

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1期 2025年2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 | 基于遥感数据的湖泊水质时空
变化特征分析 | 李壮, 籍哲宇, 赵剑, 赵东来, 刘正宏, 李国栋 |
| | Analysis of Temporal and Spatial Variation Characteristics of Lake
Water Quality Based on Remote Sensing Data | Li Zhuang, Ji Zheyu, Zhao Jian, Zhao Donglai, Liu Zhenghong, Li Guodong |
| 004 | 基于 HEC-RAS 二维洪水模拟中携带污染物范围的研究 | 薛玉丹, 苟万里 |
| | Study on the Scope of Pollutant Carrying in Two-Dimensional Flood
Simulation Based on HEC-RAS | Xue Yudan, Gou Wanli |
| 007 | 硫自养反硝化工艺在水处理中的应用及展望 | 李晓锋 |
| | Application and Prospects of Sulfur-Based Autotrophic Denitrification
in Water Treatment | Li Xiaofeng |
| 010 | 气候变化对区域生态环境的影响及适应策略研究 | 张国贤 |
| | Research on the Impact of Climate Change on Regional Ecological
Environment and Adaptation Strategies | Zhang Guoxian |
| 013 | 广州南沙区域水处理设施的智能化管理与高效运行策略分析 | 梁子豪 |
| | Analysis of Intelligent Management and Efficient Operation Strategies
for Water Treatment Facilities in Nansha Area, Guangzhou | Liang Zihao |
| 016 | 工业废水处理厂污泥含水率智能监测与高效脱水技术优化 | 陈秀芳 |
| | Optimization of Intelligent Monitoring and Efficient Dewatering Technology for
Sludge Moisture Content In Industrial Wastewater Treatment Plant | Chen Xiufang |
| 019 | 基于膜生物反应器的印染废水深度处理技术研究 | 黄涛 |
| | Research on Advanced Treatment Technology for Printing and Dyeing
Wastewater Based on Membrane Bioreactor | Huang Tao |
| 022 | 基层实验室检测大豆粗脂肪酸值
方法优化 | 王一荣, 吴新连, 黄镇源, 许铎峰, 张昱泉 |
| | Optimization of Method for Detecting Crude Fatty Acid Value of Soybeans in Grassroots
Laboratories | Wang Yirong, Wu Xinlian, Huang Zhenyuan, Xu Duofeng, Zhang Yuquan |
| 025 | 污水处理厂对区域生态环境的长期影响分析 | 潘倩仪 |
| | Long Term Impact Analysis of Sewage Treatment Plants on
Regional Ecological Environment | Pan Qianyi |
| 028 | 岩土工程勘察报告编写规范与质量提升 | 卢宇 |
| | Specification Compilation and Quality Improvement of Geotechnical
Investigation Reports | Lu Yu |
| 031 | 基于 DCS 控制系统的工业水处理总体
设计与智能应用 | 白玉铃, 史玉乾, 罗兴隆, 薛达 |
| | Overall Design and Intelligent Application of Industrial Water Treatment
Based on DCS Control System | Bai Yuling, Shi Yuqian, Luo Xinglong, Xue Da |
| 034 | 基于 Linkage Mappe 模型亚洲象栖息地生态构建修复研究 | 宗发荣 |
| | Study on Ecological Construction and Restoration of Asian Elephant Habitat
Based on Linkage Mappe Model | Zong Farong |

037	工业污染源在线监测数据的智能分析与预警模型构建 Intelligent Analysis of Online Monitoring Data of Industrial Pollution Sources and Construction of Early Warning Models	洪长吉，普剑峰，谭强华，黄俊，罗小明 Hong Changji, Pu Jianfeng, Tan Qianghua, Huang Jun, Luo Xiaoming
040	碳达峰与碳中和目标下的企业碳资产管理与咨询服务实践 Practice of Enterprise Carbon Asset Management and Consulting Services under Carbon Peak and Carbon Neutrality Targets	徐炳辉 Xu Binghui
043	城市化进程中的生态空间优化与生态修复技术体系构建 Ecological Space Optimization and Construction of Ecological Restoration Technology System in the Process of Urbanization	王多龙 Wang Duolong
046	黑龙江省农业面源污染特征与生态环境损害评估研究 Research on Characteristics of Agricultural Non-point Source Pollution and Assessment of Ecological Environmental Damage in Heilongjiang Province	刘意仁，邢凯，公成成，沈建华，赵剑 Liu Yiren, Xing Kai, Gong Chengcheng, Shen Jianhua, Zhao Jian

基于遥感数据的湖泊水质时空变化特征分析

李壮^{1,2}, 籍哲宇^{1,2}, 赵剑^{1,2}, 赵东来^{1,2}, 刘正宏^{1,2}, 李国栋^{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 150000

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 150000

DOI: 10.61369/EAE.2025010001

摘要 : 本研究利用遥感数据对湖泊水质的时空变化特征进行深入剖析。阐述了遥感技术在湖泊水质监测中的原理与优势, 详细介绍了数据获取与处理流程, 包括多源遥感数据的选择、预处理以及水质参数反演模型的构建。通过对不同时间尺度 (季节、年际) 和空间尺度 (全湖、不同湖区) 的分析, 揭示了湖泊水质参数如叶绿素 a、总磷、总氮等的时空变化规律及其相互关系, 并探讨了影响湖泊水质时空变化的主要因素, 如流域人类活动、气候条件等, 为湖泊水资源管理与生态环境保护提供了科学依据与数据支持。

关键词 : 遥感数据; 湖泊水质; 时空变化特征; 水质参数反演

Analysis of Temporal and Spatial Variation Characteristics of Lake Water Quality Based on Remote Sensing Data

Li Zhuang^{1,2}, Ji Zheyu^{1,2}, Zhao Jian^{1,2}, Zhao Donglai^{1,2}, Liu Zhenghong^{1,2}, Li Guodong^{1,2*}

1. Harbin Natural Resources Comprehensive Survey Center of China Geological

Survey, Harbin, Heilongjiang 150000

2. Harbin Black Soil Earth Critical Zone Field Scientific Observation and Research Station of the Ministry of Natural Resources, Harbin, Heilongjiang 150000

Abstract : This study conducted an in-depth analysis of the temporal and spatial variation characteristics of lake water quality using remote sensing data. It elaborated on the principles and advantages of remote sensing technology in lake water quality monitoring, and provided a detailed introduction to the data acquisition and processing flow, including the selection of multi-source remote sensing data, preprocessing, and the construction of water quality parameter inversion models. Through analysis at different temporal scales (seasonal, interannual) and spatial scales (entire lake, different lake areas), the study revealed the temporal and spatial variation patterns of lake water quality parameters such as chlorophyll-a, total phosphorus, and total nitrogen, as well as their interrelationships. Additionally, it explored the main factors influencing the temporal and spatial variation of lake water quality, such as human activities in the watershed and climatic conditions, providing a scientific basis and data support for lake water resource management and ecological environmental protection.

Keywords : remote sensing data; lake water quality; temporal and spatial variation characteristics; water quality parameter inversion

引言

湖泊作为陆地水圈的重要组成部分, 在水资源存储、生态平衡维持、气候调节以及生物多样性保护等方面发挥着不可替代的作用。随着全球经济的快速发展和人口的持续增长, 湖泊面临着不断加剧的污染压力, 水质恶化问题已成为制约湖泊可持续利用的关键因素。传统的湖泊水质监测方法主要依赖于定点采样和实验室分析, 这种方法虽然精度较高, 但存在监测点稀疏、时空代表性有限、成本高昂且难以实现大面积同步监测等缺陷。

遥感技术的出现为湖泊水质监测提供了一种全新的、高效的手段。它能够在较大的时空尺度上快速获取湖泊的水质信息, 具有宏观、动态、实时、低成本等诸多优势。通过对遥感数据的分析, 可以有效地揭示湖泊水质的时空变化特征, 为湖泊水质管理和生态环境保护提供有力的技术支撑。因此, 基于遥感数据开展湖泊水质时空变化特征的研究具有极为重要的科学意义和现实价值。

一、遥感技术监测湖泊水质的原理与方法

在湖泊水质监测领域，遥感技术已成为重要手段。其核心在于依据不同水质参数与电磁波的独特交互特性开展监测工作。本章节将详细阐述相关原理、数据获取与处理方式。

（一）原理

不同的水质参数对不同波段的电磁波具有独特的吸收、反射和散射特性。例如，叶绿素 a 在蓝光和红光波段具有明显的吸收峰，在绿光波段则有较高的反射率；悬浮颗粒物对可见光的散射作用较强，使得水体在可见光波段的反射率增加；而溶解性有机物则主要影响水体在紫外和蓝光波段的光谱特性。基于这些光谱特性差异，利用遥感传感器获取水体在不同波段的反射率或辐射值，通过建立特定的数学模型，就可以反演得到相应的水质参数浓度。

利用遥感技术对陆地水体的研究从单纯的水域识别发展到对水质参数进行遥感监测始于上个世纪 70 年代，中国利用遥感技术开展水体污染研究则始于上世纪 80 年代初期，是在天津市环境遥感试验研究中，采用光谱辐射计和地物光谱仪等传感器对不同类型水体进行光谱反射率的测试，建立了不同水体的光谱反射曲线，并据此定性地检测了水体的污染程度和污染类型^[1]。

（二）数据获取

本研究采用多源遥感数据，包括 Landsat 系列卫星数据、Sentinel-2 卫星数据等。这些卫星数据具有不同的空间分辨率、时间分辨率和光谱分辨率，能够满足对湖泊水质监测在不同尺度和精度上的需求。例如，Landsat 系列卫星数据具有较长的时间序列，可用于分析湖泊水质的长期变化趋势；Sentinel-2 卫星数据则具有较高的光谱分辨率，有利于更精确地识别水质参数的光谱特征^[2]。

（三）数据处理

在遥感数据处理过程中，预处理环节至关重要。首先是辐射定标，其作用在于把遥感图像原本的原始数字化值精准地转换为具备明确物理意义的辐射亮度值或者反射率值，以此有效消除传感器自身所产生的误差给数据带来的不良影响。接着进行大气校正，目的是剔除大气分子以及气溶胶等对电磁波造成的散射与吸收干扰，从而还原出水体最为真实的光谱信息，在大气校正方面，常用的方法包括基于辐射传输模型的 6S 模型、MODTRAN 模型，还有基于图像自身信息的暗目标法、直方图匹配法等。最后开展几何校正，该步骤主要是对因地形起伏、卫星姿态改变等因素引发的遥感图像几何变形予以纠正，使图像能够与实际的地理坐标精准匹配，为后续的空间分析工作顺利开展创造便利条件。

水质参数反演模型构建主要包含经验模型、半经验模型以及物理模型。经验模型着重于开展大量野外实测水质数据与对应遥感光谱数据的统计分析工作，从而确立二者间的经验关系式，以叶绿素 a 浓度反演为例，常见的有线性回归模型以及二次多项式、指数模型等非线性回归模型，其优势在于构建过程简易直观，然而其模型普适性欠佳，在不同湖泊与区域应用时往往需

重新构建^[3]。半经验模型是在经验模型的根基上融入一定物理机制，充分考量水质参数对光谱的吸收与散射过程，例如依据水体光谱吸收系数和后向散射系数构建的模型，此类模型在一定程度上对模型的物理意义予以强化，并且普适性也有所提升。物理模型则是依据辐射传输理论，全方位地考量水体里纯水、叶绿素 a、悬浮颗粒物、溶解性有机物等各种成分对电磁波的吸收、散射以及发射等过程，进而构建起复杂的数学模型来实现水质参数的反演，该模型具备较强的物理基础，普适性良好，只是其模型参数繁多，计算流程复杂，并且对数据的要求较为严苛。

在本研究中，根据研究湖泊的特点和数据的可获取性，选择合适的反演模型进行水质参数的反演。

二、湖泊水质时空变化特征分析

湖泊水质的时空变化特征反映其生态演变历程。深入探究这些变化特征，有助于精准把握湖泊水质动态，剖析其内在驱动因素，为湖泊的科学管理与生态修复提供关键依据与有效策略。

（一）时间变化特征

在季节变化方面，叶绿素 a 浓度呈现出明显的季节性波动规律。春季与秋季，气温逐渐回暖，光照条件逐步优化，为湖泊中浮游植物的生长繁殖创造了有利环境，使得叶绿素 a 浓度缓缓上升^[4]。进入夏季，水温持续升高，光照极为充足，并且营养盐含量也相对充裕，这些因素共同促使浮游植物大量繁衍，进而致使叶绿素 a 浓度攀升至峰值。而到了冬季，气温急剧下降，水温随之降低，浮游植物的生长因低温环境而受到显著抑制，其生长活动受限，叶绿素 a 浓度便显著降低。对于总磷和总氮浓度而言，雨季起着关键的影响作用。在雨季期间，比如春季融雪期以及夏季暴雨期，流域内地表径流活跃，大量的营养盐随着径流被带入湖泊之中，从而导致湖泊内总磷和总氮浓度迅速升高。相反，在非雨季时段，由于入湖的营养盐数量大幅减少，同时湖泊内部的生物地球化学过程，诸如吸附作用能够使部分营养盐附着于其他物质上，沉降作用可使营养盐沉积到湖底等，这些过程对营养盐起到了去除效果，使得总磷和总氮浓度处于相对较低的水平。

通过对多年遥感数据展开深入剖析，能够清晰地洞察到湖泊水质参数呈现出显著的年际变化态势。在过往的数十年历程中，因流域范围内农业活动不断强化，诸如化肥农药的大量施用，工业废水肆意排放，以及城市化进程快速推进，许多湖泊的叶绿素 a、总磷以及总氮浓度呈现出持续上扬的走向，这无疑彰显出湖泊水质在逐步趋向恶化^[5]。不过，值得欣慰的是，近年来随着湖泊流域一系列污染治理举措的有力施行，像众多污水处理厂的相继建成，农业面源污染得到有效管控等，已有部分湖泊的水质参数开始转而下降，其水质状况也由此得到了一定程度的改善与提升。

（二）空间变化特征

对整个湖泊的水质参数进行统计分析发现，不同湖区的水质存在差异。一般来说，靠近入湖河口和人类活动密集区域的湖区，水质较差，如叶绿素 a、总磷和总氮浓度较高^[6]。这是因为入

湖河口带来了大量的污染物和营养盐，而人类活动密集区域的污水排放和地表径流污染不容乐观。而位于湖泊中心或远离人类活动区域的湖区，水质相对较好。

进一步将湖泊划分为不同的湖区进行分析，发现各湖区之间的水质变化具有一定的关联性和独立性。例如，在一些大型湖泊中，具有多个相对独立的湖湾或子湖，这些湖湾或子湖由于其独特的水动力条件、地形地貌和周边土地利用类型，水质变化特征各不相同^[7]。一些湖湾由于水流缓慢、水体交换不畅，容易积累污染物，水质较差；而另一些湖湾则由于具有良好的生态自净能力（如丰富的水生植被、较大的水深等），水质相对较好。

三、湖泊水质参数间的相互关系

湖泊中的水质参数之间存在着复杂的相互关系。叶绿素 a 浓度与总磷、总氮浓度之间通常呈现正相关关系。这是因为磷和氮是浮游植物生长所必需的营养元素，当湖泊中的总磷和总氮浓度升高时，为浮游植物的生长提供了充足的养分，从而促进了叶绿素 a 的合成。然而，这种关系并非简单的线性关系，在不同的湖泊环境条件下（如水温、光照、水动力等），其相关系数会有所变化^[8]。

此外，悬浮颗粒物浓度与叶绿素 a 浓度、总磷浓度等也存在一定的关联。悬浮颗粒物可以吸附营养盐和浮游植物，影响它们在水体中的分布和迁移，同时，浮游植物的生长和死亡也会影响悬浮颗粒物的浓度和组成。例如，在浮游植物大量繁殖和死亡的过程中，会产生大量的有机碎屑，增加悬浮颗粒物的浓度。

四、影响湖泊水质时空变化的因素

湖泊水质的时空变化受多种因素交织影响，深入剖析这些因素对于全面理解湖泊生态系统至关重要。

（一）流域人类活动

在影响湖泊水质的众多人类活动因素中，农业活动首当其冲。农业生产环节大量运用的化肥与农药，一部分会伴随地表径流冲刷，另一部分则经地下渗流悄然潜入湖泊，致使湖泊中的营养盐与各类污染物含量显著攀升，像磷肥、氮肥的超量施用便是湖泊总磷和总氮的关键源头。工业活动同样不容小觑，工业生产所产生的废水往往裹挟着众多重金属以及大量有机物等污染物，

径直排入湖泊，对湖泊水质造成不同程度的破坏，即便近年来工业污染治理已有所进展，可仍有局部区域存在违法违规排放情况^[9]。而城市化进程的加快也给湖泊水质带来诸多负面效应，城市污水管网若存在缺陷，垃圾填埋场产生的渗滤液，还有降雨时城市地表径流携带的油污、重金属以及氮磷等物质，都会在降雨时段大规模涌入湖泊，对湖泊水质产生不良影响。

（二）气候条件

气温、降水和风速等气候因素对湖泊水质有着多方面的显著影响。气温的波动直接左右着湖泊水温的升降，从而对浮游植物的生长繁殖速率、水体蒸发状况以及生物地球化学进程速率产生作用，像气温上升时，会加快水体中的化学反应，推动营养盐的释放与转化^[10]。降水方面，其数量与分布状况决定了湖泊入湖水量的多寡以及入湖污染物的承载量，在降水丰富区域，湖泊水量交换频繁，不过也可能伴随更多污染物的汇入，而降水稀缺之处，湖泊可能遭遇水位降低、水质变浓等情形。风速会作用于湖泊的水动力条件，例如影响水体的混合程度与环流态势，强风能够促使水体混合均匀，助力污染物扩散与稀释，但某些时候，过大的风速可能引发湖底沉积物再次悬浮，使得水体中的悬浮颗粒物与营养盐含量增加。

五、结束语

本研究利用遥感数据对湖泊水质的时空变化特征进行了全面深入的分析。研究表明，遥感技术在湖泊水质监测中具有巨大的潜力，可以为湖泊水资源管理和生态环境保护提供丰富的信息和科学依据。

然而，目前基于遥感数据的湖泊水质监测仍存在一些不足之处。例如，水质参数反演模型的精度有待进一步提高，尤其是对于一些复杂的湖泊环境和特殊的水质参数；不同卫星数据之间的融合与协同应用还需要深入研究，以充分发挥各卫星数据的优势；此外，如何将遥感监测结果与湖泊生态模型相结合，实现对湖泊水质和生态系统的动态模拟与预测，也是未来研究的重要方向。

未来，随着遥感技术的不断发展，如新型传感器的研发、数据处理算法的改进等，基于遥感数据的湖泊水质监测将更加精准、高效，为湖泊的可持续发展和全球生态安全保障做出更大的贡献。

参考文献

- [1] 喻欢, 林波. 遥感技术在湖泊水质监测中的应用 [J]. 环境科学与管理, 2007, (07): 152-155.
- [2] 房冲. 国际界湖水水质遥感反演及时空演变分析 [D]. 中国科学院大学 (中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2020.DOI: 10.27536/d.cnki.gccdy.2020.000027.
- [3] 晁明灿. 巢湖叶绿素 a 浓度遥感反演及蓝藻水华监测研究 [D]. 辽宁科技大学, 2021.DOI: 10.26923/d.cnki.gasgc.2021.000369.
- [4] 梁中耀, 余艳红, 王丽婧, 等. 湖泊水质时空变化特征识别的贝叶斯方差分析方法 [J]. 环境科学学报, 2017, 37(11): 4170-4177.DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2017.0276.
- [5] 侯鹏飞. 城镇化背景下滇池叶绿素 a 浓度时空变化特征研究 [D]. 云南师范大学, 2020.DOI: 10.27459/d.cnki.gynfc.2020.000038.
- [6] 孙悦. 白洋淀氮素时空分布特征及治理对策 [D]. 河北科技大学, 2020.DOI: 10.27107/d.cnki.ghbku.2020.000446.
- [7] 陈方方, 王强, 宋开山, 等. 基于 Sentinel-3OLCI 的查干湖水水质参数定量反演 [J]. 中国环境科学, 2023, 43(05): 2450-2459.DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20230208.002.
- [8] 王思梦, 秦伯强. 湖泊水质参数遥感监测研究进展 [J]. 环境科学, 2023, 44(03): 1228-1243.DOI: 10.13227/j.hjks.202203285.
- [9] 王立兵. 盐湖区水体水质参数时空变化及影响因素研究 [D]. 西北师范大学, 2022.DOI: 10.27410/d.cnki.gxbfu.2022.000124.
- [10] 唐中林, 朱忠福, 李小辉, 等. 九寨沟世界自然遗产地湖泊水质参数的高光谱定量反演模型 [J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27(05): 1256-1263.DOI: 10.19675/j.cnki.1006-687x.2020.11027.

基于 HEC-RAS 二维洪水模拟中携带污染物范围的研究

薛玉丹¹, 苟万里²

1. 天津渤海职业技术学院, 天津 300402

2. 冀中矿建勘察设计院(天津)有限公司, 天津 300171

DOI: 10.61369/EAE.2025010003

摘 要 : 洪水从产流到汇流的过程中, 流速快、行洪范围较大, 很容易携带周边污染物汇入到河道中, 对河道水质造成一定的污染, 而洪水的行洪范围是计算污染物面积的基础, 文中采用美国陆军工程兵团工程水文中心 (US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center) 研发的 HEC-RAS 软件进行二维水流模型宽度分析, 并以榆溪河为例, 计算在 10%、1%、0.3% 频率年下河道行洪携带污染物范围的研究, 以期洪水携带污染物计算范围提供依据。

关 键 词 : HEC-RAS; 二维数值模拟; 地形矢量; 污染物; 行洪范围

Study on the Scope of Pollutant Carrying in Two-Dimensional Flood Simulation Based on HEC-RAS

Xue Yudan¹, Gou Wanli²

1. Tianjin Bohai Vocational and Technical College, Tianjin 300402

2. Jizhong Mining Construction Survey and Design Institute (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 300171

Abstract : During the process from flood generation to convergence, the flow velocity is fast and the flood discharge area is large, making it easy for surrounding pollutants to be carried into the river, causing certain pollution to the water quality. The flood discharge area serves as the basis for calculating the pollutant coverage. This paper uses the HEC-RAS software developed by the U.S. Army Corps of Engineers' Engineering Hydrology Center (US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center) to conduct a two-dimensional flow model width analysis. Taking the Yuxi River as an example, it calculates the flood discharge areas under 10%, 1%, and 0.3% frequency years, providing a basis for estimating the range of pollutants carried by floods.

Keywords : HEC-RAS; two-dimensional numerical simulation; terrain vector; pollutant; flood range

引言

河湖中的污染物通常有工业废水、生活污水、农业面源污染、垃圾倾倒等, 会随着降雨产生的地表径流进入河道, 尤其是在特大暴雨中, 往往会形成一定的洪水, 洪水具有流速快、行洪面积大等特点, 更容易将周边污染物带入河道中, 影响河道生态系统的稳定。因此在洪水条件下, 分析洪水的行洪面积, 是确定分析河道污染物范围的基础条件。

目前, 在洪水演进的过程中, 二维水流数学模型随着计算机技术的发展得到了广泛的应用。韩岭^[1]等通过 MIKE FLOOD 耦合模型, 预测了湟水河上游遭遇 10 年、50 年、100 年一遇洪水时的洪水风险情况。陈秀万^[2]设计了 1 个专用于地理信息系统洪灾损失信息存储和管理洪水灾情分析所需的信息系统, 可快速获取洪水淹没范围。聂汉江^[3]过 ERDAS 模拟黄壁庄水库下游一定水量的无源淹没面积。李毓湘等^[4]对珠江三角洲河网区河道进行了概化建立了珠江三角洲河网区水动力学模型。郭鹏程等^[5]采用 MIKE21 水质水动力综合模型模拟计算了不同方案下北川河生态河道 10[#] 生态湖的流场及水体交换情况。

文中采用美国陆军工程兵团工程水文中心 (US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center) 研发的 HEC-RAS 二维水流模型分析计算在 10%、1%、0.3% 频率年下洪水行洪携带污染物范围的研究, 已期为洪水携带污染物计算提供依据。

一、HEC-RAS二维模型

HEC-RAS 是由美国陆军工程兵团工程水文中心 (US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center) 研发的一款河流水力计算综合软件包。

(一) 计算原理

HEC-RAS 模型中空间离散采用有限差分法 (finite difference method, FDM) 与有限体积法 (finite volume method, FVM) 相结合的计算方法。

(二) 模型范围

根据《河道管理范围内建设项目防洪评价报告编制导则》(SL/T808-2021) 条文说明 1.0.6 条, 结合榆溪河为山区性河道特性, 本次分析范围为3倍的河段宽度, 榆溪河宽约62.17m, 按3倍考虑为186.51m, 本次纵向分析范围为上下游各300m考虑, 即: 桩号为 K0+000~K0+600, 横向分析范围按照河道左右河口各向外衍生1km。

二、模型建立

(一) 地形图

常见的地形图矢量处理方法有地形图矢量处理方法、扫描矢量化、基于摄影测量的矢量提取法、基于 LiDAR数据的矢量处理、ArcGIS地形矢量处理等。

文中采用 ArcGIS进行地形图矢量处理方法, 结合现场实测的榆溪河范围 Tiff文件地形, 通过 Arcgis转化为地理矢量图见图2-1。

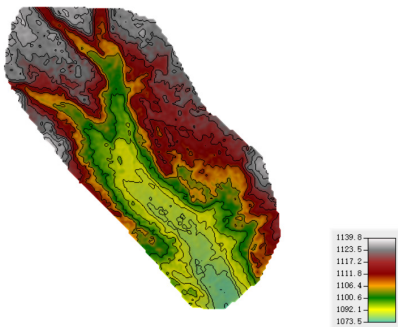


图2-1 项目区地理矢量地形图

(二) 网格划分

打开 HEC - RAS软件, 点击主界面的“RAS Mapper”按钮, 进入地理编辑界面。在“Mapper”主界面中, 点击“Tools”→“Set Projection File”, 选择之前导出的 shp文件设置坐标系, 然后导入地形数据, 进行网格生成。根据本工程的特点, 本模型中网格范围采用边长50 m 的正方形网格, 整个模型网格总数10105。

(三) 参数设置

(1) 时间离散采用有限差分法, 并通过 Crank-Nicolson 方法计算变量在 n 与 n+1 时间步的权重, 本模型中 Δt=60 s。

(2) 河床底部糙率根据模型区域水深及床面形态, 经反复调试后取为0.048, 并在局部有所微调。

(3) 模型水平涡粘系数 θ t。

$\theta t=Dhu^*$

式中:

D—为无量纲经验常数;

h—为水深;

u*—为流体粘度;

$$u_* = \frac{n\sqrt{g}}{R^{1/6}}|V|$$

式中:

R—为水力半径;

n—为曼宁系数;

|V|—为流速大小。

模型的初始条件流量按照项目区段计算流量外, 其余均采用冷启动方式, 即初始水位、流速及流向皆为0。

三、洪水分析

分析区段洪水分析根据榆溪河项目区段来水及水文条件, 采用水文比拟法与上游水库泄水量进行叠加。

(一) 水文比拟法

本段设计洪水采用产汇流条件、下垫面等因素与榆溪河临近的海流兔河韩家崙站作为参证站。按照“水文比拟”法计算, 计算公式入下:

$$Q_1 = \left(\frac{F_1}{F_2}\right)^n Q_2$$

式中:

Q₁——计算断面设计流量 (m³/s);

F₁——计算断面集水面积 (km²);

Q₂——水文站断面设计流量 (m³/s), 本评价为韩家崙站设计流量;

F₂——水文站断面集水面积 (km²), 本评价为韩家崙站集水面积;

n——面积指数, 取2/3。

计算各控制区间洪水成果见表3-1。

表3-1 各区间洪峰流量计算成果 单位: m³/s

区间段	区间面积 (km ²)	频率 (%)		
		10	1	0.333
区间段流量	324.69	24.472	84.688	117.899

(二) 水库下泄流量

根据水库设计及除险加固资料, 中营盘水库最大下泄流量为6m³/s, 李家梁水库最大下泄流量为14m³/s, 河口水库最大下泄流量为6m³/s。

(三) 项目设计洪峰流量

项目设计洪峰流量, 采用水库最大下泄流量与项目区段10%、1%、0.333%频率洪峰流量进行叠加计算, 计算成果见表3-2。

表3-2 项目区段以上各区间洪峰流量计算成果 单位: m³/s

区间段	频率 (%)		
	10	1	0.333
项目设计河段	49.258	106.378	138.312

四、模拟成果分析

根据模拟分析，在10%频率年遇洪水标准下，行洪范围宽度为51.74~62.17m，行洪宽度不溢岸，无河道两岸周边污染物携带情况，携带河道两岸周边污染物面积计算成果见表4-1，洪水范围模拟图见图4-1（1）。

表4-1 10%频率年下洪水行洪范围携带污染物面积计算成果

桩号	河底高程 (m)	左岸高程 (m)	右岸高程 (m)	行洪水面宽度 (m)	河道两岸可携带周边污染物宽度(m)	可携带周边污染物面积合计(m ²)
K0+000	1106.97	1111.25	1111.24	55.4	0	0
K0+150	1106.27	1111.15	1111.16	60.54	0	0
K0+200	1105.57	1111.06	1111.07	62.17	0	0
K0+300	1105.5	1110.95	1110.94	55.87	0	0
K0+400	1105.43	1110.85	1110.87	56.54	0	0
K0+500	1105.36	1110.36	1110.26	51.74	0	0
K0+600	1105.29	1110.29	1110.19	54.24	0	0

在1%频率年洪水标准下，行洪范围宽度为105.8~116.92m，行洪宽度溢岸，可携带河道两岸周边污染的宽度为25.8~35.74m，分析区段可携带污染物的总面积为18737 m²。携带污染物面积计算成果见表4-2。洪水范围模拟图见图4-1（2）。

