

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3期 2025年6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.artdesignnp.com>

本刊说明:

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

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



- 001 黑龙江省地下水资源开发的生态环境效应及阈值分析 王洋, 那帅博宁, 赵剑, 徐磊
Ecological Environmental Effects and Threshold Analysis of Groundwater Resource Development in Heilongjiang Province Wang Yang, Na Shuaiboning, Zhao Jian, Xu Lei
- 004 地表水微污染物迁移监测及机制分析 杨贵琼, 赵胜荣, 刘业方, 吕天兴
Monitoring and Mechanism Analysis of Micro-pollutant Migration in Surface Water Yang Guiqiong, Zhao Shengrong, Liu Yefang, Lv Tianxing
- 007 城镇集中供热建设现状及节能措施研究 王岳
Study on the Present Situation and Energy Saving Measures of Urban Central Heating Wang Yue
- 010 化工园区危险废物全过程监督检查体系构建与非法转移风险防控研究 李田田
Research on the Construction of a Whole-Process Supervision and Inspection System for Hazardous Waste in Chemical Industry Parks and the Prevention and Control of Illegal Transfer Risks Li Tiantian
- 013 生态环境损害赔偿制度的法律适用冲突与协调路径 杨雪
Legal Application Conflicts and Coordination Pathways in the Ecological Environmental Damage Compensation System Yang Xue
- 016 七叶树的药理作用及生态资源价值 张惟宗
Pharmacological Effects and Ecological Resource Value of Aesculus Chinensis Bunge Zhang Weizong
- 019 固体废物资源化利用的环境效益与工程可行性 邓广才
Environmental Benefits and Engineering Feasibility of Resource Utilization of Solid Waste Deng Guangcai
- 022 西藏生态脆弱区适应性治理路径探析 周发东
Analysis of Adaptive Governance Paths in Ecologically Fragile Areas of Xizang Zhou Fadong
- 025 平原河网地区农村生活污水治理项目设计研究 陈博, 卞方杰, 李俊
Design and Research on Rural Domestic Sewage Treatment Projects in Plain River Network Areas Chen Bo, Bian Fangjie, Li Jun
- 029 生态流量调控与水工环系统协调机制 曹永贵
Ecological Flow Regulation and Coordination Mechanism of Hydro-Engineering-Environment System Cao Yonggui
- 032 人工智能在环境监测中的应用现状及发展趋势 郭媛媛
The Current Application Status and Development Trend of Artificial Intelligence In Environmental Monitoring Guo Yuanyuan
- 035 生态修复与生态环境保护的协同机制及长效管理模式研究 赵春瑞
Research on the Collaborative Mechanism and Long-Term Management Model for Ecological Restoration and Ecological Environment Protection Zhao Chunrui
- 038 双碳目标下能源行业安全与低碳协同发展模式研究 卓子博, 孙国强, 刘鹏
Study on the Coordinated Development Mode of Energy Industry Security and Low Carbon under the Dual Carbon Target Zhuo Zibo, Sun Guoqiang, Liu Peng
- 041 生态净化技术对集中连片海水池塘养殖尾水的处理效果研究——以龙海区紫泥镇甘文农场养殖项目为例 黄清武
Research on the Treatment Effect of Ecological Purification Technology on Effluent from Concentrated Continuous Seawater Pond Aquaculture — A Case Study of the Ganwen Farm Aquaculture Project in Zini Town, Longhai District Huang Qingwu
- 045 ICP-MS与原子吸收光谱仪联合检测饮用水中多元素含量的方法研究 邓富强
Research on the Method for Determining the Contents of Multiple Elements in Drinking Water by Combining ICP-MS with Atomic Absorption Spectrometry Deng Fuqiang

黑龙江省地下水资源开发的生态环境效应及阈值分析

王洋^{1,2}, 那帅博宁^{1,2}, 赵剑^{1,2}, 徐磊^{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.2025030001

摘 要 : 本文系统分析了黑龙江省地下水开发的现状, 揭示了地下水开发导致的生态环境效应。通过整合遥感解译、模型模拟 (如 MODFLOW) 等技术, 构建了包含自然生态与社会经济维度的评价指标体系, 结合层次分析法与熵权法确定综合权重, 对大庆、三江平原等典型区域进行生态环境效应定量评价。基于理论推导、历史数据和模型模拟, 识别了不同生态效应的阈值, 并通过多目标优化模型完成区域开发阈值综合评估。研究旨在为黑龙江省地下水资源的可持续发展提供科学依据, 平衡资源利用与生态保护的关系。

关 键 词 : 黑龙江省; 地下水资源开发; 生态环境效应; 阈值分析

Ecological Environmental Effects and Threshold Analysis of Groundwater Resource Development in Heilongjiang Province

Wang Yang^{1,2}, Na Shuaiboning^{1,2}, Zhao Jian^{1,2}, Xu Lei^{1,2*}

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

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

Abstract : This paper systematically analyzes the current status of groundwater development in Heilongjiang Province and reveals the ecological environmental effects caused by groundwater exploitation. By integrating technologies such as remote sensing interpretation and model simulation (e.g., MODFLOW), an evaluation index system encompassing both natural ecological and socioeconomic dimensions was constructed. The comprehensive weights were determined using a combination of the Analytic Hierarchy Process (AHP) and the Entropy Weight Method, enabling a quantitative assessment of ecological environmental effects in typical regions such as Daqing and the Sanjiang Plain. Based on theoretical derivation, historical data, and model simulations, thresholds for different ecological effects were identified, and a comprehensive assessment of regional development thresholds was conducted using a multi-objective optimization model. The study aims to provide a scientific basis for the sustainable development of groundwater resources in Heilongjiang Province, balancing the relationship between resource utilization and ecological protection.

Keywords : Heilongjiang Province; groundwater resource development; ecological environmental effects; threshold analysis

引言

目前国内外虽在地下水资源开发与生态环境保护领域开展了大量研究, 但针对黑龙江省独特地理环境、气候条件及社会经济发展模式下的地下水资源开发生态环境效应及阈值分析仍相对不足。如何在保障社会经济发展用水需求的同时, 科学评估地下水资源开发生态环境效应, 精准确定生态环境阈值, 实现地下水资源的合理开发与生态环境保护的协调统一, 成为亟待解决的重要课题。本文基于黑龙江省地下水资源开发现状, 系统分析其生态环境效应, 开展阈值研究, 以期为该省地下水资源的可持续利用与生态环境综合保护提供理论依据与实践指导。

一、黑龙江省地下水资源开发现状及生态环境问题

（一）黑龙江省地下水资源开发的主要方式

农业灌溉是地下水的一大用水大户，由于部分地区地表水供应不足或灌溉设施不完善，大量采用机井抽取地下水进行灌溉，以满足农作物生长的需水要求。例如在一些农田集中的区域，分布着众多深浅不一的农用机井。城市供水方面，地下水也占据一定比例。部分城市除了依靠地表水供水系统外，还会利用地下水作为补充水源，尤其是在一些远离大型地表水源地或供水系统尚未完全覆盖的区域，通过建设集中供水井来保障居民和工业用水。工业生产中，部分对水质有特定要求的企业，会自行开采地下水用于生产过程。比如某些化工企业、食品加工企业等，认为地下水水质相对稳定，能更好地满足其生产工艺对水质的需求。

（二）地下水开发引发的生态环境问题

在我国，尤其是北方干旱、半干旱地区，随着人口的增长和工农业、城市建设的迅速发展，地下水的开采量正在逐渐加入。目前我国北方多数的城市和平原地区，地下水已处于超采状态。大规模开发利用地下水资源过程，伴随着水资源造福于人类，取得巨大的社会、经济效益的同时，也带来了种种环境生态负效应^[1]。部分地区可能由于长期过量开采地下水，导致地下水位持续下降，形成了地下水降落漏斗。以大庆地区为例，因石油开采及工农业用水对地下水的大量抽取，地下水位下降明显，漏斗范围不断扩大。这不仅使得开采井单位出水量锐减，一些浅井甚至报废，还导致局部含水层被疏干，造成地下水源枯竭。长期过量开采地下水，降低了所开采含水层的水头压力，致使黏土（淤泥）质隔水层及含水层中黏土（淤泥）质透镜体被压缩，进而引发地面区域性下沉^[2]。

二、地下水资源开发生态环境效应识别与评价

（一）生态环境效应识别方法

在黑龙江省地下水资源开发生态环境效应识别中，可采用多种方法协同作业。通过广泛收集该省多年的水文地质资料、气象数据、土地利用变化资料、生态环境监测数据以及社会经济发展统计资料等，全面掌握地下水资源开发前后的各类信息。组织专业团队对黑龙江省不同区域进行实地勘查，重点关注地下水开采区、生态脆弱区以及出现明显生态环境问题的区域。实地观察地表植被变化、土壤状况、水体形态等，与当地居民交流了解地下水开采对其生产生活的影 响，获取第一手直观资料^[3]。遥感解译技术也是重要手段，利用高分辨率遥感影像，对比不同时期的土地利用类型、植被覆盖度、水体面积等信息，快速识别因地下水开发导致的生态环境变化。模型模拟方法则可以对生态环境效应进行定量分析，运用数值模型，如 MODFLOW 模型，结合黑龙江省地下水流场、含水层特性等参数，模拟不同地下水开采情景下地下水位变化、地面沉降趋势以及生态环境响应，预测未来可能出现的生态环境问题。

（二）生态环境效应评价指标体系构建

基于黑龙江省地下水资源开发的特点和生态环境问题，从自然生态和社会经济两个维度出发，构建全面的评价指标体系。自然生态维度包括地下水环境指标、土壤环境指标、植被与生物多样性指标等，地下水环境指标选取地下水位变化速率、地下水降落漏斗面积、地下水水质指标，这些指标能直观反映地下水开发对地下水资源自身的影响，例如地下水位变化速率可衡量地下水开采强度是否合理，矿化度和氯离子浓度可体现入侵或水质污染程度；土壤环境指标涵盖土壤盐渍化程度、土壤含水量、土壤 pH 值等，在黑龙江省西部，地下水超采引发的土壤盐渍化问题明显，土壤盐渍化程度指标可有效反映这一生态环境效应，而土壤含水量和 pH 值变化能体现地下水与土壤水之间的相互作用对土壤环境的影响；植被与生物多样性指标选取植被覆盖度、物种丰富度指数、濒危物种数量等，以三江平原湿地为例，地下水水位变化影响湿地植被生长，植被覆盖度和物种丰富度指数的变化能清晰展现湿地生态系统在地下水开发影响下的演变情况^[4]。社会经济维度设置农业灌溉用水效率、工业用水重复利用率、居民用水保障率等指标，用于评估地下水开发对社会经济发展的影响，判断水资源利用的可持续性。

（三）生态环境效应评价模型构建

运用层次分析法，将生态环境效应评价指标体系中的目标层、准则层和指标层构建层次结构模型，通过专家打分确定各指标的主观权重，体现专家对不同指标重要性的认知。再利用熵权法计算各指标的客观权重，根据指标数据的变异程度，从数据本身特征确定权重，避免主观因素干扰^[5]。将主观权重和客观权重通过线性组合的方式得到综合权重，使权重确定更加科学合理。将综合权重与各指标的标准化数据相结合，运用加权综合评价模型计算黑龙江省不同区域地下水资源开发生态环境效应的综合得分，得分越高表明生态环境效应越差，从而实现对生态环境效应的定量评价和区域间的对比分析。

三、地下水资源开发生态环境阈值分析

（一）生态环境阈值概念及确定方法

生态环境阈值是生态系统维持自身结构和功能稳定所能承受外界干扰的最大程度或临界值，对黑龙江省地下水资源开发而言，是判断地下水开采是否会引发不可逆生态环境问题的关键指标^[7]。当地下水位下降到特定程度，可能引发地面沉降、植被退化等严重后果，这个临界的水位下降值就是重要的生态环境阈值。通过理论推导法、历史数据分析法和模型模拟法可以确定生态环境阈值，理论推导法依据生态学、水文学原理，结合黑龙江省地质、水文地质条件，从理论计算生态环境阈值；历史数据分析法通过分析长期生态环境监测数据，寻找生态环境指标显著变化的转折点确定阈值；模型模拟法则利用系统动力学模型、生态 - 水文耦合模型等，模拟不同地下水开发强度下生态环境指标变化趋势，通过设置情景确定阈值，以此模拟不同开采量下地面沉降、土壤盐渍化等效应变化来明确相应阈值。

（二）基于不同生态环境效应的阈值分析

地下水环境方面，土壤环境上，西部松嫩平原地区土壤盐渍化问题明显，当土壤表层含盐量超过 0.3%，农作物生长受明显抑制，土壤生态系统退化，此为该地区土壤盐渍化的生态环境阈值；同时土壤含水量低于田间持水量的 60% 时，植被根系难以获取充足水分，易引发植被退化，该数值可作为土壤含水量阈值。植被与生物多样性方面，以三江平原湿地为例，当湿地植被覆盖度下降至 40% 以下，湿地生态系统的物质循环和能量流动被严重破坏，生物栖息地减少，物种丰富度降低，该值可作为湿地植被生态环境阈值；从生物多样性角度，某区域濒危物种数量占物种总数比例超过 5% 时，表明该区域生态系统处于高度危险状态，此比例可作为生物多样性保护阈值。

（三）区域地下水资源开发阈值综合评估

基于上述不同生态环境效应的阈值分析，采用多目标综合评价方法对黑龙江省区域地下水资源开发阈值进行综合评估。将地下水环境、土壤环境、植被与生物多样性等不同生态环境效应的阈值作为约束条件，构建区域地下水资源开发的多目标优化模型，并结合黑龙江省不同区域社会经济发展需求，在满足生态环境阈值约束的前提下，通过模型优化求解，确定各区域地下水资源的合理开发量，即区域地下水资源开发阈值^[9]。以哈尔滨市为

例，综合考虑城市供水、周边农业灌溉需求以及多方面生态环境阈值限制，经模型计算得出其地下水资源年合理开发量阈值。通过这种综合评估方式，能够在保障生态环境安全的基础上，实现黑龙江省地下水资源科学合理利用。

四、结束语

本文通过对黑龙江省地下水资源开发现状、生态环境效应及阈值的系统研究，明确了农业灌溉、城市供水和工业生产等开发方式引发的地下水位下降、地面沉降等问题，并构建了科学的生态环境效应评价体系，精准识别了不同生态效应的阈值，提出区域开发阈值综合评估方法。研究成果为黑龙江省制定地下水资源科学管理政策、优化开发布局提供了量化依据，对协调资源利用与生态保护、推动区域可持续发展具有重要现实意义。然而地下水资源系统与生态环境的相互作用复杂多变，未来仍需进一步深化长期动态监测与多学科交叉研究，完善阈值动态调整机制，同时结合气候变化与人类活动的影响，探索更精细化的地下水开发调控策略，为黑龙江省生态安全与水资源高效利用提供更全面的理论支撑与实践路径。

参考文献

- [1] 张立杰. 地下水资源可持续开发利用的综合技术体系 [J]. 东北林业大学学报, 2001, 29(4): 41–43. DOI: 10.3969/j.issn.1000-5382.2001.04.012.
- [2] 李佳鸿. 黑龙江省水资源承载力评价及水资源优化配置研究 [D]. 东北农业大学, 2016.
- [3] 李代福, 陈建伟, 孙化江等. 黑龙江省地下水资源开发利用引起的环境问题及防治对策 [J]. 地下水, 2008, 30(4): 68–70. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1184.2008.04.024.
- [4] 孙化江, 李洪文, 叶凤等. 黑龙江省地下水资源开发利用引起的环境问题及防治对策 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2001, 12(2): 90–93. DOI: 10.3969/j.issn.1003-8035.2001.02.020.
- [5] 缪晓宇, 郭昂青. 黑龙江省松嫩平原地下水资源开发利用中主要问题及对策 [J]. 地质与资源, 2010, 19(2): 105–108, 133. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1947.2010.02.005.
- [6] 于汪洋, 杨森. 哈尔滨市地下水资源存在问题及对策 [J]. 水利科技与经济, 2011, 17(3): 61–62. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7175.2011.03.024.
- [7] 孙雷, 耿鸿江. 浅析哈尔滨市超采区变化情况 [J]. 黑龙江水利科技, 2018, 46(07): 143–146. DOI: 10.14122/j.cnki.hskj.2018.07.047.
- [8] 丛璐. 松嫩平原（黑龙江）地下水动态特征及超采区评价研究 [D]. 吉林大学, 2017.
- [9] 孙香泰, 孙博文. 黑龙江省松嫩平原地下水超采区分析研究 [J]. 黑龙江水利科技, 2016, 44(05): 1–4. DOI: 10.14122/j.cnki.hskj.2016.05.002.

地表水微污染物迁移监测及机制分析

杨贵琼, 赵胜荣, 刘业方, 吕天兴
云南亚明环境监测科技有限公司, 云南 昆明 650217
DOI:10.61369/EAE.2025030002

摘 要 : 本文主要基于地表水微污染物迁移监测及其作用机制的视角展开探讨。深入研究目前常见的微污染物, 比如 PPCPs、EDCs、微塑料等, 通过其不同来源和排放方式, 着重阐述样品收集相关内容, 针对预处理和色谱-质谱联用、荧光光谱、纳米颗粒跟踪分析等检测方法, 并且介绍了物理的水流影响、吸附、解吸过程, 化学的化学反应、酸碱平衡反应, 生物的生物摄取和生物转化等不同的微污染物迁移机理, 旨在为了解不同微污染物在地表水中的迁移规律, 制定污染防控措施提供理论依据, 对地表水的治理具有深远的影响, 展望微污染物迁移监测和机制在未来的发展方向。

关 键 词 : 地表水微污染物; 迁移监测; 迁移机制; 检测技术; 环境行为

Monitoring and Mechanism Analysis of Micro-pollutant Migration in Surface Water

Yang Guiqiong, Zhao Shengrong, Liu Yefang, Lv Tianxing
Yunnan Yaming Environmental Monitoring Technology Co., LTD., Kunming, Yunnan 650217

Abstract : This paper primarily explores the monitoring of micropollutant transport in surface water and its underlying mechanisms. It conducts an in-depth investigation into common micropollutants such as PPCPs, EDCs, and microplastics, analyzing their diverse sources and emission pathways, with particular emphasis on sample collection procedures. The study elaborates on detection methods including pretreatment techniques, chromatography-mass spectrometry, fluorescence spectroscopy, and nanoparticle tracking analysis. Furthermore, it introduces various transport mechanisms of micropollutants, encompassing physical processes like hydrodynamic influences, adsorption, and desorption; chemical processes such as chemical response and acid-base balance response; and biological processes including bioaccumulation and biotransformation. The research aims to elucidate the transport patterns of different micropollutants in surface water, providing a theoretical foundation for developing pollution prevention and control measures, which holds profound implications for surface water management. Finally, the paper prospects future research directions in micropollutant transport monitoring and mechanistic studies.

Keywords : surface water micropollutants; transport monitoring; transport mechanisms; detection techniques; environmental behavior

引言

随着城市化进程和工业化进程的加快, 地表水微污染问题渐趋凸显。其为水生态系统安全以及人类健康带来威胁。药物和个护品、内分泌干扰物、微塑料这类微污染物尽管浓度较低, 但具有持久性、生物积累等特性, 其迁移扩散会致使污染范围进一步扩展。目前对微污染物迁移途径和机理的认知尚不充分, 现有的监测技术在灵敏度和特异性方面仍需提升。因此, 展开地表水微污染物迁移监测及其机理研究, 明晰微污染物的环境行为特征, 这对于创建有效的污染防控体系, 保障水资源安全有着重要的理论价值和现实意义。

一、地表水微污染物概述

(一) 常见微污染物类型

地表水微污染物有药物及个人护理品 (PPCPs)、内分泌干

扰物 (EDCs)、微塑料、重金属纳米颗粒等, 对水环境危害大。PPCPs有处方药等, 抗生素、布洛芬在城市河流中浓度达 $\mu\text{g/L}$, 干扰水生生物内分泌和免疫系统; EDCs有双酚 A, 影响水生生物性别分化, 邻苯二甲酸酯毒性高; 微塑料粒径 $< 5\text{mm}$, 由塑

作者简介: 杨贵琼 (1993.07-), 女, 云南文山山人, 汉族, 本科, 工程师, 主要研究方向: 环境监测。

料破碎产生，不同地区浓度类型不同，存在物理损伤和污染物吸附双重危害；重金属纳米颗粒有银、二氧化钛纳米颗粒等，因纳米技术发展进入地表水，比传统重金属离子毒性大，会抑制水生生物生理过程。

（二）微污染物的来源与排放途径

微污染物的来源有生活污水排放、工业废水排放、农业面源污染、大气沉降这几个方面。生活污水里存在大量的 PPCPs、微塑料，未经处理就排放到地表水里后，上述因素成为了微污染物的重要来源；工业废水排放会带来各种各样的 EDCs、重金属纳米颗粒等，塑料在生产过程中产生的废水中含有大量微塑料和添加剂；农业面源污染包含农药、兽药的使用以及畜禽养殖废水的排放，诸多 PPCPs 以此种方式进入到了地表水当中；大气沉降的影响同样不容忽视，部分微污染物通过大气传输，最终沉降至地表水体。有研究表明，在某些偏远地区，经由大气沉降进入地表水体的微污染物占比显著。

二、迁移监测技术与方法

（一）样品采集与预处理

1. 水样采集策略

地表水水样采集时，要考虑到采样点的代表性、采样时间和频率等因素。通常会在河流、湖泊的不同地方设置多个采样点，包括上游、中游、下游，还有入湖口、出水口等；从长期监测的角度来讲，按照不同的季节、水文状况来决定采样频率，比如雨季和旱季需提高采样频次，以此掌握微污染物在不同流量下的变化情况；采用专门设计的采样设备，自动采样器等，就可以实现按时段连续采样，保证样品的完整性和准确性。

2. 预处理技术

采集回来的水样需要进行预处理以富集水样中微污染物及去除干扰物。常用的预处理方法有 SPE，即利用柱子上的某些物质将水样中的污染物进行富集，再利用一些洗脱液将其洗脱出来；而对于微塑料可以采用过滤的方法，选择不同孔径（如 $0.45\mu\text{m}$ 、 $0.22\mu\text{m}$ 等）的滤膜对水样进行过滤，使得微塑料被保留在滤膜上；对于重金属纳米颗粒可以采用离心或超滤的方法进行分离、富集。在整个预处理过程中要注意控制好实验条件，避免发生二次污染。

（二）分析检测技术

1. 色谱-质谱联用技术

气相色谱-质谱联用（GC-MS）和液相色谱-质谱联用（LC-MS）被用来检测微污染物。前者可对那些像部分农药、有机污染物这些挥发性或者半挥发性的微污染物加以分析，混合物通过气相色谱分离成各个组分之后交给质谱去执行定性和定量的任务，在对水体里的有机氯农药展开检测时，GC-MS 就能准确地测定出它们的种类和数量；LC-MS 对于极性和易受热损伤的这种微污染物来说是更好的选择，在药物和个人护理品（PPCPs）中，绝大多数药物均呈现此特征，以水环境中的抗生素为例，LC-MS 能够一次性检查多种抗生素，同时非常灵敏。

2. 荧光光谱技术

荧光光谱技术可以用来测有荧光的微污染物。一些 PPCPs 和 EDCs 在某种波长光的刺激下会发出光来，通过测量荧光强度可确

定这些物质的含量，部分多环芳烃类的内分泌干扰物特别喜欢发光，用荧光光谱仪就可以很快知道地表水中有多少，这种方法方便又快，然而遇上复杂的样品，荧光会对结果产生干扰，此时需借助其他技术手段。

3. 纳米颗粒跟踪分析技术（NTA）的应用研究

NTA 主要用于纳米颗粒的粒径分布与浓度检测，对于重金属纳米颗粒和微塑料中的纳米级颗粒，NTA 具有独特的优势。利用激光照射样品，纳米颗粒会散射出光，摄像机记录下颗粒的布朗运动，再用斯托克斯-爱因斯坦方程计算出颗粒的粒径，最后统计颗粒的浓度，在研究地表水纳米塑料的粒径分布和浓度变化时，NTA 可以提供直观且准确的数据。

4. 其他新兴技术

近些年来，一些新出现的技术也被应用到地表水微污染物监测当中，像表面增强拉曼光谱（SERS），它的存在使得微污染物的拉曼信号变得十分强烈，这样一来，痕量检测就得以实现，当检测微塑料的化学成分时，SERS 可以给予快速而准确的信息；依靠生物传感器的检测技术，利用生物分子与微污染物之间特有的结合反应，通过信号转换来检测微污染物，酶联免疫吸附测定（ELISA）便属于这种类型，其可以用来检测某些特定的药物或者激素等微污染物，其灵敏度较高，特异性也较强。

三、迁移机制分析

（一）物理迁移机制

1. 水流对微污染物迁移影响的研究

水流是地表水微污染物迁移的重要推动力之一。水流速度与流向影响着微污染物的扩散与输移。在河流当中，流速较快之处，微污染物会迅速朝下游输移，其扩散范围较大；洪水时期，河流流速加快，微污染物会被迅速带往下游更远之处。流速较慢之处，比如湖泊、河湾等地方，微污染物容易出现聚集与沉降。水流的紊动也会影响微污染物的迁移，紊动能使微污染物在水中混合得更为均匀，促使它们扩散。通过创建水动力模型，结合微污染物的输移方程，可模拟水流作用下微污染物的迁移进程，预估它在不同水文状况下的分布情形。

2. 吸附与解吸过程

微污染物在水体中会与悬浮颗粒物、沉积物等发生吸附和解吸作用，这会影响微污染物的迁移过程。悬浮颗粒物和沉积物具有较大的比表面积，能够吸附微污染物，一些重金属纳米颗粒和有机微污染物容易被黏土矿物、腐殖质等吸附。吸附使得微污染物从水相转移到固相，进而降低了其在水体中的迁移能力。当环境条件发生变化时，比如 pH 值、离子强度发生变化，被吸附的微污染物可能会解吸，重新回到水相，继续迁移。研究发现，不同种类微污染物在不同的吸附剂上吸附和解吸的特性存在差异，通过实验测定吸附等温线等参数，可以了解这一过程对微污染物迁移的影响。

3. 沉降与再悬浮

微污染物同悬浮颗粒物相融合之后，也许会出现沉降现象，将它们沉积到水底沉积物之中。沉降速度受微污染物和颗粒物结合程度、颗粒物大小、重量等诸多要素的影响，粒径较大、密度较高的颗粒物携带微污染物沉降速度更快。当这些微污染物沉到

沉积物里面之后,在某些情况下又可能再次悬浮起来,例如水流速度突然变大、底栖生物开始活动等情形,这将导致沉积物再次受到扰动,使得微污染物重新回到水中去参与它的迁移进程。在河口地区,潮汐发生得较为频繁,沉积物的沉降和再次悬浮对微污染物的流动与分布有着很大影响。通过实际观察和实验模拟,可以探究出各种因素给这两种过程带来的影响效果,进而更深刻地了解微污染物在水体和沉积物之间动态流转的情形。

（二）化学迁移机制

1. 化学反应对微污染物形态及迁移性的影响研究

微污染物在地表水中会发生各种化学反应,例如氧化还原反应、水解反应、光化学反应等,这些反应都会使微污染物的化学形态发生改变,从而影响其迁移性。例如,某些有机微污染物在光照射下会发生光降解反应,变成小分子物质,它们的亲水性以及迁移性可能会发生改变。对于重金属纳米颗粒而言,氧化还原反应会改变它的表面电荷和化学成分,从而影响其在水体中的稳定程度和迁移行为。

2. 酸碱平衡中离子交换作用机制探讨

地表水的 pH 值和离子组成会干扰微污染物的酸碱平衡以及离子交换过程。带有酸性或者碱性官能团的一些微污染物,比如某些药物、有机酸等, pH 值的变动会影响到它们的解离情况,进而影响其在水体里的溶解能力和迁移能力。酸性环境下,一些弱酸性药物也许是以分子形式存在,这种情况下,它们就比较容易吸附到悬浮颗粒物或者沉积物上,这样一来,它们在水体里的迁移能力就会变小。离子交换作用同样会影响到微污染物的迁移,因为水体中的阳离子,例如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等,可以跟吸附在颗粒物表面的微污染物开展离子交换反应,促使微污染物从颗粒物上脱离出来,进入到水相当中,从而加大其迁移能力。通过探究水体的化学组成及其酸碱平衡状况给微污染物带来的影响,可以为制订污染控制方案赋予参照。

（三）生物迁移机制

1. 生物摄取与积累过程

水生生物摄取和累积微污染物是生物迁移的重要环节。浮游生物、鱼类、贝类等水生生物会通过摄食、呼吸等方式吸收水体中的微污染物。浮游动物在摄食时会摄取微塑料和其他微污染物,这些微污染物会在它们体内逐渐累积,沿着食物链传递。微污染物会在高营养级生物体内不断富集,导致生物放大效应。有些持久性有机污染物在顶级捕食者体内的浓度可能比水体中高出数千倍甚至数万倍。通过生物积累实验,测定生物富集因子 (BCF) 等参数,就可以评判微污染物在生物体内的累积情况和迁移风险。

2. 生物转化与代谢

水生生物对微污染物的转化与代谢同样会影响微污染物的迁移。生物体内的酶系统会对微污染物进行代谢转化,使微污染物转化为其他物质。某些细菌可以将水体中有机微污染物降解为二氧化碳、水等无害物质,然而有的代谢产物可能更具有毒性或迁移性。生物转化过程还会影响微污染物的化学形态,从而影响其在生物体内的累积以及在水生态系统中的迁移。研究生物转化途径及代谢过程,有助于更好地理解微污染物的生物迁移过程。

3. 生物扰动对微污染物迁移的作用机制研究

底栖生物挖掘、摄食、排泄等活动会影响沉积物,影响微污染物在沉积物-水界面的迁移。底栖生物挖掘活动会促进沉积物-水界面之间物质交换,使沉积物中微污染物重新释放到水中。底栖生物排泄的有机质也可能影响沉积物理化性质,影响微污染物的吸附与解吸。例如,蚯蚓等底栖动物在沉积物中挖掘时会增加沉积物孔隙,促进微污染物扩散与迁移。

（四）环境因素交叉作用对迁移的影响

微污染物迁移常常是多种环境因素交叉形成的。水温变动会改变水流黏性 (物理迁移),也会改变水生生物的代谢速率 (生物迁移)。例如,在夏天高温时期,某个湖泊里微塑料的生物摄取速率较冬天提升 37%;而且因为水体分层引发的水流阻隔现象,上层水体里的微塑料浓度比底层高出 2.3 倍。水体里的溶解性有机质 (DOM) 既能通过氢键同 PPCPs 结合从而改善它的吸附能力 (物理机理),又能当作光敏剂促使光化学反应 (化学机理)。在某个水库的检测进程中,发现 DOM 含量较多的地方抗生素光降解速率比清水区快了 1.5 倍;DOM 和沉积物的复合效果致使 30% 的降解中间产物重新吸附累积。此交叉影响表明,单个机制分析难以完全展现微污染物的环境行为,若需构建起多种因素结合的迁移模型,从而为污染防控赋予更准确的参数支撑。

四、结论与展望

研究对地表水微污染物类型与来源做了总结,迁移监测技术及方法被提及,物理、化学、生物迁移机制造成的影响被剖析。监测时多种监测技术结合能提高准确性,不同迁移过程会共同影响它在水环境中的分布与归宿,但现有研究仍显不足,新型微污染物监测方法仍需优化,多机制协同作用的研究尚显薄弱。应该加强高灵敏度检测技术的研发力度,探究复杂环境条件下迁移机制造成影响的综合现象,为地表水微污染处理增添更多科学依据。

参考文献

[1] 万奇霖,刘瑶,洪文俊,等. 钱塘江地表水有机微污染物 AhR 效应分析 [J]. 浙江大学学报 (理学版), 2025, 52(02): 263–274.
[2] 洪涓. 固相微萃取技术在地表水环境农药污染物检测中的应用研究 [J]. 山西化工, 2025, 45(02): 81–83+122.
[3] 王进喜,付怡琳. 污染物总量控制和地表水环境容量的研究进展 [J]. 兰州文理学院学报 (自然科学版), 2024, 38(05): 89–92+128.
[4] 黎文辉. 地表水状态实时监测与重金属污染物特征分布研究 [J]. 环境科学与管理, 2024, 49(05): 143–146.
[5] 许秋实,关孟欣,田启明,等. 地表水污染物精细化溯源及管理技术研究——评《地表水环境质量自动监测预警理论与实践》[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(03): 116–117.
[6] 黎如昊,严惠华. 地表水污染状态实时监测与污染物特征分布研究 [J]. 环境科学与管理, 2024, 49(02): 121–124.
[7] 李蕊. 河岸过滤系统中有机微污染物的去除研究 [D]. 桂林理工大学, 2023.
[8] 丁琪琪,龚雄虎,王兆德,等. 基于多指标综合评价法筛选地表水环境优先污染物——以湖北涨渡湖为例 [J]. 湖泊科学, 2022, 34(01): 90–108.
[9] 孙唯伟. 有机物对重力流超滤处理含铁锰地表水的影响机制及应对突发污染研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2021.
[10] 李希凡. 地表水中复合微污染物致使的纳滤膜污染机制研究 [D]. 河南师范大学, 2021.

