

# 环境与生态

## Environment and Ecology

---



ART AND TECHNOLOGY PRESS INC.

(517 666 0904)

263 S KENWOOD ST 560

CASPER, WY 82601

Copyright © 2026 by ART AND TECHNOLOGY PRESS INC. (United States)

Complimentary Copy



ART AND TECHNOLOGY PRESS INC.  
(United States)

## 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3卷 第4期 2026年8月刊

主 管 ART AND TECHNOLOGY PRESS INC.

主 办 ART AND TECHNOLOGY PRESS INC.

编 辑 《环境与生态》编辑部

ISSN(O): 2998-9108

ISSN(P): 2998-9094

地 址: 263 S KENWOOD ST 560

CASPER,WY 82601

网 址: <https://arttechpress.com>

## 本刊说明:

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

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



- 001 长白山地下水系统与地表水体耦合关系研究 白志杰,高晓龙,史明志,魏海峰,唐雪峰,柳俊乾  
Research on the Coupling Relationship between Groundwater System and Surface Water in Changbai Mountain& Bai Zhijie , Gao Xiaolong, Shi Mingzhi, Wei Haifeng, Tang Xuefeng, Liu Junqian
- 004 生态环境在线监测数据异常识别研究 张有福  
Research on Abnormal Identification of Ecological Environment Online Monitoring Data Zhang Youfu
- 007 地下水监测技术在生态环境监测中的作用 韩涛  
The role of Groundwater Monitoring Technology in Ecological Environment Monitoring Han Tao
- 010 城市大气污染成因及生态治理对策探究 洪冰婷  
Exploration into the Causes of Urban Air Pollution and Ecological Governance Strategies Hong Bingting
- 013 工业污水处理及其回收再利用研究 刘威  
Research on Industrial Wastewater Treatment and Its Recycling and Reuse Liu Wei
- 016 林下经济协同发展下山林业工程建设优化研究 王陆陆  
Research on Optimization of Forest Forestry Engineering Construction under Collaborative Development of Under Forest Economy Wang Lulu
- 019 基于大疆精灵 4 可见光的惠州大亚湾红树林分类提取 杨峰,阮奇锋,黄颖,彭樱子,韩念龙  
Classification and Extraction of Mangrove Forests in DayaBay,Huizhou Based on Visible Light from DJI Phantom 4 Yang Feng, Ruan Qifeng, Huang Ying, Peng Yingzi, Han Nianlong
- 022 城市生活污水中微塑料伴生塑化剂的共赋存特征及其复合生态风险评价 纪柏帆  
Co occurrence Characteristics and Composite Ecological Risk Assessment of Microplastic Associated Plasticizers in Urban Domestic Sewage Ji Bofan
- 025 “双碳”目标下 CCER 方法学体系化扩容对“难减排”产业的激励效应与对策研究 黄庆晖  
Research on the Incentive Effects and Countermeasures of the Systematic Expansion of the CCER Methodology under the "Dual Carbon" Goals on Industries with Difficult Emission Reductions Huang Qinghui
- 028 热改性煤气化渣-生物炭复合材料提升水稻根际固氮酶活性研究 吴剑锋,朱超,张志诚,原晨曦,杨明晖,许洁  
Study on the Enhancement of Nitrogen Fixation Enzyme Activity in Rice Rhizosphere by Heat Modified Coal Gasification Slag Biochar Composite Material Wu Jianfeng, Zhu Chao, Zhang Zhicheng, Yuan Chenxi, Yang Minghui, Xu Jie
- 032 林芝市融雪水环境径流汇流模拟研究 次仁旺姆,陈宫燕,巴果卓玛,强巴欧珠,阿旺卓玛  
Simulation Study on Runoff Confluence in Snowmelt Hydrological Environment in Linzhi Ciren Wangmu, Chen Gongyan, Baguo Zhuoma, Qiangba Ouzhu, Awang Zhuoma
- 036 工厂多源补水条件下冷却水系统水质处理研究 朱雅蕾  
Research on Water Quality Treatment of Cooling Water System under Multi source Water Supply Conditions in Factory Zhu Yalei

|     |                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                   |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 039 | 公共场所健康危害因素监测数据分析与环境风险综合评估研究<br>Data Analysis of Health Hazards Monitoring and Comprehensive Assessment of Environmental Risks in Public Places                                                    | 蒋一，王艳旭，刘翠玉，胡钟颖，李然<br>Jiang Yi, Wang Yanxu, Liu Cuiyu, Hu Zhongying, Li Ran                        |
| 042 | 工业废水中重金属检测技术的创新应用与分析<br>Innovative Application and Analysis of Heavy Metal Detection Technology in Industrial Wastewater                                                                          | 张东芳<br>Zhang Dongfang                                                                             |
| 046 | 基于层次分析法的乌鲁木齐地区引种月季综合评价与优良品种筛选<br>Comprehensive evaluation of introduced roses and selection of excellent varieties in Urumqi area based on Analytic Hierarchy Process                             | 徐磊，陈焕焕，张颖，张宁，卢彦刚<br>Xu Lei, Chen Huanhuan, Zhang Ying, Zhang Ning, Lu Yangang                     |
| 049 | 区域地质灾害与生态协同治理路径探析<br>Analysis of the Collaborative Governance Path for Regional Geological Disasters and Ecology                                                                                  | 杨倩<br>Yang Qian                                                                                   |
| 052 | 环保理念下长钢护筒桩在桥梁防撞墩中的应用<br>Application of Longsteel Shield Piles under Environmental Protection Concept in Bridge Anti-collision Piers                                                               | 沈高均<br>Shen Gaojun                                                                                |
| 055 | 生态环境管理与咨询项目编写的合规性框架及优化策略研究<br>Research on Compliance Framework and Optimization Strategy for Ecological Environment Management and Consulting Project Writing                                     | 陈伟鸿<br>Chen Weihong                                                                               |
| 059 | 环境应急下基层生态环境安全风险排查实践思考<br>Practical Reflection on Grassroots Ecological Environment Safety Risk Investigation under Environmental Emergency                                                        | 吉文锦<br>Ji Wenjin                                                                                  |
| 062 | 积云对流参数化方案对厄尔尼诺背景下对流层—平流层 ENSO 温度信号模拟的影响<br>The Influence of Cumulus Convection Parameterization Scheme on Simulating Tropospheric Stratospheric ENSO Temperature Signals under El Niño Background | 于超越，关浩，王婷<br>Yu Chaoyue, Guan Hao, Wang Ting                                                      |
| 065 | 《国家公园法》实施下生态保护与土地权利平衡的冲突与调适<br>The Conflict and Adjustment between Ecological Protection and Land Rights Balance under the Implementation of the "National Park Law"                              | 祝如怡<br>Zhu Ruyi                                                                                   |
| 068 | 基于珠峰区域北斗探空与 L 波段探空数据对比分析<br>Based on the Beidou Sounding Data And L-Band Sounding Data from the Everest Regioncomparative Analysis                                                                | 格桑次旺，达确，旦增伦珠，久美南加<br>Gesang Ciwang, Da Que, Danzeng Lunzhu, Jumei Nanjia                          |
| 072 | 长春龙嘉国际机场罕见复合型天气过程诊断分析及航班影响研究<br>Diagnosis and Analysis of Rare Composite Weather Processes and Their Impact on Flights at Changchun Longjia International Airport                                 | 于超越，朱有义<br>Yu Chaoyue, Zhu Youyi                                                                  |
| 076 | 钢渣—脱硫渣固废协同处置减碳工艺及效益分析<br>Carbon Reduction Process and Benefit Analysis of Collaborative Disposal of Steel Slag Desulfurization Slag Solid Waste                                                   | 崔宝松<br>Cui Baosong                                                                                |
| 079 | 国土空间规划背景下县域土地资源集约利用优化路径研究<br>Research on the Optimization Path of Intensive Utilization of County-Level Land Resources under the Background of National Spatial Planning                          | 杨雅丽<br>Yang Yali                                                                                  |
| 082 | 阿里国家大气本底观测站观测业务现状与发展研究<br>Current Status and Development Study of the Ali National Atmospheric Background Observation Station's Operational Activities                                            | 索朗曲珍，白玛曲珍，白玛坚增，索朗塔杰，豆永丽<br>Solang Quzhen, Baima Quzhen, Baima Jianzeng, Suolang Tajie, Dou Yongli |
| 085 | 丽江机场鸟类与气象要素的相关性研究<br>Research on the Correlation between Birds and Meteorological Factors at Lijiang Airport                                                                                      | 张明欣，曹凌燕，李天怀<br>Zhang Mingxin, Cao Lingyan, Li Tianhuai                                            |

# 长白山地下水系统与地表水体耦合关系研究

白志杰<sup>1,2</sup>, 高晓龙<sup>1,2\*</sup>, 史明志<sup>1,2</sup>, 魏海峰<sup>1,2</sup>, 唐雪峰<sup>1,2</sup>, 柳俊乾<sup>1,2</sup>

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.2026040001

**摘 要 :** 长白山作为松花江、鸭绿江和图们江的发源地, 是东北重要水塔和生态功能区, 其地下水与地表水体的耦合关系关乎区域水资源安全与生态稳定。本文通过构建点-线-面监测网络, 系统获取地下水与地表水动力场数据, 结合水化学、氢氧稳定同位素示踪技术及数值模型, 探究两者耦合特征、机制及影响因素。长白山地下水与地表水动力场时空异质性显著, 受气象周期、地形地质控制, 丰平枯水期呈现不同演化特征; 水化学上两者均呈弱碱性、低盐度, 主要离子含量相关性显著, 印证耦合关联; 氢氧同位素示踪揭示大气降水为主要补给来源, 量化了不同时空尺度下两者的交换比例; 深大断裂与地热异常通过控水机制、水热耦合及深层地下水隐式补给, 显著控制耦合关系, 其中深层地下水隐式补给是天池水量稳定的关键。研究成果可为长白山区域水资源合理开发、生态环境保护及矿泉水资源管控提供理论支撑与技术参考。

**关 键 词 :** 长白山; 地下水系统; 地表水体; 水动力场

## Research on the Coupling Relationship between Groundwater System and Surface Water in Changbai Mountain&

Bai Zhijie<sup>1,2</sup>, Gao Xiaolong<sup>1,2\*</sup>, Shi Mingzhi<sup>1,2</sup>, Wei Haifeng<sup>1,2</sup>, Tang Xuefeng<sup>1,2</sup>, Liu Junqian<sup>1,2</sup>

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

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

**Abstract :** Changbai Mountain, as the source of Songhua River, Yalu River and Tumen River, is an important water tower and ecological functional area in Northeast China. The coupling relationship between groundwater and surface water bodies is related to regional water resource security and ecological stability. This article constructs a point line surface monitoring network to systematically obtain data on groundwater and surface hydrodynamic fields. Combined with hydrochemical and hydrogen oxygen stable isotope tracing techniques and numerical models, the coupling characteristics, mechanisms, and influencing factors of the two are explored. The spatiotemporal heterogeneity of groundwater and surface hydrodynamic fields in Changbai Mountain is significant, and they are controlled by meteorological cycles, topography, and geology, exhibiting different evolutionary characteristics during the wet and dry seasons; In terms of hydrochemistry, both exhibit weak alkalinity and low salinity, with a significant correlation in the content of major ions, confirming the coupling relationship; Hydrogen and oxygen isotope tracing revealed that atmospheric precipitation is the main source of replenishment, quantifying the exchange ratio between the two at different spatiotemporal scales; The deep fault and geothermal anomalies significantly control the coupling relationship through water control mechanisms, hydrothermal coupling, and implicit recharge of deep groundwater, among which the implicit recharge of deep groundwater is the key to the stability of Tianchi water volume. The research results can provide theoretical support and technical reference for the rational development of water resources, ecological environment protection, and mineral water resource management in the Changbai Mountain area.

**Keywords :** Changbai Mountain; groundwater system; surface water bodies; hydrodynamic field

# 引言

随着区域经济发展与矿产资源（尤其是矿泉水）开发力度的加大，加之全球气候变化引发的降水格局改变、冰雪融期提前等现象，长白山地下水与地表水体的耦合平衡受到显著影响，部分区域出现地下水位下降、泉眼流量衰减、地表径流不稳定等问题，不仅威胁优质矿泉水资源的可持续开发，也对区域生态系统的完整性构成挑战。因此，系统探究长白山地下水与地表水体的耦合关系，揭示其耦合机制及影响因素，成为当前区域水资源保护与生态环境治理的迫切需求。基于此，本文以长白山地下水系统与地表水体为研究对象，结合区域地质、水文与气象特征，构建多尺度监测网络，综合运用水动力场分析、水化学检测、氢氧稳定同位素示踪及数值模型等方法，系统探究地下水与地表水体的水动力场时空演化特征，识别两者的水力耦合关系，量化耦合交换比例，揭示深大断裂与地热异常对耦合关系的控制机制，阐明深层地下水隐式补给的特征与作用。本研究旨在填补长白山区域水资源耦合关系系统性研究的空白，完善火山岩区地下水与地表水体耦合的研究理论与方法，为区域水资源合理开发、矿泉水资源保护、生态环境修复及用水安全保障提供科学依据与技术支撑。

## 一、地下水与地表水水动力场特征及耦合识别

### （一）数据获取与处理

长白山区是松花江、鸭绿江和图们江三条大型河流的发源地，是东北重要的“水塔”和生态功能区，其水资源形成演化关乎区域及其下游地区用水安全与生态环境安全<sup>[1]</sup>。结合长白山区域地形、地质与水文特征，构建点-线-面监测网络，系统获取地下水与地表水动力场基础数据。地下水通过布设浅层潜水、深层承压水监测井，监测水位、水温、流速、流向；地表水以天池、二道白河、三道白河及典型泉眼为对象，监测水位、流量、流速，同步记录降水、气温、蒸发等气象数据<sup>[2]</sup>。监测按丰、平、枯水期每月1次开展，暴雨、融雪等重点时段加密，总监测周期不少于2年。数据处理采用格拉萨斯准则剔除异常值并结合野外核查修正，利用 Surfer 进行空间插值绘制水动力场分布图，通过 Excel、Origin 开展统计分析，计算水位变差、平均流速等参数<sup>[3]</sup>。同时收集区域地质勘察、水文地质、气象及前人研究成果，完善数据体系，为水动力场时空演化及耦合关系分析提供支撑。

### （二）地下水动力场时空演化

长白山地下水动力场受地质构造、岩性、气象及地表水体共同控制，时空异质性显著<sup>[4]</sup>。时间上与气象周期同步，丰水期（7—8月）降水与融水补给充足，浅层潜水水位上升1.5—2.0m，深层承压水上升0.3—0.8m，流速加快、流向稳定；平水期（5—6月、9—10月）补给减弱，水位缓降、变幅小；枯水期（11月—次年4月）以排泄为主，水位达全年最低，浅层潜水下降0.8—1.2m，深层水位较稳，流速减缓，部分区域流向反转<sup>[5]</sup>。空间上呈明显分带性：高海拔天池周边以浅层潜水为主，受天池水位控制，多向天池汇聚；中低海拔河谷区潜水与承压水共存，地下水补给地表水；深大断裂带水力紊乱、梯度大、流速快，为水交换核心区。此外，地下2km处温度66—110℃，地热异常区地下水温和动力特征与常规区域差异显著。

### （三）地表水动力场时空演化

长白山地表水体主要有天池、河流、泉眼，其水动力场时空演化受降水、冰雪融水、地下水补给及地形地貌控制<sup>[6]</sup>。天池总蓄水量20.4亿立方米，水位变化平缓，年变幅0.5—1.0米，8—

9月丰水期水位最高，靠降水与地下水补给；12月至次年3月封冻枯水期，冰层厚约1.2米，蒸发减弱，水位缓降，由深层地下水维持，呈现冬蓄春融、夏盈秋稳特征<sup>[7]</sup>。湖水经北侧阀门流出，形成乘槎河、长白瀑布，汇入二道白河，为松花江源头<sup>[8]</sup>。河流时空差异明显，丰水期流量大增，为枯水期3—5倍，水位上涨1.0—1.5米；平水期稳定；枯水期流量最小，部分支流断流，以地下水补给为主。空间上，高海拔河段流量小、流速快，冰雪融水补给突出；中低海拔河段流量大、流速缓，断裂带附近地下水补给占比超60%；下游流量稳定，受地表水与地下水相互作用影响。泉眼流量多较稳定，靖宇、安图部分泉眼日允许开采总量36.37万吨，受深层地下水控制，季节变化小；地热泉（如聚龙泉）水温40—70℃，流量与水温受地热及地下水共同影响，时空变化复杂。

### （四）地表水与地下水水力耦合关系识别

采集长白山2016—2020年不同区域、不同类型水体（浅层潜水、深层承压水、天池水、河流地表水、泉眼水）样品57组，采用多种设备检测主要离子含量，结合相关方法分析水化学特征、演化规律及耦合关联<sup>[9]</sup>。结果显示，研究区水体整体呈弱碱性、低盐度，TDS含量低，符合优质水资源特征。地下水以 $\text{HCO}_3^-$ - $\text{Na} \cdot \text{Mg} \cdot \text{Ca}$ 型为主，深层承压水偏硅酸含量高，是长白山矿泉水特质的核心成因，浅层潜水受降水和地表水影响，水化学类型与地表水相近；地表水以 $\text{HCO}_3^-$ - $\text{Na}$ 型为主，天池水特征均一，河流水体离子含量随流域上下游呈现差异。水化学演化上，地下水从浅层到深层、地表水从上游到下游，离子含量均升高、水化学类型趋于复杂，且两者离子含量（尤其 $\text{Na}^+$ 、 $\text{HCO}_3^-$ ）相关性显著，验证了耦合关系。

## 二、水化学与同位素示踪下的耦合机制

### （一）水化学特征及演化规律

2016—2020年采集长白山浅层潜水、深层承压水等5类水体样品57组，采用相关设备检测主要离子含量，结合 Piper 图等方法分析水化学特征及演化规律，揭示地下水与地表水耦合关联<sup>[10]</sup>。研究表明，两者整体呈弱碱性、低盐度，TDS含量低，符合优质水资源特征。地下水以 $\text{HCO}_3^-$ - $\text{Na} \cdot \text{Mg} \cdot \text{Ca}$ 型为主，深



层承压水偏硅酸含量高，是长白山矿泉水特质核心成因；浅层潜水受降水和地表水影响，部分与地表水（主要为  $\text{HCO}_3^-$ -Na 型）水化学类型相近。天池水化学特征均一，河流水化学特征随流域呈现空间差异。地下水从浅层到深层、地表水从上游到下游，离子含量均升高、水化学类型趋于复杂，且两者主要离子含量相关性显著，印证耦合关系。

### （二）环境同位素特征

以氢氧稳定同位素（ $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ ）为示踪剂，采集地下水、地表水、大气降水样品并经同位素比值质谱仪检测，分析长白山不同水体同位素特征，明确其补给来源及耦合关联，结合相关研究完善同位素示踪体系。大气降水是主要补给来源，其同位素含量夏季受海洋水汽影响而富集，冬季受大陆气团影响而贫化；浅层潜水同位素与大气降水、地表水相近，耦合密切，深层承压水同位素偏贫化且时空差异明显，受地质构造控制，与地表水间接耦合；天池水接受大气降水和深层地下水“隐式”补给，河流水从上游到下游同位素逐渐贫化，体现与深浅层地下水的耦合演化。此外，部分地下水同位素与西藏羌塘盆地泉水吻合，推测存在跨区域地下径流补给。

### （三）同位素示踪耦合关系量化

基于  $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  同位素数据，结合水化学数据，采用同位素质量平衡模型（HydroCalculator 软件）、端元混合模型（以大气降水等为端元、同位素为示踪指标），量化长白山地下水与地表水耦合关系、交换比例及时空特征，弥补水动力场分析局限。研究表明，交换比例时空差异显著：时间上，丰水期地表水与浅层地下水双向补给比例较高，平水期均下降，枯水期地下水补给占比升至 50%–70%、地表水补给不足 10%；空间上，中低海拔河流沿岸地下水补给占比高，天池周边地表水补给占比高，深大断裂带双向交换强度最大。此外，同位素计算的地表水蒸发与补给比（40%）与水文模型结果吻合（相关系数 0.81），验证了方法可靠性。

## 三、深大断裂与地热异常对耦合关系的控制作用

### （一）深部构造对地下水系统的控水机制

基于  $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  同位素数据，结合水化学数据，采用同位素质量平衡模型（HydroCalculator 软件）、端元混合模型（以大气降水等为端元、同位素为示踪指标），量化长白山地下水与地表水耦合关系、交换比例及时空特征，弥补水动力场分析局限。研究表明，交换比例时空差异显著：时间上，丰水期地表水与浅层地下水双向补给比例较高，平水期均下降，枯水期地下水补给占比升至

参考文献

50%–70%、地表水补给不足 10%；空间上，中低海拔河流沿岸地下水补给占比高，天池周边地表水补给占比高，深大断裂带双向交换强度最大。此外，同位素计算的地表水蒸发与补给比（40%）与水文模型结果吻合（相关系数 0.81），验证了方法可靠性。

### （二）水热耦合特征分析

长白山天池火山是我国东部潜在高温地热资源区，地下岩浆囊提供稳定热源，2km 深处温度 66—110℃，12km 深处 313—417℃，天池及望天鹅火山喷发中心地热异常显著。其水热耦合系统特征体现在三方面，水温上，地热区地下水、地表水水温显著高于非地热区，浅层地下水 15–30℃、深层 40–70℃，聚龙泉最高超 80℃，二道白河部分河段冬季不结冰；水动力场上，高温使地下水密度减小、流速加快，形成热对流循环，与地表水形成地热驱动–水动力循环–耦合交换良性循环，模型模拟印证两者强烈耦合；水化学上，地热地下水以  $\text{HCO}_3^-$ -Na 型为主，富含  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{F}^-$  等特征离子，地表水体受其补给，水化学类型向该类型演化。

### （三）深层地下水对地表水体的“隐式”补给

长白山深层地下水（深度 >100m）主要储存于深大断裂带及火山岩深层裂隙，受地质构造与地热活动控制，以隐式补给方式间接补给地表水体，无明显直接通道，这是天池水量稳定的关键。采用水量平衡法、同位素示踪法结合监测数据分析表明，该补给具有稳定、隐蔽、长期的特点。天池周边流域多年平均排泄量大于降水量，外源水年补给 23.25 亿  $\text{m}^3$ ，推测补给来自远源深层地下水（可能为西藏高原河流渗漏形成的跨区域地下径流）。补给主要集中在天池周边（年补给约 0.157 亿  $\text{m}^3$ ，填补水量差额）、二道白河上游（占河流总补给 20%–30%）及地热异常区域（占 30%–40%），时间上无季节差异，与浅层地下水补给互补。同位素示踪验证了隐式补给的存在，其不仅补充水量，还影响地表水体水化学与水温，是该区域水耦合关系的核心特色。

## 四、结束语

本文以长白山地下水系统与地表水体耦合关系为核心研究内容，运用水动力监测、水化学检测、氢氧稳定同位素示踪及数值模拟等多种方法，系统探究了研究区地下水与地表水体的耦合特征、演化规律及深层控制机制。研究填补了长白山区域地下水与地表水体耦合关系系统性研究的空白，完善了火山岩区山–水–岩–热四位一体水资源系统的耦合研究理论与技术方法，为区域水资源合理开发、矿泉水资源保护、生态环境修复及用水安全保障提供了重要的科学依据与技术支撑。

[1]王贺.季节性冻融作用下长白山区地下水形成与演化研究[D].吉林:吉林大学,2023.