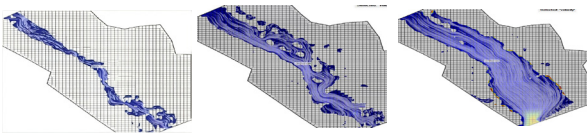
表4-2 1%频率年下洪水行洪范围携带污染物面积计算成果

桩号	河底高程 (m)	左岸高程 (m)	右岸高程 (m)	行洪水面宽度 (m)	河道两岸可携带周边污染物宽度(m)	可携带周边污染物面积合计(m ²)
K0+000	1106.97	1111.25	1111.24	110.36	30.36	0
K0+150	1106.27	1111.15	1111.16	115.74	35.74	4957.50
K0+200	1105.57	1111.06	1111.07	116.92	36.92	6774.00
K0+300	1105.5	1110.95	1110.94	109.79	29.79	10109.50
K0+400	1105.43	1110.85	1110.87	111.25	31.25	13161.50
K0+500	1105.36	1110.36	1110.26	105.8	25.8	16014.00
K0+600	1105.29	1110.29	1110.19	108.66	28.66	18737.00

在0.333%频率年洪水标准下，行洪范围宽度为107.13~117.95m，行洪宽度溢岸，可携带河道岸周边污染的宽度为27.13~37.95m，分析区段可携带河道两岸周边污染物的总面积为194563.25 m²。携带污染物面积计算成果见表4-3，洪水范围模拟图见图4-1（3）。

表4-3 0.333%频率年下洪水行洪范围携带污染物面积计算成果

桩号	河底高程 (m)	左岸高程 (m)	右岸高程 (m)	行洪水面宽度 (m)	河道两岸可携带周边污染物宽度(m)	可携带周边污染物面积合计(m ²)
K0+000	1106.97	1111.25	1111.24	112.44	32.44	0
K0+150	1106.27	1111.15	1111.16	117.1	37.1	5215.50
K0+200	1105.57	1111.06	1111.07	117.95	37.95	7091.75
K0+300	1105.5	1110.95	1110.94	110.51	30.51	10514.75
K0+400	1105.43	1110.85	1110.87	112.23	32.23	13651.75
K0+500	1105.36	1110.36	1110.26	107.13	27.13	16619.75
K0+600	1105.29	1110.29	1110.19	109.74	29.74	19463.25



（1）10%频率年行洪范围 （2）1%频率年行洪范围 （3）0.333%频率年行洪范围

图4-1 不同频率年下洪水行洪范围携带污染物面积计算成果

五、结论与展望

（一）结论

河道周边的污染物会随着降雨产生的地表径流进入河道，尤其是在特大暴雨中，往往会形成一定的洪水，洪水具有流速快、行洪面积大等特点，更容易将周边污染物带入河道中，文中采用 HEC-RAS 二维水流模型分析计算了在10%、1%、0.333%频率年下对洪水行洪可携带污染物范围进行了研究，结果表明 HEC-RAS 二维水流模型在河道行洪分析计算过程中，对污染物面积的分析计算具有良好的适用性。

（二）展望

文中采用 HEC-RAS 是由美国陆军工程兵团工程水文中心 (US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center) 研发的一款河流水力计算综合软件包，二维水流模型是在最新的5.0版本中加入的，该模块计算精度高，人机界面友好，因此在国际上得到广泛应用，但国内应用较少，其次模型对参数和资料的高要求，使得模型在实际应用中并不能完全发挥其普遍的作用；当时间步长调整的很小时，计算周期会大大增加；当人类活动影响较大的时候，模拟出的结果误差较高等等。以上问题在今后进一步的研究中，可以仔细讨论深入探究，进一步进行优化改进。

参考文献

[1] 韩岭, 盖永刚, 刘杨等. 基于 MIKE FLOOD 模型的温河上游洪水风险评估 [J]. 中国农村水利水电. 2017, (7): 616-164.
[2] 陈秀万. 遥感与 GIS 在洪水在洪水灾情中的分析与应用 [J]. 水利学报. 1194.11: 70-73.
[3] 聂汉江, 刘彬, 何立新等. 基于库群联合调度度和 DEM 的区域洪水淹没范围模拟 [J]. 水电能源科学. 2014, 5 (5): 44-46.
[4] 李毓湘, 逢勇. 珠江三角洲地区河网水动力学模型研究 [J]. 水动力学研究与进展, 2011, 16(2): 143-155.
[5] 郭鹏程, 蔡明, 闫大鹏. 基于 MIKE21 模型的人工生态湖优化设计 [J]. 人民黄河, 2014, 36(4): 56-58.

硫自养反硝化工艺在水处理中的应用及展望

李晓锋

临汾市生态环境局环境监控中心, 山西 临汾 041000

DOI: 10.61369/EAE.2025010004

摘要： 硫自养反硝化是一种环境友好的水处理技术，因其无需外加碳源、低污泥产量和减少温室气体排放等优势备受关注。本文综述了该技术的原理、优势及其在城市污水、工业废水和农业面源污染治理中的应用现状与优缺点，分析了其在不同场景的适用性与效果，并展望了未来发展方向。总体而言，硫自养反硝化技术在提升水质处理效率、降低能耗和化学药剂使用方面潜力巨大，对解决水资源管理和环境保护挑战具有重要意义。

关键词： 硫自养反硝化；水处理技术；节能减碳；反硝化脱硫细菌；极限脱氮

Application and Prospects of Sulfur-Based Autotrophic Denitrification in Water Treatment

Li Xiaofeng

Linfen City Ecological environment Bureau environmental monitoring Center, Linfen, Shanxi 041000

Abstract： Sulfur autotrophic denitrification is an environmentally friendly water treatment technology, which has attracted much attention because of its advantages such as requiring no additional carbon source, low sludge production and reducing greenhouse gas emissions. This paper summarizes the principle and advantages of the technology and its application status and disadvantages in the treatment of urban sewage, industrial wastewater and agricultural non-point source pollution, analyzes its applicability and effect in different scenarios, and prospects the future development direction. In general, sulfur autotrophic denitrification technology has great potential in improving water quality treatment efficiency, reducing energy consumption and chemical chemicals, and is of great significance to solve the challenges of water resources management and environmental protection.

Keywords： sulfur-based autotrophic denitrification; water treatment technology; energy saving and carbon reduction; denitrifying sulfur bacteria; extreme nitrogen removal

近年来，全国水质显著改善，但华北地区仍面临水资源短缺问题。随着水生态保护标准提高，污水处理厂升级改造成为趋势，北京、上海等地推出更严格的地方标准。2025年，国家发改委和住建部发布首批45个污水处理绿色低碳标杆厂名单。硫自养反硝化技术因无需外加碳源、节能减碳，成为处理低C/N比污水的最佳选择之一，符合国家节能减排方向。

一、硫自养反硝化作用机理及研究现状

（一）硫自养反硝化作用机理

生物反硝化技术分为自养和异养两类。硫自养反硝化以还原态硫为电子供体，污泥产率低，运行成本低，环保且经济，优于依赖外加碳源的异养反硝化^[1]。

（二）硫自养反硝化技术的研究现状

（1）微生物反硝化机理

硫自养反硝化利用硫源为电子供体，微生物通过氧化还原反应脱氮。提高效率需研究硫氧化反硝化菌机理及硫元素迁移

过程。

硫自养反硝化通过功能菌群（NR-SOB）同步脱氮脱硫，核心菌包括脱氮硫杆菌、脱氮硫单胞菌和泛养硫球菌。假单胞菌、苍白杆菌等也具脱硫脱氮能力。Thiobacillus denitrificans为典型自养硫氧化反硝化菌，Azoarcus和Pseudomonas为异养型。硫还原转化由多种酶（如醌氧化还原酶、亚硫酸盐还原酶等）催化，生物强化可提高菌群效率，推动工艺发展。

（2）生物载体材料及填料

生物膜法是污水处理的关键方法，生物载体材料为其核心。载体为生物膜提供附着位点，具有比表面积大、抗冲击负荷强等

作者简介：李晓锋（1972—），男，硕士研究生，工程师，研究方向：水污染控制和微生物技术及环境管理与监测，主要包括污水生物处理理论、技术及工艺优化控制，尤其是污废水生物脱氮除磷新技术。

优势。未来研究应聚焦开发低成本、高稳定性、高强度、低传质阻力的载体材料，并负载足够硫源，以提升硫自养反硝化技术的效率和应用价值^[2]。

单质硫填料因成本低、毒性小、易操作，广泛应用于硫自养反硝化技术。小粒径填料比表面积大，可提高反硝化效率。但该工艺消耗碱度，降低 pH，可能导致污泥酸化。因此，需使用石灰石、牡蛎壳等碱度调节材料制成复合填料，提升效率。

（3）协同反硝化

协同反硝化结合自养与异养工艺，更适合处理生活污水和尾水。研究重点包括有机碳源与无机硫源的协同效果，以及两类反硝化菌的耦合机制。

二、硫自养反硝化技术应用

（一）污水处理厂改造

水体富营养化是全球性环境问题，控制氮、磷输入是关键。尽管国内污水处理厂一级 A 标准规定总氮 ≤ 15 mg/L，但为减少尾水氮含量，仍需深度脱氮处理^[3]。

以下是一些污水处理厂改造的典型案例：

（1）宁晋污水处理厂

宁晋污水处理厂提标改造项目是全球首座大规模非碳源依赖深度脱氮技术示范项目。该项目的项目规模为 40000 t/d，其中 93% 为工业源水，将原有工艺“多级 AO+二沉池+深床滤池+高效沉淀池”中的深床滤池改造为硫自养反硝化滤池，达到 COD/TN 约 2~3 的脱氮效果，最终使污水达到准Ⅳ类（TN <15 mg/L）排放标准^[4]。通过采用硫自养反硝化滤池集成工艺，年综合运行费减少 145 万元，年减少碳源 1073 t，年节约能源 11.7 万 kW·h，年减少污泥 734 t。

（2）宜兴城市污水资源概念厂

宜兴城市污水资源概念厂从 2021 年 9 月起实施，项目规模为 20000 t/d，实行执行标准为太湖流域一、二级保护区限值 / 概念厂内控标准，通过应用“多模式生化处理+硫自养反硝化滤池+高级氧化单元”，最终达到 TN 的出水指标不超过 3 mg/L 的效果^[5]。同时，年综合运行费减少 186 万元，年减少碳源 840 t，年节约能源 11.6 万 kW·h，年减少污泥 730t。

（二）人工湿地

（1）北大沙河人工湿地项目^[6]

（2）硫自养反硝化强化人工湿地深度处理冷轧废水

（三）地下水修复

硝酸盐是地表水和地下水中常见的氮污染物，随着经济发展和城市化进程加快，污染程度加剧。硫自养反硝化技术在地下水修复研究中广泛开展，但多限于小试阶段，缺乏中试及实际原位修复应用研究^[7]。

（四）高盐废水处理

硫自养反硝化技术不仅适用于低浓度硝酸盐废水，还在高盐废水（如海水和工业废水）处理中展现了潜力。香港科技大学陈光浩课题组研发了硫酸盐还原、自养反硝化和硝化一体化

（SANI）工艺。该工艺利用硫酸盐还原菌在厌氧条件下将硫酸盐还原为硫化物，作为电子供体进行硫自养反硝化，实现污水脱氮。该工艺充分利用进水硫酸盐资源，通过硫自养反硝化减少污泥产量，显著降低污水处理运行成本和占地面积。

三、硫自养反硝化技术工艺

（一）珊氮

“珊氮”技术基于王爱杰研究员提出的硫-铁协同驱动反硝化增效原理，由他与中持股份合作开发，具有工程化意义^[8]。其核心创新在于 ThiocreF® 复合活性生物载体，可替代有机碳源，兼具微生物承载和高负荷脱氮功能，解决了单质硫工艺稳定性差、微生物易失活、脱氮效率低等规模化应用瓶颈。

（二）杀泥 SANI

杀泥技术由两个反应器组成：

异养硫还原反应器

移动床生物膜反应器

该技术同步去除有机物和氮磷，运行高效。

（三）氮曲

“氮曲·0 碳源硫自养滤池”是沃尔德斯推出的创新型深度脱氮技术，无需外加碳源即可高效去除硝态氮。该技术解决了异养反硝化药剂成本高、污泥量大、运维复杂等问题，为污水深度脱氮提供了经济高效的解决方案^[9]。

（四）沫澈®自养/异养协同脱氮（NSAD）

沫澈 NSAD 工艺采用自主研发的自养与异养协同脱氮技术，为高度集成的独立脱氮单元，可在少加或零碳源条件下处理高浓度氮污染废水^[10]。其第 5 代脱氮材料具备多孔、缓释、强微生物负载能力，通过主材与活性催化辅材协同作用，构建稳定、高效、经济的绿色脱氮体系，大幅降低脱氮成本，实现污泥减量，并减少 CO₂、N₂O 等温室气体排放，降低环境负面影响。

（五）潮小灰 CBD-TNgo 硫自养反硝化生物脱氮系统

CBD-TNgo 硫自养反硝化生物脱氮系统采用硫自养反硝化技术，无需外加碳源，减少 CO₂ 排放，降低运行成本 40%~60%，污泥产量减少 80%~90%，建设费用低，出水稳定达标。

（六）硫自养 2.0 工艺

清控环保从硫自养 1.0 工艺升级至 2.0 版本，解决了填充床投资高、硫颗粒反应面积小、易堵塞等问题。在工业污水处理中效果显著：

制网厂案例（80 t/d）：进水总氮 30~50 mg/L，出水稳定在 2~4 mg/L；

电子厂案例（150 t/d）：进水总氮 60~70 mg/L，出水稳定在 4~5 mg/L。

四、硫自养反硝化技术的未来展望

在“双碳”政策背景下，硫自养反硝化工艺因无需外加碳源、减少温室气体排放及低污泥产量等优势受到广泛关注。文章

总结了技术应用，探讨了电子供体选择及影响因素。实际应用中，电子供体选择需结合原水 C/N/S 比、 NO_3^- 浓度等因素，并考虑出水是否造成二次污染。目前，该工艺已取得进展，未来研究可能聚焦于：反应速率与机理差异,现有研究对不同基质的硫自养反硝化反应速率和机理结论不一致，可能与原水性质、反应器类型及微生物菌属差异有关。

参考文献

[1] 李明礼,高彦宁,黄丹,等.强化型硫铁矿自养反硝化工艺深度处理城市二沉尾水研究 [J]. 大连理工大学学报,2023,63(5):454-462.

[2] 李政辉,刘宝河,余浩然,等.硫源对反硝化脱氮性能及微生物群落结构的影响 [J]. 环境科学与技术,2023,46(9):1-10.

[3] 【关于印发污水处理绿色低碳标杆厂名单并开展对标新(改)建的通知(发改办环资〔2024〕1078号)】-国家发展和改革委员会 [EB/OL].

[4] 路青,刘宏雁,郑博英,等.硫自养反硝化的污水脱氮技术研究 [J]. 环境工程,2023,41(S2):60-61+64.

[5] 张晓明,张韦,梁静.硫自养反硝化技术对城市污水处理厂总氮深度处理效率的影响研究 [J].中国资源综合利用,2023,41(07):199-201.

[6] 李文泉,南贵珍,商静静.污水处理厂尾水硫自养反硝化人工湿地脱氮效果 [J]. 净水技术,2023,42(08):94-100

[7] 郝晓地,魏洪禹,于文波,等.硫自养反硝化技术优劣辨析 [J]. 环境科学学报,2024,44(4):1-10.

[8] 刘柏利,胡广志,李再兴,等.无机硫自养反硝化处理污水工程应用进展 [J/OL]. 应用化工,2024[2024-04-30].

[9] 高舒嘉,邵军荣,成宇,等.污水硫自养反硝化技术研究进展 [J]. 土木与环境工程学报(中英文),2024,46(2):227-235.

[10] 杨洁,方芳,陈玲珑,等.硫自养-异养协同反硝化技术的研究进展 [J/OL]. 应用化工,2024[2024-04-30].

气候变化对区域生态环境的影响及适应策略研究

张国贤

运城市生态环境保护综合行政执法队，山西 运城 044000

DOI: 10.61369/EAE.2025010005

摘要： 本文聚焦于气候变化对区域生态环境的影响及适应策略。通过对气候变化现状的分析，阐述其对区域生态环境如生物多样性、水资源、生态系统结构与功能等方面产生的显著影响。从生态保护、水资源管理、产业调整等多维度提出适应策略，旨在为区域生态环境保护与可持续发展提供理论依据与实践指导，以应对气候变化带来的挑战。

关键词： 气候变化；区域生态环境；影响；适应策略

Research on the Impact of Climate Change on Regional Ecological Environment and Adaptation Strategies

Zhang Guoxian

Yuncheng Comprehensive Administrative Law Enforcement Team for Ecological Environmental Protection,
Yuncheng, Shanxi 044000

Abstract： This article focuses on the impact of climate change on the regional ecological environment and adaptation strategies. Through analyzing the current situation of climate change, it expounds on its significant impact on the regional ecological environment, such as biodiversity, water resources, ecosystem structure and function. Adaptation strategies are proposed from multiple dimensions such as ecological protection, water resource management, and industrial adjustment, aiming to provide theoretical basis and practical guidance for regional ecological environmental protection and sustainable development to address the challenges brought by climate change.

Keywords： climate change; regional ecological environment; impact; adaptation strategies

引言

气候变化是当今全球面临的重大环境问题，其对区域生态环境的影响广泛而深刻。自工业革命以来，人类活动以前所未有的规模和速度改变着地球的气候系统。据世界气象组织（WMO）报告，过去 170 年间，全球平均气温上升约 1.1℃，而大气中二氧化碳浓度已从工业革命前的 280ppm 攀升至 2023 年的 421ppm，甲烷、氧化亚氮等其他温室气体浓度也呈持续上升趋势。这种变化不仅体现在气温的波动上，还引发降水模式紊乱、极端天气事件频发等连锁反应，严重威胁区域生态环境的稳定与可持续发展。深入研究气候变化对区域生态环境的影响机制，并探索科学有效的适应策略，已成为全球生态保护与可持续发展领域亟待解决的核心课题。

一、气候变化现状分析

（一）全球气候变化趋势

过去一个多世纪以来，全球平均气温呈显著上升趋势。政府间气候变化专门委员会（IPCC）第六次评估报告指出，1850 – 1900 年至 2011 – 2020 年期间，全球地表温度升高了 1.09℃，其中陆地升温速度（1.59℃）是海洋（0.88℃）的近两倍。与此同时，大气中温室气体浓度持续增加，二氧化碳浓度从工业革命前的约 280ppm 上升至目前的超过 410ppm，甲烷和氧化亚氮浓度分别达到工业化前水平的 2.6 倍和 1.3 倍。这种温室气体浓度的上升主要归因于人类活动，如化石燃料的燃烧（占人为排放总量的

75% 以上）、土地利用变化（如森林砍伐导致碳汇能力下降）和工业生产等。此外，全球海平面以每年约 3.7 毫米的速度上升，极端高温、强降水、干旱等灾害事件的频率和强度显著增加。

（二）区域气候变化特征

不同区域在气候变化背景下呈现出各异特征。在北极地区，气温升高速度是全球平均水平的两倍以上，北极海冰面积每十年减少约 13%，永久冻土区面积持续萎缩，导致甲烷等温室气体从冻土中释放，形成气候变暖的正反馈循环。在欧洲南部和非洲北部，降水减少导致干旱加剧，西班牙部分地区近 30 年平均降水量下降 15%，引发水资源短缺和农业减产；而在东亚和南亚地区，季风模式的改变使暴雨洪涝灾害频发，2021 年河南特大暴雨

单日降雨量突破历史极值，造成重大人员伤亡和经济损失。北美西部山区因气温上升导致积雪减少，春季融雪时间提前，影响下游河流的季节性径流规律，威胁城市供水和农业灌溉安全。

二、气候变化对区域生态环境的影响

（一）对生物多样性的影响

1. 物种分布范围改变

随着气温升高和降水模式的变化，许多物种的适宜生存范围发生了改变。以北美鸟类为例，自 1966 年以来，超过 70% 的鸟类物种分布范围向北方或高海拔地区迁移，平均迁移速度达每十年 19 公里。但并非所有物种都能适应这种变化，如澳大利亚的山地侏儒负鼠，其栖息地因气温升高而退缩至山顶，面临灭绝风险；欧洲阿尔卑斯山特有植物高山勿忘我，由于适宜生长区域缩小，种群数量在过去 50 年下降了 60%。对于岛屿生态系统而言，海平面上升和栖息地碎片化使许多特有物种面临“无处可退”的绝境，如夏威夷群岛的本土鸟类已有 17 种灭绝，现存物种中 80% 处于濒危状态。

2. 物种物候期变化

气候变化导致物种的物候期，即生物季节性活动的时间发生变化。在北半球温带地区，植物的春季物候期平均每十年提前 2 – 5 天，英国皇家鸟类保护协会研究显示，蓝山雀的繁殖期因昆虫活动提前而出现不匹配，雏鸟孵化时昆虫数量峰值已过，导致幼鸟存活率下降 12%。这种物候失调在森林生态系统中尤为明显，樱花树与传粉昆虫的物候错配使日本部分地区樱花结实率降低 30%；在北极苔原，蚊子孵化期提前导致驯鹿因叮咬时间延长而改变迁徙路线，进而影响整个食物链结构。

（二）对水资源的影响

1. 降水变化导致水资源分布不均

降水模式的改变是气候变化对水资源影响的重要方面。在中亚地区，年降水量减少 10 – 20%，咸海面积从 1960 年的 6.8 万平方公里缩减至 2020 年的不足 1 万平方公里，导致周边地区土壤盐渍化和沙尘暴频发；而在东南亚，极端降雨事件增加使湄公河流域洪水灾害损失年均增长 8%。美国西南部“大干旱”持续 22 年（2000 – 2022），科罗拉多河径流量减少 20%，引发七个州的水资源分配冲突。降水时空分布不均还加剧了城市内涝问题，中国长三角地区因强降水事件增加，2015 – 2020 年城市洪涝灾害损失年均达 50 亿元。

2. 冰川融化与海平面上升

高海拔和极地地区的冰川融化是气候变化的显著后果之一。喜马拉雅山脉冰川正以每年 0.5 – 1 米的速度退缩，预计到 2100 年，该地区冰川面积将减少 60 – 90%，威胁到恒河、印度河等亚洲主要河流的水源供应。格陵兰冰盖融化速度从 1992 年的每年 340 亿吨增加到 2019 年的每年 5320 亿吨，导致全球海平面上升约 14 毫米。海平面上升对沿海湿地生态系统造成毁灭性打击，美国路易斯安那州因海平面上升和风暴潮侵袭，每年丧失约 35 平方公里的湿地；中国长江口湿地面积近 30 年减少 40%，候鸟栖息地大幅缩减。

（三）对生态系统结构与功能的影响

1. 森林生态系统

气候变化对森林生态系统的影响多方面。在北美西部，气温升高和干旱加剧使山松甲虫爆发面积从 2000 年的 0.5 万平方公里扩大到 2015 年的 18 万平方公里，导致约 10 亿棵树木死亡；在东南亚，厄尔尼诺现象引发的干旱使 2019 年印尼热带雨林火灾排放的二氧化碳量相当于该国全年化石燃料排放量的 40%。此外，森林物种组成发生显著变化，北美东部硬木林因气候变暖，北方针叶树种比例增加，预计到 2080 年，枫树和山毛榉等传统优势树种分布范围将缩小 30 – 50%，影响森林生态系统的碳储存和生物多样性^[1]。

2. 草原生态系统

在草原生态系统中，气候变暖导致草原植被生长季延长，但同时干旱加剧，降水的不确定性增加，使得草原生产力波动增大。蒙古国草原因连续干旱和过度放牧，2000 – 2020 年植被覆盖度下降 22%，土地沙化面积扩大至国土面积的 25%。在非洲萨赫勒地区，降水减少和高温导致耐旱的灌木扩张，取代传统草本植物，使草原生态系统向荒漠生态系统退化，威胁到游牧民族的生存。草原生物多样性也随之下降，中国内蒙古草原常见物种数量从 1980 年的 200 余种减少至 2020 年的 130 余种^[2]。

3. 湿地生态系统

湿地生态系统对气候变化极为敏感。海平面上升导致沿海湿地被淹没，美国大西洋沿岸湿地预计到 2050 年将丧失 50 – 70%；而内陆湿地因降水变化和上游水资源开发，水位波动加剧，中国若尔盖湿地面积从 1950 年代的 3000 平方公里缩减至 2010 年的 1500 平方公里。气候变化还改变了湿地生态系统的生态功能，佛罗里达大沼泽地因海水入侵和水位下降，对磷的净化能力下降 60%，藻类爆发频率增加；欧洲多瑙河三角洲因洪水频率改变，候鸟停歇地面积减少 35%，影响全球候鸟迁徙路线^[3]。

三、适应气候变化的策略

（一）生态保护策略

1. 建立自然保护区和生态廊道

建立自然保护区是保护生物多样性和生态系统的重要手段。中国已建立 2750 个自然保护区，覆盖国土面积的 15%，有效保护了 90% 的陆地生态系统类型和 85% 的重点野生动物种群^[4]。同时，构建生态廊道可增强生态系统连通性，如美国“大黄石生态系统”通过设立 5000 公里的野生动物迁徙廊道，保障了灰熊、麋鹿等物种的季节性迁移；中国东北虎豹国家公园通过修复森林连接带，使东北虎活动范围扩大 40%。此外，采用“韧性保护区”理念，将气候变化预测纳入保护区规划，可提升其长期适应性。

2. 实施生态修复工程

针对已经受损的生态系统，实施生态修复工程是重建生态平衡、增强生态系统韧性的关键举措。在森林修复领域，巴西启动的“大西洋森林恢复计划”堪称国际范例。该计划通过结合人工造林、自然恢复和社区参与等多种手段，在 2009 – 2020 年间成功恢复森林面积 250 万公顷，为濒危物种金狮面狨创造了关键栖息地，其种群数量因此增加 30%，有效缓解了灭绝风险。而中国历时 40 年推进的“三北”防护林工程，更是以“绿色长城”的宏伟规模，在广袤的北方地区构筑起生态屏障，使森林覆盖率从 5.05% 提升至 13.57%，不仅遏制了土地沙化蔓延趋势，更显著

改善了区域小气候和生物多样性^[5]。在草原生态修复方面，蒙古国因地制宜推行“草畜平衡”和围栏封育措施，通过科学规划载畜量、限制过度放牧，实现了退化草场的自然休养生息。数据显示，这些措施使退化草场植被盖度提高15%–20%，草原生态系统的自我修复能力逐步恢复。湿地作为“地球之肾”，其修复对调节水文、净化水质意义重大。荷兰的“还地于河”计划极具创新性，通过拓宽河道、拆除堤坝、恢复洪泛区等工程，不仅使莱茵河沿岸湿地面积增加200平方公里，更将洪水风险降低30%，实现了防洪安全与生态保护的双重目标。这一系列实践表明，精准施策的生态修复工程能够有效逆转生态退化趋势，为区域生态系统的可持续发展注入新动能。

（二）水资源管理策略

1. 优化水资源调配

加强水资源的统一管理和调配，是应对气候变化的关键举措^[6]。根据不同地区的水资源需求和气候变化情况，需建立动态化、科学化的水资源分配机制。以以色列为例，该国通过“国家输水工程”构建起覆盖全国的供水网络，结合全球领先的海水淡化技术，将水资源循环利用率提升至90%，不仅保障了农业灌溉与城市居民用水，还实现了沙漠农业的奇迹；中国南水北调工程更是世界规模最大的调水工程，截至目前，东、中线工程累计调水超580亿立方米，直接惠及沿线4.2亿人口，有效缓解了北方地区水资源短缺的困局^[7]。同时，数字化技术为水资源管理带来革新。利用数字孪生技术构建水资源管理平台，可实现对水资源的实时监测、精准模拟与智能调控。澳大利亚墨累–达令盆地引入动态配水模型，通过整合气象数据、土壤墒情和作物需水信息，将灌溉用水效率提高25%，显著降低了农业耗水量；美国加州采用物联网传感器网络，实时监控地下水水位与水质变化，辅助管理者制定科学的地下水开采计划。此外，新兴的人工智能算法还能预测极端气候下的水资源危机，提前制定应急预案，为区域水资源安全筑牢数字防线。

2. 推广节水技术与措施

在工农业生产和居民生活中，大力推广节水技术和措施。农业领域，滴灌技术在以色列的普及率达90%，使单位面积用水量减少40%–60%；中国新疆棉花种植采用滴灌技术后，亩均节水300立方米^[8]。工业方面，新加坡采用“新生水”技术，将工业

废水处理回用，工业用水循环利用率达50%；居民生活中，日本通过推广节水马桶和感应水龙头，人均日用水量从2000年的350升降至2020年的280升。此外，征收水资源税和实行阶梯水价制度，可有效引导公众节水行为。

（三）产业调整策略

1. 发展低碳农业

农业是受气候变化影响较大的产业之一，同时也是温室气体排放的重要来源。丹麦通过推广有机农业和农牧循环模式，使农业温室气体排放较1990年减少25%；中国浙江湖州“桑基鱼塘”系统通过物质循环利用，每亩减少碳排放1.2吨。此外，采用精准农业技术，如变量施肥和无人机植保，可降低化肥使用量15%–20%；发展“稻田养鱼”“林下养鸡”等复合种养模式，既能提高土地产出，又能减少甲烷排放^[9]。

2. 推动绿色能源产业发展

能源产业是应对气候变化的关键领域。德国通过“能源转型”（Energiewende）计划，将可再生能源占比从2000年的6%提升至2023年的46%，累计减少碳排放超1.2亿吨；中国可再生能源装机容量连续8年位居世界第一，2022年风电和光伏发电量占全社会用电量的15.8%。政府可通过制定可再生能源强制配额制、绿色电力证书交易等政策，激励企业投资；同时，加强储能技术研发，如钠离子电池和压缩空气储能，解决可再生能源间歇性问题，推动能源结构深度转型^[10]。

四、结束语

气候变化对区域生态环境的影响是多方面且深远的，涉及生物多样性、水资源、生态系统结构与功能等重要领域。这些影响不仅威胁着生态系统的稳定与可持续发展，也对人类社会的经济发展和福祉造成严重挑战。通过实施生态保护、水资源管理、产业调整等一系列适应策略，可以在一定程度上缓解气候变化对区域生态环境的不利影响，增强生态系统的适应能力和韧性。然而，应对气候变化是一项长期而艰巨的任务，需要政府、企业、社会组织和公众的共同努力。未来，应进一步加强气候变化的监测与研究，不断完善适应策略和政策措施，推动区域生态环境的可持续发展，实现人与自然的和谐共生。

参考文献

- [1] 刘世荣. 气候变化对中国森林生态系统的影响及适应对策 [J]. 生态学报, 2018, 38 (12): 4121–4132.
- [2] 张卫国. 气候变化对草原生态系统的影响及适应策略 [J]. 草业学报, 2019, 28 (5): 185–196.
- [3] 段学军. 湿地生态系统对气候变化的响应与适应研究进展 [J]. 地理科学进展, 2020, 39 (4): 567–577.
- [4] 朱永官. 低碳农业发展的理论与实践 [M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [5] 胡春宏, 张晓明, 于坤霞, 等. 黄河流域水沙变化趋势多模型预测及其集合评估 [J]. 水利学报, 2023, 54(7).
- [6] 薛帆, 晁智龙, 何亮, 等. 近70年来不同地貌和植被类型区水沙特征演变及其对生态恢复的响应 [J]. 生态学报, 2023, 43(8).
- [7] 王宗涛, 王勇. 多元主体参与黄河流域生态环境修复的困境与纾解 [J]. 人民黄河, 2023, 45(7). DOI: 10.
- [8] 岳萌, 耿广坡, 王涛, 等. 2000–2019年黄河流域陕西段植被NDVI时空变化及其驱动因素分析 [J]. 水土保持研究, 2023, 30(2).
- [9] 张志高, 孙梓欣, 张秀丽, 等. 1960–2020年黄河流域气候生长季时空演变及成因分析 [J]. 干旱区研究, 2023, 40(10).
- [10] 任保平, 李培伟. 黄河流域高质量发展与生态保护耦合协调的现代化治理体系 [J]. 人民黄河, 2023, 45(9).