城镇集中供热建设现状及节能措施研究

王岳

中煤科工清洁能源股份有限公司, 北京 100020

DOI:10.61369/EAE.2025030003

摘 要 : 随着我国市场经济的持续推进以及民众生活质量的显著提升, 集中供暖行业正稳步发展。在这一发展进程中, 也逐渐涌现出一系列新的问题与挑战。因此, 通过调查研究分析了我国集中供热的体量大小、集中供热的当前态势、集中供热所具备的优势, 以及其在发展进程中遇到的难题, 并针对目前集中供热出现的能源消耗严重等问题, 从国家推行的长期节能发展战略来看, 需采用切实有效的节能办法, 达到集中供热系统的节约能耗的最终目标。为推动我国集中供热行业发展, 实现节约能源与保护生态环境的目标, 让集中供热逐步成为中国城镇的主要供暖模式。

关 键 词 : 集中供热; 节能措施; 建设现状

Study on the Present Situation and Energy Saving Measures of Urban Central Heating

Wang Yue

China Coal Technology and Engineering Group Clean Energy Co., Ltd. Beijing 100020

Abstract : With the continuous advancement of China's market economy and significant improvements in living standards, the centralized heating industry has been steadily developing. However, this progress has also brought about a series of new challenges and issues. Through comprehensive research, we have analyzed the current scale of China's centralized heating system, its operational status, inherent advantages, and existing difficulties. Addressing critical issues like excessive energy consumption, the study proposes practical energy-saving measures aligned with the nation's long-term energy conservation strategy to achieve ultimate goals of reducing system energy use. To promote the industry's growth and realize dual objectives of energy conservation and ecological protection, we aim to establish centralized heating as the primary urban heating solution in China.

Keywords : central heating; energy saving measures; construction status quo

引言

近年来, 我国集中供热行业的规模在不断地扩大, 用户对供热质量的需求也在不断的提高, 按需供热的实现已成为解决民生问题的迫切需要^[1]。根据国家统计局提供的数据显示, 我国在2014年度的标准煤消费总量为4260万吨, 和2013年度的煤炭消耗相比较仅仅增长了0.02%。2013年我们国家成功超越美国成为了世界上的第一大能源消耗国, 并且能源消耗占据世界总量的20%, 根据有关部门的统计显示, 我们国家的供热消耗比同等环境条件下的发达国家高出近3倍, 但是, 建筑能耗所占比例比较低^[2]。集中供热系统凭借自身具有的节能、管理方便等优点, 在我们得到了迅速地发展。目前, 我们国家已经有大约三百个城市建立了集中供热系统, 供热的面积已覆盖约8.5亿 m², 特别是在气候寒冷的西北、华北和东北地区, 集中供热使用范围更加的广泛^[3]。

对此, 国内一些学者也进行了相关研究, 对城镇化下我国北方省份集中供热耗煤预测及节能潜力, 提供了对城镇化下的集中供热耗煤量的预测方法, 这对集中供热新工程的建立, 对供热所耗较为清洁的能源的选择和消耗量的估算也是一个借鉴和参考。

一、集中供热的发展现状

我国集中供热发展到今天, 经历了很长时间的艰苦探索发展, 基础设施从无到有的建设起来, 建设规模从小到大逐渐形成

体系, 直到现在处于了竞争发展的状态。我们国家传统集中供热形式比较单一, 锅炉房供暖、区域联合供暖和热电联产是最主要的供热形式。自上世纪40年代以来, 集中供热大体分为了四个阶段: 简单利用阶段、简单管理阶段、基本建设阶段和全面发展阶段。

二、我国集中供热系统存在的问题

依据有关文献分析以及实地调研的成果显示，集中供热系统虽然有了些效果，但是其发展过程中的问题仍有很多难以应对的难点。这些问题大多出现于规划设计，运行维护还有管理体系这些层面，从这几个方面来看：

（1）持续低负荷运行时，锅炉热效率往往大幅下降。大多数供热锅炉实际运行工况偏离设计参数，出口水温低于额定值，很难维持在最佳能效区间，造成能源消耗加大。据数据统计，我国燃煤锅炉平均运行效率大概在60%到65%左右，比发达国家普遍水平低约20个百分点^[4]。

（2）供热管网存在显著的水力失调问题。在设计环节，供热管网的水力及热力状况会受到水力平衡计算和安装情况的作用。当前，多数供热系统都存在水力失调与热力不平衡的情况，这导致了供热不均匀，进而造成了热源的浪费。

（3）当下，供热设备行业的标准化创建尚存不足，致使产品的品质好坏不一，实际供热效果很难符合设计预期，从而造成大量的能源资源被浪费掉。在我国的环境质量评定体系里，还没有形成起系统的标准架构，对于供热过程中产生的污染排放问题，也没有相应的制约手段和惩处办法，这样就使得大气污染的防治工作陷入了更为严峻的形势当中。

（4）换热站的数据资料不够完备，供热管网的运行参数不够精准，难以实现定量管理。由于未能与计算机自动控制系统实现良好结合运用，无法及时察觉网络故障，这不仅影响了管网运行的稳定性，还造成了能源的损耗。

（5）设备陈旧，技术落后。我们国家北方地区因为受到历史因素的影响，大部分采暖设备老化，技术条件相对落后，因此，造成能源的过多消耗，使环境严重污染，长期如此将会造成恶性循环。

（6）当前供热能源结构存在明显缺陷。我国供暖体系主要依赖煤炭作为燃料，过度消耗不可再生资源并释放大量温室气体，对生态环境造成严重破坏。这种以燃煤为主的传统供热模式已难以适应热用户多元化需求的变化趋势^[5]。

三、集中供热的优越性

（一）节约燃料

在我国工业锅炉体系中，燃煤锅炉占据主导地位。其中，以供暖及中小型工业应用为主的燃煤锅炉热效率一般介于50%至60%，而大型工业锅炉的热效率则保持在70%到80%区间；相比之下，电厂锅炉的热效率可达86%至90%。若实施锅炉房区域供热或热电厂集中供能模式，则整体供热效率有望提升20%至30%。推进区域集中供热系统的建设，不仅能够提高能源使用效率，还对促进我国供热行业的可持续发展具有重要的战略意义^[6]。

（二）减轻大气污染

我国能源结构以煤炭为主导，其燃烧过程释放的污染物对大气环境质量构成显著影响。二氧化硫（SO₂）、二氧化碳（CO₂）、氮氧化物（NO_x）以及颗粒物等核心组分是造成空气污染的主要因素。相较于分散式供热方式，集中供热通过优化单台锅炉规模、配备高效除尘装置并实施高空排放技术，可有效改善区域空气质量状况。

（三）节省用地

集中式供热系统替代传统分散式锅炉房供暖模式，不仅能够有效释放燃料储备与灰渣存放空间，还对改善城市生态环境具有显著作用。

（四）提升供热质量

分布式供热是间歇供热，由于这种方式供一段时间，就会间歇一段时间，供热稳定性差；而集中供热采用的是连续供热模式，它会根据负荷情况及时进行调整，无论外界温度怎样变动，室内温度都能保持稳定。

（五）噪音低，少扰民

分散供热的供热站点离住宅区较近，供热时产生的噪音会对周边居民造成影响；而集中供暖的地点与住宅区相距较远，噪音便不会干扰到居民。

（六）自动化程度高

自动控制系统构成了集中供热系统温度调节的关键技术支撑，可借助实时采集外部环境温度数据并动态优化供热参数，精准满足用户需求，同时大幅降低人工操作强度与管理成本。

（七）设备故障率低

集中供热所使用的设备均为专门的供暖仪器，这些设备的质量相对较好，运行过程中的安全性较高，出现故障的概率也比较低。

四、集中供热的节能技术措施

在确定节能目标之后，需要建立体系化、可操作的实现路径来实现目标。在提升技术方案的科学性、实用性时，要根据区域实际情况，结合技术先进性、经济性、可行性等多维度因素，加强节能技术措施的全生命周期动态监测与管控。可以从以下几方面开展：

（一）安装热工仪表并掌握系统的运行

热工仪表作为集中供热系统运行状况监测的主要设备，其可靠程度关乎整个系统的稳定与否。它的主要功能大致包含两部分，一是凭借实时数据采集技术和动态监测手段，随时察觉潜藏的故障风险，然后依靠专业的数据分析来给出改进策略的科学依据；二是给锅炉操作人员给予准确的数据支撑，使得他们可以对燃烧过程实施精细调控，燃料配比也能做到恰当分配，如此一来能源利用效率便能得到极大提升，能耗自然也就有所降低^[7]。

（二）采用煤渣混烧措施来降低煤渣含碳量，以提高热效率

将煤渣与煤按一定比例混合燃烧，既是经济可行的节能技术手段，也是符合现代绿色低碳发展的要求。一般情况下，将煤渣与煤按4:1的质量比混合后送入锅炉燃烧。由于煤渣颗粒较大，其物理性质有助于降低通风阻力，改善气流分布的均匀性。提高煤层透气性，从而提高煤炭燃烧效率，减少碳排放量^[8]。在中小型锅炉的应用中，经过混合燃烧后的煤渣碳含量可以降低3%~8%。

（三）锅炉运转的调控方式

供暖季节期间，室内温度受到外部环境变量（外界气温）的影响而呈现出动态波动的特征。如果供热参数不能及时地根据负荷变化来进行动态调节，那么就会影响供热效率并且使能耗增加。因此供热系统运行调控的主要表现形式是：当热负荷出现变动情况的时候，通过优化系统流量分配或者改变供水温度等方式达到精确供热的目的，进而防止资源被浪费掉并提高能源利用效

率^[9]。

供暖热负荷调节的基本公式如下，

$$\bar{Q} = \frac{t_n - t_w}{t_n - t'_w} = \frac{(t_g + t_h - 2t_n)^{1+h}}{(t'_g + t'_h - 2t_n)^{1+h}} - \bar{G} = \frac{t_g - t_h}{t'_g - t'_h} \quad (1)$$

式中， \bar{Q} —供热负荷比；

\bar{G} —相对流量比；

t_g —一次网供水温度，℃；

t_h —一次网回水温度，℃；

t'_w —进入采暖用户的供水温度，℃；

t'_h —流出采暖用户的回水温度，℃。

依据调节因素的差异，可将锅炉调节划分为以下几类：

1. 质调节。质调节是指保持循环流量不变，通过改变系统的供回水温度来进行调节^[10]。质调节有以下优点：一方面，不需要改变循环水量，既保证了系统的水力稳定，又大大简化了操作过程；另一方面，保持恒定的循环流量，将使电能消耗相应增加。

2. 量调节。量调节技术的主要目标是维持供水温度在设计区间之内，通过调节系统循环水量来达成动态平衡。把流量控制转变为泵组转速调整，既提升了调节精确度又改善了操作便利性。这种方法有着明显的优势，不需要对锅炉运行状况实施干预，运行稳定性较高，采用变频控制技术可以削减能耗，不过也存在一些缺点，可能会造成供热管网内部出现热力失调情况。

3. 质量—流量复合调节技术利用分阶段改善流体质量特性来做到供暖系统精细调控。在一定时间段里，流量被保持不变，把质量调节机制融合到各个阶段的设计当中，既突破了传统单一调节手段的限制，又发挥了各自长处，大幅改进了系统的运作效能及调控精度。

4. 间歇调节。间歇调节指的是保持循环流量与水温和稳定，通过改变每天的供暖时长来实现调节。这种调节方法通常不会单独运用，多作为一种辅助调节方式在采暖初期使用。

（四）提高锅炉系统的密封性，减少过量空气系数

锅炉过量空气系数的科学控制对于燃料燃烧效率有着决定性的意义，其最适取值能极大提高整个系统的运行效果。为了达到更好的燃烧效果，需要特别注意锅炉本体和烟道部分的漏风问题。经过研究发现，通过改进引风机的设计，修复烟道的结构缺陷，加强炉墙的密封程度，改善鼓风机的功能，并且结合除渣系统中水封技术的应用，不仅可以缩短锅炉的启动时间，而且可以使得热效率提高大约8%，过剩空气系数下降约0.8。

（五）采用水泵和风机调速技术

现代城市供热系统形成了一张由众多热源构成的复杂网络，其中的主要部分包含热力站、水泵站、用户末端装置以及计算机

监控系统。而且装配了较为先进的自动化控制设施，按照热网拓扑结构的不同，多热源热电联产系统可以被归类为多环网、分区式和单回路这三种典型的模式。

多环网供热系统具备三个明显优点。第一，运行可靠性好。主热源发生故障，供热量减少或者停止的时候，备用热源能够快速切换，而且按照需求自动调节终端用户的供热参数。第二，节能效果佳。经过精细的资源分配来削减能量损耗，能源利用效率得到很大改善。第三，操作简单又经济。依靠联合供热模式，在负荷变动时灵活改变热源的启动和关闭次序，从而保证运维流程既科学又高效，花费不多。

（六）保证锅炉清洁，避免锅炉结垢而影响热效率

锅炉的空气预热器、水冷壁、省煤器等受热面容易出现积灰情况。因为水垢的热阻远远大于钢板，灰垢的热阻更是钢板的几百倍。锅炉结垢之后，整体热阻就会飞速增长，热效率也随之大幅下降，要想解决这个问题，就得形成起健全的水质管理机制，制订出系统的定期除灰计划。作为锅炉的关键部件，空气预热器、水冷壁、省煤器在运行时很容易因为受热效应而堆积很多积灰。鉴于水垢和灰垢对钢板热阻的影响差别很大，一旦锅炉结垢，它的热效率就会受到严重影响。加强水质管理，执行科学的定期除灰办法，可以有效地防止积垢生成，进而改进锅炉性能，增长服役年限，改良能源利用效率。

（七）采用管道直埋技术减少投资和运行成本

管道直埋技术属于成熟且高效的方法，相比于传统的沟渠敷设，它具备明显的技术优势，可以明显缩减工程投资成本。而且施工方便，占用土地面积小，后期维护工作量也少。硬质泡沫塑料的导热系数比较低，所以它的保温效果很好，能够有效地阻止热量流失。而采用沟渠敷设的时候，管道在长时间运行过程中会遇到保温层老化剥落或者地沟积水等情况。这些都会进一步加重热能损耗，推广管道直埋技术对于达成节能减排的目标有着重要的实际意义。

五、结论

（1）根据前人的研究成果，结合实地调查情况，介绍了我国集中供热规模、集中供热的发展现状、集中供热的优越性以及其发展过程中所面临的问题。

（2）目前集中供热方面存在能源消耗偏高现象，急需高效节能技术加以应对。由于国家实行可持续发展战略的基本需求，应着重加大集中供热系统节能技术的研发及推广力度。只有全面执行科学合理的节能方案，才可能真正实现集中供热方面的节能减排目标。

参考文献

- [1] 马喜成, 范梅梅, 杨巨生. 集中供热管网热瞬态预测 [J]. 暖通空调, 2011, 41 (5): 85-88.
- [2] 单兴卓. 节能技术和措施在集中供热系统中的应用分析 [D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [3] 李俊杰, 王宏伟, 王培, 等. 集中供热系统节能问题初探 [J]. 中国住宅设施, 2009, (6).
- [4] 方豪, 夏建军, 江亿. 北方采暖新模式: 低品位工业余热应用于城镇集中供热 [J]. 建筑科学, 2012, 28(S2): 11-14+17.
- [5] 孟哲, 刘应宗, 金宇澄. 我国集中供热的现状与对策 [J]. 华东交通大学学报, 2004(03): 66-69.
- [6] 孙春艳. 集中供热热力站的设计 [J]. 电力学报, 2011, 26(01): 88-90.
- [7] 米莎. 城市集中供热优化运行及节能措施研究 [D]. 华北电力大学, 2017.
- [8] 赵岩. 集中供热改造项目碳减排问题探究 [D]. 河北工程大学, 2015.
- [9] 韩梦. 城镇化下我国北方省份集中供热耗煤预测及节能潜力分析 [D]. 中国矿业大学, 2014.
- [10] 袁立. 遗传算法在集中供热网流量调节中的应用 [D]. 大连: 大连理工大学, 2002.

化工园区危险废物全过程监督检查体系构建 与非法转移风险防控研究

李田田

济宁新材料产业园区管委会, 山东 济宁 272200

DOI:10.61369/EAE.2025030004

摘 要 : 本文聚焦化工园区危险废物全过程监督检查体系构建与非法转移风险防控, 分析我国化工园区危险废物管理现状, 指出存在的诸多问题, 同时剖析了危险废物非法转移的行为特征、风险及识别出的风险点。在此基础上构建了化工园区危险废物全过程监督检查体系, 明确其指导思想、基本原则与总体目标并设计总体框架, 阐述了制度体系、技术体系和运行机制的构建内容。提出基于该体系的非法转移风险防控策略, 旨在为化工园区危险废物管理及非法转移风险防控提供有效参考, 保障生态环境安全与人民群众健康, 助力化工园区可持续发展。

关 键 词 : 化工园区; 危险废物; 全过程监督检查体系; 非法转移

Research on the Construction of a Whole-Process Supervision and Inspection System for Hazardous Waste in Chemical Industry Parks and the Prevention and Control of Illegal Transfer Risks

Li Tiantian

Jining New Material Industrial Park Management Committee, Jining, Shandong 272200

Abstract : This paper focuses on the construction of a whole-process supervision and inspection system for hazardous waste in chemical industry parks and the prevention and control of illegal transfer risks. It analyzes the current status of hazardous waste management in chemical industry parks in China, points out numerous existing problems, and dissects the behavioral characteristics, risks, and identified risk points of illegal hazardous waste transfers. Based on this, a whole-process supervision and inspection system for hazardous waste in chemical industry parks is constructed, clarifying its guiding ideology, basic principles, and overall objectives, and designing an overall framework. The paper elaborates on the construction content of the institutional system, technical system, and operational mechanism. It proposes strategies for preventing and controlling illegal transfer risks based on this system, aiming to provide effective references for hazardous waste management and illegal transfer risk prevention and control in chemical industry parks, safeguard ecological environmental safety and public health, and facilitate the sustainable development of chemical industry parks.

Keywords : chemical industry parks; hazardous waste; whole-process supervision and inspection system; illegal transfer

引言

近年来我国虽不断加强对化工园区危险废物的管理, 出台了一系列法律法规和政策标准, 各地也逐步建立了相关管理制度, 加强了对各环节的监管, 但危险废物非法转移等问题仍屡禁不止, 给环境和社会带来了极大隐患。因此构建一套科学、完善的化工园区危险废物全过程监督检查体系, 有效防控非法转移风险, 成为当前化工园区危险废物管理工作中亟待解决的重要课题。本文聚焦化工园区危险废物全过程监督检查体系构建与非法转移风险防控, 旨在通过深入分析管理现状和非法转移问题, 构建合理的监督检查体系, 并提出针对性的防控策略, 为提升化工园区危险废物管理水平、保障生态环境安全和人民群众健康提供有力支撑, 助力化工园区实现可持续发展。

一、我国化工园区危险废物管理现状及非法转移风险识别

（一）我国化工园区危废管理现状分析

化工园区是经济社会发展的产物，对支撑制造强国战略，促进区域经济社会发展，引导产业集聚，发展开放型经济等发挥了重要作用。同时，园区企业的生产也是危险废物产生的主要源头^[1]。近年来我国不断加强对化工园区危险废物的管理，出台了一系列相关法律法规和政策标准。同时各地也逐步建立了危险废物管理台账制度、转移联单制度等，加强了对危险废物产生、收集、贮存、运输、处置等环节的监管。然而部分化工园区危险废物产生单位环保意识淡薄，存在谎报、瞒报危险废物产生量的情况，甚至将危险废物混入一般固体废物中进行处理。在收集和贮存环节，一些单位未按照相关标准和规范进行操作，存在贮存设施不达标、分类不规范等问题，增加了危险废物泄漏和污染的风险。运输环节中，部分运输车辆不符合安全要求，驾驶员和押运员缺乏专业培训，存在违规运输的现象^[2]。处置环节则面临着处置能力不足、处置技术水平不高的问题，尤其是一些地区的危险废物处置设施超负荷运行，难以满足实际处置需求，导致部分危险废物无法得到及时、安全的处置。此外，化工园区危险废物管理的信息化水平较低，各部门之间的信息共享不畅，监管数据难以有效整合和利用，影响了监管效率和效果。同时基层监管力量薄弱，专业人才匮乏，也制约了危险废物管理工作的深入开展。

（二）危废非法转移行为特征与风险识别

危险废物非法转移具有隐蔽性强、手段多样、流动性大的特征，其方式包括未经许可擅自转移、不按转移联单制度要求转移、转移至无资质单位或个人处置、伪装谎报以普通货物名义运输转移等^[3]。此类行为风险极大，会造成土壤、水体和大气污染，破坏生态环境，其有毒有害物质还可能通过呼吸、接触等途径进入人体引发疾病，威胁群众健康，同时易引发公众恐慌影响社会稳定，扰乱危险废物处置市场秩序和公平竞争环境。通过特征分析可识别出的风险点有危险废物产生单位的合规性风险，即是否如实申报产生量、按规定转移；运输环节的安全风险，涉及运输车辆安全状况、驾驶员和押运员资质及运输路线合理性等；接收和处置单位的资质风险，即是否具备相应资质和能力；监管环节的漏洞风险，如监管信息不畅通、力度不足等。

二、化工园区危险废物全过程监督检查体系构建

（一）体系构建的指导思想、基本原则与总体目标

体系构建以习近平生态文明思想为指导，秉持绿色发展理念，围绕保障生态环境安全与群众健康，以全过程监管为主线，通过加强制度、技术及机制创新，打造科学高效严密的化工园区危险废物全过程监督检查体系，以此防范遏制非法转移行为，助力化工园区可持续发展^[4]。其基本原则为全程覆盖，实现危险废物产生、收集、贮存、运输、处置各环节无缝监管；权责明确，落实各相关方职责义务；技术支撑，借助现代信息技术与监测技

术提升监管科学性和精准性；协同共治，凝聚政府、企业、社会组织及公众的监管合力；依法监管，严格依规开展工作，做到有法可依、执法必严、违法必究^[5]。总体目标是建成较完善的全过程监督检查体系，显著提升危险废物管理信息化水平，强化各环节监管，有效遏制非法转移行为，控制环境与健康风险，为化工园区绿色安全可持续发展提供有力保障。

（二）体系的总体框架设计

化工园区危险废物全过程监督检查体系总体框架含目标层、要素层和支撑层。目标层为核心，即通过全过程监督检查实现有效管理，防范非法转移风险，保障生态环境安全与群众健康。要素层是主要内容，涵盖产生、收集、贮存、运输、处置各环节的监督检查，明确各环节监督主体、内容、方法和频次等，确保工作规范制度化^[6]。支撑层是运行保障，包括制度、技术、人员和信息支撑，制度支撑指相关法规政策和管理制度等，技术支撑含监测、信息化、应急处置技术等，人员支撑为专业监管、技术及从业人员等，信息支撑是建立统一管理信息平台以实现信息共享高效利用。

（三）制度体系构建

制度体系是化工园区危险废物全过程监督检查体系的重要保障，包含责任追究制度，明确各主体责任，追究违规者行政、民事及刑事责任；监督检查制度，制定计划方案，明确主体、对象等，确保工作常态化规范化，建立结果反馈和整改机制；信息公开制度，定期公开危险废物产生、转移、处置等信息，保障公众知情权和参与权，接受社会监督；应急管理制度，制定应急预案，明确组织体系、响应程序等，定期开展演练，提高应对能力；诚信管理制度，建立相关单位诚信档案，实行激励与惩戒，形成良好机制。

（四）技术体系构建

技术体系是提升化工园区危险废物全过程监督检查效率和水平的关键，包括信息化管理技术，即建统一管理信息平台，整合各环节信息，实现实时共享、动态监管及转移轨迹全程追踪与非法转移预警；监测检测技术，即在园区设监测点实时监测污染物排放，配备先进设备提升危险废物快速识别检测能力，为监督检查提供支持；物联网技术，即对贮存设施、运输车辆智能化管理，通过装传感器、GPS定位系统等实时监控贮存状态和运输路线，保障安全；大数据分析技术，即分析挖掘平台数据，识别潜在风险问题，为监管决策提供科学依据，如通过分析相关数据预测非法转移高发区域和时段，提前防控。

（五）运行机制构建

运行机制是保障化工园区危险废物全过程监督检查体系有效运转的重要支撑，包括协同监管机制，即由多部门组成协同监管小组，明确分工、加强协作形成合力，定期召开联席会议通报情况、解决问题；动态监管机制，对各环节动态跟踪监管，通过信息平台掌握流动情况，对异常转移预警核查；预警响应机制，建非法转移风险预警模型，依监测和分析结果预警，相关部门接预警后启动响应、采取防控措施；考核评价机制，将监督检查工作纳入绩效考核，定考核指标和标准，定期考评，结果作为评优评

先、干部任免等的重要依据，激励履行监管职责。

三、基于全过程体系的非法转移风险防控策略

（一）源头减量与风险预防策略

源头减量是减少危险废物非法转移风险的根本措施，需鼓励化工园区企业技术创新和工艺改进，采用清洁生产技术，推广先进设备和流程以提高资源利用率、减少危险废物产生；加强对企业危险废物产生情况的监管，要求如实申报信息并健全管理台账，严肃处理虚报瞒报行为；建立产生单位风险评估机制，定期评估各环节风险、识别隐患并制定防控措施，对高风险企业加大监管督促整改；同时加强企业人员培训教育，提升其环保意识和管理水平，使其认识到非法转移危害并自觉守法。

（二）过程监控与风险预警策略

过程监控是防范危险废物非法转移的关键环节，在收集和贮存环节，加强对危险废物收集和贮存设施的监管，确保其符合相关标准和规范。要求企业对危险废物进行分类收集和贮存，并设置明显的标识。定期对收集和贮存设施进行检查，及时发现和消除安全隐患^[7]。在运输环节，严格执行危险废物转移联单制度，加强对运输车辆和驾驶员、押运员的管理。运输车辆必须具备相应的运输资质和安全条件，驾驶员和押运员必须经过专业培训并取得相应的资格证书。利用物联网技术对运输车辆进行实时监控，掌握其运输路线、行驶速度、停靠地点等信息，对偏离正常运输路线的车辆进行预警和核查^[8]。建立危险废物非法转移风险预警系统，利用大数据分析技术对危险废物的转移数据进行分析 and 挖掘，识别出非法转移的潜在风险。根据风险等级的高低，采取不同的预警措施。对高风险区域和时段，加大巡查力度，提高监管的针对性和有效性。

（三）末端监管与违法惩戒策略

末端监管是防止危险废物非法处置和转移的最后一道防线，加强对危险废物处置单位的监管，严格审查其资质条件和处置能力，确保其能够按照相关标准和规范对危险废物进行安全处置^[9]。定期对处置单位的处置设施、处置过程和处置效果进行检查，对不符合要求的单位，责令其限期整改，整改不合格的，依法吊销其经营许可证。加大对危险废物非法转移行为的打击力

度，建立健全违法惩戒机制。对发现的非法转移行为，依法予以严厉处罚，包括罚款、没收违法所得、吊销相关许可证等。构成犯罪的，依法追究刑事责任。同时，加强与司法机关的协作配合，形成打击危险废物非法转移行为的合力。对典型的非法转移案例，进行公开曝光，起到警示作用，震慑潜在的违法者。

（四）全链条协同治理策略

危险废物非法转移风险防控是一项系统工程，需要政府、企业、社会组织和公众等多方主体的共同参与和协同治理。政府部门应发挥主导作用，加强统筹协调，完善相关政策法规，加大监管力度^[10]。同时建立信息共享机制，实现各部门之间的信息互通和资源共享，提高监管效率。企业作为危险废物产生、运输和处置的责任主体，应严格遵守相关法律法规和管理制度，切实履行环境保护责任。加强内部管理，建立健全危险废物管理体系，确保危险废物的安全处置。积极参与行业自律组织，加强行业内的交流与合作，共同抵制非法转移行为。社会组织和公众应发挥监督作用，积极参与危险废物管理的监督工作。通过举报、投诉等方式，及时反映危险废物非法转移行为。政府部门应畅通举报渠道，对举报属实的给予奖励，激发公众参与监督的积极性。同时加强对社会组织和公众的宣传教育，提高其对危险废物危害和非法转移行为的认识，形成全社会共同参与危险废物管理的良好氛围。

四、结束语

化工园区危险废物的管理是关乎生态环境安全、人民群众健康以及社会稳定的重要课题，面对当前存在的非法转移等问题，构建科学完善的全过程监督检查体系，辅以有效的风险防控策略，是破解难题的关键所在。通过明确目标层、要素层和支撑层的总体框架，健全制度体系，运用先进技术，完善运行机制，并从源头减量着手，能够形成全方位、多层次的管理格局，有效遏制危险废物非法转移行为，降低其带来的各类风险。随着技术的不断进步和管理的持续深化，化工园区危险废物管理水平必将得到进一步提升。这不仅能为化工产业的绿色可持续发展保驾护航，更能为实现人与自然和谐共生贡献坚实力量。

参考文献

- [1] 李均韬, 张拓. 基于全过程管理的化工园区危险废物风险防控策略研究——以百色市某化工园区为例 [J]. 化工安全与环境, 2025, 38(05): 51–54.
- [2] 乔艳慧. 化工园区危险废物监管现状分析及改进举措 [J]. 精细与专用化学品, 2025, 33(05): 10–11+22. DOI: 10.19482/j.cn11-3237.2025.05.02.
- [3] 李正宏. 智慧化工园区危险化学品全流程监管信息化建设方法研究 [J]. 科技创新与应用, 2025, 15(04): 127–130. DOI: 10.19981/j.CN23-1581/G3.2025.04.028.
- [4] 李云燕, 陈明, 陈莉. 化工园区危险废物规范化管理体系建设要点浅析 [J]. 江西化工, 2021, 37(06): 104–107. DOI: 10.14127/j.cnki.jiangxihuagong.2021.06.029.
- [5] 邓兴华. 南京市典型化工园区危险废物现状调查及问题分析 [J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(09): 141–143.
- [6] 唐红侠, 楼紫阳. 化工园区危险废物管理中的问题与解决对策 [J]. 有色冶金设计与研究, 2019, 40(05): 40–42.
- [7] 康瑾. 危险废物处置企业在化工园区一体化配套服务实践 [J]. 中国环境管理, 2013, 5(02): 65–67. DOI: 10.16868/j.cnki.1674-6252.2013.02.014.
- [8] 康小华. 化工园区危险废物暂存场所标准化建设的建议 [J]. 化工管理, 2021, (16): 183–184. DOI: 10.19900/j.cnki.ISSN1008-4800.2021.16.079.
- [9] 应急管理部有关负责人解答《关于全面加强危险化学品安全生产工作的意见》[J]. 消防界 (电子版), 2020, 6(07): 1–3. DOI: 10.16859/j.cnki.cn12-9204/tu.2020.07.001.
- [10] 王天庆, 崔静涛, 韩微微. 化工园区危险废物处理处置技术分析 [J]. 辽宁化工, 2022, 51(09): 1335–1337. DOI: 10.14029/j.cnki.issn1004-0935.2022.09.032.