[2]张玉珊,崔世平,张敏.松嫩平原地下水系统循环特征[J].吉林地质,2014(3):102–104. DOI:10.3969/j.issn.1001-2427.2014.03.025.

[3]林涛,汪少勇,邓元博,等.长白山北坡冬季不同水体稳定同位素特征及其环境意义[J].环境化学,2026,45(1):93–104. DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2024061705.

[4]韩心宇.哈尔滨市地下水水源长序列均衡计算与评价[D].黑龙江:黑龙江大学,2021.

[5]王美玉,戴长雷,王羽.松花江流域地下水资源量评价区划与分析[J].水利科学与寒区工程,2021,4(3):62–67. DOI:10.3969/j.issn.2096-5419.2021.03.014.

[6]谷志琪,卞建民,马于曦,等.基于SD模型的长白山安图县矿泉水资源承载力研究[J].东北师大学报(自然科学版),2022,54(4):136–143. DOI:10.16163/j.cnki.dslkxb.202012036.

[7]代策.长白山矿泉水集中区水资源开发利用水平评价和优化配置研究[D].吉林:吉林大学,2022.

[8]江巧宁,陈建生.深循环地下水补给长白山天池的水量平衡分析[J].水资源保护,2015(5):7–13. DOI:10.3880/j.issn.10046933.2015.05.002.

[9]常泽华.耦合冻融过程的长白山江源区地下水模拟研究[D].黑龙江:黑龙江大学,2022.

[10]于成龙.长白山轨道工程对主要地下水径流的影响评价[J].中国非金属矿工业导刊,2019(2):37–40. DOI:10.3969/j.issn.1007-9386.2019.02.012.

# 生态环境在线监测数据异常识别研究

张有福

呼和浩特市生态环境监控中心, 内蒙古 呼和浩特 010020

DOI:10.61369/EAE.2026040002

**摘 要 :** 生态环境在线监测数据异常既包括设备失真、传输缺陷和量值漂移, 也包括工况变化引起的真异常与伪异常混杂问题。文章围绕生态环境在线监测数据异常识别展开研究, 先梳理异常来源和异常分类, 再从阈值判别、时序分析、多变量关联和智能预警等方面总结识别方法, 最后提出人工复核、场景化校验和模型迭代相结合的闭环路径。研究认为, 在线监测异常识别的关键不在于规则设置得越严越好, 而在于让规则、算法和业务复核能够共同区分设备异常、数据异常和排放异常。

**关 键 词 :** 生态环境在线监测; 数据异常; 异常识别; 时序分析; 智能预警

## Research on Abnormal Identification of Ecological Environment Online Monitoring Data

Zhang Youfu

Hohhot Ecological Environment Monitoring Center, Hohhot, Inner Mongolia 010020

**Abstract :** Abnormal online monitoring data of ecological environment includes both equipment distortion, transmission defects, and value drift, as well as the mixed problem of true and false anomalies caused by changes in working conditions. The article focuses on the identification of anomalies in online monitoring data of ecological environment. Firstly, the sources and classifications of anomalies are sorted out. Then, identification methods are summarized from the aspects of threshold discrimination, time series analysis, multivariate correlation, and intelligent warning. Finally, a closed-loop path combining manual review, scenario verification, and model iteration is proposed. Research suggests that the key to identifying anomalies in online monitoring is not to set stricter rules, but to enable rules, algorithms, and business reviews to jointly distinguish equipment anomalies, data anomalies, and emission anomalies.

**Keywords :** online monitoring of ecological environment; data abnormality; abnormal recognition; time series analysis; smart early warning

## 引言

在线监测系统持续扩容后, 生态环境管理越来越依赖连续数据来识别风险、评估排放和辅助执法。然而, 平台看到的异常并不都来自真实污染过程, 其中既有传感器漂移、通信丢包、停机补传, 也有负荷切换和治理设施调整带来的正常波动。若不区分异常来源, 很多真问题会被当成设备噪声忽略, 很多假问题又会被反复核查消耗监管资源。因此, 异常识别研究的核心, 不是简单提高报警数量, 而是提高异常结论与真实场景之间的一致性。

## 一、生态环境在线监测数据异常的主要来源

### (一) 仪器漂移和量值失真会在长周期内累积成系统偏差

在线监测仪器并不会一直保持理想稳定状态, 零点漂移、量程偏差、采样管路污染和比对维护滞后, 都会使监测值逐步偏离真实水平。这类问题最难识别之处在于曲线往往依然连续, 看上去“很像真的”, 但长期偏差会不断累积并最终误导分析结果。环境在线监测数据质量控制研究指出, 采集端质控一旦松动, 后续平台看到的很多异常其实并不是排放变化, 而是量值失真。异

常识别首先要识别那些由设备状态变化引起的系统偏差, 而不能把所有连续曲线都默认当作真实排放轨迹<sup>[1]</sup>。异常识别起点不应只看单个点位超限, 还要同步审视采样链完整性、运维触发记录和时间同步状态, 避免把链路缺陷误判成排放异常。缺少这一层校验, 系统很容易把链路缺陷误读成排放波动, 后续判断基础也会被一起带偏。

### (二) 传输缺陷和平台处理错误会制造结构化假异常

数据异常并不只发生在前端仪器, 传输断点、补传逻辑、时间戳错位、字段映射错误和状态码混乱, 同样会制造看似规律的



假异常。例如同一段时间数据被重复入库、补传数据覆盖原始值、离线状态被误写为零值，这些问题在图形上都可能表现为突降、平直或突升。污染源排放数据质量影响因素研究指出，平台规则和数据处理流程本身也是异常生成的重要来源。异常识别需要同时盯住前端数据和中后台处理轨迹，避免把结构化处理错误误判为现场排放异常<sup>[2]</sup>。工况波动解释需要结合治理设施响应迟滞、旁路切换和短周期负荷变化，因为很多异常并非数值本身错误，而是语境缺失导致的误识别。语境一旦缺失，原本正常的短时响应就会被错误归为异常，从而推高不必要的核查负担。

### （三）工况变化和治污设施切换会形成真假混杂的业务异常

业务异常最复杂的地方，在于它既可能是真实风险，也可能是合理波动。设备启停、负荷切换、旁路切换、冲洗校准和治污设施检修，都会让监测曲线出现阶段性变化。如果系统缺少工况标签和维护记录，这些波动很难被正确解释。污染源在线自动监测数据智能预警研究表明，异常识别如果脱离运行场景，只靠时间序列本身作判断，往往会把部分正常工况变化误判为排放异常。业务异常识别必须把工况语义纳入分析框架，才能在“真异常”和“伪异常”之间建立边界。平台若只保存结果值而不保留补传标识、判废原因和人工修正痕迹，后续训练样本就会被污染，模型学习到的也会是混杂规则。只有把这些过程痕迹完整保留下来，样本库才不会在多轮处理后丢失原始判定依据。

## 二、在线监测数据异常识别的基础规则方法

### （一）阈值超限与突跳判别适合筛查显性异常

显性异常最适合用规则方法快速识别，如突跳、断崖、长时间恒值、超量程和数据缺测后异常回填等。这类规则透明、可解释，适合作为异常识别第一层筛查，把大量明显问题尽快拦截出来。规则方法的关键不在于条目越多越好，而在于阈值是否分因子、分行业、分场景设置。如果所有数据都套用同一波动阈值，在高波动行业中会制造大量误报，在低波动因子上又可能放过慢性异常。规则方法要与监测对象特征保持一致，才能让第一层筛查既灵敏又不过度噪声化。采集端质控还应增加维护前后对照、零跨复检和异常点回看，使同一设备在不同维护阶段的稳定性差异能够被持续追踪。这样才能分清是设备状态变化，还是维护动作本身引入了新的扰动因素。

### （二）时序连续性与周期性分析有助于识别缓慢漂移异常

有些异常并不会以一次性突变出现，而是表现为缓慢抬升、缓慢回落、周期被打断或峰谷结构异常变化。对这类问题，仅用瞬时阈值很难发现，需要通过时序连续性和周期性分析来判断其是否偏离历史规律。若同一监测点在相似工况下长期高于历史中位水平，或原本稳定的昼夜节律突然消失，就需要进一步排查是否存在仪器漂移、采样异常或治理设施状态变化。时序分析的价值，在于把异常从“单点高低”提升到“整体走势是否失常”的层面，使一些不显眼但影响很大的慢性问题不被忽略。对传输链异常的识别，可增加字段漂移监测、频率缺口扫描和时序错位校核，先排除链路问题，再进入排放逻辑层面的判断。先排除链路

故障，再做排放解释，识别结果才不会在前置环节上反复失真。

### （三）关联参数比对能识别单因子正常但逻辑失衡的异常

在线监测数据很多时候不是数值离谱，而是逻辑不通。例如浓度曲线大幅波动但流量和负荷完全静止，或排放值稳定不变但氧量、温度和运行状态明显切换，这些现象都提示单因子虽然看着正常，整体逻辑却已经失衡。污染源排放数据质量研究说明，多参数关联是区分“真排放变化”和“假数据变化”的重要方法<sup>[3]</sup>。异常识别不能停留在单点数据是否超线，而应把浓度、流量、温度、设备状态、维护记录等一起纳入比较，使异常判断具备更强的业务解释力。语义层建模时要把停机、低负荷、切料、冲洗、标定和故障旁路分别编码，只有状态刻画足够细，模型输出才不会过度泛化。状态划分越粗，模型越容易把不同来源的问题压成同一种异常表型。

## 三、复杂场景下的智能识别方法

### （一）基于特征提取的模型更适合处理多维时序混杂问题

当监测因子增多、采样频率提高、异常模式变复杂后，单纯人工制定规则会迅速遇到边界不足的问题。此时更适合先对时间窗口、波动幅度、变化速率、峰谷分布和关联参数差值等特征进行提取，再由分类模型或聚类模型识别异常模式。这样做的优势在于，它能把看似无序的曲线变化转成可比较的特征结构，从而更高效地识别重复出现的异常形态。智能模型的意义不是替代监管经验，而是让高维数据先完成初步分组和优先级排序，使人工复核更聚焦。显性异常规则库应定期用历史误报案例回标，校正连续平值、极端跳变和量程顶格的识别阈值，避免规则长期僵化后命中率下降。规则若长期不校正，典型异常也会逐渐失去应有的识别灵敏度和稳定性。

### （二）机器学习辅助预警能提高隐性异常的提前发现能力

隐性异常往往出现在短时高值之前或设备失效之前，其前兆可能只是多个变量之间的弱相关变化。机器学习模型在这类场景下的优势，在于能够从大量历史数据中捕捉“异常前的异常”，即在显著问题出现前发现模式偏移。人工智能辅助污染源追踪研究指出，算法更适合完成复杂场景下的高频筛查和候选异常定位，而最终结论仍需回到业务核验。在生态环境在线监测场景下，机器学习更适合承担预警前置层角色，把需要人工关注的时间窗提前挑出来，而不是直接替代监管判定。隐性异常更适合采用多变量联动判别，例如把浓度、流量、氧含量、负压和电流共同纳入窗口分析，识别整体逻辑是否自洽。这种整体验证比单点判断更能发现数值表面正常但机理关系已经断裂的情况<sup>[4]</sup>。

### （三）智能识别必须与质量标注和样本更新机制同步建设

很多智能识别系统效果不稳定，并不是算法本身能力不足，而是缺少高质量标注样本和持续更新机制。若训练样本中将设备异常、补传异常和真实排放异常混在一起，模型学习到的就是模糊甚至混乱的判断边界，后续预警自然容易误判。若模型上线后不持续回收误报、漏报和人工复核案例，识别能力也会随着工况变化、设备更新和监管场景变化而逐渐老化。污染源在线自动监

测数据智能预警研究表明，系统效果依赖数据分析与业务反馈形成闭环。因此，智能识别建设必须同步规划样本标注、争议复盘、案例入库和模型迭代，让模型在真实应用中不断校正，而不是依赖固定样本一次训练后长期不变。机器学习模块输出预警结果时，还应同步提供关键特征贡献、相似案例索引和历史处置记录，帮助人工复核快速判断命中原因。解释信息足够充分后，复核人员就不必再从头翻找同类工况和过往记录，预警处置效率也会更高。

## 四、异常识别结果的复核与应用闭环

### （一）人工复核是区分设备异常和排放异常的必要环节

无论规则还是算法，都只能给出“值得怀疑”的对象，而不能完全替代人工复核。真正的复核应包括设备状态检查、工况台账核对、维护记录回看和必要的现场比对监测。只有这样，系统识别出来的异常才能被分流为设备问题、数据问题或排放问题，不至于把所有报警都推向现场执法。人工复核并不是降低智能化程度，而是在关键节点上为异常判定增加事实支撑，使系统输出真正能进入管理动作。异常处置闭环不能止于标记完成，还要记录是否复测、是否到场、是否修正规则以及是否更新样本库，才能支持持续迭代。闭环记录越完整，后续做版本优化时越能看清哪一类动作真正降低了误判。

### （二）按异常等级分流处置有助于降低无效核查成本

不是所有异常都需要同样强度的响应。突跳和超量程值适合快速远程核查，长期漂移适合安排维护比对，多变量逻辑失衡则更适合结合工况台账深度复盘。通过设置异常等级和分流处置路径，可以把有限核查资源优先投向风险更高、后果更大的异常对象。这样既能避免平台天天报警、现场无从下手，也能提高真正

高风险问题的发现率和处置时效。异常识别系统只有与分级处置机制相连，才不会陷入“发现很多、解决很少”的低效循环。数据治理回写阶段应比较误报率、漏报率和人工复核负荷变化，若只追求命中数量上升，往往会把系统推向低解释性的极端。只有三项指标一起观察，系统优化才不会只追求命中数量而忽略业务可用性<sup>[5]</sup>。

### （三）把识别结果回写平台规则和运维考核才能形成持续改进

异常识别工作最怕每次都从头开始。更有效的做法，是把每次复核后的结论回写到规则库、模型样本库和运维考核台账中，形成持续学习机制。某类设备反复出现同样异常，就应追溯其维护机制是否需要调整；某类规则频繁误报，就应修订其阈值和适用条件；某类企业总在同一工况下触发异常，就应把该工况列入重点核查场景。通过这种回写机制，异常识别系统会越来越贴近真实业务，而不是停留在静态预警工具层面。模型更新必须设置灰度验证和回溯评估，先检查新旧版本对典型异常样本的判定差异，再决定是否正式替换现有识别策略。灰度校验能提前暴露版本替换后的偏差扩散，避免整个平台上线后被动返修。

## 五、结语

生态环境在线监测数据异常识别的核心，不是把更多数据判成异常，而是更准确地区分设备异常、处理异常和排放异常。规则筛查、时序分析、多变量交叉和智能预警各有边界，只有与人工复核、分级处置和样本回写机制结合起来，异常识别体系才能持续稳定运行。异常识别做得越精确，在线监测数据在监管和治理中的可信度就越高。

## 参考文献

- [1] 全吉昌. 污染源在线自动监测数据的智能分析与预警系统研究 [J]. 资源与环境科学进展, 2024, 3(1): 12-15.
- [2] 张飞杰. 环境在线监测数据质量控制方法及其有效性 [J]. 低碳世界, 2026, 16(1): 28-30. DOI: 10.16844/j.cnki.cn10-1007/tk.2026.01.011.
- [3] 邓春娟, 杨震, 李亚杰, 等. 污染源排放数据质量影响因素分析及对策 [J]. 四川环境, 2022, 41(3): 162-168.
- [4] 郭鹏. 人工智能辅助下的 VOCs 排放源追踪与监测技术研究 [J]. 低碳世界, 2026, 16(1): 34-36. DOI: 10.16844/j.cnki.cn10-1007/tk.2026.01.005.
- [5] 申凌霄. 挥发性有机物在线监测与溯源技术研究 [J]. 皮革制作与环保科技, 2025, 6(18): 56-58. DOI: 10.20025/j.cnki.CN10-1679.2025-18-19.

# 地下水监测技术在生态环境监测中的作用

韩涛

呼和浩特市生态环境监控中心，内蒙古 呼和浩特 010010

DOI:10.61369/EAE.2026040003

**摘 要：** 地下水是生态环境系统的核心组成部分，维系着区域水文循环、生态平衡与生态系统稳定，也是生态环境监测工作的重点内容。随着生态环境保护工作不断精细化、常态化发展，传统监测方式已无法适配现代生态环境治理需求，各类现代化地下水监测技术得到广泛应用。地下水监测技术能够精准捕捉地下水水质、水位、水流及水文动态变化特征，为生态环境现状研判、污染防治、生态修复及环境管理提供核心依据。本文基于生态环境监测工作实际，梳理地下水监测技术的主要类型，分析其在生态环境监测中的核心作用，总结当前技术应用存在的问题，并提出对应的优化应用策略，旨在为提升生态环境监测质量、推进地下水生态保护与治理提供理论参考。

**关 键 词：** 地下水监测技术；生态环境监测；生态保护；环境治理

## The role of Groundwater Monitoring Technology in Ecological Environment Monitoring

Han Tao

Hohhot Ecological Environment Monitoring Center, Hohhot, Inner Mongolia 010010

**Abstract：** Groundwater is a core component of the ecological environment system, maintaining regional hydrological cycles, ecological balance, and ecosystem stability. It is also a key focus of ecological environment monitoring work. With the continuous refinement and normalization of ecological environment protection work, traditional monitoring methods are no longer suitable for modern ecological environment governance needs, and various modern groundwater monitoring technologies have been widely applied. Groundwater monitoring technology can accurately capture the characteristics of groundwater quality, water level, water flow, and hydrological dynamic changes, providing core basis for ecological environment assessment, pollution prevention and control, ecological restoration, and environmental management. This article is based on the practical work of ecological environment monitoring, sorting out the main types of groundwater monitoring technology, analyzing their core role in ecological environment monitoring, summarizing the problems in current technology application, and proposing corresponding optimization application strategies, aiming to provide theoretical reference for improving the quality of ecological environment monitoring and promoting groundwater ecological protection and governance.