广州南沙区域水处理设施的智能化管理与高效运行策略分析

梁子豪

身份证号: 440682199107101355

DOI: 10.61369/EAE.2025010006

摘要： 介绍广州南沙区域水处理设施，包括建设运营特点，分析智能化管理现存问题。阐述其智能化管理技术框架、数字孪生等技术应用，还涉及智慧化运维平台、泵站联调等措施，以及多维评价指标体系、市场化运营机制探索等内容，强调其意义与需深化研究方向。

关键词： 南沙；水处理设施；智能化管理

Analysis of Intelligent Management and Efficient Operation Strategies for Water Treatment Facilities in Nansha Area, Guangzhou

Liang Zihao

ID: 440682199107101355

Abstract： This paper introduces the water treatment facilities in Nansha District, Guangzhou, including their construction and operation characteristics, and analyzes the existing problems of intelligent management. It elaborates on the technical framework of intelligent management, the application of digital twin and other technologies, as well as measures such as intelligent operation and maintenance platform and joint debugging of pumping stations. Additionally, it explores the multi-dimensional evaluation index system and market-oriented operation mechanism, emphasizing its significance and the need for further research.

Keywords： Nansha; water treatment facilities; intelligent management

引言

随着我国对水资源保护和水环境治理的日益重视，如2021年发布的《“十四五”节水型社会建设规划》强调了提高水资源利用效率和加强水环境治理的重要性。南沙区域水处理设施的建设与运营在这一背景下显得尤为关键。其设施分布、处理能力、工艺应用等方面呈现出一定特点，但同时智能化管理存在诸多问题。从技术框架设计到数字孪生、深度学习算法的应用，再到智慧化运维平台建设等一系列举措，都旨在实现南沙区域水处理设施的智能化管理与高效运行，以满足政策要求和区域发展的需要，提升水资源利用效率和水质保障能力。

一、南沙区域水处理设施现状分析

（一）设施建设与运营现状

南沙区域水处理设施在建设运营方面呈现出一定特点。在污水处理厂分布上，呈现出与区域人口分布和产业布局相关的格局，部分区域分布较为密集，以满足当地污水处理需求^[1]。其处理能力各有不同，一些大型污水处理厂承担着主要的处理任务。主流工艺应用方面，A²/O工艺在脱氮除磷上有一定成效，能有效处理生活污水等常见污水类型；MBR工艺则在水质净化深度上表现出色，出水水质较好。管网覆盖率影响着污水收集效率，部分区域覆盖率较高，但仍存在一些有待完善的地方。中水回用比

例是衡量水资源循环利用的关键指标，目前该比例有待进一步提高，以实现更好的水资源可持续利用。

（二）智能化管理现存问题

南沙区域水处理设施智能化管理存在诸多现存问题。SCADA系统集成度不足，无法实现对水处理各环节数据的高效整合与实时监控，影响了管理决策的及时性与准确性。水质预测模型精度低，难以对水质变化进行精准预估，不利于提前采取有效的处理措施。能耗管理粗放，未能充分利用智能化手段优化能源消耗，增加了运行成本。在工业废水冲击负荷下，应急响应存在缺陷，无法快速有效地应对突发情况，可能导致水质恶化等不良后果^[2]。

二、智能化管理技术体系构建

（一）智慧水务技术框架设计

广州南沙区域水处理设施智能化管理的技术框架设计为包含物联网感知层、边缘计算层、云平台决策层的三级架构。物联网感知层通过水质多参数在线监测，实时获取水质数据，为后续处理提供基础信息^[3]。边缘计算层采用分布式 PLC 控制，对感知层传来的数据进行初步处理和分析，实现对水处理设施的局部控制和优化。云平台决策层则综合各方面数据，利用大数据分析和智能算法，做出更全面、更科学的决策，对整个水处理系统进行宏观调控，以提高水处理设施的运行效率和管理水平，实现智能化管理与高效运行。

（二）关键技术应用实践

数字孪生技术在水力模型仿真中具有重要应用。通过构建物理实体的虚拟模型，实现对水处理设施水力系统的精确模拟^[4]。这有助于提前预测水流状态、压力分布等关键参数，为设施的优化设计和运行提供决策支持。同时，深度学习算法在曝气量动态调控方面展现出显著的优化效果。它能够根据水质变化、微生物活动等多种因素，实时调整曝气量，提高曝气效率，降低能耗。深度学习算法通过对大量历史数据的学习和分析，建立起输入输出之间的复杂映射关系，从而实现曝气量的精准控制，保障水处理过程的高效稳定运行^[4]。

三、高效运行策略优化路径

（一）运行模式创新

1. 智慧化运维平台建设

为实现广州南沙区域水处理设施的高效运行，需建设智慧化运维平台。该平台应具备设备健康度评估功能，通过实时监测设备运行数据，运用数据分析算法，准确评估设备的健康状况，及时发现潜在故障风险^[5]。同时，设置预防性维护提醒功能，依据设备的运行时长、使用频率以及健康度评估结果，智能生成维护计划并及时提醒工作人员，确保设备维护的及时性和有效性。此外，平台还应包含能效对标分析功能，对比不同设备以及不同时间段的能效数据，为优化设备运行参数和能源利用效率提供依据，从而提升整个水处理设施的运行效率和经济性。

2. 动态调度机制优化

建立基于潮汐规律的泵站联调方案，通过分析潮汐的周期性变化，合理调整泵站的运行时间和流量，实现水资源的高效利用和减少能耗^[6]。例如，在涨潮时，适当减少泵站的排水流量，利用潮汐的顶托作用，避免污水的过度排放；在落潮时，增加排水流量，及时排出污水。同时，开发雨季合流制溢流智能控制算法，根据实时的降雨量和污水流量，智能控制合流制管道的溢流情况。通过传感器实时监测降雨量和污水流量，当降雨量超过一定阈值时，算法自动调整合流制管道的阀门开度，优先排放雨水，减少污水溢流对环境的污染。

（二）管理机制创新

1. 全流程绩效考核体系

制定涵盖处理达标率、吨水药耗、碳排放强度的多维评价指标体系，对于水处理设施的高效运行至关重要。处理达标率直接反映了设施的处理效果，是衡量其是否满足环境要求的关键指标^[7]。吨水药耗则涉及到运营成本和环境影响，合理控制药耗既能降低成本，又能减少化学药剂对环境的潜在危害。碳排放强度指标体现了设施在运行过程中的能源利用效率和对气候变化的影响，有助于推动设施向低碳运行模式转型。通过综合考虑这些指标，建立全流程绩效考核体系，可以激励运营团队不断优化管理机制，提高水处理设施的整体运行效率和环境效益。

2. 市场化运营机制探索

在市场化运营机制探索方面，研究 PPP 模式在污泥资源化项目中的应用路径具有重要意义。PPP 模式能够整合政府与社会资本的优势资源，提高项目的运营效率和服务质量^[8]。通过合理的风险分担和利益共享机制，激发社会资本的积极性 and 创新能力。同时，设计基于水质担保的服务采购方案也是关键。该方案以水质达标为核心目标，促使运营方采取有效的技术和管理措施，确保水处理设施的稳定运行和出水水质符合标准。这不仅保障了公众的用水安全，也为市场化运营提供了明确的绩效评价依据，有利于促进水处理行业的健康发展。

四、水处理技术方向与发展前景

（一）前沿技术应用方向

1. 低碳处理技术发展

厌氧氨氧化工艺在工业废水处理中具有重要应用前景。该工艺具有无需外加碳源、污泥产量低等优点，适用于低碳氮比的工业废水处理^[9]。通过利用厌氧氨氧化菌的特殊代谢途径，能够高效去除废水中的氨氮和亚硝酸盐氮，实现废水的高效脱氮。同时，光伏-污水处理耦合系统也是低碳处理技术的一个重要发展方向。这种系统将光伏发电与污水处理相结合，利用太阳能污水处理过程提供能源，不仅降低了污水处理的能耗，还提高了能源利用效率，具有良好的经济可行性^[9]。这些低碳处理技术的发展为水处理行业的可持续发展提供了新的思路和方法。

2. 新材料应用突破

石墨烯膜组件在水处理深度处理阶段展现出显著性能优势。其具有超高的渗透性和选择性，能够高效地分离水中的杂质和污染物，极大地提高了水的净化程度^[10]。同时，功能性生物填料也对处理效能起到了重要的提升作用。这类填料通过特殊的表面结构和化学成分，为微生物提供了良好的附着环境，促进了微生物的生长和代谢，从而增强了对水中有机物等污染物的分解和去除能力，进一步提高了水处理设施的整体处理效果，推动了水处理技术在新材料应用方面的突破与发展。

（二）智慧水务发展前景

1. 数字孪生系统深化应用

数字孪生技术在水务领域的应用前景广阔。在管网渗漏智能

诊断方面，未来有望通过更精确的传感器网络和先进的数据分析算法，实现对管网渗漏的实时监测和精准定位。这将大大提高维修效率，减少水资源浪费。在工艺参数动态优化上，数字孪生系统可结合实时运行数据和模拟模型，对水处理工艺参数进行动态调整。例如，根据水质变化和流量波动，自动优化药剂投放量和处理时间等参数，提高水处理效果和能源利用效率。同时，随着人工智能和大数据技术的不断发展，数字孪生系统的智能化水平将不断提升，为水务设施的高效运行提供更强大的支持。

2. 人工智能决策支持

机器学习在智慧水务的人工智能决策支持方面具有重要应用前景。在异常工况预警中，可通过对水处理设施大量运行数据的学习，建立模型识别异常模式。例如，监测水质变化、设备运行参数偏离正常范围等情况，及时发出预警，避免故障扩大。在多目标优化调度方面，能综合考虑水质达标、能耗降低、设备使用寿命等多个目标。根据实时数据和预测信息，制定合理的调度策略，如优化水泵运行时间、药剂投放量等，提高水处理设施的运行效率和经济性，实现智能化管理与高效运行。

（三）政策保障体系构建

1. 标准规范体系建设

在水处理技术方向与发展前景中，标准规范体系建设至关重要。应针对智能化设施建设制定相关标准，明确技术要求和性能指标，确保设施的质量和可靠性。同时，确立数据交互协议等配套技术规范，保障不同设备和系统之间的数据准确、高效传输。这有助于实现水处理设施的智能化管理与高效运行。在政策保障方面，政府应出台鼓励性政策，推动企业积极参与标准规范的制

定和执行。通过构建完善的标准规范体系，为水处理技术的发展提供坚实的基础，促进广州南沙区域水处理设施的智能化水平提升，实现高效运行，提高水资源利用效率和水质保障能力。

2. 区域协同发展机制

构建粤港澳大湾区水环境治理信息共享平台是区域协同发展的关键举措。通过整合各方数据资源，实现水质监测、污水处理设施运行等信息的实时共享，提高决策的科学性和精准性。同时，探索跨境生态补偿机制实施路径至关重要。应明确补偿的标准和方式，依据生态服务价值评估结果，合理确定补偿额度。在区域协同发展机制下，加强粤港澳三地在政策、技术、资金等方面的合作，共同推动南沙区域水处理设施的智能化管理与高效运行，促进大湾区水环境质量的整体提升。

五、总结

南沙区域水处理设施智能化管理与高效运行具有重要意义。通过智能化升级的技术路径探索以及管理创新模式实践，数字技术为传统水务带来转型契机。智能化管理提升了设施运行效率，增强了水处理能力。同时，管理创新模式优化了资源配置，提高了决策科学性。然而，目前仍需在一些方面持续深入研究。完善智慧水务标准体系，能够规范行业发展，确保设施运行的准确性和可靠性。集成应用低碳技术，符合环保理念，有助于实现可持续发展。加强湾区环境治理协同，可整合区域资源，提升整体环境治理效果，推动南沙区域水处理设施向更智能、更高效方向发展。

参考文献

- [1] 左金星, 曹长春, 崔赞璐, 等. 南方小城镇污水处理现状和发展探讨 [J]. 水科学与工程, 2011(6):3.
- [2] 段金平. 广州市南沙区盐碱地植被景观生态恢复的植物种类选择与配置 [D]. 华南农业大学, 2010.
- [3] 罗洁枝. 广州南沙港口物流发展策略研究 [D]. 广东工业大学, 2016.
- [4] 凌霄, 徐志标. 珠江三角洲城市群水资源区域一体化研究 [J]. 给水排水, 2016, 42(10):5.
- [5] 孙盛智. 军用仓库智能化管理系统研究与实现 [D]. 南京邮电大学, 2011.
- [6] 周秋婷, 谢婼, 梁汝雯, 等. 对广州南沙湿地旅游资源及其开发的探讨 [J]. 旅游纵览月刊, 2015(07):126-127.
- [7] 康洪. 南沙软土地基处理综合研究 [D]. 中南大学, 2010.
- [8] 肖建成. 广州南沙新区开发建设的几点思考 [J]. 商场现代化, 2013(4):152.
- [9] 肖建成. 广州南沙建设城市副中心探讨 [J]. 魅力中国, 2016(11):261.
- [10] 杜敏. 基于 SWOT 分析的广州南沙保税港区发展对策研究 [J]. 物流技术, 2013(5).

工业废水处理厂污泥含水率智能监测与 高效脱水技术优化

陈秀芳

佛山市南海西樵鑫龙水处理有限公司, 广东 佛山 528000

DOI: 10.61369/EAE.2025010007

摘要： 文章介绍了传统污泥含水率监测技术和脱水工艺的局限，阐述了多源感知数据融合方法、LSTM – CNN混合神经网络模型等创新技术在污泥含水率监测与脱水过程中的应用，还涉及多种技术对脱水效率的影响以及运行经济性对比等内容，指出当前研究的不足和未来方向

关键词： 污泥含水率；监测技术；脱水工艺

Optimization of Intelligent Monitoring and Efficient Dewatering Technology for Sludge Moisture Content In Industrial Wastewater Treatment Plant

Chen Xiufang

Foshan Nanhai Xiqiao Xinlong Water Treatment Co., LTD. Foshan, Guangdong 528000

Abstract： This article introduces the limitations of traditional sludge moisture content monitoring technology and dewatering processes. It expounds on the application of innovative technologies such as multi-source perception data fusion methods and the LSTM–CNN hybrid neural network model in sludge moisture content monitoring and the dewatering process. It also covers the influence of various technologies on dewatering efficiency and the comparison of operation economics. Additionally, it points out the deficiencies of current research and future directions.

Keywords： sludge moisture content; monitoring technology; dewatering process

引言

随着环保要求的不断提高（如2023年发布的相关环保政策强调加强工业废水处理监管），工业废水处理厂污泥含水率的监测与脱水技术优化成为关键课题。传统的人工采样检测法和离线干燥法等含水率监测技术以及机械压滤和热干化等脱水工艺存在诸多局限，如监测时效性差、准确性受影响以及运行效率低下、能耗高且易造成二次污染等问题。在此背景下，多源感知数据融合方法、智能算法的应用以及对脱水机理的研究等为解决这些问题提供了新思路，对实现污泥含水率的智能监测与高效脱水技术优化具有重要意义。

一、工业污泥处理技术现状与问题分析

（一）传统含水率监测技术局限性

人工采样检测法和离线干燥法是传统的含水率监测技术，但存在诸多局限性。人工采样检测法需要人工定期采集污泥样本，然后在实验室进行分析，这一过程耗时较长，导致时效性差。而且在采样、运输和分析过程中可能会引入误差，随着时间推移误差不断累积，影响监测结果的准确性。离线干燥法同样需要较长时间来获取结果，不能及时反映污泥含水率的变化情况。此外，传感器单一参数监测也存在不足，仅依靠某一个参数来判断含水率可能会受到其他因素的干扰，无法全面、准确地反映污泥的真实含水率状况^[1]。

（二）脱水工艺运行效率瓶颈

机械压滤和热干化是常见的污泥脱水工艺，但存在诸多运行

效率瓶颈。机械压滤在处理大量污泥时，能耗会显著增加，同时处理量难以满足工业生产需求，导致整体效率低下^[2]。热干化工艺虽能有效降低污泥含水率，但能耗过高，限制了其大规模应用。此外，在污泥脱水过程中，为提高脱水效果，往往会过量投加药剂。这不仅增加了处理成本，还可能造成二次污染，对环境产生不利影响^[2]。这些问题严重制约了脱水工艺的运行效率，亟待解决。

二、污泥含水率智能监测系统构建

（一）多源感知数据融合方法

该部分主要探讨多源感知数据融合方法。为实现准确的污泥含水率监测，构建基于介电常数传感器、近红外光谱仪和图像识别技术的多模态数据采集系统。介电常数传感器可通过测量污泥

的介电特性来反映含水率^[9]。近红外光谱仪则利用近红外波段的光谱特征与污泥含水率之间的关系进行检测。图像识别技术可从污泥的图像中提取相关特征用于含水率分析。通过对这些不同来源的数据进行融合,综合考虑各传感器的优势和特点,能够更全面、准确地获取污泥含水率信息,为后续的智能监测和高效脱水技术优化提供可靠的数据基础。

(二) 深度学习预测模型开发

构建 LSTM - CNN 混合神经网络模型用于污泥脱水过程的含水率预测与异常预警。LSTM (长短期记忆网络) 善于处理时间序列数据,能捕捉到污泥脱水过程中含水率随时间变化的趋势^[14]。CNN (卷积神经网络) 则在特征提取方面具有优势,可提取污泥相关数据中的关键特征。将两者结合,充分发挥各自优势。首先对污泥脱水过程中的相关数据进行收集与整理,包括污泥的初始性质、处理过程中的温度、压力等参数以及不同阶段的含水率实测值。然后对数据进行预处理,如归一化等操作,使其适合模型输入。接着构建 LSTM - CNN 混合模型,确定网络结构和各层参数。通过大量的训练数据对模型进行训练和优化,使模型能够准确预测污泥含水率,并在含水率出现异常时及时预警。

三、高效脱水工艺优化机理研究

(一) 脱水过程关键参数解析

1. 污泥微观结构演变规律

通过 SEM-EDS 联用技术研究絮体结构、孔隙率与脱水效率的关联机制。污泥微观结构对脱水过程至关重要,絮体结构的完整性和孔隙率大小直接影响水分的脱出效率。研究发现,结构紧密且孔隙率适中的絮体更有利于脱水。SEM 技术可直观呈现絮体的微观形态,分析其颗粒大小、形状及排列方式。EDS 则能确定元素组成及分布,进一步揭示污泥的化学特性。综合两者结果,深入了解絮体结构与脱水效率之间的内在联系,为高效脱水工艺的优化提供理论依据^[15]。

2. 压力场 - 温度场耦合效应

在高效脱水工艺中,压力场与温度场的耦合效应至关重要。机械压滤过程中,压力的施加促使污泥中的水分排出,同时,热力作用改变了污泥的物理化学性质,如降低其黏度,增强水分的流动性^[6]。这种耦合效应使得脱水过程更加高效。压力场的分布影响着水分在污泥中的迁移路径,而温度场则通过改变污泥内部的分子运动状态来促进水分的分离。两者相互协同,在合适的压力和温度条件下,能够打破污泥中水分与固体颗粒之间的吸附力和结合力,从而实现更好的脱水效果。深入研究这种耦合效应,对于优化脱水工艺参数,提高脱水效率具有重要意义。

(二) 脱水药剂智能调控策略

1. 新型复合调理剂研发

开发基于生物炭基的阳离子聚合物 - 纳米材料复合调理体系。将生物炭与阳离子聚合物及纳米材料复合,利用生物炭的大比表面积和吸附性能,增强对污泥中水分的吸附和固定作用^[7]。阳离子聚合物可中和污泥颗粒表面的负电荷,促进颗粒聚集,减

少颗粒间的静电斥力,从而有利于脱水过程。纳米材料的加入则进一步改善了复合调理剂的性能,可能通过其特殊的物理化学性质,如小尺寸效应、表面效应等,增强对污泥结构的破坏和水分的释放。这种复合调理体系有望提高污泥的脱水效率,为工业废水处理厂污泥含水率的降低提供新的技术手段。

2. 动态加药控制系统

构建模糊 PID 控制算法实现药剂投加量与污泥性质的实时匹配是动态加药控制系统的关键。该算法结合了模糊控制和 PID 控制的优点,能够根据污泥的实时性质,如含水率、粘度等,准确地调整药剂投加量^[8]。模糊控制部分用于处理不确定的污泥性质信息,通过模糊规则和推理,将污泥性质的模糊描述转化为药剂投加量的模糊调整量。PID 控制部分则用于对模糊调整量进行精确的调节,确保药剂投加量能够快速、稳定地达到最佳值。通过这种方式,实现了药剂投加量与污泥性质的实时匹配,提高了脱水效率,降低了药剂消耗。

四、质量控制与工程应用验证

(一) 监测系统可靠性验证

1. 数据采集误差控制

在数据采集误差控制方面,采用卡尔曼滤波算法消除传感器信号噪声。该算法通过对系统状态的最优估计,有效降低了噪声对测量数据的干扰,提高了数据的准确性和可靠性^[9]。同时,建立三级校准体系。一级校准在传感器生产环节进行,确保传感器的初始精度;二级校准在安装前进行,针对安装环境对传感器进行微调;三级校准在运行过程中定期开展,以适应设备老化和环境变化等因素带来的影响。通过这一系列措施,从数据采集源头严格控制误差,为工业废水处理厂污泥含水率的智能监测提供了高质量的数据基础。

2. 模型泛化能力测试

为验证模型的泛化能力,采用迁移学习方法对不同行业废水处理厂进行验证。首先收集多个行业废水处理厂的污泥含水率数据以及相关运行参数数据,构建多源数据集。将预训练模型应用于这些数据集,观察模型在不同行业场景下的性能表现。通过对比不同行业数据上的预测准确率、均方误差等指标,评估模型的泛化能力。结果表明,经过迁移学习优化后的模型在不同行业废水处理厂中均能取得较好的预测效果,证明了模型具有较强的泛化能力,可适用于多种行业的污泥含水率智能监测,为工业废水处理厂污泥含水率监测系统的可靠性提供了有力支撑^[10]。

(二) 脱水工艺优化效果评估

1. 能耗比评价模型

构建单位处理量综合能耗指标体系,涵盖机械能、热能及药剂消耗,以评估脱水工艺优化效果。机械能主要考虑污泥脱水设备运行所需电耗等;热能涉及加热过程中的能量损耗;药剂消耗则包括在污泥处理中各类化学药剂的使用量。通过精确测量和统计这些能耗指标,建立能耗比评价模型。该模型可综合反映脱水工艺在实际运行中的能耗情况,对比优化前后的数据,直观展现

工艺优化对能耗的影响。同时，依据模型分析结果，可进一步挖掘节能潜力，为持续优化脱水工艺提供有力依据，实现工业废水处理厂污泥脱水过程的高效节能。

2. 脱水产物特性分析

检测优化后污泥的资源化利用指标至关重要。污泥热值是衡量其能源潜力的关键因素，通过精确测量发现，经过脱水工艺优化后，污泥热值有所提升，这为其后续可能的能源化利用提供了更好的基础。同时，重金属固化率也是不容忽视的指标。优化后的工艺使得重金属固化率提高，减少了重金属在环境中的迁移性和生物可利用性，降低了对环境的潜在危害。这些指标的改善表明脱水工艺优化不仅在降低含水率方面有成效，还在提升污泥资源化利用价值和环境安全性上具有积极作用。

(三) 工程示范应用研究

1. 智能脱水车间建设

某工业园区废水处理厂进行了全流程自动化改造，其中智能脱水车间建设是关键部分。该车间采用先进的智能监测设备，对污泥含水率进行实时精准监测。通过传感器等技术，将数据及时反馈至控制系统。在设备方面，选用高效节能的脱水设备，并进行合理布局，以提高脱水效率。同时，建立了完善的自动化控制系统，可根据监测数据自动调整设备运行参数，确保脱水效果稳定。车间还配备了专业的维护团队，定期对设备进行检查和维护，保障设备正常运行。此外，对车间的运行数据进行详细记录和分析，以便不断优化工艺，提高智能脱水车间的整体性能，实

现污泥含水率的有效降低和处理效率的提升。

2. 运行经济性对比

对工业废水处理厂污泥含水率智能监测与高效脱水技术优化后的系统与传统工艺进行运行经济性对比。从年度运维成本来看，智能监测与优化技术可能减少了人工频繁检测的成本以及因监测不及时导致的设备故障维修成本。同时，高效脱水技术可能降低了脱水设备的能耗以及相关化学药剂的使用量，从而减少药剂采购成本。在处理效率方面，智能监测能够实时反馈数据，使操作人员可及时调整参数，提高污泥处理的整体效率，减少处理时间，进而可能降低整体运营成本。通过这些关键指标的对比，可直观体现该技术优化的经济优势。

五、总结

工业废水处理厂污泥含水率的监测与脱水技术优化至关重要。多源感知与智能算法为含水率监测带来创新，可更精准地获取数据。机械-化学协同脱水机理的揭示，有助于提高脱水效率。基于数字孪生的污泥处理系统则为未来发展指明方向，能更好地模拟和优化处理过程。然而，当前研究在复杂水质适应性和设备耐久性方面存在改进空间。复杂水质条件下监测技术的准确性和脱水技术的有效性需进一步提升，同时设备的耐久性也关乎技术的长期稳定运行，这都是后续研究需要重点关注方向，以实现污泥含水率的智能监测与高效脱水技术的进一步完善。

参考文献

[1] 徐佩佩. 建筑泥浆高效综合脱水技术研究 [D]. 东南大学, 2015.
[2] 罗文培. 泥浆电渗脱水试验与理论研究 [D]. 郑州大学, 2022.
[3] 马旭. 化学调理剂对市政污泥脱水性能及理化性质的影响研究 [D]. 西安建筑科技大学, 2018.
[4] 朱红敏. 电渗脱水污泥热干化特性研究 [D]. 天津大学, 2013.
[5] 何足道, 王电站, 颜成, 等. 城市污泥生物沥浸法和化学法调理的效果比较——对污泥理化性质及其深度脱水性能的影响研究 [J]. 中国环境科学, 2019, 39(03): 1019–1025.
[6] 苗起璋. 污泥高效脱水技术在国内污泥处理中的应用 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2013.
[7] 王喻, 李磊, 刘帅, 等. 不同化学调理剂对市政污泥脱水性能及脱水机理的研究 [J]. 环境科学与管理, 2022, 47(02): 107–112.
[8] 康华珊. 污泥调理对污泥理化性质及脱水性能影响的研究 [D]. 燕山大学, 2018.
[9] 吴春旭, 唐明悦, 张鸿涛, 等. 我国不同地区市政污泥理化性质及其对脱水性能的影响 [J]. 环境工程学报, 2021, 15(01): 271–278.
[10] 唐健, 张欢, 曹晶, 等. 市政污泥脱水技术的发展及展望 [J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(08): 106–114.

