吐鲁番广袤区域内更多非重点区域的生态修复、以及全域坎儿井网络的系统性保护而言，资金需求依然巨大。单纯依靠国家财政投入，不仅给地方政府带来持续的财政压力，也难以满足治理后期长期管护和可持续运营的资本需求。因此，拓宽资金来源渠道，建立稳定、多元的投入机制，是打破资金约束瓶颈、实现全域生态治理目标的根本出路^[4]。

（三）政策环境的积极信号与机遇

挑战与机遇并存。国家层面高度重视生态文明建设，新疆维吾尔自治区也适时出台了《关于鼓励和支持社会资本参与生态保护修复的实施意见》等一系列导向明确的政策文件。这些政策为社会资本参与生态保护修复提供了合法性依据和方向性指引，与“东天山南麓示范工程”这一实体项目形成了“政策+项目”的双重支撑，为社会资本的进入创造了前所未有的有利条件。如何将政策的“推力”转化为对社会资本有吸引力的“拉力”，是当前需要深入探索的关键^[5]。

二、构建吸引社会资本参与的长效机制：政策、金融与信息三位一体

吸引社会资本的核心在于建立可预期、可持续的回报机制。这需要从政策顶层设计、金融工具创新和信息服务支撑三个方面协同发力，为社会资本营造一个风险可控、收益可期的投资环境。

（一）强化政策激励，明确产权与收益预期

政策是稳定社会资本信心的“压舱石”。应充分利用自治区已有的产权激励政策，进行细化和落地。具体而言：

1. 自然资源资产使用权配置：对于积极参与“东天山南麓示范工程”配套修复工程或独立承担坎儿井保护项目的社会资本，可依法依规赋予其一定期限内的修复区周边部分自然资源资产的使用权，例如，允许其优先开发利用修复后形成的林地、草地的碳汇权益^[7]。

2. 点状供地支持生态产业：借鉴其他地区成功经验，明确允许在生态修复区域内，以“点状供地”方式提供不超过3%的修复面积，用于支持社会资本发展生态旅游、科普教育、康养健身等绿色产业。这直接回应了吐鲁番“矿山修复+坎儿井文旅”的融合需求，使社会资本能够获得直接的经营性资产。

3. 税收优惠与指标激励：全面落实环保项目所得税减免等税收优惠政策。同时，将生态修复产生的节余建设用地指标、新增耕地占补平衡指标等，通过市场化方式优先配置给投资主体，或允许其参与交易，将生态价值转化为实实在在的经济收益。

（二）创新金融支持，拓宽融资渠道与降低成本

金融是撬动社会资本的“杠杆”。需推动金融机构开发量身定制的金融产品。

1. 推广“政社合作”投入模式：可借鉴内蒙古乌梁素海流域治理等项目的成功经验，探索在吐鲁番建立“财政资金+社会资本”按比例投入的联合投资模式。国家示范资金作为引导性、基础性投入，主要用于解决公共性强的基底修复问题；社会资本则专注于具有市场前景的产业开发和运营环节。

2. 发展中长期绿色信贷与资产质押：鼓励银行等金融机构开发针对矿山生态修复和坎儿井保护的中长期绿色贷款产品。允许社会资本以未来可能获得的碳汇收益权、土地指标收益权等预期收益作为质押物，破解项目初期缺乏传统抵押物的融资难题。

3. 探索生态修复领域PPP模式：对于综合性、区域性的大型修复项目，可设计政府与社会资本合作（PPP）模式，明确各方权责利，建立基于修复绩效的付费机制，保障社会资本获得长期稳定的合理回报。

（三）搭建信息平台，提升项目透明度与参与精准度

1. 建立项目信息发布平台：由地方政府牵头，搭建吐鲁番市生态修复与坎儿井保护项目信息平台。动态发布“东天山南麓示范工程”及其配套项目的具体需求、技术标准、投资规模、预期效益等信息^[8]。

2. 标准化项目包与收益模型：将分散的治理需求，如单条坎儿井的加固工程、特定区域的植被恢复项目，打包成规模适度、边界清晰、收益模式明确的项目包。例如，明确公告修复一条长度为5公里的坎儿井所需投资额、可保护的灌溉面积、预计可带动的旅游收入或农业产值等，使社会资本能够进行清晰的成本收益测算，提高投资决策的效率和精准度。

三、实现可持续回报的核心路径：生态修复与产业发展的深度融合

社会资本的逐利本性决定了其参与生态修复的可持续性，最终必须依赖于能够产生稳定现金流的产业支撑。必须摒弃“为修复而修复”的旧思路，转向“以产业发展反哺生态修复”的新模式，构建“生态修复+产业反哺”的良性循环。

（一）“矿山修复+坎儿井文旅”融合模式

1. 项目捆绑开发：引导社会资本在参与东天山南麓矿山削坡减载、植被恢复等工程的同时，同步承接周边关联坎儿井的暗渠加固、竖井口整治、展示设施建设等任务。

2. 打造特色旅游线路：将修复后的矿山地貌（如层层梯田式的植被恢复区）与古老的坎儿井地下暗渠参观体验相结合，设计

开发“矿山复绿观景 + 坎儿井探秘 + 绿洲农业体验”等主题旅游线路。可以借鉴山东威海华夏城从废弃矿坑变身5A级景区的成功经验，通过门票收入、餐饮住宿、文创产品销售等旅游综合收益，逐步覆盖并超过前期修复投入，实现可持续运营^[9]。

3. 融入区域旅游大盘：将此类项目主动融入吐鲁番市乃至新疆的全域旅游规划中，与火焰山、葡萄沟等知名景区联动，形成客流共享、优势互补的旅游网络。

（二）“生态农业 + 坎儿井灌溉”融合模式

1. 发展高效节水农业：在完成地质稳定与土壤改良的矿山修复区域，引导社会资本发展以枸杞、沙棘、肉苁蓉等耐旱、高附加值的经济作物为主的生态农业。

2. 保障坎儿井灌溉功能：生态修复的核心目标之一是涵养水源，稳定地下水位。修复后形成的良好植被覆盖有助于水源涵养，从而为坎儿井提供更稳定的补给。社会资本可以依托修复后保障的坎儿井水源，用于灌溉自身发展的生态农业项目，形成“修复涵养水源→水源保障坎儿井→坎儿井灌溉农田→农产品产生收益”的完整闭环。

3. 打造绿色农业品牌：利用“坎儿井灌溉”、“生态修复区产出”等独特卖点，打造高端农产品品牌，通过线上线下渠道销售，实现品牌溢价，提升项目收益水平。

（三）拓展碳汇交易等新兴收益渠道

随着全国碳市场的稳步发展，生态修复项目产生的碳汇价值日益凸显。应积极推动将吐鲁番矿山修复与植被恢复项目产生的碳汇权益进行科学监测与核证，鼓励参与的社会资本申请国家核证自愿减排量（CCER）等碳信用，并进入碳市场交易。这为社会资本开辟了一条除主营业务收入之外的新增收益渠道，增强了项目的综合盈利能力。

四、保障措施：将坎儿井保护贯穿全程并构建协同监管体系

确保社会资本在追求经济利益的同时，不偏离生态修复与坎儿井保护的公共目标，必须建立强有力的全过程保障与监管体系。

（一）将坎儿井保护作为刚性约束融入项目全生命周期

1. 工程设计阶段：在项目招标文件和合作协议中，必须明确社会资本对坎儿井保护的法定义务和合同责任。将坎儿井水源补给量、水质标准、结构安全等作为项目设计的约束性指标和验收的核心要件。例如，在东天山南麓工程周边科学划定地下水保护红线，要求矿山截排水系统的设计必须经过水文地质专家论证，

确保不对坎儿井的补给含水层造成负面影响。

2. 项目施工阶段：强制推行生态友好的施工工艺和技术。在坎儿井本体及周边敏感区域进行植被恢复时，严格限制大型机械的使用，避免对竖井、暗渠结构造成振动破坏。应参照吐鲁番高昌区已有的成功经验，推广使用混凝土拱圈加固、卵形涵衬砌等传统与现代相结合的坎儿井修缮工艺。同时，建立严格的废弃物管理制度，严禁在坎儿井的影响范围内堆放矿山修复产生的废土石料。

3. 长期管护阶段：建立可持续的后期管护机制。可以借鉴云南昆明大板桥等项目“企业施工 + 当地村民参与”的模式，在项目设计中就预留管护经费，组织培训当地村民参与坎儿井的日常掏捞、清淤、巡查等工作。这既降低了企业长期派驻人员的管护成本，又为当地居民创造了就业岗位，更重要的是激发了社区居民作为文化遗产主人的保护意识，形成了内生性的保护力量。

（二）构建“政府 - 专业机构 - 公众”三位一体的协同监管格局

1. 强化政府主导监管：地方政府（自然资源、水利、文旅等部门）须切实履行监管主体责任，制定清晰、量化的坎儿井保护成效评估标准，并将其作为项目验收、资金拨付乃至后续优惠政策享受的先决条件。例如，明确要求修复后相关坎儿井的出水量需稳定在年均5万立方米以上，暗渠、竖井的完好率需达到90%以上等硬性指标。

2. 引入专业技术支持：积极引入新疆坎儿井研究会、科研院所等第三方专业机构，为社会资本提供从方案设计到施工全过程的技术咨询和质量监督。例如，在工程区域内铺设地下水监测井网，由专业机构实时监控矿山修复活动对周边地下水动态的影响，及时预警并提出校正措施，确保坎儿井水文环境的安全。

3. 鼓励公众参与监督：建立透明的信息公示和举报渠道。参照“以工代赈”的思路，不仅让村民参与管护，还可吸纳当地居民代表参与项目的过程性监督，形成“政府监管 + 专业指导 + 群众监督”的共治格局。这能有效约束企业行为，确保社会资本投入真正服务于“生态修复与遗产保护”的双重公共目标。

五、结论

吐鲁番地区探索吸引社会资金参与生态修复与坎儿井保护，不仅能够有效破解吐鲁番当前面临的资金与技术难题，助力历史遗留矿山疮疤的愈合和千年坎儿井的活态传承，更能为我国乃至全球同类型的干旱区、生态脆弱区协调处理经济发展与生态保护、文化遗产的关系，提供一个可复制、可推广的“吐鲁番样本”，具有重要的实践意义和深远的战略价值。

参考文献

- [1] 翟磊, 赵紫涵. 社会资本参与生态保护修复项目的路径探讨 [J]. 项目管理技术, 2022, 20(12): 87-92.
- [2] 肉克亚古丽·马合木提. 吐鲁番坎儿井保护研究 [D]. 复旦大学, 2013.
- [3] 宋启佳. “经济 - 社会 - 生态”耦合协调视角下吐鲁番市乡村韧性测度与发展策略研究 [D]. 新疆农业大学, 2025.
- [4] 梁江涛. 基于社会资本视角的 Y 生态修复 PPP 项目经济可行性研究 [D]. 江西财经大学, 2024.
- [5] 黄智秀. 社会资本对生态治理效益的作用及差异化研究 [D]. 天津商业大学, 2022.
- [6] 马洪, 车奕强. 社会资本参与生态环境损害修复的实践困境与路径优化 [J]. 学术界, 2024, (01): 197-209.
- [7] 王儒密, 冯妙玲, 张娅楠, 等. 社会资本参与生态保护修复的自然资源资产配置研究 [J]. 价值工程, 2023, 42(35): 166-168.
- [8] 王华. 社会资本参与生态保护修复的动力机制、实践困境与完善路径 [J]. 环境保护, 2023, 51(3).
- [9] 王荷. 社会资本参与生态修复对生态效益的影响研究 [D]. 河北: 河北大学, 2024.

基于生态红线约束的国土资源管控路径研究

顾成龙^{1,2}, 付国猛^{1,2*}

1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 黑龙江 哈尔滨 150086

2. 自然资源部哈尔滨黑土地地球关键带野外科学观测研究站, 黑龙江 哈尔滨 150086

DOI:10.61369/EAE.2025060006

摘 要 : 生态红线作为维护生态安全、提升国土空间利用质量的重要制度, 对开发强度、空间布局与资源配置形成刚性约束。文章围绕其在压缩建设用地规模、明确开发边界、优化空间格局、规范审批程序等方面的作用, 结合国土空间用途边界划定、生态红线分层管控、建设用地选址审查和用地结构比例调控等措施, 形成以生态优先为导向的管控路径, 旨在为国土资源精细化管理及经济环境协调发展提供有效支撑。

关 键 词 : 生态红线; 国土资源; 建设用地规模; 生态功能

Research on the Path of Territorial Spatial Planning Control Based on Ecological Red Line Constraints

Gu Chenglong^{1,2}, Fu Guomeng^{1,2*}

1. Harbin Natural Resources Survey, China Geological Survey, Harbin, Heilongjiang 150086

2. Observation and Research Station of Earth Critical Zone in Black Soil, Harbin, Ministry of Natural Resources, Harbin, Heilongjiang 150086

Abstract : As an important system for maintaining ecological security and improving the quality of territorial space utilization, ecological red lines impose rigid constraints on development intensity, spatial layout, and resource allocation. This article focuses on their role in reducing the scale of construction land, clarifying development boundaries, optimizing spatial patterns, and standardizing approval procedures. By integrating measures such as the demarcation of territorial space use boundaries, hierarchical control of ecological red lines, review of construction land site selection, and regulation of land use structure ratios, a control path oriented by ecological priority is formed, aiming to provide effective support for the refined management of territorial resources and the coordinated development of the economy and environment.