**Keywords：** groundwater monitoring technology; ecological environment monitoring; ecological protection; environmental governance

## 引言

地下水作为重要的水资源与生态环境要素，广泛参与自然生态系统的物质循环与能量流动，对陆地植被生长、土壤环境稳定、地表水补给等具有关键支撑作用。在工业化与城镇化持续推进的背景下，地下水面临污染侵入、水位下降、水文结构失衡等一系列生态环境问题，间接引发植被退化、土壤盐碱化、水生态失衡等次生环境问题，严重制约区域生态环境可持续发展。生态环境监测是生态环境保护与治理的前置性、基础性工作，而地下水监测是水环境监测与生态质量评价的重要环节。科学运用地下水监测技术，能够实现对地下水生态状况的动态、全面、精准监测，及时掌握地下水生态变化规律，精准识别各类生态环境风险，为生态环境管控、污染治理和生态修复工作提供数据支撑与技术保障，对构建完善的生态环境监测体系、提升生态环境治理现代化水平具有重要现实意义。



## 一、生态环境监测中主要的地下水监测技术

### （一）地下水水位动态监测技术

地下水水位动态监测技术是基础性的地下水监测手段，核心用于持续追踪地下水埋深、水位升降及水文动态变化情况。该技术依托专业监测设备搭建常态化监测点位，可实现全天候、自动化的水位数据采集与记录，能够稳定捕捉不同季节、不同时段地下水水位的动态波动规律。通过长期连续监测，可清晰掌握区域地下水补给与排泄平衡状态，精准判断地下水储量变化趋势，为研判区域水文生态稳定性、识别地下水超采等生态问题提供基础依据，是开展地下水生态评价的基础技术支撑。

### （二）地下水水质监测技术

地下水水质监测技术聚焦地下水水体组分与水质状态，主要检测水体中各类化学指标、污染组分及理化性质的变化情况。该技术涵盖现场快速检测与实验室精准分析两种模式，可全面排查地下水水体污染情况、水质达标状态及水质演变趋势。通过对地下水水质的常态化监测，能够及时发现水体污染隐患，明确水质异常的变化特征，精准区分自然因素与人为活动对地下水水质的影响，为地下水污染防治、水质改善及水生态健康评价提供核心技术支撑。

### （三）地下水生态遥感监测技术

地下水生态遥感监测技术属于新型非接触式监测技术，依托遥感设备与空间信息技术，实现大范围、立体化的地下水生态监测。该技术可突破传统点位监测的局限性，覆盖大面积区域，通过捕捉地表植被长势、土壤湿度、地表水体变化等关联特征，反演区域地下水分布、储量及生态变化状况。该技术适配大范围生态区域的普查式监测工作，能够快速掌握区域地下水生态整体格局与变化趋势，为宏观生态环境监测与治理规划制定提供重要参考。

### （四）生物监测与同位素示踪技术

该技术可弥补传统物理化学监测方式的不足，大幅增强生态环境监测能力。针对地下生物检测，主要采取高通量测序技术分析微生物群落，以石油降解菌或反硝化菌等特定功能菌群，揭示地下水的有机物污染程度；在河流、泉眼等地下水排泄区域采集底栖生物指标，综合评估地下水水质对生态系统的支撑能力。针对同位素示踪技术，基于稳定同位素，综合研判地下水的补给来源和演化过程，可辅助分析地下水的人为污染程度；检测地下水的放射性同位素，可用于估算地下水的滞留时间和污染物迁移速率。此类技术大多应用于气候变化及地下水污染溯源等研究领域。

## 二、地下水监测技术在生态环境监测中的核心作用

### （一）支撑生态环境现状精准研判

地下水生态状态是区域生态环境质量的重要评价指标，地下水监测技术能够全方位采集地下水水文、水质、生态相关的动态信息，构建完整的地下水生态数据体系，帮助工作人员全面掌握

区域地下水生态现状。通过持续监测数据的对比分析，可清晰梳理地下水生态的演变规律，精准判断区域生态环境整体质量，识别生态环境薄弱区域与潜在问题，彻底改变传统经验化、模糊化的研判模式，让生态环境现状评价更加科学、精准、客观，为各项生态环境工作开展奠定基础。

### （二）助力地下水污染风险防控

地下水具有隐蔽性强、更新周期长、污染修复难度大的特点，一旦遭受污染将对区域生态环境造成长期负面影响。地下水监测技术可实现对地下水水质的常态化动态监测，及时捕捉水质异常变化，提前识别污染隐患与污染扩散趋势，实现污染问题的早发现、早预警、早处置。同时，通过监测数据可精准锁定污染影响范围与污染程度，为污染溯源、风险评估、污染管控工作提供支撑，有效防范地下水污染扩散引发的系列生态环境问题，筑牢区域水生态安全防线。

### （三）服务生态修复与环境治理工作

生态环境修复与治理工作需要科学的数据支撑与效果验证，地下水监测技术贯穿地下水生态修复的全过程。在修复前期，监测数据可为修复方案制定提供现状依据，明确修复重点与治理方向；在修复中期，动态监测可实时追踪水体、水位变化状态，及时调整修复策略，保障治理工作的科学性与针对性；在修复后期，通过持续监测可验证生态修复成效，判断地下水生态系统的恢复状态，为巩固治理成果、建立长效管护机制提供重要支撑，推动生态环境治理工作闭环落地。

## 三、地下水监测技术应用的优化路径

### （一）完善立体化监测体系

传统的地下水监测网络主要根据水文地质单元布设，监测重点在于获取资源属性，而搭建生态环境监测体系，则需强化健康属性和环境属性。为突破传统单点监测覆盖面不足、数据碎片化的问题，需整合各类地下水监测技术优势，构建点位监测与遥感监测相结合、静态检测与动态追踪相结合的立体化监测体系。合理优化监测点位布局，实现全域范围内无死角、全覆盖的常态化监测，丰富监测数据维度，保障监测数据的连续性、完整性与全面性。

针对生态环境较为脆弱的区域，可搭建生态敏感区靶向监测体系，实现数据精准加密。在部分集中式饮用水水源地及上游补给区域，搭建上中下三游监测网络，重点监测地下水中的有机农药及硝酸盐等有毒指标含量，对生态系统的危害影响；在河流湖泊及重要湿地等区域，设置水位与水质监测井，主要用于监测地下水位，矿化度及埋深情况，综合评估地下水对地表植被的影响机制。

针对农业及工业污染源，建立立体化的污染源监控网络。针对危废处置厂、化工园区等重点污染场所，在地下水流向的下游地区布设污染扩散监控井，用于监控化工污染的扩散轨迹，避免有毒有害物质渗透至含水层。在北方丘陵及华北平原等农业集中区域，适当增加地下水监测点位，布设密度，关注地膜微塑料及

氮磷流失等因素对地下水的影响。针对岩溶区域采用高精度监测方式，进行盲区监测，避免地表污水经由落水洞渗入地下水系。

（二）推进监测技术智能化升级

依托信息化、智能化技术推动地下水监测技术升级改造，搭建自动化监测、数据实时传输、智能分析预警的一体化监测平台。替代传统人工采样、人工分析的低效模式，减少人工操作带来的误差，提升监测工作的效率与精准度。通过智能系统实现数据自动汇总、分析与研判，自动识别异常生态状态并发出预警，大幅提升地下水生态风险处置的及时性，适配现代化生态环境治理的工作需求。

其一，搭建立体协同监测体系。突破各类介质壁垒限制，实现多维数据高效采集与衔接。基于 InSAR 微型干涉雷达技术，遥感监测地下水超采对地面沉降产生的影响，根据监测数据反向推演地下水储量变化，可有效弥补传统点状监测方法短板；地上采用物联网监测技术，依托 LPWAN 广域网技术实现偏远地区监测数据高效传输；配备低功耗且微型化的智能传感器，长期原位监测深层地下水压力、温度、pH 值等指标变化情况；地下采用地球物理监测技术，依托探地雷达、高密度电阻率法等先进技术，不需要开挖地表即可获取地下污染物流动轨迹，以二维或三维影像形式呈现，支持监测并对污染物的精准定位。

其二，引入 AI 技术深度赋能。相对于传统方式，AI 技术深度赋能下可以有效解决预警响应不及时、大规模数据处理难度大等问题。依托 LSTM、随机森林等机器学习算法，对采集的数据进行清洗处理，剔除环境干扰或设备故障等因素导致的异常值，从源头上提升数据整体质量。搭建长序列监测数据训练模型，模拟复杂水文地质条件下污染物在地下水的迁移轨迹，便于掌握扩散污染物的源头位置，针对后续污染物扩散趋势提前预警，从而将环境风险控制在合理范围内。

其三，研发新型污染物监测技术。面对新型污染物的治理需求，应持续研发污染物监测技术，以便更好地应对实际工作需要。例如，可开发以免疫分析原理为主的生物传感器，可实现氢化物、重金属物质的快速筛查。或大力推广激光诱导击穿光谱技术，在现场水环境监测中应用，这种方程式不仅可提升现场检测效率与精度，还可减少样品运输中的变质风险，最大程度上提升应急响应速度。

（三）搭建技术标准体系

地下水监测工作的规范化展开，离不开统一的技术标准体系支撑。面对持续增长的生态环境监测要求，需搭建全生命周期的

标准化监测体系，以保证采集的监测数据真实、准确、全面。故此，在现有标准体系中增加新污染物和生态指标的监测标准，如针对内分泌干扰物、微塑料、抗生素等新污染物，加快配套的技术规范和分析方法标准完善，弥补制度短板；将生态健康指标纳入地下水监测技术范畴，确保所采集的监测数据可直接用于区域生态风险评估中。针对数据混乱和类型不一的问题，需设定统一的技术规范，确定各类传感器的检出限，准确度和精密度以及生用条件的，保证现场各类传感器采集数据在同一监测体系保持一致性；加快地下水自动监测井的建设技术规范出台，从源头上规范统一数据传输模块，供电系统、监控防护的安装工艺，便于后期的设备调试和检修，将设备故障率降到最低。除此之外，针对不同水文地质条件进行全过程质量控制，避免受外界扰动因素出现采样假象；建立三级审核制度，现场运维人员在自行审核后，上传至技术中心二次审核，最后交由专家会审，检测全过程借助区块链技术进行数据加固，避免人为篡改数据影响整体数据精度。

（四）强化监测成果转化应用

建立监测数据与生态治理工作的联动机制，强化地下水监测成果的落地转化，避免监测与治理脱节。依托常态化监测数据，定期开展地下水生态质量评估，梳理区域地下水生态存在的突出问题，为生态环境规划、污染治理、生态修复、环境管控等工作提供精准的数据支撑与决策参考。同时，依托监测成果建立长效管护机制，持续巩固地下水生态保护成效，推动区域生态环境质量持续改善。除此之外，引入第三方运维单位，在市场化模式支持下，最大程度降低行政干预成本，提升地下水监测技术服务水平。

四、结束语

地下水监测技术是生态环境监测体系不可或缺的重要组成部分，是守护地下水生态安全、推进生态环境精细化治理的核心技术手段。各类地下水监测技术从水文动态、水质状态、宏观生态等多个维度，为生态环境现状研判、风险防控、修复治理提供了坚实支撑，对维护区域生态平衡、保障水生态安全、推动生态环境可持续发展具有重要意义。在生态环境治理现代化的发展背景下，需持续优化地下水监测体系，升级监测技术，强化成果转化，充分发挥地下水监测技术的核心价值，全面提升地下水生态保护与治理水平，为区域生态环境高质量发展提供坚实保障。

参考文献

[1] 万里. 地下水和土壤监测技术在环境监测中的运用要点分析 [J]. 皮革制作与环保科技, 2025, 6 (12): 70-72.  
[2] 经阔. 水文地质勘探技术在地下水环境监测井成井中的应用 [J]. 地下水, 2024, 46 (01): 139-140+154.  
[3] 刘德全; 张雪容. 生态环境监测技术培训教程 [M]. 中国环境出版集团: 202312. 694.  
[4] 张师豪. 煤矿周边地下水重金属污染监测与生态修复技术研究 [J]. 科技与创新, 2025, (04): 162-165.  
[5] 鲁珊珊. 水处理中环境监测技术及污染防治措施 [J]. 皮革制作与环保科技, 2022, 3 (07): 14-16.



# 城市大气污染成因及生态治理对策探究

洪冰婷

运城市生态环境局临猗分局, 山西 运城 044100

DOI:10.61369/EAE.2026040004

**摘 要 :** 近年来,我国城镇化进程不断加快,工业产业规模持续扩大,这使得城市大气环境污染问题日益严峻,已然成为阻碍人居环境改善和生态可持续发展的关键因素,呈现出复合型、区域性的污染特点。如今,城市大气污染不再仅仅是单一污染物排放所导致的,而是产业结构、能源利用方式、交通运输状况、气象条件以及生态建设等多个因素相互作用的结果。本研究聚焦我国城市大气污染的实际情况,从人为污染源和自然影响因素两个方面深入分析了大气污染产生的主要原因。同时,仔细梳理了当前生态治理工作中存在的问题与不足。在此基础上,结合生态文明建设的要求以及大气污染防治的政策方向,提出了具有针对性和系统性的生态治理对策。期望这些对策能够为城市空气质量的持续提升、区域生态环境的优化以及实现人与自然的和谐共生提供理论依据和实践指导。

**关 键 词 :** 城市大气污染; 污染成因; 生态治理; 减污降碳; 协同防控

## Exploration into the Causes of Urban Air Pollution and Ecological Governance Strategies

Hong Bingting

Linyi Branch of Yuncheng Ecological Environment Bureau, Yuncheng, Shanxi 044100

**Abstract :** In recent years, China's urbanization process has been accelerating, and the scale of industrial industries has continued to expand. This has made urban air pollution increasingly severe and has become a key factor hindering the improvement of living environment and ecological sustainable development, presenting a complex and regional pollution characteristic. Nowadays, urban air pollution is no longer solely caused by the emission of a single pollutant, but rather the result of the interaction of multiple factors such as industrial structure, energy utilization methods, transportation conditions, meteorological conditions, and ecological construction. This study focuses on the actual situation of urban air pollution in China, and deeply analyzes the main causes of air pollution from two aspects: anthropogenic pollution sources and natural influencing factors. At the same time, we carefully sorted out the problems and deficiencies in the current ecological governance work. On this basis, combined with the requirements of ecological civilization construction and the policy direction of air pollution prevention and control, targeted and systematic ecological governance measures have been proposed. We hope that these measures can provide theoretical basis and practical guidance for the continuous improvement of urban air quality, optimization of regional ecological environment, and realization of harmonious coexistence between humans and nature.

**Keywords :** urban air pollution; causes of pollution; ecological governance; reduce pollution and carbon emissions; collaborative prevention and control

## 引言

与传统的仅关注污染治理末端环节的模式不同,生态治理强调从系统的角度进行综合施治,注重从源头上防控污染,借助自然的自我修复能力,并建立长效的管控机制,这与新时代大气污染防治的核心要求高度契合。目前,学术界和行业内对于大气污染的研究大多集中在工业排放管控、机动车尾气治理等单一领域。然而,对于大气污染成因进行全面、系统的分析,以及从生态层面构建综合性治理体系的研究还相对不足。为了有效改善城市大气环境质量,使其实现常态化、长效化的提升,有必要深入梳理城市大气污染形成的多种原因,结合大气污染治理实践中存在的实际问题,构建一个全方位、多层次的生态治理体系。

## 一、城市大气污染的核心成因分析

城市大气污染的产生并非由单一因素所致，而是人为排放的污染物总量超出了大气环境的承载能力，再加上自然气象条件、地理环境的限制以及生态缓冲能力不足等因素共同作用的结果。总体而言，这些成因可分为人为主导成因和自然辅助成因两大类。

### （一）人为主导成因

#### 1. 产业结构不合理，工业污染排放量大

工业污染是城市大气污染的主要源头，特别是在以工业为主导的城市，高耗能、高排放产业占比过高的结构性问题依旧存在。像钢铁、水泥、焦化、玻璃、有色金属等传统重工业，不仅能耗高，而且污染物排放量巨大。尽管国家近年来大力推动超低排放改造，但部分企业的治理设施运行不稳定，废气收集也不彻底，无组织排放问题十分突出，持续向大气中排放颗粒物、二氧化硫、氮氧化物、挥发性有机物等污染物<sup>[1]</sup>。

与此同时，城市工业园区布局分散，对小微企业的管控普遍薄弱。部分小微企业生产工艺落后，环保设备简陋。为了降低生产成本，这些企业存在超标排放、间歇性停运治理设施等违规行为。由于污染排放零散，难以进行全方位监管，从而形成了大量隐性污染源。此外，部分城市产业转型缓慢，新旧动能转换衔接不顺畅，低端制造和粗放加工产业仍占有一定市场份额，进一步加重了大气环境的负担。

#### 2. 能源结构以化石能源为主，清洁化替代不足

长期以来，我国城市能源消费主要依赖煤炭、石油等化石能源，清洁能源占比偏低，这是大气污染难以根治的根本原因之一。从生产方面来看，火电、供热、工业锅炉等领域仍然高度依赖煤炭消费。即使完成了超低排放改造，大规模的煤炭燃烧仍会持续产生污染物排放。从生活方面来看，北方部分城郊和乡村地区的清洁取暖改造尚未全面覆盖，冬季散煤燃烧量大，燃烧效率低，污染物排放浓度高，且由于排放分散，难以进行集中治理，成为秋冬季大气污染的重要新增来源。

此外，石油制品消耗带来的污染问题也日益突出。城市中的机动车、工程机械、物流货车等燃油设备大量消耗成品油，在燃烧过程中排放氮氧化物、挥发性有机物等污染物，为臭氧和二次颗粒物的生成提供了物质条件。而风电、光伏、生物质能等清洁能源的推广受到地域、成本和储能技术等因素的限制，其替代速度和规模无法满足减污降碳的迫切需求<sup>[2]</sup>。

#### 3. 交通运输污染日益严重，移动源监管困难重重

近年来，城市机动车数量呈现出迅猛增长的态势，交通移动源已然成为城市大气污染的主要源头之一，并且在大中型城市大气污染中的占比不断攀升。一方面，私家车、网约车、出租车等燃油机动车持续排放尾气污染物。特别是老旧车辆，其尾气处理装置老化，污染物超标排放的问题尤为突出。另一方面，城市的物流运输、工程建设以及港口运输主要依赖重型柴油货车和非道路移动机械。这些设备不仅油耗高，而且污染物排放量大，加之其作业范围分散、流动性强，给监管工作带来了极大的挑战<sup>[3]</sup>。

城市交通拥堵状况也进一步加剧了污染的累积。在早晚高峰时段，车辆处于怠速行驶状态，燃油燃烧不充分，尾气污染物排放量大幅增加。密集的车流在城市近地面形成了污染聚集层，污

染物难以快速扩散，直接导致城区空气污染程度加重。目前，新能源车辆的替代主要集中在公共交通领域，私家燃油车的替代进程较为缓慢，交通领域的清洁化转型仍有很大的提升空间。

#### 4. 城市建设与生活面源污染点多面广

城市大规模建设所产生的扬尘污染是造成颗粒物污染的重要原因。在建筑施工、道路开挖、拆迁工程以及渣土运输等作业过程中，会产生大量扬尘。然而，部分施工单位并未严格落实围挡、喷淋、覆盖、渣土冲洗等防尘措施，导致扬尘无组织排放现象十分严重。与此同时，城市道路清扫保洁不及时、裸露土地未进行绿化以及矿山采石等问题，也在不断加剧扬尘污染。

生活面源污染同样不容小觑。城市中的餐饮油烟、居民生活散烧、垃圾露天焚烧以及烟花爆竹燃放等零散污染源，虽然单个点位的排放量相对较小，但由于其整体数量众多、分布广泛，且管控难度较大，累积起来的污染效应十分显著。此外，农村地区秸秆露天焚烧、畜禽养殖废气排放等农业面源污染，会随着大气环流扩散至城区，进一步加剧城市的区域性污染。

### （二）自然辅助成因

#### 1. 气象条件阻碍污染物扩散

气象条件是左右大气污染浓度的关键外部因素。静稳、逆温、高湿等不利气象状况会极大地降低大气的自净能力，致使污染物持续积聚。在秋冬季，我国中东部城市常出现静稳天气，此时风速极小，大气层结稳定，垂直对流运动微弱，大气边界层高度降低。这使得污染物既无法向上扩散，也难以向外传输，只能在近地面不断堆积，从而迅速形成雾霾天气。

逆温层的存在如同“大气保温屏障”，它抑制了空气的垂直交换，让污染物更难消散，加剧了污染物的滞留。而高湿天气会促使气态污染物转化为细颗粒物，进一步加重雾霾污染的程度。在夏季，高温强光的气象条件会加快挥发性有机物与氮氧化物的光化学反应，引发臭氧污染的爆发，形成季节性的污染高峰。研究显示，高浓度的气溶胶会使边界层上部大气升温、地表降温，造成污染与气象之间的恶性循环，进一步加剧污染物的累积<sup>[4]</sup>。

#### 2. 地理格局对空气流通形成限制

部分城市由于受到地形地貌的限制，大气扩散条件先天不足。像盆地、山谷型城市，四周被山脉环绕，地形封闭，空气流通的通道十分狭窄。这导致外部的洁净空气难以流入，本地排放的污染物也无法顺利扩散出去，很容易造成污染的滞留。

而在平原城市群，人口密集、产业集中，城市连片发展。区域内没有天然的通风屏障，污染物在城市之间相互传输、叠加，从而形成持续性的区域性污染。此外，随着城市建成区面积不断扩大，高层建筑密集分布，局部空气流通格局被改变，城区的通风能力被削弱，加剧了局部污染的聚集。