基于膜生物反应器的印染废水深度处理技术研究

黄涛

深圳市海景环保技术有限公司，广东 深圳 518101

DOI: 10.61369/EAE.2025010008

摘 要： 文章聚焦于印染废水深度处理中的技术问题，构建以膜生物反应器为主体的集成处理体系，系统地设计并结合了印染废水高色度、高有机负荷特性，明确膜组件配置与生化参数匹配机制，并开展了工况参数对出水水质影响的试验研究，分析污泥龄、膜通量和气水比等变量对 COD_{Cr} 与色度去除率的调控效应。结果揭示了跨膜压差增长规律与膜污染控制关键因素，评估处理后出水的达标能力与回用适配性，以此提出工艺优化路径与工程应用建议。

关 键 词： 膜生物反应器；印染废水；深度处理；膜污染控制；出水水质

Research on Advanced Treatment Technology for Printing and Dyeing Wastewater Based on Membrane Bioreactor

Huang Tao

Shenzhen Haijing Environmental Protection Technology Co., Ltd. Shenzhen, Guangdong 518101

Abstract： This article focuses on the technical issues in the advanced treatment of printing and dyeing wastewater, constructing an integrated treatment system with a membrane bioreactor as the main component. It systematically designs and combines the characteristics of high chromaticity and high organic load of printing and dyeing wastewater, clarifies the matching mechanism between membrane module configuration and biochemical parameters, and conducts experimental research on the influence of operating conditions on effluent water quality. The study analyzes the regulatory effects of variables such as sludge age, membrane flux, and air–water ratio on COD_{Cr} and chromaticity removal rates. The results reveal the growth pattern of transmembrane pressure difference and the key factors for membrane fouling control, evaluate the compliance and reuse adaptability of the treated effluent, and propose process optimization paths and engineering application suggestions based on this.

Keywords： membrane bioreactor; printing and dyeing wastewater; advanced treatment; membrane fouling control; effluent water quality

引言

印染行业在纺织加工过程中产生大量高浓度、高色度、高有机负荷的废水，其成分复杂、水质波动大，常规生化处理难以稳定达到排放或回用标准。膜生物反应器技术结合膜分离与生物降解优势，具备出水水质稳定、占地面积小、抗负荷冲击能力强等特点，已在印染废水深度处理领域展现出良好应用前景^[1]。随着水资源保护与循环利用需求的不断提升，探索适用于印染废水深度净化的高效膜生物反应器已成为工程实践中的关键方向。

一、印染废水水质特征与处理难点分析

印染废水在生产各阶段均产生大量含有助剂、染料、表面活性剂及其他有机化学品的高浓度复合废水，水质变化频繁，具有高色度、高 COD_{Cr}、高盐分、低可生化性等典型特征。废水中常见的活性染料与分散染料结构稳定，分子中含有苯环、偶氮基、硝基等难降解基团，导致生物处理过程中微生物难以有效分解，去除效率受限^[2]。废水 COD_{Cr} 常维持在 800 ~ 2000 mg/L，色

度超过 200 倍，部分还原染料体系 pH 波动剧烈，增加处理过程负荷。高浓度盐分抑制微生物活性，并对膜结构造成物理胀缩与孔隙堵塞风险。废水中含有的胶体颗粒和可溶性有机物易在膜面形成浓差极化层，加剧膜污染速率，降低膜通量，影响出水水质稳定性。印染废水处理还需面对进水水质波动幅度大、峰值冲击频繁等复杂工况，需具备良好的缓冲能力与高容忍度的技术路径^[3]。

作者简介：黄涛（1987.05—），男，汉族，湖北潜江人，研究方向：环境工程。

二、MBR 处理工艺设计与运行参数设定

（一）工艺流程设计

膜生物反应器处理单元设置于预处理段与后续深度净化之间，整体构建以稳定进水、有机负荷削减、产水达标为目标的连续流工艺路径^[4]。预处理区设置格栅和沉淀装置用于初步去除大颗粒悬浮物及部分无机杂质，调节池用于平衡水质与水量，确保进入膜生物反应器段的有机负荷处于稳定区间。生化处理段采用完全混合式曝气池，配合膜组件池构成主体单元，曝气区配置微孔曝气盘与循环搅拌器，形成稳定的溶氧环境与泥水混合态^[5]。膜分离区安装中空纤维膜组件，设置产水抽吸泵维持恒定负压，抽吸侧配置压力监测与反洗控制装置，利用间歇抽吸和周期反洗策略调控膜污染发展速率。

（二）反应器与膜组件参数配置

反应器主体为矩形钢结构池体，内部衬以环氧树脂防腐涂层，反应有效容积为3.5 m³，设置溢流调节口与观察窗，便于日常维护与运行监控^[6]。反应区采用一体化设计，将曝气区与膜池区隔离布置，曝气区容积占比65%，配比合理以利于有机物降解与泥龄维持。膜组件选用中空纤维型PVDF材质，膜孔径为0.1 μm，单组膜面积20 m²，总装膜面积80 m²，安装方式为立式悬挂，膜束分布均匀、流体扰动良好。产水方向自内向外，抽吸负压维持在-15 kPa以内，设置气水联合清洗管路 with 反洗接口，采用鼓风机辅助气体冲刷模式增强膜面扰动效果。膜组件框架采用不锈钢材质，具备可拆卸结构，便于更换与清洗操作^[7]。

（三）试验运行参数与控制条件设置

水力停留时间设定为6 h，反应器污泥浓度维持在MLSS 8000 ~ 10000 mg/L区间，以维持高效生物降解能力。污泥龄控制在25 d，采用间歇排泥策略，基于每日SV30观测数据动态调整排泥频率与时长。曝气量控制在每小时3.2 m³，配置变频风机联动溶解氧探头实时调节供气强度，溶解氧浓度稳定维持在2.0 ~ 3.5 mg/L之间^[8]。膜抽吸采用周期运行模式，抽吸持续8分钟，停止2分钟，周期性反洗每2小时进行1次，反洗时间设置为30秒，反洗流速为产水流速的1.5倍^[9]。膜通量计算采用以下公式：

$$J = \frac{Q}{A}$$

其中，J为膜通量（L/m² · h），Q为单位时间产水量（L/h），A为有效膜面积（m²）。跨膜压差监测频率为每15分钟一次，预警值设定为25 kPa，超过后执行强力气水反洗流程。系统自动记录出水流量、膜压、曝气频率等核心运行参数，并通过上位机软件形成数据曲线，支持过程追溯与运行优化分析^[10]。水温控制范围维持在18 ~ 28℃，环境条件记录并计入数据分析变量。

三、运行效果分析与技术评价

（一）CODcr与色度去除效果分析

在连续运行30天的稳定负荷阶段内，监测进出水的CODcr与色度变化情况，形成典型处理周期内的波动曲线。图1显示原水

CODcr波动范围在950 ~ 1450 mg/L之间，平均为1190 mg/L。图2可见色度集中在220 ~ 310倍，平均色度为265倍。MBR出水的CODcr稳定控制在40 ~ 85 mg/L之间，平均值为62 mg/L，整体去除率维持在92.3%以上；色度出水范围为5 ~ 18倍，平均为11倍，对应平均去除率达95.8%。结果表明，在曝气强度、污泥浓度和膜抽吸控制参数维持恒定的条件下，有机污染物与染料结构在复合生化-膜分离耦合机制下可实现高效协同去除，且未观察到负荷积压或性能劣化现象。

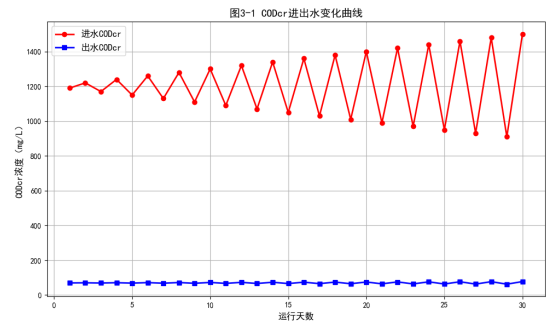


图1 CODcr进出水日变化曲线

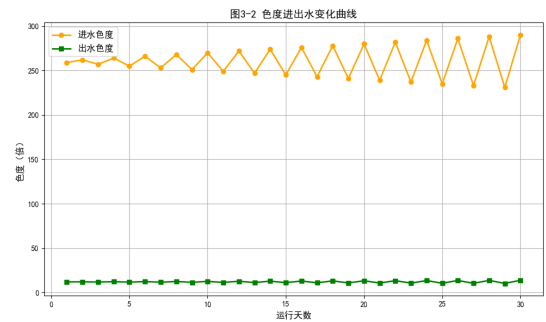


图2 色度进出水日变化曲线

（二）膜污染发展规律与控制策略

跨膜压差（TMP）在稳定运行初期维持在9 ~ 12 kPa区间，反洗周期为每2小时1次，每次持续30秒，配合10分钟/2分钟的抽吸/停止间歇策略维持膜表面负荷平衡。随着运行时间延长至第12天后，TMP呈缓慢上升趋势，至第20天达到17.6 kPa，出现轻微膜面污染积累，出水通量略有下降。调整反洗频率至每小时1次，并在第21天实施气水联合强清洗，TMP降至11.2 kPa并保持稳定，恢复原有抽吸流量。在第30天末端，TMP稳定维持在13.1 kPa，未出现不可逆堵塞风险。膜污染发展表现出周期性积累—恢复规律，与产水间歇结构密切相关，强化在线反洗与气体扰动对控制污染速率效果显著，具体见图3。

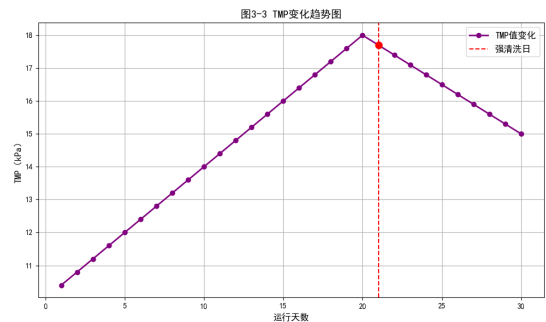


图3 TMP变化趋势及反洗干预节点示意图

(三) 出水水质达标情况与对比分析

以《纺织染整工业水污染物排放标准》(GB 4287-2012)为对比依据,对出水主要水质参数进行达标评估,如表1。出水CODcr平均为62 mg/L,远低于一级标准(80 mg/L);氨氮平均为4.2 mg/L,满足一级标准限值(8 mg/L);色度控制在11倍内,优于标准上限(40倍);悬浮物、pH、溶解氧等指标亦处于合格区间。MBR出水可满足印染废水达标排放要求,具备直接回用前置基础,若配合活性炭或纳滤系统,可以具有进一步再利用潜力。

表1 出水水质与排放标准对比表

指标	出水平均值	标准限值(一级)	是否达标
CODcr	62 mg/L	80 mg/L	是
色度	11 倍	40 倍	是
氨氮	4.2 mg/L	8.0 mg/L	是
SS	5 mg/L	20 mg/L	是
pH	7.3	6 ~ 9	是

四、关键影响因素与优化探究

(一) SRT (污泥龄) 对处理效果的影响

污泥龄作为调控微生物代谢结构与反应器稳定运行的关键变量,对有机物去除效率及膜组件运行状态具有显著影响。在运行过程中,当SRT控制在25 d左右,MLSS浓度维持在9000 mg/L上下,可形成稳定的菌群结构,保障对难降解染料及中分子有机物的持续降解能力。试验中进一步延长SRT至35 d,观察到出水CODcr及色度无明显改善,反而出现污泥沉降性能下降、SVI升高至190 mL/g的趋势,间接导致膜面负荷加重,通量略有下降,TMP积累速率加快。相反,在缩短SRT至15 d的阶段,污泥活性虽有所提升,但对复杂染料分子的截留降解效果明显减弱,色度去除率降低至85%以下,说明生物群落未能充分适应高负荷条件下的染料降解需求。综合分析表明,维持中长SRT有助于微生物群落结构稳定,有利于持久应对印染废水的成分复杂性和冲击负荷波动。

(二) 膜污染控制优化策略研究

在运行周期内的TMP监测结果表明,污染积累呈现出典型的“缓升—跃增—恢复”三阶段特征,污染的核心驱动机制来自

于高浓度有机胶体物质和高盐背景下的膜孔堵塞与膜面附着层厚化。在连续运行初期,采取固定反洗频率和标准气水比清洗方式对污染具有抑制作用,但当运行周期接近20 d时,TMP升高速率加剧,标准反洗频率无法有效控制膜阻增长,需调整为高频反洗(1 h/次)并引入错流扰动策略。采用间歇式强曝气扰动并结合反向抽吸,在21天后有效降低TMP至初始阶段水平,通量恢复率达92%以上。此类控制模式对高色度废水中的微絮体、微生物代谢产物(SMP)及可溶性微污染物(DOM)聚集影响的响应效果优于常规反洗策略。此外,在膜组件布局优化过程中,将膜片间距调整至4 mm,并采用底部均布鼓风气孔板,使局部死角流减少40%以上,进一步延缓了表面膜层形成周期。

(三) 深度处理与回用适配性探讨

在原始处理单元出水基础上,出水CODcr已优于《纺织染整工业水污染物排放标准》(GB4287)一级排放限值,色度控制在20倍以下,氨氮、SS等指标亦处于优良状态,具备作为回用水源的基础条件。进一步检测中发现,残余微量染料、溶解有机碳(DOC)及部分表面活性剂在出水中仍有检测,需配合后续精密处理单元进行截留与去除。在实际工程可行性上,采用超滤—活性炭吸附组合段可使色度降至5倍以下,CODcr进一步降至30 mg/L左右;若采用纳滤或反渗透作为末端强化,可实现印染废水在漂洗、定型或冷却等环节的回用。运行经济性评估表明,以膜生物反应器为核心段构建的处理路径相较常规“好氧+A/O”工艺,在占地缩减35%、自动化水平提升的前提下,单位水量处理成本提升控制在12%以内,具备高标准排放或企业内部中水回用的技术潜力。建议后续工程中针对目标用途设计分级深度净化路径,实现技术适配性与经济合理性的双向兼顾。

五、结论

膜生物反应器在应对印染废水高色度、高有机负荷特性条件下表现出稳定的处理性能,其关键运行参数如污泥龄、膜通量控制与反洗频率对出水质量和膜运行状态具有显著影响,动态反洗与气水扰动结合可有效抑制污染积累趋势。污泥负荷管理与膜组件结构优化协同调节能够提升运行连续性与出水一致性,在处理目标明确的场景中结合深度处理单元可满足不同回用需求,具有良好的技术可控性与资源化拓展潜力。

参考文献

[1] 张璐,刘惠,严明.膜生物反应技术在环境工程污水处理中的应用研究[J].造纸装备及材料,2024,53(12):129-131.
[2] 戴雅,谢新敏.膜生物工艺优化及其在煤矿废水零排放中的应用[J].能源与节能,2024,(10):135-137.
[3] 张亚兵.膜生物反应器在医疗废水处理中的应用[J].中国资源综合利用,2024,42(09):258-260.
[4] 顾军,赵敏燕,栾燕,等.膜生物反应器及其在工业废水处理中的应用[J].化工设计通讯,2024,50(08):134-136.
[5] 潘卿.膜生物反应技术在环境工程污水处理中的应用探讨[J].清洗世界,2024,40(07):76-78.
[6] 刘垚.膜生物反应技术在环境工程污水处理中的应用[J].石材,2024,(07):87-89.
[7] 张波,王高骏,付鹏,等.高浓度氨氮对厌氧膜生物反应器处理养猪废水的抑制影响及生物炭缓解效能[J].环境工程学报,2024,18(05):1283-1291.
[8] 张昱,王辰,韩子铭,等.厌氧膜生物反应器处理抗生素废水研究进展与展望[J].环境工程学报,2024,18(03):623-633.
[9] 李灿,黄斌,古航坤,等.厌氧膜生物反应器—纳滤/反渗透处理印染废水[J].水处理技术,2021,47(06):98-103.
[10] 刘鲁建,董俊,张岚欣,等.粉末活性炭膜生物反应器深度处理印染废水的中试[J].化学与生物工程,2021,38(01):43-46.

基层实验室检测大豆粗脂肪酸值方法优化

王一荣, 吴新连, 黄镇源, 许铎峰, 张昱泉
中储粮广州质检中心有限公司, 广东 广州 510800
DOI: 10.61369/EAE.2025010009

摘要 : 粗脂肪酸值是判断大豆储存品质的重要指标, 然而检测步骤繁琐, 耗时较长。本文通过通过对称样量、使用的滴定液浓度等方面进行探索, 结果表明, 称样量和滴定溶液浓度均能影响大豆粗脂肪酸值的检测。当称样量为2g, 滴定液浓度为0.02mol/L时, 检测结果与国标法相比差异较小, 且可提高检测效率, 大大方便检验员检测。

关键词 : 大豆; 粗脂肪酸值; 方法优化

Optimization of Method for Detecting Crude Fatty Acid Value of Soybeans in Grassroots Laboratories

Wang Yirong, Wu Xinlian, Huang Zhenyuan, Xu Duofeng, Zhang Yuquan
China Grain Reserves Corporation Guangzhou Quality Inspection Center Co., Ltd. Guangzhou, Guangdong 510800

Abstract : The crude fatty acid value is an important indicator for judging the storage quality of soybeans, but the detection steps are cumbersome and time-consuming. This article explores through aspects such as symmetrical sample size and the concentration of the titrant used. The results show that both the sample size and the concentration of the titrant can affect the detection of soybean crude fatty acid value. When the sample size is 2g and the titrant concentration is 0.02mol/L, the difference between the detection results and the national standard method is small, and it can improve the detection efficiency, greatly facilitating the inspector's detection.

Keywords : soybean; crude fatty acid value; method optimization

引言

大豆是中国重要粮食作物之一^[1], 已有五千年栽培历史, 是我国的主要粮食作物。大豆种子含有丰富植物蛋白质和脂肪, 并含有多
种氨基酸^[2], 尤其是人体不能合成的必需氨基酸成分比较平衡, 故有“植物肉”的美称。

大豆营养成分丰富, 在储存期间由于受到微生物、酶等作用, 或被空气中的氧所氧化, 会发生氧化酸败和水解酸败, 造成大豆粗
脂肪酸值增加^[3]。大豆粗脂肪酸值与大豆储藏品质有很好的相关性, 因而我国将其作为储粮劣变指标, 判断大豆的储存品质。在 GB/T
31785-2015中规定: 当粗脂肪酸值 $\leq 3.5\text{mgKOH/g}$ 时, 判定为宜存; 粗脂肪酸值 $\leq 5\text{mgKOH/g}$ 时, 判定为轻度不宜存; 粗脂肪酸值
 $> 5\text{mgKOH/g}$ 时, 判定为重度不宜存^[4]。

按照 GB/T 31785-2015 要求, 大豆粗脂肪酸值应先按 GB/T 14488.1-2008 提取, 再按照 GB 5009.229 进行检测。GB 5009.229
中规定了三种检测方法, 即第一法冷溶剂指示剂滴定法、第二法冷溶剂自动电位滴定法、第三法热乙醇指示剂滴定法和第四法分光光度
法。GB 5009.229-2025 将于 2025 年 9 月 16 日实施, 与 GB 5009.229-2016 相比, GB 5009.229-2025 第一法、第二法和第三法适用范
围完全一致, 因此, 选择适合的检测方法可以大大提高检测效率。四种方法中, 第一法、第二法所需试剂为无水乙醚和异丙醇, 其中无
水乙醚是易制毒试剂, 管理严格、试剂申购保管手续负杂, 且毒性较大, 不适用于基层实验室检测。第三法所用试剂为乙醇, 试剂管理
相对简单, 且毒性较低。因此, 在实际使用过程中, 热乙醇法检测大豆粗脂肪酸值更加便捷, 更适用于基层实验室检测。

然而, 国标法检测酸值所需油样用量较大, 酸值在 (0-1) mg/g 时的最小称样量为 20g, 酸值在 (1-4) mg/g 时的最小称样量为
10g。目前常用的索氏抽提方法提取粗脂肪耗时较长, 且一次提取量有限, 单次提取较难满足国标要求。本实验选用不同的滴定方法,
饼通过对最小称样量、使用的滴定液浓度等方面进行探索, 针对基层实验室实际情况, 进一步优化大豆粗脂肪酸值检测流程, 提高检测
效率, 降低检测成本。

作者简介: 王一荣 (1993.03-), 女, 山西晋城人, 硕士研究生, 研究方向: 粮油检测。

一、材料与方法

（一）原料

所用原料均为美国产高油大豆，预估酸值为0mg/g-4mg/g。

（二）试剂及材料

石油醚，沸点为30℃-60℃；KOH-95%乙醇滴定液，0.1mol/L、0.05mol/L、0.02mol/L；无水乙醇，分析纯；酚酞指示剂，10g/L；乙醚，分析纯；异丙醇，分析纯；滤纸筒、脱脂棉。

（三）仪器

分析天平，感量0.01g及0.0001g；锤式旋风磨；加热板；水浴锅；索氏抽提器；全自动索氏抽提仪；电热鼓风干燥箱；微量滴定管，10mL，最小刻度0.02mL；量筒，50mL。

（四）样品准备

将样品缩分至100g左右，使用锤式旋风磨将样品粉碎，混匀，装入样品袋备用。

（五）试样处理

1.粗脂肪的制备。参照 GB/T 14488.1-2008《植物油料 含油量测定》，用全自动索氏抽提仪提取粗脂肪。

2.无水乙醇的准备。量取所需无水乙醇，每100mL加入酚酞0.5mL，置于电热板上加热至微沸。趁热用滴定液对无水乙醇滴定至微红色，且15s内无明显褪色时，乙醇酸性被中和。将溶液置于电热板上保持微沸，备用。

3.冷溶剂法滴定酸值。称取制备好的油样（m），精确至0.01g，加入乙醚-异丙醇混合液50mL和3滴-4滴的酚酞指示剂，充分振摇溶解试样。用KOH标准滴定液滴定，当出现微红色，且15s不褪色时，为滴定的中点，立刻停止滴定，记录滴定所消耗的毫升数V。

用50mL乙醚-异丙醇混合液，加入3-4滴酚酞指示剂，重复上述步骤，记录滴定所消耗的毫升数V₀。

4.热乙醇法滴定酸值。称取制备好的油样（m），精确至0.01g，加入保持微沸的无水乙醇50mL，用KOH标准滴定液趁热滴定。当出现微红色，且15s不褪色时，为滴定的中点，立刻停止滴定，记录滴定所消耗的毫升数V。

热乙醇指示剂滴定法无需进行空白试验。

（六）结果表示

1.粗脂肪酸值。按下式计算：

$$X=56.1 \times c \times (V-V_0) / m$$

式中，X为酸值(mg/g)；V为油样消耗KOH标准滴定液的体积(mL)；V₀为相应的空白测定所消耗的标准滴定溶液的体积(mL)；c为KOH标准滴定溶液的浓度(mol/L)；m为油样的称样量(g)；56.1为KOH的摩尔质量(g/mol)。

当酸值≤1mg/g，计算结果保留2位小数；1mg/g<酸值≤100mg/g，计算结果保留1位小数；酸值>100mg/g，计算结果保留整数。

2.精密度。根据GB 5009.229精密度要求：当酸值<1mg/g，在重复条件下获得的2次独立测定结果的绝对差值不得超过算

数平均值的15%；当酸值≥1mg/g，在重复条件下获得的2次独立测定结果的绝对差值不得超过算数平均值的12%^[3]。

二、结果与分析

（一）不同检测方法对大豆油酸值的影响

选取大豆油样4个，用GB 5009.229中第一法和第三法检测大豆油的酸值，探究不同检测方法对大豆油酸值的影响。

表1 不同滴定方法酸值结果

序号	1	2	3	4	5
第一法 冷溶剂法 / (mg/g)	0.68	1.9	2.7	3.5	4.6
第三法 热乙醇法 / (mg/g)	0.59	1.7	2.5	3.3	4.3
绝对差值 /%	0.09	0.1	0.2	0.2	0.3
相对相差 /%	14.1	11.1	7.7	5.9	6.7

表1可知，与冷溶剂法相比，热乙醇法检测大豆油酸值结果较低，但相对相差满足GB 5009.229要求，热乙醇法与冷溶剂法检测大豆粗脂肪酸值无显著性差别。

（二）称样量对热乙醇法检测粗脂肪酸值的影响

选取粗脂肪酸值大于1mg/g的大豆油样4个，分别称取2g、5g、10g油样，用0.1mol/L的KOH-95%乙醇滴定液对大豆粗脂肪酸值进行检测，探究称样量对酸值的影响。检测结果见表2。

表2 不同称样量酸值结果

称样量 /g	酸值 / (mg/g)			
	1	2	3	4
10	1.7	2.5	3.3	4.3
5	1.6	2.4	3.2	4.3
2	1.3	2.1	2.9	4.0

表2可得，随着称样量的减少，同一样品的粗脂肪酸值逐渐减少，且酸值含量越低，受到的影响越大。这可能是由于称样量的减少，滴定液消耗逐渐减少，滴定过程变短。同时，由于滴定过程中褪色较快，较多的称样量褪色较慢，称样量减少可能导致滴定终点较快到达，检测结果偏低。

（三）滴定液浓度对热乙醇法检测酸值的影响

称取10g油样，分别用0.02mol/L、0.05mol/L、0.1mol/L的KOH-95%乙醇滴定液对大豆粗脂肪酸值进行检测，探究滴定液浓度对酸值的影响。检测结果见表3。

表3 不同滴定液浓度粗脂肪酸值结果

滴定液浓度 / (mol/L)	酸值 / (mg/g)			
	1	2	3	4
0.1	1.7	2.5	3.3	4.3
0.05	1.9	2.6	3.5	4.6
0.02	2.0	2.9	4.0	5.1

表3可得，随着滴定液浓度的减少，同一样品的粗脂肪酸值逐渐增加，且酸值含量越高，受到的影响越大。这可能是由于滴定液浓度的降低，滴定液消耗量较大，滴定过程变长，导致滴定终点延迟，检测结果偏高。

（四）热乙醇法检测粗脂肪酸值方法优化

根据（一）和（二）可以得出，称样量和滴定液浓度对滴定

液消耗量均有不同程度的影响，从而导致滴定过程发生变化，使得检测结果产生偏离。为保证滴定液消耗量基本一致，采用称样量和滴定液同步减少的方式，对上述大豆样品粗脂肪酸值进行检测，优化大豆粗脂肪酸值的检测方法，检测结果见表4。

表4 方法优化后粗脂肪酸值结果

称样量 /g	10	2	相对相差 /%
滴定液浓度 / (mol/L)	0.1	0.02	
1	0.44	0.39	12.0
2	0.59	0.53	10.7
3	0.83	0.73	12.8
4	1.3	1.2	8.0
5	1.5	1.6	6.5
6	1.7	1.6	6.1
7	2.2	2.2	0.0
8	2.5	2.3	8.0
9	2.7	2.9	7.1
10	3.3	3.2	3.1
11	3.4	3.2	6.0
12	3.7	3.9	5.3
13	4.3	4.1	4.8
14	4.5	4.4	2.2
15	4.9	4.8	2.1

表4可得，同步减小油样质量和滴定液浓度后，酸值检测结果略小于国标法检测结果，但整体差异不大。采用2g油样，用0.02mol/L的KOH-95%乙醇滴定液检测大豆粗脂肪酸值，与国标法要求的10g油样，用0.1mol/L的KOH-95%乙醇滴定液检测相比，检测结果相近，符合国标规定的精密度要求。因此，可以采用称量2g油样，使用0.02mol/L浓度滴定液的方法检测大豆粗脂肪酸值。

三、基层实验室检测大豆粗脂肪酸值方法优化

作为大豆储存品质指标，在大豆入库过程中需定期开展粗脂肪酸值的检测，确保入库大豆符合国标GB/T 31785的贮存要求。然而，日常检测过程中，如何高效检测大豆粗脂肪酸值长期困扰着检验员。

（一）大豆脂肪含量与粗脂肪酸值检测结合方法优化

大豆粗脂肪酸值首先需要提取大豆脂肪，之后进行检测。若能将大豆脂肪含量与粗脂肪酸值检测结合起来，可大大提高大豆入库检测效率。

根据脂肪测定仪厂家说明书，脂肪测定仪最大处理量为10g，经抽提可获得大豆脂肪2g。根据前文的实验，可用热乙醇法检测，并同步缩小称样量与滴定液浓度，实现脂肪含量和粗脂肪酸值同步检测，减少检测流程，提高入库效率。优化后的大豆入库检测脂肪含量和粗脂肪酸值的步骤为：称取10g大豆粉，用脂肪抽提仪抽提3h，用2.3中提出的优化后的热乙醇法滴定抽提出的约2g大豆脂肪，计算即可得出脂肪含量和粗脂肪酸值。

（二）优化后检测时间及成本对比

综上所述，若需同时检测大豆脂肪含量及粗脂肪酸值，可采用3.1中优化后的检测方法同步检测脂肪含量与粗脂肪酸值。与国标方法相比，优化后检测时间及成本对比见表5。

表5 检测时间及成本对比

	抽提时间	试剂消耗	场地要求
国标法	10h	2000mL	5个通风橱
优化后的检测方法	3h	100mL	1个通风橱

相较于传统的国标法，采用脂肪测定仪进行大豆脂肪含量的测定以及粗脂肪酸值的检测，不仅实现了两项指标的合并检测，极大地提升了检测效率，而且还显著缩短了抽提所需的时间。此外，在测定粗脂肪酸值时，优化后的方法仅需2克的油样，有效降低了因多次抽提而产生的石油醚的消耗量。同时，由于抽提次数及时间的减少，通风橱的使用频率也相应降低。最后，优化后的方法采用了热乙醇法，而不使用冷溶剂法，这样可无需再采购乙醚这一特殊试剂，从而大大缩短了采购周期，降低了采购成本。

四、结论

在大豆粗脂肪酸值的检测过程中，需先采用索氏抽提的方法对大豆的脂肪进行提取，之后检测大豆粗脂肪含量。按照国标要求，称取10g或20g的油样检测大豆粗脂肪酸值，则需抽提较长时间，并抽提多次后进行混合，提取耗时长，样品集并操作复杂。

实际检测过程中，可采用全自动索氏抽提仪抽提10g大豆粉，提出油样2g，用0.02mol/L的KOH-95%乙醇滴定液进行检测。采用优化后的大豆粗脂肪酸值检测方法，用于提取大豆脂肪的石油醚仅需150mL，检测时间由10h缩短为4h，且检测结果与国标基本一致。综上所述，优化后的检测方法可用于大豆粗脂肪酸值的检测，可为大豆粗脂肪酸值快速检测提供参考。

参考文献

- [1] 张来林, 金文, 周杰生, 等. 充氮气调对大豆制油品质的影响 [J]. 河南工业大学学报 (自然科学版), 2010, 31(6): 11-14.
- [2] 张玉荣, 寇含笑, 吴琼, 等. 高油大豆储藏过程中的营养品质变化研究 [J]. 食品科技, 2022, 47(02): 207-214.
- [3] 郑有涛, 曾剑豪, 孙玉萍, 进口大豆储存期间品质变化研究 [J/OL]. 中国油脂.
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 大豆储存品质判定规则: GB/T 31785—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [5] 王宇, 李建鹏, 赵德柱, 等. 热乙醇法和冷溶剂法测定大豆油酸值比较研究 [J]. 中国食品工业, 2022 (07): 101-104.
- [6] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品中酸价的测定: GB 5009. 229—2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

污水处理厂对区域生态环境的长期影响分析

潘倩仪

佛山市淳悦环境科技有限公司，广东 佛山 528300

DOI: 10.61369/EAE.2025010010

摘要： 本文阐述了污水处理厂多方面的内容。介绍了活性污泥法和膜生物反应器等技术及其问题。探讨了不同区域生态系统对污水处理的敏感性与承载力。分析了污水处理厂尾水排放、污泥处置等对环境的影响，还涉及对生物多样性、碳平衡的影响以及相关工艺优化、运维管理、风险评估、生态补偿等方面，强调构建生态风险管理框架的重要性。

关键词： 污水处理厂；生态环境；技术优化

Long Term Impact Analysis of Sewage Treatment Plants on Regional Ecological Environment

Pan Qianyi

Foshan Chunyue Environmental Technology Co., Ltd. Foshan, Guangdong 528300

Abstract： This article elaborates on various aspects of sewage treatment plants. Introduced technologies and issues such as activated sludge process and membrane bioreactor. Explored the sensitivity and carrying capacity of different regional ecosystems to sewage treatment. Analyzed the impact of wastewater treatment plant effluent discharge and sludge disposal on the environment, as well as their impact on biodiversity, carbon balance, and related process optimization, operation and maintenance management, risk assessment, ecological compensation, etc., emphasizing the importance of building an ecological risk management framework.