生态环境损害赔偿制度的法律适用冲突与协调路径

杨雪

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.2025030005

摘 要：生态环境损害赔偿制度作为生态文明建设的重要法律保障，在实践中面临着诸多法律适用冲突，严重影响了制度效能的发挥。本文从生态环境损害赔偿制度的法律定位与实践价值出发，分析了该制度在法律适用中存在的规范冲突、制度衔接不畅、赔偿标准不统一等问题，并深入探讨了冲突产生的原因。在此基础上，提出了完善法律体系、厘清制度边界、统一赔偿标准、健全执行机制等协调路径，旨在为解决生态环境损害赔偿制度的法律适用难题提供理论参考，促进制度的有效实施，助力生态环境保护和修复。

关 键 词：生态损害赔偿；法律适用冲突；协调路径；生态修复

Legal Application Conflicts and Coordination Pathways in the Ecological Environmental Damage Compensation System

Yang Xue

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

Abstract： As an important legal safeguard for the construction of ecological civilization, the ecological environmental damage compensation system faces numerous legal application conflicts in practice, severely hindering the effectiveness of the system. Starting from the legal positioning and practical value of the ecological environmental damage compensation system, this paper analyzes issues such as normative conflicts, poor institutional integration, and inconsistent compensation standards that arise in the legal application of the system, and delves into the causes of these conflicts. Based on this analysis, the paper proposes coordination pathways, including improving the legal framework, clarifying institutional boundaries, standardizing compensation criteria, and enhancing enforcement mechanisms. The aim is to provide theoretical references for addressing the challenges of legal application in the ecological environmental damage compensation system, promote its effective implementation, and contribute to ecological environmental protection and restoration.

Keywords： ecological damage compensation; legal application conflicts; coordination pathways; ecological restoration

一、生态环境损害赔偿制度的法律定位与实践价值

生态环境损害赔偿制度是指因污染环境、破坏生态造成生态环境本身损害时，由责任人承担赔偿责任，用于生态环境修复的法律制度。该制度以保护生态环境公共利益为核心，强调对生态环境本身的修复和补偿，区别于传统的人身损害赔偿和财产损害赔偿。

从法律依据来看，我国《环境保护法》为生态环境损害赔偿制度奠定了基础，《民法典》中关于环境污染和生态破坏责任的规定进一步细化了相关内容，《生态环境损害赔偿制度改革方案》等政策性文件则对制度的具体实施作出了部署。这一制度的建立和完善，是我国环境法治建设的重要突破，标志着我国生态环境保护从注重事后惩罚向事前预防和事中修复转变。

在实践价值方面，生态环境损害赔偿制度具有多方面的重要意义。首先，它能够有效弥补生态环境损害，通过要求责任人承

担赔偿责任，为生态环境的修复提供资金支持，促进受损生态系统的恢复。其次，该制度强化了对环境违法行为的惩戒力度，提高了违法成本，对潜在的环境违法行为形成威慑，从而减少生态损害的发生。再次，它有利于维护生态环境公共利益，保障社会公众的生态权益，实现人与自然的和谐共生。最后，生态环境损害赔偿制度的实施，有助于推动形成政府主导、企业担责、社会参与的生态环境保护格局，促进生态文明建设的深入开展^[5]。

二、生态环境损害赔偿制度法律适用冲突的具体表现

（一）法律规范之间的位阶冲突

目前，我国涉及生态损害赔偿的法律规范众多，包括法律、行政法规、地方性法规、部门规章等，这些规范之间存在着位阶冲突。例如，《环境保护法》与《民法典》在生态损害赔偿的责任主体、赔偿范围等方面的规定存在不一致之处。《环境保护法》侧

作者简介：杨雪（1995-），女，山西运城人，法学硕士，环境工程助理工程师，从事环境执法，环境科研等研究与管理。

重于对环境违法行为的行政处罚，而《民法典》则更注重民事责任的承担，两者在适用过程中容易产生冲突。

（二）制度功能的重叠与界分模糊

生态环境损害赔偿制度与环境公益诉讼制度在功能上存在一定的重叠，两者都以保护生态环境公共利益为目标，在实践中容易出现适用上的混淆。环境公益诉讼包括民事公益诉讼和行政公益诉讼，其中民事公益诉讼与生态环境损害赔偿制度在诉讼主体、诉讼请求等方面存在相似之处。

例如，在诉讼主体方面，生态损害赔偿诉讼的原告主要是省级、市地级人民政府及其指定的部门、机构，而环境民事公益诉讼的原告则包括检察机关、社会组织等。由于两者的原告范围存在交叉，在一些案件中可能出现多个主体同时提起诉讼的情况，导致司法资源的浪费。在诉讼请求方面，两者都可以要求责任人承担生态环境修复责任和赔偿损失，但在具体的请求内容和范围上缺乏明确的界分，容易引发争议。

（三）赔偿标准与计算方法的适用分歧

生态损害赔偿的标准和计算方法是生态环境损害赔偿制度的核心内容之一，但目前我国尚未形成统一的赔偿标准和计算方法，导致在实践中出现了适用分歧。不同地区、不同部门在处理生态损害赔偿案件时，往往采用不同的标准和方法，使得赔偿结果存在较大差异。

在确定生态环境损害的范围时，如《江苏省生态环境损害赔偿制度改革试点工作实施方案》（苏政办发〔2016〕130号）中，早期试点阶段将赔偿范围主要限定为“直接造成的生态环境物质损害”，包括污染物清除、场地修复、动植物死亡直接损失等可直接观测的物理或化学损害，未明确纳入间接损害。而《贵州省生态环境损害赔偿制度改革实施方案》（黔府办发〔2018〕44号）则明确将“生态环境功能永久性损害造成的损失”纳入赔偿范围，例如因水体污染导致的区域水源涵养功能下降、湿地净化能力丧失等间接损害，体现了对生态系统整体价值的考量。

在计算赔偿金额时，有的采用市场价值法，有的采用恢复成本法，不同的计算方法得出的结果可能相差甚远。如《山东省生态环境损害鉴定评估技术指南（试行）》（鲁环发〔2019〕12号）中规定，对于土壤污染、河流生态破坏等案例，优先采用“恢复成本法”，即按“将受损生态环境修复至基线水平（受损前状态）所需的全部费用”计算赔偿金额，包括工程修复、长期监测等支出。《浙江省生态环境损害赔偿资金管理办法》（浙环发〔2020〕28号）中，对于可直接交易的生态资源（如林木、渔业资源）损害，明确可采用“市场价值法”，即按“受损资源的市场交易价格×损失数量”计算。

（四）责任承担与执行衔接的冲突

生态损害赔偿责任的承担方式包括修复生态环境、赔偿损失等，在责任执行过程中，存在着责任承担与执行衔接的冲突。一方面，责任人可能不履行或者不完全履行修复义务，导致生态环境无法及时得到修复。另一方面，即使责任人承担了赔偿责任，赔偿资金的使用和管理也存在问题，资金可能无法真正用于生态环境的修复。

此外，在执行过程中，不同部门之间的协调配合不够顺畅，缺乏有效的联动机制。例如，环境保护部门、司法机关、财政部门等在生态损害赔偿的执行过程中各自为政，信息不共享，工作

不协同，影响了执行效率和效果^[4]。

三、生态环境损害赔偿制度法律适用冲突的成因分析

（一）法律体系不完善

我国生态环境损害赔偿制度的法律体系仍存在结构性缺陷，不同位阶法律规范间的协同机制尚未有效建立。《环境保护法》《民法典》等核心法律虽确立了生态损害赔偿的基本框架，但条文表述多以原则性规定为主，缺乏量化标准、责任认定流程等配套细则，导致司法实践中存在“有法难依”的现实困境。更为突出的是，部分地方性法规与部门规章在赔偿范围界定、管辖权限划分等关键问题上存在制度性冲突，这种规范体系内部的矛盾不仅削弱了法律的权威性，也加剧了生态损害赔偿案件裁判标准的区域差异。

（二）制度设计不科学

生态环境损害赔偿制度与环境公益诉讼制度在制度设计层面存在结构性缺陷，由此衍生出功能重叠与界分模糊的实践困境。具体而言，诉讼主体设置缺乏清晰的适用边界，导致实践中同一生态损害事件可能触发行政机关、社会组织、检察机关等多方主体并行起诉，形成司法资源错配的“多头诉讼”困局。在赔偿标准构建方面，现行规范未能充分考量生态系统服务功能的复杂性、地域生态条件的差异性 & 损害类型的多样性，致使赔偿计算模型难以精准适配不同生态损害场景，进而引发裁判尺度不统一、司法公信力削弱等连锁反应。

（三）执法与司法衔接不畅

在生态环境损害赔偿制度的运行实践中，执法与司法环节存在显著的衔接梗阻，尚未构建起制度化的协同治理体系。行政机关在环境执法过程中，存在“重行政处罚、轻损害追偿”的路径依赖，未能将生态损害赔偿作为环境违法行为的完整法律后果予以全面落实；司法机关在案件审理时，由于缺乏行政执法过程的有效信息传导，导致案件事实认定存在证据链断裂风险，对责任主体的归责判定也易出现偏差，进而影响司法裁判的权威性与执行效果。

（四）社会参与机制不健全

生态环境损害赔偿制度的落地生根，离不开社会公众的深度参与。然而，当前我国社会参与机制尚存在明显短板。一方面，公众对生态环境损害赔偿制度认知较为模糊，参与意识淡薄，缺乏主动参与的内生动力；另一方面，社会组织在参与生态损害赔偿诉讼实践中举步维艰，普遍面临资金链紧张、专业人才匮乏等现实困境，严重制约其功能的有效发挥。

四、生态环境损害赔偿制度法律适用冲突的协调路径

（一）完善法律体系，明确规范效力层级

要化解生态环境损害赔偿制度的法律适用冲突，需从法律体系的顶层设计入手，通过确立科学的效力层级架构，构建协同统一的规范体系。具体而言，应将《环境保护法》《民法典》等核心法律的修订工作纳入立法规划快车道，针对生态损害赔偿的责任认定规则、损害量化标准、赔偿范围边界等关键内容进行精细化规定，提升法律条文在司法实践中的指引效能。与此同时，建立

常态化的法规规章动态审查机制,运用合法性审查、合目的性审查等手段,系统清理地方性法规与部门规章中的冲突条款,以确保从中央到地方的生态损害赔偿法律规范形成逻辑严密、层级分明的制度闭环,为生态环境司法保护提供坚实的规范支撑。

（二）厘清生态损害赔偿与环境公益诉讼的适用边界

为避免生态环境损害赔偿制度与环境公益诉讼制度在适用上产生混淆,亟需从理论与实践层面明晰二者适用边界。具体而言,应着重从起诉条件、诉讼主体资格、诉讼请求范围等维度,系统梳理生态损害赔偿诉讼与环境民事公益诉讼的差异性规范,并构建科学完善的衔接机制。建议通过立法或司法解释明确:政府及其授权部门、机构在生态损害赔偿领域享有优先起诉权,当政府基于法定原因未提起诉讼时,检察机关可依法启动环境民事公益诉讼程序,形成“行政优先、司法补充”的递进式救济格局。此外,还应强化两项制度在实践中的协同联动,通过建立常态化信息共享平台、规范证据交换程序等方式,破除制度壁垒,切实提升生态环境司法保护效能^[1]。

（三）统一赔偿标准与计算方法,建立科学评估体系

统一赔偿标准与计算方法对解决生态环境损害赔偿制度法律适用冲突意义重大。我从标准制定、评估体系建设、赔偿金额确定三方面细化表述,增强专业性和逻辑性。

统一赔偿标准与计算方法是破解生态环境损害赔偿制度法律适用困局的核心环节。需立足我国生态环境区域差异性、生态系统多样性的现实国情,构建“国家标准+地方细则”的双层规范体系。在国家标准层面,应明确生态环境损害的量化认定标准,细化财产性损失、功能性损失等损害类型的核算公式,统一生态环境基线确定、损害范围界定等关键技术参数。同时,依托环境科学、法学等多学科交叉优势,构建包含损害调查、因果关系判定、价值量化的全流程生态环境损害评估技术体系,通过设立专业资质认证制度、开展常态化技能培训,培育既精通环境科学原理又熟悉法律实务的复合型评估人才队伍。在个案处理中,应建立以损害程度分级、影响范围测绘、修复方案成本核算为基础的动态量化模型,确保赔偿金额能够精准覆盖生态环境修复工程实施、修复效果长期监测等全周期费用,实现“损害—赔偿—修复”的闭环管理^[2]。

（四）健全责任履行方式,强化执行衔接机制

为保障生态损害赔偿责任切实落地,需构建权责明晰、执行有力的全链条制度体系。首先,应通过立法明确责任主体的生态

修复法定义务与经济赔偿责任,建立覆盖方案设计、施工监管、效果评估的全流程审查监督机制,运用第三方评估等手段确保生态修复达到预期目标。针对拒不履行或履行不到位的责任主体,依法采取行政强制执行、司法追责等措施,形成刚性约束。其次,打破部门壁垒,构建跨区域、跨部门的执行联动机制,通过搭建统一信息平台实现数据共享,建立联席会议制度推动工作协同,切实提升执行效能。最后,建立专项赔偿资金全生命周期管理体系,实行专户存储、独立核算、全程审计,运用区块链等技术实现资金流向可追溯,确保每一笔资金都精准投入生态环境修复工程^[3]。

（五）构建多元化纠纷解决机制,提升制度运行效能

构建多元化纠纷解决机制是提升生态环境损害赔偿制度运行效能的核心抓手。可从三方面系统推进:一是激活非诉解纷资源,建立生态损害赔偿“协商—调解—仲裁”阶梯式解纷体系,通过政策引导、财政激励等方式,鼓励当事人优先选择非诉方式化解争议,降低解纷成本与司法资源消耗;二是强化解纷机制衔接,构建司法机关与行政调解、行业仲裁等非诉机构的信息共享平台,制定诉讼与非诉程序转换细则,实现矛盾纠纷的分流引导与高效处置;三是拓宽公众参与渠道,通过普法宣传、案例解读提升社会认知度,建立生态损害线索举报、公益诉讼支持等机制,将公众监督转化为生态保护的社会合力,形成共建共治共享的现代化环境治理格局。

五、结束语

生态环境损害赔偿制度是我国生态文明建设的重要制度保障,对于保护生态环境、维护生态安全具有重要意义。然而,该制度在法律适用过程中面临着诸多冲突,这些冲突不仅影响了制度的实施效果,也制约了生态环境保护事业的发展。因此,必须采取有效措施,解决这些法律适用冲突,完善协调路径。

通过完善法律体系、厘清制度边界、统一赔偿标准、健全执行机制和构建多元化纠纷解决机制等措施,可以有效化解生态环境损害赔偿制度的法律适用冲突,提高制度的运行效能。随着这些协调路径的逐步实施,我国的生态环境损害赔偿制度将不断完善,为生态环境的保护和修复提供更加有力的法律支持,推动我国生态文明建设迈向新的台阶。

参考文献

- [1]熊敏瑞,王玮.论生态环境损害赔偿诉讼制度与环境公益诉讼制度的竞合[J].中国国土资源经济.2023,36(4).
- [2]林煜,张晓楠.生态环境损害赔偿磋商机制的法律构建——基于其法律性质思辨的论证[J].贵州大学学报(社会科学版).2023,41(1).
- [3]梁春艳,谭雅华.生态环境损害赔偿制度研究[J].石家庄学院学报.2023,25(1).
- [4]陈哲.《民法典》时代生态环境损害赔偿诉讼与民事公益诉讼之统合论[J].内蒙古社会科学.2022,43(3).
- [5]黄胜开.生态环境损害赔偿诉讼的法理辨析与机制协调[J].理论月刊.2022,(1).

七叶树的药理作用及生态资源价值

张惟宗

北京师范大学第二附属中学，北京 100000

DOI:10.61369/EAE.2025030006

摘 要： 七叶树在我国有悠久的药用历史，其成熟种子为中药娑罗子，具有疏肝理气，宽中止痛的功效。现代研究表明，含有七叶皂苷、黄酮苷等化学成分，具有抗肿瘤，缓解阿尔茨海默症，肠道保护等作用。同时，七叶树株型美观、适应性强等特点，是著名的观赏树种，具有重要的景观价值和生态价值。本文通过文献资料综述，介绍了七叶树的药理作用及生态资源价值，为其研究和综合利用提供了重要参考。

关 键 词： 七叶树；七叶皂苷；黄酮苷；药理作用；生态保护

Pharmacological Effects and Ecological Resource Value of Aesculus Chinensis Bunge

Zhang Weizong

The Second High School Attached to Beijing Normal University, Beijing 100000

Abstract： Aesculus chinensis has a long history of medicinal use in China, with its mature seeds, known as "Suoluo Zi" in traditional Chinese medicine, possessing the effects of soothing the liver and regulating qi, as well as relieving abdominal pain. Modern research indicates that it contains chemical components such as aescin and flavonoid glycosides, which exhibit anti-tumor, Alzheimer's disease alleviation, and intestinal protection properties. Additionally, Aesculus chinensis is renowned as an ornamental tree species due to its attractive plant form and wide adaptability, holding significant landscape and ecological value. This paper provides a comprehensive review of the pharmacological effects and ecological resource value of Aesculus chinensis through literature review, offering important references for its research and comprehensive utilization.

Keywords： Aesculus chinensis Bunge; aescin; flavonoid glycosides; pharmacological effects; ecological conservation

引言

七叶树 Aesculus chinensis Bunge 为无患子科七叶树属落叶乔木，别名猴板栗、娑罗树等。原产于白垩纪晚期的亚洲，后扩散至美洲和欧洲。主要特征是掌状复叶对生，小叶七枚，故名“七叶树”，在春季也会开圆筒形花序的花，花色洁白。其果实表面棕色或棕褐色，近圆形，种皮硬而脆。野生的七叶树分布于低海拔地区的山地和气候湿润的阔叶林中。在佛教传说中，释迦摩尼坐化在娑罗树下，一说此处“娑罗树”指七叶树，故在寺庙中多有栽培。由于其分布广泛，栽培成活率高，观赏价值高，同时具有丰富的人文底蕴，常作为城市景观植物，在全国各地广泛栽培。

七叶树在我国药用历史悠久，其果实，秋季成熟时采收，除去果皮，干燥即为中药娑罗子，具有疏肝理气，和胃止痛功效。七叶树作为景观植物也具有药用价值，其重要的生态和经济价值引起了人们的关注，近年来关于其化学成分的生物活性研究、生态资源保护等方面展开了广泛研究，本文对此进行综述，旨在为七叶树药用和生态资源开发和利用提供参考。

一、七叶树药用历史记载

七叶树在中国的药用历史可追溯至清代地方民族医学文献，在《本草纲目拾遗》《药性通考》中均有记载^{[1][2]}。其种子“娑罗子”在《彝药志》《楚彝本草》中明确记载具有“疏肝理气、和胃

止痛”的功效，用于治疗肝胃气滞引起的胸腹胀闷、胃脘疼痛，树皮则用于急慢性胃炎和胃寒疼痛。现代《中国药典》一部，正式收载娑罗子，并延续其“理气宽中”的传统功效，主治脘腹胀满、经前乳胀等症。

二、七叶树的化学成分及药理作用研究

现代化学和药理学研究表明,七叶树主要含有七叶皂苷类、黄酮类化学成分,具有抗炎、降低胆固醇、抑制胃液分泌等药理作用。

(一) 七叶皂苷类

七叶树属植物中广泛含有七叶皂苷类化合物,主要是由七叶树干燥成熟种子中提取的一类三萜皂苷化合物^[3]。其中对中华七叶树种子中三萜皂苷成分的研究开始于20世纪末期,到目前为止已经提取分离得到了26种单体化合物。HPLC法测定发现七叶皂苷 Ia、七叶皂苷 Ib、异七叶皂苷 Ia 和异七叶皂苷 Ib 是七叶树种子中含量最高的四种三萜皂苷,占有皂苷含量的80%以上。1999年发现了8个新的皂苷类化合物,即七叶皂苷 A、七叶皂苷 B、七叶皂苷 C、七叶皂苷 D、七叶皂苷 E、七叶皂苷 F、七叶皂苷 G 和七叶皂苷 H^[4]。

有研究报道^[5],七叶皂苷对阿尔茨海默症有所缓解,对于秀丽线虫模型的研究表明,其可延长线虫生存时间,在阿尔茨海默症发病时减缓症状,通过上调抗氧化应激基因 skn1 的表达来减轻氧化损伤,从而改善运动能力和认知水平的降低。研究表明七叶皂苷具有抗癌的作用^[6]。在其对于结直肠癌细胞增殖侵袭作用的研究中,氧化三甲胺(TMAO)可以诱导结直肠癌细胞大量扩增,而七叶皂苷处理后可显著降低细胞的存活率,具有癌细胞杀伤能力。同时,七叶皂苷还表现出抑制结直肠癌细胞迁移的能力,可以抑制 TMAO 对于 HCT116 细胞中相关通路的表达增强,达到抗肿瘤的作用。

对于高脂血症和动脉粥样硬化抗氧化活性的研究表明^[7],七叶皂苷可以促进 Keap1-Nrf2/ARE 信号通路的激活,抑制氧化应激,从而改善钙质血症。七叶皂苷还具有很好的抗炎作用,它可以抑制巨噬细胞释放相关蛋白^[8]。

七叶皂苷还具有肠道保护、镇痛、抗病毒、调节能量代谢并提高血管张力等多种药理作用。在临床应用中,七叶皂苷常用于治疗脑出血、神经类疾病及炎症等疾病具有治疗、保健等作用^{[9][10][11]}。目前,以七叶皂苷为有效成分的制剂主要为七叶皂苷钠冻干粉针剂、七叶皂苷钠搽、复方七叶皂苷钠凝胶和七叶皂苷钠片等,用于脑水肿、创伤或术后肿胀、静脉回流障碍性疾病(如静脉曲张、血栓性浅静脉炎)、脊柱退行性疾病(如腰椎间盘突出、坐骨神经痛)、放射性直肠炎及周围神经炎症的治疗^[12]。

(二) 黄酮类

黄酮类化合物广泛分布于七叶树属植物中,具有抗炎、抗肿瘤、抗氧化等多种生物活性^{[11][20][21]}。七叶树中所含的黄酮类化合物有黄酮醇类、花色素类和黄酮醇类,其中黄酮醇类化合物大部分积累于花中,少部分富集在叶片中,种子中含量较低^[14]。

七叶树中的原花青素 A2 具有优秀的抗氧化功能,通过中和自由基能够有效降低氧化应激诱导的皮肤细胞损伤,从而延缓皮肤老化进程并抑制炎症反应^[17]。

从七叶树中提取的黄酮类糖苷 I B、黄酮类糖苷 I C、黄酮类糖苷 II D 则能够通过 p38 丝裂原活化蛋白激酶(p38 MAPK)、

核转录因子- κ B(NF- κ B)和转录激活子-3(STAT-3)抑制一氧化氮(NO)的释放,这可能是娑罗子发挥抗炎作用的基础^[18]。

有研究表明,七叶树的总黄酮对人肺癌 A549、人宫颈癌 HeLa、人肝癌 HepG2 及人乳腺癌 MCF-7 细胞的生长具有明显的抑制作用,在体内实验中,总黄酮可抑制小鼠胸腺萎缩和脾细胞的生长,发挥抗肿瘤作用^[19]。

三、七叶树的生态资源价值

(一) 作为城市景观树的生态作用

七叶树因为其易于栽培、树形美观、易于养护、适应性广等优点,作为中国多个城市的主要景观树木和道路行道树广为栽培。在关于北方城市常见绿化树木枯落叶新欢再利用潜力研究中,将青桐、银杏、紫叶李、栾树、七叶树、樱花、火炬树、海棠、构树、鹅掌楸的枯落叶样本进行处理和分解实验,将其埋入土壤一段时间后进行处理可知,七叶树枯落叶初始化学组成中 N 含量较低,P 含量较高,其分解速率在十种常见绿化树木中排名第七,这是由于分解系数和初始化学组成中的 N、P 含量成显著正相关,和木质素呈负相关。可见七叶树的落叶样本可作为磷肥原料^[12]。

城市景观树木的另一大作用在于利用植物吸滞能力净化城市大气污染。在对于城市常见园林树木滞尘能力和叶片微形态的研究中,针对国槐、胡桃、七叶树、榆树、紫叶李、七叶树、紫叶桃、白蜡、悬铃木、银杏、雪松、油松、白皮松等树木进行研究,采集健康成熟叶片进行颗粒物测定,结果显示七叶树的单株滞尘能力在十二种植物中排名第六,这和它的叶面结构,叶片面积等密切相关。说明七叶树作为城市景观树木,对于净化城市空气,改善空气质量也有重要的作用^[13]。七叶树作为城市景观树木,还具有吸收多种环境污染物的特性和功能特点,具有显著的培育价值。

(二) 资源保护现状

在全国范围内对于七叶树的种质资源和遗传多样性进行调查,发现不同地方七叶树果皮和种皮的颜色基本一致,如果皮为棕米黄,种皮为黑红色。

七叶树上述形态特征与地理位置的相关性表明:树高和纬度呈显著负相关,单种重和单果重呈极显著正相关。在调查走访中,发现有些地方的七叶树古树由于生长在景区和寺庙而被保护起来,有些树生长在高山或郊外而没有被保护^[14]。七叶树作为重要的观赏和药用树种,其生态保护需要从多角度入手。首先应加强原地保护,在自然分布区建立保护区,禁止非法采挖和破坏栖息地;其次推广人工繁育技术,通过种子育苗、扦插等方式扩大种群数量;同时开展种群监测和基因库建设,保存优质种质资源;此外还需加强公众教育,提高对七叶树生态价值的认知,鼓励社区参与保护。在城市建设中可将其作为特色景观树种合理引种,既美化环境又促进物种保护。

四、讨论与展望

七叶树不仅可作为景观植物，同时也具有药用价值，具有重要的生态价值和经济价值，其研究具有深远的意义。本文通过对七叶树有效成分及其生物学活性的综述，了解到其在抗炎、降低胆固醇、抑制胃液分泌等方面的显著药效，尤其是七叶皂苷在抗癌、抗氧化、降血脂等方面的突出表现，为开发新药提供了有力的科学依据。此外，七叶树在城市景观建设中的生态作用也不容忽视，其净化空气、美化环境的效果，为城市绿化提供了一份自然助力。

未来，对于七叶树的研究可以从以下几个方面进一步深入：

一是加强七叶皂苷及其他有效成分的分离纯化的研究，促进新技术的推广应用。二是探讨其有效成分作用机制的深入研究，为其药理学应用提供理论基础。三是开展七叶树在土壤改良和水土保持等方面的研究，丰富其在生态学领域的应用。四是加强七叶树的种质资源保护和合理利用，通过遗传育种等手段，提升其在不良环境下的适应能力和药用价值。

综上所述，七叶树在药理和生态领域具有广阔的研究前景，通过持续不断的科学研究，这种天然资源有望在医药健康、生态保护等方面发挥更大的作用。

参考文献

[1] 赵学敏. (1983). 本草纲目拾遗. 人民卫生出版社.