Keywords : ecological red lines; territorial resources; construction land scale; ecological functions

引言

《生态保护红线划定技术指南》提出:“生态保护红线具有显著的区域特定性,其保护对象和空间边界相对固定^[1]。”《中共中央国务院关于建立国土空间规划体系并监督实施的若干意见》进一步明确,“划定生态保护红线、永久基本农田、城镇开发边界等空间管控边界以及各类海域保护线,强化底线约束,为可持续发展预留空间^[2]。”当前生态功能区退化、用地结构失衡等问题日益突出,急需借助生态红线约束明确资源可用边界,调控土地利用结构,提升用地配置效率。生态红线作为约束性空间边界,在资源分区指引、建设用地审核、用途转换判断等环节均具备关键支撑作用,文章将围绕其在国土资源管控中的空间压制价值与配置引导作用展开探讨。

一、生态保护红线概述

生态保护红线的管控范围指国土生态空间内生态功能特殊或

重要,且必须强制性进行严格保护起来的区域,具体包括重要水源涵养、防风固沙、生物多样性维护、水土保持、海岸生态稳定等重要范围,以及重要的自然保护地。依据《生态保护红线划定

基金项目:

自然资源监测(哈尔滨中心)(DD20243006)

东北地质科技创新中心基金项目(QCJJ2023-33)

全国国土变更调查国家级外业核查(哈尔滨中心)(DD20230517)

作者简介:顾成龙(1993.02-),男,汉族,黑龙江省哈尔滨市人,本科,助理工程师,研究方向:国土勘察与管理。

通讯作者:付国猛(1987.11-),男,汉族,河北沧州人,本科,助理工程师,研究方向:国土勘察与管理。

技术指南（试行）》要求，结合生态功能重要性评价与生态敏感性分区成果，通过土地利用现状图斑的叠加分析实现空间精准定位，并在国土空间分区框架内落实用途等级控制、开发强度阈值设定与准入条件核定。该体系以空间边界固定化、管控指标量化和保护责任属地化为核心特征，推动永久基本农田、城镇开发边界与生态保护范围形成协调衔接的约束格局，为统筹耕地保护、生态安全与高质量发展空间布局奠定基础。

二、生态红线约束对国土资源管控的影响

（一）压缩建设用地规模

在生态空间优先保护原则下，生态红线约束压缩建设用地规模，在高生态敏感区形成刚性边界，减少无序开发对土地的占用。结合全国建设用地面积变化情况，可见在生态管控政策作用下，扩张趋势得到抑制。以生态功能完整性、环境容量承载力与自然过程连续性为基础，限制新增建设活动进入生态保护单元，引导土地利用向集约高效转变。生态红线作为空间底线，压降粗放利用比例，提升单位面积资源开发效益。涵养区、栖息带、水源补给带等受限区域促使开发向已批未用地、低效存量地和城市边界内集中，推动用地结构由分散走向紧凑^[4]。

（二）明晰开发边界范围

生态红线空间边界的强制性约束效应在开发边界范围划定中发挥主导作用，对压缩可建设区域尺度、明确城镇拓展边界线位、限制空间扩张方向产生直接影响。生态功能重要区域被纳入生态保护红线后，其土地利用属性将转化为限制性用途，削减原有建设预期，促使国土空间开发边界以生态空间格局为参照进行调整。生态红线与永久基本农田、城镇开发边界等三类空间管控边界在重叠区段形成复合性限制，避免低等级开发边界对高等级生态边界产生侵蚀影响，促成边界层级内部逻辑一致^[5]。国土资源管控中，生态红线约束提升了边界线划定的空间精度与逻辑严密性，减少弹性边界模糊带和边界游移空间，限制无序蔓延态势，推动开发边界由经验型向控制性转变。

（三）优化用地格局

国土资源管控中用地格局呈现向生态空间主导的方向调整，耕地、林地、草地、水域等自然资源类型在空间分布上形成相对稳定格局，限制性用途区与一般用途区之间的界限趋于清晰。生态功能重要区和敏感区被纳入生态红线范围后，建设用地分布密度受到有效限制，区域土地利用格局中生态空间比例提升，建设活动集中度向已开发区域聚合，减少无序分散布局。永久基本农田与生态保护红线在空间叠加区段形成土地用途稳定带，防止建设性占用向高生态价值区侵蚀，促进农用地与生态用地形成互补格局^[6]。沿河湖、水源涵养区、生态廊道等重点生态空间在国土资源管控框架下实现连续性保留，提升整体景观连通性，带动周边用地功能协调发展。

（四）规范审批程序

生态红线的存在使建设用地审批环节对空间管控边界的依赖度显著提升，生态保护范围、永久基本农田与城镇开发边界的叠

加关系直接影响建设项目的可行性评估与审批结论，形成对选址条件、用地性质与空间分区的强约束作用^[7]。审批程序在生态红线影响下，对土地利用总体规划、国土空间用途管制方案及用地分类标准的衔接性提出更高要求，审批部门需在项目立项审查、规划许可审核与用地报批等阶段强化生态功能区的优先性认定，避免生态敏感区、重点水源涵养区及生物多样性维护区被纳入建设用地范围^[8]。审批程序在国土资源管控中受到生态红线的推动，表现为审批时限受制于生态要素核查、审批条件受限于生态空间稳定性评估，从而提高土地资源配置的生态安全门槛，并在一定程度上压缩非生态优先区域的审批灵活度，强化国土空间格局与生态安全格局之间的协调性。

三、基于生态红线约束的国土资源管控路径

（一）国土空间用途边界划定

以生态红线分布格局、永久基本农田边界与城镇开发边界为基础，统筹区域自然地理条件、生态功能分区与土地利用现状调查成果，在空间分割单元精细化处理过程中，将重点生态功能区、水源涵养区、生物多样性维护区及生态脆弱区纳入严格管控范围。结合遥感监测解译、实地核查和地形地貌分析成果，开展多源数据交叉验证，将自然保护地、湿地保护区、森林生态区等特殊用地优先纳入管控边界，防止与建设用地边界产生冲突，同时提升边界划定的精准度与科学性^[9]。

划界环节依托1:10000地形图与最新国土调查数据开展空间叠加分析，明确农用地、建设用地、未利用地的分布及属性界限。在行政单元边界、地形分水线、河湖岸线等天然界标处设定空间控制线，形成连续、封闭、易识别的边界线成果，并在地类转换高频区域引入缓冲区处理，减少边界变化对用途管制的影响^[10]。对于跨行政区的生态红线区域，在相关区域协同会商基础上统一边界线位置，避免重复或遗漏划定，保持空间控制一致性与可操作性，并建立联动核验机制以便后续管理衔接。

边界划定成果同步形成矢量数据文件、文字说明与比例尺地图，标注边界走向、控制范围及对应土地利用分类代码，并对重要区段附加高分辨率影像对照。成果纳入国土空间用途管制平台，与土地审批、用地预审、规划许可等环节形成无缝衔接，确保边界成果在日常管理中可快速调用和复核。结合动态更新机制，对因自然演变或规划调整引起的边界变化及时修订，同时建立年度复核与阶段性评估制度，为各类国土资源利用活动提供前置空间约束条件与长期管理依据。

（二）生态红线类型分层管控

在国土资源管控过程中，针对生态红线的精细化管理以类型分层为基础，将生态功能定位、空间分布特征与环境敏感程度作为分级依据^[11]，划分水源涵养红线、生物多样性维护红线、水土保持红线、海岸带保护红线等类别，并结合遥感监测成果、实地踏勘记录与国土调查数据明确边界坐标、面积指标和空间形态。

水源涵养红线区域严格限制新增建设用地审批，优先安排生态修复与涵养林保育用地；生物多样性维护红线区域控制对栖息

地连通性造成干扰的生产建设活动，在用地审批中核查与野生动植物分布范围的重叠比例；水土保持红线区域管控采取土、坡耕地开垦等高侵蚀风险利用方式，按照坡度、土壤质地及降雨侵蚀力分区制定利用条件；海岸带保护红线区域以潮间带、红树林湿地及近岸渔业资源分布为基础，限定围填海与岸线硬化比例，保持岸线自然形态与生态缓冲带连续性。各类红线在国土空间总体规划图上分层表达，并在管控档案中标注用地性质、禁止或限制利用方式、管理责任主体及监测评价频次^[12]。在审批环节，建设项目选址、用地报批、变更申请等对照对应红线分层要求逐项比对审查，形成图件比对、现场核查与批前会商的衔接流程，使空间利用活动严格符合约束条件。

（三）建设用地选址条件审查

在建设用地选址条件审查过程中，以生态红线分区成果、国土空间总体规划图和永久基本农田分布图为基础，结合遥感监测数据与现地踏勘记录，对拟选址区域的空间属性、资源承载能力及环境敏感程度进行分项比对。审查环节在审批前调取生态红线分布图层，将其与拟用地边界进行叠加分析，核查是否涉及水源涵养区、生物多样性维护区、水土保持区、海岸带保护区等重点管控单元，并对重叠面积比例、缓冲带宽度及边界位置进行精准测定。

对于涉及高生态敏感度区域的选址申请，依照生态功能分级标准限定可利用范围，合理调整用地形态，避让生态廊道、珍稀物种栖息地和重要湿地^[13]。在比对永久基本农田保护范围及城镇开发边界时，防止与基本农田红线、城镇扩展控制线产生空间冲突，并结合区域生态安全格局分析，确定空间利用的适宜性。涉及地质灾害易发区、洪涝易淹区等高风险单元的，根据地形坡度、地质稳定性、排水条件及历史灾害记录设定禁止建设或限制建设条件。审查技术程序涵盖地理信息数据库调用、现场核实测绘、审批图件会签等环节，并形成由规划管理、自然资源管理和生态环境管理等部门联合参与的用地审查流程。

（四）用地结构比例调控

以国土空间总体规划的分区管控目标为指导，结合区域自然

资源禀赋、产业布局方向与人口承载能力，依据最新土地利用现状数据库核定各主要地类的可安排规模与比例基数，制定年度与阶段性比例调控方案。调控过程中，将耕地、园地、林地、草地、水域、建设用地等作为主要考核单元，分别设定可变化幅度、下限指标与优先保护类别。建设用地安排优先在既有城镇建设区、产业集聚区及配套设施用地范围内部挖潜，通过棚户区改造、低效用地再开发、功能置换与闲置用地复用等方式压缩新增占用需求，并同步优化土地利用强度与空间布局。生态用地比例控制则注重维持生态系统的完整性与连通性，在邻近建设区和农业区的空间交界处布设生态缓冲带或廊道，减少人为干扰对生态功能的破坏。

比例动态调整依托年度土地利用更新成果、地类变更审批数据及空间开发强度测算结果，形成趋势分析报告，结合经济发展阶段性目标与生态安全底线进行综合研判，适时优化各类用地规模结构。对生态用地的保护实行刚性管控，严禁随意改变用途，并建立占用申请的论证与听证机制，提高决策透明度。调控结果纳入年度土地供应计划、耕地保护目标责任考核以及自然资源利用绩效评估，形成从方案制定、实施执行到跟踪反馈的闭环管理模式，使比例调控在生态保护与经济发展间形成稳定均衡的长期格局。

四、结语

本研究围绕生态红线约束在国土资源管控中的作用展开，阐明其在压缩建设用地规模、明晰开发边界范围、优化用地格局、规范审批程序等方面的关键影响，明确国土空间用途边界划定、生态红线类型分层管控、建设用地选址条件审查及用地结构比例调控的实施路径。未来，应持续完善生态红线成果管理与动态更新，强化监测评估与技术支持，推动管控措施与国土资源管理深度融合，为构建高质量、可持续的国土空间利用格局提供稳固保障。

参考文献

- [1] 中华人民共和国环境保护部. 环发〔2015〕56号生态保护红线划定技术指南[S]. 北京：中华人民共和国环境保护部，2015.
- [2] 中共中央国务院. 中共中央国务院关于建立国土空间规划体系并监督实施的若干意见[Z]. 北京：中共中央国务院，2019.
- [3] 姜昀，王文燕. 生态红线分区管控与国土空间规划关系研究[J]. 环境工程技术学报，2025，15(01): 11-16.
- [4] 石海韵，倪天华. 青藏高原生态保护红线管控与生态补偿机制协同关键问题与对策[J]. 环境保护，2025，53(07): 71-74.
- [5] 方飞，郑婉钰. 国土空间资源利用与生态环境保护在生态管控中的管理协同[J]. 未来城市设计与运营，2023，(03): 14-23.
- [6] 李丽娟，江思卫，黄钰清. 广西林地管理与生态保护红线管控关系分析[J]. 中南林业调查规划，2024，43(03): 6-10.
- [7] 李栋，李明超，李王锋，等. 全周期管理理念下生态保护红线与国土空间规划协同路径研究[J]. 环境保护，2025，53(11): 19-24.
- [8] 王文涛. 基于国土空间规划背景的生态保护红线的管理策略[J]. 生态与资源，2024，(03): 95-97.
- [9] 代传超. 浅谈国土年度变更调查监测类型及日常自然资源管理方面的应用[J]. 中华建设，2025，(08): 96-98.
- [10] 鲁欣. 基于国土资源大数据应用的土地资源管理模式创新[J]. 销售与管理，2025，(19): 18-20.
- [11] 关强. 国土资源调查过程中3S技术的运用探讨[J]. 科技资讯，2025，23(11): 170-172.
- [12] 张丽娜. 国土空间规划中土地资源优化配置与环境保护目标的实现路径[J]. 住宅与房地产，2025，(06): 43-45.
- [13] 胡义萍. 基于生态预算提升国土资源管理方法与建议[J]. 财经界，2025，(06): 87-89.

污泥焚烧工艺优化及污染物控制研究

谷奋

广州拉斯卡工程技术有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/EAE.2025060013

摘 要 : 污泥焚烧作为高效减量化、无害化处理污泥的核心技术,在城市固废处置中占据重要地位。文章以综合垃圾处理设施污泥焚烧项目为研究对象,基于拉斯卡(RASCHKA)流化床焚烧技术,系统分析污泥焚烧工艺的核心流程与技术参数。探讨当前污泥焚烧面临的负荷适配、腐蚀防护、污染物协同去除等难题,并提出针对性解决措施,为污泥焚烧工艺的高效稳定运行及环保达标提供技术参考,助力实现污泥处理的低环境影响与高资源利用率目标。

关 键 词 : 污泥焚烧工艺; 优化; 污染物控制

Research on Optimization of Sludge Incineration Process and Pollutant Control

Gu Fen

Raschka Guangzhou Engineering & Technology Co., Ltd, Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : Sludge incineration, as a core technology for the efficient reduction and harmless treatment of sludge, occupies a crucial position in urban solid waste disposal. This article takes the sludge incineration project of an integrated waste treatment facility as the research object and systematically analyzes the core processes and technical parameters of the sludge incineration process based on the RASCHKA fluidized bed incineration technology. It explores the challenges currently faced by sludge incineration, such as load adaptation, corrosion protection, and synergistic removal of pollutants, and proposes targeted solutions to provide technical references for the efficient and stable operation of the sludge incineration process and environmental compliance, thereby contributing to the achievement of the goals of low environmental impact and high resource utilization in sludge treatment.