Keywords： sewage treatment plant; ecological environment; technical optimization

引言

随着城市化进程的加速，污水处理成为保障生态环境可持续发展的关键环节。2022年发布的《“十四五”城镇污水处理及资源化利用发展规划》强调了污水处理在生态环境保护中的重要性。污水处理厂作为污水处理的核心设施，其运行对区域生态环境影响深远。从活性污泥法和膜生物反应器等技术应用的利弊，到不同区域生态系统的敏感性与承载力差异，再到尾水排放、污泥处置、污染物排放对水环境、土壤 - 地下水的的影响，以及对生物多样性、温室气体排放等方面的作用，都需要深入研究。同时，基于生态安全的工艺优化、智慧化运维管理、综合风险评估框架构建、生态损益货币化计量模型建立以及三方联动治理模式和差异化生态补偿标准体系制定等措施，对科学应对污水处理厂的影响至关重要。

一、污水处理厂运行现状与区域生态特征

（一）污水处理技术发展概况

活性污泥法是污水处理中常用的方法，其通过微生物的代谢作用去除污水中的有机污染物。该方法具有处理效果好、运行成本相对较低等优点，在许多污水处理厂得到广泛应用^[1]。然而，活性污泥法也存在一些技术瓶颈，如污泥膨胀问题可能导致处理效果下降，需要复杂的控制措施来维持系统稳定。膜生物反应器作为一种新兴的污水处理技术，结合了生物处理和膜分离的优势，具有出水水质好、占地面积小等特点。但膜污染问题是其面临的主要挑战，这不仅会增加运行成本，还会影响膜的使用寿命

和处理效率。

（二）典型区域生态环境本底分析

不同气候带、水文特征的区域生态系统具有独特的敏感性与承载力特征。在干旱地区，水资源匮乏，生态系统对水的敏感性极高，其承载力也相对较低，污水处理厂的运行可能对有限的水资源产生关键影响^[2]。湿润地区水资源丰富，但可能面临水质污染对生态系统的冲击问题，其生态系统对水质变化敏感，承载力受水质影响较大。在具有特殊水文特征的区域，如河流交汇处或湿地周边，生态系统更为复杂多样，其敏感性体现在多个方面，包括对水位变化、水质成分等，承载力则取决于多种生态因子的综合作用。

二、长期运行对生态环境的多维度影响

（一）水环境系统累积效应

污水处理厂长期运行尾水排放对水环境系统产生累积效应。尾水排放影响受纳水体自净能力，持续输入的尾水中含有一定量的营养物质及污染物，改变水体的化学组成和物理性质，干扰水体中原有的自净过程，降低其自净效率^[9]。同时，对微生物群落结构产生渐进式改变。尾水中的成分与原水体不同，长期排放使得微生物生存环境发生变化，一些对环境变化敏感的微生物数量可能减少，而适应新环境的微生物可能逐渐成为优势种，从而改变整个微生物群落结构，影响水体生态系统的物质循环和能量流动等功能。

（二）土壤-地下水复合污染路径

污水处理厂长期运行中，污泥处置不当是导致土壤-地下水复合污染的重要因素。污泥中含有的重金属等污染物，在雨水冲刷、地表径流等作用下，可能会迁移至土壤中。随着时间推移，这些污染物会在土壤中逐渐积累，并可能通过土壤孔隙等通道进一步下渗至地下水。其污染路径受多种因素影响，如土壤的质地、孔隙度、含水量等，这些因素会影响污染物在土壤中的迁移速度和扩散范围^[10]。同时，地下水的流动也会使污染范围进一步扩大，导致地下水污染风险在时空上发生演变，对区域生态环境造成长期的潜在威胁。

三、生态环境影响的作用机制解析

（一）污染物迁移转化机理

1. 氮磷元素的生物地球化学循环

污水处理厂排放的污染物中，氮磷是关键成分。在生态环境中，氮磷元素存在复杂的生物地球化学循环过程。氮可通过多种形态（如氨氮、硝态氮等）在水体、土壤和生物间迁移转化。污水处理厂排放的含氮物质进入环境后，会改变原有氮循环的平衡。例如，过量的氨氮可能抑制水生生物的呼吸作用，影响水体生态系统的结构和功能^[9]。磷元素在环境中主要以正磷酸盐等形式存在，其迁移转化受土壤吸附、解吸以及生物吸收等过程影响。污水处理厂排放的磷可能导致土壤和水体中磷含量升高，引发水体富营养化等问题，进而干扰区域生态系统的氮磷平衡。

2. 新兴污染物的生态毒理效应

药物残留、微塑料等新兴污染物在生态系统中具有复杂的迁移转化过程和生态毒理效应。这些污染物可通过多种途径进入环境，如污水处理厂排放的出水可能含有残留的药物成分以及微塑料颗粒。它们在环境中迁移时，可能会被生物吸收，并随着食物链传递发生生物放大作用。例如，一些水生生物可能会摄取含有污染物的食物，随着营养级的升高，污染物在生物体内的浓度逐渐增加，从而对处于食物链顶端的生物产生更严重的影响，威胁生态系统的平衡和稳定^[6]。同时，新兴污染物还可能具有独特的生态毒理效应，如干扰生物的内分泌系统、影响生殖能力等。

（二）生态系统响应机制

1. 水生生物多样性演变趋势

污水处理厂的运行对水生生物多样性有着复杂的影响机制。污水排放改变了水体的物理化学性质，如温度、溶解氧、营养物质含量等，这些变化直接影响水生生物的生存环境^[7]。一些对环境变化敏感的物种可能会减少甚至消失，而一些耐污物种则可能

趁机大量繁殖，导致生物群落结构发生改变。从生物完整性指数角度来看，水质的变化会反映在生物多样性的多个层面，包括物种丰富度、均匀度以及优势种的变化等。长期而言，这种生物多样性的演变可能会进一步影响生态系统的功能和稳定性，如物质循环和能量流动过程可能受到干扰，最终影响整个区域的生态健康状况。

2. 陆生生态系统间接影响路径

污水处理厂在运行过程中会排放温室气体，这对区域碳平衡产生长期影响。温室气体排放改变了区域内的碳通量，影响了大气中二氧化碳等气体的浓度。一方面，排放的温室气体增加了大气的温室效应，可能导致局部气温升高，进而影响陆生生态系统的气候条件。气温变化会改变植物的生长周期和分布范围，一些物种可能因不适应新的温度环境而减少或消失，影响生态系统的生物多样性。另一方面，碳平衡的改变可能影响土壤中碳的含量和循环，土壤微生物的活动也会随之改变，进一步影响植物对养分的吸收和利用，从而对整个陆生生态系统产生间接影响^[8]。

四、生态环境管理对策与咨询服务体系

（一）全过程污染防控技术体系

1. 基于生态安全的工艺优化方案

污水处理厂应注重基于生态安全的工艺优化。深度处理技术可进一步去除污水中的污染物，提高出水水质，减少对受纳水体的潜在生态风险^[9]。例如，采用高级氧化工艺可有效降解难降解有机物。同时，资源回用技术是工艺优化的重要方向。通过膜分离等手段，将处理后的污水进一步净化，实现水资源的回用，用于工业冷却、城市绿化等，提高水资源的利用效率，降低对新鲜水资源的依赖，从而在保障生态安全的同时，实现污水处理厂的可持续发展。

2. 智慧化运维管理系统

污水处理厂的智慧化运维管理系统对于提高处理效率和降低环境风险至关重要。设计融合物联网与大数据的水质预警平台架构是关键举措之一^[10]。通过物联网技术，可实时监测污水处理过程中的各项参数，如水质指标、流量、设备运行状态等。将这些数据传输至大数据平台进行分析处理，能够及时发现异常情况并发出预警。这有助于运营人员快速采取措施，避免污染事故的发生。同时，基于大数据分析结果，可以对污水处理厂的运行进行优化，提高处理效果，减少能源消耗和化学药剂的使用，实现更加可持续的污水处理运营模式。

（二）生态环境影响评估方法

1. 长期生态风险评价模型

为准确评估污水处理厂对区域生态环境的长期影响，需开发包含时空异质性的综合风险评估框架作为长期生态风险评价模型的一部分。考虑生态系统的复杂性和动态变化，时空异质性的纳入至关重要。在空间维度上，需分析污水处理厂不同区域以及周边不同地理位置的生态环境特征差异。在时间维度上，要研究长

期过程中生态环境指标的变化趋势。通过整合多源数据,包括水质、土壤、生物群落等方面的数据,结合先进的数学模型和分析方法,对污水处理厂运营过程中可能产生的生态风险进行量化评估,从而为生态环境管理对策的制定和咨询服务体系的完善提供科学依据。

2.生态系统服务价值核算

污水处理厂对区域生态环境的影响涉及多个方面,在生态系统服务价值核算中,需建立污水处理设施生态损益的货币化计量模型。这一模型应综合考虑污水处理厂运行过程中对生态系统各项服务功能的影响。例如,对水资源净化服务价值的改变,原本受污染的水体经处理后水质提升,带来一定的正向价值;而在土地利用方面,污水处理厂的建设占用土地,可能导致该区域原有生态系统提供的如栖息地服务等功能价值降低。通过对这些不同方面的生态服务价值进行量化,并以货币形式体现,能够更直观地评估污水处理厂对区域生态环境的长期影响,为合理规划和管理工作提供科学依据。

(三) 环境管理决策支持系统

1.多主体协同治理机制

构建政府-企业-公众三方联动的环境治理新模式是解决污水处理厂对区域生态环境长期影响的关键。政府应制定严格的环境政策和监管措施,确保污水处理厂达标排放,同时加大对环保产业的扶持力度。企业作为污水处理的主体,要积极采用先进的污水处理技术,提高污水处理效率,减少污染物排放。公众则应增强环保意识,积极参与环境监督,对污水处理厂的运行情况监督进行监督和反馈。通过三方协同治理,可以形成强大的合力,共同应对污水处理厂对区域生态环境的长期影响,实现区域生态环境

的可持续发展。

2.生态补偿制度设计

制定基于环境容量的差异化生态补偿标准体系是生态补偿制度设计的关键。需综合考虑污水处理厂所在区域的环境容量,包括水体自净能力、土壤承载能力等。对于环境容量较大的区域,补偿标准可相对较低,而对于环境容量较小且生态脆弱的区域,应提高补偿标准。同时,要精确评估污水处理厂的排放对区域生态环境各要素的影响程度,以此为依据确定不同要素对应的补偿权重。例如,对水体生态系统造成的影响权重可能高于对局部大气环境的影响权重。通过科学合理地构建这一标准体系,能更有效地激励污水处理厂积极采取措施减少对区域生态环境的长期影响,实现生态环境的可持续发展。

五、总结

污水处理厂对区域生态环境存在多方面长期影响。从水质改善来看,长期稳定运行可有效净化污水,减少污染物排放,改善水体环境,对水生生态系统的稳定和生物多样性保护具有积极意义。在土壤方面,合理的污水排放和处理可避免土壤污染,保障土壤生态功能。然而,其运行过程中也可能存在潜在风险,如处理不当可能导致二次污染等。为应对这些影响,需构建包含技术革新、制度完善和公众参与的生态风险管理框架。技术革新可提高污水处理效率和质量,制度完善能确保污水处理厂规范运行,公众参与可加强监督和环保意识,从而为环境管理部门提供科学决策依据,实现区域生态环境的可持续发展。

参考文献

- [1] 李大. 污水处理厂提标改造技术对生态环境的改善研究 [J]. 房地产导刊, 2023(8):3-5.
- [2] 戴毅. L市某污水处理厂一期工程设计方案及技术研究 [D]. 哈尔滨工程大学, 2018.
- [3] 冯泽. 山阳县污水处理厂二期工程工艺设计研究 [D]. 长安大学, 2017.
- [4] 张玉涛. 进水盐度波动对污水处理厂处理效果的影响 [D]. 哈尔滨工业大学, 2015.
- [5] 谷得明, 郭昌胜, 冯启言, 等. 精神活性物质在北京市某污水处理厂中的污染特征与生态风险 [J]. 环境科学研究, 2020, 33(3):659-667.
- [6] 陈庆荣. 污水处理厂废气多层次处理方法研究 [J]. 绿色科技, 2021, 23(2):135-136.
- [7] 刘竞春. 关于污水处理厂废气多层次处理方法的研究 [J]. 资源节约与环保, 2020(7):126.
- [8] 张建兵. 关于污水处理厂废气多层次处理方法的研究 [J]. 中小企业管理与科技, 2014(12):115-116.
- [9] 康敬鹏. 滨海新区城镇污水处理厂施工技术优化与投资控制措施 [J]. 城市建设理论(电子版), 2015, 5(14):1919-1920.
- [10] 郑星宇, 何华, 黄康. 某区域生活污水处理厂工艺设计 [J]. 广东化工, 2019, 46(22):114-115.

岩土工程勘察报告编写规范与质量提升

卢宇

身份证号: 412728199303065754

DOI: 10.61369/EAE.2025010011

摘要： 阐述岩土工程勘察报告的核心作用，分析其现存问题，如数据完整性、格式标准化、参数可靠性等。介绍规范要求及不同工程应用要点，强调钻探取样率、原位测试方法等对质量的影响，还涉及技术应用、系统开发、质量控制、人员培训及行业发展建议等内容

关键词： 岩土工程勘察报告；质量问题；规范要求

Specification Compilation and Quality Improvement of Geotechnical Investigation Reports

Lu Yu

ID: 412728199303065754

Abstract： This paper elaborates on the core role of geotechnical investigation reports and analyzes existing problems such as data completeness, format standardization, and parameter reliability. It introduces specification requirements and key points for different engineering applications, emphasizing the impact of drilling sampling rates and in-situ testing methods on quality. The paper also covers technology applications, system development, quality control, personnel training, and suggestions for industry development.

Keywords： geotechnical investigation report; quality issues; specification requirements

引言

岩土工程勘察报告对工程设计、施工安全及经济效益等方面均具有关键作用。然而，当前报告存在数据完整性、格式标准化及参数可靠性等诸多问题。GB50021《岩土工程勘察规范》(2009年修订版)对报告编写提出了详细要求。同时，钻探取样率、原位测试方法、地质模型简化及参数选取等影响报告质量。管理性因素如质量控制流程缺陷及标准化建设滞后也不容忽视。在此背景下，探讨如何提升勘察报告质量，包括应用新技术、完善质量控制及建立相关体系等，具有重要的现实意义。

一、岩土工程勘察报告现状分析

(一) 勘察报告的核心作用

岩土工程勘察报告具有至关重要的核心作用。它为工程设计提供关键依据，准确的岩土参数和地质条件描述能帮助工程师合理确定基础形式、埋深等设计要素，确保工程结构的稳定性和安全性^[1]。在施工安全方面，勘察报告能提前揭示潜在的地质灾害风险，如滑坡、泥石流、岩溶等，使施工单位采取相应的预防和应对措施，避免事故发生。从经济效益角度来看，合理的勘察结果可避免因地质条件不明导致的工程变更和延误，减少不必要的成本支出，提高工程建设的整体效益。

(二) 现存典型问题剖析

当前岩土工程勘察报告存在多方面问题。在数据完整性上，部分报告存在数据缺失现象，如对某些关键地层的描述不够详细，缺少必要的原位测试数据等^[2]。格式标准化方面，不同单位

的报告格式差异较大，章节设置不统一，影响了报告的规范性和可读性。对于参数可靠性，一些报告在确定岩土参数时方法不当，未充分考虑地质条件的复杂性和不确定性，导致参数取值不准确，进而影响后续工程设计与施工的安全性和合理性。

二、勘察报告编写规范体系

(一) 国家标准规范解读

GB50021《岩土工程勘察规范》对岩土工程勘察报告的编写至关重要。在数据采集方面，规范要求详细、准确地记录岩土体的各项物理力学指标，包括岩土的类型、分布、工程性质等^[3]。对于原位测试和室内试验数据，应明确测试方法、仪器设备及试验条件，确保数据的可靠性。在成果表达上，需清晰呈现勘察目的、方法、结论等内容。应采用合适的图表，如地质剖面图、钻孔柱状图等，直观展示岩土体的空间分布和工程特性。同时，对

岩土工程问题的分析评价应基于充分的勘察数据，提出合理的工程建议，为工程设计和施工提供科学依据。

（二）行业最佳实践案例

在隧道工程勘察报告中，需详细描述地质构造、岩石特性等。例如某典型隧道工程，对地层岩性进行了精准分层，明确各层岩石的强度、完整性等指标，并结合地质勘察数据预测可能出现的不良地质情况，为隧道设计施工提供关键依据^[4]。深基坑项目勘察报告则要着重关注周边环境和地下水位等因素。如某深基坑项目，详细勘察了周边建筑物基础形式及与基坑的距离，分析了地下水位变化对基坑稳定性的影响，通过规范的勘察报告为深基坑设计和施工安全提供保障。这些案例展示了规范在不同工程中的应用要点，对提高勘察报告质量具有重要意义。

三、报告质量影响因素研究

（一）技术性影响因素

1. 勘察数据采集精度

钻探取样率和原位测试方法对岩土工程勘察报告质量影响显著。钻探取样率的高低直接关系到所获取岩土样本的代表性，若取样率过低，可能遗漏关键地层信息，导致对岩土参数的误判。原位测试方法的选择也至关重要，不同的原位测试方法适用于不同的岩土条件，其测试结果的准确性和可靠性差异较大。例如，标准贯入试验适用于砂土、粉土等，静力触探试验则更适合软土等。选择不当的原位测试方法可能无法准确获取岩土力学参数，进而影响报告中对岩土工程性质的评价。因此，合理确定钻探取样率和选择合适的原位测试方法是提高勘察数据采集精度的关键^[5]。

2. 数值模拟适用性

地质模型简化程度与参数选取对岩土工程勘察报告质量影响显著。过度简化地质模型可能导致关键地质信息缺失，无法准确反映实际地质条件，进而影响工程判断^[6]。合理的简化应在保留主要地质特征的基础上，去除次要因素。参数选取同样至关重要，不准确的参数会使数值模拟结果偏离实际情况。需综合考虑岩土体的物理力学性质、地质构造以及现场测试数据等多方面因素来选取合适参数，以提高数值模拟的适用性和勘察报告的质量。

（二）管理性影响因素

1. 质量控制流程缺陷

岩土工程勘察报告的质量受多种管理性因素影响，其中质量控制流程缺陷尤为关键。以三级校审制度为例，其执行不到位会引发错漏传递现象。在实际操作中，可能由于校审人员的疏忽、专业能力不足或时间紧迫等原因，未能严格按照校审标准对报告进行审核。这可能导致一些错误或遗漏在各个校审环节中未被发现，从而传递到最终的报告中，影响报告的准确性和可靠性，降低了岩土工程勘察报告的质量^[7]。

2. 标准化建设滞后

岩土工程勘察报告质量受标准化建设滞后影响。企业级技术

标准与国家规范衔接存在不足，企业标准可能未能及时更新以适应国家规范的修订变化^[8]。这会导致在勘察报告编写过程中，出现技术指标不一致、数据处理方法差异等问题。不同企业的勘察人员可能依据各自企业的标准执行，使得报告缺乏统一的规范和可比性。当涉及到跨地区、跨企业的项目合作时，这种差异可能会造成理解上的混乱和工作上的不便，严重影响勘察报告的质量和工程后续的顺利进行。

四、质量提升实施路径

（一）技术创新应用

1. 三维地质建模技术

BIM+GIS融合技术在复杂地层可视化表达中具有重要应用价值。该技术能够整合多源地质数据，实现对复杂地层结构的精确建模与可视化呈现^[9]。通过BIM的三维建模能力和GIS的空间分析功能，可更好地展示地层的空间分布、岩性变化等信息。这有助于岩土工程勘察人员更直观地理解地质条件，提高对复杂地层的认知能力。同时，在工程设计阶段，能为设计师提供准确的地质模型，辅助其进行合理的基础选型和结构设计。在施工过程中，也可可为施工人员提供可视化的地质指导，降低施工风险，提高工程质量和效率。

2. 智能校核系统开发

开发智能校核系统可从以下方面着手。基于专家系统构建自动化报告审查方案，需整合岩土工程领域的专业知识和经验规则，建立知识数据库，用于识别报告中的关键信息和潜在问题^[10]。利用机器学习算法对大量已审核的高质量报告进行学习训练，提高系统对不同地质条件和工程场景的适应性。开发可视化交互界面，方便工程师与系统进行交互，直观展示校核结果和问题所在。同时，建立反馈机制，使系统能根据人工审核结果不断优化自身的校核规则和算法，提升系统的准确性和可靠性。

（二）管理体系优化

1. 全过程质量控制

从野外作业到成果交付的全过程质量控制至关重要。在野外作业阶段，要确保勘察设备的精准性和可靠性，严格按照规范操作，详细记录地质信息，包括地层结构、岩石特性等。同时，对样本采集过程进行严格把控，保证样本的代表性和准确性。回到室内，对样本的测试分析要采用科学合理的方法和先进的技术手段，确保数据的真实性和可靠性。在报告编写过程中，要依据准确的数据和详细的野外记录，按照规范的格式和要求进行编写，内容应全面、客观地反映勘察结果，避免主观臆断和模糊表述。从各个环节入手，实现全链条的质量提升。

2. 数字化档案建设

设计可追溯的电子化报告管理系统架构是数字化档案建设的关键。该架构应具备全面的数据记录功能，从岩土工程勘察的原始数据采集，到报告的编写、审核、修改的每一个环节都详细记录。系统要实现数据的实时更新与同步，确保不同阶段的信息准确无误且可随时查询。通过建立严格的权限管理机制，区分不同

人员的操作权限，保证数据的安全性和保密性。同时，利用数据加密技术对重要信息进行加密处理，防止数据泄露。此外，还应具备数据备份与恢复功能，以应对可能出现的系统故障或数据丢失情况，从而有效提升岩土工程勘察报告的质量和管理效率。

（三）人员能力建设

1. 注册岩土工程师责任制

注册岩土工程师在岩土工程勘察中承担着关键责任。作为项目负责人，应具备扎实的专业知识和丰富的实践经验，能够对项目的技术方案进行准确决策。在质量方面，需建立质量终身责任制度。工程师要确保勘察过程严格遵循相关规范和标准，从野外勘探到室内试验，每一个环节都不能疏忽。对勘察数据的准确性和可靠性负责，避免因数据错误导致工程安全隐患。同时，在报告编写阶段，要综合分析各项数据，给出合理的结论和建议。若因自身技术决策失误或对质量把控不严导致工程出现问题，无论时间过去多久，都要承担相应责任，以强化其责任意识，提升工程质量。

2. 持续教育机制

建立包含新技术、新规范的企业内部培训体系是提升人员能

力的关键。该体系应涵盖岩土工程勘察的各个方面，包括地质分析、测试技术、报告编写规范等。培训内容需与时俱进，及时纳入行业内的新技术和新规范，确保员工知识的更新。培训方式可多样化，如内部专家讲座、案例分析研讨、实地操作演示等。同时，建立培训效果评估机制，通过考核、实际工作表现评估等方式，检验员工对培训内容的掌握程度，激励员工积极参与培训，不断提升自身能力，进而提高岩土工程勘察报告的质量。

五、总结

岩土工程勘察报告编写规范的实施与质量提升至关重要。需系统总结关键技术路径，包括准确的数据采集与分析方法、合理的勘察手段选择等，以确保报告的科学与准确性。同时，展望人工智能技术应用前景，其可在数据处理、模型建立等方面发挥优势，提高勘察效率与质量。此外，建立行业质量信用评价体系的建议也不可或缺。通过对勘察单位的质量信用评价，激励企业提升自身水平，规范市场竞争，保障岩土工程勘察行业的健康发展，从而为工程建设提供可靠的地质依据和技术支持。

参考文献

- [1] 周贻鑫. 中、美、欧岩土工程勘察规范对比研究 [D]. 东南大学, 2015.
- [2] 兰燕. 图里规范理论视域下科技文本翻译研究——以《岩土工程勘察报告》英译为例 [D]. 济南大学, 2022.
- [3] 王晓文. 提高岩土工程勘察质量的措施探讨 [J]. 黑龙江科技信息, 2014, 000(021): 70-70.
- [4] 张斌. 如何提升岩土工程勘察质量 [J]. 工程建设与设计, 2017(18): 2.
- [5] 曹小军. 某大型储罐工程岩土勘察研究 [D]. 西安建筑科技大学, 2015.
- [6] 李留进. 浅谈岩土工程勘察报告的编写工作 [J]. 建材与装饰, 2017(48): 2.
- [7] 韩中振, 王弟平, 张世纪. 岩土工程勘察报告编写应注意的几点问题 [J]. 建筑工程技术与设计, 2014(34).
- [8] 王弟平, 张世纪, 韩中振. 岩土工程勘察中水文地质问题 [J]. 建筑工程技术与设计, 2014, 000(034): 922-922, 869.
- [9] 姚海平, 裴生丽, 陈志国, 等. 浅谈岩土工程勘察报告的编写工作 [J]. 四川地质学报, 2014, 34(4): 5.
- [10] 刘世涛. 浅谈岩土工程勘察报告的编写工作 [J]. 投资与合作: 学术版, 2012(3): 1.

基于 DCS 控制系统的工业水处理总体设计与智能应用

白玉铃, 史玉乾*, 罗兴隆, 薛达
甘肃银光化学工业集团有限公司, 甘肃 白银 730900
DOI: 10.61369/EAE.2025010012

摘 要 : 随着现代工业快速发展, 对水资源需求呈现日益增加态势, 同时也对水处理质量和效率提出更高要求, 由此行业内对基于分布式控制系统 (DCS) 的工业水处理总体设计方案进行深入探究。基于此, 本文研究中将首先对 DCS 控制系统进行概述, 随后结合具体案例, 对工业水处理 DCS 控制系统设计方案进行探究, 并对其具体智能应用要点进行探究。

关 键 词 : DCS 控制系统; 工业水处理; 设计

Overall Design and Intelligent Application of Industrial Water Treatment Based on DCS Control System

Bai Yuling, Shi Yuqian*, Luo Xinglong, Xue Da
Gansu Yinguang Chemical Industry Group Co., Ltd. Baiyin, Gansu 730900

Abstract : With the rapid development of modern industry, the demand for water resources is increasing, and higher demands are being placed on the quality and efficiency of water treatment. This has led to a deeper exploration of the overall design of industrial water treatment systems based on Distributed Control Systems (DCS). In this study, we first provide an overview of DCS control systems, then explore the design of DCS control systems for industrial water treatment through specific case studies, and delve into the key points of their intelligent applications.