[2] 国家中医药管理局. (1999). 中华本草 (第5册). 上海科技出版社.

[3] 陈长军, 徐为华, 张梦晨, 等. 七叶皂苷药理活性及制剂临床应用研究进展 [J]. 武汉大学学报 (医学版), 2020, 41(01): 157–163.

[4] 路强强, 石新卫, 胡浩, 等. 中华七叶树种子化学成分及生物活性研究进展 [J]. 西北药学杂志, 2016, 31(06): 651–654.

[5] 张一平, 李璐迪, 朱安, 等. 基于秀丽线虫模型探究七叶皂苷和右美沙芬对阿尔茨海默病的保护作用 [J]. 北京大学学报 (医学版), 2025, 57(04): 764–771.

[6] 刁隽丽, 周超, 李子银, 等. 七叶皂苷对结直肠癌细胞增殖、侵袭的作用及机制研究 [J]. 世界中医药, 2024, 19(13): 1954–1958+1965.

[7] 王学智, 郝亚逢, 原涛, 等. 七叶皂苷钠对高脂血症大鼠动脉粥样硬化和抗氧化活性的影响及作用机制 [J]. 医学分子生物学杂志, 2025, 22(02): 187–193.

[8] 陈丹丹, 周格知, 周亚琼. 七叶皂苷钠联合甘露醇在基底节区脑出血患者的应用效果 [J]. 浙江创伤外科, 2025, 30(05): 896–899.

[9] 孙小利, 刘俊然. 七叶皂苷钠联合维生素 B12 治疗周围性面神经麻痹的疗效研究 [J]. 黑龙江医药科学, 2025, 48(02): 136–138.

[10] 王孝生, 秦春跃, 刘杨俊. 七叶皂苷钠改善老年下肢骨折术后肿胀疗效及对氧化应激、炎症因子的影响 [J]. 分子诊断与治疗杂志, 2025, 17(03): 466–469.

[11] 刘晓禹, 范姝媛, 白奉轩, 等. 基于尿酸转运蛋白探讨中药黄酮类成分治疗高尿酸血症的作用机制 [J]. 生命的化学, 2025, 45(03): 480–488.

[12] 范晓慧, 马勇, 冯家豪, 等. 北方城市 10 种常见树木凋落叶的分解及养分释放特征 [J]. 西北林学院学报, 2020, 35(06): 25–31.

[13] 宁婷婷, 纪紫嫣, 马雪媛, 等. 聊城市常见园林树木滞尘能力与叶片微形态解析 [J]. 安徽农业科学, 2021, 49(04): 121–124+151.

[14] 李玉岭, 张元帅, 董爱辉, 等. 七叶树种质资源调查和表型性状多样性分析 [J]. 南方林业科学, 2022, 50(04): 17–23.

[15] 徐飞, 郭东凯, 季士亮, 等. 七叶皂苷钠的药理作用及临床药物联用 [J]. 中国医药科学, 2022, 12(10): 51–55.

[16] 魏一丁. 七叶树中类黄酮和香豆素糖基转移酶的鉴定与功能分析 [D]. 湖北中医药大学, 2019.

[17] 尉芹, 马希汉, 杨秀萍, 等. 娑罗子化学成分研究进展 [J]. 西北林学院学报, 2003, (04): 126–129.

[18] Cao, H. N., Ruan, J. Y., Han, Y., Zhao, W., Zhang, Y., Gao, C., ... & Wang, T. (2023). NO release inhibitory activity of flavonoids from *Aesculus wilsonii* seeds through MAPK (P38), NF- κ B, and STAT3 cross-talk signaling pathways. *Planta Medica*, 89(01), 46–61.

[19] 石沁, 叶利春, 刘华侨, 等. 罐组分级逆流提取技术在娑罗子提取工艺中的应用 [J]. 世界科学技术-中医药现代化, 2018, 20(04): 603–607.

[20] Lu, X. Q., Ren, P., Qin, S., Li, J., & Zhao, X. N. (2025). Antioxidant potential of four flavonoids from *Scutellaria baicalensis*: a computational investigation on radical scavenging activity and enzyme inhibition. *New Journal of Chemistry*.

[21] Li, L., Jin, Y., Li, T., Lv, B., Yuan, D., Li, X., & Yuan, J. (2025). Flavonoid Polyphenols as Therapeutic Agents for Fatty Liver Disease: Mechanisms, Microbiome Interactions, and Metabolic Insights. *Molecular Nutrition & Food Research*, e70144.

固体废物资源化利用的环境效益与工程可行性

邓广才

广州诺登环保工程有限公司，广东 广州 511440

DOI:10.61369/EAE.2025030007

摘 要： 固体废物资源化利用是应对资源短缺与环境污染双重挑战的重要途径。本文系统分析了固体废物资源化在减少环境污染、降低碳排放、节约自然资源等方面的环境效益，从技术成熟度、经济成本、政策支持及产业链协同等角度探讨了其工程可行性，并提出优化技术路径、完善政策体系、强化市场驱动等推进策略，为推动固体废物资源化利用的可持续发展提供参考。

关 键 词： 固体废物；资源化利用；环境效益

Environmental Benefits and Engineering Feasibility of Resource Utilization of Solid Waste

Deng Guangcai

Guangzhou Nuodeng Environmental Protection Engineering Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 511440

Abstract： Resource utilization of solid waste represents a crucial approach to addressing the dual challenges of resource scarcity and environmental pollution. This paper systematically analyzes the environmental benefits of solid waste resource utilization in terms of reducing environmental pollution, lowering carbon emissions, and conserving natural resources. It explores the engineering feasibility from the perspectives of technological maturity, economic costs, policy support, and industrial chain collaboration. Furthermore, it proposes strategies such as optimizing technological pathways, improving policy frameworks, and strengthening market-driven approaches to promote the sustainable development of solid waste resource utilization, providing references for advancing this field.

Keywords： solid waste; resource utilization; environmental benefits

引言

随着工业化和城市化加速，固体废物产生量持续增长，传统“末端处置”模式占用土地且易引发污染，威胁生态与人类健康。在此背景下，固体废物资源化利用作为“3R”原则核心实践，通过将废弃物转化为再生资源实现“变废为宝”，成为全球可持续发展重要共识。近年来，我国重视固体废物资源化工作，出台相关政策文件推动技术创新与产业升级。然而，固体废物成分复杂、处理难、成本效益不平衡等问题制约其工程应用。因此，深入评估其环境效益，系统分析工程可行性，对突破技术瓶颈、优化产业布局、提升资源利用效率有重要理论与实践意义。

一、固体废物资源化利用的环境效益分析

（一）资源减耗效益

固体废物的资源化利用，其核心价值之一在于能够替代部分原生资源，从而减少对矿产、森林、土地等自然资源的开采与消耗。当工业废渣、城市垃圾等被转化为可再利用的材料时，对自然界原始物质的索取便相应降低。例如，粉煤灰作为一种燃煤电厂的副产品，经过适当处理后，可以部分替代水泥作为混凝土的掺合料。这种替代不仅直接减少了水泥生产所需石灰石等原料的开采量，还降低了水泥生产过程中的能耗^[1]。

（二）污染减排效益

资源化利用在减少污染方面同样具有显著效益。它能够有效降低固体废物在收集、运输、处理（如填埋、焚烧）等环节中产生的环境负担。在收集和运输过程中，废物量的减少直接意味着运输车辆行驶里程和燃油消耗的降低，从而减少了相应的尾气排放和交通拥堵。在处理环节，将废物资源化处理通常比填埋或焚烧产生更少的温室气体。例如，填埋有机废物会产生甲烷，这是一种强效温室气体；而通过堆肥或厌氧消化等资源化方式处理，可以捕获并利用这些气体，或将其转化为相对无害的物质。填埋场还会产生渗滤液，污染土壤和地下水，而资源化利用则避免了

大量废物进入填埋场，减少了渗滤液的产生量。焚烧处理虽然能减少体积，但会产生扬尘和多种有害物质，如二噁英、重金属等，需要复杂的烟气处理系统。资源化利用则从根本上减少了需要焚烧的废物量^[2]。

（三）土地节约效益

资源化利用对于土地资源的节约同样意义重大。它通过减少最终需要进入填埋场的废物总量，直接保护了宝贵的土地资源。填埋场占用了大量的土地面积，并且这些土地往往位于城市周边或交通便利的区域，具有很高的潜在利用价值。当更多的废物被回收、再利用或转化为其他有用物质时，对新增填埋场的需求就会减少，现有填埋场的使用寿命也能得到延长。更进一步，一些资源化产品可以直接应用于土地工程中，促进土地的可持续利用。

（四）综合环境效益评价

固体废物资源化利用所带来的环境效益是多方面的、系统性的。它不仅体现在单一环节的资源节约或污染减排上，更在于其对传统“产生—丢弃”处理模式的根本性改善。这种改善覆盖了从资源开采、生产制造、使用消费到最终处置的整个链条，推动形成了更为闭合和高效的物质循环。因此，评价资源化利用的环境效益时，必须强调其综合性和系统性，认识到各项效益之间的相互关联和协同作用。同时，评估过程需要采取全生命周期的视角，全面考量资源化过程本身可能产生的环境负荷（如收集运输的能耗、处理加工的排放等），并将其与不进行资源化处理（即采用传统方式）所造成的环境影响进行对比。

二、固体废物资源化利用的工程可行性探讨

（一）技术成熟度与适用性

在探讨固体废物资源化利用的工程可行性时，首先需要评估相关技术的成熟程度及其适用范围。针对不同种类的固体废物，存在多种资源化技术路径，例如物理分选、机械破碎、高温熔融、化学转化或生物降解等。这些技术并非万能，其成熟度各不相同。某些技术，如针对特定塑料的物理回收或金属的电磁分选，已经发展较为成熟，应用广泛。而另一些技术，如复杂有机废物的化学解聚或特定工业废渣的高值化利用，可能仍处于研发或小规模试验阶段，技术稳定性有待验证。技术选择并非随意，必须与待处理废物的具体物理化学特性紧密匹配。例如，湿式分选技术适用于含水量较高的废物，而干式破碎则对含水率有特定要求^[3]。

（二）工艺流程与设备要求

典型的固体废物资源化利用工艺流程通常包含多个关键环节和相应的设备构成。以建筑垃圾再生骨料生产为例，其流程一般包括原料的接收与初步分拣、破碎、筛分、磁选除铁、清洗等步骤。每个环节都需要特定的设备，如颚式破碎机、反击式破碎机、振动筛、磁选机、洗石机等。这些设备共同构成了完整的处理线。在工程实践中，设备的运行稳定性、可靠性至关重要，这直接关系到处理线的连续作业能力和处理效率。自动化程度也是

重要考量，高度自动化的系统可以减少人为干预，保证产品质量的均一性，并降低对操作人员的数量需求。

（三）运行成本与经济性

资源化利用项目的经济性是决定其能否可持续运行的关键因素。这涉及到初始的投资成本，包括土地购置或租赁、厂房建设、工艺设备采购与安装等费用，以及后续的运行维护成本，如日常能耗（电力、燃料）、化学药剂消耗、人工工资、设备定期维护和更换备件费用等。这些成本构成了项目的总投入。另一方面，项目的经济性也取决于其产出产品的市场接受度和销售价格。如果再生产品能够获得市场认可，以合理的价格销售出去，就能带来收入，抵消部分甚至全部成本。然而，市场对再生产品的偏好、价格敏感度、以及与传统原生材料的竞争关系，都直接影响着产品的销售情况和项目整体的盈利能力。成本效益的平衡往往充满挑战，例如，某些高值化利用技术虽然产品价值高，但投资和运行成本也相应增加；而一些低成本的简单处理技术，产品附加值可能较低，市场空间有限。如何在技术先进性、处理效果与经济可行性之间找到平衡点，是资源化工程面临的重要难题。

（四）运行安全与风险控制

固体废物资源化利用的工程实践中，运行安全与风险控制是不可忽视的重要环节。处理过程中可能存在多种安全风险。例如，在处理含有可燃物的废物时，如废弃塑料或生物质，干燥或破碎过程中产生的粉尘可能达到爆炸极限，引发粉尘爆炸。某些废物在高温处理或化学处理过程中可能释放出有毒有害气体，如二噁英、重金属蒸汽等，对操作人员和环境造成危害。此外，破碎、剪切等机械设备也可能导致机械伤害。为了控制这些风险，工程实践中需要采取多方面的措施。通过优化工艺设计，如设置防爆泄压装置、改进通风除尘系统，可以从源头上减少风险因素。选择符合安全标准的设备，如带有安全防护罩的机械，也能降低事故发生的概率。制定并严格执行标准操作规程，对操作人员进行充分的安全培训，提高其安全意识和应急处理能力同样重要。同时，必须制定完善的应急预案，明确在发生泄漏、火灾、爆炸等紧急情况时的应对流程和责任分工，确保能够迅速有效地控制事态，减少损失。这些措施共同构成了资源化工程安全运行的保障体系^[4]。

三、环境效益与工程可行性的耦合关系

（一）环境效益对工程可行性的影响

显著的环境效益能从多个维度提升资源化项目的工程可行性。在政策支持方面，当项目具有明确的碳减排贡献，如某垃圾焚烧发电项目经测算每年可减少二氧化碳排放 50 万吨，这类项目更容易符合国家及地方的绿色发展政策导向，从而获得审批流程简化、税收减免等实际支持。根据生态环境部 2024 年发布的《绿色项目认定标准》，碳减排量达到每年 10 万吨以上的资源化项目，在省级审批环节的平均耗时较普通项目缩短 30%。在社会认可度上，具备资源替代价值的项目，如利用工业废渣生产新型建

材替代传统水泥，能直观减少天然矿产资源的开采，这类项目往往能获得社区居民和环保组织的支持，降低项目落地后的舆情风险。而在市场价值层面，随着碳交易市场的完善，项目产生的碳减排量可作为商品交易，为项目带来额外收益。例如，某生物质能发电项目通过出售碳减排额度，每年新增收入约 800 万元，提升了项目的投资回报率，使其在融资过程中更易获得金融机构的青睐。

反之，环境效益的量化难度或不明确性会给项目带来障碍。部分资源化项目的环境效益涉及生态修复、生物多样性保护等难以用具体数值衡量的领域，如湿地净化工程对区域生态系统的改善作用，由于缺乏统一的量化标准，在项目立项时难以通过成本效益分析说服投资方，导致融资困难。据中国环境保护产业协会 2023 年的数据，因环境效益量化不明确而导致立项失败的资源化项目占比达 22%。

（二）工程可行性对环境效益实现的影响

工程可行性是环境效益落地的基础，技术、工艺、设备等方面的问题会直接削弱环境效益。若资源化项目采用的技术不成熟，如某垃圾填埋气回收项目因气体提纯技术不过关，导致甲烷回收率仅为 30%，远低于设计的 60%，不仅无法实现预期的碳减排目标，还造成了能源浪费。工艺不稳定同样会引发问题，某电镀废水资源化项目因处理工艺参数波动，导致出水水质时而超标，产生二次污染，原本预期的水资源循环利用效益被污染治理成本抵消。设备故障的影响也不容忽视，某光伏电站因逆变器频繁故障，全年有效发电时间减少 150 小时，对应的碳减排量较计划降低约 12%。

工程实践中的成本控制和安全管理虽不直接产生环境效益，却是环境效益持续稳定实现的保障。某秸秆生物质发电项目通过优化燃料运输路线降低物流成本，将节省的资金用于设备维护，确保机组全年稳定运行，使碳减排量连续三年达到设计值的 95% 以上。而某化工废渣资源化项目因忽视安全管理，发生有毒物质泄漏事故，不仅造成周边环境污染，项目也被责令停产整改，前期投入的环保设施无法发挥作用，环境效益化为泡影^[5]。

（三）实现环境效益与工程可行性协同优化的路径

技术创新和工艺改进是协同优化的核心手段。某钢铁企业

通过研发转炉煤气高效回收技术，将煤气回收率从 70% 提升至 90%，在不增加设备投资的前提下，年减少二氧化碳排放 20 万吨，同时通过煤气发电创造经济效益 3000 万元，实现了环境效益与工程可行性的双赢。管理提升也能发挥重要作用，某城市生活垃圾焚烧项目引入智能运维系统，实时监控设备运行状态和污染物排放数据，提前预警并排除故障，使项目连续五年保持 98% 的运行负荷率，垃圾无害化处理率和发电量均稳定在设计水平。

协同优化需要综合权衡多重因素。在某厨余垃圾处理项目规划中，技术团队对比了厌氧发酵产沼和饲料化两种工艺：厌氧发酵环境效益更优（甲烷回收率高），但设备投资高；饲料化工艺成本较低，但需严格控制重金属含量。最终结合当地农业需求，采用“预处理 + 部分厌氧发酵”组合工艺，既保证 90% 以上的有机物降解率，又将投资控制在预算内，实现技术、经济、环境的平衡。此外，还需考虑社会因素，某工业固废填埋场在扩容阶段充分征求周边社区意见，增设防渗与废气处理设施，获得居民支持后顺利推进，项目投用后年消纳固废 15 万吨，二次污染控制达标率 100%。

四、结语

固体废物资源化利用有显著环境效益与工程可行性，但实现可持续发展仍面临挑战。环境效益上，虽在资源减耗等方面优势明显，但综合效益量化与评估需更科学方法和标准。工程可行性方面，技术成熟度等问题待优化解决。未来，推动其发展需政府、企业和社会各方共同努力。政府要完善政策体系，加大项目支持，引导资金投入，加强监管。企业作为实施主体，应加大技术研发投入，优化流程，降低成本，提升竞争力，强化安全管理。社会要加强环保宣传，提高公众认识与支持，营造良好氛围。通过各方协同合作，有望实现环境效益与工程可行性协同优化，为全球可持续发展作贡献。相信不久后，固体废物资源化利用将成解决资源与环境问题重要手段，推动社会走向绿色、循环、低碳发展道路。

参考文献

- [1] 袁梦娇, 何冰流, 夏玮. CFB 锅炉燃料耦合资源化综合利用可行性分析 [J]. 石油石化绿色低碳, 2021, 6(04): 35-41.
- [2] 姚梦茵, 程亮. 固体废物污染防治中绿色基础设施建设问题诊断研究 [C]// 中国环境科学学会 2021 年科学技术年会. 中国环境科学学会, 2021.
- [3] 凌辉勋. 一般工业固体废物治理及资源化利用策略分析 [J]. 华东科技 (综合), 2021, 000(006): P.1-1.
- [4] 杜洪彪, 梁扬扬, 李金惠, 等. 工业园区固体废物协同利用技术评价方法——以包头铝业园区为例 [J]. 环境科学研究, 2023.
- [5] 张宁宁, 石忠钰, 韩瑞, 等. 粉煤灰“工程型”及“产品型”资源化利用研究进展 [J]. 金属矿山, 2022, (05): 26-36.

西藏生态脆弱区适应性治理路径探析

周发东

西藏交发项目管理有限公司，西藏 拉萨 850000

DOI:10.61369/EAE.2025030008

摘 要： 西藏作为全球气候变化敏感区和国家生态安全屏障，面临冰川退缩、冻土消融等复合型生态风险。本文基于我国生态文明思想，结合“双碳”目标，采用GIS空间分析、社会经济统计模型、政策文本分析与典型案例调研相结合的方法，系统分析西藏生态脆弱区的适应性管理需求，提出“生态修复—社区参与—政策协同”三位一体治理框架，探索生态保护与高质量发展的协调路径。

关 键 词： 环境治理；生态

Analysis of Adaptive Governance Paths in Ecologically Fragile Areas of Xizang

Zhou Fadong

Xizang Jiaofa Project Management Co., LTD., Lasa, Xizang 850000

Abstract： As a sensitive area to global climate change and a national ecological security barrier, Xizang is confronted with complex ecological risks such as glacier retreat and permafrost thawing. Based on China's ecological civilization thought and in combination with the "dual carbon" goals, this paper adopts a method combining GIS spatial analysis, socio-economic statistical models, policy text analysis and typical case research to systematically analyze the adaptive management needs of ecologically fragile areas in Xizang, and proposes a three-in-one governance framework of "ecological restoration – community participation – policy coordination". Explore the coordinated path between ecological protection and high-quality development.

Keywords： environmental governance; ecology

引言

在全球气候变化的大背景下，西藏地区因其独特的地理位置和生态环境，成为了气候变化的敏感区域。西藏不仅是我国重要的生态安全屏障，而且其生态系统的稳定对于区域乃至全球的生态平衡都有着至关重要的意义。然而，近年来，西藏生态脆弱区面临着冰川退缩、冻土消融等一系列复合型生态风险，这些变化不仅对当地的生态环境造成了严重破坏，也给社会经济发展带来了诸多挑战。因此，如何应对气候变化，实现生态适应型发展，成为了西藏生态脆弱区亟待解决的问题。本文旨在通过系统分析西藏生态脆弱区的适应性管理需求，提出相应的治理框架和路径，为西藏的生态保护和可持续发展提供理论支持和实践指导^[1]。

一、西藏生态脆弱区的气候变化挑战

（一）区域生态特征与气候变化的耦合效应

1. 高寒生态系统脆弱性

西藏高原地区的植被恢复周期极长，一般大于10年。这是由于高寒环境下，气温低、生长季短、土壤肥力低等因素限制了植被的生长和繁殖。同时，冻土退化对地表径流产生了显著影响，导致地表径流减少30% - 50%。以藏北高原为例，冻土退化使得原本储存于冻土层中的水分无法正常补给地表径流，进而影响了当地的水资源分布和生态系统的稳定性。基于1990 - 2020年的遥感数据，通过建立高原植被盖度与气温、降水的多元回归模型（ $R^2 = 0.87$ ），可以揭示出当年均温 $\geq 2.5^{\circ}\text{C}$ 时，草场退化风险会

激增。这表明气温升高对高原植被的影响十分显著，进一步加剧了高寒生态系统的脆弱性。此外，冰川物质平衡监测显示，喜马拉雅山脉西部冰川年均损失0.6米厚度（Kääb et al., 2022），这不仅影响了当地的生态景观，也对周边地区的水资源供应构成了威胁^[2]。

2. 冰川消融的级联效应

近30年来，雅鲁藏布江流域冰川面积缩减了12%。冰川作为“固体水库”，其消融直接影响了下游地区的水资源供应。据估算，雅鲁藏布江下游地区约有300万居民的供水安全受到威胁。冰川消融还会引发一系列的连锁反应，如冰湖溃决、泥石流等地质灾害。以易贡藏布流域为例，2000年发生的易贡湖溃决事件，就是由于冰川快速消融导致冰湖水位上升，最终引发溃决，给下游地区带来了严重的人员伤亡和财产损失。同时，冰川消融对雅

江径流季节分配也产生了显著影响，以冈仁波齐冰川为案例，量化分析表明融雪期提前15天，枯水期延长20天，这对下游地区的农业灌溉、水电开发等活动造成了不利影响^[3]。

（二）社会经济系统的适应性缺口

1. 传统牧业生产模式受阻

传统牧业是西藏地区重要的经济支柱之一，但近年来，由于气候变化的影响，草场载畜量下降40%。以那曲地区为例，当地牧民主要依赖天然草场放牧，但随着气温升高、降水减少，草场质量下降，可承载的牲畜数量大幅减少。这导致牧民人均收入增速低于全国平均水平，给牧民的生活带来了困难。通过构建包含草场质量、畜群结构、市场波动的复合脆弱性指数（CVI），显示那曲地区CVI值达0.78（高脆弱性），这表明当地牧业生产对气候变化的适应能力较弱^[4]。

2. 人居设施抗灾能力薄弱

西藏部分地区的人居设施抗灾能力薄弱，30%的边境村寨未达到防洪标准。在极端天气事件频发的情况下，这些地区的致灾率上升15%。以2018年西藏东南部的暴雨洪涝灾害为例，由于部分村寨的排水系统不完善、房屋建筑标准低等原因，导致大量房屋被淹，居民的生命财产受到严重损失。对比川藏铁路与青藏公路的防灾设计标准差异（如抗震等级、排水系统容量），可以发现部分基础设施在设计 and 建设过程中对气候变化的考虑不足，存在一定的安全隐患^[5]。

二、适应性管理的创新实践

（一）生态修复技术体系构建

1. 冻土保护工程

采用热棒技术 + 植被缓冲带的方法，有效降低了青藏公路沿线冻土区的退化速率。热棒技术通过高效的热传导作用，将地下的热量散发到空气中，从而保持冻土的低温状态。植被缓冲带则可以减少地表径流对冻土的冲刷，增加地表植被覆盖，改善冻土的生态环境。通过实际监测，该方法使青藏公路沿线冻土区退化速率降低60%。同时，结合生态恢复的长期目标，不断优化热棒的布置密度和植被的选择，提高冻土保护的效果^[6]。

2. 水资源智能调配

建立冰川融水动态监测系统，实现了那曲地区灌溉效率提升25%。该系统通过实时监测冰川融水的流量、水质等参数，结合当地的气象、土壤等信息，实现了水资源的精准调配。利用物联网技术和大数据分析，为农业灌溉提供科学的决策支持，确保水资源得到合理利用。此外，还可以通过建设水库、水窖等水利设施，调节水资源的时空分布，提高水资源的利用效率^[7]。

3. 高寒植被恢复

筛选耐寒牧草品种（如冷地早熟禾），人工草地年均产草量达1200kg/亩。通过对不同牧草品种的适应性研究和选育，选择适合高寒环境的品种进行推广种植。同时，采用科学的种植和管理技术，如合理施肥、灌溉、病虫害防治等，提高人工草地的产量和质量。草类、灌木可利用雨季进行直播造林，提高在荒山、

荒坡、荒沟等地的造林面积。乔木宜选用植苗造林方式，在春、秋两季选取多株造林、遮阴造林等抗旱造林方法，喷洒增温保墒剂，提高成活率^[8]。

（二）社区参与型治理模式

1. 生态管护员制度

设立2.8万名基层管护员，实现95%的保护区网格化管理。生态管护员作为基层的生态保护力量，他们熟悉当地的生态环境和社会情况，能够及时发现和处理生态破坏行为。通过建立完善的培训、考核和激励机制，提高生态管护员的业务能力和工作积极性。同时，加强对生态管护员的监督和管理，确保他们能够履行职责，有效地保护生态环境^[9]。

2. 绿色生计转型

发展高原有机农业，带动2.3万户农牧民增收，户均年收入增加1.2万元。高原地区具有独特的自然环境和资源优势，适合发展有机农业。通过推广有机种植技术、建立农产品质量追溯体系等措施，提高农产品的品质和市场竞争力。同时，加强农业产业化发展，延长产业链，提高农产品的附加值。此外，还可以结合当地的旅游资源，发展乡村旅游等产业，促进农牧民的增收致富。

3. 文化生态融合

将传统“萨玛”祭祀仪式转化为生态教育载体，参与度提升至78%。“萨玛”祭祀仪式是西藏地区的传统文化活动，蕴含着丰富的生态保护理念。通过对传统仪式的挖掘和创新，将生态保护知识融入到仪式中，提高了当地居民的生态保护意识。同时，利用文化活动的影响力，吸引更多的人参与到生态保护中来。还可以通过建设生态文化博物馆、举办生态文化节等方式，传承和弘扬生态文化，促进文化与生态的融合发展。

三、双碳目标下的协同治理机制

（一）绿色低碳转型路径

1. 清洁能源替代

规划到2030年可再生能源占比达85%，西藏地区具有丰富的太阳能、水能、风能等可再生能源资源。以光伏治沙项目为例，该项目不仅可以利用太阳能发电，减少对传统化石能源的依赖，还可以通过光伏板的遮阴作用，降低地表温度，减少水分蒸发，改善沙漠生态环境。据统计，光伏治沙项目年减排CO₂ 120万吨。同时，加大对清洁能源产业的投资和研发力度，提高清洁能源的利用效率和稳定性^[10]。

2. 生态产品价值实现

建立碳汇交易试点，林芝市森林碳汇量估值达23亿元/年。通过对森林、草原等生态系统的碳汇功能进行评估和监测，将碳汇资源转化为可交易的资产。碳汇交易不仅可以为生态保护提供资金支持，还可以激励企业和社会资本参与生态保护和修复。此外，还可以探索其他生态产品的价值实现途径，如水资源使用权交易、生态旅游服务等，促进生态资源的合理利用和价值提升。

3. 循环经济体系

推广“牦牛养殖 - 有机肥生产 - 生态种植”产业链，资源

综合利用率达92%。该产业链通过将牦牛养殖产生的粪便进行处理，生产有机肥，用于生态种植，实现了资源的循环利用。同时，减少了废弃物的排放，降低了环境污染。通过建立循环经济产业园区，加强企业之间的合作和资源共享，进一步提高循环经济的发展水平。

（二）政策创新与制度保障

1. 生态空间分区管控

划定“三区三线”，严格控制核心区开发强度 $\leq 0.3\%$ 。通过明确生态保护红线、永久基本农田和城镇开发边界，实现了对生态空间的科学规划和有效管理。加强对核心区的保护和监管，限制开发活动，确保生态系统的完整性和稳定性。同时，建立生态空间监测和评估机制，及时发现和解决生态空间保护中存在的问题。

2. 跨区域补偿机制

建立长江、雅鲁藏布江流域横向生态补偿基金，年规模超5亿元。跨区域生态补偿机制可以平衡上下游地区在生态保护和经济发展中的利益关系，促进区域间的协调发展。通过明确补偿标准和方式，确保生态保护地区能够得到合理的补偿，激励他们积极参与生态保护。同时，加强对生态补偿资金的管理和监督，提高资金的使用效率。

3. 智慧监测平台建设

部署1500个物联网监测点，实现生态数据实时共享与风险预警。智慧监测平台可以实时获取生态环境的各项数据，如气温、降水、土壤湿度、水质等。通过大数据分析和人工智能技术，对生态环境进行动态监测和评估，及时发现潜在的生态风险，并发出预警信号。同时，利用智慧监测平台，为生态保护决策提供科学依据，提高生态保护的精准性和有效性。

四、结论与建议

（一）构建“监测预警－工程修复－制度保障”的适应性管理闭环

建立完善的生态监测预警体系，实时掌握生态环境的变化情

况，为生态修复和管理提供科学依据。加强生态修复工程的实施和管理，采用先进的技术和方法，提高生态修复的效果。同时，完善相关的政策制度，为生态保护和适应气候变化提供制度保障。通过构建这一闭环管理体系，实现生态保护和可持续发展的良性循环。

（二）推动生态价值核算体系与GEP统计制度创新

建立科学合理的生态价值核算体系，准确评估生态系统的服务功能和价值。推动GEP（生态系统生产总值）统计制度的创新，将生态价值纳入国民经济核算体系，为生态保护和决策提供更加全面、准确的信息。通过生态价值核算和GEP统计，引导社会资源向生态保护领域流动，促进生态经济的发展。

（三）强化边疆民族地区生态治理的数字化赋能

利用现代信息技术，如物联网、大数据、人工智能等，加强对边疆民族地区生态环境的监测和管理。建设数字化生态治理平台，实现生态数据的实时共享和协同处理。通过数字化赋能，提高生态治理的效率和精准性，促进边疆民族地区的生态保护和社

（四）完善适应气候变化的国际合作机制（如中尼跨境冰川保护协定）

加强与周边国家在气候变化应对和生态保护方面的合作，共同应对跨境生态问题。以中尼跨境冰川保护协定为例，通过建立跨境监测网络、联合开展科研项目、共享信息和技术等方式，加强对跨境冰川的保护和管理。同时，积极参与国际气候变化合作，借鉴国际先进经验，提升西藏地区应对气候变化的能力和水平。

综上所述，西藏生态脆弱区在气候变化的背景下面临着诸多挑战，但通过适应性管理的创新实践和双碳目标下的协同治理机制，有望实现生态保护与高质量发展的协调共进。未来，需要进一步加强科技创新、政策支持和国际合作，不断完善适应性治理路径，为西藏地区的可持续发展奠定坚实基础。

参考文献

[1] Kääb, A., Treichler, D., Nuth, C., et al. (2022). Acceleration of ice loss across the Himalayas over the past 40 years. *Science Advances*, 8(24), eabn5955.