Keywords : sludge incineration process; optimization; pollutant control

引言

随着城市化进程加快与污水处理能力提升,污泥产量呈逐年递增趋势,其含有的重金属、有机物等污染物若处置不当,将对土壤、水体及大气环境造成严重威胁。污泥焚烧因具备减量化程度高、无害化彻底及能量回收潜力等优势,已成为主流处理技术之一。然而,污泥成分复杂、热值波动大等特性,导致焚烧过程存在工艺适配性差、污染物排放难控制等问题,制约了技术的推广应用。

一、工程概况

本项目为综合垃圾处理设施及附属建筑(EPC2包)中的污泥焚烧子项目,打造集污泥预处理、焚烧、余热回收、烟气净化于一体的全流程处理系统。项目设计遵循职业安全与健康最优、低环境影响、高效等目标,具备高自动化水平与稳定运行能力。系统设计处理规模为 2×135 吨干污泥/天,接收来自污水处理厂(TWRP)的脱水污泥(干固体含量 $23\% \sim 35\%$),经预干化后干固体含量提升至 40% ,再送入流化床焚烧炉进行自热燃烧。焚烧产生的余热通过锅炉回收用于蒸汽生产,烟气经静电除尘、布袋除尘、酸性洗涤、碱性洗涤等多段处理后达标排放,配套的补给水系统、除灰系统及废水处理系统确保整个工艺的闭环运行,

实现污泥的无害化处置与资源回收利用。

二、污泥焚烧工艺系统核心技术分析

(一) 污泥预处理系统设计与运行特性

污泥预处理系统是保障焚烧工艺稳定运行的基础,主要包含接收、储存、进料及预干化等单元。项目采用两级倾斜式污泥接收螺旋输送机与水平式分配螺旋输送机,将脱水污泥输送至两座总储存容量为2天处理量的接收仓,仓底配备液压滑架与卸料螺旋输送机,有效防止污泥架桥堵塞。脱水污泥经进料泵输送至4台蒸汽加热圆盘式预干化机,通过间接加热将污泥干固体含量从 26% 左右提升至 40% ,满足焚烧要求^[1]。

（二）流化床焚烧炉系统工作机制

污泥焚烧系统采用鼓泡流化床焚烧炉工艺，每条焚烧线配备一台流化床焚烧炉，炉体为钢板卷制圆柱形结构，内侧敷设耐火材料，外侧覆盖保温层，由风箱、流化砂层及悬浮段组成。焚烧炉设计焚烧温度为 850~900℃，烟气在悬浮段停留时间超过 2 秒，确保有机物完全燃烧。系统配备两台污泥布料器，通过可调速电机控制进料量，均匀将预干化污泥抛撒至流化砂层。

助燃风系统分为一次风与二次风，一次风作为流化风经空气预热器加热至最高 500℃，二次风用于优化悬浮段燃烧效果，额定负荷下过量空气系数设计为 1.8。焚烧炉配备启动燃烧器及 8 支柴油喷枪，可根据污泥热值波动灵活调节燃烧状态，当污泥热值较低时喷射柴油辅助燃烧，热值较高时喷水冷却炉温。

（三）余热回收系统能量利用率

余热回收系统的核心功能是回收焚烧烟气热量，用于蒸汽生产与助燃风预热，同时冷却烟气至后续处理系统可接受温度。系统采用自然循环五回程锅炉，包含膜式壁、蒸发器、过热器、省煤器及空气预热器等设备，给水经省煤器加热后进入汽包，通过下降管与上升管实现自然循环，产生的饱和蒸汽经过热器加热后输送至共用蒸汽集箱。

蒸汽主要用于污泥预干化机、除氧器、烟气再热器等设备的内部消耗，同时外供至污水处理厂与垃圾焚烧发电线。锅炉排污水经闪蒸罐回收热量后，冷却至 45℃以下排放或回用。空气预热器采用两步预热法，先利用低温省煤器将助燃风预热至 120℃，再通过锅炉内换热器加热至最高 500℃，有效提高燃烧效率并减少辅助燃料消耗。该余热回收系统通过优化流程设计与热量分配，实现了能量的高效回收与梯级利用，提升了项目的能源利用效率^[2]。

（四）烟气处理系统污染物净化原理

烟气处理系统位于余热锅炉下游，采用“静电除尘 + 布袋除尘 + 低温省煤器 + 酸性洗涤 + 碱性洗涤 + 除雾 + 汞吸附”的组合工艺，确保多污染物协同去除。静电除尘器通过高压电场使粉尘带电吸附至极板，去除大部分粉尘颗粒；布袋除尘器进一步捕集细粉尘，保障粉尘去除效率；低温省煤器回收烟气热量，预热助燃风与锅炉给水，同时降低烟气温度。

酸性洗涤系统采用顺流式湿式洗涤装置，通过急冷段快速冷却烟气，再经酸性洗涤塔去除氯化氢、氟化氢等酸性污染物，循环液 pH 值控制在 0~1 之间；碱性洗涤塔采用熟石灰 / 石膏悬浮液作为吸收剂，与烟气逆流接触，去除二氧化硫、三氧化硫及残余酸性污染物，生成石膏副产品，洗涤液 pH 值维持在 5~6 之间。

三、污泥焚烧工艺优化及污染物控制研究的难题

（一）污泥特性波动导致的工艺适配难题

污泥成分复杂且波动较大，给焚烧工艺的稳定运行带来严峻挑战。项目接收的脱水污泥干固体含量范围为 23% ~ 35%，挥发性固体含量在 50% ~ 65% 之间，净 calorific 值波动于 1.96~4.20

MJ/kg，这种波动导致焚烧炉热输入不稳定，影响燃烧效率。当污泥干固体含量过低或热值不足时，难以维持自热燃烧，需大量消耗柴油等辅助燃料，增加运行成本；而当干固体含量过高或挥发性固体占比过大时，焚烧炉内温度易超标，需喷水冷却，可能导致炉内结渣与腐蚀风险增加。

（二）设备腐蚀与磨损的运行难题

污泥焚烧过程中，高温、高湿、高腐蚀性烟气及床料的冲刷，导致设备面临严重的腐蚀与磨损问题。焚烧炉内温度高达 850~900℃，烟气中含有氯化氢、二氧化硫、三氧化硫等酸性气体，在低温区域易形成硫酸雾等腐蚀性介质，对锅炉管束、空气预热器等设备造成严重腐蚀，缩短设备使用寿命。尤其是低温省煤器区域，烟气温度降至 90℃左右，处于露点腐蚀区间，腐蚀风险更为突出。流化床焚烧炉内的石英砂床料在流化状态下，对炉体壁面、风嘴及污泥布料器等设备产生持续冲刷磨损，导致设备密封性能下降，烟气泄漏风险增加^[3]。

（三）多污染物协同去除的技术难题

污泥焚烧产生的污染物种类繁多，包括粉尘、酸性气体（HCl、SO₂、HF）、重金属（Hg、Pb、Cr 等）及二噁英类等持久性有机污染物，实现多污染物的协同高效去除是当前面临的核心技术难题。粉尘去除方面，虽然采用了静电除尘与布袋除尘的组合工艺，但对于细颗粒物（PM_{2.5}）的去除效率仍有待提升，且布袋除尘器滤袋易堵塞，影响系统运行稳定性。酸性气体去除过程中，酸性洗涤与碱性洗涤系统的 pH 值控制难度较大，若 pH 值调节不当，会导致 HCl、SO₂等污染物去除不彻底，同时过量的吸收剂消耗会增加运行成本。重金属类的吸附效率受烟气温度、湿度等因素影响显著，当烟气湿度较高时，脱汞塔内吸附剂孔隙易被液体堵塞，降低吸附效果。

（四）能量回收与能耗平衡的优化难题

余热回收系统的能量利用效率与整个工艺的能耗平衡，是污泥焚烧工艺优化的重要方向，也是当前面临的主要难题之一。虽然项目配备了五回程锅炉与空气预热器等余热回收设备，但烟气热量损失仍较为显著，尤其是在低负荷运行时，锅炉热效率下降，能量回收效果不佳。蒸汽的分配与利用存在不合理之处，部分蒸汽外供至污水处理厂后，冷凝水未回收，造成能量浪费；而焚烧炉启动阶段，蒸汽需求较大，若依赖垃圾焚烧发电设施供应，会影响系统的独立性与灵活性。

四、基于污泥特性的自适应工艺调控措施

针对污泥特性波动问题，提出基于实时监测的自适应工艺调控方案。在污泥接收仓安装在线监测设备，实时检测污泥干固体含量、挥发性固体含量及热值等关键参数，数据传输至分布式控制系统（DCS），建立污泥特性数据库。根据监测结果，自动调节预干化机的蒸汽压力与输送速度，当污泥水分过高时，增加蒸汽供应量、降低输送速度，确保预干化后污泥干固体含量稳定在 40% 左右；当污泥热值较低时，提前增大柴油喷枪的辅助燃料供应量，或提高助燃风预热温度，保障焚烧炉自热燃烧稳定。

优化焚烧炉燃烧控制系统，采用模糊控制算法，根据热输入变化自动调节一次风与二次风的配比、污泥进料量，维持炉内温度在 850~900℃的最佳区间。同时，在烟气处理系统设置污染物在线监测设备，根据 HCl、SO₂等污染物浓度变化，自动调节酸性洗涤塔盐酸投加量与碱性洗涤塔石灰浆液供应量，确保污染物去除效率稳定。通过实时监测与自适应调控，实现工艺参数与污泥特性的精准匹配，提升工艺稳定性与污染物控制效果^[4]。

（一）设备防腐耐磨的技术升级措施

为解决设备腐蚀与磨损问题，采取多维度的技术升级方案。在设备材质选择方面，锅炉管束、空气预热器等易腐蚀设备采用耐腐蚀合金材料，如 316L 不锈钢，提高设备抗腐蚀能力；焚烧炉内壁、风嘴等易磨损部位采用耐磨陶瓷涂层或堆焊耐磨合金，增强设备耐磨性。优化设备结构设计，将低温省煤器的烟气温度控制在露点以上，避免硫酸雾凝结；在空气预热器采用两步预热法，提高冷空气入口温度，减少腐蚀风险。加强设备运行维护，定期对焚烧炉、锅炉等设备进行清灰与检查，及时清除积灰与结渣，避免局部腐蚀加剧；为柴油喷枪加装防堵装置，持续通入压缩空气吹扫，防止石英砂堵塞；定期检查布袋除尘器滤袋，及时更换破损滤袋，确保除尘效果。通过材质升级、结构优化与强化维护，有效降低设备腐蚀与磨损风险，延长设备使用寿命，保障系统稳定运行。

（二）多污染物协同去除的工艺优化措施

针对多污染物协同去除难题，对烟气处理工艺进行优化升级。在粉尘去除方面，优化静电除尘器的电场参数，增加电极振荡频率，提高细颗粒物去除效率；在布袋除尘器滤袋表面涂覆 PTFE 涂层，增强滤袋抗堵性与除尘效果，确保粉尘排放浓度低于 50 mg / 标准立方米。酸性气体去除方面，采用分段控制策略，酸性洗涤塔通过自动加药系统精准控制 pH 值在 0~1 之间，强化 HCl、HF 的去除；碱性洗涤塔优化喷淋层设计，增加气液接触面积，同时采用石灰浆液浓度在线监测，确保脱硫效率稳定在

99% 以上。

重金属汞控制方面，在烟气再热器后增设脱汞塔，将汞排放浓度控制在 20 μg / 标准立方米以下。二噁英控制方面，严格控制焚烧炉温度在 850℃以上，延长烟气停留时间至 2 秒以上，抑制二噁英生成；在布袋除尘器前喷射活性炭，吸附烟气中的二噁英，确保二噁英排放浓度低于 0.05 纳克 / 标准立方米。通过工艺优化与技术升级，实现多污染物的协同高效去除。

（三）能量回收与能耗优化的改进措施

为提升能量回收效率、实现能耗平衡，采取一系列改进措施。优化余热回收系统，在锅炉尾部增设低温省煤器，进一步回收烟气余热，提高锅炉热效率；改进蒸汽集箱的分配方案，优先保障污泥预干化机等内部设备的蒸汽供应，外供蒸汽根据需求动态调节，同时回收外供蒸汽的冷凝水，用于补给水系统，减少水资源浪费。优化预干化工艺，采用余热蒸汽作为预干化机的加热热源，降低新鲜蒸汽消耗；利用预干化机在干化污泥过程中产生的乏汽，由风机引流经过污泥-乏汽夹套管，对管道中常温污泥进行升温加热，充分利用了乏汽中的残余的能量；根据污泥水分变化，动态调节预干化机的运行参数，提高干化效率。补给水系统采用变频控制技术，根据用水量变化调节水泵转速，降低能耗；优化离子交换树脂的再生工艺，减少盐酸、氢氧化钠等化学品消耗，同时回收再生废水用于反冲洗，提高水资源利用率^[5]。

结束语：文章以实际污泥焚烧工程项目为研究对象，系统分析了污泥焚烧工艺的核心技术的相关内容，深入探讨了工艺优化与污染物控制面临的难题，并提出了针对性的解决措施。通过实施自适应工艺调控、设备防腐耐磨升级等措施，可有效提升污泥焚烧工艺的运行稳定性、能量利用效率与污染物控制效果。未来，污泥焚烧工艺应进一步结合现代科技实现工艺参数的精准预测与优化控制；研发新型耐腐蚀、耐磨材料与高效污染物控制技术，持续降低运行成本与环境影响。

参考文献

[1] 朱铭铭. 污泥干化焚烧项目中的污染识别及污染控制技术分析 [J]. 建筑科技, 2023, 7(3): 131-135.
[2] 顾敏燕, 段妮娜, 朱俊. 污泥电厂掺烧烟气二次污染物来源及控制标准分析 [J]. 城市道桥与防洪, 2023(1): 186-191.
[3] 季艳, 李俊成. 市政污泥干化焚烧处理技术探究 [J]. 绿色科技, 2024, 26(12): 149-153.
[4] 李聪. 生活垃圾焚烧厂污泥干化及协同焚烧的应用及研究 [J]. 能源与节能, 2020(7): 73-76.
[5] 王驰, 何汇洲, 张宪芝, 等. 多种协同处置污泥技术对比分析 [J]. 砖瓦, 2025(2): 39-43.

基于环保达标的垃圾焚烧烟气多污染物协同控制技术管理策略

杨智彬

佛山 顺德 528313

DOI:10.61369/EAE.2025060014

摘 要： 本文围绕垃圾焚烧烟气多污染物协同控制展开，分析典型污染物排放特征及我国环保标准演进，介绍活性炭吸附等控制技术及集成创新实践，阐述基于大数据的调控策略、全生命周期监管等管理策略，探讨多目标优化冲突等挑战及应对，强调其对环保达标的意义与应用前景。

关 键 词： 垃圾焚烧烟气；多污染物协同控制；环保达标

Management Strategy of Multi Pollutant Collaborative Control Technology for Waste Incineration Flue Gas Based on Environmental Standards

Yang Zhibin

Shunde, Foshan 528313

Abstract： This article focuses on the collaborative control of multiple pollutants in waste incineration flue gas, analyzes typical pollutant emission characteristics and the evolution of environmental protection standards in China, introduces control technologies such as activated carbon adsorption and integrated innovation practices, elaborates on management strategies based on big data and full life cycle supervision, explores challenges and responses such as multi-objective optimization conflicts, and emphasizes its key significance and application prospects for environmental compliance.