Keywords : DCS control system; industrial water treatment; design

引言

水是工业生产中不可或缺的资源, 其质量直接对产品质量和生产过程安全造成影响。随着工业规模逐渐扩大和环保要求提高, 传统水处理方法已难以满足现代工业的需求, 因此开发高效、智能的工业水处理系统占据重要地位。分布式控制系统 (DCS) 作为成熟的工业自动化控制技术, 以其高可靠性、灵活性和扩展性, 在工业水处理领域得到广泛应用。行业内技术人员工作中对基于 DCS 的工业水处理系统进行深入研究, 通过集成先进的控制策略和智能算法, 实现对水处理过程的精确控制和优化管理, 以此实现水处理过程中的关键参数进行实时监测, 还可根据水质变化自动调整处理工艺, 从而保证出水质量, 提高水资源的利用率。此外, 智能应用引入进一步提升系统智能化水平, 为工业水处理可持续发展提供技术支撑。

一、DCS 控制系统概述

DCS (Distributed Control System, 分布式控制系统) 本质为一种高度集成、模块化、分布式的自动化控制系统, 其被广泛应用于工业领域生产过程和设备控制中。该系统核心思想为, 将控制功能分散到各现场控制站或控制器上, 同时通过网络通信技术将相关控制站进行连接, 以此实现数据的实时传输、处理和监控等目标^[1]。

DCS 控制系统通常由现场控制站 / 控制器、操作员站 / 人机界面 (HMI)、工程师站以及通信网络组成。现场控制站负责采集传感器数据, 执行控制算法并输出控制信号到执行机构, 通常分

布在生产线或工艺设备的关键位置。操作员站提供图形化的用户界面, 使操作员可对生产过程、调整控制参数、查看报警信息等进行实时监控, 通常位于中央控制室。工程师站用于系统组态、编程、调试和维护, 可以加载、修改和下载控制算法、数据库和画面组态等信息。通信网络将相关站点连接起来, 实现数据的高速、可靠传输, 常用通信协议包括以太网、MODBUS、PROFIBUS 等。

DCS 系统具备分散控制和集中管理的特点, 既能提高系统可靠性和灵活性, 又能为对生产过程整体进行监控和管理提供便利条件支持, 从而优化生产流程、提高生产效率。系统采用标准化的硬件和软件接口, 具有开放性和良好的可扩展性, 可根据生产

作者简介: 白玉铃 (1996.10—) 女, 汉族, 甘肃武威, 工程师, 本科, 工业水污染防治技术与自动化
通讯作者: 史玉乾 (1974.06—), 男, 汉族, 甘肃靖远, 高级工程师, 本科, 工业水污染防治技术开发与工程融合, shiyuqian88@sohu.com,

需求增加控制站或扩展功能。DCS系统还采用冗余设计，如冗余控制器、冗余电源、冗余通信等，确保系统在恶劣环境下的稳定运行。此外，系统模块化设计使得维护和升级难度大幅下降，只需替换或升级有问题的模块，而无需对系统整体进行大规模改动^[2]。

当前，DCS控制系统被广泛应用于石油、化工、电力、冶金、造纸、制药等工业领域，其可有效实现复杂生产过程的自动化控制，提高产品质量、降低生产成本、增强生产安全性。

二、化工水处理 DCS 控制系统设计方案

（一）案例概况

为深入探究化工水处理 DCS 控制系统设计要点，本文中选取具体案例进行详细阐述。案例工程为某电厂二期百万千瓦机组“上大压小”扩建工程，该工程的化学水处理系统主要负责为#3和#4两台百万千瓦机组提供生产供水及生活用水。整个水处理设施由加药装置、净水站、综合水泵房、锅炉补给水处理单元、循环水处理系统、中水回用装置、污水处理设施以及凝结水精处理装置等八大子系统组成。

（二）DCS 控制系统架构

1.DCS 控制系统架构

DCS 控制系统主要采用三级分层控制模式，具体内容主要包括过程管理层、过程控制 I 级以及过程控制 II 级。过程管理层配置工程师工作站、操作员终端及打印设备，主要承担全厂生产过程实时监控、运行操作及系统控制功能。过程控制 I 级主要承担数据处理任务，接收上位机指令并向过程控制 II 级发送控制信号；过程控制 II 级作为现场设备执行层，主要完成现场数据采集和设备操作指令的执行工作。

2.FF 现场总线网络连接方案

案例工程设计中主要采用 Ovation 分布式控制系统架构，FF-H1 总线网络通过专用接口模块实现与 DCS 控制器的数据交互。各 FF 接口模块具备双通道设计，可同时接入两条独立的 FF-H1 总线网络。系统配置中，FF 模块输出端需连接电源调节装置，经该装置转换后接入现场接线端子箱。FF-H1 总线采用多级串联方式，主干线路可并联多个接线端子箱，网络末端必须安装 FF 专用终端匹配器，整体形成树状拓扑结构连接现场智能仪表设备，具体连接方式如图 1 所示。

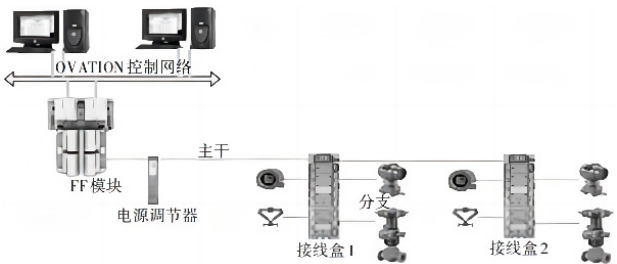


图 1 FF 网络架构

3.Profibus-DP 总线网络拓扑方案

Profibus-DP 工业总线网络通过 DP 通讯模块与 DCS 控制器建立连接，单个 DP 模块支持双路 Profibus-DP 网络接入。系统

采用标准 DB9 接口连接器实现 DP 模块与现场总线的物理连接，网络架构采用典型的线性总线拓扑。当传输距离超出标准范围时，需通过光电转换设备延伸至本地总线配电箱，随后以总线型结构连接现场设备。需重点关注的是，Profibus-DP 网络末端必须接入带有电源供应的终端电阻模块以确保信号完整性。

4.硬件 I/O 配置方案

凝结水精处理工程主要包括预处理过滤装置、离子交换装置以及再生装置等子系统，采用三组互为备份的控制单元进行管理。在规划阶段，预留各工艺环节 I/O 模块的备用通道，并对硬件接点进行了合理布局。技术人员工作中选用 16 通道数字信号采集输出模块，采用 8 通道模拟信号及温度传感器输入模块，并配置 8 通道模拟信号输出模块，以确保各组控制单元管理的总硬件接点数不超过 400 个。现场仪表分为总线式仪表和传统仪表两类，传统仪表通过硬线连接至 I/O 接口单元。现场常规监测参数包括模拟信号采集、模拟信号输出、开关信号采集及开关信号输出。具体数据如表 1 所示。

表 1 硬件 I/O 配置表

系统 I/O 类型	HAI	HAO	DI	DOX	DOX	RTD	合计
精处理系统	32	12	182	98	14	1	339
再生及共用系统	24	2	224	56	70	2	378
合计	56	14	406	154	84	3	717

DROP1/DROP51 代表互为备份的 DCS 控制单元，精处理系统配置双套控制机架。主控机柜 DROP1 与扩展机架 EXTI-1 共同构成控制单元，每套冗余控制器最大支持 16 个本地站和 4 个远程 I/O 节点。具体分布为：DROP1 机柜包含 A1-A4、B1-B4、C1-C5、D1-D8 共 8 组本地站；EXTI-1 机架设有 A1-A4、B1-B4、C1-C3、D3-D4 等接口。各本地站最大允许安装 8 个功能模块，以 DROP1 的 A 站为例，其模块编号范围为 A1 至 A8。详细硬件配置如表 2 所示。

表 2 机柜卡件配置表

DROP1		精处理系统							
CTRL1/51 正面	位置	A1	A2	A3	A4				
	模块类型	HAI	HAO	HAO	HAI				
	位置	B4	B3	B2	B1				
CTRL1/51 反面	模块类型	HAI	HAO	HAO	RTD				
	位置	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
	模块类型	DI	DI	DI	DI	DI			
EXT1-1 正面	位置	D8	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1
	模块类型	DI	DI	DI	DI	DI	DI	DI	DI
	位置	A1	A2	A3	A4				
EXT1-1 反面	模块类型	DOC	DOC	DOC	DOC				
	位置	B4	B3	B2	B1				
	模块类型	DOC	DOC	DOC	DOC				
EXT1-1 反面	位置	C1	C2	C3	C4				
	模块类型	DP	FF	FF					
	位置	D4	D3	D2	D1				
EXT1-1 反面	模块类型	DP	FF						
	位置								
	模块类型								

（三）系统程序设计

1.前置过滤装置运行规范要求

精处理系统配备的前置过滤装置包括 A 系列、B 系列及旁通

管路系统，两套过滤设备可并行运作，但反冲洗操作必须错时进行。当旁通管路压差超过120Kpa且旁通阀处于完全开启状态时，需切断A系列进出口阀门；若A系列入口流量突破1200t/h且旁通阀全开，同样需要关闭A系列进出口阀门；当A系列进出口压差高于120Kpa并伴随旁通阀全开工况时，必须立即切断A系列进出口阀门。在A系列进水阀、增压阀或出水阀任一处于非关闭状态时，其反冲洗进水阀、排污阀、进气阀及排气阀均不得开启；反之，当反冲洗相关阀门任一未完全关闭时，常规运行阀门组也禁止操作。

2.前置过滤器旁路控制逻辑

在双套过滤器同时运转情况下，旁路阀门处于完全关闭状态；若仅单套过滤器投入运行，则旁路阀门开启至50%开度；当两套装置均停止工作时，旁路阀门将完全开启。当检测到系统入口主管道压力超过4.5MPa时，旁路阀门自动全开；当入口介质温度突破70℃阈值时，旁路阀门同样执行全开动作。此外，在旁路压差超过120Kpa、入口流量突破1200t/h或进出口压差达到120Kpa等工况下，旁路阀门均会采取全开操作模式。

3.凝结水精处理监控系统

系统界面可实时展示整套控制系统中各类设备、管路及阀件的连接关系与运行参数，为操作人员提供直观便捷的远程操控平台。系统运行期间，监控画面会动态更新各设备的实时状态信息。人机交互界面布局如图2所示。

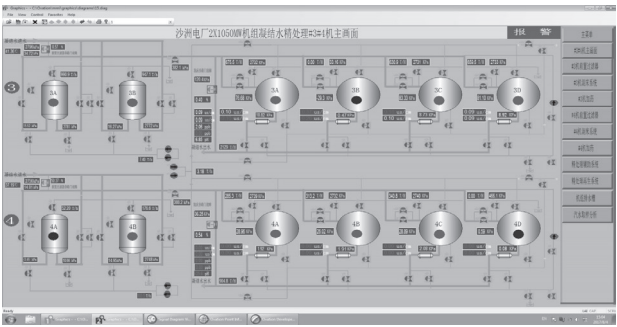


图2 人机监控界面

三、基于DCS控制系统的工业水处理系统智能应用

（一）智能监测与预警系统

智能监测与预警系统是DCS控制系统的关键智能应用方向之一。该系统可实时采集水处理过程中的关键参数，并运用先进

的数据分析算法进行实时监测和分析。在检测到异常数据或潜在故障时，系统将立即发出预警信号，提示操作人员及时采取措施进行干预^[3]。以水质监测为例，智能监测与预警系统可对水的浊度、pH值、余氯等关键指标进行实时监测，并依据预设阈值范围进行评估，若水质指标超出正常范围则立即发出预警，并明确指出超标指数以及超标程度，协助操作人员迅速定位问题并采取适当的处理措施。

（二）智能控制策略优化

工业水处理系统在DCS控制基础上，集成了智能控制策略优化技术。传统控制策略通常基于固定数学模型和参数设置实现，难以有效应对水处理过程中复杂多变的工况。而智能控制策略可依据实时数据和水质变化对参数和工艺流程进行自动调整，确保出水质量稳定性和处理效率^[4]。如在凝结水精处理过程中，智能控制策略可根据前置过滤器运行状况和进出口压差，自动调整反冲洗时机和频率。当过滤器压差增大或流量减少时，系统会判断过滤器可能堵塞并自动启动反冲洗程序进行清洗。此外，系统还可根据反冲洗过程中的数据反馈，持续优化反冲洗策略，以提升清洗效果和延长过滤器的使用寿命。

（三）智能故障诊断与排除

基于DCS控制系统工业水处理系统还具备智能故障诊断与排除功能。通过集成先进的故障诊断算法和专家系统，该功能可迅速定位和诊断系统故障，并提供相应解决方案^[5]。此不仅显著提升故障处理效率，还大幅减少因故障导致的停机时间和生产损失。在系统水泵出现故障时，智能故障诊断与排除系统可迅速检测到异常信号，并分析故障的潜在原因，随后根据故障类型和严重程度提出有针对性的处理建议，如停机检修、更换备件等。同时系统还可结合故障信息和历史数据进行深度学习和分析，以提高未来故障预测和诊断的准确性。

四、总结

综上所述，DCS控制系统在化工水处理中发挥重要作用，行业内在实际发展中应注重对DCS控制系统架构以及系统程序设计等关键环节进行深入把握，同时积极加强对智能监测与预警系统、智能控制策略优化、智能故障诊断与排除等方面的重点关注，以此为提升化工水处理成效提供有力保障。

参考文献

[1] 叶明辉, 刘香桂, 胡晓军. 智能化控制系统在水处理领域的应用与发展趋势 [J]. 智能城市应用, 2024, 7(4): 79-81.
[2] 张平. 发电厂化学水处理系统中的控制技术应用 [J]. 集成电路应用, 2023, 40(6): 204-205.
[3] 石明璇. 轧钢厂水处理自动控制系统分析 [J]. 冶金与材料, 2022(005): 042.
[4] 许童童, 刘强, 李娜. 黄骅港水处理集控系统 HMI 及接口程序的设计与实现 [J]. 能源科技, 2020, 18(3): 5.
[5] 曹渊, 宋杰, 朱彬, 等. 浅析电厂水处理设备自动化控制系统设计 [J]. 科技资讯, 2021, 19(21): 3.

基于 Linkage Mappe 模型亚洲象栖息地生态构建修复研究

宗发荣

云南省普洱市江城县林业和草原局, 云南 普洱 665099

DOI: 10.61369/EAE.2025010013

摘要： 本研究基于 MaxEnt 模型的模拟预测结果, 结合电路理论, 构建了江城县亚洲象栖息地的生态安全格局。首先, 依据 MaxEnt 模型的结果, 确定了江城县亚洲象栖息地的生态源地, 识别出破碎化生境斑块。其次, 利用地形数据和土地利用类型等环境信息, 构建了研究区的最小阻力面, 并结合电路理论, 识别出了最小成本路径, 进而获得了生态廊道。最后, 通过电路理论中的网络流模型, 将生态系统中的节点及其连接关系抽象为电路中的节点和电阻, 采用电路模型分析了生态系统的连通性和流动性, 为江城县亚洲象生态网络安全格局的构建提供了理论依据和方法支持。

关键词： linkage mappe 模型; 亚洲象; 生态修复; 栖息环境

Study on Ecological Construction and Restoration of Asian Elephant Habitat Based on Linkage Mappe Model

Zong Farong

Jiangcheng County Forestry and Grassland Bureau, Pu 'er City, Yunnan Province, Pu'er, Yunnan 665099

Abstract : This study, based on the simulation predictions from the MaxEnt model and incorporating circuit theory, constructed the ecological security pattern of the Asian elephant habitat in Jiangcheng County. First, using the results from the MaxEnt model, the study identified the ecological sources of the Asian elephant habitat in Jiangcheng County and recognized fragmented habitat patches. Next, by utilizing environmental information such as topographic data and land use types, the study constructed the minimum resistance surface of the study area. Combining this with circuit theory, the study identified the minimum cost path, thereby establishing the ecological corridor. Finally, using the network flow model from circuit theory, the nodes and their connections in the ecosystem were abstracted into nodes and resistors in a circuit. The circuit model was used to analyze the connectivity and mobility of the ecosystem, providing theoretical support and methodological guidance for the construction of the ecological security pattern of the Asian elephant in Jiangcheng County.

Keywords : linkage map model; Asian elephant; ecological restoration; habitat environment

亚洲象是热带森林生态系统中最具代表性的旗舰种和伞护种, 保护亚洲象及其栖息地, 对于区域生态系统及生物多样性保护具有重要意义, 同时也有助于树立亚洲象保护的典范^[1]。近年来, 由于土地利用变化、交通基础设施和水利建设等人类活动的影响, 亚洲象栖息地遭遇严重的破碎化, 一些地区甚至出现岛屿化现象, 天然生态廊道逐渐消失, 导致多个种群之间的交流受阻, 给亚洲象的保护带来了巨大挑战。因此, 确定亚洲象栖息地破碎化区域之间的生态廊道至关重要^[2]。研究表明, 与孤立的栖息地斑块相比, 通过廊道连接的栖息地能够保留更多的本地物种, 且这种效应会随着时间推移而得到增强^[3]。因此, 为了提升潜在廊道区域栖息地的连续性和整体性, 缓解栖息地碎片化问题是必要的, 这不仅有助于保护亚洲象的栖息环境, 也强调了亚洲象保护和管理的迫切性。

一、研究区基本概况

(一) 江城县地理位置

江城县位于云南省南部, 地理坐标为北纬22° 20' N至22° 56' N、东经101° 14' E至102° 19' E, 东西横距112

km, 南北纵距64 km, 总面积3544.38 km²。江城与越南的奠边省、莱州省和老挝的丰沙里省接壤, 拥有183 km的国境线, 独特的地理位置使其成为“一县连三国、一县接三州市”的重要交界点^[4]。自然资源方面, 江城森林覆盖率达68.83%, 森林蓄积丰富, 此外还拥有丰富的草原、湿地资源和生物多样性, 栖息着多

作者简介: 宗发荣(1997.09—), 男, 哈尼族, 云南江城, 大学专科, 专技九级, 从事林草有害生物防治。

种珍稀动植物，如亚洲象、熊、猴、麂子等，以及多种国家级保护植物^[9]。江城的“立体气候”和“立体生态”特征，使其成为重要的生态保护区和生物多样性的宝贵资源地^[10]。



(二) 江城县亚洲象种群现状

江城县是我国的亚洲象的一个重要分布区域^[7-8]。自2011年首次有记录显示一群亚洲象进入该地区以来，种群数量持续增加。2011年，18头亚洲象首次从景洪市进入江城县，并在整董镇的滑石板村一带活动。至2014年，种群数量增加到59头，主要分布在整董镇。2015年，亚洲象进一步向西北扩展，进入江城县康平镇，并频繁在整董镇、康平镇、思茅区倚象镇和西双版纳勐旺乡之间活动。至2024年，江城县的亚洲象种群稳定在55头，主要栖息在康平镇和整董镇的范围内，同时种群数量逐年增加，监测数据显示每年都有新生象。亚洲象的活动范围不断扩展，除江城县外，还扩展到宁洱县、景谷县等地，整体扩散趋势向北^[9]。

年份	野生亚洲象数量 / 头	
	普洱市	江城县
2011-2012	55	18
2013	45	28
2014	59	43
2015	约 106	52
2016	108	38
2017	137	53
2018	137	44
2019	137	47
2020	181	47
2021	127	51
2022	181	53
2023	181	50
2024	181	55

二、数据来源与方法

亚洲象分布数据由江城县林业草原局提供，土地利用 LULC (Land Use) 数据为全国土地利用类型遥感监测空间分布数据。DEM数据来源于ALOS，并利用 ArcGIS 软件表面分析模块

提取坡度数据。归一化植被指数 (NDVI) 数据源自资源环境科学数据注册与出版系统。水系、道路数据来源于 OSM 数据 (OpenStreetMap) 开放街区地图 (<https://www.openstreetmap.org/>)，并利用 ArcGIS 软件欧氏距离分析模型计算出象群活动位点距河流、道路的距离。植被类型数据来源于地理遥感生态网科学数据注册与出版系统 (www.gisrs.cn)。降水 and 气温数据由中国科学院成都山地灾害与环境研究所提供。居民点数据来源于国家统计局，并利用 ArcGIS 软件欧氏距离分析模块计算出象群活动位点距居民点的距离。

本研究采用 Linkage Mapper 工具包进行基因型数据分析，探索物种间的遗传连锁关系及物种流动模式。通过遗传连锁分析，揭示物种之间的遗传联系程度，推断物种间的遗传交流路径，从而构建生态网络和生态廊道，促进物种迁徙和基因交流，提升生态系统连通性与稳定性。此外，Linkage Mapper 支持多种数据格式，适用于不同生态系统的研究，提供高效的数据分析平台。

(一) 生态源地的确定

生态廊道作为带状景观结构存在于生态源地之间，可通过景观连通性等指标衡量其优劣^[10-12]。因此，在研究江城县亚洲象潜在生态廊道构建时，需要明确生态源，即象群可扩散的栖息地或迁移休息点。进一步通过该生态源地的适宜度反应在目标斑块直接的阻力面及阻力系数等，进一步构建江城县亚洲象潜在生态廊道。依据 MaxEnt 模型模拟预测的亚洲象生境适宜性以及亚洲象活动范围区间为基础，利用 ArcGIS 10.8 软件提取最佳栖息地和适宜栖息地中所有斑块，并剔除栖息地面积小于 0.5 km² 的栖息地斑块，将其他生境斑块作为亚洲象生态廊道的源地斑块。

(二) 生态廊道识别

生态廊道作为生态源地之间的关键连接通道，由多种要素共同构成。其构建旨在缓解栖息地破碎化所带来的负面影响，增强不同栖息地之间的连通性。这一构建对于物种迁徙、物质能量交换以及生物多样性保护等方面均具有至关重要的意义。本章将基于 MCR 和 Linkage Mapper 方法进行廊道的识别研究。

迁移扩散的最小成本路径 (Least-cost path method, LCP)，也被称为生态廊道路径。本研究利用 Linkage Pathways Tool 工具，输入了江城县亚洲象的生态源地和综合阻力面数据，计算出亚洲象在源地间迁徙时所克服的累积阻力值。在本章中，将生态走廊的成本加权距离阈值设定为 20000。

三、结果与分析

(一) 最小累积阻力面构建

基于研究区的各类因子特征及相关研究成果，归纳得出各种阻力等级对应的数值。随后，运用主成分分析法确定了各因子的权重。最后借助 ArcGIS 软件中的栅格计算器，得出研究区的综合生态阻力值，该值相对较高，达到 19 以上。高阻力区主要分布在农田、耕地、建设用地等人类活动密集的区域，受土地利用和人为干扰影响较大，限制了物种在不同区域间的扩散与迁徙。相反，低阻力区主要分布在人类活动以外的林地等资源丰富的

区域。

（二）生态源地分级

本研究采用 MaxEnt 生态位模型构建生态源并将结果按自然间断点分级法分为三级：三级源地（最重要）、二级源地（较重要）和一级源地（重要）。普洱市江城县生态源地如图 2 所示，普洱市江城县总共有 27 个生态源地，生态源地总面积约为 437.42 km²，空间上呈现西部和中部集聚成片、东部和北部零散稀疏的分布格局，其中江城县东部的大叔脚村、曼老街村、曼克老村和营盘山村所在的生态源地面积最广，达到 146.77 km²，占生态源地面积的 34%

从生态源地面积来看，江城县一级源地面积占源地总面积的 11.03%，主要分布在研究区中部的水城村、良马河村、板河村和江边村等地。二级源地面积占源地总面积的 71.03%，主要分布在研究区的东部、北部和西部，分布较为零散稀疏。三级源地面积占源地总面积的 18.23%，主要分布在研究区的西南部，以整董村和滑石板村为代表。面积较大的源地多组团分布在研究区中东部、西部和中部低阻力处，而二级源地多零散分布在北部且面积较小，这表明江城县整体生态环境其他地区优于北部，尤其是中部和西部能够为生物提供更加稳定且空间连续性更强的栖息环境。

（三）生态廊道分析

Linkage Mapper 是用于支撑野生动物栖息地连通性的工具。识别结果表明，江城县生态廊道分布受源地分布、地形起伏等因素影响，整体呈东部密集、西部和北部稀疏的蜘蛛网状。廊道主要分布在地形平坦的生态用地及地形起伏较小的低阻力值区域。研究区内共识别出 58 条生态廊道。为深入分析这些生态廊道对区域亚洲象适宜生境连通性的贡献，根据各廊道的 CFC 值，运用自然断点法将其划分为三个等级。

从生态廊道的分级情况来看，康平乡和整董镇的三级生态廊

道数量相对较少，且其长度也最短，而一级和二级廊道的长度则呈现出逐渐增加的趋势。这一现象暗示着，较短的生态廊道可能具备更高的连通效率。相比之下，曲水乡和勐烈镇的三级生态廊道则相对较长，特别是勐烈镇，其一级和二级廊道的数量最为丰富。这一现象的原因可能在于，该区域的生态源地破碎化程度较高，且不同生态源地之间的距离相对较远。对于较长的生态廊道，应着重加强其维护工作，优化廊道的结构和植被配置，以消除潜在的亚洲象迁徙障碍。在空间分布上，三级廊道主要扮演着连接重要生态源地的角色，对于提升区域内亚洲象适宜栖息地的连通性具有重要意义。因此，确保三级生态廊道的完整性至关重要。与此同时，也应关注其他等级廊道的状况，通过改善和优化，增加研究区内亚洲象迁徙路径的多样性。

四、结论

基于的研究结论，提出以下保护建议的内容，以促进江城县亚洲象栖息地的有效保护和管理：（1）生态保护区划划定：根据生态源地和廊道分析结果，建议在西部和中部地区设立重点生态保护区，重点加强对一级源地和二级廊道的保护，并制定相应的管理措施。（2）生态环境修复：针对生态夹点和生态障碍点，制定生态环境修复方案，通过绿化、植被恢复等方式增强区域生态连通性，改善亚洲象栖息地的质量和完整性。（3）科学监测与评估：建立健全的生态监测网络，定期对亚洲象栖息地的环境变化进行监测与评估，及时发现问题并采取相应措施。（4）社区参与与教育宣传：加强与当地社区的合作，提高社区居民对亚洲象保护的认知和参与度，推动保护工作的落实。（5）持续优化与更新：随着数据的不断积累和模型的进一步优化，持续改进预测模型，提高预测的准确性和可靠性，以更好地支持亚洲象栖息地的保护和管理。

参考文献

[1] 吴得卿, 魏建华, 樊辉. 南滚河流域土地利用变化对亚洲象生境的影响 [J]. 生态学报, 2021, 41(16): 6476–6485.

[2] 肖洒. 普洱地区亚洲象肇事特点及损失情况分析 [D]. 北京林业大学, 2015.

[3] 唐建文. 基于 ArcGIS 和 MCR 模型的略阳县生态廊道分析 [J]. 测绘技术装备, 2023, 25(02): 27–30.

[4] 陈鹏, 张劲峰, 候云苹, 等. ITTO 项目江城试验示范点社会经济效益初步评价 [J]. 林业经济问题, 2003(6): 323–327.

[5] 周园芳. 江城县西南桦苗木培育现状 [J]. 思茅师范高等专科学校学报, 2012, 28(06): 19–21.

[6] 朱霜, 胥永明. 边疆民族地区农村反假币工作存在的问题及对策以思茅市江城县为案例 [J]. 时代金融, 2006, (12): 148–149.

[7] 黄元, 谭德安, 白梁芳, 等. 思茅至江城拟建高速公路沿线亚洲象栖息地适宜性分析 [J]. 林业建设, 2019(06): 67–73.

[8] 郭春祥, 卢磊. 一起“象”往普洱 [N]. 普洱日报, 2022–08–09(001).

[9] Zhang L, Li C, Yue C, et al. Habitat Suitability Evaluation and Ecological Corridor Construction for Asian Elephants: The Case of Jiangcheng, a New Range for Elephants in Southwestern China [J]. Forests, 2024, 15(7): 1195–1195.

[10] 王晓峰, 朱梦娜, 张欣蓉, 等. 基于“源地–阻力–廊道”的三江源区生态安全格局构建 [J/OL]. 生态学报, 2024, (11): 1–15 [2024–03–26].

[11] 徐冬梅, 彭建, 董建权. 基于空间连续小波变换和电路模型的宁夏沿黄城市带生态安全格局构建 [J/OL]. 生态学报, 2024, (09): 1–12 [2024–03–26].

[12] 王真真. 基于电路理论的曹县生态安全格局构建研究 [D]. 山东农业大学, 2023. DOI: 10.27277/d.cnki.gsdnu.2023.000456.

工业污染源在线监测数据的智能分析与预警模型构建

洪长吉¹, 普剑峰^{2*}, 谭强华³, 黄俊⁴, 罗小明²

1. 西双版纳巅峰环境检测有限公司, 云南 西双版纳 666100

2. 西双版纳州生态环境局景洪分局生态环境监测站, 云南 西双版纳 666100

3. 西双版纳州生态环境局勐腊分局生态环境监测站, 云南 西双版纳 666100

4. 西双版纳州生态环境局, 云南 西双版纳 666100

DOI: 10.61369/EAE.2025010017

摘要： 本论文围绕工业污染源在线监测数据的智能分析与预警模型构建展开研究。针对传统监测数据处理效率低、预警滞后等问题，提出基于大数据与机器学习的智能分析方法，通过数据清洗、特征提取、模型训练等流程构建预警模型。研究表明，该模型能够有效提升数据处理精度与预警及时性，为工业污染源监管提供科学决策支持，对推动环境保护智能化发展具有重要意义。

关键词： 工业污染源；在线监测；智能分析；预警模型；机器学习

Intelligent Analysis of Online Monitoring Data of Industrial Pollution Sources and Construction of Early Warning Models

Hong Changji¹, Pu Jianfeng^{2*}, Tan Qianghua³, Huang Jun⁴, Luo Xiaoming²

1. Xishuangbanna Peak Environmental Testing Co., LTD., Xishuangbanna, Yunnan 666100

2. Ecological Environment Monitoring Station, Jinghong Branch of Xishuangbanna Prefecture Ecological Environment Bureau, Xishuangbanna, Yunnan 666100

3. Ecological Environment Monitoring Station, Mengla Branch of Xishuangbanna Prefecture Ecological Environment Bureau, Xishuangbanna, Yunnan 666100

4. Xishuangbanna Prefecture Ecological Environment Bureau, Xishuangbanna, Yunnan 666100

Abstract： This thesis focuses on the intelligent analysis of online monitoring data of industrial pollution sources and the construction of early warning models. Aiming at the problems of low processing efficiency and delayed early warning of traditional monitoring data, an intelligent analysis method based on big data and machine learning is proposed, and an early warning model is constructed through processes such as data cleaning, feature extraction, and model training. The research results show that this model can effectively improve the accuracy of data processing and the timeliness of early warning, provide scientific decision support for the supervision of industrial pollution sources, and is of great significance for promoting the intelligent development of environmental protection.