[2] 中国科学院青藏高原研究所. (2023). 青藏高原生态变化监测与评估报告. 北京: 科学出版社.

[3] 国家发展和改革委员会. (2021). 西藏自治区“十四五”时期生态环境保护规划. 西藏自治区人民政府办公厅印发.

[4] 西藏自治区林业和草原局. (2024). 西藏高寒草地退化与修复技术研究. 拉萨: 西藏人民出版社.

[5] 王君正. (2023). 西藏清洁能源产业发展报告. 西藏自治区产业发展工作调研座谈会.

[6] 李虹. 中国生态脆弱区的生态贫困与生态资本研究 [D]. 西南财经大学, 2011.

[7] 周扬, 何志平. 高原脆弱生态区铁路工程建设环保对策研究 [J]. 铁路节能环保与安全卫生, 2019, 9(03): 7-9+14.

[8] 姚传江. 西藏生态脆弱区绿色矿业开发模式研究 [J]. 中国有色金属, 2018, (S1): 432-434.

[9] 米玛顿珠. 西藏生态脆弱区绿色矿业经济发展模式研究 [D]. 中国地质大学, 2017.

[10] 徐增让, 成升魁, 闵庆文, 等. 西藏生态脆弱区人为作用对生态退化的影响 [J]. 干旱区地理, 2005, (06): 740-745.

平原河网地区农村生活污水治理项目设计研究

陈博, 卞方杰, 李俊

上海勘测设计研究院有限公司, 上海 201800

DOI:10.61369/EAE.2025030009

摘 要 : 农村生活污水治理既是农村人居环境整治的重要内容, 也是突出短板^[7]。江苏省农村生活污水治理行政村覆盖率达62.9%, 其中苏南、苏中、苏北分别为96.1%、66.8%、48.6%。虽然苏南平原河网地区农村生活污水治理工作取得了一定成效, 但部分地区仍然存在治理覆盖率不足、治理模式不合理、设施运行负荷低、长效管护机制不健全等问题。本文通过对苏州市吴江区农村生活污水治理项目的设计研究, 提出了针对性的治理方式和措施建议。

关 键 词 : 农村生活污水治理; 环境整治; 治理方式; 长效管护

Design and Research on Rural Domestic Sewage Treatment Projects in Plain River Network Areas

Chen Bo, Bian Fangjie, Li Jun

Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 201800

Abstract : The treatment of rural domestic sewage is not only an important part of the improvement of rural living environment but also a prominent shortcoming^[7]. The coverage rate of administrative villages for the treatment of rural domestic sewage in Jiangsu Province has reached 62.9%, among which it is 96.1%, 66.8% and 48.6% respectively in southern Jiangsu, central Jiangsu and northern Jiangsu. Although some achievements have been made in the treatment of rural domestic sewage in the plain river network areas of southern Jiangsu, there are still some problems in some areas, such as insufficient coverage rate of treatment, unreasonable treatment mode, low operational load of facilities and imperfect long-term management and protection mechanism. Through the design and research of the rural domestic sewage treatment project in Wujiang District, Suzhou City, this paper proposes targeted treatment methods and suggestions for measures.

Keywords : rural sewage treatment; environmental improvement; treatment mode; long-term management

引言

长江是中华民族的母亲河, 既孕育了灿烂的长江文明, 也承载着长江经济带发展国家战略。经过几十年的开发建设, 长江经济带的生态问题比较突出, 长江流域污染排放总量大、环境风险高、环境承载总量不堪重负, 部分区域发展与保护的矛盾尖锐等问题日益受到各方高度重视。习近平总书记早在2016年1月5日长江经济带发展重庆座谈会上就明确提出, 长江水质关系着沿江4亿人民的生产生活, 更关系子孙后代的生存环境, 我们必须从中华民族长远利益考虑, 把修复长江生态环境摆在压倒性位置, 探索出一条生态优先、绿色发展新路子, 为今后长江经济带发展正确把握生态环境保护和经济发展的关系指明了方向。长江流域的生态环境治理除关注到城镇外, 农村的生活污水治理也是不容忽视的一环。

一、总体设计思路探讨

(一) 污水收集范围^[1]

农村生活污水指农村居民生活过程中产生的污(废)水, 主要包括卫生间、厨房、庭院洗衣、农家乐、民宿或宴会厅食堂排水等, 污水收集应做到人粪尿、洗涤、洗浴和厨用废水等生活污水应纳尽纳、应收尽收、应治尽治。

除了常规农村生活污水外, 农村还存在部分畜禽养殖, 豆制品

品加工、粉条加工、酿酒等作坊, 小规模工业企业等^[6]。这部分非生活污水通常被村民接入厨房、洗手间等下水管, 易随接户管进入污水处理站点。该部分污水虽然量小, 但由于污染物浓度高或有毒有害, 其进入污水处理系统后会对普遍采用的生物处理系统产生强烈冲击, 甚至会使生物系统崩溃, 进而大大增加污水处理系统出水超标风险。因此, 农村生活污水收集时应杜绝非生活污水进入污水收集系统。

村庄内的小型作坊、特色产业生产废水原则上不纳入污水收

集范围，但对于采用纳管模式的村庄，确需排入则应向行业主管部门提出申请，经评估排放污水能够稳定达到《污水排入城镇下水道水质标准》（GB/T31962-2015），获得批准后可排入村庄污水收集系统。

（二）村庄治理模式^[3]

农村生活污水治理模式一般有三种：纳管模式、相对集中治理模式和分散治理模式^[8]。具体模式的选择应综合考虑村庄的规划、居住人口、与现状市政污水厂网的距离、村民诉求等因素，在苏州市吴江区农村生活污水治理中治理模式的选择主要遵循下表所示原则。

表1 村庄治理模式
Tab.1 Village governance model

序号	治理模式	适用情形
1	纳管模式	①重要水体保护区范围内的村庄采用纳管方式，将污水导出保护区范围； ②距离现状市政污水厂网不超过2km，或者可新建一段主管，沿途收集一片区域的村庄污水。
2	分散治理模式	①常住人口较少，污水总量不超过5t/d形态分散的村庄； ②某村庄被道路或河流分隔的个别少数农户。
3	相对集中治理模式	上述两种情形以外的村庄。

（三）工程类型

新建工程：针对完全未治理过的村庄，在村内新建污水管网、污水提升泵站、污水处理设施，收集并处理生活污水。

整改工程：针对已实施过农村生活污水治理，但是现状污水管道及设施存在轻微损坏、缺陷或者无法达到目前整治标准，经过局部整改可以继续发挥使用功能的村庄，按照现行标准对现状管道和设施进行修复、翻新。

重建工程：针对已实施过农村生活污水治理，但是采用庭院式人工湿地等分散处理设施，基本处于废弃状态，或者现状污水管道及设施损坏、缺陷严重，排水设施丧失使用功能的村庄，重新建设村庄污水收集处理系统。

二、户内污水收集系统分析

苏南等经济条件较好的地区基本都已实施过多轮农村生活污水治理，但是以往的工程多注重主管道及污水处理终端的建设，对接户未引起重视，接户管设计不合理或者建设质量不高，造成污水无法有效收集或管道反臭村民意见大等问题，后续农村生活污水治理应加强接户管的建设实施。

苏州市吴江区要求工程范围内三水（厨房水、卫生间水、庭院水）接户率达到85%以上。接户工程以农户房屋建筑外墙为界，在建筑物或院墙外设置靠墙井，厨房、卫生间和庭院洗涤污水通过管道接入靠墙井^[5]。靠墙井宜采用混凝土现浇或砖砌形式，方便多根管道从各个方向接入。对于楼房立管混接以及立管老化严重的，需进行立管改造，根据实际情况新建雨、污水立管。

接户管一般根据农户排水设施实际情况采用 De75、De110、De160三种规格，尽量采用大管径；为防止接户管堵塞，接户管之间的连接采用小型检查井，不得采用弯头连接；接户管每隔一定距离也应设置小型检查井，根据工程经验该距离建议不大于15m。

（一）化粪池的设置^[2]

若选择相对集中模式，每户均新建玻璃化粪池，厕所排出的污水接入玻璃化粪池后排入污水管网，该措施目的是为了防管道设施淤堵，减轻后期运维工作量；若选择纳管模式，均不建设化粪池，原化粪池废弃或做超越处理，厕所排出的污水直接排入污水管网，以保证污水处理厂进厂浓度。若部分村民有浇菜地等资源化利用需求，纳管模式村庄也可根据村民诉求设置玻璃化粪池，方便居民取用粪水。

（二）清扫井的设置

在农贸市场、商铺、农户厨房等出水管上设置成品塑料清扫井，拦截絮状固体杂物，防止管道堵塞，便于居民开盖清理。

（三）隔油池的设置

对于农家乐及饭店等餐饮类的污水管道，需设置隔油池，厨房废水经过隔油池沉淀悬浮杂物和油水分离的工艺过程处理后，进入管网或农村生活污水处理设施。隔油池容积应满足厨房最大排水量，保证废水在此处可停留10分钟以上。

（四）防臭设计

农户住宅的卫生间、厨房出水立管设置“S”型存水弯，或在埋地横管设置“P”型存水弯、水封井，水封深度不小于50mm，防止化粪池或污水管道臭气倒逸至农户家中。

三、户外污水收集系统

由于村庄生活污水流量较小，根据水力计算及工程实践，村内污水管道设计一般选用 DN200~DN400，管材多采用 HDPE 结构壁缠绕管。

（一）主管道敷设^[9]

人行步道、宅间小弄、绿化带下面的污水管最小覆土厚度为0.4m，车行道下面的污水管最小覆土厚度为0.7m，覆土不足0.7m时采用混凝土包封进行保护。对于部分管道，特别是住户和管网系统之间的连接管，位于低洼地带时，可以采用局部填土方式，以保证管道有一定的覆土厚度，对管道进行保护。

（二）管道过河方式研究^[10]

江南平原河网地区水网密布，水面率高。苏州市吴江区河道数量多达2600条，河湖水面率为24.4%。农村房屋沿河而建，一个村庄通常被河道划分成2个及以上片区，因此污水管在敷设过程中无法避免穿越河道，是农村生活污水治理实施过程中的重难点，也是卡点。管道过河细分下来通常有4种方式：重力管顺埋过河、倒虹管过河、压力管牵引过河和压力管架设过河，具体过河方式的选择要根据河道宽度、深度、通航情况、管道埋深、用地条件及河道周边环境综合考虑。

表2 管道过河形式比选				
Tab.2 Comparison and selection of pipeline crossing forms				
过河形式	重力管顺埋过河	倒虹管过河	压力管牵引过河	压力管架设过河
优点	1) 满足设计坡度要求, 水力条件好, 不易淤堵; 2) 对周边景观影响较小。	1) 对下游管道埋深影响较小; 2) 对周边景观影响较小。	1) 对下游管道埋深无影响; 2) 对周边景观影响较小。	1) 对下游管道埋深无影响; 2) 后期维护较容易。
缺点	当上游管道埋深较浅的情况下, 对下游管道埋深影响较大。	农村水量变化大, 容易淤堵。	后期维护难度大。	管道明设, 对周边景观有一定影响。
经济性对比	施工难度大, 造价最高	施工难度大, 造价较高, 运维难度大	施工方便, 造价较低, 但运行中产生电费及设备维修保养费, 运维成本较高	施工方便, 造价较低, 但运行中产生电费及设备维修保养费, 运维成本较高

对于管道敷设标高合适, 上下游可顺接的情况, 或者河道窄且水深不大的河段, 可选用重力管顺埋过河的方式, 其余情况, 优先采用水泵提升压力管过河的方式。临近现状桥梁时, 在征得桥梁主管部门同意的情况下过河压力管段可采用挂桥的形式, 无现状桥梁时过河压力管段可采用河底穿越的形式。

明敷管道采用 PE 管外套不锈钢管。过河重力管施工宜采用围堰法施工, 以保证管道坡度满足要求, 尽量避免采用牵引施工等不宜控制管道坡度的施工方式。倒虹管因易产生淤堵, 尽量避免使用。

（三）污水提升泵站选型及设置

1. 在以下情形需酌情设置污水提升泵站：

①管道埋深过大处，本项目管道埋深控制在3m以内，村内房屋密集处不宜超过2m；

②管道穿越河流处，通过泵站提升后压力管过河；

③管道接入现状市政污水管，且新建管道标高比现状市政污水管标高低；

④接入的市政污水管道水位较高，存在污水倒灌风险。

2. 新建泵站形式比选

目前，除了传统混凝土泵站，一体化预制泵站也得到了很广泛的应用。现对这两种泵站形式进行分析比选，如下表所示。

表3 泵站形式比选表			
Tab.3 Comparison table of pump station forms			
序号	项目	传统混凝土泵站	一体化预制泵站
1	土建成本	较高	低于传统砼泵站
2	占地面积	施工期间占地面积较大	较小
3	施工周期	需分步施工，浇注和养护需要2-3个月工期	便于运输吊装，完成基坑开挖、预制好泵站底板，1周内即可完成安装。施工量小，安装工期短。
4	使用寿命	较长	一般
5	底部沉积	平坦的泵坑底部设计、较长的水力停留设计易产生淤积和臭气	设计自清洁底部，最大程度的降低泵站底部的淤积，减少臭气产生

序号	项目	传统混凝土泵站	一体化预制泵站
6	密封性	对施工水平要求较高，施工不当易造成渗漏	工厂一体化成品预制，密封性较好
7	综合造价	一般	较高

村庄污水水量一般较小，其周边建设用地有限，施工作业面狭小，为了节省用地，缩短施工周期，方便后期运营管理，综合考虑新建泵站宜尽量采用成品一体化预制泵站。

3. 利用现状调节池改造为泵站

苏南地区太湖一级保护区等重要水体周边村庄，之前已经实施过农村生活污水治理，建设了污水处理设施，但是这些处理设施出水标准较低，无法满足现行排放标准要求，可考虑将该部分村庄污水导排至保护区外的市政污水管网进行处理。为节能减排，节约工程造价，可对现状污水处理设施进行利旧，利用既有钢筋混凝土池体，改建为提升泵站。

经过现场调查，村庄内现状污水处理设施内设有调节池，部分池体为钢筋混凝土、砖砌等传统土建结构，外观状态正常无破损，适当改造后可改建为调节池，以节约污水设施占地面积，降低工程投资。

常规改造方法如下：①将调节池前管道用气囊封堵，在气囊上游检查井内放置水泵，污水抽排至现状污水处理设施内进行处理，作为施工期间污水的临时处理措施；②拆除原调节池顶板，将调节池内污水、淤泥清除干净，检查调节池内部是否有结构性缺陷、破损、是否漏水，对缺陷、破损进行修补，加高调节池墙体至地面，实施池体表面防水措施，对池体防水性能进行补强；③安装水泵及其附属设施，并对安装过程中破坏的防水措施进行补充，安装调节池活动盖板。

（四）格栅检测井的设置

本工程在容易造成管道堵塞、管道堵塞难以清理和管道中固体杂物易对设备设施造成危害的位置，设置格栅检测井，以便于对管道中的杂物进行拦截清理。

本次设计主要在以下4个部位设置格栅检测井：

①过河倒虹管进水井前；

②污水提升泵站前；

③污水处理设施前；

④村庄生活污水接入市政管网前。

格栅宜选用不锈钢304材质，格栅间距为20mm。

格栅检测井的具体做法和管理养护可参照《上海市排水检测井图集》(DB31 SW/Z017—2021)、《上海市排水检测井技术规程》(DB31SW/Z016—2021)。

（五）污水处理设施设计

1. 污水处理设施的设置

对于采用相对集中治理模式的村庄，需建设污水处理设施对污水进行就地处理，处理达标之后排入自然水体或资源化利用。为降低后期运维工作量，应尽量降低独立处理设施的数量，1个自然村原则上仅考虑设置1~2座污水处理站。

2. 污水处理工艺的选择

农村生活污水处理设施污水处理工艺需要具有较强的抗冲击

负荷能力、具有较高的碳源利用率、产泥量小、运维简单^[4]。AO工艺和SBR工艺具有工艺运行稳定可靠、污染物去除率高的特点；生物接触氧化工艺具有抗冲击负荷能力强、污泥产生量少的特点。污水处理设施可采用“单级AO+生物接触氧化”的组合工艺。结合农村污水处理项目较多采用一体化设施的项目特点，在项目实施过程中，可根据实际情况，在满足现场工况和设备性能要求的前提下，对设施工艺及构造进行局部调整或改良。

四、设施站点装饰装修

（一）标识、标牌设计

目前农村生活污水治理的设施站点通常是无人值守、定期巡检，设置一个美观、耐用、信息全面的展示牌就显得尤为重要。一个精心设计的展示牌不仅可以美化周边环境，提升站点的整体景观，更能够突显当地独特的人文特色，为游人呈现一幅生动的文化画卷。其次，这样的展示牌也为运维和巡检人员提供了极大的便利。通过展示关键信息，如站点的工艺流程、出水指标等重要数据，工作人员可以迅速了解站点的运行状态，有针对性地进行维护和管理，确保设施持续高效运转。

1. 污水处理设施标识牌

每一处污水处理站内都布置一块标识牌，标识牌展示污水处理设施信息，其中内容包含：项目名称、所属县级市（区）、镇（街道）、行政村、自然村、治理方式、管理部门、建设单位、设计单位、设计规模、受益户数及人口、工艺流程图、管网平面布置图、排放要求、开始运行时间、运维单位、运营范围、安全警示、村联系人及联系方式、二维码、监督电话等。

2. 污水提升泵站标识牌

污水提升泵站标识牌内容：村庄名称、泵站编号、潜污泵数

量、设计流量、流量计量程（若有）、设计扬程、污水去向、管网长度、管理部门、建设单位、安全警示、运维单位、村联系人及联系方式、报修二维码、监管平台二维码等。

3）报修卡

在农户出户管或靠墙井旁边墙上设置报修卡，注明：运维单位、报修电话、报修二维码等。

（二）围栏设计

在污水设施站点设置围栏，防止人员进入发生安全问题，并对站点内设备进行保护。污水处理设施围栏高度1.2m，分散独立设施、一体化泵站围栏高度0.6m。靠近围栏门和道路一侧，在围栏上设置水环境保护宣传标语。

（三）进场道路

在一体化处理设施、泵站等位置离现状道路较远的站点，设置进场道路。进场道路可考虑采用8字型绿色植草砖，收边采用灰色pc砖，道路宽1.2m。

五、结语

江南平原河网地区经济较为发达，很多地方已实施过农村生活污水治理项目，甚至实施过多轮，但是总体效果不甚理想，这与农村环境复杂、边界影响因素变数多，建设期间头痛医头、脚痛医脚，缺乏顶层系统设计、建设管理不到位有关，也存在建成后运维养护缺失等问题。江南平原河网地区农村生活污水治理，应以“设施全覆盖、污水全收集、尾水全提标、监管全方位”为目标，按照“因地制宜，分类推进”的原则实施，借助智慧水务平台加强设施运营期间的养护，使农污治理设施真正发挥应有作用，守护一方水环境，为美丽乡村建设添砖加瓦。

参考文献

- [1] 金赵明. 关于农村生活污水治理存在的问题及未来发展规划的探讨 [J]. 环境保护与循环经济, 2023, (2): 70.
- [2] 王一萍. 基于乡村振兴发展战略的苏北农村人居环境整治现状及优化探析 [J]. 农村经济与科技, 2023, (3): 46.
- [3] 毛超杰. 南方某农村地区污水自排体系及分区处理工艺研究 [J]. 云南化工, 2023, (3): 102.
- [4] 陈辉熾. 农村生活污水治理工程设计研究 [J]. 科学技术创新, 2023, (3): 50.
- [5] Li Yongqiu. Practice and thinking of rural domestic sewage treatment design [J]. Municipal Technology, 2023, (3): 191.
- [6] 邓彩红. 农村水环境污染现状及对策 [J]. 市政技术, 2023, (1): 88.
- [7] 袁建伟. 长三角区域农村生活污水治理投建运经验与探讨 [J]. 长江技术经济, 2023, 7 (1): 82-86.
- [8] 邱国勤. 分散式农村生活污水治理技术的思考探究 [J]. 皮革制作与环保科技, 2023, (4): 90.
- [9] 崔昱, 朱砂砾, 王凯丽. 环巢湖治理项目——双桥河沿岸农村地区水环境治理工程设计研究 [J]. 中国市政工程, 2023, (1): 58.
- [10] 许珂, 蒋鹏, 郑美妹, 刘晓. 环境友好的农村污水治理网络优化设计 [J]. 工业工程, 2023, (1): 162.

生态流量调控与水工环系统协调机制

曹永贵

中国地质调查局军民融合地质调查中心, 四川 成都 610036

DOI:10.61369/EAE.2025030010

摘 要 : 本文聚焦生态流量调控与水工环系统协调机制, 分析了我国在该领域的现状与挑战, 同时指出存在跨部门协同不足、监测网络不完善、技术适应性待提升等问题。在此基础上构建了协调机制的总体框架与目标, 提出建立 “政府主导、部门协同、社会参与、科技支撑” 的多层次体系, 涵盖组织协调、目标协同、技术支撑、运行调控及监督反馈与评估等具体机制, 以实现生态流量与水工环系统的动态平衡和良性互动。从政策法规、资金投入、科技与人才等方面提出保障措施, 并给出分阶段推进、试点示范、宣传教育和国际合作等实施路径, 旨在为生态流量调控与水工环系统的长期协调发展提供支撑, 助力生态文明建设和高质量发展。

关 键 词 : 生态流量调控; 水工环系统; 协调机制; 管理体系

Ecological Flow Regulation and Coordination Mechanism of Hydro-Engineering-Environment System

Cao Yonggui

China Geological Survey Military-Civilian Integration Geological Survey Center, Chengdu, Sichuan 610036

Abstract : This paper focuses on the ecological flow regulation and coordination mechanism of the hydro-engineering-environment system, analyzing the current status and challenges in this field in China. It points out issues such as insufficient cross-departmental collaboration, an imperfect monitoring network, and the need for improved technological adaptability. On this basis, a general framework and objectives for the coordination mechanism are constructed, proposing the establishment of a multi-tiered system characterized by "government-led, departmental collaboration, social participation, and technological support." This system encompasses specific mechanisms for organizational coordination, goal alignment, technological support, operational regulation, as well as supervision, feedback, and assessment, aiming to achieve a dynamic balance and positive interaction between ecological flow and the hydro-engineering-environment system. Furthermore, safeguard measures are proposed in terms of policies and regulations, financial investment, technology, and talent. Implementation paths such as phased progression, pilot demonstrations, public education, and international cooperation are also suggested, with the aim of providing support for the long-term coordinated development of ecological flow regulation and the hydro-engineering-environment system, contributing to the construction of ecological civilization and high-quality development.