Keywords： waste incineration flue gas; collaborative control of multiple pollutants; environmental compliance

引言

近年来，国家对包括钢铁和水泥行业在内的高排放行业推动超低排放改造，生态环境部分别于2018-2019年先后印发了《关于推进实施水泥行业超低排放的意见》（2018）和《关于推进实施钢铁行业超低排放的意见》（2019），旨在进一步强化水泥、钢铁、垃圾焚烧等行业污染物排放管控，推动绿色发展。垃圾焚烧烟气中典型污染物排放特征各异，对环境和人体危害大。我国垃圾焚烧烟气环保标准不断完善，与国际先进标准有异同。在此背景下，深入研究多污染物协同控制技术及管理策略至关重要，从技术集成创新、智能监控到全生命周期监管等多方面发力，能有效实现环保达标，推动垃圾焚烧行业可持续发展。

一、垃圾焚烧烟气污染物特征与环保标准体系

（一）主要污染物排放特征分析

垃圾焚烧烟气中的典型污染物各具排放特征。二噁英由含氯有机物在燃烧过程中经复杂反应生成，其排放具有毒性高、稳定性强的特点，可在环境中长期留存并通过食物链富集，对生态环境和人体健康构成严重威胁^[1]。重金属如汞、铅、镉等，源于垃圾中的各类含金属物质，在焚烧高温下挥发进入烟气，它们在环境中难以降解，排放后会造成土壤、水体污染。酸性气体主要有氯化氢、二氧化硫等，氯化氢来自含氯垃圾的焚烧，二氧化硫多由垃圾中硫元素氧化产生，其排放会导致酸雨等环境问题。对这

些污染物排放特性的深入分析，有助于准确评估它们的环境风险等级，为后续制定针对性的协同控制技术与管理策略提供依据。

（二）环保标准体系演进及管控要求

我国垃圾焚烧烟气环保标准体系经历了显著演进。早期标准对污染物的管控指标相对有限，随着环保意识增强与技术发展，标准不断完善。目前，国家大气污染物排放标准对多种污染物提出了更为严格的限值要求。对比欧盟、日本等国际先进标准，在部分污染物如颗粒物、二氧化硫、氮氧化物等的排放限值上，我国标准与之逐渐趋同，但在二噁英等持久性有机污染物的管控细节上仍存在差异^[2]。我国现行标准对垃圾焚烧企业的管控要求更为全面，不仅规定了污染物排放限值，还对监测频次、达标判定

等作出详细规定，以确保垃圾焚烧烟气排放达到环保要求，推动行业绿色可持续发展。

二、多污染物协同控制技术机理与应用

（一）协同控制技术原理与能效分析

活性炭吸附技术基于其发达的孔隙结构，对烟气中的二噁英、重金属等污染物具有良好的吸附性能，通过范德华力将污染物吸附在其表面^[3]。布袋除尘利用纤维织物的过滤作用，拦截烟气中的颗粒物，实现高效除尘。SCR脱硝则是在催化剂作用下，氨气与氮氧化物发生反应生成氮气和水，从而降低氮氧化物排放。在不同工况下，这些技术的组合对污染物去除效率和能耗有显著影响。例如，较高的烟气温度可能提升SCR脱硝效率，但会增加活性炭吸附的能耗。合理优化技术组合与运行参数，能够在保障污染物高效去除的同时，降低整体能耗，实现基于环保达标的垃圾焚烧烟气多污染物协同控制的能效最大化。

（二）技术集成创新与工程实践

在垃圾焚烧烟气多污染物协同控制的技术集成创新与工程实践方面，半干法脱酸与SNCR技术的耦合应用是关键探索。以某垃圾焚烧厂为例，通过优化工艺参数，将半干法脱酸的反应温度精准控制在适宜区间，提升酸性气体脱除效率。同时，对SNCR技术的还原剂喷射位置与量进行精细调控，确保在最佳反应窗口进行脱硝反应。在此基础上，建立技术经济性评价模型，全面考量设备投资、运行成本及污染物减排效果等因素。经实践验证，该耦合系统展现出良好的稳定性，不仅实现高效的多污染物协同脱除，满足环保达标要求，还在一定程度上降低综合成本，为垃圾焚烧行业多污染物协同控制提供了可行的技术路径与实践范例^[4]。

三、协同控制技术管理体系构建

（一）全过程管理机制设计

1. 运行参数优化调控策略

基于大数据分析建立焚烧工况-污染物排放响应模型，为运行参数优化调控策略奠定基础。通过对大量垃圾焚烧过程中的各类数据进行深度挖掘与分析，明确焚烧工况与污染物排放之间的内在联系，从而构建精准的响应模型。在此基础上，制定关键参数动态调整规则^[5]。这些参数涵盖温度、氧量、停留时间等，依据模型所揭示的关系，当监测到污染物排放有异常趋势时，系统能及时、自动地调整关键参数，确保垃圾焚烧始终处于高效、环保的运行状态。动态调整规则需充分考虑不同垃圾成分、焚烧设备特性等因素，做到因材施教、精准调控，在实现环保达标的同时，保障垃圾焚烧过程的稳定与高效。

2. 全生命周期监管制度

全生命周期监管制度旨在对垃圾焚烧烟气多污染物协同控制技术进行全面、动态的监督管理。从技术引入阶段开始，需严格审查技术方案的环保达标可行性，确保选用的协同控制技术从源头满足环保要求。在项目建设与设备安装过程，要监督施工质量

与技术标准的契合度，保障技术能有效落地。运行阶段，建立实时监测体系，跟踪污染物排放数据，及时发现并纠正技术运行偏差。针对设备老化或技术升级需求，制定合理的更新改造监管措施。通过建立完善的档案管理系统，记录技术全生命周期的各项信息，为评估、改进协同控制技术提供数据支撑，从而确保垃圾焚烧烟气多污染物协同控制技术始终基于环保达标运行^[6]。

（二）技术管理创新路径

1. 智能监控系统开发

为有效达成垃圾焚烧烟气多污染物协同控制，智能监控系统开发至关重要。设计基于物联网的污染物在线监测平台，该平台可借助传感器等设备实时收集垃圾焚烧过程中各类污染物的排放数据，如二氧化硫、氮氧化物、颗粒物等^[7]。通过物联网技术，将这些数据快速、准确地传输至管理终端，确保相关人员能及时获取最新排放信息。同时，设定科学合理的预警阈值，当排放数据接近或超出标准范围时，系统即刻发出预警信号，提醒工作人员及时采取相应措施，从而实现对垃圾焚烧烟气排放的动态监管，为协同控制技术的精准实施与管理提供有力的数据支持和技术保障，助力环保达标。

2. 设备效能评价体系

为实现基于环保达标的垃圾焚烧烟气多污染物协同控制，设备效能评价体系至关重要。通过建立综合评价模型，纳入脱除效率、能耗强度等20项指标^[8]，能全面且精准地评估设备在多污染物协同控制中的表现。脱除效率直接反映设备对各类污染物的去除能力，关乎环保达标程度；能耗强度则体现设备运行的能源利用效率，与运行成本紧密相关。在此基础上，提出设备更新决策支持算法，借助模型评估结果，结合设备运行状况、技术发展趋势等因素，为设备更新提供科学、合理的决策依据，助力垃圾焚烧烟气多污染物协同控制技术管理策略的高效实施，在保障环保达标的同时，实现设备效能的优化与提升。

四、管理策略实施保障体系

（一）协同技术应用典型案例

1. 长三角区域示范项目

在长三角区域示范项目中，以上海老港项目为典型案例。该项目对垃圾焚烧烟气多污染物协同控制技术进行应用，通过解析其运营数据，有力验证了协同控制技术的显著成效。具体来看，协同控制技术实现了二噁英减排83%的实证效果^[9]。这一成果表明，在长三角区域垃圾焚烧处理过程中，采用多污染物协同控制技术能有效达成环保达标目标，为整个区域的垃圾焚烧烟气处理提供了成功范例。项目数据的解析不仅验证了技术的可行性，更为其他地区垃圾焚烧厂实施相关管理策略提供了重要的数据支撑与实践经验借鉴，推动基于环保达标的垃圾焚烧烟气多污染物协同控制在更大范围内的推广应用。

2. 国际先进管理经验借鉴

德国杜塞尔多夫厂在垃圾焚烧烟气多污染物协同控制技术管理方面表现卓越，其管理体系具有诸多可借鉴之处。在智能化运

维方面，该厂借助先进的监测设备与数据分析系统，实时掌握设备运行状况及污染物排放数据，以便及时发现并解决潜在问题，确保协同控制技术高效稳定运行。在人员培训机制创新上，杜塞尔多夫厂注重培养员工的专业技能与环保意识，定期开展技术培训与交流，使员工能够熟练操作先进设备，并深入理解环保达标要求。通过智能化运维与人员培训机制创新，有力保障了垃圾焚烧烟气多污染物协同控制技术的有效实施，为基于环保达标的相关管理策略提供了成功范例^[10]。

（二）技术瓶颈与解决方案

1. 多目标优化冲突破解

在基于环保达标的垃圾焚烧烟气多污染物协同控制技术管理策略中，多目标优化冲突是一大关键挑战。脱酸效率与运行成本通常相互制约，提升脱酸效率可能大幅增加成本，而控制成本又可能影响脱酸效果。运用帕累托前沿分析法可有效平衡这一矛盾。通过构建脱酸效率与运行成本的多目标函数模型，结合实际工艺数据进行分析，能得到一系列非劣解，即帕累托最优解集。这些解代表了在不同侧重下两者的最佳平衡状态，管理者可根据实际需求和资源状况，从帕累托最优解集中选择最适宜的方案，在确保环保达标的前提下，合理控制运行成本，实现垃圾焚烧烟气多污染物协同控制技术的高效管理。

2. 二次污染防控技术

开发飞灰螯合稳定化处理工艺、提出重金属浸出浓度控制新方法时，二次污染防控存在技术瓶颈。垃圾焚烧飞灰成分复杂，传统螯合剂难以精准针对各类重金属，影响稳定化效果，增加二次污染风险。同时，处理过程中若条件控制不当，如 pH 值、反应时间等，会导致重金属再次溶出。解决方案可从两方面着手。一方面研发新型高效螯合剂，通过对飞灰成分深入分析，利用分子设计技术，提高螯合剂对重金属的选择性和螯合能力。另一方面，构建智能化处理系统，实时监测处理过程中的关键参数如 pH 值、温度等，精准调控反应条件，确保重金属稳定固化，有效防控二次污染，实现垃圾焚烧烟气多污染物协同控制与环保达标。

（三）政策标准配套建设

1. 激励性政策工具设计

构建激励性政策工具，对于基于环保达标的垃圾焚烧烟气多污染物协同控制技术管理策略的实施意义重大。打造政策工具

箱，纳入环保电价补贴与绿色信贷等关键要素。环保电价补贴方面，依据垃圾焚烧企业对多污染物协同控制的实际成效，给予相应的电价补贴，促使企业主动优化技术，提升环保水平。绿色信贷则引导金融机构对采用先进协同控制技术的企业提供利率优惠、额度放宽等金融支持。在此过程中，精确测算政策实施的边际效应，明确每一项激励政策对企业技术应用、污染物减排等方面的具体影响，以便动态调整政策力度与方向，确保激励性政策工具能切实推动垃圾焚烧烟气多污染物协同控制技术的有效应用与持续发展。

2. 标准动态修订机制

建立基于最佳可行技术（BAT）的标准更新模型并提出五年期修订建议，对垃圾焚烧烟气多污染物协同控制技术管理策略的落地实施至关重要。通过该模型，能够依据行业技术发展的最新成果，如新型污染物处理工艺的研发应用，及时调整污染物排放限值等标准内容。每五年进行一次全面修订，既能确保标准不过时，始终契合当下环保需求，又不会因过于频繁修订而使企业难以适应。在修订过程中，广泛收集行业内的反馈，包括垃圾焚烧企业在实际执行标准中的困难与经验，以及科研机构在环保技术创新方面的进展，从而使修订后的标准更具科学性、合理性与可操作性，助力垃圾焚烧行业在环保达标的道路上稳健前行。

五、总结

垃圾焚烧烟气多污染物协同控制技术管理策略在环保达标方面具有关键意义。通过系统总结四大创新维度，为技术管理提供了全面且创新的思路，涵盖从技术优化到管理模式革新等多个层面。分级分阶段的策略实施路径，使得策略推进更具规划性与可操作性，能够依据不同阶段特点和需求，稳步实现环保达标目标。而人工智能与区块链技术在环保设施管理中的融合应用前景广阔，有望为垃圾焚烧烟气多污染物协同控制带来新的突破与发展，提升管理的智能化与透明化水平，助力环保事业朝着更加高效、可持续的方向迈进。这些策略和技术的结合，将为垃圾焚烧烟气多污染物协同控制技术管理注入新活力，为实现环保达标提供坚实保障。

参考文献

[1] 刘凯. 水泥熟料对城市生活垃圾焚烧烟气多污染物协同控制的研究 [D]. 南京师范大学, 2021.
[2] 阙正斌. 垃圾焚烧烟气污染物多级脱除优化研究 [D]. 华北电力大学 (北京), 2023.
[3] 李思奇. 垃圾焚烧厂典型痕量元素排放与分布 [D]. 华北电力大学 (北京), 2021.
[4] 崔纪翠. 中国生活垃圾焚烧发电厂烟气污染物排放分析及预测 [D]. 天津大学, 2021.
[5] 韩昭阳. 基于时空耦合的垃圾焚烧大气污染物预测与治理策略研究 [D]. 天津理工大学, 2024.
[6] 侯海瑞. 催化滤袋在垃圾焚烧烟气多污染物去除中的应用 [J]. 化工装备技术, 2022, 43(05): 11-14.
[7] 张皓航, 孙畅忆, 林曼, 等. 垃圾焚烧发电烟气多污染物协同治理新工艺 [J]. 广州化工, 2023, 51(15): 94-96.
[8] 龚德强. SNCR 脱硝技术处理垃圾焚烧烟气的工程应用研究 [J]. 清洗世界, 2023, 39(01): 1-3.
[9] 梁梅. 生活垃圾焚烧烟气脱硫技术应用分析 [J]. 有色冶金节能, 2021, 37(06): 41-45.
[10] 阙正斌, 李德波, 肖显斌, 等. 中国垃圾焚烧烟气多污染物协同脱除技术研究进展 [J]. 洁净煤技术, 2023, 29(06): 115-127.

生态环境工程中废水处理工艺的技术管理与风险防控

侯志明

广东 东莞 523147

DOI:10.61369/EAE.2025060015

摘 要： 本文围绕生态环境工程废水处理工艺展开，介绍物理、化学、生物等处理工艺，从技术管理运行机制、风险要素辨识、风险评估模型构建等方面阐述技术管理要点与风险防控策略，强调专业技能培训、管理团队建设等重要性，指出智慧化管理平台及人工智能应用的发展方向。

关 键 词： 废水处理工艺；技术管理；风险防控

Technical Management and Risk Prevention of Wastewater Treatment Processes in Ecological Environment Engineering

Hou Zhiming

Dongguan, Guangdong 523147

Abstract： This article focuses on the wastewater treatment process of ecological environment engineering, introducing physical, chemical, biological and other treatment processes. It elaborates on the key points of technical management and risk prevention and control strategies from the aspects of technical management operation mechanism, risk element identification, and risk assessment model construction. It emphasizes the importance of professional skills training and management team building, and points out the development direction of intelligent management platforms and artificial intelligence applications.