Keywords： industrial pollution source; online monitoring; intelligent analysis; early warning model; machine learning

伴随着工业化进程的不断加速，工业污染的问题越来越严重。工业污染源在线监测是环境监管中的一种重要方法，累积了大量的数据，然而传统的分析方式很难发掘数据中的潜在价值，不能满足预警的实时性和准确性要求。基于这一背景，建立智能分析和预警模型以实现工业污染源的有效监管已成为目前环境保护领域中的一个研究重点。本论文研究目的在于探讨工业污染源在线监测数据智能分析的方法，建立科学高效的预警模型以帮助环境监管水平的提高。

一、工业污染源在线监测数据的特点

工业污染源在线监测数据作为环境监管体系中的核心依据，具有明显的复杂性和动态性特点，深刻地影响了智能分析预警模型建设策略。在数据来源方面，工业污染源在线监测数据涵盖了

废水，废气和固体废弃物等多类污染物的排放监控，涵盖了化工，冶金和电力等高污染行业生产全过程。监测设备种类繁多，其中包括水质自动分析仪、烟气连续监测系统（CEMS）、颗粒物监测仪等，这些设备都是通过传感器来实现的、物联网终端等来实现对数据的实时采集和发送，构成多源异构数据集，从数据

类型水平上看,工业污染源在线监测数据表现出结构化和非结构化共存的特征。结构化数据,例如污染物浓度数值,监测时间戳和设备编号,逻辑关系和存储格式明确,易于直接统计分析;非结构化数据包括了设备的运行日志、图像和视频数据等,这些数据包含了丰富的信息,但需要使用特定的技术手段进行分析和处理。另外,监测数据中也含有时序数据的特点,污染物排放浓度和流量都会随着时间推移而动态地变化,从而构成了一个带有时间序列特点的数据流,它的变化规律受到生产周期,工艺调整和环境因素等诸多因素的影响^[1]。

二、智能分析方法的研究

(一) 数据清洗和预处理

在采集和传输工业污染源的在线监测数据的过程中,容易受到传感器误差,网络波动和设备故障的干扰而造成数据中缺失值,异常值和噪声数据的出现。数据清洗和预处理是确保分析准确性至关重要的环节。对于缺失值的处理,对于污染物浓度和流量的时序数据通常采用线性插值法和三次样条插值法对其进行填补^[2]。例如,在某一特定时间段内,如果废水的pH值数据出现缺失,可以使用三次样条插值法,并根据之前和之后的监测数据来构建一个平滑的曲线,以拟合这些缺失的数据点,并进行相应的测试,这种方法填充连续性数据时,误差率可以被限制在允许范围内。对异常值采用 3σ 原则辨识,数据与均值偏差大于3倍标准差后判断为异常情况,并对某燃煤电厂SO₂排放浓度进行了监控,利用这一原理成功地辨识出了传感器故障引起的超标异常,校正后的数据波动与生产实际情况相符。

在处理噪声数据时,结合了中值滤波和小波去噪的方法。对颗粒物浓度监测数据进行处理时,将中值滤波窗口布置成5×5可以有效地去除突发脉冲噪声;对含有高频噪声信号利用db4小波基对其进行三层分解和重构,去噪后信噪比提高到25dB,数据平滑度明显提高。此外,针对多源异构数据,需进行格式统一与标准化处理,将不同设备输出的浓度单位(如mg/L、ppm)统一转换为法定计量单位,通过Min-Max标准化方法将数据归一化至[0,1]区间,消除量纲差异对后续分析的影响,确保数据的可用性与一致性。

(二) 数据特征提取和降维

工业污染源监测的数据维度多具有信息冗余的特点,特征提取和降维可以有效地降低数据的复杂度和提高分析效率。在特征提取中,对于时序数据利用傅里叶变换和小波变换进行频域特征提取。以某个化工园区的废水流量数据为研究对象,利用离散傅里叶变换技术,将时域信号转化为频域信号,并从中提取了主要的频率成分及其对应的能量占比,从而成功地识别了生产周期中的特征频率波动。同时通过滑动窗口对均值,方差和峰值的统计特征进行统计并构造多维特征向量。

在降维技术中,选择了将主成分分析(PCA)与局部线性嵌入(LLE)结合起来的方法。对某钢铁厂废气监测数据进行处理时,原始数据含有SO₂,NO_x和颗粒物浓度共12个特征维度并经过PCA进行处理,前三个主要成分的累计方差贡献率高达92%,成功地将数据维度从12维减少到了3维;对具有非线性分布特征的数据进一步利用LLE算法对其进行优化,使其嵌入到低维空间

而又能保持其局部结构,从而有效地解决了PCA对非线性数据降维的限制。实验结果显示,当结合这两种技术时,数据的存储量降低了75%,模型的训练时间减少了60%,同时关键特征的保留率超过了90%,这为后续的智能分析提供了强大的数据支撑。

(三) 智能分析算法的选择

工业污染源数据具有非线性,动态性和复杂性等特点,这就给智能分析算法的研究提出了更高的要求,常见的计算方法有支持向量机(SVM)、随机森林(RF)和深度学习技术。在处理小样本数据分类时,SVM展现出了卓越的性能,而在某电镀厂废水中重金属超标的预警环节,选择了采用径向基核函数(RBF)的SVM模型,通过调整 $C=10$ 的惩罚参数和 $\gamma=0.5$ 的核函数参数,成功地实现了对超出标准和正常数据的精确分类,测试集的准确率高达95%。在处理多变量回归和分类任务时,随机森林算法表现出色。在预测某火电厂NO_x排放浓度的过程中,构建了一个包含500棵决策树的随机森林模型,通过对特征的重要性进行排序,筛选出了关键的影响因子,预测的均方误差(MSE)达到了0.87,这明显优于传统的线性回归模型^[3]。

在深度学习算法领域,长短期记忆网络(LSTM)对于时序数据展现出了卓越的处理性能。在某工业园区的PM2.5浓度预测实验中,搭建包含2层LSTM单元(每层128个神经元)、1层全连接层的网络结构,利用过去72小时的气象数据和污染物浓度作为输入,预测未来24小时的浓度变化,模型在测试集上的平均绝对误差(MAE)为4.2μg/m³,显示出了很好的动态适应性。在实践中,需要结合数据特点和分析目标进行算法综合选择,也可以采用集成学习方法将各种算法优势进行整合,促进模型泛化能力和分析精度的提高^[4]。

三、预警模型的建立

(一) 模型架构设计

工业污染源预警模型架构需要综合考虑数据处理的效率,预测的准确性和实时性等因素,采取分层模块化设计,底层为数据接入层,通过物联网协议(如MQTT、CoAP)实现多源监测设备的数据实时采集,支持每秒处理1000条以上的数据流,确保数据传输的低延迟(<500ms)^[5]。数据经清洗预处理后进入特征工程层,运用滑动窗口技术(窗口的尺寸设定在15分钟的数据量内)提取动态特征,并结合主成分分析(PCA)将原始20维数据降至8维,减少计算复杂度,核心预测层使用混合模型架构并集成了LSTM和XGBoost算法的优点。LSTM网络构建3层结构(每层64个神经元),通过门控机制捕捉污染物浓度的长短期时序依赖,适用于预测连续变化趋势;XGBoost模型利用树模型对非线性数据的出色拟合能力,有效地处理了如气象状况、生产压力等外部因素。两者输出结果经加权融合(权重系数由网格搜索决定,LSTM为0.6,XGBoost为0.4),形成最终预测值^[6]。

上层为预警决策层,设置三级预警阈值:轻度超标(浓度超过标准值10%-30%)、中度超标(30%-50%)、重度超标(>50%)。以某石化公司的VOCs排放量为研究对象,其标准值定为80mg/m³。在预测浓度达到88mg/m³的情况下,会触发轻度预警;96mg/m³的浓度会触发中度预警;而120mg/m³的浓度则会触发重度预警。预警信息由消息队列(Kafka)向监管平台实时

推送，响应时间限定为2秒钟^[7]。

（二）模型训练和优化

模型训练使用离线训练和在线更新两种策略。离线训练阶段，选取某工业园区近3年的监测数据（共100万条记录）作为训练集，划分70%用于训练、20%用于验证、10%用于测试。在LSTM网络中，学习率被设定为0.001。通过使用Adam优化器并进行50轮的迭代训练，训练集的均方误差（MSE）从最初的25.6下降到了3.2；在XGBoost模型中设定树深度6，学习率0.1和子采样率0.8，经过300次迭代后验证集的AUC为0.92，为了处理数据分布动态变化问题，该模型使用了在线学习机制^[8]。当新加入的数据量达到1000条时，系统会启动增量训练，并利用FTRL（Follow-the-Regularized-Leader）算法来更新模型的参数，以确保模型能够适应生产流程的调整或季节性的排放变动。针对模型过拟合问题，在LSTM中加入Dropout层（丢弃率0.2），在XGBoost中采用正则化参数 $\lambda = 0.1$ ，使测试集MSE稳定在4.1左右，泛化性能显著提升。另外，利用模型蒸馏技术对复杂模型进行压缩，使推理时间由原来的150ms减少到30ms以适应实时预警的需要。

（三）模型评估指标体系

模型评估使用多维度的指标体系覆盖预测的准确性，稳定性和实用性。评估准确性的指标涵盖了均方误差（MSE）、平均绝对误差（MAE）、决定系数（ R^2 ）以及平均绝对百分比误差（MAPE）。在某燃煤电厂进行SO₂浓度的预测时，模型的MSE达到了2.3mg/m³，MAE为1.2mg/m³， R^2 为0.94，而MAPE为5.8%，这些数据充分展示了模型的高预测精度，稳定性指标是通过计算不同时间窗口（1小时、6小时、1天）的预测误差波动，从而评估模型对数据波动的抵抗能力。实验表明，该模型在各时间尺度上MSE标准差小于0.5，说明具有较好的稳定性。在实用性指标方面，重点关注预警的时效性和误报率^[9]。

四、实验设计和结果分析

本实验选取某大型工业园区作为研究对象，收集近2年的工

业污染源在线监测数据，涵盖废气、废水等10类污染物指标，共计120万条数据记录。实验环境采用Python 3.8开发平台，硬件配置为Intel Core i7-12700H处理器、16GB内存，使用TensorFlow 2.8与Scikit-learn 1.1.3框架搭建模型。实验被分为两组：对照组和实验组。对照组使用了传统的时间序列分析模型（ARIMA）和单一的SVM模型，而实验组则采用了本研究提出的LSTM-XGBoost融合预警模型^[10]。

以PM2.5的浓度预测为研究对象，实验组的模型平均绝对误差（MAE）达到了3.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，均方误差（MSE）为18.2 $\mu\text{g}^2/\text{m}^6$ ，而决定系数（ R^2 ）为0.96；而对照组ARIMA模型MAE为6.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，MSE为34.7 $\mu\text{g}^2/\text{m}^6$ ， R^2 仅为0.82，SVM模型MAE为5.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，MSE为26.3 $\mu\text{g}^2/\text{m}^6$ ， R^2 为0.89，实验组在复杂时序数据处理上优势显著。在进行预警性能的测试时，对于突然超出标准的事件，实验组的模型平均提前了1.5小时发出预警，预警的准确率高达92%，而误报率仅为2.5%；对照组的预警时间只有0.8小时，其准确性为78%，而误报率高达8%，从模型的运行效率角度来看，经过模型的压缩和优化，实验组的单条数据推理时间缩短到了28ms，与优化前相比减少了62%，从而满足了实时监测的需求。通过Shapley值分析可知，生产负荷（贡献度32%）、气象湿度（25%）、设备运行参数（20%）为影响污染物排放的关键因素。试验结果表明：文中所构建的融合模型无论从预测精度还是预警及时性和稳定性等方面都要好于传统方法，能够为工业污染源智能监管工作提供可靠的技术支持。

五、结束语

本研究通过建立智能分析和预警模型，实现工业污染源的在线监测数据智能分析，从而为工业污染监管工作提供一种全新的技术途径。在今后的工作中，将对模型性能进行进一步优化，并根据实际应用场景进行扩展研究，以增强其泛化能力和实用性，促进工业污染源监管朝着智能化和精准化的方向迈进。

参考文献

[1] 伍恒赞,陈会明,陈谊,曹炳伟,储险峰,熊长保.工业污染源废水水质在线监测方法研究[J].江西化工,2024,41(01):41-44.
[2] 吴烨超,朱丹,丁香怡,包金婷.环境监测在节能减排工作中的作用分析[J].节能,2024,44(01):116-118.
[3] 朱明龙,倪莹,张学娟.无人机遥感监测在水源地污染源监测中的应用研究[J].清洗世界,2024,41(02):131-133.
[4] 陈林,蔡锴潮,陈臻.混合所有制改革与绿色全要素生产率——基于工业污染源重点调查的经验证据[J].商业经济与管理,2024,(11):74-90.DOI:10.14134/j.cnki.cn33-1336/f.2024.11.007.
[5] 王海榕.城市大气污染治理措施研究[J].皮革制作与环保科技,2024,5(21):122-124.DOI:10.20025/j.cnki.CN10-1679.2024-21-42.
[6] 李兵.工业排气监测的常见问题及优化措施[J].皮革制作与环保科技,2022,3(04):110-112.
[7] 苟鹏,谭铃,卜兴兵.工业污染源排放总量核算分析[J].中国资源综合利用,2023,41(08):179-181.
[8] 黄洁妮.工业污染源“一企一档”管理系统建设与应用[J].黑龙江环境通报,2024,37(07):20-22.
[9] 马智斌.关于工业污染源有组织废气监测中的常见问题探讨[J].皮革制作与环保科技,2020,1(05):30-33.
[10] 程梦婷,李凌波.工业污染源二氧化硫排放监测技术进展[J].当代化工,2017,46(10):2116-2118.DOI:10.13840/j.cnki.cn21-1457/tq.2017.10.042.

碳达峰与碳中和目标下的企业碳资产管理 与咨询服务实践

徐炳辉

身份证号: 440782199408210913

DOI: 10.61369/EAE.2025010015

摘要： 本文围绕碳达峰、碳中和目标阐述碳资产管理相关内容。介绍其概念、价值构成等，分析欧盟企业实践及国际咨询机构服务模式创新，探讨能源、制造业转型，指出中国碳市场问题及企业挑战，强调碳盘查等手段及人才培养、ESG理念对碳资产管理的重要性。

关键词： 碳达峰；碳中和；碳资产管理

Practice of Enterprise Carbon Asset Management and Consulting Services under Carbon Peak and Carbon Neutrality Targets

Xu Binghui

ID : 440782199408210913

Abstract : This article elaborates on carbon asset management related content around the goals of carbon peak and carbon neutrality. Introduce its concept, value composition, etc., analyze the practice of EU enterprises and the innovation of international consulting firm service models, explore the transformation of energy and manufacturing industries, point out the problems and challenges of China's carbon market, emphasize the importance of carbon inventory and other means, talent cultivation, ESG concept for carbon asset management.

Keywords : carbon peak; carbon neutrality; carbon asset management

引言

随着全球气候变化问题凸显，碳达峰、碳中和成为焦点。从《联合国气候变化框架公约》确立国际合作框架，到后续 COP 大会不断推动气候行动深入，国际社会应对气候变化的进程持续推进。我国也积极行动，自“十二五”规划起逐步完善相关政策，到“十四五”规划对双碳目标的进一步明确与细化，彰显出实现双碳目标的决心。在此背景下，碳资产管理的重要性日益凸显。它涵盖了碳资产的价值构成以及全生命周期管理等诸多方面。欧盟 ETS 下企业的实践经验、国际咨询机构的创新服务模式，以及能源、制造业等行业的转型探索，都为碳资产管理提供了有益借鉴。然而，我国碳市场机制仍待完善，控排企业面临诸多政策约束与挑战，这同时也为咨询服务企业带来了新的业务拓展机遇，如何应对这些挑战、把握机遇，是实现双碳目标过程中亟待探讨解决的问题。

一、碳达峰与碳中和目标的理论基础

（一）双碳目标内涵与实施路径

碳达峰是指二氧化碳排放量达到历史最高值，然后经历平台期进入持续下降的过程，是二氧化碳排放量由增转降的历史拐点。碳中和则是指企业、团体或个人测算在一定时间内直接或间接产生的温室气体排放总量，通过植树造林、节能减排等形式，以抵消自身产生的二氧化碳排放量，实现二氧化碳“零排放”。国际社会对碳减排早已形成广泛共识，如《巴黎协定》等框架为全球应对气候变化行动提供了指引^[1]。我国也积极参与全球气候治理，从“十二五”规划提出单位国内生产总值二氧化碳排放降低

目标，到“十四五”规划明确碳达峰行动方案，不断完善政策，以推动双碳目标的实现。

（二）碳资产管理理论框架

碳资产是指在强制碳排放权交易机制或者自愿减排机制下，产生的可直接或间接影响组织温室气体排放的配额排放权、减排信用额及相关活动^[2]。其价值构成要素包括市场供需关系、政策法规影响以及自身稀缺性等。碳资产的生命周期管理涵盖了从碳资产的产生，如企业通过节能减排措施获得减排量，到交易流通，再到最终的注销或使用等环节。对碳资产进行科学有效的管理，有助于企业更好地应对气候变化挑战，实现可持续发展目标。

二、国际碳资产管理实践经验

（一）欧盟碳交易体系下的企业实践

欧盟碳交易体系（ETS）下企业有诸多实践经验。德国莱茵集团（RWE）依据欧盟分配的配额，精准核算碳排放，优化生产流程、提高能源效率，有效减少了碳排放，从而在配额范围内实现生产目标，避免购买额外配额增加成本^[3]。部分企业如意大利能源公司埃尼（Eni）利用碳期货、碳期权等金融衍生品进行套期保值，锁定碳价，降低碳交易价格波动带来的风险。还有企业通过参与碳基金等方式，为自身碳减排项目融资，推动企业绿色转型。荷兰国际集团（ING）通过参与碳基金，为可再生能源项目提供资金支持。这些实践为其他国家和地区的企业在碳资产管理方面提供了有益参考。

（二）国际咨询机构服务模式创新

国际咨询机构在碳资产管理服务模式上不断创新，英国标准协会（BSI）积极参与全球统一标准的研究与制定，结合不同行业特点细化核算方法，确保数据准确性和可比性^[4]。对于碳足迹认证业务，BSI构建了完善的认证体系，从产品生命周期角度出发，涵盖原材料采购、生产加工、运输销售到最终消费及废弃物处理等各个环节，为企业提供全面的碳足迹评估报告。同时，通过整合行业资源，搭建信息共享平台，促进企业间的经验交流与合作，从而推动整个行业的碳资产管理水平提升。

三、中国企业碳资产管理现状分析

（一）重点行业实施现状

1. 能源行业转型路径

“双碳目标”下，能源行业作为碳排放的主要来源，其转型路径对实现碳达峰与碳中和目标至关重要，如华能集团的“睿能”系列相变烟气深度冷却技术，通过采用先进的碳捕集技术，能够有效减少二氧化碳的排放。同时，企业逐渐增加对风能、太阳能等新能源的利用比例，以降低对传统化石能源的依赖。这不仅有助于减少碳排放，还能提高能源利用的可持续性^[5]。此外，某些能源行业在转型过程中还注重能源效率的提升，如国家能源集团通过实施“三改联动”，对电机组进行节能降排改造、供热改造和灵活性改造，显著提升了能源利用效率，推动整个行业向低碳、绿色方向发展。

2. 制造业低碳改造实践

在制造业低碳改造实践中，钢铁、水泥等高耗能行业是重点关注对象。以钢铁行业为例，通过工艺流程优化来降低碳排放是常见的做法^[6]。宝钢股份利用先进的热风炉技术，使煤气利用率提升，每年减少约15万吨二氧化碳排放。河钢集团与洛氏化学合作开展全球首例氢冶金工业生产，用氢能替代焦炭炼铁，可使吨钢二氧化碳排放量减少30%。在水泥行业，优化熟料生产工艺，降低石灰石分解过程中的碳排放也是重要举措。海螺水泥通过优化熟料生产，探索出水泥行业低碳转型之路。这些行业还积极探索余热回收利用技术，将生产过程中产生的余热用于发电或其他

生产环节，进一步提高能源综合利用效率，减少对外部能源的依赖，从而实现碳排放的降低。

（二）实施过程主要挑战

1. 制度体系待完善

中国碳市场机制尚不完善，一方面，碳市场覆盖范围有限，部分高排放行业未被纳入，导致企业参与度不均衡，影响碳资产管理的全面性^[7]。另一方面，碳配额分配方法不够科学合理，可能无法准确反映企业的实际排放情况和减排潜力，使得企业在碳资产管理中面临不确定性。在政策执行时，不同地区对碳减排政策的理解和执行力度不同，给企业带来困扰。企业在跨地区经营时，需应对不同的政策要求，增加了碳资产管理的复杂性和难度，不利于统一的制度体系建设和企业的可持续发展。

2. 技术经济性制约

减排技术的应用往往伴随着较高成本，企业需要投入大量资金用于设备更新、技术研发等，这对企业的财务状况形成较大压力^[8]。同时，碳资产管理专业人才短缺，相关人员不仅要掌握环境科学、能源管理等知识，还需了解金融、市场等领域，人才匮乏导致企业在碳资产的核算、监测、交易等环节难以高效开展，进一步影响碳资产管理的技术经济性，制约了企业碳资产管理的有效实施。

四、碳资产管理咨询服务创新实践

（一）全生命周期管理服务

1. 碳盘查与减排规划

碳盘查是企业了解自身碳排放状况的重要手段，基于ISO14064标准，企业能够搭建科学的碳核算体系。该标准为企业提供了统一的温室气体核算和报告规范，涵盖了确定组织边界、识别排放源、选择核算方法、收集活动数据以及计算排放量等一系列流程^[9]。在确定组织边界时，需明确企业运营的物理边界和财务边界，确保核算范围的准确性。识别排放源则要求全面考虑直接排放和间接排放，包括能源消耗、生产过程、运输等环节产生的温室气体排放。选择合适的核算方法并准确收集活动数据是保证碳核算结果可靠性的关键。通过精确的碳盘查，企业能够为后续的减排规划提供详实的数据基础，从而制定出切实可行的减排目标和措施。

2. 碳资产开发与交易

碳资产开发是企业实现碳减排目标的重要途径之一。咨询服务机构可协助企业识别潜在的碳资产项目，如可再生能源项目、能源效率提升项目等，并开展CCER项目开发工作。通过对项目的筛选、设计、监测和核证等环节的严格把控，确保项目符合相关标准和要求，从而成功获得碳资产。在碳交易方面，咨询服务机构为企业提供市场分析和交易策略建议。帮助企业了解碳市场的动态和价格走势，制定合理的交易计划，包括选择合适的交易时机和交易方式。同时，还可为企业提供碳金融产品创新服务，如碳期货、碳期权等衍生品的相关知识和应用指导，帮助企业更好地管理碳资产风险，实现碳资产的保值增值^[10]。

（二）数智化技术赋能体系

1. 碳管理 SaaS 平台构建

碳管理 SaaS 平台借助大数据技术构建碳排放实时监测与预测系统，通过收集企业生产运营各环节的相关数据，包括能源消耗、生产流程等，实现对碳排放的精准实时监测。利用数据分析算法，挖掘数据中的潜在规律，对碳排放趋势进行预测。这有助于企业提前规划减排策略，合理安排生产活动，以更好地应对碳达峰与碳中和目标。同时，SaaS 平台的模式降低了企业使用成本，提高了碳资产管理的效率和灵活性，为企业提供了便捷、高效的碳管理解决方案。

2. 区块链技术应用探索

分布式账本作为区块链的核心技术之一，在碳资产溯源与交易中展现出独特的实践价值。它通过创建不可篡改的记录，确保碳资产的产生、转移和交易过程的透明度和可追溯性。每一笔碳资产的相关数据都被准确记录在分布式账本上，从源头的排放监测到最终的交易完成，各个环节都清晰可查。这不仅有助于企业自身对碳资产的管理和监控，也为监管机构和其他利益相关者提供了可靠的信息来源。同时，分布式账本的去中心化特性，降低了交易过程中的信任成本，提高了交易效率，促进了碳资产市场的健康发展。在实际应用中，它能够有效防止碳资产数据的造假和篡改，保障市场的公平公正。

（三）实践过程中的挑战

1. 国际竞争压力

从国际角度看，全球碳资产管理咨询服务市场都存在竞争激烈的情况，国际咨询巨头凭借其丰富的行业经验、先进的技术和成熟的全球网络，在市场中占据优势地位。它们能够提供高标准、国际化的服务，这对国内咨询服务企业形成较大竞争压力。国内企业在国际化视野以及服务标准化等方面相对薄弱，难以与之直接抗衡。在跨国碳交易项目咨询中，国际机构更易获取优质客户资源，国内企业则面临客户信任度不足、项目经验欠缺等问题，限制了其在国际市场的业务拓展。

2. 国内发展困境

在国内，虽然碳资产管理咨询服务市场潜力巨大，但也存在

诸多发展困境。一方面，国内企业对碳资产管理咨询服务的认知度和接受度参差不齐。部分企业尚未充分认识到碳资产管理对自身可持续发展的重要性，对咨询服务的需求动力不足，导致市场需求释放不够充分。另一方面，国内咨询服务行业在数据准确性、核算方法一致性等方面存在不足。不同机构采用的核算标准和方法存在差异，使得数据可比性和可信度受到影响，影响了咨询服务质量和企业决策的科学性。同时，国内碳资产管理咨询服务行业还面临专业人才短缺的问题，专业复合型人才匮乏，制约了行业整体发展水平和竞争力的提升。

五、总结

碳达峰与碳中和目标的提出具有坚实的理论基础，其内涵包括二氧化碳排放量达峰后下降与通过多种方式实现二氧化碳“零排放”。我国现阶段不断完善政策推动双碳目标实现，碳资产管理理论框架也逐渐形成。国际上，欧盟碳交易体系下企业积累了丰富的碳资产管理实践经验，国际咨询机构也在服务模式上不断创新。中国企业在重点行业已开展诸多实践，但仍面临制度体系待完善、技术经济性制约等挑战。在碳资产管理咨询服务领域，出现了全生命周期管理服务和数智化技术赋能体系等创新实践，但也存在国际竞争压力和国内发展困境。未来，随着双碳目标政策的推进，政府应继续完善碳市场机制，扩大覆盖范围，优化配额分配方法，确保企业公平参与碳交易，为企业碳资产管理提供稳定的政策环境。高碳排企业需积极响应政策，加大减排技术研发投入，政府可通过财政补贴、税收优惠等方式降低企业技术应用成本，提高减排效率。咨询服务企业提升专业水平，为高碳排企业提供精准的碳盘查、减排规划、碳资产开发与交易等服务。高校和职业院校紧跟发展，加强对碳资产管理相关学科的投入，培养既懂环境科学、能源管理，又掌握金融、市场知识的复合型人才，满足企业对专业人才的需求。企业之间可以开展合作与经验交流，搭建行业交流平台，鼓励企业分享碳资产管理经验，推广先进实践案例，推动整个行业的低碳转型与发展。

参考文献

- [1] 陈立扬. 碳达峰、碳中和目标下的绿色税制优化研究 [D]. 首都经济贸易大学, 2022.
- [2] 袁贺鹏. 碳达峰、碳中和目标下中蒙煤炭合作研究 [D]. 兰州大学, 2023.
- [3] 何嘉欣. 应对碳达峰碳中和的财税政策优化研究 [D]. 兰州财经大学, 2023.
- [4] 刘强. 黑龙江省碳达峰与碳中和的有效路径研究 [D]. 黑龙江大学, 2022.
- [5] 余春晓. 碳达峰碳中和视域下企业社会责任法律规制研究 [D]. 西安建筑科技大学, 2023.
- [6] 柯娟娟, 袁祥勇. 碳达峰与碳中和目标下碳会计治理模式研究 [J]. 经济师, 2022(7): 78-79.
- [7] 沈向男, 李银星. 基于“碳达峰、碳中和”目标下的钢铁企业成本管理 [J]. 品牌研究, 2020(31): 38, 40.
- [8] 翁晓姚. 碳达峰与碳中和目标下供水企业绿色低碳发展的思考 [J]. 净水技术, 2022, 41(5): 1-4, 13.
- [9] 吴莉. A 石化企业碳资产管理研究 [D]. 湖南: 南华大学, 2019.
- [10] 任秀芳. 浅论石油炼化企业碳达峰与碳中和路径 [J]. 资源节约与环保, 2021(10): 115-117.

城市化进程中的生态空间优化与生态修复技术体系构建

王多龙

内蒙古自治区巴彦淖尔市生态环境事业发展中心，内蒙古 巴彦淖尔 015000

DOI: 10.61369/EAE.2025010016

摘 要： 随着全球城市化进程的加速，城市发展与生态环境保护之间的矛盾日益凸显。城市生态空间作为维系城市生态系统健康、提供生态系统服务、保障人居环境质量的关键载体，在快速扩张的城市建设中面临着面积萎缩、格局破碎、功能退化等多重压力。本文深入探讨了城市化背景下生态空间所面临的严峻挑战，阐述了进行生态空间优化与生态修复的紧迫性和必要性。在此基础上，系统分析了城市生态空间优化的关键路径与方法，包括基于生态系统服务功能的空间识别与规划、生态网络构建与连通性提升策略以及多功能生态空间的整合与设计。同时，重点构建了城市生态修复的技术体系，涵盖了体系的核心构成、关键生态修复技术的原理与实践，以及技术集成、监测评估与适应性管理等重要环节。

关 键 词： 城市化；生态空间；空间优化；生态修复

Ecological Space Optimization and Construction of Ecological Restoration Technology System in the Process of Urbanization

Wang Duolong

Bayannur Ecological Environment Development Center, Inner Mongolia Autonomous Region, Bayannur,
Inner Mongolia 015000

Abstract： With the acceleration of the global urbanization process, the contradiction between urban development and ecological environment protection has become increasingly prominent. Urban ecological space, as a key carrier for maintaining the health of the urban ecosystem, providing ecosystem services, and ensuring the quality of the living environment, is facing multiple pressures such as shrinking area, fragmented layout, and functional degradation in the rapidly expanding urban construction. This article deeply explores the severe challenges faced by ecological space under the background of urbanization, and expounds the urgency and necessity of optimizing ecological space and ecological restoration. On this basis, the key paths and methods for optimizing urban ecological space were systematically analyzed, including spatial identification and planning based on ecosystem service functions, ecological network construction and connectivity improvement strategies, as well as the integration and design of multi-functional ecological Spaces. Meanwhile, a technical system for urban ecological restoration has been focused on, covering the core components of the system, the principles and practices of key ecological restoration technologies, as well as important links such as technology integration, monitoring and evaluation, and adaptive management.