Keywords : ecological flow regulation; hydro-engineering-environment system; coordination mechanism; management system

引言

随着我国经济社会的快速发展, 水资源开发利用强度不断加大, 水利工程建设规模持续扩大, 水工环系统在支撑经济社会发展的同时, 也对河流生态流量产生了深刻影响。在此背景下, 如何实现生态流量调控与水工环系统的有效协调, 成为当前水资源管理与生态保护领域亟待解决的重大课题。深入分析我国生态流量调控与水工环系统协调的现状与挑战, 构建科学高效的协调机制, 对于优化水资源配置、维护水生态系统健康、推动生态文明建设和高质量发展具有重要的理论价值和现实意义。本文正是基于这一背景, 围绕生态流量调控与水工环系统协调机制展开研究, 旨在为破解二者协调难题提供思路与对策。

一、我国生态流量调控与水工环系统协调现状与挑战

（一）现行管理体系与政策框架分析

生态流量的合理配置及调控需要综合考虑流域水资源以及河流水生态敏感

目标生态需求状况，进行确定河流生态系统的生态目标流量需求配置。当前，

切实可行的途径方法是通过制定改善水生态目标生态流量需求为主导的水工建

筑物调度规程，来改善河流生态健康和生态目标生态流量保障需求问题，此即就

是生态调度模式的展开，生态调度，即就是在现行供水调度方式中加入河流生态

系统识别的生态保护目标^[1]。管理体系上，国务院水行政主管部门统筹全国河湖生态流量管理，其流域管理机构负责相关管理实施及指导，省级水行政主管部门承担本区域具体工作。生态环境、自然资源等部门负责管控指标确定，水行政、发改、能源等部门协同保障水工程生态流量泄放，各级河长湖长参与管理。政策框架方面，《中华人民共和国水法》《中华人民共和国长江保护法》《中华人民共和国黄河保护法》等明确了生态流量管控相关要求；2025年6月多部门联合印发的《河湖生态流量管理办法（试行）》，进一步明晰部门职责、规范管控指标程序，对泄放调度等作出全面规定。

（二）技术方法应用现状

生态流量确定技术形成了丰富方法体系，需综合多因素按标准规范确定管控指标，特殊河流可按需确定。实际中，水文分析法（如 Tennant 法、7Q10 法）、水力学法（如 R2Cross 法）、生物栖息地法应用较广，模型模拟法（如 SWAT 模型、MIKE 系列模型）可动态模拟预测^[2]。生态流量监测采用多种手段结合的体系，传统水文站、水位站实时监测流量、水位；遥感技术提供大范围水资源宏观数据；物联网技术实现监测数据自动采集、传输和存储，提升效率与准确性^[3]。生态流量调度技术将管控指标纳入流域水资源调度方案和计划，利用信息化技术统一调度配置，结合实时监测数据和模型预测，会商研判保障形势，优化调度方案。

（三）存在的主要问题与挑战

尽管我国在生态流量调控与水工环系统协调方面取得了一定进展，但仍面临诸多问题与挑战。管理协调上，跨部门协同不足，数据共享和沟通机制不畅，影响指标确定与调整效率；部分地区政策执行不力，水工程管理处未按要落实生态流量调度及泄放保障措施^[4]。技术层面，部分地区监测网络不完善，站点分布不均、数据精度不高，偏远地区和中河流设施落后，难满足精准监测需求；生态流量确定技术因适用条件和局限性，对复杂流域难确定最适流量；调度技术虽应用信息化手段，但应对极端气候或突发水资源变化时，方案灵活性和适应性待提升；相关协调研究不深入，缺乏对生态系统整体响应机制的系统认识，难实现深度融合与协同发展。

二、生态流量调控与水工环系统协调机制构建

（一）协调机制的总体框架与目标

协调机制以系统性和协同性为核心，构建“政府主导、部门协同、社会参与、科技支撑”的多层次体系^[5]。纵向明确各级管理主体责任，形成自上而下管理链条；横向加强多部门联动，建跨部门协作平台，实现信息共享等，同时引入多元主体形成共治格局。目标是实现生态流量调控与水工环系统动态平衡和良性互动，短期保障生态流量基本需求，维护水生生态稳定；中期优化水资源配置，提升调控科学性，促进生态与经济社会协调；长期构建可持续水生态系统，助力生态文明建设和高质量发展。

（二）组织协调机制

组织协调机制的关键是建立跨层级、跨部门机构，国家层面设协调领导小组，由国务院相关领导牵头，多部门负责人参与，负责统筹规划等；流域层面设协调委员会，由流域管理机构牵头，协调流域内各省及相关部门，解决跨区域问题^[6]。同时完善工作制度与流程，明确议事规则等，建立定期会商制度分析问题、制定方案，建立应急协调机制应对突发水生态事件；加强基层组织建设，在县级及以下设专职协调岗位，落实上级部署并协调本地工作。

（三）目标协同机制

目标协同机制旨在确保生态流量调控、水工环系统保护与经济社会发展目标的一致性。目标设定阶段，经多目标综合论证确定关键指标，再将总体目标分解为各部门、地区的具体目标，明确责任与时限。实施中建立动态监测评估机制，掌握目标实现情况；目标冲突时启动协调协商程序调整目标，保障整体目标达成。同时建立激励机制，表彰先进以调动积极性。

（四）技术支撑机制

技术支撑机制以科技创新为核心，为生态流量调控与水工环系统协调提供坚实的技术保障。加强生态流量确定、监测、调度等关键技术的研发与应用，鼓励科研机构、高校和企业开展联合攻关，突破现有技术瓶颈。建立技术标准体系，制定统一的生态流量确定方法、监测规范、调度规程等技术标准，确保技术应用的规范性和一致性^[7]。加强技术推广和培训，通过举办培训班、技术交流等形式，向基层管理部门和技术人员普及先进技术和方法，提高其技术应用能力。同时构建全国性的生态流量与水工环系统信息共享平台，整合各部门、各地区的监测数据、模型成果等信息资源，为决策提供数据支持和技术服务。

（五）运行调控机制

运行调控机制负责生态流量日常调度与水工环系统动态管理。将生态流量管控指标纳入流域水资源统一调度，制定方案优化配置，保障足额泄放；建立水工程联合调度机制，协调多水工程运行，实现多目标协同。加强水工环系统动态监测与维护，定期巡查评估并处理问题，如治理河道淤积、修复地下水超采区等；建立联动响应机制，在生态流量异常或水工环系统受损时，及时采取措施恢复生态稳定。

（六）监督反馈与评估机制

监督反馈与评估机制是协调机制有效运行的重要保障。建立政府、部门、社会及舆论全方位监督体系，各监督主体按职责开展检查、抽查或通过渠道鼓励公众参与监督。健全反馈机制，对

监督发现的问题梳理分析并形成报告，反馈责任单位督促限期整改^[8]。建立涵盖生态、经济、社会效益的评估指标体系，定期评估协调机制运行效果，评估结果作为政策调整、机制优化和考核奖惩的依据，以持续改进机制、提升协调水平。

三、协调机制实施的保障措施与路径

（一）政策法规保障

政策法规是协调机制实施的根本支撑，需完善相关法律法规体系，在现有法律基础上制定配套法规规章，明确具体要求、责任划分和处罚标准，确保有法可依。加强政策衔接协调，避免冲突或空白，相关部门制定政策时需考虑协调需求，保障政策一致连贯；并结合地区实际制定差异化措施^[9]。强化政策执行与监督，建立考核机制，将相关工作纳入绩效考核，对执行不力者问责；跟踪评估实施效果，及时调整完善政策。

（二）资金投入保障

资金投入是协调机制实施的重要物质基础，要建立多元化的资金投入机制，加大政府财政投入力度，将生态流量调控与水工环系统协调相关的项目和工作纳入各级财政预算，确保有稳定的资金来源。同时积极引导社会资本参与，通过 PPP 模式、政府购买服务等方式，吸引企业、社会组织等投入资金，参与生态流量监测、水工环系统修复等项目^[10]。优化资金使用结构，提高资金使用效益。加强对资金使用的统筹规划和管理，确保资金重点投向生态流量调控关键技术研发、监测网络建设、水工环系统保护与修复等领域。建立资金使用绩效评价机制，对资金使用情况跟踪评估，根据评价结果调整资金投向和使用方式，提高资金的使用效率。加强资金监管，确保资金安全规范使用。建立健全资金监管制度，加强对资金筹集、分配、使用等环节的监督检查，防止资金挪用、挤占和浪费。对资金使用过程中出现的违法违规行，要依法严肃查处，追究相关人员的责任。

（三）科技与人才保障

科技创新是推动协调机制实施的重要动力，人才是科技创新和机制实施的关键支撑。要加强生态流量调控与水工环系统协调相关的科技研发，设立重大科技专项，支持科研机构、高校和企业开展关键技术研究，如生态流量精准预测与调控技术、水工环系统动态监测与修复技术等，突破技术瓶颈，为协调机制实施提供技术支撑。加强科技成果转化与推广应用，建立科技成果转化平台，促进科研成果与实际应用的对接。鼓励企业参与科技成果转化，对成功转化的科技成果给予政策支持和奖励，加快科技成

果的产业化进程，提高协调机制实施的科技水平。加强人才培养与引进，建立健全人才培养体系，培养一批既懂生态流量调控又懂水工环系统管理的复合型人才。通过高校专业建设、在职培训、学术交流等方式，提高人才的专业素质和实践能力。同时制定优惠政策，引进国内外高端人才和先进技术，为协调机制实施提供人才保障。

（四）实施路径建议

分阶段推进协调机制实施，根据不同阶段的目标和任务，制定具体的实施计划。在初期阶段，重点做好基础工作，为协调机制的全面实施奠定基础。在中期阶段，全面推行协调机制，加强各部门之间的协同合作，优化生态流量调度，加大水工环系统保护与修复力度。在后期阶段，对协调机制实施效果进行评估和总结，不断完善机制，实现生态流量调控与水工环系统的长期协调发展。加强试点示范，选择具有代表性的流域或地区开展协调机制实施试点工作，探索适合不同区域特点的实施模式和经验。在试点过程中，及时总结成功经验和存在的问题，为在全国范围内推广实施提供借鉴。通过试点示范，以点带面，逐步推动协调机制在全国范围内的广泛应用。强化宣传教育，提高全社会对生态流量调控与水工环系统协调重要性的认识。通过媒体宣传、科普教育、公众参与等方式，普及相关知识和政策，增强公众的生态环境保护意识，引导社会各界积极参与到协调机制实施工作中来，形成全社会共同推动的良好氛围。加强国际合作与交流，学习借鉴国外先进的经验和技，积极参与国际生态流量调控与水工环系统管理相关的合作项目和学术交流活动，提升我国在该领域的国际影响力和竞争力，推动协调机制的不断完善和发展。

四、结束语

本文通过对我国当前生态流量调控与水工环系统协调的现状分析，梳理了管理体系、技术应用中取得的进展，也指出了跨部门协同不足、技术适应性有限、机制不完善等突出挑战，并在此基础上构建了包含组织协调、目标协同、技术支撑、运行调控、监督反馈与评估在内的多层次协调机制，提出了政策法规、资金投入、科技人才等保障措施及分阶段实施路径。这些研究成果旨在为破解二者协调难题提供系统性思路，实现生态流量与水工环系统的动态平衡，让河流永葆生机，为子孙后代留下天蓝、地绿、水清的美好家园，为全球水资源管理与生态保护贡献中国智慧与中国方案。

参考文献

- [1] 党晓戈.多闸坝河流分段分类生态流量调控研究[D].河北工程大学,2021.DOI:10.27104/d.cnki.ghbjy.2021.000388.
- [2] 顾晓伟,章蕾,刘京京,等.小水电站生态流量自动调控系统标准化建设的思考与建议[C]//中国水利学会,西安理工大学.2024中国水利学术大会论文集(第七分册).水利部产品质量标准研究所;,2024:77-79.DOI:10.26914/c.cnkihy.2024.070068.
- [3] 吕静.水库调度运行对下游河道生态流量的影响及调控技术研究[J].水上安全,2024,(14):85-87.
- [4] 曹阳.沙颍河生态流量过程计算及模拟调控研究[D].郑州大学,2022.DOI:10.27466/d.cnki.gzzdu.2022.000456.
- [5] 轩玮,李卢伟.生态流量调控与水资源保障集成技术——算好“生态水账”复苏美丽白洋淀[J].中国水利,2021,(15):16-21.
- [6] 王鹏,华祖林,褚坚坚,等.高度城镇化地区河网水系生态调控方案[J].水资源保护,2022,38(01):205-212.
- [7] 孟立志.水工环地质信息网络系统建设研究[J].城市建设理论研究(电子版),2016,(9):1805-1805.
- [8] 王新贺.水工环地质调查在生态建设中的重要性[C]//2018地球科学与文化研讨会论文集.2018:204-208.
- [9] 吕相伟,刘垚.基于智能遥感识别的矿山水工环灾害数据采集系统[J].世界有色金属,2021,(7):26-27.DOI:10.3969/j.issn.1002-5065.2021.07.013.
- [10] 张郝哲,罗少勇,张学军等.水工环地质信息网络系统建设研究[J].城市建设理论研究(电子版),2015,5(13):286-287.

人工智能在环境监测中的应用现状及发展趋势

郭媛媛

上海摩特威尔环境科技股份有限公司，上海 201602

DOI:10.61369/EAE.2025030011

摘 要： 随着生态环境保护需求的升级与人工智能技术的迭代，环境监测领域正经历从传统模式向智能化转型的关键阶段。人工智能凭借数据处理、模式识别与预测分析的技术优势，在环境监测的感知、分析、决策环节实现了突破性应用。本文通过剖析人工智能在环境监测领域的应用现状、核心优势及未来面临的挑战，并对其发展趋势展开前瞻性探究。旨在为人工智能与环境监测的深度融合提供参考，推动环境监测技术体系的现代化演进。

关 键 词： 人工智能；环境监测；智能感知；现代化监测体系

The Current Application Status and Development Trend of Artificial Intelligence In Environmental Monitoring

Guo Yuanyuan

Shanghai Mortwell Environmental Technology Co., Ltd., Shanghai 201602

Abstract： With the upgrading of ecological environmental protection needs and the iteration of artificial intelligence technology, the field of environmental monitoring is experiencing a critical stage of transformation from traditional models to intelligent ones. Relying on its technological advantages in data processing, pattern recognition and predictive analysis, artificial intelligence has achieved breakthrough applications in the perception, analysis and decision-making links of environmental monitoring. This paper explores the application status, core advantages, future challenges of artificial intelligence in the field of environmental monitoring, and conducts a forward-looking study on its development trends. It aims to provide a reference for the in-depth integration of artificial intelligence and environmental monitoring, and promote the modernization of the environmental monitoring technology system.

Keywords： artificial intelligence (AI); environmental monitoring; intelligent perception; modern monitoring system

引言

环境监测作为生态环境管理的基础支撑，需要识别可能对生态系统或公众健康有害的任何变化，因此，其技术水平直接决定了对环境质量的认知深度与管控效能^[1]。传统的环境监测技术包括统计分析、实验室分析和手动采样，这些方法存在成本高、程序繁琐和准确性差等局限性，已经无法满足当前日益复杂的环境状况。

近年来，人工智能技术的快速发展为环境监测突破瓶颈提供了新范式。其通过机器学习、深度学习等算法与传感器、遥感等技术的结合，实现了监测数据的智能采集、动态分析与前瞻预测，推动环境监测向“全域感知、精准解析、主动防控”转型。例如，江苏省水文水资源勘测局宿迁分局，通过引入人工智能技术，对河流进行远程感知与智能分析，实现了对水流的实时监测与精准预测，有效提升了水文状况预警的及时性和准确性^[2]。本文聚焦人工智能在环境监测领域的技术应用逻辑，梳理其在感知、分析、决策环节的具体实践；通过从技术赋能角度总结其对监测体系的优化作用；进而识别应用中存在的技术与非技术障碍；最后结合学科交叉趋势提出发展方向，为完善智能化监测技术体系提供思路。

一、人工智能在环境监测中的应用现状

人工智能在环境监测中的应用已形成“数据输入—处理分析—输出应用”的完整技术链条，其核心是通过算法模型对环境信

息进行深度挖掘与价值转化。

（一）智能感知与数据采集：技术融合下的监测网络升级

在环境监测的前端感知环节，人工智能与传感器技术紧密结合，构建起智能传感器网络。高精度传感器能够实时、海量地采

作者简介：郭媛媛（1996.12-），女，汉族，山西介休人，硕士研究生，助理工程师，研究方向：环境工程。

集环境中的各类参数，如大气中的温度、湿度、PM2.5 浓度、二氧化硫等污染物浓度，水体中的酸碱度、溶解氧、化学需氧量等水质指标，以及土壤中的重金属含量、养分含量等。例如，中国检验检疫科学研究院与杭州富集生物科技有限公司利用智能传感器技术可快速监测多项空气健康指标，能24小时在线监控并智能化处理，通过机器学习算法对传感器数据进行训练，使其能够自动识别并修正因传感器故障、外界干扰等因素导致的错误数据，确保了监测数据的真实性和准确性。顾雪冬等^[3]研究设计了智能感知与预测预警系统，能够实时监测水质状况以及预警潜在风险，并且通过测评验证了其监测数据的准确性和及时性。Boateng, D 等将先进的机器学习 (ML) 算法集成到柔性水凝胶传感技术中，以增强其数据处理能力并实现智能感知。无人机与卫星图像技术在环境监测中的应用也离不开人工智能的支持^[4]。无人机搭载高分辨率摄像头、多光谱传感器等设备，能够深入到复杂地形区域，进行低空、近距离的环境数据采集与图像拍摄。卫星则凭借其广阔的覆盖范围，实现对全球环境的宏观监测。人工智能图像识别算法可对无人机与卫星获取的图像进行快速分析，识别出森林覆盖变化、水体污染范围、土地利用类型变更等环境信息。例如，冯烈等学者通过夜间微光遥感与多光谱反演结合，精确地了解城市夜间光谱的特征和分布情况^[5]；周颖等通过比较远海 PPK 潮位测量技术与常规水位计潮位测量方法，验证了前者相关计算的准确性、精度和稳定性，分析表明其用于计算深度基准面等的精度满足要求，为确定深度基准面提供了可行方案^[6]。

（二）数据分析与处理：算法驱动的信息挖掘

环境监测过程中生成的海量数据承载着丰富的环境表征信息，但传统的数据处理范式在处理此类大规模、高维度且结构复杂的数据集时，其效能往往难以充分发挥。以东北地区平原型城市——吉林省白城市为例，利用机器学习构建空气质量重度污染预测模型，进一步加强了空气的日常管理。深度学习技术在环境监测数据处理中的应用日益广泛^[7]，尤其是，递归神经网络（RNN）及其派生的长短期记忆网络（LSTM）[16]，在时序性环境数据的处理任务中呈现出卓越效能。例如，利用 LSTM 网络对河流断面的水质数据进行建模，能够有效捕捉水质指标随时间的变化趋势，提前预测水质恶化风险，为水资源管理与污染防控提供及时预警。

（三）污染溯源与风险评估

准确追溯污染源是环境治理的关键环节。人工智能结合传感器网络、地理信息系统（GIS）等技术^[8]，能够实现对环境污染源的快速定位与精准识别。例如，通过分析大气污染物在不同监测站点的浓度分布、时空变化特征，利用反演算法和机器学习模型，逆向推导污染源的位置与排放强度。在水质污染源方面，基于水流模型与水质监测数据，运用人工智能算法模拟污染物在水体中的扩散路径，确定污染源的具体位置。在风险评估方面，人工智能通过对大量环境数据、社会经济数据以及历史灾害数据的综合分析，评估气候变化、环境污染等对人类生活和经济发展的潜在影响^[9]。例如，利用人工智能模型预测海平面上升对沿海地区的淹没风险，评估极端天气事件引发的洪涝、干旱等灾害对

生态系统和农业生产的破坏程度，为政府和企业制定科学的风险应对策略提供依据。

二、人工智能赋能环境监测的优势

相较于传统监测模式，人工智能技术通过重构数据处理逻辑与监测流程，展现出三方面显著优势。

（一）提升了监测的准确性与及时性

传统环境监测手段受限于人工操作、设备精度等因素，在数据采集与分析过程中容易出现误差与滞后。人工智能技术能够实时处理大量监测数据，通过对数据的深度学习与分析，及时发现环境参数的异常变化，准确识别环境问题。智能传感器网络可实现对环境的24小时不间断监测，一旦环境指标超出正常阈值，系统能够迅速发出预警，相比人工巡检与传统监测设备，大大提高了监测的及时性，为环境突发事件的应急响应争取宝贵时间^[10]。

（二）增强了监测的全面性与精细化

人工智能技术使得环境监测能够覆盖更广泛的区域与更多的环境要素。卫星与无人机监测借助人工智能图像识别技术，可对大面积的森林、草原、海洋等生态系统进行宏观监测，同时也能对城市中的微小污染源进行精细化识别。在水质监测中，通过对水体中多种污染物指标的综合分析，人工智能模型能够精准判断水体的污染类型与程度，实现对水环境的全面、精细化监测，为制定针对性的污染治理措施提供详细依据^[11]。

（三）降低了监测成本并提升工作效能

人工智能实现了环境数据的自动采集、处理与分析，减少了对大量人工的依赖，降低了人力成本。同时，智能化监测设备的维护与管理成本相对较低，且能够通过自我诊断与修复机制，减少设备故障时间，提高监测系统的运行效率。此外，人工智能算法能够快速处理海量数据，相比传统的数据处理方法，大大缩短了数据处理周期，提高了监测结果的产出效率，使得环境监测工作更加高效、经济。

三、人工智能在环境监测应用中面临的挑战

人工智能在环境监测中的深度落地仍面临技术适配性与系统支撑性两方面瓶颈。

（一）数据质量与安全问题

环境监测数据的质量直接影响人工智能分析结果的准确性。然而，在实际监测过程中，由于传感器故障、数据传输中断、人为干扰等因素，监测数据可能存在缺失、错误、异常值等问题。此外，环境监测数据涉及国家生态安全、公共利益等重要信息，数据安全至关重要。人工智能系统在数据存储、传输与处理过程中，面临着数据泄露、篡改等安全风险，如何保障数据质量与安全是人工智能在环境监测应用中亟待解决的问题。

（二）技术模型的适应性与可解释性

不同地区的环境特征、监测需求存在差异，现有的人工智能技术模型在应用过程中可能需要进行大量的本地化调整与优化，

以适应不同的监测场景。同时，许多人工智能模型，尤其是深度学习模型，具有较高的复杂性，其决策过程往往被视为“黑箱”，缺乏可解释性。在环境监测领域，对于一些关键的监测结果与决策，需要明确模型的推理依据与可靠性，如何提高技术模型的适应性与可解释性，增强用户对人工智能监测结果的信任度，是当前面临的重要挑战之一^[12]。

（三）专业人才短缺

人工智能在环境监测中的应用需要既懂环境科学知识又掌握人工智能技术的复合型专业人才。目前，我国在这方面的专业人才储备相对不足，传统环境监测领域的从业人员对人工智能技术的掌握程度有限，而人工智能领域的专业人员对环境监测业务的了解不够深入，人才短缺在一定程度上制约了人工智能技术在环境监测领域的广泛应用与深度发展^[13]。

四、人工智能在环境监测领域的发展趋势

针对上述挑战，未来发展需围绕技术融合、模型优化与人才培育形成协同推进路径。

（一）多技术融合与协同发展

未来，人工智能将与物联网、大数据、区块链、云计算等技术实现更深层次的融合，通过协同作用助推环境监测向智能化方向持续发展。物联网技术将实现更广泛、更全面的环境感知设备互联互通，为人工智能提供海量、实时的监测数据；大数据技术

为人工智能数据处理与分析提供强大的数据存储与管理能力；区块链技术可确保监测数据的真实性、不可篡改与可追溯性；云计算技术为人工智能模型的训练与运行提供强大的计算资源支持。通过多技术融合，构建更加完善、高效的智能化环境监测体系。

（二）模型优化与创新发展

随着人工智能技术的不断发展，针对环境监测领域的模型优化与创新将持续推进。一方面，现有的人工智能模型将不断优化，提高模型的准确性、适应性与可解释性。例如，开发可解释的深度学习模型，通过可视化技术展示模型的决策过程与关键特征，增强用户对模型结果的理解与信任。另一方面，新的人工智能算法与模型将不断涌现，以满足环境监测领域日益复杂的监测需求。如基于强化学习的环境监测决策模型，能够根据实时监测数据自动调整监测策略，实现更高效的环境监测与管理。

五、结论

人工智能技术为环境监测的现代化转型提供了核心驱动力，其在智能感知、数据解析、决策支持等环节的应用，显著提升了监测的精准性、时效性与系统性。尽管面临数据质量、模型适配、人才短缺等挑战，但通过多技术融合、算法创新与人才培育的持续推进，人工智能将进一步突破应用瓶颈，为构建高效、智能的生态环境监测体系提供关键技术支撑，推动环境监测学科向更高精度、更广维度发展。

参考文献

- [1] 张耀. 新兴环境监测技术在水质污染检测中的应用与前景 [J]. 中国轮胎资源综合利用, 2025(03): 77-79.
- [2] 黄诗淇, 叶文. 从蹲点监测到“无人值守” [N]. 中国水利报, 2022-08-11(008).
- [3] 顾雪冬, 赵倩. 水环境污染的智能感知与预测预警系统研究 [J]. 信息系统工程, 2025(04): 16-19.
- [4] 冯学智. 高空间分辨率卫星图像分割的新型技术研究. 江苏省, 南京大学, 2012-05-20.
- [5] 冯烈. 基于微光夜间遥感的城市光环境立体观测与多光谱反演研究 [J]. 硕士. 2024.
- [6] 周颖, 王瑞. 远海 PPK 测量潮位用于深度基准面计算的研究 [J]. 港工技术, 2022, 59(02): 23-26.
- [7] 沈宁. 基于数据驱动的智能电网光伏能源预测方法研究 [J]. 能源与环保, 2024, 46(11): 193-197+204.
- [8] 刘宇欣. 森林防火地理信息系统的构建与应用 [J]. 造纸装备及材料, 2025, 54(01): 96-98.
- [9] 盘红玉. 地理信息系统在洪涝灾害防治中的应用 [J]. 西部探矿工程, 2025, 37(04): 111-113.
- [10] 唐思捷, 姜继平, 邱勇, 等. 人工智能赋能城市水环境管理的技术路径探讨 [J]. 中国给水排水, 2024, 40(16): 8-17.
- [11] 李艳琴. 人工智能技术在水污染治理领域的应用研究 [J]. 皮革制作与环保科技, 2023, 4(15): 112-114.
- [12] 杨香传, 曹真子. 大数据分析在环境监测中的应用与挑战 [J]. 智慧中国, 2025(05): 114-115.
- [13] 倪优, 许向勇, 袁铭章, 等. 无人机在环境监测中的创新应用与前景展望 [J]. 中国资源综合利用, 2025, 43(04): 149-151.

生态修复与生态环境保护的协同机制及 长效管理模式研究

赵春瑞

吉林市生态环境保护综合行政执法支队, 吉林 吉林 132000

DOI:10.61369/EAE.2025030012

摘 要 : 本文聚焦生态修复与生态环境保护的协同机制及长效管理模式研究,二者辩证统一、相互依存,协同具有极强必要性与紧迫性。协同机制以“系统治理”为核心,涵盖目标、主体、要素、过程四维度,分别通过建立一体化战略目标体系、构建多元共治格局、统筹生态要素治理、实施全周期闭环管理实现协同。长效管理以“生态优先、系统治理、持续发展、共建共享”为核心理念,遵循多项原则,其模式由组织架构、制度体系、资金保障、技术支撑和公众参与五部分构成,并通过动态评估与适应性调整的运行机制保障有效运转,最终旨在推动生态系统稳定与可持续发展。

关 键 词 : 生态修复; 生态环境保护; 协同机制; 长效管理

Research on the Collaborative Mechanism and Long-Term Management Model for Ecological Restoration and Ecological Environment Protection

Zhao Chunrui

Jilin City Comprehensive Administrative Law Enforcement Detachment for Ecological Environment Protection,
Jilin, Jilin 132000

Abstract : This paper focuses on the research of the collaborative mechanism and long-term management model for ecological restoration and ecological environment protection. These two aspects are dialectically unified and interdependent, with strong necessity and urgency for collaboration. The collaborative mechanism takes "systematic governance" as its core, covering four dimensions: objectives, subjects, elements, and processes. It achieves collaboration by establishing an integrated strategic objective system, constructing a multi-stakeholder governance pattern, coordinating the management of ecological elements, and implementing full-cycle closed-loop management. The long-term management model adheres to the core principles of "ecological priority, systematic governance, sustainable development, and co-construction and sharing," following multiple principles. Its model consists of five parts: organizational structure, institutional system, financial support, technical support, and public participation. It ensures effective operation through a dynamic evaluation and adaptive adjustment mechanism, ultimately aiming to promote ecosystem stability and sustainable development.

Keywords : ecological restoration; ecological environment protection; collaborative mechanism; long-term management

引言

生态修复与生态环境保护作为应对生态危机的两大核心手段,其各自的作用已得到广泛认可,但单一的修复或保护措施难以应对复杂多变的生态挑战。如何实现生态修复与生态环境保护的有效协同,构建科学高效的长效管理模式,成为当前生态治理领域亟待解决的关键课题。深入探究二者的内在逻辑与协同必要性,构建完善的协同机制,设计切实可行的长效管理模式,对于提升生态系统质量和稳定性、保障生态安全、推动人与自然和谐共生具有重要的理论价值和现实意义。

一、生态修复与生态环境保护的内在逻辑与协同必要性分析

（一）二者的辩证统一关系

为了维护区域生态安全，解决生态系统问题，改善和提升生态系统服务和质量，需要自然或者人为干预开展生态修复与保护，各级管理者积极进行生态修复与保护重点区域识别，修复受损和退化的生态系统，同时保护高质量的生态空间^[1]。生态修复与生态环境保护辩证统一、相互依存，共同助力生态系统稳定与可持续发展。生态环境保护侧重预防破坏，通过法规、管控等“防患于未然”，如建自然保护区、限排污；生态修复针对已受损系统，以工程和生物措施“亡羊补牢”，如草原补种、河流净化^[2]。前者是后者的基础，缺之则修复成果难存；后者为前者提供支撑，可增强生态系统稳定性与服务功能。二者目标一致，均为实现生态健康及人与自然和谐共生。

（二）协同的必要性与紧迫性

当前生态环境问题日益严峻，单一的生态修复或生态环境保护措施已难以应对复杂的生态挑战，二者的协同具有极强的必要性与紧迫性^[3]。从必要性看，生态系统是有机整体，某区域破坏可能引发连锁反应，仅修复受损区域而不注重周边保护，成果难存，如河流治理需控上游污染与修下游水质并举；修复需以环保为导向防新破坏，环保也需修复补充以改善恶化状况。从紧迫性看，全球生态问题加剧，我国部分地区生态仍脆弱，若不及时协同治理，问题将恶化，威胁当代及后代；社会经济发展加大生态承载压力，协同二者能提高治理效率，加快生态恢复，为可持续发展提供生态基础。

二、生态修复与生态环境保护协同机制的构建

（一）协同机制的总体框架

生态修复与生态环境保护协同机制的总体框架，是以“系统治理”为核心，遵循“战略同向、主体联动、要素统筹、过程闭环”原则，涵盖目标、主体、要素、过程四维度的有机系统^[4]。结构上，以目标协同引领方向，主体协同整合多元力量形成共治格局，要素协同打破治理壁垒实现整体保护修复，过程协同贯穿全周期管理保障成效。其核心逻辑是通过目标、主体、要素、过程的协同，实现二者深度融合，推动生态系统良性循环。

（二）目标协同机制：实现“修复—保护”的战略同向

目标协同是生态修复与生态环境保护协同的前提，核心是建立“修复—保护”一体化战略目标体系，通过顶层设计明确优先级、关联性和阶段性任务^[5]。目标设定为“总目标—分目标—具体指标”三级体系，总目标是提升生态系统质量和稳定性、实现人与自然和谐共生；分目标细化修复与保护侧重，各有具体内容；具体指标进一步量化分目标。为保障落地，建立目标联动调整机制，定期评估并动态优化目标优先级，还通过跨区域、跨部门目标对接避免矛盾，实现协同。

（三）主体协同机制：构建多元共治的治理格局

生态修复与生态环境保护涉及范围广、利益关系复杂，单一主体难以承担全部治理责任，必须构建多元共治的主体协同机制，明确各主体的权责边界，形成“各尽其责、协同发力”的治

理网络^[6]。政府主导统筹规划、制定政策与监督执法，纵向联动中央与地方，横向打破部门壁垒；企业要履行生态责任，落实保护措施、承担修复义务，还可借技术创新参与修复；社会组织和公众作为补充，环保 NGO 参与相关工作，科研机构提供技术支持，公众通过多种方式参与，且有信息公开机制保障其权益。

（四）要素协同机制：促进“山水林田湖草沙”的系统联动

要素协同机制旨在打破单一要素治理局限，按“系统保护、整体修复”思路统筹“山水林田湖草沙”等生态要素治理^[7]。空间上，基于生态整体性和连通性划定“三线”，统一管控生态空间，如流域治理统筹山林、湿地、农田等；措施上，推动修复与保护措施协同适配，如沙漠化治理兼顾植被修复与水源保护，矿山修复同步处理地表植被与水土污染；还建立要素间生态补偿机制，以经济杠杆调节利益关系，激励协同治理。

（五）过程协同机制：贯穿“事前—事中—事后”的全周期管理

生态修复与环境保护的协同需要覆盖治理的全流程，通过事前预防、事中管控、事后评估的闭环管理，确保协同行动的科学性和有效性，避免“重修复轻保护”“重投入轻效果”等问题^[8]。事前开展生态调查与风险评估，建立项目审批联动机制；事中强化过程监督与动态调整，搭建跨部门信息共享平台；事后注重效果联合评估与长效维护。以此形成良性循环，保障协同治理的持续性和有效性。