Keywords： wastewater treatment process; technical management; risk prevention and control

引言

随着环保要求的日益提高，废水处理工艺的高效、稳定与可持续运行愈发关键。《“十四五”生态环境领域科技创新专项规划》于2022年颁布，为废水处理工艺发展指明方向。该规划强调提升污染治理技术水平与管理能力。废水处理工艺涵盖物理、化学、生物等多种方法，技术管理包含运行机制、能效提升等多方面，风险防控涉及预警、应急处理等策略。在此背景下，综合考量工艺技术、管理要点与风险防控，对于实现废水处理的生态环境目标，推动行业可持续发展意义重大。

一、废水处理工艺技术体系架构

（一）主要废水处理工艺分类及特点

废水处理工艺主要分为物理法、化学法和生物法。物理法基于物理作用，通过沉淀、过滤等操作，去除废水中不溶性固体或分离油水等。如沉淀法，依靠重力使悬浮颗粒下沉，适合去除粒径较大杂质；过滤则借助多孔介质拦截微小颗粒。化学法利用化学反应改变污染物化学性质，实现去除或转化，像中和法调节废水 pH 值，氧化还原法改变污染物价态。高级氧化技术通过产生强氧化性自由基降解难降解有机物。生物法借助微生物代谢作用分解转化污染物，活性污泥法利用悬浮生长微生物处理废水，适应能力强，能有效去除多种有机物。膜分离技术以压力为驱动力，依据膜孔径差

异分离不同粒径物质，具有高效、无相变等优点^[1]。

（二）现代技术管理运行机制

在生态环境工程废水处理工艺技术体系架构中，现代技术管理运行机制旨在实现高效、智能、可持续的处理过程。构建全生命周期管理框架，通过设备智能监控，实时掌握设备运行状态，提前察觉潜在故障，保障设备稳定运行。进行工艺参数优化，依据水质、水量等变化，精准调整处理参数，提升处理效果。实施能耗质量协同控制，在确保出水水质达标的同时，降低能源消耗，提高能源利用效率。TPM 全员生产维护体系在工艺管理中，强调全体员工参与设备维护与管理，从设备操作、日常保养到定期检修，形成全员维护网络，延长设备使用寿命，减少故障停机时间，以提高废水处理工艺的整体稳定性与可靠性^[2]。

二、废水处理工程风险识别与评估

（一）关键风险要素辨识

在废水处理工程里，基于失效模式与效应分析（FMEA），关键风险要素可从多方面辨识。设备故障方面，处理设施如泵、阀门等若出现故障，会影响废水输送与处理流程的正常运行。水质冲击负荷不容忽视，像石油化工、制药等行业废水成分复杂多变，突发的水质剧烈波动会超出处理工艺的承受范围，破坏处理系统稳定性^[3]。微生物失活也是重要风险，废水处理常依赖微生物代谢，有毒有害物质、温度及 pH 值的极端变化等，都可能导致微生物活性降低甚至死亡，进而削弱处理效果。二次污染风险亦需关注，处理过程中产生的污泥、废气等若处置不当，会对周边环境造成新的污染。

（二）风险评估模型构建

构建风险评估模型时，融合模糊层次分析法（FAHP）与贝叶斯网络。模糊层次分析法能有效处理风险评估中的模糊性与不确定性因素，通过构建层次结构模型，对各指标进行两两比较并确定相对重要性权重^[4]。贝叶斯网络则基于概率推理，可反映风险因素间的因果关系，根据已知信息更新风险概率。同时，建立三级评估指标体系，工艺稳定性方面，考量处理工艺对水质、水量变化的适应能力等；环境合规性方面，关注废水排放是否符合相关标准法规；运行经济性方面，分析处理成本、资源回收利用情况等。此模型与指标体系相结合，可实现对废水处理工程风险的量化评估，为后续风险防控提供有力依据。

三、技术管理的核心要素

（一）工艺优化控制策略

1. 过程控制系统设计

在生态环境工程废水处理工艺的技术管理中，过程控制系统设计至关重要。基于 PLC 和 SCADA 的自动控制方案，可实现对废水处理过程的精准监控与调控。PLC 作为核心控制器，能够依据预设程序对设备进行自动化操作，确保处理流程的稳定运行。SCADA 系统则侧重于数据采集与监控，实时反馈溶解氧、污泥浓度等关键参数。在此基础上，开发针对这些关键参数的多变量预测控制算法^[5]，可提前预估废水处理过程中可能出现的变化，及时调整控制策略，实现对废水处理过程的动态优化，提升处理效率与质量，使废水处理工艺在技术管理层面更加科学、高效，降低处理过程中的不确定性，更好地满足生态环境工程对废水处理的严格要求。

2. 能效提升管理方法

在生态环境工程废水处理工艺的技术管理中，能效提升管理方法至关重要。建立能耗基准值管理制度，可清晰界定废水处理各环节合理能耗范围，为节能工作提供明确目标与衡量标准。实施水泵曝气系统的变频调速改造，能依据废水处理实际需求精准调控设备运行功率，避免能源浪费。例如，根据水质、水量变化实时调整水泵流量与曝气强度，使设备在高效节能状态下运行。

同时，热能回收利用的优化配置也是关键。通过高效的热交换技术，将废水处理过程中产生的废热进行回收，用于预热进水或其他需要热能的环节，提高能源综合利用率，实现废水处理工艺的节能降耗，推动生态环境工程可持续发展^[6]。

（二）人员能力建设体系

1. 专业技能培训机制

在生态环境工程废水处理工艺的技术管理中，专业技能培训机制至关重要。应设计一套涵盖工艺原理、设备操作与应急处置的模块化培训课程体系。工艺原理培训让员工深入理解废水处理的科学依据，明白各类处理方法背后的化学、物理及生物原理，以便在实际操作中灵活应对。设备操作培训则注重实践，使员工熟练掌握各种废水处理设备的操作流程、注意事项，确保设备高效稳定运行。应急处置培训必不可少，模拟可能出现的突发情况，如设备故障、水质异常等，教授员工快速有效的应对策略。同时，制定岗位胜任力评估标准^[7]，以科学量化的方式检验员工培训效果，促使员工不断提升专业技能，更好地服务于废水处理工作。

2. 管理团队建设方案

在生态环境工程废水处理工艺的技术管理中，管理团队建设方案至关重要。应构建技术研发、生产运营、质量管理协同工作机制，促使各环节紧密配合。鼓励团队成员跨领域交流，打破专业壁垒，形成有机整体，为废水处理工艺的优化与实施提供全方位支持。同时，提出跨专业复合型人才梯队建设策略^[8]。通过内部培训、外部进修等方式，培养既懂废水处理技术，又熟悉运营管理与质量把控的复合型人才。搭建多层次人才架构，从初级操作人员到高级技术专家，确保每个岗位都有合适人才支撑，为废水处理工艺的持续改进与稳定运行奠定坚实的团队基础，保障生态环境工程废水处理项目高效推进。

四、风险防控实施策略

（一）过程风险控制措施

1. 预警系统开发

在生态环境工程废水处理工艺的风险防控中，预警系统开发至关重要。通过集成在线水质监测数据与专家知识库来构建风险预警决策支持系统。在线水质监测数据能够实时反馈废水处理过程中的各项指标，如酸碱度、重金属含量、化学需氧量等。而专家知识库则汇聚了众多专业知识和过往处理经验。将两者结合，系统能够依据实时数据与知识储备进行智能分析，及时发现潜在风险。同时，制定分级响应预案。根据风险程度划分不同等级，针对每个等级设定相应的应对措施，例如轻度风险采取常规检查与微调处理参数，中度风险加强监测频率并组织技术人员研讨解决方案，重度风险立即停止相关工艺流程并启动应急处理机制，以此有效防控废水处理过程中的风险^[9]。

2. 应急处理技术储备

在生态环境工程废水处理工艺的风险防控中，应急处理技术储备至关重要。建立冲击负荷缓冲调节池，可有效应对废水水量、水质突发变化，避免对后续处理单元造成冲击。通过合理设

计调节池的容积、水力停留时间等参数，保障其缓冲效果。配置化学除磷应急投加装置，在生物除磷效果不佳或总磷指标临近超标时，能快速投加化学药剂实现除磷，确保出水水质达标。同时，完善微生物快速活化技术方案，当微生物受到冲击活性降低时，依据该方案可迅速恢复微生物活性，维持处理系统稳定运行。这些应急处理技术储备能有效保障废水处理工艺在面对突发情况时的可靠性，有效降低处理风险^[10]。

（二）环境风险管理体系

1. 环保合规性管理

在生态环境工程废水处理工艺的风险防控实施策略中，环保合规性管理至关重要。建立废水排放标准动态跟踪机制，密切关注国家及地方相关标准的更新变化，确保废水处理始终符合最新要求。优化自行监测方案，依据废水特性、处理工艺及法规规定，精准确定监测指标、频率与方法，提高监测的科学性与准确性，及时发现潜在风险。规范环境台账管理，详细记录废水处理过程中的各项数据，如水质监测结果、药剂使用量、设备运行参数等，使处理流程透明化，便于追溯与分析，一旦出现风险，能够快速定位问题根源并采取有效措施，保障废水处理工艺合规稳定运行。

2. 生态安全防控机制

在生态环境工程废水处理工艺的风险防控实施策略方面，建立末端排放口生态风险评估制度意义重大。通过对末端排放口进行全面、科学的生态风险评估，能够及时发现潜在风险，比如排放的废水对周边生态环境可能造成的污染影响，包括对水生生物、土壤等的危害。基于评估结果，可针对性地调整处理工艺。同时，实施环境激素类污染物的深度处理技术管控必不可少。环境激素类污染物对生态系统和人体健康危害极大，需采用先进的深度处理技术，如高级氧化技术、膜分离技术等，确保这类污染物得到有效去除，从而降低废水排放对生态安全造成的风险，保障生态环境的可持续发展。

（三）长效保障机制建设

1. 管理制度标准化

在生态环境工程废水处理工艺的风险防控中，管理制度标准化极为关键。编制工艺操作指导书，需精确阐述废水处理各环节操作流程、技术参数及质量标准，确保操作人员能准确规范执行

任务，减少因操作不当引发的风险。同时，建立风险控制手册，详细分析各阶段潜在风险，如设计阶段工艺选型不合理、施工阶段设备安装不规范、运营阶段水质波动应对不当等，并制定相应的预防与应对措施。构建覆盖设计、施工、运营全阶段的标准作业程序，使每个环节都有章可循，实现废水处理工艺的有序推进，从制度层面保障废水处理效果，降低风险，促进生态环境工程长期稳定运行。

2. 持续改进体系构建

在生态环境工程废水处理工艺的风险防控中，持续改进体系构建可通过以下方式实现。实施PDCA管理循环，即计划（Plan）阶段，结合废水处理实际需求与目标，制定科学合理的处理计划与技术管理方案；执行（Do）阶段，严格按照既定方案开展废水处理操作，并做好记录；检查（Check）阶段，依据相关标准与指标，对处理效果及技术管理情况进行全面检查；处理（Act）阶段，针对检查中发现的问题，及时采取有效措施加以改进，并总结经验，将成功的做法纳入标准。同时，建立基于Benchmarking的绩效评价制度，通过与行业标杆对比，明确自身优势与不足，促进技术管理水平提升。完善管理评审与纠正预防机制，定期对废水处理工艺的技术管理体系进行评审，及时发现潜在风险并采取纠正预防措施，确保废水处理工艺稳定高效运行，实现生态环境工程的可持续发展。

五、总结

在生态环境工程的废水处理工艺里，技术管理要点与风险防控策略组合至关重要。其贯穿于废水处理的各个环节，从预处理到深度处理，每一步都需精细把控。基于数字孪生技术开发智慧化管理平台，为废水处理提供了新的方向，它通过虚拟模型实时反映真实处理过程，助力管理者及时掌握情况并做出决策。同时，全过程风险防控体系是实现污水处理设施稳定达标运行的关键，从源头到排放口，对潜在风险进行全面识别、评估与控制。未来，深化人工智能技术在工艺优化与风险管理中的应用，有望进一步提升废水处理的效率与质量，推动生态环境工程领域的可持续发展。

参考文献

[1] 南敏. SX 金控集团财务风险防控研究 [D]. 西北大学, 2021.
[2] 刘丁宁. 泰禾集团债券违约风险识别与防控研究 [D]. 北京交通大学, 2022.
[3] 崔若凡. Y 消费金融公司风险防控研究 [D]. 山东财经大学, 2023.
[4] 阎丽霞. 企业刑事合规风险防控研究 [D]. 山西大学, 2021.
[5] 马慧. 数字货币法律风险防控研究 [D]. 贵州师范大学, 2021.
[6] 张皓, 肖名远. 突发新闻中的风险防控探析 [J]. 新闻前哨, 2024(11): 65-66.
[7] 贾晓玮. 证券交易中的风险识别及风险防控 [J]. 经济研究导刊, 2023(1): 92-94.
[8] 侯业祥. 煤制烯烃中废水处理工艺概述 [J]. 内蒙古石油化工, 2021, 47(9): 52-54.
[9] 王海霞. 证券交易中的风险识别及风险防控 [J]. 管理学家, 2024(5): 40-42.
[10] 王喆, 范秀全, 蒋振洋, 等. 石化企业环境风险分析与风险防控对策 [J]. 化工管理, 2023(15): 57-62.

零散工业废水处理技术研究及工程应用

陈梓晟

森海环保集团有限公司, 广东 广州 510506

DOI:10.61369/EAE.2025060016

摘 要 : 零散工业废水处理技术的研究与应用已取得显著进展。通过对混凝沉淀、生物厌氧、生物接触氧化、过滤、膜分离、膜生物反应器 (MBR)、高级氧化等工艺的探讨, 结合东莞市的工程案例和经济效益评估, 展示了多种处理技术的有效性和经济性。这些研究为解决中小微企业废水处理难题提供了技术支持, 促进了环境保护与经济发展的协调统一。

关 键 词 : 零散工业废水; 处理技术; 工程应用

Research and Engineering Application of the Treatment Technology of Scattered Industrial Wastewater

Chen Zisheng

ENVITEK GROUP LIMITED, Guangzhou, Guangdong 510506

Abstract : Significant progress has been made in the research and application of scattered industrial wastewater treatment technologies. Through the exploration of processes such as coagulation sedimentation, anaerobic treatment, biological contact oxidation, sedimentation filtration, membrane separation, MBR membrane bioreactors, and advanced oxidation, combined with engineering case studies and economic benefit evaluations in Dongguan, the effectiveness and cost-efficiency of various treatment technologies are demonstrated. These studies provide technical support for addressing wastewater treatment challenges faced by small and medium-sized enterprises, promoting the coordination of environmental protection and economic development.