Keywords： urbanization; ecological space; spatial optimization; ecological restoration

引言

城市化是人类文明进步和社会经济发展的必然趋势，但其快速推进也给生态环境带来了前所未有的压力。在城市扩张过程中，自然和半自然生态系统被大量侵占和改造，导致生态空间规模缩减、结构失衡、功能衰退，引发了生物多样性丧失、环境污染加剧、城市热岛效应增强、生态系统服务能力下降等一系列生态环境问题。生态空间作为城市及其周边区域内具有自然属性、以提供生态系统服务和生态产品为主要功能的地域空间，是保障城市生态安全、提升人居环境品质、实现区域可持续发展的基石。因此，如何在城市化进程中有效保护、优化和修复生态空间，构建健康的城市生态系统，已成为当前城乡规划、环境科学及生态学领域共同关注的核心议题。优化生态空间布局、提升其生态功能，并运用科学的生态修复技术对受损区域进行干预，是缓解城市发展与生态保护冲突、走向生态文明的必由之路。

作者简介：王多龙（1979.08—），男，汉，内蒙古巴彦淖尔人，工作单位：内蒙古自治区巴彦淖尔市生态环境事业发展中心，职称：高级工程师（副高），学历：大学本科，研究方向：生态修复。

一、城市化对生态空间的挑战与优化必要性

（一）城市化进程对生态空间的胁迫效应

城市化的核心特征之一是土地利用/覆被的剧烈变化。大规模的建设活动将农田、林地、草地、湿地等自然或半自然生态空间转变为建筑、道路等不透水地面，直接导致生态空间的绝对数量减少^[1]。更为严重的是，剩余的生态空间往往被城市建成区分割、包围，形成孤立、破碎的“生态孤岛”，阻碍了物种迁徙、基因交流和能量流动，降低了区域生态系统的整体性和稳定性^[2]。同时，城市高强度的人类活动带来了严重的环境污染，工业排放、交通尾气、生活污水和固体废弃物等污染源，持续对城市内部及周边的土壤、水体和大气环境造成污染，损害生态空间的质量和生态功能。此外，城市硬质下垫面取代自然植被，加上人为热量排放，显著改变了局地气候，形成“城市热岛效应”，进一步干扰了生态过程，对生物生存构成威胁。这些胁迫效应相互交织、累积放大，共同导致了城市生态系统服务（如水源涵养、空气净化、气候调节、生物多样性维持等）能力的显著下降。

（二）生态空间优化的内涵与目标

城市生态空间优化并非简单地追求绿地面积的最大化，而是指在深刻理解城市生态系统结构与功能的基础上，通过科学规划和合理布局，调整生态空间的数量、质量、空间格局和连通性，使其能够更有效地发挥生态功能、提供生态系统服务，并与城市社会经济系统协调发展的过程^[3]。其核心内涵在于提升生态空间的“生态效率”和“系统韧性”。优化的目标是多维度的：首先，要保障关键生态过程的顺畅进行，维持区域生态安全格局，例如保护重要的水源涵养区、生物多样性热点区域和生态廊道；其次，要最大化生态系统服务的供给能力，满足城市居民对清洁空气、水、宜人气候和游憩空间的需求；再次，要提升城市生态系统应对自然灾害（如暴雨内涝、高温热浪）和人为干扰的韧性与恢复力；最后，要促进生物多样性的保护与恢复，为各类生物提供适宜的栖息地和迁移通道，构建人与自然和谐共生的城市环境。

（三）优化生态空间的紧迫性与战略意义

面对城市化带来的生态压力，进行生态空间优化已刻不容缓。首先，这是落实国家生态文明建设战略部署、推动绿色发展的内在要求^[4]。优化生态空间是划定并严守生态保护红线、构建国土空间开发保护新格局的重要组成部分。其次，这是提升城市可持续发展能力和综合竞争力的关键举措。一个拥有健康、高效生态空间的城市，能够吸引人才、资本，提升居民幸福感，降低环境治理成本，展现更强的长期发展潜力。再次，优化生态空间对于提升城市应对气候变化、防灾减灾能力具有重要意义。例如，合理的城市湿地、绿地布局能有效缓解城市内涝，降低热岛强度。最后，随着公众生态意识的提升，对高质量生态环境的需求日益增长，优化生态空间是满足人民日益增长的优美生态环境需要的民生工程。因此，将生态空间优化纳入城市发展顶层设计，具有极其重要的现实紧迫性和深远的战略意义。

二、城市生态空间优化的关键路径与方法

（一）基于生态系统服务功能的空间识别与规划

生态空间优化的首要步骤是科学识别哪些区域对于维持城市及区域生态系统的健康与服务功能至关重要。这需要借助生态系统服务评估方法和工具^[5]。例如，利用 InVEST（Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs）、ARIES（Artificial Intelligence for Ecosystem Services）等模型，结合遥感影像、地理信息系统（GIS）、地面调查等多源数据，定量评估不同区域的水源涵养、土壤保持、碳储存、空气净化、生境提供等关键生态系统服务的供给能力。通过对各项服务功能进行空间制图与叠加分析，可以识别出生态功能极重要区（生态源地）、生态敏感区以及生态功能提升潜力区。基于这些识别结果，在国土空间规划、城市总体规划等各层次规划中，应明确这些关键生态空间的边界，将其纳入强制性保护或优先恢复范围，并制定差异化的管控措施和优化策略，确保城市发展不突破生态承载力的底线。

（二）生态网络构建与连通性提升策略

破碎化是城市生态空间面临的主要问题之一，构建生态网络是提升生态空间连通性、维护生态系统整体性的有效途径^[6]。生态网络通常由“源地—廊道—节点”构成。“源地”是大型、高质量的生态斑块，是物种栖息和生态功能的核心区；“廊道”是连接源地的线性或带状生态空间，如河流廊道、道路绿带、山脉走向等，为物种迁移和能量流动提供通道；“节点”是廊道交汇处或小型关键生态斑块，起到“踏脚石”或中转站的作用。构建生态网络需要综合运用最小累积阻力模型（MCR）、电路理论等方法，识别关键的生态源地，模拟物种扩散路径，规划设计生态廊道的走向、宽度和结构。提升连通性的策略包括：保护和修复现有的自然廊道（如河流及其滨水带）；建设人工或半人工廊道（如城市绿道、大型公园之间的连接绿带）；在关键位置设置“踏脚石”斑块；通过生态化的基础设施设计（如动物通道、生态桥梁）克服交通线路等硬性障碍。构建多尺度、功能复合的生态网络，能够有效缓解生境破碎化影响，提升区域生物多样性和生态系统韧性^[7]。

（三）多功能生态空间的整合与设计

传统的城市绿地往往侧重于单一的景观美化或游憩功能。现代生态空间优化理念强调多功能整合，即在有限的城市空间内，通过精心的设计，使生态空间同时承载生态、社会、经济等多重效益^[8]。例如，“海绵城市”建设理念就是多功能生态空间整合的典型实践，通过构建雨水花园、下沉式绿地、植草沟、透水铺装、人工湿地等“绿色”和“灰色”基础设施，实现雨水的自然积存、渗透、净化和利用，兼具防洪排涝、水质改善、雨水资源化、微气候调节和生物栖息地等多重功能。城市中的废弃地、棕地可以通过生态修复技术改造为具有科普教育、休闲游憩和生态保育功能的生态公园。城市边缘的农业用地可以发展都市农业，融合生产、生态、观光、教育等功能。在设计层面，需要注重引入乡土物种，营造近自然的群落结构，增加生境多样性，提升生

态功能；同时，要充分考虑人的需求，设置适宜的活动场地、科普标识、无障碍设施等，促进人与自然的互动，实现生态效益与社会效益的统一。

三、城市生态修复技术体系的构建与应用

（一）生态修复技术体系的核心构成

城市生态修复技术体系是一个涵盖多种技术手段、针对不同受损生态系统类型和修复目标的综合性框架^[9]。其核心构成可以大致分为以下几个层面：首先是污染控制与治理技术，主要针对城市化过程中产生的水体、土壤、大气等环境污染问题，包括物理修复（如客土法、固化/稳定化）、化学修复（如化学淋洗、氧化还原）和生物修复（如植物修复、微生物修复）等技术，旨在削减污染负荷，改善环境介质质量。其次是生境恢复与重建技术，侧重于恢复受损或退化的栖息地，如湿地重建、河流生态修复（河岸带植被恢复、河道形态改造）、矿山/废弃地植被恢复（基质改良、先锋植物种植、群落演替诱导）、城市土壤改良与重建等，旨在恢复生态系统的结构和基本功能。再次是生物多样性保育与提升技术，包括乡土物种筛选与繁育、植被群落构建、动物栖息地营造（人工鸟巢、昆虫旅馆）、物种引种与辅助迁移、生态廊道功能强化等，旨在提升区域的物种丰富度和遗传多样性。最后是生态系统管理与调控技术，如水资源优化调度、外来入侵物种防控、生态监测与预警、适应性管理策略等，旨在维持修复后生态系统的长期稳定和健康运行。

（二）关键生态修复技术的原理与实践

在众多生态修复技术中，有几类在城市环境中应用尤为广泛且关键。例如，针对城市水体污染和内涝问题，人工湿地技术通过模拟天然湿地的结构和功能，利用“基质-微生物-植物”复合系统的物理、化学、生物协同作用，高效去除水中的污染物，同时具有调蓄雨洪、美化景观、提供生境等多种效益。生态浮岛/浮床技术则利用漂浮载体种植水生植物，其根系深入水中吸收污染物，为微生物提供附着场所，适用于湖泊、河道等开放水体的净化^[10]。对于受污染的城市土壤，植物修复技术利用特定植物（超富集植物或耐性植物）吸收、固定、转化或挥发土壤中的重金

属、有机污染物等，具有成本低、环境友好、易于管理等优点，但周期相对较长。微生物修复技术则利用土著或外源微生物的代谢活动降解有机污染物或改变重金属形态，效率较高。在植被恢复方面，强调“近自然”原则，优先选用适应性强、生态位互补的乡土植物，构建结构复杂、功能稳定的植物群落，不仅能快速覆盖裸露地表、防治水土流失，还能为动物提供食物和栖息地，促进生态系统的正向演替。

（三）技术集成、监测评估与适应性管理

城市生态修复往往面临复杂的问题和多重目标，单一技术难以奏效，需要根据修复区域的具体条件（如污染类型与程度、场地空间、水文地质条件、修复目标等）和成本效益，将多种技术进行优化组合与集成应用。例如，在污染河流修复中，可能需要结合底泥清淤（物理）、曝气增氧（物理/化学）、人工湿地（生物/生态）、岸带植被恢复（生态）等多种技术。技术集成应用后，必须建立完善的长期监测与评估体系。监测内容应涵盖水质、土壤质量、植被生长状况、生物多样性（指示物种）、生态系统服务功能变化等多个方面，运用地面采样分析、遥感监测、模型模拟等多种手段，全面、动态地掌握修复效果。基于监测评估结果，需要实施适应性管理。适应性管理是一种“实践-监测-评估-调整”的循环过程，它承认生态系统和修复过程的不确定性，强调在实践中学习，根据反馈信息及时调整修复策略和管理措施，以确保持续达到或逼近修复目标，提高修复工程的成功率和长期效益。

四、结论

城市化是不可逆转的时代潮流，但其发展路径并非注定以牺牲生态环境为代价。通过科学的生态空间优化与有效的生态修复，完全有可能实现城市发展与生态保护的协同共进。生态空间优化是顶层设计，重在预防和格局塑造，通过合理的规划布局，保障城市生态安全底线，提升生态系统服务供给能力和韧性；生态修复则是问题导向的干预措施，重在治理和功能恢复，运用系统化的技术手段，修复受损的生态系统，改善人居环境质量。二者相辅相成，共同构成了城市可持续发展的重要生态支撑。

参考文献

- [1] 罗岭. 空间价值博弈视角下城乡过渡区生态空间优化策略研究 [D]. 重庆交通大学, 2024.
- [2] 侯凯琦. 基于生态系统服务评估的流域生态空间优化研究 [D]. 华中科技大学, 2024.
- [3] 王浩阳, 牛文浩, 宋曼, 等. 基于 LUCC 及其 ESV 响应的陕西省生态网络构建与空间优化 [J]. 资源科学, 2023, 45(07): 1380-1395.
- [4] 柳清. 基于景观生态服务过程的济南市生态空间结构研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2021.
- [5] 李荷. 韧性营建: 高密度建成环境内生态空间优化研究 [D]. 重庆大学, 2020.
- [6] 李茜. 国土空间规划背景下的高密度城市化地区生态空间治理机制及实现路径 [J]. 未来城市设计与运营, 2024, (01): 33-39.
- [7] 杨学亮, 谢旻珂, 张云路, 等. 城市化对城乡生态空间碳储量的影响机制——以北京市为例 [J]. 中国城市林业, 2023, 21(06): 98-105+142.
- [8] 周添惠. 快速城市化地区“三生”空间演变与食物供需研究 [D]. 云南大学, 2022.
- [9] 钟国庆. 城市化对岭南水乡生态空间的影响及修复策略探讨——以广州小洲村为例 [J]. 安徽建筑, 2022, 29(03): 3-6.
- [10] 何龙斌, 凌自苇, 安琪, 等. 高度城市化地区生态空间规划管控研究——以深圳市为例 [J]. 建设科技, 2021, (08): 54-59.

黑龙江省农业面源污染特征与生态环境损害评估研究

刘意仁^{1,2}, 邢凯^{1,2}, 公成成^{1,2}, 沈建华^{1,2}, 赵剑^{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.2025010002

摘要 : 黑龙江省, 我国农业重地, 面临着农业面源污染的挑战。本文深入探讨了该省农业面源污染的多个方面, 涵盖了农药和化肥的过量使用、畜禽粪便的排放问题、农田废弃物的处理失误、坡耕地在暴雨径流作用下的污染, 以及水田集约化生产对环境造成的压力。此外, 本文还评估了这些污染因素对生态环境的破坏, 尤其是水体富营养化和土壤质量退化。文章结尾处, 提出了旨在加强农业面源污染防治的政策法规建议和技术解决方案。

关键词 : 农业面源污染; 黑龙江省; 生态环境损害; 污染防治措施

Research on Characteristics of Agricultural Non-point Source Pollution and Assessment of Ecological Environmental Damage in Heilongjiang Province

Liu Yiren^{1,2}, Xing Kai^{1,2}, Gong Chengcheng^{1,2}, Shen Jianhua^{1,2}, Zhao Jian^{1,2*}

1. Harbin Natural Resources Comprehensive Survey Center of China Geological Survey, Harbin, Heilongjiang 150086

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

Abstract : Heilongjiang Province, a key agricultural region in China, faces challenges from agricultural non-point source pollution. This article delves into multiple aspects of agricultural non-point source pollution in the province, including excessive use of pesticides and fertilizers, issues related to livestock and poultry manure emissions, mishandling of farmland waste, pollution caused by slope farmland under the influence of storm runoff, and environmental pressures resulting from intensive paddy field production. Furthermore, this paper assesses the damage these pollutants cause to the ecological environment, particularly eutrophication of water bodies and degradation of soil quality. Concluding remarks offer policy and regulatory recommendations aimed at strengthening agricultural non-point source pollution prevention and control, along with technical solutions.

Keywords : agricultural non-point source pollution; Heilongjiang Province; ecological environmental damage; pollution prevention and control measures

引言

黑龙江省, 作为我国粮食生产的重要基地, 拥有丰富的农业资源。然而, 随着农业的迅猛发展, 存在着农业面源污染问题。这种污染以其分散性、累积性、隐蔽性和滞后性而著称, 主要源自农药和化肥的过量使用、畜禽粪便的随意排放以及农田废弃物的处理不当。这些污染物通过地表径流和土壤侵蚀的途径, 不仅引发了水体富营养化, 还导致了土壤质量的恶化, 可能对生态环境造成一定的影响。

一、黑龙江省农业面源污染特征分析

(一) 农药化肥的不合理使用

黑龙江省作为我国的农业大省, 在农药化肥的使用上呈现出逐年减少的趋势, 但总量仍不容忽视。以黑龙江省讷河市为例, 年度统计数据显示, 2019 年讷河市施用各类化肥总量为 123057.79 吨, 2020 年讷河市施用各类化肥总量为 116724.79

吨, 2020 年比 2019 年减少 6333 吨, 同比减少 5.15%。2021 年全市化肥施用总量 113106.32 吨, 比 2020 年减 3618.47 吨, 同比减少 3.10%。数据显示, 每年化肥使用量有所下降, 但化肥使用总量仍然比较大, 并且工业化肥被农作物吸收利用的养分较少, 对水体、大气可能造成污染, 尤其是对土壤影响较大^[1]。

然而, 不合理使用农药化肥可能会给土壤和水体带来一定污染问题。过量施用的化肥和农药无法被作物完全吸收, 残留物质

通讯作者: 赵剑 570006630@qq.com

通过地表径流和土壤侵蚀进入水体，引起富营养化。此外，这些有害物质还会损害土壤质量，导致土壤板结和酸化等问题。黑土区坡耕地产流、产沙特征的研究报告指出，不同农田植被条件下，土壤侵蚀强度、径流系数以及产流、产沙量存在显著差异，尤其在植被条件不利时，这些问题更为突出。因此，合理使用农药化肥，防止其流失，对于保护土壤和水资源至关重要。

（二）畜禽粪便排放

黑龙江省作为我国畜牧业的重要发展地区，拥有较大的畜禽养殖规模，每年产生的畜禽粪污量约为1.03亿吨。这些粪便如果未能得到及时有效的处理，将会直接排放到环境中，会对水体和土壤造成相对污染。粪便中的氮、磷等营养物质一旦进入水体，就会引发富营养化问题，同时粪便中的病原体 and 寄生虫也会对环境 and 人类健康构成威胁^[2]。以畜牧养殖大县集贤县为例，该县生猪、肉牛、羊的年存栏量达21万头/只，每年产生的畜禽粪污高达48万吨。为解决这一问题，集贤县通过建设粪污处理厂，将畜牧粪污经过发酵处理转化为有机肥料，这些肥料随后被用于绿色农业种植，从而形成了无害养殖与绿色种植相结合的农业循环产业链，既保护了环境，又促进了农业的可持续发展。

（三）农田废弃物

黑龙江省作为我国的农业大省，拥有广阔的农作物种植面积，因此产生的农田废弃物数量相当可观，主要包括农作物秸秆和农药包装废弃物等。这些农田废弃物的处理不当，如直接丢弃在田间地头，将对环境造成污染。特别是农作物秸秆，如果选择直接焚烧，不仅会导致大气污染，还会造成资源的浪费。而农药包装废弃物的随意丢弃，则可能污染土壤和水体。以黑龙江省为例，每年产生的农作物秸秆约占全国总量的十分之一，尤其在每年4月份的整地备耕阶段，秸秆根茬及残余物的焚烧现象非常普遍，对环境空气质量的影响尤为明显，秸秆根茬焚烧对区域PM2.5浓度的贡献可达到50%以上^[3]。因此，农田废弃物的合理处置对于环境保护至关重要。

（四）暴雨径流对坡耕地污染物的输出

黑龙江省西北部的丘陵漫岗平原地区，坡耕地普遍面临着水土流失的问题。由于坡度的存在和耕地保护措施的忽视，黑土层逐渐变薄。在这些坡耕地上，不同农田植被条件下的产流情况存在显著差异，其中荒地和玉米地的产流量最高，小麦地次之，大豆地最低。径流过程相对于降雨过程表现出明显的滞后性，且随着雨强的变化而变化，而采用水土保持技术模式较好的处理方式，其径流过程的滞后性更为明显，对雨强变化的敏感性较低。

在暴雨径流的作用下，土壤中的氮、磷等污染物通过地表径流和土壤侵蚀被输移至水体和土壤中。以黑龙江省西部丘陵漫岗区的坡耕地为例，不同处理的产沙过程与径流过程呈现出相同的波动变化趋势，但产沙过程受降雨强度变化的影响更为显著^[4]。土壤侵蚀量的季节分布不均，主要集中在降雨量较多的7月和8月。同时，土壤中的有机质、氮、磷、钾等养分也会随着径流和侵蚀而流失，其中有机质的流失量最大，其次是全量养分的流失，而速效养分的流失相对较少。这些现象表明，坡耕地上的水土流失不仅影响了土壤的结构和质量，还对水体环境造成了潜在

的污染风险。

（五）水田集约化生产对环境的影响

在黑龙江省，水稻种植中采用的优化施肥方法包括三次追肥法和四次追肥法，涉及尿素、二铵、氯化钾等多种化肥的使用。此外，为了防治病虫害，水田也会使用农药。水田的排水主要包括人为排水和暴雨径流，这些排水中可能含有化肥和农药的残留物以及其他污染物。这些排水活动对出境河流和界湖的水质产生了影响。排水中的氮、磷等营养物质会导致水体富营养化，这不仅影响了水生生物的生存，也破坏了生态系统的平衡。同时，农药残留对水体造成的污染，对水生生物和人类健康构成了潜在威胁^[5]。以松花江流域为例，农业面源污染的主要污染物为有机污染物和氮磷化合物，这些污染物通过土壤侵蚀、径流和渗透作用进入河流和湖泊，引起水体富营养化，从而严重损害了水质。

二、黑龙江省农业面源污染对生态环境的损害评估

（一）水体富营养化

黑龙江省作为我国的农业大省，由于农药化肥的使用、畜禽粪便排放以及农田废弃物的处理不当，导致大量氮、磷等营养物质通过地表径流和土壤侵蚀等途径进入水体，使得水体中氮、磷含量不断上升。1990年至2004年间，黑龙江省农用化肥的氮、磷施用量和施用密度呈现逐年增长的趋势，同时，全省每年产生的畜禽粪污约1.03亿吨，也含有大量的氮、磷。这些污染物可能导致松花江、辽河等流域水体富营养化问题，水体富营养化会引起藻类及其他浮游生物的过度繁殖，导致水体溶解氧量下降，水质变差，鱼类及其他生物死亡的现象，同时破坏水生生态系统的平衡，影响水资源的利用^[6]。

目前，黑龙江省的松花江、辽河等流域水质现状并不乐观。据2022年全国地表水环境质量状况显示，海河流域和松花江流域可能存在着污染状态。尽管松花江干流水质有所改善，但支流水质形势依然不能忽视。工业和生活废水排放量的快速增长，以及化学耗氧量COD和氨氮排放量的超标，尤其是农业面源污染的加剧，对松花江水域的威胁进一步增大。农业面源污染在黑龙江省水质断面中的贡献占比重大，化肥和农药的流失、畜禽粪便的排放以及农田废弃物的处理不当，都是导致水质恶化的主要原因。这些问题的存在，不仅影响了水体的自净能力，也加剧了流域水污染的严重程度。

（二）土壤质量下降

黑龙江省作为我国的农业大省，农药化肥的不合理使用对土壤肥力产生了显著影响。1990年至2004年间，农用化肥的氮、磷施用量和施用密度逐年增加，过量施用的化肥和农药不仅未能被农作物完全吸收，反而残留在土壤中，改变了土壤的有机质和养分含量。化肥中的氮、磷等营养元素在土壤中积累，造成养分比例失衡，而农药残留则抑制了土壤微生物的活动，影响了有机质的分解和转化，导致土壤中有机质含量减少^[7]。这些问题进一步引发了土壤板结、酸化等现象，影响了土壤的耕作质量和肥料利用率，增加了土壤和肥料养分流失的风险，也会导致地表水和地

下水发生污染。

此外，农业废弃物如农田残膜和畜禽粪便也会对土壤造成了污染。农田残膜影响了土壤的物理性状，阻碍了水肥的运移，降低了土壤的通气性和透水性，影响了土壤微生物的活动和土壤结构的形成，从而降低了土壤肥力。畜禽粪便的随意排放导致氮、磷等营养物质进入土壤，造成土壤养分过剩，影响农作物的正常生长，同时粪便中的病原体 and 寄生虫也对土壤环境和人类健康构成威胁。

土壤重金属污染也是黑龙江省面临的一个问题。化肥中可能含有的重金属元素，以及工业活动和交通排放，都可能导致土壤重金属污染。长期使用含重金属的化肥和环境污染物的积累，使得土壤中重金属含量增加，导致土壤质量下降。土壤中农药的残留还可能促使重金属离子活性增加，进一步加重土壤重金属污染^[8]。这些问题对黑龙江省在农业生产中化肥施用总量增长迅速、利用效率低、施肥方式传统等问题，需要采取有效措施加以改善。

三、黑龙江省农业面源污染防治措施

（一）政策法规层面

《黑龙江省人民政府办公厅关于强化农业面源污染防治的实施意见》旨在坚决打好农业面源污染治理攻坚战，秉持生态优先、绿色发展的理念，力争有效控制污染恶化势头，达成“一控、三减、三基本”的既定目标。政府启动了秸秆综合利用、化肥农药减量使用、畜禽废弃物资源化处理、农膜回收利用、耕地重金属污染防控等八大行动计划，并制定了相应的五大保障措施。在推进绿色龙江建设的进程中，农业面源污染防治成为促进农业资源可持续利用和生态环境整体改善的关键环节^[9]。政策强调，监管工作需要与“金山银山”并重，通过优化产业布局和提升产品品质，实现经济发展与环境保护的双赢。黑龙江省制定了一系列法规政策，建立了农业面源污染监测网络 and 标准体系，对生态环境损害进行量化评估，确保污染得到有效治理和控制。

（二）技术措施层面

黑龙江省致力于推进绿色农业技术，以提升土壤肥力和病虫

害防治效果，同时减少对环境的负担。为此，省内在推广测土配方施肥技术方面做出了努力，通过合作社和直供模式实现精准施肥，并结合农药风险监测与病虫害疫情预警，提供专业化防治与绿色防控的一体化服务。同时，财政专项资金正支持新型有机肥、生物肥和低毒环保型农药的研发与应用，科技企业通过创新平台推动农药市场向绿色转型，以此降低化学农药和化肥的过量施用，保障土壤健康和生态环境的平衡。

在畜禽养殖废弃物利用方面，省内建置了沼气池和有机肥加工厂，如华泽农牧在宾县常安镇的处理中心，将粪污转化为有机肥料和水肥资源，推动种养循环发展，哈尔滨市等地也在提升畜禽粪污的综合利用效率^[10]。此外，省内在农膜回收上实行“五化”利用机制，减少地膜污染，并推动废弃食用菌糠和菌袋的资源化利用，同时建立了农药包装废弃物的强制回收和集中处置体系，推动农药残液的无害化处理。

为了进一步提升农业面源污染防治的效果，亟需提升农民的环保意识，通过教育培训和宣传引导，让农民认识到农业面源污染的危害，并主动参与到环保行动中。加强农村环境综合整治，完善环保基础设施，实施垃圾分类、污水处理等措施，从源头上有效控制农业面源污染，为构建美丽乡村、实现乡村振兴战略目标奠定坚实的基础。这些举措共同构成了黑龙江省农业面源污染防治的全面策略，旨在促进农业的可持续发展。

四、结束语

总而言之，黑龙江省作为我国的农业大省，在农业面源污染方面面临着诸多挑战。通过对农药化肥的不合理使用、畜禽粪便排放、农田废弃物处理不当、暴雨径流对坡耕地污染物的输出以及水田集约化生产对环境的影响等问题的深入分析，揭示了农业面源污染对生态环境的损害。在此基础上，本文提出了从政策法规层面和技术措施层面加强农业面源污染防治的措施。通过实施一系列有效的防治措施，黑龙江省的农业面源污染问题将得到有效控制，实现农业与生态环境的和谐共生，为我国农业的可持续发展贡献力量。

参考文献

- [1] 李文超. 讷河市农业面源污染评估及治理措施研究 [D]. 东北农业大学, 2023. DOI: 10.27010/d.cnki.gdbnu.2023.000896.
- [2] 范长城. 黑龙江省农业面源污染时空特征及影响因素分析 [D]. 东北农业大学, 2023. DOI: 10.27010/d.cnki.gdbnu.2023.000861.
- [3] 葛梦婕. 农业 FDI 对我国农业面源污染的影响研究 [D]. 山东师范大学, 2023. DOI: 10.27280/d.cnki.gsdsu.2023.000863.
- [4] 唐炼. 农业面源污染多维度影响及其治理机制优化研究 [D]. 东北林业大学, 2023. DOI: 10.27009/d.cnki.gdblu.2023.000115.
- [5] 张玖弘. 环境规制对农业面源污染的影响研究 [D]. 西南科技大学, 2022. DOI: 10.27415/d.cnki.gxngc.2022.000773.
- [6] 尚杰, 石锐, 张滨. 农业面源污染与农业经济增长关系的演化特征与动态解析 [J]. 农村经济, 2019, (09): 132–139.
- [7] 梁琪. 广西西江流域农业面源污染综合防控研究 [D]. 广西大学, 2019.
- [8] 杨永健, 孟雪晴. 黑龙江省农业面源污染负荷排放特征研究 [J]. 生态经济, 2018, 34(12): 184–190.
- [9] 易晨欣. 我国农业面源污染防治法律体系的完善 [J]. 法制与经济, 2022, 31(06): 65–69.
- [10] 朱坚, 邵颖, 彭华, 等. 湖南省农业面源污染形势与综合管理对策 [J]. 湖南农业科学, 2022, (10): 49–53. DOI: 10.16498/j.cnki.hnnykx.2022.010.013.