三、生态修复与生态环境保护长效管理模式的设计

（一）长效管理的核心理念与基本原则

长效管理以“生态优先、系统治理、持续发展、共建共享”为核心理念，遵循科学性、持续性、适应性、权责明晰、协同性原则。“生态优先”强调将生态系统的健康和稳定置于首位；“系统治理”要求将生态修复与生态环境保护作为一个有机整体；“持续发展”注重管理措施的长期性和稳定性；“共建共享”则突出多元主体的协同参与^[9]。长效管理需遵循多项基本原则，科学性原则要求以生态学、环境科学等理论为指导，基于生态系统的自身规律和演变特征制定管理措施，确保管理决策和行动符合生态系统的客观实际；持续性原则强调建立稳定的资金投入机制、人员保障机制和制度约束机制，确保管理工作能够长期开展；适应性原则指出，由于生态系统处于不断变化之中，外界环境也会对其产生影响，因此长效管理模式必须具备一定的灵活性和适应性；权责明晰原则要求明确政府、企业、社会组织和公众在长效管理中的权利和责任，避免出现管理真空或推诿扯皮现象，政府负责统筹协调、监督执法，企业承担因自身活动导致的生态破坏的修复和长期管护责任；协同性原则则强调加强生态修复与生态环境保护管理工作的内部协同以及与其他相关领域的外部协同，形成管理合力。

（二）长效管理模式的具体构成

长效管理模式是一个由多个相互关联、相互支撑的部分组成的有机整体，具体包括组织架构、制度体系、资金保障、技术支

撑和公众参与五个方面。在组织架构方面,构建“统一领导、分级负责、部门协同、属地管理”体系,成立由政府主要领导牵头的领导小组,负责统筹协调重大问题、制定中长期规划,其下设办公室负责日常工作的组织实施与督促检查^[10]。制度体系需健全完整规范,其中法律法规制度完善相关内容以确保有法可依,规划制度编制各类规划并明确目标、任务和措施,监测评估制度建立监测网络且定期评估,考核问责制度将工作纳入绩效考核并明确奖惩与问责,管护制度则针对不同区域制定管护细则。资金保障需多元化且稳定,财政投入将资金纳入预算并逐年增加,中央对重点区域给予转移支付,同时完善生态补偿机制以引导受益地区提供资金,通过多种方式引入社会资本,还需建立资金监管制度确保专款专用。技术支撑方面要加强技术研发与应用,监测技术推广先进技术并建立智能化监测网络,修复技术研发推广关键技术并形成适配技术方案,管理技术运用信息技术建立信息平台,同时加强专业人才培养以提升从业人员水平,定期公开信息保障公众知情权。公众参与着重保障公众参与权,在决策过程中广泛征求公众意见,建立监督举报机制鼓励举报并处理线索,支持引导公众开展志愿服务且建立激励机制。

（三）长效管理的运行机制：动态评估与适应性调整

长效管理的运行机制是保障管理模式有效运转的核心,其中动态评估与适应性调整是关键环节。动态评估机制是对生态修复效果、生态环境保护状况以及长效管理措施的实施效果进行定期、系统的评估,为适应性调整提供依据。评估指标体系需要构建科学、全面的内容,涵盖生态系统结构、生态功能、环境质量以及管理措施等方面,指标的设置应具有可操作性、可量化和针对性,根据不同区域的生态特点和管理目标进行调整。评估周期与主体的确定需根据生态系统的演变速度和管理工作的需要,对于生态脆弱区、重点修复区,评估周期可适当缩短,对于生态状况稳定的区域,评估周期可适当延长,评估主体可由政府部门、科研机构、社会组织等共同组成,确保评估结果的客观性和权威性。评估方法与流程采用实地监测、数据分析、模型模拟、专家论证等多种评估方法相结合的方式,提高评估的科学性和准确性,评估流程包括数据收集与整理、指标计算与分析、综合评价、结果反馈等环节,在数据收集过程中,充分利用生态环境监

测网络的实时数据和历史数据,确保数据的真实性和完整性。适应性调整机制是根据动态评估的结果,对长效管理目标、措施、制度等进行及时、合理的调整,以应对生态系统的变化和管理工作中出现的问题。目标调整方面,当评估结果显示生态系统的演变趋势与原定管理目标出现偏差时,或因外部环境变化导致原目标不再适用时,应对管理目标进行适当调整,调整后的目标应更加符合生态系统的实际情况和可持续发展的要求,并通过科学论证和公众参与确定。措施调整需要根据评估结果,对生态修复措施、环境保护措施、资金投入方式、技术应用等进行优化和调整,例如若评估发现某一区域的植被修复效果不佳,可能是由于物种选择不当或管护措施不到位,应及时更换适宜的物种或加强管护。若发现资金使用效率低下,应调整资金分配方式,提高资金的使用效益。制度完善要求当评估发现现有制度存在漏洞或执行不力时,及时修订和完善相关制度。反馈与应用机制的建立,需要将评估结果及时反馈给相关管理部门和决策机构,并作为调整管理策略、考核管理绩效、分配管理资源的重要依据,同时将评估结果向社会公开,接受公众监督,提高管理工作的透明度和公信力。通过动态评估与适应性调整的良性互动,长效管理模式能够不断适应生态系统的变化和管理需求,确保生态修复与生态环境保护工作始终沿着正确的方向推进,实现生态系统的长期稳定和可持续发展。

四、结束语

生态修复与生态环境保护并非孤立存在,二者的辩证统一关系决定了协同推进的必然性。本文通过对二者内在逻辑与协同必要性的分析,构建了涵盖目标、主体、要素、过程四个维度的协同机制,同时设计了以“生态优先、系统治理、持续发展、共建共享”为核心理念的长效管理模式。这些研究成果为破解当前复杂的生态环境问题提供了思路与框架,有助于提升生态治理的科学性和有效性。然而生态系统的复杂性和动态性决定了生态修复与环境保护的协同及长效管理是一项长期而艰巨的任务,未来还需在实践中不断完善机制、优化模式,结合不同区域的生态特点进行针对性探索。

参考文献

- [1]王文静, 遂非, 欧阳志云等. 国土空间生态修复与保护空间识别——以北京市为例[J]. 生态学报, 2022, 42(6): 2074–2085. DOI: 10.5846/stxb202103150692.
- [2]秦立公, 胡娇, 朱可等. 广西喀斯特湿地价值评价及生态修复与保护模式研究[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(8): 284–288. DOI: 10.15889/j.issn.1002-1302.2019.08.065.
- [3]霍庭秀, 霍亮. 黄河流域乌梁素海生态修复与保护的实践[C].//2021第九届中国水生态大会论文集. 2021: 1–4.
- [4]庞红霞. 可持续发展理念下林业生态修复与保护的发展路径研究[J]. 造纸装备及材料, 2024, 53(5): 113–115. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3066.2024.05.038.
- [5]杜宏伟, 马月林. 对渭河流域生态修复与保护的建议——以山西省忻州市为例[J]. 中国水利, 2016, (11): 42–45.
- [6]宇润练. 晋祠泉域水生态修复与保护方案[J]. 山西水土保持科技, 2022, (4): 23–26, 56. DOI: 10.3969/j.issn.1008-0120.2022.04.007.
- [7]张毅. 浅谈大同市御河流域生态修复与保护项目（南环桥~京大高速桥段）景观设计[J]. 建材与装饰, 2016, (24): 46–46, 47.
- [8]施长国. 西藏林芝高原景观生态修复与保护的研究[J]. 花卉, 2024, (22): 184–186. DOI: 10.3969/j.issn.1005-7897.2024.22.062.
- [9]柴向斌. 汾河流域生态修复与保护治理存在的问题及建议[J]. 山西水利, 2019, 35(9): 29–30. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7042.2019.09.018.
- [10]胡洋洋. 青藏高原脆弱生态修复与保护研究——以高寒草地为例[J]. 农业技术与装备, 2020, (5): 73–74. DOI: 10.3969/j.issn.1673-887X.2020.05.033.

双碳目标下能源行业安全与低碳协同发展模式研究

卓子博, 孙国强, 刘鹏

济南和鉴信成技术服务有限公司, 山东 济南 250000

DOI:10.61369/EAE.2025030013

摘 要 : 本文聚焦于双碳目标下能源行业安全与低碳协同发展模式展开深入研究。在阐述双碳目标对能源行业提出新要求的基础上, 分析能源行业安全与低碳发展的内在联系。从能源生产、传输、消费等环节入手, 探讨实现安全与低碳协同发展的具体路径, 包括技术创新、管理优化等方面。旨在为能源行业在双碳目标下构建科学合理的协同发展模式提供理论支持与实践参考, 推动能源行业在保障安全的前提下实现低碳转型, 促进经济社会的可持续发展。

关 键 词 : 双碳目标; 能源行业; 安全生产; 协同发展

Study on the Coordinated Development Mode of Energy Industry Security and Low Carbon under the Dual Carbon Target

Zhuo Zibo, Sun Guoqiang, Liu Peng

Jinan Hejian Xincheng Technical Services Co., Ltd., Jinan, Shandong 250000

Abstract : This paper conducts an in-depth study on the collaborative development model of energy industry safety and low-carbon transition under the dual carbon goals. After elaborating on the new requirements imposed by the dual carbon targets on the energy sector, it analyzes the intrinsic connection between energy industry safety and low-carbon development. Starting from the production, transmission, and consumption phases of energy, this research explores specific pathways for achieving coordinated development in safety and low-carbon aspects, including technological innovation and management optimization. The aim is to provide theoretical support and practical references for establishing scientifically sound collaborative development models within the energy industry under the dual carbon framework. This initiative seeks to facilitate the energy sector's low-carbon transition while ensuring safety, thereby promoting sustainable socio-economic development.

Keywords : dual carbon target; energy industry; production safety; coordinated development

引言

在全球气候变化的大背景下, 我国提出碳达峰、碳中和的双碳目标, 这对能源行业产生了深远影响。能源行业作为碳排放的主要源头, 其发展模式亟待转型。然而, 能源行业的特殊性决定了在追求低碳发展的同时, 必须高度重视安全生产。安全是能源行业发展的基石, 低碳是能源行业发展的方向, 如何实现安全与低碳的协同发展, 成为当前能源行业面临的重要课题^[1]。

一、双碳目标对能源行业的新要求

(一) 能源结构调整要求

双碳目标要求能源行业加快能源结构调整, 逐步降低对传统化石能源的依赖, 提高清洁能源的比重。这意味着能源行业需要加大对太阳能、风能、水能、生物能等可再生能源的开发与利用力度, 减少煤炭、石油等高碳能源的使用。能源结构的调整将改变能源行业的生产与供应格局, 对能源企业的技术、设备和管理

提出了新的挑战^[2]。

(二) 能源效率提升要求

提高能源利用效率是实现双碳目标的重要途径。能源行业需要在生产、传输、消费等各个环节采取有效措施, 降低能源损耗, 提高能源的综合利用效率。例如, 在能源生产环节, 采用先进的开采技术和设备, 提高能源的采收率^[3]; 在能源传输环节, 优化电网、油气管网等基础设施, 减少能源传输过程中的损耗; 在能源消费环节, 推广节能技术和产品, 引导用户合理用能。

（三）碳排放控制要求

双碳目标明确了碳排放的总量和时间节点，能源行业作为碳排放大户，必须严格控制碳排放。这要求能源企业加强碳排放管理，建立碳排放监测、报告和核查体系，制定科学的减排目标和措施。同时，积极探索碳捕集、利用与封存（CCUS）等新技术，降低能源生产过程中的碳排放强度。

二、能源行业安全与低碳发展的内在联系

（一）安全是低碳发展的前提

能源行业的安全生产直接关系到能源供应的稳定性和可靠性。如果能源生产过程中发生安全事故，不仅会造成人员伤亡和财产损失，还会导致能源供应中断，影响经济社会的正常运行。例如，煤矿事故可能导致煤炭供应减少，影响电力生产和工业生产；油气管道泄漏事故可能引发火灾、爆炸等次生灾害，对周边环境和居民安全造成威胁。因此，只有确保能源行业的安全生产，才能为低碳发展提供稳定的能源供应保障^[4]。

（二）低碳发展促进安全水平提升

低碳发展要求能源行业采用更加先进、高效、环保的技术和设备，这将有助于提高能源行业的安全生产水平。例如，推广清洁能源技术可以减少对传统化石能源的依赖，降低煤炭开采、油气勘探开发等过程中的安全风险；采用智能化、自动化技术可以提高能源生产和传输的安全性和可靠性，减少人为因素导致的安全事故。此外，低碳发展还促使能源企业加强安全管理，完善安全制度和应急预案，提高应对突发事件的能力。

（三）安全与低碳协同发展是必然趋势

在双碳目标下，能源行业面临着安全与低碳发展的双重压力。单纯追求安全而忽视低碳发展，将无法实现能源行业的可持续发展；单纯追求低碳发展而忽视安全，将给能源行业带来巨大的风险。因此，能源行业必须实现安全与低碳的协同发展，在保障安全生产的前提下，积极推进低碳转型，实现经济效益、社会效益和环境效益的统一^[5]。

三、能源生产环节的安全与低碳协同发展

（一）传统化石能源生产的安全与低碳优化

在煤炭生产方面，加强煤矿安全监管，提高煤矿开采的机械化、自动化水平，减少井下作业人员数量，降低安全事故发生的概率。同时，推广煤炭清洁生产技术，如煤炭洗选、煤矸石综合利用等，减少煤炭生产过程中的污染物排放和碳排放。在油气生产方面，加强油气勘探开发的安全管理，采用先进的钻井技术和设备，提高油气采收率。加大对油气田伴生气的回收利用力度，减少甲烷等温室气体的排放^[6]。

（二）可再生能源生产的安全保障与低碳发展

可再生能源生产虽然相对安全，但也存在一定的风险。例如，太阳能光伏电站的建设和运行过程中，需要注意电气安全、消防安全等问题；风力发电场的建设需要考虑对生态环境的

影响，避免对鸟类等野生动物造成伤害。在保障安全的前提下，要进一步加大可再生能源的开发力度，提高可再生能源的发电效率和稳定性。加强可再生能源技术创新，降低可再生能源的生产成本，提高其市场竞争力。

（三）能源生产过程中的安全与低碳技术创新

研发和应用安全与低碳协同发展的新技术是能源生产环节的关键。例如，开发新型的煤炭清洁燃烧技术，提高煤炭燃烧效率，减少污染物和碳排放；研究油气田高效开采与碳捕集一体化技术，在提高油气采收率的同时，实现二氧化碳的捕集和封存。此外，利用大数据、人工智能等技术，实现对能源生产过程的实时监测和智能控制，提高能源生产的安全性和低碳水平^[7]。

四、能源传输环节的安全与低碳协同发展

（一）电网安全与低碳运行

电网是能源传输的重要基础设施，其安全稳定运行至关重要。要加强电网的安全管理，完善电网调度和运行机制，提高电网应对突发事件的能力。同时，推进电网的低碳化改造，提高可再生能源的消纳能力。加强智能电网建设，实现电网的自动化、信息化和互动化，提高电网的运行效率和可靠性。推广分布式能源接入技术，促进能源的就地生产和消费，减少能源传输过程中的损耗^[8]。

（二）油气管网安全与低碳发展

油气管网的安全运行关系到油气的稳定供应。要加强对油气管网的巡检和维护，及时发现和处理安全隐患。采用先进的管道监测技术，如光纤传感技术、无人机巡检技术等，提高油气管网的安全监测水平。在油气管网建设过程中，要充分考慮低碳发展要求，优化管网布局，减少管道长度和建设成本。推广油气管网的节能技术，降低油气管网运行过程中的能耗和碳排放。

（三）能源传输设施的安全与低碳管理

建立健全能源传输设施的安全与低碳管理制度，加强对能源传输设施的规划、设计、建设、运行和维护等全过程管理。加强对能源传输设施从业人员的安全培训和教育，提高其安全意识和操作技能。建立能源传输设施的安全与低碳应急预案，定期组织应急演练，提高应对突发事件的能力。

五、能源消费环节的安全与低碳协同发展

（一）工业能源消费的安全与低碳转型

工业领域作为能源消耗和碳排放的主要来源，其安全与低碳转型对实现能源高质量发展具有关键意义。首先，应加强安全生产监管，完善工业企业的能源使用规范，强化设备运行管理与操作人员培训，防范火灾、爆炸及中毒等安全事故。其次，推动节能技术升级，广泛应用高效电机、智能控制系统和余热回收装置，提升能源利用效率。同时，鼓励企业采用风电、光伏等清洁能源替代燃煤，构建多元化能源结构。此外，要推动重点行业碳达峰行动，实施碳配额管理和碳足迹核算，引导企业开展绿色生

产认证，全面促进工业能源消费向安全、高效、低碳方向协同发展^[9]。

（二）建筑能源消费的安全与低碳提升

建筑领域的能源消费涵盖供暖、制冷、照明等多个方面，是城市能耗的重要组成部分。在安全管理方面，需加强对电气线路、燃气管道的定期检测与维护，防范火灾、泄漏等事故的发生，保障居民生命财产安全。在低碳发展方面，应大力推广绿色建筑标准，采用高性能保温材料 and 智能控制系统，提升建筑能效水平。积极推广太阳能热水系统、分布式光伏以及地源热泵等可再生能源应用，提升建筑能源自给能力。同时，建立完善的建筑能耗监测平台，实施分类统计与动态评估，为政策制定和技术优化提供数据支撑，推动建筑用能向安全与低碳双目标协同迈进。

（三）交通能源消费的安全与低碳变革

交通运输是能源消费和碳排放增长较快的领域之一，推进其安全与低碳转型对于实现“双碳”目标至关重要。在安全管理方面，应加强对交通工具的安全性能审查，完善新能源汽车电池安全标准，确保车辆运行稳定可靠；同时加强交通基础设施的安全防护，提升道路通行安全性。在低碳转型方面，应加快新能源汽车推广应用，完善充电桩、换电站等配套设施建设，推动公共交通电动化。优化城市交通结构，发展轨道交通、共享出行模式，减少私人燃油车使用频率。通过政策激励与技术革新并举，实现交通系统在保障运行安全的同时，大幅降低碳排放强度，推动交通能源消费向清洁、安全、高效方向转型升级。

六、能源行业安全与低碳协同发展的管理优化

（一）政策法规引导

政府应通过制定科学合理的政策法规体系，推动能源行业实现安全与低碳协同发展。首先，要完善清洁能源支持政策，如财政补贴、税收减免、绿色信贷等，激励企业加快可再生能源的开发与应用。其次，应加强对高碳能源的监管力度，出台严格的碳

排放标准和环境准入机制，推动传统能源企业进行技术升级和结构优化。同时，建立健全绩效考核体系，将安全生产和低碳发展指标纳入企业评价体系，形成有效的激励约束机制，促使能源企业在保障安全的同时实现绿色转型^[10]。

（二）标准规范制定

标准化是推动能源行业安全与低碳协同发展的基础支撑。应加快制定覆盖能源生产、传输、消费全过程的安全操作规程和低碳技术标准，明确各环节的技术要求和管理规范。通过统一标准，提升行业整体安全水平，降低事故发生率，同时控制碳排放总量和强度。此外，要加强标准的宣传贯彻和技术培训，增强企业对标准的理解和执行力。建立标准动态更新机制，确保其适应行业发展和国家“双碳”目标的需要，从而为能源行业的高质量发展提供有力保障。

（三）协同管理机制建立

能源行业涉及多个管理部门，需建立高效的协同治理机制，统筹安全与低碳发展目标。建议设立跨部门协调小组，负责政策制定、资源调配与监督落实，推动形成工作合力。同时，构建信息共享平台，整合安全监管、碳排放监测、能源调度等数据资源，提升决策科学性和监管效率。加强环保、工信、应急管理等部门之间的沟通协作，打破信息壁垒，形成上下联动、横向协同的工作格局。通过机制创新，全面提升能源行业的系统性管理水平，实现安全与低碳的协调发展。

七、结语

双碳目标下能源行业安全与低碳协同发展是能源行业实现可持续发展的必然选择。在能源生产、传输和消费等各个环节，都需要采取有效措施，实现安全与低碳的有机结合。通过技术创新、管理优化等手段，不断提高能源行业的安全生产水平和低碳发展能力。能源行业安全与低碳协同发展不仅有助于实现双碳目标，推动经济社会的绿色转型，还能保障能源供应的稳定性和可靠性，维护国家能源安全。

参考文献

- [1] 李惠恩. “双碳”目标下绿色能源行业的财税激励政策研究 [J]. 绿色中国, 2025, (01): 187-189.
- [2] 周春雷, 王洁, 刘文思, 等. “双碳”目标下能源行业低碳供应链碳排放测算模型研究 [J]. 环境科学与管理, 2024, 49(09): 26-31.
- [3] 郭红红, 贾亦非. “双碳”目标下新能源行业金融发展策略研究——以风电、光伏发电行业为例 [J]. 甘肃金融, 2024, (09): 52-55.
- [4] 裴春晖. “双碳”目标下新能源行业上市公司价值投资策略的量化分析 [J]. 投资与合作, 2024, (08): 32-34.
- [5] 刘超. “双碳”目标下“减污降碳协同增效”在生态环境法典中的立法表达 [J]. 政法论丛, 2024(02).
- [6] 沈文. 探索现代农业减污降碳协同增效新模式——以上海金山区廊下镇为例 [J]. 当代农村财经, 2024(03).
- [7] 冯钦忠, 杨世童, 刘俐媛, 陈俊, 王凯月, 陈扬, 崔皓. “双碳”目标下工业园区减污降碳协同增效路径分析与技术要求 [J]. 环境保护科学, 2023(03).
- [8] 孙雪妍, 白雨鑫, 王灿. 减污降碳协同增效: 政策困境与完善路径 [J]. 中国环境管理, 2023(02).
- [9] 李红霞, 郑石明, 邹克. 应急响应的减污降碳协同效应: 内在机制与增效路径 [J]. 暨南学报 (哲学社会科学版), 2023(01).
- [10] 应兴华, 钱文荣, 曹立勇. 推进欠发达革命老区泰顺县松垟社区发展的探讨. 浙江农业科学, 2015(10).

生态净化技术对集中连片海水池塘养殖尾水的处理效果研究——以龙海区紫泥镇甘文农场养殖项目为例

黄清武

福建省环境保护设计院有限公司, 福建 福州 350100

DOI:10.61369/EAE.2025030014

摘 要 : 为探索经济可行的集中连片海水池塘养殖尾水净化技术, 开发了3种基于生态净化技术处理海水池塘养殖尾水, 分别通过构建生态浮床(海马齿)、生态浮床(炭素纤维生态草)及红树林+牡蛎壳生态围隔等措施, 比较了3种不同类型的生态措施对海水养殖尾水的净化效果。结果表明: 通过90d 的系统运行, 3种生态净化技术的出水水质检测结果能达到《福建省水产养殖尾水排放标准》(DB35/2160-2023)表2海水接纳水域养殖尾水排放限值中的一级标准。3种不同类型生态净化措施对集中连片海水池塘养殖尾水的处理能力从高到低依次是红树林+牡蛎壳生态围隔>生态浮床(海马齿)>生态浮床(炭素纤维生态草), 其中红树林+牡蛎壳生态围隔系统对于总磷的去除率可达到57.24%~74.35%、总氮的去除率可达到12.88%~36.23%、CODMn的去除率可达到46.71%~65.46%。研究表明, 基于生态净化技术对于处理集中连片海水池塘养殖尾水具有较好的应用前景。

关 键 词 : 生态净化技术; 海水池塘养殖尾水; 降解效果; 达标排放

Research on the Treatment Effect of Ecological Purification Technology on Effluent from Concentrated Continuous Seawater Pond Aquaculture — A Case Study of the Ganwen Farm Aquaculture Project in Zini Town, Longhai District

Huang Qingwu

Fujian Environmental Protection Design Institute Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350100

Abstract : In order to explore the economically feasible purification technology of centralized contiguous seawater pond aquaculture tailwater, three types of ecological treatment methods were developed based on ecological purification technology to treat seawater pond aquaculture tailwater, and the purification effects of three different types of ecological measures on mariculture tailwater were compared by constructing ecological floating beds (seahorse teeth), ecological floating beds (carbon fiber ecological grasses) and mangrove oyster shell ecological confinement. The results showed that through 90 days of system operation, the effluent quality test results of the three ecological purification technologies could reach the first-level standard in the discharge limit of aquaculture tailwater in the seawater receiving waters in Table 2 of the Fujian Aquaculture Tailwater Discharge Standard (DB35/2160-2023). The treatment capacity of the three different types of ecological purification measures for aquaculture tailwater in contiguous contiguous seawater ponds was > from high to low: mangrove oyster shell ecological enclosure > ecological floating bed (seahorse tooth). The ecological floating bed (carbon fiber ecological grass), among which the removal rate of total phosphorus in the mangrove oyster shell ecological enclosure system could reach 57.24%~74.35%, the removal rate of total nitrogen could reach 12.88%~36.23%, and the removal rate of CODMn could reach 46.71%~65.46%. The results show that ecological purification technology has a good application prospect for the treatment of aquaculture tailwater in contiguous seawater ponds.

Keywords : ecological purification technology; seawater pond aquaculture tailwater; degradation effect; discharge standards

引言

随着集中连片海水池塘养殖场的快速发展,养殖规模持续扩大,养殖密度不断提高,尾水处理压力日益增大。根据刘梅等调查^[1],现有集中连片海水池塘养殖场主要存在问题是无效的养殖尾水处理设施,难以实现达标排放,处理并削减水产养殖尾水中过量的氮、磷、有机物等污染物对环境及养殖本身造成的影响日益受到关注。水产养殖尾水的现有处理方法主要包括物理法(曝气法、过滤法、泡沫分离技术等)、化学法(絮凝沉降、臭氧法等)和生物法(微生物处理、微藻处理、水生动植物调控等)^[2-3]。

研究表明,生态净化技术对海水池塘养殖尾水的处理具有显著作用,主要是通过培育耐盐植物来处理海水养殖尾水。其中,耐盐植物中海马齿曾用于原位修复养殖水体,氨氮去除率可达到74%~91%、亚硝态氮去除率可达到93%~98%、总氮去除率可达14%~33%、COD去除率可达67%~85%、总磷去除率可达41%~68%,效果优良^[4];水葱生长速率快,对氨氮和磷酸盐去除能力很强;美人蕉耐受能力强,净化能力较弱;芦苇在较高盐度环境下净化能力强^[5-7];据研究^[7-8],碳素纤维生态草因具备附着生物量大、功能性微生物群落丰度高、去除营养物效率高等优势,可成为生态浮岛的理想人工载体。研究报道称^[10-11],红树林同样具有高效净化养殖尾水功能,主要通过其发达的根系能吸收水中的氮、磷,还能过滤陆地径流和内陆带出的污染物等。

本文设计了基于生态净化技术的海水池塘养殖尾水净化模式,选取龙海区紫泥镇甘文农场养殖项目为试验基地,通过分别构建生态浮床(海马齿)、生态浮床(炭素纤维生态草)及红树林+牡蛎壳生态围隔等措施,比较3种不同生态净化技术对氮和磷的降解效果,研究和筛选了具有较好降解效果的生态净化处理技术,为福建地区现有的集中连片海水池塘养殖模式向绿色环保方向转型升级提供技术参考。

一、材料与方法

(一) 试验场地

本工程为龙海区紫泥镇甘文农场集中连片内陆养殖池塘标准化改造和尾水治理项目,位于漳州市龙海区紫泥镇甘文农场沙头口片区,主要的养殖品种为缢蛏,总面积约1000亩。每年9-10月开始投放蛏苗,随后,调水改底、合理投喂,于次年2月份左右开始陆续收获,一直持续到7月份左右,9月再次开启新一轮缢蛏养殖工作。本试验区的养殖取水方式一般采用自设泵抽取或自流的方式,从附近沟渠取水,而沟渠中的水通过水闸以自流的方式,在高潮位时从周边海域补水。经过现场养殖户调研反馈分析,养殖过程每日的置换水量约为10cm(养蛏池),尾水则通过水闸或水泵以自流或电力抽水的形式排入塘边沟渠。

(二) 试验设计

对现有龙海区紫泥镇甘文农场集中连片内陆养殖池塘进行改造,选取3块坡度、塘深、池塘面积基本一致的池塘(片区A~C)进行改造,分别铺设进水管网,设置流量计等。进水管网从塘边沟渠中引养殖尾水。3个试验片区设置生态系统如下:

片区A:设定为生态浮床(海马齿)

生态浮床框体采用0.5m×1.0m×0.05m的长方形高密度聚乙烯板紧密拼接而成,每一水道浮床面积为60m²,底部采用石条通过钢丝条与浮板连接进行固定。剪取平均长度20~30cm、茎节数5~6个、顶生对生叶4~6片的耐盐水生植物(海马齿)进行扦插,种植密度约48株/m²。

片区B:设定为生态浮床(炭素纤维生态草)

采用浮床悬挂式布局,覆盖面积比为1:50(生态草面积:水域面积),深度控制在1.5~2m光补偿层。

片区C:设定为红树林+牡蛎壳生态围隔系统

红树林+牡蛎生态围隔部署进水沟渠中,占地约5亩,有效水深2m,水力停留时间0.5h,其中红树林种植于进水沟渠两侧及池

塘围隔田埂上,牡蛎壳布设于中间。

(三) 样品收集和检测

从蛏苗播种开始,每隔10d采集3组试验片区的进水和出水的水样立即带回实验室参照相关标准进行水质检测。对3组试验蛏池的进口及出水口共计6个采集点采集水质样品,每个采集点收集3个平行样品,每10d取样1次,分别测定pH值、化学需氧量(COD)、总氮(TN)、总磷(TP)、悬浮物(SS)。测定方法按GB17378.4《海洋监测规范第4部分:海水分析》进行^[12]。