Keywords : scattered industrial wastewater; treatment technology; engineering application

引言

随着工业的快速发展, 零散工业废水的处理成为亟待解决的环境问题。零散工业废水来源广泛, 水质复杂, 处理难度大^[1]。传统的处理方法难以满足日益严格的环保要求。因此, 研究和应用先进的零散工业废水处理技术, 不仅有助于保护生态环境, 还能促进企业的可持续发展。本文将探讨零散工业废水的处理工艺、工程实例以及相关技术研究, 为该领域的实践提供参考和指导。

一、零散工业废水处理工艺

(一) 混凝沉淀

在零散工业废水处理中, 混凝沉淀作为预处理技术被广泛采用。该方法通过向废水中投加铝盐或铁盐等混凝剂, 促使悬浮颗粒及胶体物质聚集形成较大絮凝体, 从而加速沉降。混凝反应分为快速混合与慢速絮凝两个阶段。前者确保混凝剂均匀分散并与污染物接触, 后者使微小颗粒成长为大絮团。为提高效率, 斜管/斜板沉淀池、高效沉淀池等新型设计应运而生。通过安装的小口径协管/斜板缩短了水流路径, 降低水流扰动, 提高了固液分离效率。磁混凝技术作为一种提高混凝沉淀效果的技术, 结合传统混凝与磁粉使用。研究表明, 磁粉能与污染物紧密结合, 并借助磁场实现快速分离。合理的加药顺序 (先磁粉和 PAC, 最后 PAM)

有助于优化整个反应体系, 提升水质透明度^[2]。

(二) 生物厌氧

生物厌氧处理技术利用微生物在无氧条件下高效降解高浓度难降解有机废水, 将其转化为甲烷和二氧化碳。该过程包含四个连续阶段: 水解 (大分子→小分子)、酸化 (小分子→挥发性脂肪酸)、产乙酸 (脂肪酸→乙酸/氢气/CO₂) 和产甲烷 (乙酸/氢气→甲烷/CO₂)^[3]。其核心优势在于利用颗粒污泥 (沉降性好、活性高) 维持高生物量及反应器稳定性, 无需填料。UASB、EGSB 和 IC 为现主流反应器, 通过废水自下而上流动的生流式设计, 扰动由微生物形成的污泥床, 使废水中有机物与微生物充分接触, 从而实现降解有机物并产生沼气。该类型生物厌氧反应器再通过顶部三相分离器实现气液固高效分离。此类反应器具有处理负荷高、去除率高、能耗低的显著优点。然而, 该技术对温

度、pH等运行参数敏感，需精确控制以保障微生物活性与处理效能。在零散工业废水处理中，需根据收治废水水质水量合理配水以保证生物厌氧工艺及后续处理工艺高效稳定运行。

（三）生物接触氧化

生物接触氧化法是一种结合活性污泥法与生物膜法特点的生物处理工艺。其核心是在反应池内设置高比表面积填料，微生物附着在填料上形成生物膜，通过池底曝气维持废水扰动状态并充分充氧。废水中有机污染物的去除主要依赖生物膜内微生物的氧化分解作用。该工艺优势显著：高比表面积填料与良好充氧条件保障了高生物固体浓度与容积负荷；大量生物膜及水流完全混合使其具备优异的抗冲击能力；同时具有剩余污泥产量少、无污泥膨胀风险、运行管理简便的特点。工程实践中，该技术广泛应用于生活污水及工业废水（如印染废水）处理，通过优化填料选型与运行参数，可有效降解有机物，以实现达标排放。综上，生物接触氧化工艺在零散工业废水处理领域具有重要应用价值。

（四）过滤技术

过滤技术在废水处理中扮演着关键角色，主要用于去除水中的细小悬浮物和胶体颗粒，实现深度固液分离。该技术通过滤料（如砂、活性炭等）的截留作用去除杂质，常用的过滤设备包括砂

滤池和活性炭滤池等。近年来，新型过滤技术如活性砂过滤、动态膜、滤布滤池等，凭借其高效、低耗的特点，在废水水处理领域得到日益广泛的应用。随着环保要求的不断提高，过滤技术正朝着高效、低能耗、自动化的方向持续发展。通过研发新型滤料和优化工艺流程，可以进一步提升过滤效率，降低运行成本，以满足日益严格的水质排放标准。在零散工业废水处理中，过滤技术作为深度处理的重要环节，能够有效去除残留的悬浮物和胶体颗粒，确保出水水质达标，是实现零散工业废水高效处理的关键技术之一。

二、零散工业废水处理技术研究

（一）膜分离技术

膜分离技术是一种利用半透膜的选择性透过特性，实现混合物中不同组分分离的过程^[4]。这种技术无需化学反应，仅通过物理方式将物质分离，因此具有能耗低、操作简便、无二次污染等优点，特别适用于废水处理领域。根据膜孔径的大小，膜分离技术可以大致划分为微滤（MF）、超滤（UF）、纳滤（NF）和反渗透（RO）四种类型。

表1 膜分离技术的类型

膜类型	孔径范围	主要用途	备注
微滤（MF）	0.1–10微米	去除悬浮固体、大颗粒物质和部分微生物	适用于初步过滤
超滤（UF）	0.01–0.1微米	分离病毒、细菌、蛋白质和部分高分子有机物	适用于去除较小的颗粒和微生物
纳滤（NF）	约1纳米	选择性去除二价离子和部分单价离子，如钙、镁和硫酸根等	介于超滤和反渗透之间，适用于部分脱盐
反渗透（RO）	小于1纳米	去除全部的溶解性离子和大部分有机物	广泛应用于海水淡化和工业废水脱盐

膜分离技术不仅提高了废水处理效率，还实现了资源的回收利用。例如，在染料废水处理中，纳滤和反渗透技术可以高效去除废水中的有机溶剂和残留的活性药物成分，达到严格的排放标准^[5]。较之于传统的过滤技术而言，膜分离技术可在分子范围内分离，这是一种物理过程，无需发生相的变化或者添加助剂。膜分离技术虽然具有高效、节能等优势，但其劣势在于膜材料成本较高，运行过程中容易发生污染和堵塞，需定期清洗和更换，增加了维护成本。

（二）膜生物反应器（MBR）

膜生物反应器（MBR）是一种将膜分离技术与生物技术有机结合的新型废水处理技术。它通过膜分离设备截留生化反应池中的活性污泥和大分子有机物，无需设置二沉池^[6]。MBR技术利用膜分离技术显著增强了生物反应器的处理效率和稳定性，使活性污泥浓度得到显著提升，其水力停留时间（HRT）和污泥停留时间（SRT）可以分别进行精准控制^[7]。

MBR技术的主要优点包括：(1)高效的固液分离，出水水质良好、稳定，可以直接回用。(2)剩余污泥产量少，降低了污泥处理费用。(3)占地面积小，模块化设计，便于扩建。(4)操作管理方便，易于实现自动化控制。

MBR技术在城市污水和工业废水处理与回用等方面已得到了广泛应用。例如，在制药废水处理中，MBR技术能够有效去除废水中的抗生素和有机物，出水水质达到回用标准。在电子工业废水处理中，MBR技术能够去除废水中的重金属和有机物，保护环境和水资源^[8]。

尽管MBR技术具有许多优点，但其高昂的建设和运行成本

仍然是推广应用的主要障碍。因此，研究者们正在努力开发更经济、更高效的MBR工艺，如通过优化膜材料和膜清洗技术来降低膜污染和能耗，通过改进生物反应器的设计来提高处理效率和降低运行成本^[9]。

（三）膜化学反应器（MCR）

膜化学反应器（MCR）是一种将膜分离技术和化学反应相结合的新型水处理技术。它利用反应器内高化学浓度特性，强化胶体、悬浮物、溶解性盐类物质等架桥及共反应，并利用膜分离实现超细悬浮物、总金属离子等高效去除，从而实现水质净化，无需设置沉淀池。MCR技术可替代传统的混凝沉淀和超滤组合工艺，节省占地，实现系统提标改造，与膜分离、蒸发结晶等技术配合可实现浓盐水减量和零排放^[10]。

MCR技术的主要优点包括：（1）产水水质好，浊度低，甚至可达到零排放预处理；（2）系统能耗低，无需大流量回流和反冲洗；（3）系统集成度高，可替传统的混凝沉淀和超滤组合工艺，简化废水处理流程；（4）操作维护便利，集成自控系统，控制曝气和冲洗周期。

MCR技术在城市污水和工业废水处理与回用均得到广泛的应用。例如，在电子制造业（线路板酸洗废水处理），通过MCR膜工艺可高效分离并回收金属，提高资源利用率，同时降低废水排放成本。在化工及制药行业，MCR技术可用于化工废水的预处理或深度处理，特别是含有高COD、有机污染物的废水处理，结合生化工艺可达到更高的去除率。

尽管MCR技术具有许多优点，但其膜污染问题、投资成本高、膜寿命有限等因素是其推广应用的主要障碍。因此，未来需

要进一步优化膜材料和工艺设计，降低投资和运行成本，同时加强膜的清洗和维护技术，延长膜的使用寿命。

（四）高级氧化技术

高级氧化技术是一种利用强氧化剂或光、电、声等能量激活的氧化剂产生羟基自由基（·OH）等具有强氧化能力的自由基，从而实现高效分解废水中有机污染物的技术。这种技术适用于多种有机物的处理，包括生物可降解物和生物难降解的有机物。高级氧化技术具有处理范围广、高效性的优点，能够快速分解废水中的有害物质，从而在短时间内达到处理废水的效果。

表2 高级氧化技术的主要类型

类型	作用
化学氧化	利用高活性化合物化合物产生具有强氧化能力的自由基，分解有机物。
光催化氧化	利用光催化剂（如 TiO ₂ ）在紫外光照射下产生具有强氧化能力的自由基，分解有机物。
电化学氧化	通过电解产生具有强氧化能力的自由基，分解有机物。
声化学氧化	利用超声波产生空化效应，产生具有强氧化能力的自由基，分解有机物。
组合氧化	利用光催化氧化、电化学氧化、声化学氧化、化学氧化等高级氧化技术相互组合，产生具有强氧化能力的自由基，分解有机物。

高级氧化技术在处理高浓度难降解有机物，提高废水可生化性，废水深度处理等方面具有显著优势。例如，在染料废水处理中，高级氧化技术能够有效分解难生物降解的染料分子，去除色度和毒性。在农药废水处理中，高级氧化技术能够分解农药分子，降低其生物毒性。

尽管高级氧化技术具有高效性，但其运行成本较高，且对废水的预处理要求较高。因此，研究者们正在探索更经济、更实用的高级氧化工艺，如通过优化反应条件和催化剂来降低能耗和运行成本，通过与其他处理技术（如生物处理）的组合来提高处理效率和降低成本。

三、零散工业废水处理技术的应用

（一）工程案例

在广东零散工业废水处理中，多地先进工艺成效显著。东莞

中溥环保科技有限公司采用预处理、一级高级氧化、混凝沉淀、厌氧-缺氧-好氧、MBR、二级高级氧化及生物滤池等工序，处理能力800m³/d，出水稳定达DB44/26第二时段三级标准，运行两年抗冲击负荷强（COD<30mg/L，镍<0.1mg/L），年节水超10万吨[11]。另外，广州市首家第三方服务企业元泰环境科技的处置中心，以气浮/铁碳微电解预处理结合混凝沉淀、UASB、二级AO及除磷沉淀工艺，处理能力1000m³/d，出水TN稳定达GB/T31962-2015B级标准，其余指标均符合DB44/26第二时段三级标准^[11]。

（二）经济效益评估（以东莞市为例）

东莞市首创“零散工业废水”集中处理模式，针对性解决中小微企业日均排放量不足3吨非危险废水的处理难题，成效显著。截至2022年，全市累计转运处理废水约33.36万吨，日均处理914吨；通过社会投资建成5家处理单位，总处理能力达2550吨/日，全面满足集中处理需求。相较于企业分散处置的高成本与低效问题，集中模式大幅降低企业经营成本——按单厂20万元治污设施建设费估算，全市1.2万余家涉废企业共节省建设成本24亿元^[12]。

该模式兼具多重效益：集中处理简化管理操作，杜绝超标排放，减轻水环境压力；项目建设运营创造就业岗位，助力地方经济发展；运营中严格落实环保政策，有效削减污染物排放。同时，通过废水回用提升资源效率，进一步降低企业用水成本，实现了“企业降本、环保达标、社会增效”的共赢。其在经济效益、环境效益与社会效益上的突出表现，为全国同类地区提供了可复制的实践经验。

四、结束语

零散工业废水处理技术的研究与应用对环境保护和社会经济发展具有重要意义。通过多种先进工艺的有机结合，不仅提升了废水处理效率，还可实现了资源回收和循环利用。在实际应用中，科学的工程设计和高效的管理模式进一步优化了技术效果，降低了运行成本。未来需持续推动技术创新与管理优化，为实现可持续发展目标提供技术支撑和实践经验。

参考文献

[1]倪凌峰,王沛芳,王亚宜.电化学氧化技术在 MBR 中的膜污染控制研究与应用进展[J].哈尔滨工业大学学报,2024,56(10):127-135.
[2]杜子谦.一种零散工业废水处理工艺[J].广州化工,2020,48(2):3.
[3]吴琼,王雄,李国洪,等.大治市城西北工业污水处理厂工程设计实践[J].给水排水,2020,46(2):63-67,73.
[4]高云霄.膜处理工艺在高盐工业废水零排放中的应用[J].区域治理,2019(44):4.
[5]王梦莹,焦忠红,段潍超,等.膜分离技术在工业废水零排放工艺中的应用研究[J].山东化工,2024,53(4):261-264.
[6]张健.MBR膜技术用于污水处理的研究分析[J].皮革制作与环保科技,2024,5(11):16-18.
[7]李淑辉.MBR膜生物反应器在污水处理中的发展及应用[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术:00184-00184.
[8]王殿帆.探析 MBR 技术在工业污水处理中的应用[J].区域治理,2020,(43):0161-0161
[9]崔尚发.MBR技术在工业废水处理应用中的研究进展[J].探索科学,2019,(11):219.
[10]李文刚,孙耀胜,么强,等.新型有机污染物污染现状及深度处理工艺研究进展[J].环境工程,2021,39(8):77-87.
[11]杨洋.零散工业废水处理模式的改进研究[J].广东化工,2023,50(21):126-127.
[12]徐志清,赵焰,陆梦楠,等.基于膜法的火电厂废水零排放技术研究及应用[J].中国电机工程学报,2019,39(S1):148-154.

生态环境工程领域生活垃圾填埋场与转运站建设运营管理的实践探索

麦守廉

广东 中山 528467

DOI:10.61369/EAE.2025060017

摘 要： 本文围绕生活垃圾填埋场与转运站展开，涵盖选址、工艺设计、运营管理等多方面。选址需综合考量地质、水文及社会经济因素；填埋工艺研究分层填埋与防渗结构；运营管理涉及作业管理、渗滤液处理等。转运站则探讨功能布局、设备配置等。此外，还提及固废设施智慧运维及低碳运营等，展望了人工智能与循环经济融合的发展方向。

关 键 词： 生活垃圾填埋场；生活垃圾转运站；智慧运维

Practical Exploration of Construction, Operation and Management of Domestic Waste Landfills and Transfer Stations in the Field of Ecological Environment Engineering

Mai Shoulian

Zhongshan, Guangdong 528467

Abstract： This article focuses on landfill sites and transfer stations for household waste, covering multiple aspects such as site selection, process design, and operation management. Site selection should comprehensively consider geological, hydrological, and socio-economic factors; Research on layered landfill and anti-seepage structure in landfill technology; Operations management involves job management, leachate treatment, etc. The transfer station explores functional layout, equipment configuration, etc. In addition, intelligent operation and low-carbon operation of solid waste facilities were also mentioned, and the development direction of the integration of artificial intelligence and circular economy was discussed.