#### 3. 城市生态缓冲体系功能不足

城市中的绿地、湿地、林地等生态空间就像是大气天然的“净化器”，它们能够吸附颗粒物、吸收有害气体、调节微气候以及增强空气流通。然而，当前许多城市在城镇化建设过程中，存在着重开发、轻生态的问题。城市绿地覆盖率不足、绿地布局不均衡、城郊生态防护林受损、湿地面积萎缩等问题较为突出。

城区里碎片化的绿地和小型公园无法形成连续的生态缓冲带，对大气污染物的吸附和降解能力大幅降低。城市的生态自净能力难以应对污染排放的压力，无法有效缓解大气污染问题。

## 二、城市大气污染生态治理的优化对策

针对当前城市大气污染的多元成因与治理短板，需摒弃传统末端治理思维，坚持“源头防控、系统施治、生态修复、区域协同、长效管控”的原则，构建产业、能源、交通、生态、监管五位一体的生态治理体系，实现大气污染标本兼治。

### （一）优化产业结构，从源头上减少工业污染

产业结构的优化是解决大气污染问题的根本核心措施。其一，要严格执行产业准入负面清单制度，果断淘汰那些落后、低效的产能，有计划地让高耗能、高排放、低附加值的产业退出市场。对于钢铁、水泥、焦化等传统产业，要推动其朝着绿色化和智能化方向进行升级改造，全面开展重点行业的超低排放改造工作，保证工业废气能够稳定地达到排放标准。

其二，要大力扶持新能源、高端制造、节能环保等绿色低碳产业的发展，促进新旧动能的平稳转换，降低产业发展对环境造成的压力。同时，要规范工业园区的布局和管理，引导工业企业集中进入园区，实现集聚式发展，这样可以对污染物进行集中收集和统一治理，避免零散企业随意排放污染物的现象。

此外，还要加强对小微企业的环保监管，定期开展排污排查和整治工作，严厉查处超标排放、偷排漏排以及治理设施闲置等违法行为，强化企业在生态环保方面的主体责任，从源头上减少工业污染物的排放<sup>[5]</sup>。

### （二）调整能源结构，构建清洁低碳的能源体系

持续推动能源向清洁化方向转型，是从根本上解决化石能源污染问题的关键。一方面，要严格控制煤炭的消费总量，持续减少工业燃煤和散煤的使用量。在北方城市全面推进清洁取暖改造，扩大电采暖和气采暖的覆盖范围，彻底杜绝城郊和农村地区散煤燃烧的现象<sup>[6]</sup>。另一方面，要优化工业用能结构，引导企业更换燃煤锅炉和窑炉，推广使用电能、天然气、生物质能等清洁能源，提高工业清洁用能的比例。同时，要加大对清洁能源的开发和利用力度，根据不同地区的实际情况，推进城市风电、光伏、地热能等新能源的规模化应用，完善储能和输电等配套设施，提高清洁能源供应的稳定性。

要落实减污降碳协同增效的要求，逐步降低化石能源在能源消费中的占比，构建一个清洁、低碳、高效、安全的城市能源体系，实现能源消费和污染减排的同步推进。

### （三）优化交通体系严控移动源污染

聚焦交通污染短板，推动交通绿色转型。加快机动车清洁替代，淘汰老旧超标燃油车，推广新能源公共车辆，构建绿色交通体系。强化尾气监管，查尾气超标等违法行为，规范非道路移动机械管控。优化路网布局，缓解拥堵，减少怠速排放。发展公共

交通、共享单车，引导低碳出行。优化物流运输，推广绿色物流，鼓励大宗货物铁路、水路运输。

### （四）强化生态修复，提升净化能力

依托生态修复力打造大气生态屏障。科学规划生态空间，提升绿地覆盖率，在城区关键区域建防护绿地、生态林带。合理搭配植被，优选净化能力强的乡土树种。疏通通风廊道，打通空气流通通道。修复湿地、水系生态，调节微气候。加强城郊防护林建设，抵御外来污染，提升自净能力。

### （五）深化区域协同，构建联防联控格局

针对大气污染区域性，打破属地壁垒，构建全域协同体系。建立联防联控机制，统一标准、管控与考核，实现信息共享、应急联动、联合执法。加强跨区域溯源，精准定位责任。开展联合整治，聚焦重点时段全方位治理<sup>[7]</sup>。完善生态补偿，倒逼城市落实责任，实现区域大气环境共治共享。

### （六）完善监管体系，强化科技与制度支撑

构建智能化、常态化、法治化监管体系，为大气生态治理筑牢防线。升级大气环境监测网络，优化站点布局，覆盖城区、工业园区和城郊重点区域。借助大数据、物联网、卫星遥感等技术，搭建智能监测预警平台，精准锁定污染源头、预判污染趋势，推动治污从“被动”转向“精准”。加大科技研发投入，推广高效除尘、脱硫脱硝、VOCs治理等先进技术，提升污染治理精细化程度<sup>[8]</sup>。健全生态环保管理制度，细化大气污染治理考核细则，将空气质量改善纳入地方政府和企业绩效考核，压实各方责任。严格执行环保执法责任制，加大对违法排污行为的处罚力度，形成强大震慑。搭建公众参与平台，畅通举报渠道，加强大气环保宣传教育，引导企业主动治污、市民践行低碳生活，构建政府、企业、社会、科技协同共治的良好格局。

## 三、结论

要立足生态治理思维，坚持系统施治、源头防控、自然修复、长效管控，才能实现大气环境质量根本性改善。需始终坚守生态文明建设理念，以减污降碳协同增效为核心，持续推进产业、能源、交通结构绿色转型，强化城市生态修复与自然净化能力建设，完善区域联防联控机制与智能监管体系，构建全方位、多层次、常态化的生态治理长效机制。通过多元共治、标本兼治，持续破解复合型大气污染难题，不断优化城市人居环境，推动城市经济社会发展与生态环境保护协同共进，实现城市可持续高质量发展。

## 参考文献

- [1] 倪俊. 城市大气污染现状及防治对策研究 [J]. 皮革制作与环保科技, 2025, 6(23): 87-89.
- [2] 张森, 马晓菲, 刘闯, 等. 城市群能源消费大气污染生态风险评估探究 [J]. 环境监测管理与技术, 2025, 37(06): 25-34+58
- [3] 陈丽. 城市大气污染控制与空气质量改善技术研究 [J]. 皮革制作与环保科技, 2025, 6(15): 157-159.
- [4] 葛坤, 吴晓杰. 城市大气污染现状、成因分析及对策 [J]. 科技创新与生产力, 2026, 47(01): 14-16.
- [5] 宫燕, 赵丽平, 张天宇, 等. 城市大气污染物空间分布特征及其影响因子研究 [J]. 环境科学与管理, 2026, 51(01): 36-41.
- [6] 皮义仁. 浅议城市生态环境管理在大气污染治理中的应用 [J]. 清洗世界, 2026, 42(02): 123-125.
- [7] 邓彦海, 封岚, 刘艳. 城市大气污染原因和环境监测治理技术探讨 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2026, (11): 163-165.
- [8] 刘波, 高一娟. 城市大气污染治理措施与成效分析 [J]. 生态环境保护与修复, 2026, 39(04): 135-137.



# 工业污水处理及其回收再利用研究

刘威

广东 TCL 瑞峰环保科技有限公司, 广东 惠州 516000

DOI:10.61369/EAE.2026040005

**摘 要：** 工业废水处理与回用关系水环境安全及产业绿色转型。2024年处理能力达1.934亿吨/日，再生水利用量212亿立方米，但成分复杂、回用率偏低，不同行业废水水质差异大、治理难度高。系统梳理物理化学、生物处理及膜分离等技术路线，重点分析MBR、反渗透、蒸发结晶等深度处理工艺的应用瓶颈，结合典型案例探讨行业技术选择与优化路径，并对工业污水零排放与减污降碳协同方向进行展望。

**关 键 词：** 工业污水；废水处理；再生水利用

## Research on Industrial Wastewater Treatment and Its Recycling and Reuse

Liu Wei

Guangdong TCL Ruifeng Environmental Protection Technology Co., Ltd., Huizhou, Guangdong 516000

**Abstract：** The relationship between industrial wastewater treatment and reuse, water environment safety, and industrial green transformation. By 2024, the processing capacity will reach 193.4 million tons per day, with a recycled water usage of 21.2 billion cubic meters. However, the composition is complex, the reuse rate is low, and the wastewater quality varies greatly among different industries, making treatment difficult. Systematically sorting out the technical routes of physical chemistry, biological treatment, and membrane separation, focusing on analyzing the application bottlenecks of deep treatment processes such as MBR, reverse osmosis, and evaporative crystallization. Combining typical cases, exploring industry technology selection and optimization paths, and looking forward to the direction of zero discharge of industrial wastewater and the synergy of pollution reduction and carbon reduction.

**Keywords：** industrial wastewater; wastewater treatment; reclaimed water utilization

## 引言

我国人均水资源量仅为世界28%，北方部分地区极度缺水。2024年全国再生水利用量达212亿立方米，工业领域是节水关键。工业废水处理能力增长缓慢，2024年为1.934亿吨/日，预计2028年达2.087亿吨/日。全球约80%工业废水直接排放。工信部发布废水循环利用典型案例，提供示范路径。北京2024年再生水利用量达13.23亿立方米，小米汽车工厂实现70%废水回用，展示了可行性。

## 一、工业污水特性与处理挑战

### （一）工业废水的水质特征

与生活污水相比，工业废水的水质特征差异巨大，不同行业的废水成分截然不同。化工废水含有大量难降解有机物和有毒有害物质，COD浓度可达数万毫克每升；电镀废水含六价铬、镍、铜等重金属离子，毒性大且生物不可降解；印染废水色度高、盐度高、有机物可生化性差；制药废水成分复杂，含抗生素和生物抑制性物质；造纸废水含大量木质素和悬浮物，COD和色度均高。同一行业不同工艺段产生的废水水质也有显著差异，如化工生产中冷却排水相对清洁，而工艺废水和清洗废水则污染物浓度极高。这种水质的高度异质性决定了工业污水处理不能套用统一模式，必须根据水质特征选择针对性的技术组合。

### （二）处理与回用的技术难点

工业污水处理面临三个核心难点：一是难降解有机物的去除，B/C比低于0.3的废水采用常规生化法处理效果有限，需要化学氧化或高级氧化作为预处理或深度处理手段；二是高盐废水的脱盐和结晶，膜分离产生的浓水含盐量高，直接排放会造成二次污染，蒸发结晶能耗大、运行成本高，是制约零排放的技术瓶颈；三是重金属和有毒物质的稳定化处理，化学沉淀法产生的含重金属污泥属于危险废物，处置成本高且存在二次风险。此外，工业废水水量和水质波动大，冲击负荷频繁，对处理系统的抗冲击能力要求高。回用环节还需解决回用水水质与用水端标准的匹配问题，不同用途（循环冷却水、工艺用水、锅炉补给水）对水质要求差异大，处理深度和成本也不同<sup>[1]</sup>。



## 二、工业污水处理主要技术路线

### （一）理化学法

物理化学法是工业污水处理的常用手段，包括混凝沉淀、气浮、吸附、离子交换和化学氧化等。混凝沉淀通过投加混凝剂使废水中胶体和悬浮物脱稳聚沉，对SS、色度和部分重金属有较好的去除效果，常作为预处理或中间处理环节。气浮适用于含油废水和轻质悬浮物的去除。吸附法利用活性炭或树脂吸附有机物和重金属，适合低浓度废水的深度处理，但吸附剂再生和更换成本较高。化学氧化和高级氧化技术（如Fenton试剂、臭氧氧化、电化学氧化）对难降解有机物有显著降解效果，常作为生化处理的前处理或后处理。物理化学法的优点是反应速度快、对水质波动的适应性强，但药剂消耗量大、污泥产量多是主要缺点。以Fenton氧化为例，每处理1吨COD浓度为2000mg/L的废水，双氧水和硫酸亚铁的药剂成本约为8至15元，产生的铁泥还需按危废处置，综合处理成本较高。

### （二）生物处理法

生物处理法是工业污水有机物去除的主体工艺，包括活性污泥法、生物膜法和厌氧处理等。好氧生物处理适合B/C比大于0.3的可生化废水，对COD和氨氮的去除率可达85%以上；厌氧生物处理适合高浓度有机废水（COD大于2000毫克/升），能耗低且可产沼气回收能源，但出水仍需好氧后处理。工业废水生物处理的关键在于微生物驯化和工艺参数控制。有毒物质对微生物的抑制效应需要通过渐进驯化来克服，具体做法是从较低浓度废水开始逐步提高进水比例，每次调整后稳定运行三天以上，观察微生物活性和沉降性能，待系统恢复后方可继续增加负荷。溶解氧、污泥龄和营养盐比例等参数需根据废水特性精确调控，例如好氧池溶解氧一般维持在2至4毫克/升，污泥龄控制在15至30天，碳氮磷比例按100比5比1补充调整<sup>[2]</sup>。

序批式活性污泥法（SBR）和移动床生物膜反应器（MBBR）因其运行灵活、抗冲击能力强，在工业废水处理中应用广泛。SBR工艺将进水、反应、沉淀、排水、待机五个工序集中在一个池内完成，通过时序控制替代传统连续流的空间分隔，尤其适合水量波动大的间歇排放企业。MBBR工艺在池内投加比重接近水的悬浮填料，微生物附着生长在填料表面，既增加了生物量又提高了耐冲击能力，填料填充率一般控制在30%至60%，需定期检查填料流化状态，防止局部堆积或堵塞。实际工程中，生物处理常与前后的物理化学单元组合使用，例如前端设置气浮或水解酸化改善可生化性，后端接二沉池或膜分离强化泥水分离。运行人员应每日监测进出水指标，及时调整曝气量和回流比，发现污泥膨胀或泡沫异常时，需排查溶解氧和负荷波动原因并采取投加絮凝剂或缩短泥龄等针对性措施。

### （三）膜分离技术

膜分离技术是近年来工业污水处理和回用领域发展最快的技术方向，包括微滤、超滤、纳滤和反渗透等。膜生物反应器（MBR）将膜分离与生物处理相结合，以膜组件替代传统二沉池实现泥水分离，出水SS和浊度接近于零，可直接回用。MBR反应

器内污泥浓度（MLSS）可达8000至12000mg/L，是传统工艺的2至5倍，大幅提高了有机物和氨氮的去除效率，同时减少了占地面积。MBR的不足在于膜造价较高、膜污染导致通量衰减需要定期化学清洗、运行能耗偏高。MBR膜材质以PVDF为主，化学稳定性好、机械强度高，清洗周期一般为3至6个月，膜使用寿命5至8年，膜更换费用约占运行成本的25%至35%。反渗透（RO）用于脱盐和深度处理，出水水质可满足锅炉补给水等高标准回用需求，但RO浓水的处理是当前工业废水零排放的最大难题<sup>[3]</sup>。

## 三、工业废水回收再利用技术

### （一）分级分质回用策略

工业废水回用应遵循“分级分质、梯级利用”原则，根据不同用水环节的水质需求匹配相应的回用水标准。循环冷却水对水质要求相对宽松，主要关注悬浮物、硬度及微生物指标，经生化处理加混凝、过滤、消毒即可满足，COD可放宽至60毫克/升以下，总硬度不超450毫克/升。工艺清洗用水对悬浮物和硬度有一定要求，需增加超滤或软化处理，悬浮物控制在10毫克/升以内，硬度降至150毫克/升以下。锅炉补给水对电导率和硅含量要求严格，电导率通常需低于0.2微西/厘米，必须经过反渗透或离子交换深度处理，必要时加设二级反渗透或EDI（连续电除盐）。实施分级回用时，应先行调研各用水节点的水量、水质及波动规律，绘制全厂水平衡图，识别回用潜力最大的环节。然后按照“高质高用、低质低用”原则设计回用路径，避免将高标准处理后的水用于低要求点造成浪费。某典型化工企业实施分级回用后，废水回用率从35%提升至75%，吨水处理成本下降约20%，说明分级分质策略不仅节约水资源，还能降低整体处理成本。此外，该企业还将循环冷却排污水经过简单处理后用于道路洒扫和绿化，进一步减少外购新鲜水量。实际工程中，还应设置缓冲调节池和在线水质监测仪表，当回用水质波动时及时切换至备用排放路径，确保不影响生产安全。分级分质策略配合智慧管控平台，可实现各回用单元的自动调度和成本优化<sup>[4]</sup>。

### （二）膜集成深度处理工艺

MBR+RO双膜法是当前工业废水深度处理回用的主流工艺。MBR作为RO的预处理，可有效去除有机物、悬浮物和微生物，保障RO膜的安全运行；RO进一步脱盐，出水可达工业纯水标准。双膜法的出水回用率通常在60%至70%，剩余30%至40%的RO浓水含盐量和有机物浓度高，需要进一步处理。纳滤作为RO的替代或补充，可选择性地去除二价离子和有机物，在特定行业（如印染、制药）的废水回用中有独特优势。膜集成工艺的关键控制点是膜污染防控，需要根据进水水质选择合适的预处理方案和膜组件配置，制定科学的清洗周期和清洗方案。

### （三）蒸发结晶与零排放

工业废水零排放（ZLD）是当前的终极目标，蒸发结晶是实现ZLD的核心技术。多效蒸发（MED）和机械蒸汽再压缩（MVR）是两种主流蒸发工艺，MVR利用压缩机回收二次蒸汽的潜热，能耗比MED降低30%至40%，是当前新建ZLD项目的

首选。蒸发产生的结晶盐需根据成分判断是否属于危险废物，含重金属的结晶盐需按危废处置，纯度较高的工业盐可实现资源化利用。ZLD的运行成本居高不下，高盐废水蒸发吨水处理成本在50至120元之间，是制约其大规模推广的主要因素。折中方案是“近零排放”，将回用率提高到90%至95%，仅对少量浓水进行蒸发处理，兼顾经济性和环保要求。以一个日排放5000吨高盐废水的化工厂为例，ZLD方案年运行成本约900万至2100万元，而近零排放方案可控制在500万至800万元<sup>[5]</sup>。

## 四、典型行业废水回用实践

工信部2024年遴选的工业废水循环利用典型案例覆盖了钢铁、石化、造纸、纺织等多个行业，呈现出不同行业的技术特色。钢铁行业以冷却水和烟气脱硫废水回用为主，某大型钢铁企业通过“预处理+反渗透+电渗析”组合工艺实现全厂废水零排放，年回用水量超过2000万立方米。石化行业废水成分复杂，某炼化企业采用“隔油气浮+生化+MBR+RO”全流程工艺，出水回用于循环冷却水系统和锅炉补给水系统，回用率达80%以上。纺织印染行业以高盐高色度废水为特征，某印染企业采用“厌氧+好氧+臭氧催化氧化+RO”工艺，解决了色度和COD深度去除难题，回用水用于染色前水洗工序。造纸行业通过封闭循环用水和纤维回收，吨纸耗水量已从早期的100立方米降至10立方米以下。这些案例表明，不同行业需要根据自身废水特性和回用需求，选择合适的技术组合，不存在放之四海而皆准的单一方案。这些案例的共性经验是：先做好水质调查和回用需求分析，再确定技术路线，避免技术选型盲目性。

## 五、发展趋势与展望

### （一）减污降碳协同

污水处理本身是高能耗过程，曝气、提升和膜过滤均需消耗

大量电能。未来工业污水处理需要在达标排放和节能降耗之间寻求平衡，如采用高效曝气设备降低生化段能耗、利用厌氧产沼回收能源、引入光伏和余热为蒸发单元供能。减污降碳协同意味着不仅关注出水水质，还要核算处理全过程的碳排放强度，优化工艺选择和运行参数。

### （二）智慧化管控

工业废水水量水质波动大，传统人工调控滞后且粗放。基于物联网传感器和过程控制算法的智慧化管控系统可实现进水水质在线监测、药剂投加量自动调节、膜通量趋势预测和故障预警，显著提高运行稳定性和处理效率。工信部2024年典型案例中已出现智慧水管控方向，通过数据驱动优化用水网络和排水调度，将综合水耗降低5%至15%。

### （三）资源化利用

工业废水中蕴含的可回收资源正逐步受到重视——从电镀废水中回收镍、铜等有色金属，从高盐废水中分盐结晶获得工业级硫酸钠和氯化钠，从有机废水中通过厌氧发酵提取沼气能源。资源化利用改变了废水处理“纯投入”的属性，部分抵消处理成本，提高企业主动治理的积极性。随着资源回收技术的成熟和循环经济政策的推动，工业污水处理将从“达标排放”向“资源再生”转型。

## 六、结束语

工业污水处理及回用事关节水与环保。2024年我国工业废水处理能力达1.934亿吨/日，再生水利用量212亿立方米，但处理率偏低、功能性回用不足的问题依然存在。物化、生物、膜等技术各有适用，MBR+RO双膜法是深度回用主流，蒸发结晶可实现零排放却成本较高。不同行业废水特性差异大，需因地制宜、分级分质。近零排放是兼顾经济与环保的务实选择。未来应推动减污降碳协同、智慧管控与资源化利用，依靠政策、市场与企业合力，将废水从治理负担转化为再生资源。

## 参考文献

- [1] 雷鸣. 工业污水处理及回收再利用研究 [J]. 建筑工程技术与设计, 2020(31):3981.
- [2] 邵志浩, 黄孙进. 我国工业污水处理及回收再利用研究 [J]. 百科论坛电子杂志, 2021(16):599.
- [3] 郭洪萍. 工业污水处理方式方法与回收利用途径 [J]. 建筑工程技术与设计, 2020(7):3929.
- [4] 杨佳辰. 工业废水处理与回用系统设计优化研究 [C]//2025工程技术应用与管理交流会论文集. 2025:1-3.
- [5] 彭静. 工业废水处理技术的创新与应用研究 [J]. 皮革制作与环保科技, 2026, 7(1):5-7.