(四) 数据处理和分析

检测数据结合福建省《水产养殖尾水排放标准》(DB35/2160-2023)中表2海水接纳水域养殖尾水排放限值来评估养殖尾水达标情况。采用SPSS statistics19.0对实验数据进行单因素方差分析,统计养殖尾水不同污染因子的平均浓度、标准偏差,判断各养殖方式对养殖尾水污染因子浓度是否有显著性影响,P<0.05表示存在显著性差异。采用Origin 2021软件进行作图。

二、结果与讨论

(一) 水质变化分析及达标情况

对3个养殖尾水处理试验片区出水进行水质跟踪检测,从蛏苗播种后开始,每隔10d进行1次进出水水质监测,持续至90d的养殖周期,共进行9次监测,每个试验片区共有9组监测数据。从监测结果来看(表1和图1),3个试验片区,养殖尾水经生态净化处理后,出水中总磷、总氮、COD_{Mn}均能达到《福建省水产养殖尾水排放标准》(DB35/2160-2023)表2海水接纳水域养殖尾水排放限值中的一级标准。其中,试验片区A-生态浮床(海马齿)总磷、总氮及COD出水浓度分别为0.068±0.02mg·L⁻¹、1.65±0.52mg·L⁻¹、2.03±0.37mg·L⁻¹;试验片区B-生态浮床(炭素纤维生态草)总磷、总氮及COD出水浓度分别为0.140±0.03mg·L⁻¹、1.89±0.35mg·L⁻¹、2.85±0.60mg·L⁻¹

¹；试验片区C-红树林+牡蛎壳生态围隔系统总磷、总氮及COD出水浓度分别为 $0.072 \pm 0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $1.61 \pm 0.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $1.61 \pm 0.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

由于缢蛏苗播种3d后，饵料培养池开始向养蛏池供应饵料。考虑水质的稳定性，一般养蛏池每次排出池水1/2左右，然后饵料培养池向其排放池水供给饵料，接着饵料培养池补充海水，随着养殖时间增加会追加肥料，因此进出水水质会随着时间推移逐渐增大，约养殖到50d进出水水质 COD_{Mn} 会达到最大，70d进出水水质总氮会达到最大。养殖到80d左右会进行到缢蛏收获时间，进而减少换水频次及减少肥料追加，因此进出水水质会出现下降的一个趋势。如图1所示，项目的污染物出水浓度会随着养殖时间的增加而增大，在50~70d达到最大，后会逐渐出现浓度下降的趋势。

表1 各试验区出水监测点污染因子的实测值(平均值 ± 标准差)
Table 1 Measured values of pollution factors at effluent monitoring points in each experimental area (mean ± standard deviation)

		总磷 / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	总氮 / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	COD_{Mn} / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
A-生态浮床 (海马齿)	进水	0.188 ± 0.05	1.88 ± 0.52	3.48 ± 0.69
	出水	0.068 ± 0.02	1.65 ± 0.52	2.03 ± 0.37
B-生态浮床 (炭素纤维生态草)	进水	0.188 ± 0.05	1.99 ± 0.34	3.64 ± 0.79
	出水	0.140 ± 0.03	1.89 ± 0.35	2.85 ± 0.60
C-红树林+牡蛎壳生态围隔系统	进水	0.199 ± 0.05	2.19 ± 0.52	3.68 ± 0.65
	出水	0.072 ± 0.02	1.61 ± 0.32	1.61 ± 0.28

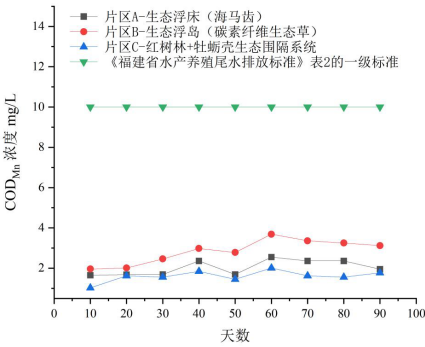


图1(a) 各试验区CODMn监测因子的实测浓度变化

Fig. 1(a) Changes in measured concentrations of CODMn monitoring factors in each experimental area

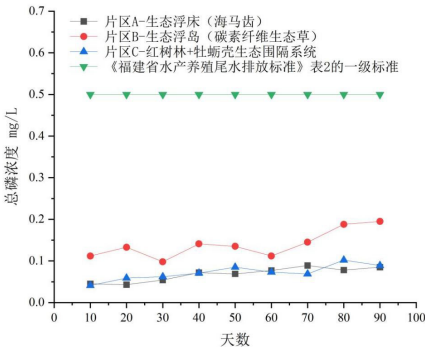


图1(b) 各试验区总磷监测因子的实测浓度变化

Fig. 1(b) Changes in the measured concentrations of total phosphorus monitoring factors in each experimental area

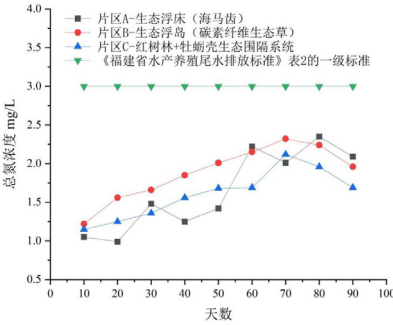


图1(c) 各试验区总氮监测因子的实测浓度变化

Fig. 1(c) Changes in measured concentrations of total nitrogen monitoring factors in each experimental area

(二) 不同类型生态净化技术对养殖尾水中特征污染物的净化效果

1. 总氮的净化作用分析

不同类型生态净化技术对养殖尾水的TN的净化效果如图2(a)及表1所示，红树林+牡蛎壳生态围隔系统去除率能达到12.88%~36.23%，均高于生态浮床（海马齿）及生态浮床（炭素纤维生态草）系统。但3种工艺技术对于总氮的去除效果较低，基本约处于20%的水平范围；主要原因可能是牡蛎壳结构能在其表面形成一层钙化的生物膜，此外其微孔结构提供了微生物（硝化、反硝化细菌）栖息地，牡蛎壳内的微生物可以通过其生物化学过程转化水中的氮，将无机氮化合物转化为氮气，从而减少了水体的总氮含量^[3]。而生态浮床（炭素纤维生态草）系统总氮TN去除效率较低，主要原因可能是人工炭素纤维生态草它由高比表面积的炭素纤维材料制成，能够为水中的微生物提供了极佳的附着环境，这些微生物在炭素纤维生物膜上形成稠密的生物膜，但人工炭素纤维生态草运行一段时间后，生物膜系统局部可能会形成堵塞，导致系统孔隙率变小，弱化了浮床、炭素纤维生态草及附着微生物各自独立及协同作用对氮的去除效果，从而影响了净化系统的运行^[4]。综上说明TN在经过红树林+牡蛎壳生态围隔系统的红树林根系吸收转化、牡蛎壳吸附固持及微生物降解转化等作用后，比生态浮床（海马齿）及生态浮床（炭素纤维生态草）系统有更显著的去除效果。

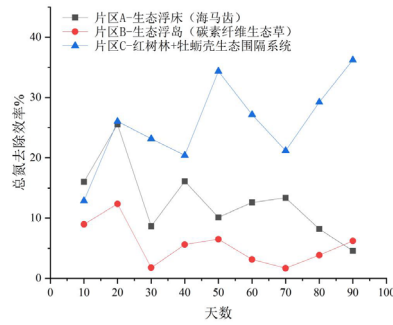


图2 各试验区总氮去除效果

Fig.2 Total nitrogen removal effect in each test area

2. 总磷的净化作用分析

如图3及表1所示，不同类型生态净化技术对养殖尾水的总磷去除率结果来看：红树林+牡蛎壳生态围隔系统与生态浮床

(海马齿)去除效果较为接近,去除率分别为57.24%~74.35%、53.85%~59.50%,但生态浮床(炭素纤维生态草)去除率仅为2.76%~51.52%;在生物净化系统中TP的降解主要通过基质吸附、微生物群落降解和植物根系吸收。但本文研究重点处理含盐的养殖尾水,主要技术重点是在于筛选一种净化含盐尾水的植物。已有研究表明^[12],红树林处理养殖不同盐度海水效果都很明显,其主要是通过红树植物通过其发达的通气根系(如支柱根、呼吸根)从沉积物孔隙水中吸收溶解性的磷酸盐,并将其转化为有机磷形式,固定在植物的根、茎、叶等组织中,达到净化水质的目的。同样研究表明^{[4][15]},海马齿净化盐度15尾水中的N、P元素效果优良,盐度为30的全海水下均能健康生长,适应性较强,可以从无根到有根的生长时间,只需要4~6 d,说明其适应性强,生命力顽强。因此海马齿通过其发达的水生根系,直接从水体中吸收溶解性的活性磷酸盐(PO_4^{3-}),并将其转运至茎、叶等部位,同化为自身的有机磷化合物。此外海马齿庞大的根系网络表面附着了大量的微生物(包括细菌、真菌、藻类等),形成生物膜。微生物群落将水体中的颗粒态有机磷、溶解性有机磷分解矿化,部分供自身利用,部分成为无机磷后被植物吸收或由聚磷菌固定。从而达到净化水质目的。

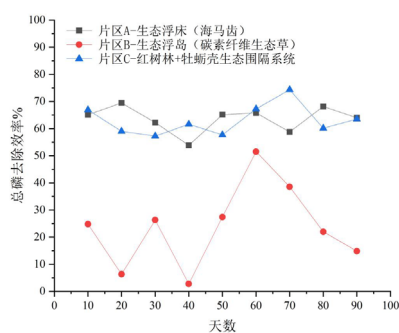


图3 各试验区总磷去除效果

Fig.3 Total phosphorus removal effect in each experimental area

3. COD_{Mn} 净化作用分析

COD去除率结果来看,如图4及表1所示:去除效果最优的为红树林+牡蛎壳生态围隔系统,能达到46.71%~65.46%,生态浮床(海马齿)为23.61%~54.20%,生态浮床(炭素纤维生态草)去除率仅为14.47%~29.62%。考虑养殖成本及早期设计的缺陷,龙海区紫泥镇甘文农场本身并没有底排污系统,且养殖种类又属于缢蛏,所以会养殖过程中会出现残饲和粪便沉积于池底,水体的COD处于较高水平。而红树林+牡蛎壳生态围隔系统、生态浮床(海马齿)、生态浮床(炭素纤维生态草)可以将水体中的残饲和粪便等固态有机物通过吸附等作用分离出来,同时利用微生物群落,将水体中大分子的有机物降解成小分子的有机物或者无机物的过程,可产生一定量的无机氮和无机磷,因此,该环节COD显现下降趋势^[16-17]。

三、结论

本文采用3中不同类型生态净化技术对集中连片海水水产养殖外排废水的污染物进行转化和降解,取得了较好的生态净化效果。红树林+牡蛎壳生态围隔系统去除效率优于生态浮床(海马齿)显著优于生态浮床(炭素纤维生态草)。其中红树林+牡蛎壳生态围隔系统对于总磷的去除率可达到57.24%~74.35%、总氮的去除率可达到12.88%~36.23%、 COD_{Mn} 的去除率可达到46.71%~65.46%。分析可得:生态浮床上附着的微生物作用是氮去除主要的归趋途径,红树林+牡蛎壳及生态浮床填料吸附是磷去除的主要归趋途径。综上可得,红树林+牡蛎壳生态围隔系统及生态浮床(海马齿)净化技术在沿海地区含盐水产养殖尾水生态修复应用中具有较好的应用潜力。

参考文献

- [1]刘梅,原居林,倪蒙,等. "三池两坝"多级组合工艺对内陆池塘养殖尾水的处理[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(1): 97-106. DOI: 10.12153/j.issn.1674-991X.20200153.
- [2]冯丽娟,肖耿峰,程香菊,等. 基于AQUATOX模型的集装箱养殖尾水净化塘生态系统模拟及调控预测[J]. 环境工程学报, 2022, 16(5): 1525-1536. DOI: 10.12030/j.cjee.202201082.
- [3]曾宪磊,魏宝成,刘兴国,等. 基于Ecopath模型的复合养殖池塘构建[J]. 水产学报, 2018, (5). DOI: 10.11964/jfc.20170410796
- [4]冀碧霞,黄建荣,李连春,等. 海马齿对海水养殖系统中氮、磷的移除效果研究[J]. 水生态学杂志, 2011, 32(05): 94-99. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2011.05.012.
- [5]张力. 耐盐植物对含盐污水净化效果及生理生化响应[D]. 浙江海洋学院, 2013.
- [6]张海耿,崔正国,马绍赛,等. 人工湿地净化海水养殖外排水影响因素与效果实验研究[J]. 海洋环境科学, 2012, 31(01): 20-24+52.
- [7]WU Hailu, XU Kaiqin, HE Xiaojuan, et al. Removal of nitrogen by three plant species in hydroponic culture: Plant uptake and microbial degradation[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2016, 227(9): 1-11.
- [8]Zhang R, Qian X, Li H, et al. Selection of optimal river water quality improvement programs using QUAL2K: A case study of Taihu Lake Basin, China[J]. Science of The Total Environment, 2012, 431(none): 278-285. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.05.063.
- [9]朱文婷,刘植植,丁闯,等. 3种新型生态净化材料的脱氮效率及机理分析[J]. 环境工程, 2019, 37(06): 52-57+63. DOI: 10.13205/j.hjgc.201906011.
- [10]仇建标,陈琛,彭欣,等. 红树林人工湿地-养殖耦合系统构建与净化效果[J]. 浙江农业科学, 2019, 60(11): 2073-2077. DOI: 10.16178/j.issn.0528-9017.20191144.
- [11]虞丹君,罗海忠,徐志进,等. 不同红树处理海水养殖尾水效果初探[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(07): 271-274.
- [12]国家海洋环境监测中心. GB 17378.4-2007 海洋监测规范 第4部分: 海水分析[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [13]B N P A, A N T S, B V A T. Constructed Floating Wetlands: A review of research, design, operation and management aspects, and data meta-analysis[J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 308: 1120-1132. DOI: 10.1016/j.cej.2016.09.140.
- [14]赵倩,庄林岚,盛芹,等. 潜流人工湿地中基质在污水净化中的作用机制与选择原理[J]. 环境工程, 2021, 039(009): 14-22.
- [15]张艳琳,范伟,蔡元保,等. 海马齿对不同比例淡水海水组培的生长和生理响应[J]. 西北植物学报, 2009, 29(06): 1240-1245.
- [16]宋颖,黄玉婷,葛川,等. 多介质土壤滤层系统(MSL)与潜流式人工湿地技术处理海水养殖废水的效能比较[J]. 环境科学, 2014(9): 7. DOI: 10.13227/j.hjkk.2014.09.026.
- [17]程果峰,刘晃,吴凡. 海水对虾养殖塘排放废水生态处理设计[J]. 渔业现代化, 2010, 37(05): 13-18.

ICP-MS 与原子吸收光谱仪联合检测饮用水中多元素含量的方法研究

邓富强

江门公用检测科技有限公司, 广东 江门 529000

DOI:10.61369/EAE.2025030015

摘 要 : 本研究旨在建立电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS) 与原子吸收光谱仪 (AAS) 联合检测饮用水中多元素含量的分析方法。通过优化样品前处理条件和仪器工作参数, 准确、高效测定饮用水中常量、微量及痕量金属元素。研究选取铁、锰、铅等多种典型元素为目标分析物, 考察两种仪器检测性能, 如线性范围、检出限等, 并测定实际饮用水样品。结果显示, ICP-MS 适用于低含量元素快速筛查与定量, 检出限低、多元素同时分析能力强; AAS 在高含量元素测定中稳定性和准确性良好。两种方法联合应用弥补单一仪器不足, 提高饮用水中多元素分析覆盖面和可靠性, 为饮用水安全监测提供科学有效技术支撑。

关 键 词 : ICP-MS; 原子吸收光谱仪; 饮用水; 多元素分析

Research on the Method for Determining the Contents of Multiple Elements in Drinking Water by Combining ICP-MS with Atomic Absorption Spectrometry

Deng Fuqiang

Jiangmen Public Inspection Technology Co., Ltd., Jiangmen, Guangdong 529000

Abstract : This study aims to establish an analytical method for the simultaneous determination of multiple elements in drinking water using Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS) combined with Atomic Absorption Spectrometry (AAS). By optimizing sample pretreatment conditions and instrumental operating parameters, we achieved accurate and efficient determination of major, minor, and trace metal elements in drinking water. Various typical elements, including iron, manganese, and lead, were selected as target analytes to evaluate the detection performance of the two instruments, such as linear range and detection limit, and to analyze actual drinking water samples. The results indicated that ICP-MS is suitable for rapid screening and quantification of low-concentration elements, featuring low detection limits and strong capabilities for simultaneous multi-element analysis. Meanwhile, AAS demonstrated good stability and accuracy in determining high-concentration elements. The combined application of these two methods compensates for the limitations of individual instruments, enhancing the coverage and reliability of multi-element analysis in drinking water and providing scientific and effective technical support for drinking water safety monitoring.

Keywords : ICP-MS; atomic absorption spectrometry; drinking water; multi-element analysis

饮用水安全是重大民生问题, 重金属及常量元素含量是评价水质的重要指标。过量摄入或缺乏某些元素会影响人体健康, 如铅、镉等重金属有累积毒性, 铁、锰等元素含量异常也可能导致水质异色异味或健康风险。因此, 建立能快速准确全面测定饮用水中多种元素含量的分析方法, 对保障饮用水安全意义重大。目前, 水中元素分析方法有原子吸收光谱法 (AAS)、电感耦合等离子体发射光谱法 (ICP-OES) 和电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS) 等。AAS 操作简便、成本低、对部分元素测定准, 但一次只能测一种元素, 效率低; ICP-MS 检出限低、线性范围宽、可多元素同时分析, 但对复杂基体或高含量元素测定精度可能受影响。单一分析技术难以满足饮用水多元素同时准确测定需求。

一、材料与方法

（一）仪器设备与试剂材料

本次实验分析主要用电感耦合等离子体质谱仪（ICP-MS）和原子吸收光谱仪（AAS）。ICP-MS选 Agilent7800，配高灵敏度四极杆质量分析器等关键配置，可多元素同时检测并降干扰；AAS选 Agilent AA240FS，有全谱检测器等配置，适特定元素精确测定。实验所需标准物质有覆盖目标元素（铁、锰、铅、镉等）的多元素混合标准溶液等；实验用水为超纯水；使用的酸和其他试剂纯度高。使用前均需检查标准溶液和试剂的纯度与有效期。

（二）样品采集与前处理

饮用水样品采集按标准规程，用经硝酸酸化清洗的采样瓶，采样后密封，记录信息，2-4摄氏度冷藏，一周内检测。样品前处理核心是消解，本研究用硝酸-过氧化氢混合酸体系湿法消解，将样品置于消解罐加混合酸加热至澄清，能分解有机物和悬浮物、消除基质干扰、提高回收率。消解冷却后转移至容量瓶定容，部分样品按需稀释。

（三）仪器分析条件优化

ICP-MS分析条件优化很关键，优化参数包括射频功率等，通过调谐软件或手动调整，使目标元素（如铁、锰、铅）信号强、氧化物和双电荷离子产率低。AAS分析条件优化涉及空心阴极灯电流等，通过观察吸光度信号优化，使信号强且稳、背景干扰小。根据样品数量等协调两种仪器分析顺序和时间，先ICP-MS筛查，再AAS精测（尤其铁、锰等高含量元素），提高效率^[1]。

（四）干扰及其消除

饮用水检测可能存在光谱、非光谱、电离、多原子离子等干扰。本研究采取多种措施消除干扰，如用内标溶液校正信号波动；AAS选合适谱线、调燃烧头角度（针对铁、锰的特征谱线）；ICP-MS用碰撞/反应池技术消除多原子离子干扰；进行基体匹配、稀释样品减少基体效应。

（五）方法学验证

方法学验证确保分析结果准确可靠。绘制校准曲线，要求相关系数不低于0.9990，确定线性范围（涵盖铁、锰的常见浓度区间）。测定检出限和定量限，通过测定空白溶液标准偏差换算。考察精密度包括仪器精密度和重复性，计算相对标准偏差。验证准确度用标准参考物质测试和加标回收实验（重点验证铁、锰的回收率）。这些步骤确保方法适用于饮用水目标元素准确测定。

二、结果与讨论

（一）仪器条件优化结果

经过系统性的参数扫描与验证，优化的ICP-MS关键参数确定为：射频功率设定为1500瓦，等离子体气流量为15升/分钟，辅助气流量为1.0升/分钟，载气流量为0.8毫升/分钟，选用同心雾化器，将采样深度调整至8毫米，并采用跳峰扫描模式。这些参

数组组合能够使等离子体达到稳定且高效的离子化状态，同时确保样品引入系统工作在最佳效率点，从而获得最高的离子信号强度和最稳定的基线。对于AAS，优化的参数包括：铁、锰空心阴极灯电流设定为5毫安，光谱带宽选择0.2纳米，燃烧头高度设定为10毫米，乙炔流量为1.5升/分钟，空气流量为10升/分钟，积分时间为3秒。这些参数的设定考虑了光源稳定性、光谱分辨率、吸收信号强度以及火焰状态的优化，使得铁、锰在原子化区具有最大的吸收信号，并保证了信号读数的稳定性^[2]。

（二）样品前处理效果

所选的微波消解前处理方法对元素回收率产生了积极影响。通过使用高纯度的硝酸和过氧化氢作为消解试剂，并在设定的温度和时间程序下进行消解，样品基质被有效分解，目标元素转化为可溶态并进入溶液。代表性元素如铁、锰、铅的回收率测定结果显示，其回收率范围在90%至110%之间，均达到了方法学要求（通常认为回收率在80%-120%为可接受范围）。这表明所选前处理方法能够有效消除样品基质的干扰，提高目标元素的提取效率，保证了后续仪器分析结果的准确性。在干扰消除效果方面，对比采用了干扰消除措施（如使用内标校正、碰撞/反应池技术）前后的信号强度或干扰峰图可见，在未采取措施时，部分元素（如铁的多原子离子干扰）的质谱干扰或光谱干扰峰较为明显，导致目标离子信号强度降低或产生错误信号。而在采取相应措施后，干扰峰显著减弱或消失，目标离子信号强度得到恢复和稳定，信背比提高。这证明了所采取的干扰消除措施是有效的，能够满足饮用水样品中目标元素准确定量的要求。

（三）方法学验证结果

方法学验证结果显示，各目标元素在特定浓度范围（0.1 - 100 微克/升，铁、锰线性上限更高）呈良好线性关系，相关系数（ r ）>0.999。检出限（DL）和定量限（QL）依连续空白测定结果计算，各元素DL低至0.01微克/升，QL低至0.03微克/升（铁、锰检出限略高于铅、镉），满足痕量元素监测灵敏度要求。精密度的实验通过计算相对标准偏差（RSD）评估，仪器精密度的实验RSD<2%，重复性实验RSD<3%，表明方法精密度良好。准确度验证中，使用标准参考物质分析，测定结果与认定值相对误差在5%以内，加标回收实验回收率在95% - 105%之间，符合要求。

将本联合方法与单独使用ICP-MS或AAS的方法比较，单独使用ICP-MS元素覆盖宽、检出限低，但对易受干扰元素准确性受限；单独使用AAS对铁、锰等高含量元素操作简单、抗干扰强，但元素覆盖有限。本联合方法用ICP-MS检测多元素，AAS对铁、锰等高精度补充检测，综合性能优于单一方法^[3]。

（四）联合检测方法的整体评价

综合来看，该联合检测方法表现出色。分析速度上，优化仪器参数、合理安排检测顺序，一次实验可完成大部分目标元素测定，提高了效率。成本效益方面，虽初期投入两台仪器成本，但长期可减少样品处理批次、操作时间，降低试剂和人力成本，适合常规监测任务。元素覆盖范围结合了ICP-MS和AAS的优势，能满足饮用水卫生标准中多数金属及类金属元素检测需求。灵敏

度上, ICP-MS适用于痕量元素监测, AAS对铁、锰等高含量元素测定精度高。该方法适用于不同来源和基质的饮用水样品, 可靠性有方法学验证数据支持。因此, 该方法为饮用水多元素检测提供了有效技术方案^[4]。

三、方法应用

(一) 实际饮用水样品的检测

本次检测的实际饮用水样品来源涵盖城市自来水、地下水以及瓶装矿泉水三类。城市自来水样品采集自我国南部某城市的5个不同自来水管网的出厂水及管网末梢水, 共20份; 地下水样品取自该城市周边10个乡镇的浅层地下水井, 各采集1份, 共10份; 瓶装矿泉水样品则选取了市场上销量较高的8个品牌, 每个品牌随机抽取3瓶, 共24份。

使用建立的 ICP-MS与原子吸收光谱仪联合方法对这些样品进行检测, 结果显示各目标元素的含量范围存在差异。其中, 铁元素在城市自来水中的含量范围为0.03-0.21mg/L, 在地下水中为0.05-0.32mg/L, 在瓶装矿泉水中为0.01-0.15mg/L; 锰元素在城市自来水中的含量范围为0.01-0.08mg/L, 地下水中为0.02-0.12mg/L, 瓶装矿泉水中未检出; 铅元素在城市自来水中的含量范围为0.001-0.005mg/L, 地下水中为0.002-0.008mg/L, 瓶装矿泉水中为0.001-0.003mg/L; 镉元素在所有样品中的含量均未超过0.001mg/L。

(二) 结果可靠性验证

选取15份具有代表性的样品, 分别采用本联合方法与单独 ICP-MS方法、单独 AAS方法进行对比。结果显示, 对于铅、镉等低浓度元素, 联合方法与单独 ICP-MS方法的检测结果相对偏差均小于5%; 对于铁、锰等中高浓度元素, 联合方法与单独 AAS方法的检测结果相对偏差均小于8%, 表明三种方法的检测结果具有良好的一致性。

将本次检测结果与《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2022) 进行对比, 所有样品中铅、镉等毒理学指标均符合标准限值要求, 其中铅的最高检测值为0.008mg/L, 远低于标准限值0.01mg/L; 镉的最高检测值为0.001mg/L, 符合标准限值0.005mg/L的要求。铁、锰等感官性状和一般化学指标中, 仅有2份地下水样品的锰含量略超过标准限值(0.1mg/L), 分别为0.12mg/L和0.11mg/L, 其余样品均符合标准。据2021年《中国饮用水水质监测报告》显示, 采用多方法联合检测的饮用水样品中, 指标符合国家标准的比例较单一方法检测提高了6.3%, 这也

从侧面印证了本联合方法检测结果的可靠性。

(三) 方法优势体现

结合实际检测结果来看, ICP-MS与 AAS联用方法在同时检测高、中、低浓度元素方面优势明显。在检测低浓度的铅、镉元素时, ICP-MS展现出了优异的灵敏度, 能够准确检测到0.001mg/L以下的含量; 而对于中高浓度的铁、锰元素, AAS则能发挥其在该浓度范围内检测稳定性高的特点, 避免了 ICP-MS在高浓度检测时可能出现的信号饱和问题。例如, 在检测某份铁含量为0.32mg/L的地下水样品时, AAS的检测结果相对标准偏差为2.1%, 而单独使用 ICP-MS的相对标准偏差为5.8%。

在处理复杂基质干扰方面, 该联用方法也表现出较强的能力。本次检测的部分地下水样品中含有较高浓度的氯离子, 在单独使用 AAS检测铁元素时, 出现了明显的基质干扰, 检测结果偏差较大; 而联合方法中, ICP-MS采用碰撞反应池技术有效消除了氯离子的干扰, 使铁元素的检测结果相对偏差控制在3%以内。在平衡检测成本与效率方面, 联用方法同样具有优势。相较于单独使用 ICP-MS检测所有元素, 联用方法在检测中高浓度的铁、锰时采用 AAS, 降低了昂贵的 ICP-MS耗材消耗, 经统计, 本次检测的总分析成本降低了约23%。同时, 两种仪器可并行操作, 对同批次44份样品的检测时间较单独使用一种仪器缩短了约18%, 在保证检测准确性的前提下, 提高了检测效率, 更适用于大批量饮用水样品的多元素快速检测需求^[5]。

四、结语

ICP-MS与原子吸收光谱仪联合检测方法在饮用水多元素含量检测中性能卓越、优势显著。方法学验证显示, 该方法线性关系好、检出限低、精密度和准确度高, 保障了检测结果可靠性。实际应用中, 能处理城市自来水、地下水和瓶装矿泉水等不同来源和基质的饮用水样品, 检测结果符合标准。此联合检测方法在多方面表现出色, 分析速度快、成本效益优、元素覆盖广、灵敏度高, 整合了 ICP-MS和 AAS的长处, 弥补了单一方法的不足(尤其在铁、锰等高含量元素与铅、镉等痕量元素的协同检测上)。未来, 该方法有望在饮用水质量监测领域更广泛推广应用。随着对饮用水安全关注度提升, 检测技术要求提高, 该方法可拓展到地表水、海水等其他水质检测, 为水资源质量评估提供支持, 还可结合新技术持续优化, 提高检测准确性、效率和成本效益, 保障饮用水安全。

参考文献

- [1] 郭颖, 王忻, 刘付英, 等. ICP-MS和 GFAAS 测定粮食中铅、镉含量的对比研究 [J]. 食品工业, 2022, 43(7): 280-283.
- [2] 李亚丽, 张育维, 孙蓓蓓, 等. 肥料中重金属元素镍含量测定方法的研究 [J]. 中国土壤与肥料, 2022(9): 216-223. DOI: 10.11838/sfsc.1673-6257.21416.
- [3] 杨茹. 基于 Fe₃O₄ 磁性微粒分离富集的 ICP-MS 对复杂基质样品中痕量铅的检测研究 [D]. 天津大学, 2019.
- [4] 崔利娟. 液体阳极辉光放电原子发射光谱高灵敏检测重金属元素的方法研究 [D]. 西北师范大学, 2022.
- [5] 郑坚强, 刘彬, 司俊玲, 等. ICP-MS 与 GF-AAS 测定饮用水中镍、铬、镉、铅含量的对比分析 [J]. 食品研究与开发, 2020, 41(6): 6. DOI: CNKI: SUN: SPYK.0.2020-06-027.