Keywords： landfill site for household waste; household waste transfer station; smart operation and maintenance

引言

《“十四五”城镇生活垃圾分类和处理设施发展规划》（2021年颁布）为生活垃圾处理指明方向。生活垃圾填埋场与转运站的建设运营管理意义重大，选址需综合地质、水文及社会经济因素，设计要注重填埋工艺与防渗结构，运营管理涵盖作业流程、渗滤液处理等多方面。转运站在功能布局、设备配置、除臭降噪等领域不断探索创新。同时，数字孪生、北斗定位等技术助力运维智慧化提升，碳足迹核算、光伏封场等推动低碳发展。未来，人工智能与循环经济的融合将为固废管理带来新突破。

一、生活垃圾填埋场建设关键技术

（一）填埋场选址与场地勘察

生活垃圾填埋场选址需综合考虑地质条件、水文环境及社会经济因素。地质条件方面，要避开地震活动带、断层等不良地质区域，选择地质稳定、承载能力良好之处，以防填埋体变形或塌陷。水文环境上，应远离水源地、含水层等，且地下水位不宜过高，减少渗滤液对地下水污染风险。社会经济因素也不容忽视，需考量与城市距离、交通便利性，既方便垃圾运输，又要避免对

周边居民生活产生过大影响。场地勘察时，要遵循岩土工程勘察技术标准，全面了解场地岩土特性，运用科学风险评估方法，识别潜在风险，如滑坡、渗漏风险等，为填埋场后续设计与建设提供可靠依据^[1]。

（二）填埋工艺系统设计与防渗结构

生活垃圾填埋场的填埋工艺系统设计，要着重研究分层填埋作业规范。分层填埋能使垃圾分布更合理，有效利用填埋空间，同时减少垃圾沉降带来的影响。规范需明确每层填埋的厚度、压实度等具体参数，确保填埋作业科学有序进行。防渗结构方面，

HDPE 膜与 GCL 复合材料防渗体系是常用选择。HDPE 膜具有良好的化学稳定性、耐候性和防渗性能。GCL 复合材料则有施工简便、遇水膨胀密封等特点。对比二者经济性与生态效益^[2]，HDPE 膜成本相对较高但使用寿命长，GCL 复合材料成本较低但对施工环境要求稍高。需综合考虑项目所在地的地质条件、环境要求及预算等因素，选择合适的防渗体系，以实现生态与经济的平衡。

二、生活垃圾填埋场运营管理体系

（一）填埋作业全过程管理

在生活垃圾填埋场运营管理中，填埋作业全过程管理至关重要。建立垃圾进场计量的标准化流程，精准把控垃圾入场数量，为后续处置规划提供数据支撑。实施分区压实，依据填埋场布局合理划分区域，通过专业压实设备提高垃圾压实度，减少垃圾体积，延长填埋场使用寿命。覆土作业也遵循标准化要求，及时覆盖垃圾，防止异味扩散、蚊蝇滋生等环境问题。同时，积极探索无人机监测作业面的创新应用，利用无人机灵活、高效的特点，实时监测填埋作业面情况，及时发现如垃圾暴露、覆土不均等问题，为填埋作业的优化调整提供依据，从而提升填埋作业全过程管理水平，实现生态环境友好的填埋作业^[3]。

（二）渗滤液处理与甲烷回收

在生活垃圾填埋场运营管理体系中，渗滤液处理与甲烷回收至关重要。采用膜生物反应器与蒸发结晶组合工艺处理渗滤液，膜生物反应器可有效去除大部分有机物与氨氮，确保水质达标。蒸发结晶进一步浓缩处理，实现水资源的循环利用，降低对环境的污染^[4]。甲烷回收方面，研究沼气收集发电系统运营能效比优化方案，通过合理设计收集系统，提高甲烷收集效率，降低泄漏率。优化发电设备运行参数，提升发电效率，将回收的甲烷转化为电能，实现资源的再利用，同时减少甲烷直接排放对大气环境造成的温室效应，助力生活垃圾填埋场的绿色、可持续运营。

三、生活垃圾转运站工程实践

（一）转运站规划设计与设备选型

1. 站区功能布局优化

在生活垃圾转运站工程实践中，站区功能布局优化至关重要。建立压缩设备、车辆动线与环保设施的协同规划模型是关键举措。通过此模型，能够全面且系统地考量各功能要素间的相互关系与影响。在不同处理规模下，深入分析用地效率指标，可使土地资源得到更为合理的配置。比如，针对小型转运站，可依据其处理规模，精准规划压缩设备的摆放位置，同时结合车辆进出站的流线，合理设置车辆动线，避免拥堵，提升转运效率。环保设施布局则需充分考虑风向、地势等因素，确保对周边环境影响最小化。这种优化方法依据协同规划模型与用地效率指标分析，让站区功能布局科学合理，实现高效运营^[5]。

2. 智能压缩设备配置

在生活垃圾转运站智能压缩设备配置方面，垂直预压式与水

平打包式设备各具特点，需对比其运行参数。垂直预压式设备在压缩比上表现出色，通常可将垃圾压缩至较小体积，但其对垃圾的适应性可能相对较弱。水平打包式设备则在处理不同类型垃圾时更为灵活，可高效处理混合垃圾。从能耗角度看，两者也存在差异，垂直预压式在单次压缩过程中能耗可能较高，但因压缩比高，整体转运量相同情况下，总能耗或有不同表现。5G 物联网在设备状态监测中的实践意义重大^[6]，通过在设备关键部位安装传感器，借助 5G 网络的高速与低延迟特性，能实时将设备运行参数传输至管理平台，如设备压力、运行时长等，便于管理人员及时掌握设备状态，提前预警故障，保障转运站高效稳定运行。

（二）转运站环保设施建设

1. 臭气控制技术体系

在生活垃圾转运站臭气控制技术体系构建中，生物滤池与离子除臭联用系统成为关键举措。生物滤池利用微生物分解臭气中的污染物，具有处理效率高、运行成本低等优势，能有效去除大部分可生物降解的恶臭物质。离子除臭则通过产生高能离子，与臭气分子发生反应，进一步分解恶臭成分，对生物滤池难以处理的成分进行补充净化。两者联用，取长补短，可显著提升除臭效果。同时，应用嗅觉指纹图谱评价除臭效果，该技术能从嗅觉感官层面，综合反映臭气成分和强度的变化，以更贴合人体实际感受的方式对除臭效果进行量化评估^[7]，助力转运站精准调控除臭工艺，保障周边环境空气质量。

2. 噪声污染防治措施

在生活垃圾转运站噪声污染防治方面，着重研究隔声屏障结构与设备减振基座的组合降噪方案。通过采用具有高效吸声、隔声性能的材料构建隔声屏障，合理规划其高度、长度及安装位置，有效阻挡和吸收设备运行产生的噪声向外传播。同时，为各类转运设备安装减振基座，利用橡胶、弹簧等减振材料，降低设备振动传递至地面引发的结构噪声。为精准评估降噪效果，建立声环境三维模拟评估模型。该模型基于实际场地参数、设备噪声源强等数据，模拟不同工况下转运站周边声环境分布情况，以便及时调整优化降噪方案，确保降噪措施科学有效，最大程度降低对周边环境及居民的噪声影响^[8]。

四、固废设施运维智慧化提升

（一）数字孪生技术应用

1. BIM 全生命周期管理

在固废设施运维智慧化提升的数字孪生技术应用中，BIM 全生命周期管理发挥着关键作用。在填埋场扩容工程里，借助 BIM 技术可实现动态模拟。通过构建精准的三维模型，将填埋场的地理信息、设施布局等数据集成其中，模拟填埋过程、场地变化等，提前预测可能出现的情况，为工程规划与决策提供有力支撑。同时，利用 BIM 的冲突检测功能，能对扩容工程中的不同设施、结构进行碰撞检查，及时发现设计与施工中的潜在冲突点，如管道与建筑物的位置冲突等。这一功能可在施工前对设计进行优化调整，避免施工阶段的变更与返工，有效提高工程质量与效

率,实现填埋场扩容工程全生命周期的精细化管理^[9]。

2.北斗定位智能调度

在固废设施运维智慧化提升的北斗定位智能调度环节,开发基于北斗系统的运输车辆路径优化算法意义重大。借助北斗系统高精度定位功能,能够实时精准掌握运输车辆位置^[10]。通过该算法,可依据交通路况、运输距离、垃圾产生量等多因素,对车辆行驶路径进行动态规划与优化,避免拥堵,提高运输效率。同时,构建实时监控大数据平台,与北斗定位系统深度融合。该平台收集车辆运行状态、垃圾装载量、运输时间等数据,进行分析处理,实现对整个固废运输过程的全方位监控与智能调度,及时发现并解决运输中出现的问题,确保固废运输高效、有序进行,助力生活垃圾填埋场与转运站的智能化运营管理。

(二) 低碳运营模式创新

1.碳足迹核算体系

建立适用于生活垃圾填埋场与转运站的碳足迹核算体系,对于实现低碳运营意义重大。通过建立覆盖建设期建材运输、运营期能耗的全过程LCA(生命周期评价)模型,能够全面评估固废设施在整个生命周期内的碳排放情况。建设期建材运输涉及不同运输方式与距离,其碳排放存在差异,明确这些参数并纳入模型,可精准计算该阶段碳排放量。运营期能耗涵盖设备运行、照明等多方面,细致分析各能耗环节,确定关键减排节点,如优化填埋气收集利用系统,减少温室气体逸散,或改进转运站设备能源效率,降低电力消耗。借助该核算体系与LCA模型,为固废设施低碳运营提供量化依据与改进方向。

2.光伏封场一体化

在生态环境工程领域,针对生活垃圾填埋场退役后的处理,光伏封场一体化是一种创新的低碳运营模式。研究退役填埋场光伏覆盖技术,能够实现资源的二次利用。一方面,光伏板的铺设可以充分利用填埋场的闲置空间,将太阳能转化为电能,带来发电收益,增加填埋场运营的额外经济收入。另一方面,光伏封场有助于生态修复,光伏板能一定程度上减少雨水对填埋场的冲刷,降低渗滤液产生量。同时,这种模式还能减少场地扬尘,改善周边生态环境。通过发电收益与生态修复协同效益的分析,可更好地评估该模式在固废设施运维智慧化提升方面的价值,为生活垃圾填埋场的可持续发展提供新路径。

(三) 安全风险防控机制

1.边坡稳定性预警

构建基于InSAR技术的形变监测系统,对生活垃圾填埋场

边坡进行高精度、大面积的形变监测。该技术利用合成孔径雷达干涉测量原理,通过分析雷达回波信号获取地表微小形变信息,能实时掌握边坡表面位移变化情况。基于监测数据,深入分析边坡形变特征与趋势,为滑坡风险评估提供有力数据支撑。同时,开发滑坡风险分级响应预案。根据边坡形变程度、地质条件等因素,将滑坡风险划分为不同等级,针对每个等级制定详细的应对措施。风险较低时,加强监测频率;风险较高时,及时采取工程加固、人员疏散等措施,从而实现对生活垃圾填埋场边坡稳定性的有效预警,保障固废设施安全稳定运行。

2.职业健康管理体系

在固废设施运维智慧化提升的安全风险防控机制中,职业健康管理体系至关重要。一方面,完善防尘降噪个体防护标准,依据填埋场与转运站的实际作业环境及污染物特点,精准制定适用于不同岗位作业人员的防护装备要求,确保防尘口罩、降噪耳塞等防护用品能有效抵御粉尘、噪音危害。另一方面,建立作业人员健康档案大数据分析平台,全面收集作业人员的健康体检数据、职业暴露史等信息,运用大数据分析技术,及时洞察潜在的健康风险趋势,如长期接触垃圾污染物可能引发的呼吸道疾病、皮肤病等。通过这两方面措施,为作业人员构筑起坚实的职业健康保障防线,推动固废设施运维工作的持续开展。

五、总结

在生态环境工程领域,生活垃圾填埋场与转运站的建设运营管理经过实践探索,取得诸多创新成果。选址设计上,充分考虑环境因素与周边规划,实现科学布局;工艺优化通过采用先进技术,提升处理效率与环保水平;智慧运维借助信息化手段,提高管理效能。基于全生命周期成本提出设施升级路径,旨在从规划到退役各阶段,综合考量成本与效益,推动可持续发展。展望未来,人工智能与循环经济理念在固废管理领域的融合是必然趋势。人工智能将实现更精准的监测与决策,循环经济则促进资源的最大化利用,二者结合为生活垃圾填埋场与转运站的建设运营管理开辟新方向,助力生态环境工程领域迈向更高水平。

参考文献

- [1] 康霄.生活垃圾填埋场生态修复与景观设计研究——以济南济北填埋场为例[D].山东建筑大学,2022.
- [2] 吕文娟.基于生态修复的生活垃圾填埋场景观再生设计研究[D].西安建筑科技大学,2022.
- [3] 陈佳卉.生活垃圾转运站选址对城市住区恶臭扩散的影响[D].浙江大学,2022.
- [4] 安晓雯.低碳视角下的生活垃圾转运站选址及路径优化[D].华北电力大学(北京),2022.
- [5] 呼延震.城市生活垃圾填埋场液气运移规律及调控措施研究[D].大连海事大学,2021.
- [6] 刘洁.城市生活垃圾收运系统优化模型研究[D].四川:西南交通大学,2011.
- [7] 丁伟杰.生活垃圾转运站除臭技术及典型工艺研究[J].皮革制作与环保科技,2022,3(10):92-94.
- [8] 陈伟洲.生活垃圾填埋场治理技术方案探究[J].低碳世界,2022,12(12):31-33.
- [9] 刘玉文.利用生活垃圾填埋场上建设飞灰固化物填埋场适宜性探讨[J].再生资源与循环经济,2021,14(1):20-24.
- [10] 张士兵.生活垃圾填埋场恶臭高发期应急监测和精准溯源的探索[J].当代化工研究,2022(12):59-61.