# 林下经济协同发展下山林林业工程建设优化研究

王陆陆

淄博市原山林场, 山东 淄博 255200

DOI:10.61369/EAE.2026040006

**摘 要 :** 在林下经济一体化协同发展的时代背景下, 山林林业工程建设需坚守生态保护底线, 同步助推区域特色产业稳健发展。传统林业建设模式功能维度单一, 林地资源利用效率偏低, 普遍存在生态保护与产业发展难以统筹兼顾的矛盾, 无法适配新时期林下经济高质量发展的需求。本文结合林业工程建设实践与林下经济融合发展典型案例, 从建设价值、优化策略、保障体系三个维度展开系统性探究, 重点围绕林地空间综合开发、生态产业协同规划、基础设施提质升级等核心内容进行深度剖析, 为推动林业工程与林下经济深度融合、协同赋能提供可行的实践路径与理论参考。

**关 键 词 :** 林下经济; 山林资源; 林业工程建设; 优化策略

## Research on Optimization of Forest Forestry Engineering Construction under Collaborative Development of Under Forest Economy

Wang Lulu

Yuanshan Forest Farm, Zibo, Shandong 255200

**Abstract :** In the context of integrated and coordinated development of agroforestry, the construction of forest forestry projects needs to adhere to the bottom line of ecological protection and simultaneously promote the stable development of regional characteristic industries. The traditional forestry construction model has a single functional dimension, low utilization efficiency of forest resources, and a common contradiction between ecological protection and industrial development, which cannot meet the needs of high-quality development of understory economy in the new era. This article combines the practice of forestry engineering construction with typical cases of integrated development of understory economy, and conducts a systematic exploration from three dimensions: construction value, optimization strategy, and guarantee system. The focus is on in-depth analysis of core contents such as comprehensive development of forest space, coordinated planning of ecological industries, and upgrading of infrastructure. It provides feasible practical paths and theoretical references for promoting the deep integration and collaborative empowerment of forestry engineering and understory economy.

**Keywords :** under forest economy; forest resources; forestry engineering construction; optimization strategy

山林林业工程是林木抚育、生态修复、林地资源高效利用的核心载体。传统林业建设多聚焦林木培育与生态防护两大基础功能, 林地空间布局较为粗放, 林下闲置资源未得到有效开发, 配套基础设施建设滞后, 难以支撑产业化发展需求。林下经济依托林地资源开展林下种植、生态养殖、产品精深加工、休闲文旅等多元业态, 实现了森林生态价值与经济、社会价值的同步释放。为推动生态保护与产业经营协同共进, 需革新传统建设理念, 秉持生态优先的核心原则, 优化规划布局、盘活存量资源、完善配套体系, 在维系山林生态系统稳定的基础上, 推动林下产业长效稳健发展。

### 一、林下经济协同发展下山林林业工程建设的核心价值

#### (一) 盘活林下闲置资源, 提升森林资源利用效能

传统山林林业建设以上层乔木栽植、抚育养护为核心任务, 重点保障林木正常生长成材。该模式下, 林下闲置空间、林间光照、土地肥力等自然资源长期处于闲置状态, 林地开发模式单

一, 整体资源利用率较低。在林下经济融合发展理念指引下, 现代山林工程建设突破单一林木培育的局限, 实现上层林木养护与林下资源开发双向统筹<sup>[1]</sup>。建设过程中通过科学优化林分结构、精准调控林间郁闭度, 打造适配多元林下业态的生长环境, 可满足中药材、食用菌、经济作物的规模化种植需求, 同时适配林下畜禽养殖、特色水产养殖等产业发展条件。这种立体化、复合型开发模式, 打破了传统林业单一依靠木材产出的盈利局限, 构建

作者简介: 王陆陆, 淄博市原山林场, 科室: 山林, 研究方向: 林业工程类。



“上层育林、下层创收”的复合经营体系，充分挖掘森林资源多元价值，实现林地资源最大化、多元化高效利用。

### （二）优化林分群落结构，提升生态系统稳定性

传统林业工程多采用纯林栽植模式，林区树种单一、植被结构简单，生态系统自我调控能力薄弱，存在显著的生态短板<sup>[2]</sup>。长期运营下，纯林林地易爆发大规模病虫害，伴随土壤肥力衰减、土质退化等生态问题，同时林区生物种类匮乏、生物多样性不足，生态系统抗干扰、抗风险能力较弱。适配林下经济发展的新型林业工程，摒弃单一树种栽植模式，重点营造混交林、复层林结构，搭配高低错落的乡土树种与多样化林下植被，构建层次丰富、物种多元的森林生态群落。林下植被可有效发挥涵养水土、改良土壤、固持地表土层的作用，显著降低水土流失风险。同时，多元植被群落可为鸟类、昆虫等生物提供栖息繁衍载体，丰富林区生物多样性，抑制病虫害大规模滋生，推动单一脆弱的原生生态系统，逐步转型为多元共生、稳定可持续的优质生态体系。

### （三）完善林区基础设施，破解林下产业发展瓶颈

我国山林资源多分布于偏远山区，区位条件相对闭塞。传统林业工程聚焦林木抚育、生态防护核心工作，忽视配套基础设施一体化建设，导致林区道路、灌溉供水、电力通信、日常管护等基础设施配套不完善，严重制约林下产业规模化、标准化发展，难以开展规模化种养、产品加工、仓储运输等产业化作业<sup>[3]</sup>。在林下经济协同发展背景下，山林林业工程实现全方位提质升级，在推进林木培育、生态修复的基础上，同步配套建设适配产业发展的基础设施体系，涵盖林区作业道路、节水灌溉管网、管护用房、产品仓储场地、初级加工场地等全套配套设施。完善的基础设施体系，一方面可满足森林防火、林木抚育、林区管护等传统林业工作需求，保障林业基础工作有序推进；另一方面可有效破解林下产业田间作业、日常管护、产品储运的各类难题，破除产业发展硬件壁垒，为林下产业规模化、常态化发展筑牢硬件根基<sup>[4]</sup>。

### （四）拓宽林业价值维度，助推山林经济可持续发展

传统山林经济收益渠道单一，主要依托木材采伐获取经济效益，存在产业链条短、产品附加值低、盈利空间有限等问题。同时产业发展受森林资源总量约束较强，过度采伐易引发生态破坏，发展持续性不足<sup>[5]</sup>。林业工程与林下经济深度融合后，有效突破传统林业发展局限，衍生出多元化产业业态，形成林木培育与中药材种植、食用菌培育、林下养殖、生态文旅融合发展的完整产业链。林业工程为林下产业提供优质生态基底与资源支撑，林下产业持续产出经济效益，其产业收益可反哺林业建设，用于林木抚育、生态修复、设施提质与工程优化。由此形成“生态赋能产业、产业反哺生态”的良性循环，推动山林发展模式从传统资源采伐型，转型为生态与经济统筹兼顾的生态产业型，实现山林资源可持续利用与区域林业经济长效发展<sup>[6]</sup>。

## 二、林下经济协同发展下山林林业工程建设优化策略

### （一）科学调控林分结构，构建生态适配型复合林业体系

实现林业建设与林下经济协同发展，核心前提是科学优化林

木配置结构。规划阶段需结合林地土质条件、区域气候特征及预设林下产业业态，摒弃传统纯林栽植模式，打造树种多元、层次错落、树龄梯度化的复合型林地。针对喜阴中药材种植地块，优先选配楠木、樟木等郁闭度适中的阔叶树种，将林间郁闭度调控至0.6至0.7区间，在保障乔木正常生长的同时，形成柔和散射光环境，适配中药材生长习性。针对食用菌培育地块，可栽植杉木、马尾松等速生树种，适度降低林间郁闭度，优化林间通风与湿度条件，契合菌类生长需求<sup>[7]</sup>。

### （二）优化工程空间布局，实现林地功能分区协同适配

传统山林建设采用同质化布局模式，无法适配多元林下产业的差异化发展需求。新时期林业建设需依据林地地势高差、土层厚度、水源分布等自然禀赋，对林区进行科学功能划分，设置生态保育区、林木培育区、林下种植区、林下养殖区及配套加工服务区，实现各区域功能明晰、联动协同、统筹发展<sup>[8]</sup>。坡度较大、生态脆弱的地块划定为生态保育区，以原生植被保护、水土保持、野生动植物养护为核心功能，禁止高强度开发作业。土层深厚、地势平缓的地块规划为林木培育区，栽植优质用材树种与乡土树种，夯实林业基础产能。林间闲置空间规划为林下种植区，依托林木天然遮阴条件，布局各类中药材与经济作物种植。林下养殖区选址于视野开阔、通风优良的区域，远离生态保育区与居民生活区，规避养殖活动带来的生态干扰与人居影响。仓储、初加工、办公等配套场地布局于林区出入口周边交通便利区域，提升物资转运与产品加工效率。

### （三）升级基础设施体系，适配林下产业规模化发展

基础设施提质改造需统筹兼顾林业管护与产业发展双重需求，补齐传统设施老旧、功能单一的短板，构建系统化、复合型配套网络。道路建设摒弃单一防火通道模式，分级规划主干道、生产便道与田间小路<sup>[9]</sup>。主干道对接外部干线公路，满足大型设备通行、货物长途储运需求；生产便道延伸至各功能片区，保障日常种养作业与林区巡查高效开展；田间小路细化至各栽植地块，适配精细化田间管理。供水系统依托山林自然地势修筑蓄水池、引水渠，配套喷灌、滴灌等节水设施，优先利用天然水源，既可满足林木抗旱补水需求，也可适配林下作物灌溉需求，同时规避大水漫灌引发的土壤板结、水土流失等问题。同步配套建设管护用房、森林防火设备、病虫害监测系统、供电通信线路，规划标准化加工场地与仓储库房，实现林下产品就地初加工、就地仓储，减少转运损耗，全方位支撑林下产业规模化、标准化运营<sup>[10]</sup>。

### （四）创新工程建设模式，构建多元主体共建共享机制

传统山林工程以政府单一主导模式为主，建设资源有限、推进效率偏低。新时期需创新建设运营模式，推广“国有林场+合作社+农户”“企业+基地+农户”等多元合作模式，整合各方资源、技术与人力优势，压降建设成本、提升建设质效。国有林场依托场地资源、专业技术与管理经验，负责林区整体规划、林分改造与基础设施建设，打造标准化林下产业基地。村集体合作社整合零散户林地资源，通过土地流转、股份合作等方式实现连片规模化经营，解决散户经营标准不一、生产效率低下的问题<sup>[11]</sup>。引入专业化农业经营企业，负责提供优质种苗、技术指



导、产品收购与市场销售，带动农户参与标准化种养作业。

（五）强化生态管控治理，坚守林产协同发展底线

产业发展需始终坚守生态优先原则，将生态环保管控贯穿工程规划、施工建设、日常运营全流程，杜绝过度开发引发的生态破坏。严格管控开发范围与开发强度，生态红线区域、公益林核心区域禁止开展高强度种植与规模化养殖，仅可适度发展低干扰林下种植、生态观光等业态<sup>[12]</sup>。施工阶段优先采用环保建材与生态化施工工艺，减少地面硬化作业，保护原生土壤结构与植被群落。林下种植优选本土种质资源，严禁引入风险性外来物种，防范生物入侵。林下养殖需科学核定养殖容量，配套建设粪污处理设施，实现养殖废弃物资源化利用，规避种养污染破坏水土环境<sup>[13]</sup>。搭建常态化生态监测体系，动态监测林木覆盖率、土壤肥力、水土流失、病虫害发生态势等核心指标，依据监测数据动态优化林分结构、调整种养规模，精准平衡生态保护与产业发展的关系，保障山林生态系统长期稳定、良性循环<sup>[14]</sup>。

三、林下经济协同发展下山林林业工程建设保障措施

（一）夯实技术支撑体系，提升建设与产业发展专业性

专业技术是林业建设与林下产业稳健发展的核心支撑。需整合林业培育、生态修复、农业种养、工程建设等多领域专业人才，组建复合型技术服务团队。结合区域林地禀赋与产业规划方向，定制一体化技术方案，对林分改造、苗木选配、种养技术、设施建设标准等内容进行规范化界定<sup>[15]</sup>。推广成熟适配、落地性强的实用技术，涵盖中药材仿野生种植、林下菌类培育、节水灌溉、生态修复等关键技术。常态化开展基层技能培训，通过田间实操示范、现场答疑指导等方式，补齐经营主体与农户技术短板。择优打造标准化示范基地，直观展示复合林地营建、林下产业培育、生态防护建设等先进模式，发挥典型引领、辐射带动作用，高效破解建设与生产过程中的各类技术难题<sup>[16]</sup>。

（二）健全长效管护机制，保障工程稳定运营

为保障林区资源与基础设施长效发挥效能，需构建专业主

导、群众参与、权责明晰的常态化管护体系，落实专项管护经费<sup>[17]</sup>。国有林场与专业管护人员承担林区全域巡查、设施检修、防火防灾、病虫害防控等核心工作；村集体合作社与农户负责自有林地林木抚育、种养管理等日常事务，形成分层管控、各司其职的管护格局。建立配套考核评价机制，将管护成效与经费拨付、收益分配直接挂钩，压实管护主体责任。通过线下宣讲、入户科普等多元方式，强化农户生态保护与设施管护意识，引导群众主动参与林木抚育、设施维护、生态治理等工作，营造全员参与、共建共管、共享共赢的良好发展氛围<sup>[18]</sup>。

（三）完善全链产业体系，提升工程综合效益

依托现有林业基地与林下种养园区，延伸拓展产业链条，构建种养、加工、销售、文旅一体化融合发展模式<sup>[19]</sup>。重点培育本地农产品加工主体，对林下药材、食用菌、特色农副产品开展初加工与精深加工，开发饮片、干货、特色食品等衍生产品，提升产品附加值。依托优良山林生态禀赋，打造区域特色林下农产品品牌，积极申报绿色、有机产品认证，增强市场核心竞争力。整合林区自然景观与乡村民俗资源，开发林间采摘、生态观光、康养休闲等文旅业态，推动林业产业与乡村文旅深度融合<sup>[20]</sup>。多元化经营模式有效拓宽增收渠道，全面提升山林林业工程的生态效益、经济效益与社会效益。

四、结束语

综上所述，林下经济融合发展模式为现代山林林业建设提供了全新发展路径，彻底扭转了传统林业单一侧重生态防护或木材产出的发展局限，构建起生态保护、资源利用、产业增收、民生改善多元协同的发展格局。林业工程建设需始终坚守生态优先底线，科学盘活林地空间、优化功能布局、深化林产融合，通过完善林分结构、升级基础设施、创新合作模式、严格生态管控，系统性破解传统林业发展短板。依托技术支撑、长效管护、全链产业保障体系，确保林业工程长效稳定运营，实现山林生态价值与经济价值双向赋能。

参考文献

[1] 温嘉媚. 林业工程技术在森林培育中的实践与创新 [J]. 棉花科学, 2025, 47(9): 67-69.  
[2] 卢秦福, 曹欧华. 林业经营中营林生产技术面临的问题及解决措施探究 [J]. 农村科学实验, 2022(9): 109-111.  
[3] 胡可锐, 曾常金, 孔庆红. 提高林业工程建设中现代营造林质量的实践研究 [J]. 农家科技, 2023(21): 76-78.  
[4] 朱俊华. 国有林场林下经济发展现状与对策探究 [J]. 农业技术与装备, 2023(5): 141-143.  
[5] 尹凯. 基于林权改革视域下的森林资源管理问题分析 [J]. 现代园艺, 2022, 45(20): 172-174.  
[6] 张晓梅. 林业生态建设及林下经济产业发展的措施 [J]. 农村实用技术, 2026(3): 113-114.  
[7] 刘正樑, 杨春. 林业生态建设与林下经济产业协同发展研究——基于乡村振兴的视角 [J]. 农业灾害研究, 2026, 16(1): 40-42.  
[8] 逯飞. 林业生态建设与林下经济产业协同发展的困境及对策 [J]. 农业产业化, 2026(4): 23-25, 28.  
[9] 李靖彤, 付婷婷. 林业生态建设与林下经济产业探究 [J]. 林业科技, 2025, 50(5): 76-78.  
[10] 刘东, 李洪建. 乡村振兴背景下林业经济发展的措施研究 [J]. 农村实用技术, 2026(1): 6-7.  
[11] 简波. 林业生态建设及林下经济产业发展的策略 [J]. 农业灾害研究, 2025, 15(3): 7-9.  
[12] 李和麟. 林业生态建设与林下经济产业发展探析 [J]. 花卉, 2025(2): 184-186.  
[13] 曾红勇. 林业生态建设与林下经济产业发展探析 [J]. 花卉, 2025(4): 166-168.  
[14] 叶俊南, 李树巧, 陈进江, 等. 林业生态建设与林下经济产业发展的措施研究 [J]. 中国林副特产, 2024(2): 50-52.  
[15] 谢晓东, 陈东腾, 邓晓玲. 生态建设视角下林业经济可持续发展路径分析 [J]. 林业科技情报, 2025, 57(4): 109-111.  
[16] 周俊如. 林业多元立体生态开发与林下经济发展 [J]. 江西农业, 2024(11): 141-143.  
[17] 仇学建. 乡村振兴背景下林业特色经济可持续发展路径 [J]. 农村经济与科技, 2025, 36(4): 74-76.  
[18] 刘献华. 林业生态建设及林下经济产业发展的措施研究 [C]//2024 工程技术与施工管理论坛论文集. 2024: 1-3.  
[19] 林东辉. 林业科技服务对农户参与林下经济行为的影响及其应用策略 [J]. 广东蚕业, 2024, 58(7): 55-57.  
[20] 王森. 生态经济背景下林业勘察设计的定位及发展 [J]. 花卉, 2025(1): 133-135.

# 基于大疆精灵4可见光的惠州大亚湾红树林分类提取

杨峰, 阮奇锋, 黄颖, 彭樱子, 韩念龙<sup>\*</sup>  
惠州学院地理与旅游学院, 广东 惠州 516007  
DOI:10.61369/EAE.2026040007

**摘 要 :** 本文提出利用无人机获取高空间分辨率的可见光影像, 结合随机森林、K-最近邻两种机器学习算法, 对惠州市红树林湿地公园5种优势红树林树种进行分类识别。实验表明, 随机森林总体精度94.8972%、Kappa系数0.8845, K-最近邻总体精度94.2155%、Kappa系数0.8690。其中, 随机森林算法对分类结果的稳定性更好。但对小面积易混淆的物种识别效果存在一定的限制。本研究为滨海湿地遥感监测和红树林生态系统保护修复提供技术参考。

**关 键 词 :** 无人机; 遥感; 红树林; 随机森林分类; K-最近邻法

## Classification and Extraction of Mangrove Forests in DayaBay,Huizhou Based on Visible Light from DJI Phantom 4

Yang Feng, Ruan Qifeng, Huang Ying, Peng Yingzi, Han Nianlong<sup>\*</sup>  
School of Geography and Tourism, Huizhou University, Huizhou, Guangdong 516007

**Abstract :** This paper proposes to acquire visible light images with high spatial resolution using unmanned aerial vehicles (UAVs). Combined with two machine learning algorithms, namely Random Forest and K-Nearest Neighbor (KNN), classification and identification of five dominant mangrove species in Huizhou Mangrove Wetland Park are carried out. Experimental results demonstrate that the Random Forest algorithm achieves an overall accuracy of 94.8972% and a Kappa coefficient of 0.8845, while the K-Nearest Neighbor algorithm yields an overall accuracy of 94.2155% and a Kappa coefficient of 0.8690. Among the two algorithms, Random Forest presents better stability in classification outputs. Nevertheless, it has certain limitations in identifying small-area species with confusing spectral features. This study can provide technical references for remote sensing monitoring of coastal wetlands as well as the protection and restoration of mangrove ecosystems.

**Keywords :** Unmanned Aerial Vehicle (UAV); remote sensing; mangrove forests; random forest classification; K-nearest neighbours

## 引言

红树林作为重要的滨海湿地生态系统, 在维护海岸带生态平衡, 净化环境, 缓解气候变暖等方面都具有重要作用和研究意义<sup>[1,2]</sup>。对红树林树种的精准分类对其生态功能的研究以及科学管理规划都具有重要作用<sup>[3]</sup>。

无人机具有作业灵活, 成本低, 影像精度高等诸多优势, 成为开展红树林精细监测的重要手段<sup>[4,5]</sup>。本研究使用精灵4无人机在可见光波段对惠州市红树林湿地公园进行数据采集。通过机器学习算法对数据进行分析, 最终达到对红树林进行有效分类的目的。

## 一、研究区和数据

### (一) 研究区

惠州市红树林湿地公园地处亚热带季风区, 南邻大亚湾, 总面积176公顷(图1)。该区域, 气候温暖湿润, 降雨量充沛, 平

均海拔低于30米, 最大的高差小于20米, 为红树林生长营造了优越的环境<sup>[6-8]</sup>。区域内红树林资源丰富, 包括真红树种和半红树在内的木榄、秋茄、桐花树、黑桐、金蕨等多种树种<sup>[9-11]</sup>。

基金项目: 广东省创新训练项目 (S202410577083)

作者简介: 杨峰 (1978-), 男, 讲师, 研究方向: 地理大数据空间分析。

通讯作者: 韩念龙。

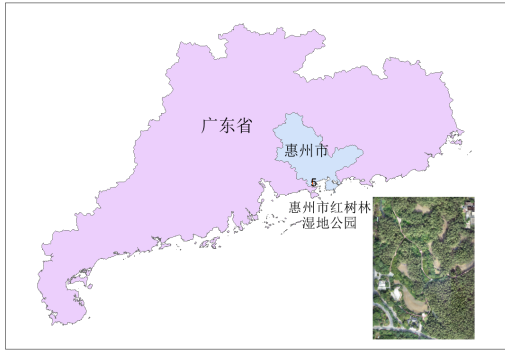


图1 研究区域

Fig.1 Research area

## (二) 研究数据

研究使用精灵4无人机在可见光波段进行数据采集。数据采集在当天上午10点30分到12点整进行。该时间段太阳高度角较大,能减少地物阴影,避开涨潮时段,防止影像中大面积水域的出现。无人机飞行高度设定为100米,地面采样距离约2.74cm/像素。

## 二、研究方法

### (一) 技术路线

无人机获取数据后,得到有效影像共计498张。通过空三加密生成密集点云,构建数字表面模型,开展正射校正以及影像匀色拼接等相关工作,最终获得研究区的数字正射影像图。通过室内作业同室外工作相结合的方式选择样本点。利用k-最近邻以及随机森林这两种模型分别展开训练。利用训练模型对红树林群落进行提取,最终得到区域内包含无瓣海桑、桐花树等在内的5种优势树种的分类结果。技术路线如图2所示。

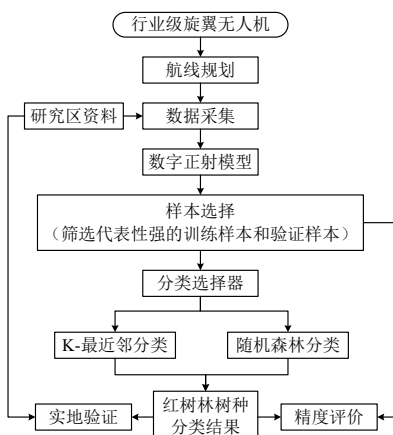


图2技术路线图

Fig2. Technology roadmap

### (二) 样本选取

依据相关调查,该区域的真红树林树种共有8种之多,而半红树林树种则有5种<sup>[9]</sup>。综合实地踏勘与影像数据的目视解译结果,确定无瓣海桑、桐花树、白骨壤、秋茄、木榄等五种树种为该区域

优势树种,并作为本分类研究对象,建立解译标志(表1)。

表1红树林物种解译标志  
Table 1. Mangrove species interpretation sign

| 树种   | 无人机影像 | 拍摄树种照片 | 树种特征                  |
|------|-------|--------|-----------------------|
| 木榄   |       |        | 墨绿色、团簇、树冠位于中层、边界清晰    |
| 无瓣海桑 |       |        | 高度最高、集中连片、绒状质感        |
| 白骨壤  |       |        | 浅绿色、斑驳纹理、叶子较小、分布在栈道两边 |
| 桐花   |       |        | 绿色、多分布于路两边、纹理清晰       |
| 秋茄   |       |        | 色泽偏浅、叶片形态细碎、分布较散      |

### (三) 分类方法

#### 1. 随机森林分类

随机森林属于一种基于决策树所形成的整合手段。它通过构建多棵决策树并进行组合预测,以提高模型的泛化能力和预测精度<sup>[12]</sup>。其核心公式如下:

$$\hat{y}(x) = \arg \max_{c \in C} \sum_{k=1}^K I(h_k(x) = c) \quad (1)$$

其中,  $\hat{y}(x)$  为样本  $x$  的最终分类结果,  $C$  是所有类别集合,  $K$  为决策树数量;  $h_k(x)$  是单棵决策树输出,  $I(\cdot)$  统计单棵树投票,  $\sum_{k=1}^K I(h_k(x) = c)$  为类别  $c$  总票数。

#### 2. k 近邻分类

K 近邻核心原理在于“相似对象归属于同一类别”<sup>[13]</sup>。通过计算待分类对象和训练样本之间的距离,识别出与之最为临近的 K 个样本,找出出现次数最多的邻居,将其划分到相应的类别中。

$$(x_i, y_i) = \sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ik} - x_{jk})} \quad (2)$$

$x_i, y_i$  代表不同样本点的特征向量,  $n$  则表征特征数量。

#### 3. 精度评价

Kappa 系数属于衡量分类结果一致性的一项关键指标。其核心公式如下:

$$\hat{K} = \frac{P \sum_{i=1}^n P_{ii} - \sum_{i=1}^n (P_{i+} P_{+i})}{P^2 - \sum_{i=1}^n (P_{i+} P_{+i})} \quad (3)$$

Kappa 系数取值区间  $[-1, 1]$ , 分五个等级。值在 0.61 至 0.80



表示分类结果和实际吻合程度较高；0.81至1.00表示分类的结果和实际基本保持一致<sup>[14]</sup>。

三、结果与讨论

(一) 分类结果

对研究区域内的5种核心优势红树林树种展开分类提取。共选择训练样本点50余个。结果如图2所示。两种算法的分类效果基本一致。研究区内红树林树种分布密集。无瓣海桑分布最为广泛。秋茄与白骨壤在区域的上部，中部，下部成分片分布。秋茄树种的分布区域相对较小，主要集中在研究区中部和中上部的道路两旁。桐华树在研究区的下部呈较多的密集分布的状态，在研究区中部的道路附近也有一片集中分布的区域。木榄多被无瓣海桑遮挡，其分类结果较少，以小群落的形式零星分布。

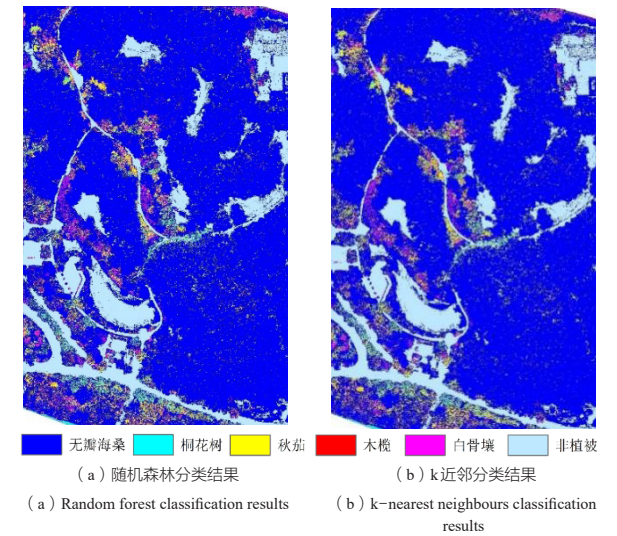


图2 红树林分类结果  
Fig2. Mangrove classification results

基于混淆矩阵对分类精度进行评价（表2）。两种方法的Kappa系数值都处在0.81至1.00区间，说明两种方法分类效果都较好。随机森林的Kappa系更高一些。

表2. 总体精度对比  
Table2. Overall accuracy comparison

|      | 总体精度（%） | Kappa系数 |
|------|---------|---------|
| 随机森林 | 94.8972 | 0.8845  |
| K近邻  | 94.2155 | 0.8690  |

(二) 实地验证

在研究区设置93个验证点（如图3）。对每一个实地点进行分类结果的对比，结果表明随机森林算法的精度达到了92.47%，分类结果质量较好。

(三) 讨论

根据对研究区5种优势树种的分类提取及精度验证，随机森林和K近邻两种算法都得到了较高的分类精度，总精度为94.8972%和94.2155%，Kappa系数分别为0.8845和0.8690，都处在0.81到1.00，说明无人机可见光遥感结合传统的机器学习算法对于红树林精细分类有很好的可行性和实用性。

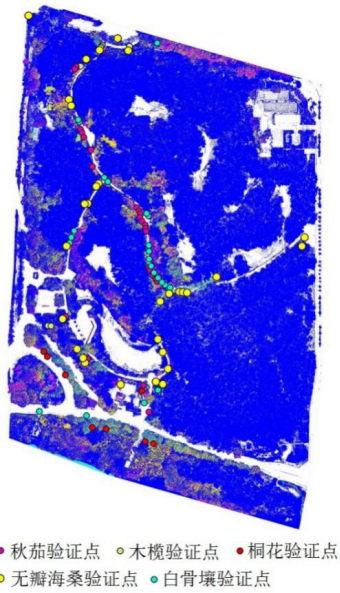


图3 验证点分布  
Fig3. Validation Point Distribution

四、结论

本文利用精灵4无人机所获取的可见光数据，对惠州大亚湾红树林湿地公园5种优势红树林树种进行分类。实验表明，随机森林算法与k近邻算法对红树林树种的分类结果具有较好的一致性，都能得到较高的分类精度。相比较而言随机森林算法分类更为稳定。

参考文献

[1] 张书嵘,付波霖,高二涛,等.联合 UAV-LiDAR点云和 SSAFormer的红树林群落精细分类[J].遥感学报,2025,29(05):1140-1163.  
[2] 闻馨,贾明明,李晓燕,等.基于无人机可见光影像的红树林冠层群落识别[J].森林与环境学报,2020,40(05):486-496.DOI:10.13324/j.cnki.jfcf.2020.05.005.  
[3] 刘凯,龚辉,曹晶晶,等.基于多类型无人机数据的红树林遥感分类对比[J].热带地理,2019,39(04):492-501.  
[4] 冯家莉,刘凯,朱远辉,等.无人机遥感在红树林资源调查中的应用[J].热带地理,2015,35(01):35-42.  
[5] 胡健波,张健.无人机遥感在生态学中的应用进展[J].生态学报,2018,38(01):20-30.  
[6] 林石卿,邱敏婷,于法钦.大亚湾红树林国家级城市湿地公园的红树林资源[J].广东园林,2018,40(02):84-87.  
[7] 陈学梅,缪绅裕,罗志荣,等.大亚湾红树林研究Ⅰ. 澳头港的红树植物群落[J].植物学通报,1998(4):57-60.  
[8] 缪绅裕,林海波,陈学梅.大亚湾红树林研究Ⅱ. 澳头港部分红树植物的生态生理[J].植物研究,1997(3):99-104.  
[9] 曾宪光.惠州红树林湿地资源现状及保护对策[J].惠州学院学报(自然科学版),2008(6):55-57.  
[10] 柯东胜,彭晓娟,吴玲铃,等.大亚湾典型生态系统状况调查与分析[J].海洋环境科学,2009(4):421-425.  
[11] 盛大勇,陈东明,卢永辉,等.广东大亚湾水产资源省级自然保护区红树林资源空间分布研究[J].惠州学院学报,2022,42(03):37-43.  
[12] Catani F, Lagomarsino D, Segoni S, et al. Landslide susceptibility estimation by random forests technique:sensitivity and scaling issues[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2013, 13 (11): 2815-2831.  
[13] T.M. Cover, P.E. Hart, Nearest neighbor pattern classification, IEEE Trans. Inf. Theory 13 (1) (1967) 21 - 27 .  
[14] 王凤霞,李屹,夏卓异,等.基于 Sentinel-2A的红树林提取机器学习方法比较[J].测绘地理信息,2023,48(03):79-81.



# 城市生活污水中微塑料伴生塑化剂的共赋存特征及其复合生态风险评价

纪柏帆

普洱学院茶叶咖啡学院, 云南 普洱 665000

DOI:10.61369/EAE.2026040008

**摘 要 :** 随着城市的高速发展, 城市生活污水中微塑料和增塑剂污染日趋显著, 并以其联合作用效应及生态毒性为当前环境污染研究中的热点之一。本文从城市污水中微塑料和增塑剂来源、分析方法及两者交互作用等方面进行综述, 并建立了表征该类物质联合作用风险指数体系, 进一步探讨其对水生生物及污水厂的影响作用。结果表明: 微塑料与增塑剂广泛存在于城市污水中, 并且各类型废水所含上述两种物质的种类、浓度及分布差异较大。

**关 键 词 :** 城市生活污水; 微塑料伴生塑化剂; 复合生态风险

## Co occurrence Characteristics and Composite Ecological Risk Assessment of Microplastic Associated Plasticizers in Urban Domestic Sewage

Ji Bofan

Tea and Coffee College, Pu'er College, Pu'er, Yunnan 665000

**Abstract :** With the rapid development of cities, the pollution of microplastics and plasticizers in urban domestic sewage is becoming increasingly significant, and their combined effects and ecological toxicity are currently one of the hotspots in environmental pollution research. This article reviews the sources, analysis methods, and interactions of microplastics and plasticizers in urban sewage, and establishes a risk index system to characterize the combined effects of these substances, further exploring their impact on aquatic organisms and sewage treatment plants. The results indicate that microplastics and plasticizers are widely present in urban wastewater, and there are significant differences in the types, concentrations, and distributions of these two substances in various types of wastewater.

**Keywords :** urban domestic sewage; microplastics accompanied by plasticizers; composite ecological risk

### 引言

随着城市化进程的加速, 由于微塑料和塑化剂作为新型持久性污染物, 在不断发展的城市生活中产生的城市生活污水中的污染情况也日趋严重。微塑料来源于日常用品磨损、工业生产废水中排放、处理厂未完全去除等因素; 塑化剂主要源于各类塑料制品在生产加工过程中以及应用过程中所产生的有机化合物, 分别进入城市的废水系统中, 并以不同的方式存在, 在一定条件下不能轻易降解, 并可能通过食物链富集而威胁环境及人的身体健康。

### 一、城市生活污水中微塑料伴生塑化剂的共赋存特征

#### (一) 微塑料与塑化剂的来源分析

城市污水中存在大量微塑料和塑化剂, 并且来源十分多样、途径非常繁杂, 最主要的是来自日常生活消费品、工业排放和不恰当废弃物处理处置。生活中的洗面奶、牙膏、涤纶面料衣物、塑料袋等均是主要的微塑料来源。其通过冲洗、扫除或粉碎后进

入排水管道而排入生活污水中。此外, 塑化剂是塑料制品的主要添加剂, 广泛应用于食品容器、医疗器械及建材等行业, 在食品容器中使用较为普遍。有研究表明, 塑化剂会从废弃塑料制品上脱落(老化、摩擦、溶出)进入水体环境并随着微塑料一起排放到生活污水中。工业排放是另一个重要的源头, 在其中以化学、纺织及药品等行业为甚。在这些行业中排出的废水中有大量的微塑料与塑化剂存在, 加重了城市的污水处理负担。另外, 垃圾填埋

课题信息: 项目名称: 污水中微塑料赋存特征及其生态风险研究, 项目编号: 202301BA070001-125。

作者简介: 纪柏帆(1991.06—), 女, 拉祜族, 云南省普洱市人, 硕士研究生学历, 普洱学院, 茶叶咖啡学院就职, 助理研究员, 主要从事生态学、咖啡科学与工程、食品质量与安全的教学工作。课题: 主持省级课题1项, 市级课题结题3项。

以及不正确的废物处置也会造成微塑料与塑化剂的泄漏，并由此经由地面水流或者地下水流的方式进入到生活的污水中去。

### （二）共赋存特征的监测方法

要研究并掌握城市生活污水中的微塑料与塑化剂之间的共生关系就需要运用一些科学有效的收集方法以及处理方式还有检测手段等。在收集过程中一般会采取定点的方式来进行取样工作以便于更好的保证所获得样本具有代表性并且便于比较分析。比如可以在污水处理站内不同位置的出入口处设立相应的采样地点来达到很好的了解整个过程的目的，包括从进入到排出的过程。对于样品中的分离，在样品处理中常用的方法有浮选法、过滤法以及消解等。其中，浮选法是根据溶液的密度来将微塑料颗粒分开，并且可以通过改变溶液的密度来进行微塑料颗粒的筛选，主要是采用不同大小的筛子或者滤纸，比如300目的筛子或者是600目的筛子，还有1 $\mu$ m的玻璃纤维滤膜等等，都可以用来对微塑料和纳米塑料进行筛选。

通过采用化学消解的方法，比如用65%的硝酸+30%的过氧化氢溶液等方法可以将样品中所含有的有机物质除去，进而提升目标物质的回收量。对于检测技术而言，则主要运用了傅立叶变换红外光谱以及拉曼光谱这两种手段来开展有关于微小颗粒及塑化剂的相关检验工作，并且还能够其中获得相关的分子结构信息，在此基础上便能够明确出具体的目标污染成分及其含量情况。但是每一种方法都有其优缺点，在灵敏性上各有千秋，并且在操作难易程度及成本投入等方面也有所不同。比如采用浮选的方法简单方便，但是对于低密度的微塑料却难以实现较好的分离效果。而采用光谱的技术可以达到很高的分辨能力，但是仪器的成本相对较高并且对于样本的要求较为苛刻。

### （三）不同类型城市生活污水的共赋存特征差异

不同类型的城镇生活污水中的微塑料同时含有塑化剂的情况存在较大差别，并且受到该地区功能类型以及人们行为方式的不同而有所影响。在居民区内产生的生活污水中含有微塑料和塑化剂的数量较少但是品种较多，主要是由于人们的日常生活用品和个人卫生用品所导致。根据研究发现，在居民区的生活污水中含有的纤维状微塑料最多，这是由于经常性的清洗衣物造成的。而商业区的生活污水中的微塑料及塑化剂明显增多，并且在一些餐饮、零售业比较集中的地区尤为突出。这些污水中含有较多的颗粒状微塑料以及邻苯二甲酸酯类塑化剂，表明了大量使用的塑料包装材料与一次性的用品。而在工业区内，由于各种原因导致的混合污染情况更加严重，在其中发现的微塑料以及塑化剂的数量和类型都比其它地方要高得多。

在工业废水中主要存在的是聚乙烯（PE）和聚丙烯（PP），而且是伴随着大量的塑化剂，如DEHP、DBP等。这是因为在工业生产中对于塑料及其添加物的用量较大，在废水处理时很难将它们彻底清除干净，通常出现在工业废水中的是两种类型的微塑料——聚乙烯（PE）、聚丙烯（PP），并且其中还含有大量的塑化剂，比如邻苯二甲酸二辛酯（DEHP）或邻苯二甲酸二丁酯（DBP）。造成这一现象的原因是由于在工业生产和加工的过程中，对于塑料材料及添加物的广泛利用，在废水处理环节无法有效将微塑与

塑化剂完全清除出去。除此之外，值得注意的问题还有来自各地区的生活污水处理所呈现出的不同特点，比如从表1可以看出工业废水中微塑料的总去除率为86.73%，明显高于生活污水中的74.84%，说明了工业废水的处理方法比生活污水更能有效地除去微塑料，但是却不能很好地去除塑化剂。

## 二、城市生活污水中微塑料伴生塑化剂的复合生态风险评价

### （一）复合生态风险评价指标体系构建

建立复合生态风险评价指标体系。为了能够充分地分析出城市生活中产生的污水中的微塑料所伴随出现的塑化剂对于整个环境所产生的危害程度，在研究的过程中就需要建立起相关的复合生态风险评价指标体系，并且在制定过程中要保证其具有一定的科学性以及合理性还有可行性，从而使得最终得出的结果更加实用有效。对于所选指标的选择要充分考虑到微塑料以及塑化剂的生态毒性和生物富集系数、持久性以及可迁移性等因素，在具体的实践中可以通过开展相应的急性毒性实验或者慢性毒性实验来获得相关的生态毒性指标，并以此作为衡量污染物给水生动物造成危害的重要依据之一；而通过生物富集系数可以了解污染物在食物网中被积累的可能性大小，从而判断出该类污染会对处于较高营养等级上的生物产生何种程度的影响。

### （二）对水生生物的影响

微塑料所伴随产生的塑化剂会对水生生物产生一定的危害，在其中一方面表现为物理上的伤害以及另一方面为化学方面的毒害，具体表现形式也会随着污染物质不同及生物体本身处于哪个营养等级有所不同。在物理上来说，微塑料可能会被水生生物吃入到身体中去，造成消化系统堵塞或者出现其他部位受到损害的情况发生，甚至还会使机体承受更大的压力等。特别是像一些以过滤方式来获取食物的生物，比如浮游动物或者是贝类，当它们进食了这些微小的塑料时就会对其正常的食物摄入量带来很大的影响，并且还会影响到他们的成长与发育情况。从化学毒性的角度来说，由于塑化剂是微塑料常见的伴随污染物质且有很强的生物活性，能够穿过细胞壁进入到细胞内部，破坏生物体内的内分泌以及新陈代谢，并损害人体的免疫力等。研究发现，在较低剂量下，塑化剂就会导致水生生物出现氧化压力并改变基因表达情况，从而降低它们的存活率及生育力。