基于环境工程视角的城市排水运维与水环境治理协同模式

余昀

广州市城市排水有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/EAE.2025060018

摘 要 : 城市排水运维与水环境治理需协同。当前排水管网运维管理存短板致治理工程失效。应构建管网健康度评价与治理设施运行耦合模型, 融合多源监测数据, 构建数字孪生系统, 升级智能化运维, 建立动态运维决策系统, 协同设计海绵设施, 集成生态化治理技术, 制定闭环管理规范, 建立多部门协调机制, 突破传感技术, 推进数字化改造。

关 键 词 : 协同模式; 排水运维; 水环境治理

Collaborative Model of Urban Drainage Operation And Maintenance and Water Environment Governance Based on Environmental Engineering Perspective

Yu Yun

Guangzhou Urban Drainage Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : The operation and maintenance of urban drainage and water environment governance need to be coordinated. The current shortcomings in the operation and maintenance management of drainage pipelines have led to the failure of treatment projects. A coupling model for evaluating the health of pipeline networks and managing facility operation should be established, integrating multi-source monitoring data, building a digital twin system, upgrading intelligent operation and maintenance, establishing a dynamic operation and maintenance decision-making system, collaborating on sponge facility design, integrating ecological governance technology, developing closed-loop management standards, establishing a multi departmental coordination mechanism, breaking through sensing technology, and promoting digital transformation.

Keywords : collaborative mode; drainage operation and maintenance; water environment management

引言

2021年, 国家颁布《关于推进污水资源化利用的指导意见》, 强调了城市排水与水环境治理的重要性。城市排水系统承担着水量调控、污染阻隔及生态安全维护等关键环境工程职能, 与水环境治理紧密关联。然而, 当前排水管网运维管理存在检测技术滞后、应急响应不足和数据孤岛等问题, 导致两者脱节, 水环境治理效果不佳。在此背景下, 构建协同模式势在必行。通过构建管网健康度评价等模型、融合多源监测数据、打造数字孪生系统等一系列关键突破点, 能有效提升协同效率, 契合政策导向, 助力城市生态环境的可持续发展。

一、城市排水与水环境治理协同机理

(一) 城市排水系统功能解析

城市排水系统在水量调控、污染阻隔、生态安全等方面发挥着关键环境工程职能。在水量调控上, 它能够收集和输送城市降雨形成的地表径流, 避免局部地区出现内涝积水, 通过合理规划排水管网管径、坡度及泵站提升能力等, 有效调节水量^[1]。在污染阻隔方面, 排水系统可拦截、输送污水, 防止其随意排放污染地表水体, 部分排水设施还具备一定的初步净化功能, 如雨水口

设置的截污挂篮, 可截留垃圾与部分污染物。从生态安全维度看, 完善的排水系统有助于维持城市水系生态平衡, 保障水生动植物的栖息环境, 促进城市水生态系统的健康稳定, 为城市生态安全提供有力支撑, 从而与水环境治理形成紧密协同关系, 共同助力城市生态环境的良性发展。

(二) 水环境治理的工程需求

水环境治理有着水质提升、生态修复、雨洪管控等多元目标, 这些目标的实现对排水体系存在显著技术依赖。在水质提升方面, 需排水系统具备高效的污水收集与处理能力, 确保污水得

到有效收集并达标处理，防止污水直排造成水体污染^[2]。生态修复要求排水体系能改善水生态环境，例如通过合理设计排水设施，为水生动植物提供适宜的栖息环境。雨洪管控则依赖排水系统的科学规划与建设，使其能够在暴雨时及时排水，避免内涝发生，同时实现雨水的资源化利用，补充城市水资源。总之，水环境治理的工程需求促使城市排水体系不断优化升级，以满足日益严格的环境要求。

二、排水运维现状与治理脱节问题

（一）管网运维管理短板分析

当前城市排水管网运维管理存在诸多短板。检测技术滞后是其中关键问题，传统检测手段难以精准且高效地定位管网内部的细微破损、堵塞等隐患，使得一些潜在问题无法及时发现与解决，导致排水不畅甚至污水外溢等情况，影响水环境质量^[3]。应急响应不足同样突出，面对暴雨等极端天气或突发管网故障，缺乏完善且快速的应急响应机制，无法迅速采取有效的应对措施，致使大量雨水或污水积压，对周边水环境造成严重冲击。此外，数据孤岛现象严重，排水运维相关部门、企业间数据流通不畅，信息难以共享，各环节工作无法有效协同，既降低了运维效率，又使水环境治理难以形成合力，造成排水运维与水环境治理的脱节。

（二）水环境治理工程失效诱因

在城市排水运维与水环境治理中，水环境治理工程失效的诱因凸显了排水运维现状与治理的脱节。截污纳管方面，因缺乏对排水系统实际运行参数，如流量、水质等的持续监测与精准把控，导致截污设施未能按需调整，污水溢出问题频现，使得截污纳管工程失效^[4]。初雨污染治理上，现有排水运维模式往往忽视初雨阶段污染物的快速积累，未能及时启动针对性处理机制。治理工程设计时，未充分结合排水管网的运维实际情况，两者缺乏有效协同，致使水环境治理工程在应对初雨污染时力不从心。这种排水运维与治理工程的脱节，使得水环境治理难以达到预期效果，城市水环境污染问题依然严峻，亟待建立协同模式来扭转这一局面。

三、环境工程协同机制构建

（一）技术协同框架设计

1. 管网健康度评价模型

构建管网健康度评价模型，应基于多维评估体系展开。腐蚀指数反映管网材料因受化学、生物等作用而产生的损坏程度，它与管网的使用寿命紧密相关，严重的腐蚀会导致管网破裂、渗漏，影响排水功能^[5]。淤积率体现管网内部泥沙、杂物等堆积状况，过高的淤积率会减小管道过水断面，降低排水效率，增加内涝风险。结构缺陷值表征管网的物理结构完整性，如裂缝、变形等缺陷，这些缺陷不仅影响管网自身稳定性，还可能引发周边土壤流失等环境问题。将这三个参数纳入模型，通过科学的算法和权重分配，综合评估管网健康度，为城市排水运维与水环境治理提供准确依据，实现两者基于管网健康状况的有效协同。

2. 治理设施运行耦合模型

治理设施运行耦合模型将污水处理厂、调蓄池和人工湿地视为一个有机整体，构建能反映它们相互作用关系的数学模型。通

过对污水处理厂进出水水质、水量变化，调蓄池的存储与释放规律，以及人工湿地的净化能力等关键参数进行分析，整合出一套动态耦合机制^[6]。该模型可精准模拟不同工况下各设施的运行状态，为协同运行提供量化依据。例如，在暴雨期间，模型能依据实时降雨数据、污水厂处理能力和调蓄池容量，合理分配水流，确保污水厂稳定运行，同时使调蓄池和人工湿地充分发挥削峰、净化等作用，提升整体的排水运维与水环境治理协同效率，有效应对城市水环境复杂多变的状况。

（二）数据融合平台架构

1. 多源监测数据融合

在基于环境工程视角的城市排水运维与水环境治理协同模式下，多源监测数据融合至关重要。要实现水质传感器、流量计、视频监控的时空数据对齐。水质传感器获取的是水体中各类物质成分及含量数据，能反映水质状况；流量计监测水流的流量数据，了解排水系统的运行负荷；视频监控则直观呈现排水区域的实际场景。由于这些数据来源不同，其时间戳、空间坐标体系存在差异，所以需进行时空数据对齐处理。通过运用特定的算法与技术，将不同数据源的数据在时间和空间维度上统一起来，以确保数据的一致性与准确性，从而为后续深入的数据分析与决策提供坚实基础^[7]。如此，才能更有效地挖掘数据背后的价值，助力城市排水运维与水环境治理的协同开展。

2. 数字孪生系统构建

在基于环境工程视角的城市排水运维与水环境治理协同模式中，数字孪生系统构建至关重要。通过建立包含管网 BIM 模型与水动力模型的虚拟仿真环境^[8]，可实现对城市排水系统及水环境的精确模拟。管网 BIM 模型能详细呈现排水管网的空间布局、结构特征等，为系统提供直观的物理架构信息。水动力模型则可模拟水流在管网中的运动规律，以及与周边水环境的相互作用。二者融合构建的数字孪生系统，能实时反映城市排水与水环境的动态变化，为运维人员提供全面、准确的信息，辅助其做出科学决策，实现城市排水运维与水环境治理的高效协同，助力环境工程目标的达成。

四、协同模式实施路径

（一）智能化运维升级

1. 缺陷智能诊断技术

在基于环境工程视角的城市排水运维与水环境治理协同模式中，智能化运维升级的缺陷智能诊断技术极为关键。借助管道机器人的视觉识别，可清晰捕捉排水管道内部诸如裂缝、破损、堵塞等状况。同时，声呐探测能获取管道周边水体分布与流动等信息，为诊断提供更全面数据支撑。将这些采集到的数据运用先进的数据分析算法进行深度挖掘，准确判断缺陷类型、程度与发展趋势，进而依据诊断结果制定针对性的维护治理策略。通过这种方式，实现对排水系统缺陷的智能、精准诊断，提升运维效率与质量，避免因缺陷发现不及时而引发水环境问题，有力推动城市排水运维与水环境治理的协同发展^[9]。

2. 动态运维决策系统

动态运维决策系统是实现城市排水运维与水环境治理协同模式的关键环节。该系统借助先进的传感器技术，实时收集城市排

水系统中的流量、水质等数据，以及水环境相关指标，如水体富营养化程度、溶解氧含量等^[10]。将这些海量数据输入基于机器学习的分级预警与资源调度模型中，模型通过深度分析数据，挖掘排水与水环境之间的潜在联系和变化规律。依据分析结果，系统能对可能出现的排水故障、水环境恶化等问题进行分级预警，提前发出警报。同时，结合资源调度模型，根据预警级别以及实际运维需求，合理调配人力、物力资源，确保在排水系统出现问题时能及时响应处理，高效保障城市排水顺畅，维护良好的水环境质量，实现排水运维与水环境治理的高效协同。

（二）生态化治理技术集成

1. 海绵设施协同设计

在海绵设施协同设计中，应充分考量城市排水运维与水环境治理的双重需求。从场地规划阶段，就要将雨水花园、绿色屋顶、下沉式绿地等海绵设施与城市排水管网进行统筹布局，确保其空间上的合理分布与有效衔接。对于雨水花园，优化其植物配置与土壤结构，提升对雨水的净化与渗透能力，同时设计合适的溢流口与排水管网相连，在雨量过大时及时排水。绿色屋顶则注重排水坡度与防水处理，让收集的雨水能有序汇入排水系统，减少对建筑屋面的压力。下沉式绿地合理控制下沉深度与规模，增强其蓄水能力，并与周边排水设施协同，实现雨水的高效收集、净化与排放，通过这些海绵设施的协同设计，切实提升城市排水运维效率与水环境治理水平。

2. 原位修复技术优选

在城市排水运维与水环境治理协同模式中，生态化治理技术集成的原位修复技术优选至关重要。需针对不同污染程度及类型的水体，选择合适的原位修复技术。对于轻度污染水体，可优先考虑生物强化修复技术，通过向水体中添加特定微生物，增强其对污染物的分解能力，促进水质净化。而对于污染较重的水体，原位化学氧化还原技术更为适宜，利用强氧化剂或还原剂，快速降解水体中的有机污染物及重金属。同时，要结合城市排水系统的特点，考虑技术实施的可行性与经济性，确保所选原位修复技术既能有效治理水环境，又能与排水运维相适配，以最小的成本实现最佳的协同治理效果，最终达成基于水质目标的微生物 - 植物 - 材料复合修复方案的构建。

（三）管理制度创新

1. 全生命周期管理标准

在基于环境工程视角的城市排水运维与水环境治理协同模式

中，制定从规划设计到报废更新的闭环管理规范至关重要。规划设计阶段，要充分考虑城市水文地质、人口分布、未来发展趋势等因素，确保排水系统既能满足当下需求，又具备前瞻性。建设施工时，严格把控材料质量与施工工艺，保障排水设施的坚固耐用。运维阶段，建立定期巡检机制，及时发现并处理管道堵塞、设备老化等问题，同时利用智能监测技术，实时掌握排水系统运行状态。到了报废更新环节，科学评估设施状况，合理规划新建设施，实现资源的高效利用与可持续发展，通过这一闭环管理规范，全面提升城市排水运维与水环境治理的协同效果。

2. 多部门协调机制设计

建立水务、环保、城建等多部门协调机制，旨在打破部门壁垒，提升城市排水运维与水环境治理协同效率。在联合决策方面，搭建常态化沟通平台，共享数据与信息，针对重大排水与水环境项目共同研讨方案，确保从规划到实施各环节充分考虑不同部门专业视角。例如在城市新区域排水系统规划时，水务部门提供排水流量等专业数据，环保部门基于水环境保护要求提出限制条件，城建部门结合城市建设规划给出布局建议，共同制定科学方案。在考核体系上，构建统一且兼顾各部门职责的指标，如综合考量污水处理达标率、河道水质改善情况、排水设施完好率等，将协同治理成效与各部门绩效挂钩，激励各部门积极合作，形成高效的城市排水运维与水环境治理协同模式。

五、总结

在环境工程视角下，城市排水运维与水环境治理协同模式至关重要。通过对相关关键突破点的凝练可知，传感技术的突破成为推动协同模式发展的重要一环。精准、高效的传感技术能实时且准确地监测排水与水环境各项指标，为后续治理决策提供有力依据。同时，治理全流程的数字化改造也刻不容缓。利用数字化手段可整合排水运维与水环境治理各个环节的数据，实现智能分析与科学调度。未来，应围绕这两个方向深入研究，进一步优化协同模式，提升城市排水运维水平，改善水环境质量，实现城市生态环境的可持续发展，为环境工程领域的实践提供更具前瞻性与可行性的指导。

参考文献

- [1]徐丽婷. 基于社会 - 生态系统视角的太湖水环境治理研究 [D]. 中国科学院大学, 2021.
- [2]左丽. 智慧治水背景下水环境治理“双效”协同模式研究——以浙江省为例 [D]. 杭州电子科技大学, 2021.
- [3]李佳音. 水环境治理多元主体协同行为的形成机理研究 [D]. 华北水利水电大学, 2023.
- [4]李刚. 生活者视角下省级跨界水环境协同治理研究——以毛乌素沙地红碱淖为例 [D]. 内蒙古大学, 2023.
- [5]刘彦. 水环境治理视角下中南半岛古代城镇营建与发展特征研究 [D]. 东南大学, 2021.
- [6]吴梦晗. 水环境协同治理思考 [J]. 合作经济与科技, 2021(19): 182-183.
- [7]刘虹. 河长制水环境治理创新制度的成效与反思——从协同治理视角看 [J]. 皮革制作与环保科技, 2022, 3(9): 157-159.
- [8]鲁先锋. 地方政府水环境治理的协同机制及实现条件——基于 SX 县水环境治理分析 [J]. 西北农林科技大学学报 (社会科学版), 2023, 23(02): 127-137.
- [9]颜海娜, 张雪帆, 王露寒. 数据何以赋能水环境跨部门协同治理 [J]. 华南师范大学学报 (社会科学版), 2021(4): 115-126.
- [10]王玮, 杨文瑜, 陈利华, 等. 基于水力建模的水环境治理方案评估与优化 [J]. 资源节约与环保, 2023(7): 33-38.