### （三）对污水处理厂处理工艺的影响

城市生活污水中的微塑料伴生塑化剂对污水处理厂各处理工艺的干扰已成为一个亟待关注的问题。在物理处理阶段，微塑料颗粒的存在可能影响沉淀池和过滤装置的正常运行，导致悬浮物去除效率下降和设备堵塞风险增加。在化学处理阶段，塑化剂的引入可能改变污水的化学性质，如pH值和溶解性有机碳含量，从而影响混凝、絮凝和高级氧化等工艺的处理效果。尤其是膜分离过程中的微塑料会在膜上产生沉积物，造成膜污染现象加重、膜通量降低及运营费用提高等不良影响，在生物处理过程中，伴随而来的塑化剂会对微生物种类及其活动带来较大影响。塑化剂的

毒害作用可能会使活性污泥中的相关生物体失去活力，从而影响它们对于污染物质的分解程度；另外，由于微塑料颗粒的存在可能会成为一些耐污生物的良好附着体，在处理过程中被富集而改变了微生物群体结构及多样性的变化。这将导致整个污水系统的处理效果下降，并且还会造成二次污染的问题出现，使得城市的水资源遭受更大的破坏性影响。

#### （四）基于联合毒性效应的交互作用风险评估

对于复合性生态风险来说，在评价过程中将微塑料、塑化剂作为两个单独存在的物质是不合理的，相互影响产生一种特殊的毒理作用——其结果往往是无法用简单的数学运算得出答案（即不是相加的关系），这这也是一个难题。因此，在评价时要跳出单一污染物的概念，主要关注的是“载体效应”，以及“协同毒性”。由于微塑料是疏水性的有机物载体，并且能将污水中所含有的塑化剂等物质吸收并富集到较高水平，在水中形成的混合型污染物，因此一旦被水生动物吞入体内之后，在其消化系统内会存在一定的释放现象，使得原本存在于微塑料上的塑化剂更容易进入生物体内部而发挥出更大的作用，即产生了所谓的“特洛伊木马”。

采用毒性单位方法或者混合性毒理学指数来定量描述微塑料和塑化剂共同存在下产生的协同、拮抗或加和作用。比如需要考虑的是微塑料造成的身体损害是否降低了机体免疫力从而加大了塑化剂带来的内分泌影响。借助建立的剂量-效应曲线模型研究在不同比例条件下所产生的联合毒性临界点，可以更加明确复合污染物对于水生动物生长发育以及基因变化所造成的影响程度，防止由于忽视相互作用而给环境管理工作带来错误指导。

#### （五）全生命周期动态迁移与生物富集风险评价

传统上以静态的环境浓度作为风险评价的基础，并未考虑伴随于微塑料上的塑化剂在处理过程中发生的转变与变化情况，在更全面地了解微塑料带来的危害时，需要将其视作一个完整的体系来看待——即从微塑料产生的源头开始，经过污水厂处理之后进入最终接收水域的过程。在污水厂内部，微塑料可能会因为吸收塑化剂而导致自身沉降性发生改变从而导致在初沉池或二沉池处被去除率降低，这会使得最后排出的水中所含有的危险物质含量发生变化。考虑复合污染物的食物链营养级放大作用，并研究

底栖动物因摄入含有微塑料—塑化剂复合体的沉积物而将污染物转移至更高营养水平鱼的可能性，建立以食物网为载体、传递为基础的动态生态风险预警体系。

#### （六）基于风险矩阵法的分级管控与不确定性分析

为便于实施管理措施应对复杂的数据信息，建议利用风险矩阵法评估微塑料伴生塑化剂的复合生态风险并对其进行分级处理。此方法结合了污染物发生可能性（即环境中的污染水平）以及其可能产生的结果（如生态毒性作用），将其分为几个等级。根据监测结果，将不同地区的生活污水中的微塑料以及塑化剂的暴露情况划分成低、中、高的三种级别。结合生态毒性数据来判断这些物质对于重要生物或生态系统的影响是否具有危险性。利用一个矩阵图来进行反应，把两种等级结合起来，并且找出那些有很高危险性的区域和可以被人们所接受的风险区域，以此作为区分的标准。例如，而如果已经确认是高危区域的话，在这种状况下就必须采取更加严格的方法来处理问题。除此之外在危险程度上还需要考虑到一些不稳定的因素，并且还要将取样时产生的误差、所测得数值的限制范围以及毒性的转移方式等带来的不确定的因素都纳入到其中去。通过敏感性分析的方式找出危险程度评估过程中的最关键的部分，例如说粒径或者是增塑剂释放的速度等等，并且能够确保结果真实有效。

### 三、结束语

本文详细分析了城市生活污水中共存于微塑料上的塑化剂并对其进行了综合评估，并且阐明了微塑料和塑化剂在城市生活污水处理过程中的来源以及它们之间的关系。结果表明，在不同城市的生活中处理过程中发现的主要原因包括日常使用的物品或工业废物等。同时，这些物质的存在方式也因所处的城市而异。通过对建立的复合生态风险评价指标体系分析得出，在该评价指标体系下，不仅会对水生生物产生一定的影响，并且也会对污水处理厂所采用的处理方式造成一定的影响，特别是对于其中的生态毒性以及生物富集等方面产生的影响较为明显。这在一定程度上也为城市的水环境治理提供了一定的支持作用，同时也在很大程度上为相关的生态风险评估工作起到了积极的作用。

### 参考文献

- [1] 宣立强, 刘硕, 万鲁河, 等. 典型城市不同来源污水中 MPs 的分布特征差异 [J]. 环境科学与技术, 2022, 45(6): 87-92.
- [2] 李海燕, 杨小琴, 简美鹏, 等. 城市水体中微塑料的来源、赋存及其生态风险研究进展 [J]. 生态环境学报, 2023, 32(2): 407-420.
- [3] 李宇翔, 刘硕, 古雪倩, 等. 哈尔滨人工渠中微塑料赋存特征 [J]. 世界生态学, 2024, 13(1): 69-75.
- [4] 郭荣欣, 邹德勋, 仝婧婧, 等. 生态环境中的微塑料: 文献计量网络分析 [J]. 应用化工, 2021, 50(S01): 248-259.
- [5] 徐丹影, 陈奥飞, 赵胤祺, 等. 武汉城市污水中微塑料的分离、鉴定及其微观特征分析 [J]. 环境科学研究, 2021, 34(3): 637-645.

# “双碳”目标下 CCER 方法学体系化扩容对“难减排”产业的激励效应与对策研究

黄庆晖

中国石油大学（北京）经济管理学院，北京 102249

DOI:10.61369/EAE.2026040009

**摘要：** 2024年1月 CCER 市场重启以来，方法学发布在2025年明显加速，截至2026年初总数达18项，覆盖领域从“本身绿”拓展至“难减排”转型领域。本文系统分析 CCER 方法学体系化扩容的制度演进逻辑、产业激励机制及其协同障碍。研究表明：方法学扩容通过价格信号传导、投资成本分摊、技术学习曲线效应和产业链协同四重机制激励高碳行业转型；但仍面临供需衔接失衡、与绿证权益重叠、额外性论证张力、国际化接轨缺口等协同障碍。论文据此提出优化方法学顶层设计、健全双重计算防范、推动国际互认等建议。

**关键词：** 中国核证自愿减排量；方法学体系；难减排产业；激励机制；制度协同

## Research on the Incentive Effects and Countermeasures of the Systematic Expansion of the CCER Methodology under the "Dual Carbon" Goals on Industries with Difficult Emission Reductions

Huang Qinghui

School of Economics and Management, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249

**Abstract：** Since the CCER market was reactivated in January 2024, the release of methodologies has significantly accelerated in 2025. By the beginning of 2026, the total number had reached 18, covering fields from "green by itself" to "difficult-to-abate" transformation areas. This paper systematically analyzes the institutional evolution logic, industrial incentive mechanism, and coordination obstacles of the systematic expansion of the CCER methodology system. The study shows that the expansion of methodologies stimulates the transformation of high-carbon industries through four mechanisms: price signal transmission, investment cost sharing, technology learning curve effect, and industrial chain collaboration; however, it still faces coordination obstacles such as imbalance between supply and demand, overlap with green certificate rights, tension in the demonstration of additivity, and gaps in international alignment. Based on this, the paper proposes suggestions for optimizing the top-level design of the methodology, improving dual calculation prevention, and promoting international mutual recognition.

**Keywords：** China Certified Emission Reduction; methodology system; difficult-to-absorb industries; incentive mechanism; institutional coordination

### 引言

碳市场是实现“双碳”目标的关键政策工具。中国 CCER 机制起步于2012年，因项目质量问题于2017年3月暂停，2023年10月生态环境部发布新版《温室气体自愿减排交易管理办法（试行）》并公布首批四项方法学，2024年1月正式重启。2025年方法学发布明显加速，全年落地12项加上原有6项共达18项，覆盖领域从“本身绿”向建筑节能、油气伴生气回收、农林生物质发电等“难减排”领域扩展，“CCER 方法学体系”顶层设计文件预计2026年发布，市场进入体系化阶段。

“难减排”产业（hard-to-abate sectors）指依靠常规市场机制难以深度减排的钢铁、水泥、化工、建筑、油气等部门，其转型直接关系2030年前碳达峰目标。现有文献多聚焦强制配额市场运行效率（王科和李思阳，2022；王科等，2023）、初始分配（何梦舒，2011）、扩围影响（刘宇等，2022）及顶层设计（张希良等，2021），鲜有针对方法学体系化扩容的产业激励分析。本文系统分析 CCER 方法学体系化扩容的制度演进逻辑、产业激励机制及其协同障碍，并提出政策建议。

作者简介：黄庆晖，2023级硕士生，专业：产业经济学，研究方向：能源经济与产业政策。



## 一、CCER方法学体系化扩容的制度演进与最新进展

### （一）制度溯源：从CDM到CCER

CCER机制脱胎于《京都议定书》的清洁发展机制（CDM）。2012年6月国家发改委发布《温室气体自愿减排交易管理暂行办法》，2015年启动交易，2017年3月因项目质量问题暂停备案，期间新项目停滞致供给萎缩。2023年10月生态环境部发布新版《管理办法（试行）》及首批四项方法学（造林碳汇、并网光热发电、并网海上风电、红树林营造），2024年1月CCER市场重启，由北京绿色交易所担任全国统一交易机构。

### （二）扩容节奏：从“精品路线”到“密集扩容”

重启后CCER方法学发布呈现加速特征。2023年10月首批四项聚焦“精品路线”；2025年成为密集扩容之年：1月第二批扩展至节能领域，8—9月第三、四批涵盖油气伴生气回收、生物质发电、滨海盐沼及海草床修复，10月第五批6项延伸至建筑节能与氢能，12月发布既有公共建筑能效提升方法学。截至2026年初总数达18项，林业碳汇5项、能源产业4项，整体覆盖可再生能源、节能、农业废弃物资源化、生态系统碳汇、非二氧化碳温室气体减排等方向。

### （三）体系化构建：从单点扩容到顶层设计

CCER方法学发展逻辑正发生结构性转变。“CCER方法学体系”预计2025年底或2026年发布，将自上而下针对重点行业，基于国家战略需求、项目额外性、数据质量等多维度形成系统性规划。其制度意义有三：一是改变方法学开发随意性；二是建立质量评估筛选统一标准；三是与全国碳市场扩围（2025年3月纳入钢铁、水泥、铝冶炼）呼应，构建强制与自愿两市场协同的政策合力。

### （四）覆盖维度：从“本身绿”到“高碳转低碳”

CCER方法学覆盖领域呈现从“本身绿”向“高碳转低碳”扩展的趋势。首批聚焦风电、光伏、造林等本身绿色领域，新近方法学更多关注传统高碳行业减排潜力，第五批首次涉及建筑节能（我国建筑能耗占全国能源消耗44.8%），第三批聚焦油气甲烷减排。这意味着CCER机制不再仅是清洁能源项目的财务补充工具，而正演变为系统性产业转型激励工具，拓宽了碳市场政策工具的产业边界。

## 二、方法学体系化扩容对“难减排”产业转型的激励机制

“难减排”产业的转型困境本质上是市场失灵问题：边际减排成本高、社会效益与私人收益错配、技术学习曲线陡峭。CCER方法学体系化扩容通过将其减排活动“碳货币化”，构造多维度激励机制。

### （一）价格信号传导机制

方法学发布相当于在产业活动与碳市场间架设价格传导通路——减排活动获方法学背书后，企业可将减排量核证为CCER交易获碳价收益，激励向低碳路径倾斜。当前CCER已显现与全

国碳排放配额（CEA）的“价差倒挂”——2024年初首批948万吨CCER登记以来成交均价高于同期CEA，反映市场对高质量CCER的稀缺性溢价。方法学体系化构建保障供给稳定预期将进一步强化价格信号引导功能（Newell & Pizer, 2003）。

### （二）投资成本分摊机制

“难减排”行业转型面临初始投资大、回收期长、单位减排成本高等障碍。CCER收益作为额外现金流可分摊资本支出压力，对建筑节能、油气伴生气回收尤具意义——以既有公共建筑节能改造为例，业主分散、投入大长期面临“市场失灵”与“组织失灵”双重困境，CCER引入可改善项目内部收益率（IRR），本质是通过外部碳价内部化矫正负外部性失衡。新方法学的“打包开发”机制亦回应了小微项目融资障碍。

### （三）技术学习曲线效应

新型低碳技术单位成本随累积装机量增加呈现学习曲线下降特征，但个体企业早期投入难独自承担学习成本，致“先行者吃亏”的市场失败。CCER方法学体系化扩容通过将分散减排活动纳入统一计量标尺，可加速学习曲线下移。以氢能为例，2024年电解水制氢因经济性差占比仅1%，绿氢方法学纳入后将以碳收益弥补成本劣势，推动规模化应用，形成“碳价补贴—规模扩张—成本下降—竞争力提升”良性循环。

### （四）产业链协同机制

随着方法学覆盖从单一节点拓展至全产业链，CCER机制可促进上下游协同减排，如规模化猪粪污沼气利用方法学既减少畜牧业甲烷排放，又通过沼气发电替代化石能源，形成“农业废弃物—清洁能源—碳减排”协同效应。这种“全产业链覆盖”模式使减排成本可在各环节合理分摊、收益跨主体重配置，有助打破“集体行动困境”，与Goulder（1995）双重红利理论一致，即矫正环境外部性的同时优化资源配置效率。

## 三、当前制度安排的局限与协同障碍

方法学体系化扩容虽提供了重要激励通路，但当前CCER制度仍存在若干结构性局限。

### （一）与强制配额市场的供需衔接失衡

CCER作为强制配额市场抵销工具，需求规模受抵销比例上限约束（不超5%）。2025年3月全国碳市场扩围至钢铁、水泥、铝冶炼后需求大幅扩张，但同期方法学密集扩容也带来潜在供给增量。截至2025年8月底自愿市场累计成交249万吨、成交额2.1亿元，而强制碳市场配额累计成交6.96亿吨、478.26亿元，两市场规模显著不对称，易致价格波动加剧、套利空间过大，扩容节奏与抵销需求的动态平衡成为关键难题。

### （二）CCER与绿证的环境权益重叠

可再生能源既能开发CCER又能产生绿证，环境权益重复计算问题凸显。同一项目若不加区分参与两市场，可能导致减排收益重复出售。当前监管已明确项目“二选一”并设两年过渡期，但过渡期后边界划定仍需明确，设计不当反而扭曲企业选择、引发市场分割。一种优化路径是按“额外性强度”划分：高额外性前

沿项目进入 CCER 市场，常规平价上网项目统一通过绿证获益。

**（三）额外性论证与方法学质量的张力**

额外性是 CCER 机制的根本基石，只有相对基准情景产生额外减排才能签发 CCER。方法学扩容速度与质量保障存在天然张力：密集扩容利于覆盖更多产业，但过快可能引入额外性争议项目，损害国际公信力。当前采用“免予额外性论证”与“一般论证”双轨制，务实降低开发难度同时对方法学科学性提出更高要求。如何在扩容速度与质量、激励广度与额外性严格性间寻求平衡，是体系化建设的根本议题。

**（四）国际化接轨的制度缺口**

随着欧盟碳边境调节机制（CBAM）于2026年1月1日实施、CORSIA 等国际机制推进，CCER 国际化需求上升。但当前监管框架未明确境外注册机构直接参与 CCER 交易的可行路径。《管理办法》第二十九条虽规定跨境交易由生态环境部另行制定，相关管理办法已列入2025—2026年度重点任务清单但具体规则未出台，直接制约钢铁、水泥、铝冶炼等出口导向行业借助 CCER 应对国际气候规则的能力。

**四、政策建议**

基于上述分析，本文从产业激励机制完善与制度协同视角提出以下政策建议。

第一，优化方法学体系顶层设计。根据产业转型战略明确开发优先序，重点向“难减排”产业倾斜；设立分级管理机制，对战略急需领域采用“快速通道”，对额外性争议领域设“观察期”；引入“打包开发”等机制激活分散减排主体。

第二，完善市场衔接与价格发现机制。扩大市场参与主体，引入金融机构等专业投资者；探索 CCER 期货、远期等衍生工具丰富价格发现与风险管理；抵销比例可据供给与履约需求动态调整，建立市场调节机制。

第三，健全双重计算防范机制。尽快出台过渡期后 CCER 与绿证永久划界规则，按“额外性强度”标准：常规可再生能源纳入绿证，新技术可再生能源、碳汇等高额外性项目纳入 CCER；建立全国统一环境权益登记平台防止重复计量。

第四，推进国际互认与数据质量监管。抓住跨境碳交易管理办法制定窗口明确境外机构参与路径，优先推动 CCER 被 CORSIA、《巴黎协定》第六条等机制认可为合格抵销单位，推动我国特色方法学参与国际规则制定；运用区块链、物联网建立全流程数据追溯体系，加快培育第三方审定与核查机构。

**五、结论**

CCER 方法学体系化扩容是中国碳市场进入新阶段的重要标志。本文研究揭示：方法学体系化扩容通过价格信号传导、投资成本分摊、技术学习曲线效应和产业链协同四重机制，构成对“难减排”产业绿色转型的系统性激励工具；其覆盖领域从“本身绿”向“高碳转低碳”延伸，标志 CCER 从清洁能源项目财务补充工具向产业系统性转型激励工具的功能性跃迁。然而当前制度仍面临供需衔接失衡、与绿证权益重叠、额外性论证张力、国际化接轨缺口等障碍，未来应从方法学顶层设计、市场衔接、双重计算防范、国际互认等维度系统优化，使 CCER 真正成为驱动“难减排”产业绿色低碳转型的有效市场工具。

**参考文献**

[1] 何梦舒. 我国碳排放权初始分配研究——基于金融工程视角的分析 [J]. 管理世界, 2011, (11): 172–173.  
[2] 王科, 李思阳. 中国碳市场回顾与展望 (2022)[J]. 北京理工大学学报 (社会科学版), 2022, 24(2): 33–42.  
[3] 王科, 李世龙, 李思阳, 等. 中国碳市场回顾与最优行业纳入顺序展望 (2023)[J]. 北京理工大学学报 (社会科学版), 2023, 25(2): 36–44.  
[4] 刘宇, 羊凌玉, 李欣蓓, 等. 碳中和目标实现下中国转型发展路径研究 [J]. 北京理工大学学报 (社会科学版), 2022, 24(4): 27–36.  
[5] 张希良, 张达, 余润心. 中国特色全国碳市场设计理论与实践 [J]. 管理世界, 2021, 37(8): 80–95.  
[6] 生态环境部. 全国碳市场发展报告 (2025)[R]. 北京: 生态环境部, 2025.  
[7] Newell R G, Pizer W A. Regulating stock externalities under uncertainty[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2003, 45(2): 416–432.  
[8] Goulder L H. Environmental taxation and the double dividend: A reader’s guide[J]. International Tax and Public Finance, 1995, 2(2): 157–183.

# 热改性煤气化渣 – 生物炭复合材料提升水稻根际固氮酶活性研究

吴剑锋<sup>1</sup>, 朱超<sup>1</sup>, 张志诚<sup>1</sup>, 原晨曦<sup>1</sup>, 杨明晖<sup>1</sup>, 许洁<sup>2</sup>

1. 陕西科技大学, 陕西 西安 710021

2. 中国石油西南油气田公司安全环保监督检测中心, 四川 成都 610041

DOI:10.61369/EAE.2026040010

**摘 要 :** 在稻田生态系统中, 铁、锰、钼等金属元素生物可利用性低, 限制了生物固氮效率; 而煤气化渣富含金属元素、堆存环境风险高。本研究将 CGS 与稻壳在 700℃ 下共热解, 制得复合材料 CGS-BC700。结果表明, 共热解破坏了 CGS 的硅铝酸盐网络, 比表面积增至 245.6 m<sup>2</sup>/g, 铁、锰、钼呈现缓释特征。施用于水稻后, 根际固氮酶活性提高约 2.8 倍, 固氮微生物群落被激活, 促进光合产物积累, 产量提高 15.2%, 籽粒蛋白质含量上升。单独施用生物炭与未活化 CGS 效果不显著, 说明共热解活化是实现协同增效的关键。CGS-BC700 兼具载体供菌和缓释供金属辅因子的双重功能, 实现了固废资源化、根际微生态调控与作物增产的统一。后续需关注其在多季连作下的长效性及对土著微生物群落的影响。

**关 键 词 :** 煤气化渣; 生物炭复合材料; 共热解; 固氮酶活性; 生物固氮

## Study on the Enhancement of Nitrogen Fixation Enzyme Activity in Rice Rhizosphere by Heat Modified Coal Gasification Slag Biochar Composite Material

Wu Jianfeng<sup>1</sup>, Zhu Chao<sup>1</sup>, Zhang Zhicheng<sup>1</sup>, Yuan Chenxi<sup>1</sup>, Yang Minghui<sup>1</sup>, Xu Jie<sup>2</sup>

1. Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710021

2. Safety and Environmental Protection Supervision and Testing Center, Petro China Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu, Sichuan 610041

**Abstract :** In the rice paddy ecosystem, the bioavailability of metal elements such as iron, manganese, and molybdenum is low, which limits the efficiency of biological nitrogen fixation; Coal gasification slag is rich in metal elements and has high environmental risks for storage. This study co pyrolyzed CGS with rice husk at 700 °C to produce composite material CGS-BC700. The results showed that co pyrolysis destroyed the aluminosilicate network of CGS, increasing the specific surface area to 245.6 m<sup>2</sup>/g. Iron, manganese, and molybdenum exhibited slow-release characteristics. After application to rice, the rhizosphere nitrogenase activity increased by about 2.8 times, the nitrogen fixing microbial community was activated, the accumulation of photosynthetic products was promoted, the yield increased by 15.2%, and the grain protein content increased. The application of biochar alone and unactivated CGS showed no significant effect, indicating that co pyrolysis activation is the key to achieving synergistic efficiency enhancement. CGS-BC700 combines the dual functions of carrier bacterial supply and slow-release metal cofactor supply, achieving the unity of solid waste resource utilization, rhizosphere microecological regulation, and crop yield increase. Subsequent attention should be paid to its long-term effectiveness under multi season continuous cropping and its impact on indigenous microbial communities.

**Keywords :** coal gasification slag; biochar composite; co-pyrolysis; nitrogenase activity; biological nitrogen fixation

## 引言

全球水稻生产长期依赖化学氮肥, 过量投入的氮肥会对环境带来巨大压力, 亟需开发生物固氮 (BNF) 潜力以替代部分氮肥。在淹水稻田中, 根际固氮微生物可将大气氮转化为生物可用氮, 通过强化这一内源供氮途径, 是未来水稻可持续生产的方向。生物炭作

为土壤改良剂,具备较大的比表面积和良好孔隙结构,可改善土壤环境和阳离子交换能力,营造适宜微生物生长的微环境<sup>[1]</sup>。但原始生物炭缺乏固氮酶所需的关键金属元素<sup>[2]</sup>,而土壤中这些元素常以无效态存在,限制了生物炭对固氮效率的稳定提升效果<sup>[3]</sup>。煤气化渣(CGS)富含上述微量元素,但其经1300℃以上高温熔融后,金属被包裹于稳定的铝硅酸盐玻璃相中,常规条件下难以释放,生物可利用性极低<sup>[4]</sup>。常用的活化手段如强酸浸出、高温熔融处理,能耗高、化学消耗大,并会产生酸性废液和废气等二次污染物<sup>[5]</sup>。因此,有必要开发一种新的非破坏性固相改性技术,以实现煤气化渣玻璃结构中高效的物理破碎使内部营养物质得到充分释放。

为此,本研究提出假设:在适当温度下将稻壳与气化渣共碳化,可破坏气化渣的玻璃相结构,制备出兼具多级孔隙与微量元素缓释功能的复合材料。生物炭提供缓冲与离子交换能力,气化渣供给金属辅因子,二者协同构建有利于固氮微生物的根际微环境。为了验证这一假设,本研究通过材料结构、元素释放和农业效应三个方面进行验证。首先是在600至800℃下制备复合材料,分析其相组成、孔隙变化与微观结构;之后通过土壤溶液模拟,测定Fe、Mn、Mo的释放动力学;最后开展水稻培育试验,监测根际固氮酶活性、土壤指标及水稻生长状况。最终基于试验结果,评估该材料在集成化稻田中的应用前景。

## 一、材料与方法

### (一) 原料制备和复合合成

稻壳原料取自当地一家农产品加工企业。去离子水反复冲洗外壳后置于80℃的烘箱中干燥,直至恒定质量。煤气化渣是从商业煤化工工厂获得的工业副产品。在热解之前,将两种原料进行机械破碎,并通过2毫米不锈钢筛进行筛分。复合材料的制备过程如下:将干燥的稻壳和CGS以预定的质量比充分混合,然后转移到石英舟中,置于水平管式炉内。通高纯氮气(N<sub>2</sub>,纯度≥99.999%)30分钟,建立无氧气氛。随后,以5℃/min的加热速率加热到600、700和800℃的目标温度,并保温2小时。冷却至室温后,回收固体产物并标记CGS-BC600、CGS-BC700和CGS-BC800。同时,在相同条件下制备稻壳生物炭(BC),并保留未经处理的CGS作为对照材料。

### (二) 物理化学表征

采用扫描电子显微镜(SEM)观察样品的表面微观形貌和结构变化。为评估铝硅酸盐玻璃相的非晶化和破碎程度,进行了X射线衍射(XRD)分析。基于低温氮吸附-解吸等温线,采用BET方程计算比表面积,同时分析孔径分布特征。此外,还进行了水提取实验,以定量研究金属元素的释放动力学。经微孔膜过滤后,通过电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)测定提取溶液中目标元素的浓度。

### (三) 实验设计与植物栽培

在温室条件下进行了对照盆栽试验,以评估改性材料在农业土壤环境中的实际应用潜力。使用10%(v/v)过氧化氢溶液对水稻种子进行表面消毒15分钟,用去离子水冲洗,并在黑暗条件下发芽。当幼苗达到合适的生长阶段时,选择发育均匀的水稻幼苗,并将其移植到装有田间收集的水稻土作为生长基质的塑料盆中。试验采用随机完全区组设计,共6个处理,具体如下:

(1)空白对照(CK),不施用土壤改良剂;(2)原始稻壳生物炭(BC);(3)原料未改性煤气化渣(CGS);(4)复合材料CGS-BC600;(5)复合材料CGS-BC700;(6)复合材料CGS-BC800。每种材料的施用率统一设定为土壤干重(w/w)的2%,并在水稻移植前将每种材料与土壤完全均质化。在水稻的生

长周期内,在土壤表面保持2-3cm的水面,模拟传统稻田的典型淹水厌氧环境。

### (四) 土壤、酶和植物分析

在水稻分蘖期和生理成熟期采集根际土壤样本。挖掘出根系完整的整株水稻,将紧紧附着在根表面的土壤刷掉,作为根际土壤。以1:2.5(w/v)的土壤-水质量体积比制备土壤悬浮液,分别测定土壤pH值和电导率(EC)。通过重铬酸钾氧化容量法测量总有机碳(TOC)和土壤有机质(SOM)含量。以2mol/L氯化钾(KCl)溶液为萃取剂,提取土壤中的铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)。通过定量滤纸过滤后,用靛酚蓝比色法定量NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N浓度。采用乙炔还原法(ARA)测定根际土壤固氮酶活性。待水稻成熟收获后,将地上植物部分和根系分离,用去离子水彻底冲洗,在70℃下烘干至恒重,称重计算植物总干生物量。水稻的千粒重、籽粒蛋白质含量和淀粉含量等指标均按照相应的国家标准方法进行测定。

### (五) 统计分析

所有实验测定均采用三个独立的生物重复进行,以确保所获数据的可重复性和统计可靠性。使用R软件进行数据处理和统计分析。采用单向方差分析来评估所有处理组之间的总体显著差异。如果通过方差分析检测到显著差异,则采用Tukey的显著性差异事后检验进行多重比较,以区分不同处理之间的平均值差异。在这项研究中,统计显著性阈值设定为p<0.05。

## 二、结果

### (一) CGS-BC复合材料的形态和结构演变

SEM结合EDS元素表面扫描的结果表明,样品在热协同处理过程中的形态变化如图1所示。原始煤气化渣的微观表面致密光滑,表现出快速冷却下形成的铝硅酸盐玻璃的典型形态特征。经过改性后,复合材料内部形成了高度异质的多级孔结构。特别是在700℃下,内部煤气化渣玻璃基质发生大规模破碎,产生的无机矿物碎片紧密嵌入碳质骨架中。上述相结构破坏效应也通过XR图得到了验证:在未处理的气化渣中,在2θ=20°-30°范围内有一个属于铝硅酸盐玻璃体的宽漫射衍射峰,其非晶衍射峰的强度在改性后显著降低(图2a),表明玻璃体网络骨架的有序结构



被破坏。从氮吸附-解吸等温线可以看出，材料的比表面积大大提高（图2b）：原始煤气化渣的比表面积仅为8.4 m<sup>2</sup>/g，CGS-BC700增加到245.6 m<sup>2</sup>/g（图2c）。比表面积变化的主要原因是热解过程中分解了大量的生物质组分，并在碳质基质中产生了丰富的介孔结构。

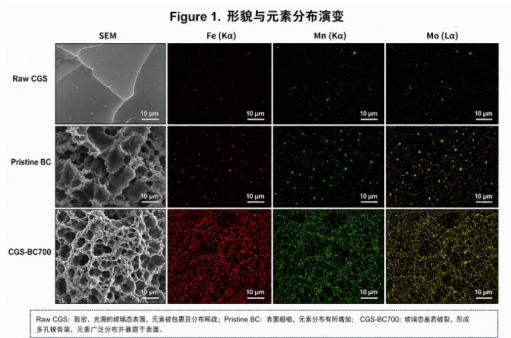


图1 原料和合成复合材料的形态和元素演变。

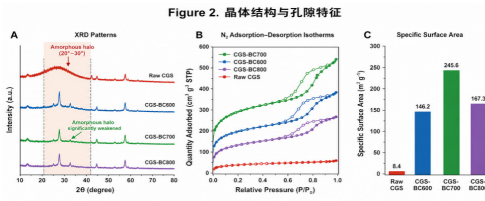


图2 CGS-BC复合材料的结构和纹理特征。(a) X射线衍射(XRD)图。(b) N<sub>2</sub>吸附-解吸等温线。(c)不同热解温度下的比表面积(SSA)变化。

## (二) 微量金属辅因子的释放动力学

在30天内进行了水提取实验，以分析铁、锰和钼的活化和释放，结果如图3所示。实验过程中，原煤气化渣的金属浸出浓度始终保持较低水平，证实了玻璃相的化学稳定性。改性后，复合材料表现出金属元素的持续释放能力，释放量由热解温度决定。在实验条件下，CGS-BC700的累积浸出浓度最高。30天后，浓度达到14.2 mg/L Fe，3.8 mg/L Mn，0.45 mg/L Mo。动力学曲线显示出两阶段模式，最初的5天内为缓慢溶解阶段，随后过渡到线性释放阶段。说明该材料可以以较低的速率提供长期的微量金属元素供应。当热解温度升高到800℃时，所得产物的释放能力降低。这种下降可归咎于两个因素。一方面，高温导致无机矿物基质部分重新烧结，导致先前暴露的活性位点重新封闭。另一方面，生物炭的孔隙结构在高温下发生坍塌，液体介质和内部活性表面之间的接触面积减小，阻碍了金属离子的扩散和传质。

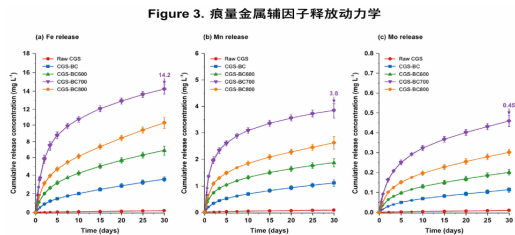


图3在30天的水浸出期内，粗CGS、原始BC和CGS-BC复合物中主要金属辅因子的累积释放动力学：(a)铁(Fe)，(b)锰(Mn)和(c)钼(Mo)。数值以平均值±标准差表示(n=3)。

## (三) 根际微环境与固氮酶活性

应用改性材料后，水稻根际土壤的理化性质发生了显著变化。相较于空白组，CGS-BC700处理使土壤有机质增加了34.2%。pH值在6.5-6.8的范围内保持稳定，有利于水稻生长（图4a）。测定固氮酶活性后发现，单独使用生物炭只会使酶活性略有增加。相比之下，CGS-BC700处理的乙烯生产率是对照组的2.8倍（图4b）。从机理的角度来看，酶活性的显著增强与铁、锰和钼的持续缓慢释放直接相关。这三种微量营养素直接参与铁蛋白、铁钼辅因子和其他含金属活性中心的构建。缓解了根际固氮微生物的营养限制，从而使固氮酶活性升高。

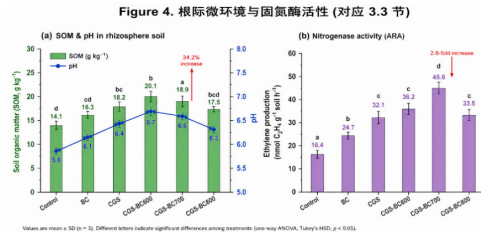


图4不同改良剂对根际微环境和重氮营养功能的影响。(a) 分蘖期土壤有机质(SOM)和pH值。(b)通过乙炔还原试验(ARA)量化的根际固氮酶活性。

## (四) 水稻生长状况与生物量积累

水稻产量的变化反映了根际微环境的改善和水稻固氮能力的增强。CGS-BC700处理组显示出最佳的营养生长状态。与对照组相比，地上干生物量增加了41.5%，根系增加了52.3%（图5a）。同时，根系面积出现较大增长，表明在根际养分供应改善后，光合产物优先分布在地下，促进根系建设。稻米指标的变化趋势与水稻生长状况一致。在CGS-BC700处理下，千粒重达26.8克，与未处理的土壤相比增加了15.2%。稻米的蛋白质含量也同步增加，最高达8.9%（图5b）。这表明高效氮素利用不仅能提高产量，还能促进含氮化合物在籽粒中的积累。原状煤气化渣和原始生物炭的增产效果有限表明，复合材料的效果提高不仅仅是两种原料功能的总和。由两者共热解形成的界面互穿复合结构弥补了单一原料的缺点，对水稻生长和产量形成实现了多方面的正向调控。

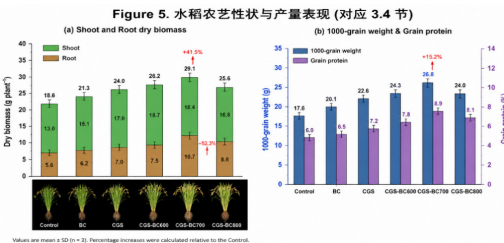


图5不同处理下水稻的生长状况和产量构成。(a)茎和根干生物量积累。(b)1000粒重和粒蛋白含量。数值为平均值±标准差(n=3)。

## 三、讨论

CGS-BC700优异的农用性能，本质上是CGS中铝硅酸盐玻璃基质经高温后的结构破坏。700℃下的共热解诱导物理破碎并构

建分级碳支架，使表面积增加至245.6 m<sup>2</sup> /g即可证明这一点。结构重构会释放原本其中包裹的微量金属元素，同时多孔生物炭骨架能够避免快速淋溶，最终实现金属元素长效稳定的双相缓释。在淹水的水稻土中，这种稳定的供应直接缓解了重氮营养群落的元素瓶颈。复合材料通过独特的协同作用：生物炭部分缓冲 pH 值，为微生物定殖提供物理微生态位，而破碎的 CGS 则充当长期的矿物库。这种优化后的地下微环境最终在灌浆阶段转化为优越的氮资源库，通过增强氮同化，使千粒重增加 15.2%，籽粒蛋白质含量提高。尽管短期效果优良，但将这项技术过渡到田间应用仍需谨慎。需要多年的原位实验评估碳骨架的结构稳定性，并监测土壤-作物系统中共存重金属的潜在累积风险。最终，通过全面的生命周期技术经济评估，以验证这种共热解策略在传统施肥制度下的商业可行性和环境可持续性。

## 四、结论

综上所述，在700℃下将煤气化渣与稻壳共热解，有效地克服了原料 CGS 的养分难溶性。复合材料充当金属辅因子缓释储库，能有效改善土壤微量金属供给不足的问题，使根际固氮酶活性增加2.8倍，在提升籽粒蛋白质含量的基础上，使水稻产量同步增加15.2%。除了直接产生农业增产效益外，这种双源废弃物协同回收模式是一套具备实操性的处置方案。一方面能够同步降低工业废渣与农业副产物的环境压力，另一方面为集成化水稻种植体系强化生物固氮作用开辟了可持续、可行的新思路。

## 参考文献

[1] 高亮, 李志合, 王芳, 等. 生物炭在土壤改良中的应用进展与风险分析 [J]. 农业工程学报, 2025, 41(19): 19–31.

[2] 王玉虎, 赵明敏, 郑红丽. 植物内生固氮菌及其固氮机理研究进展 [J]. 生物技术进展, 2022, 12(1): 17–26.

[3] 王慧, 马婧, 张燕辉, 等. 稻田生物固氮及其调控途径研究进展 [J]. 微生物学通报, 2025, 52(8): 3481–3494.

[4] 孙振杰, 唐彪, 董开明, 等. 煤气化细渣活化耦合酸浸过程结构演化特性 [J]. 中国矿业大学学报, 2025, 54(03): 524–533.

[5] 丁子涵, 马丽, 吴俊杰, 等. 煤气化渣制备功能微纳材料研究进展 [J]. 工程科学学报, 2024, 46(9): 1671–1684.

# 林芝市融雪水文环境径流汇流模拟研究

次仁旺姆, 陈宫燕\*, 巴果卓玛, 强巴欧珠, 阿旺卓玛

西藏林芝市气象局, 西藏 林芝 860000

DOI:10.61369/EAE.2026040011

**摘 要 :** 近年来林芝市流域由气候变暖引发的洪涝灾害风险加剧。针对林芝市冰川融水对径流过程的影响,在径流模拟过程中,集成了度日模型,将冰川融水作为模型的重要水量收入来源,构建了适宜于高海拔和高山地区的融雪径流汇流模型。在波密与奴下实验区通过实际水位数据率定模型参数,开展模型模拟对比实验。实验发现,在高海拔和高山地区,未考虑冰川融雪情况下,同一实验区简单径流汇流模型的拟合系数为0.85、0.92,而增加冰川融雪后,其拟合系数为0.96、0.98,同比增长13%、7%左右。表明本文的融雪径流汇流模型可应用于高海拔和高山地区的径流汇流模拟。这一成果对于林芝市流域的水文管理和复杂水文环境下的径流汇流模拟研究具有重要的理论和实践价值。

**关 键 词 :** 林芝市; 复杂水文; 径流模拟; 冰川融雪

## Simulation Study on Runoff Confluence in Snowmelt Hydrological Environment in Linzhi

Ciren Wangmu, Chen Gongyan\*, Baguo Zhuoma, Qiangba Ouzhu, Awang Zhuoma

Nyingchi Municipal Meteorological Bureau, Xizang, Linzhi, Xizang 860000

**Abstract :** The risk of flooding in the Linzhi City watershed, triggered by climate warming, has increased in recent years. In view of the influence of glacier meltwater on the runoff process in Linzhi City, during the runoff simulation process, the degree-day model was integrated, and the glacier meltwater was taken as an important source of water revenue in the model, so that the snowmelt runoff and confluence model was constructed suitable for high-altitude and alpine areas. In the experimental areas of Bomi and Nuxia, the model parameters were determined by the actual water level data, and comparative experiments were carried out. It was found that the fitting coefficients of the simple runoff and catchment model in the same experimental area were 0.85 and 0.92 at high altitude and high mountain areas without considering the glacier snowmelt, while the fitting coefficients of the model were 0.96 and 0.98 after adding the glacier snowmelt, which were increased by about 13% and 7% year-on-year. It shows that the snowmelt runoff catchment model in this paper can be applied to runoff catchment simulation in high altitude and alpine areas. This result has important theoretical and practical value for the hydrological management of Linzhi City watershed and the simulation of runoff and catchment under complex hydrological environment.

**Keywords :** Linzhi city; complex hydrology; runoff simulation; glacial snowmelt

### 引言

随着气候变化,西藏林芝冰川发生大面积消融,导致汛期雅鲁藏布江下游水位暴涨。林芝的复杂水文环境,受高山部分水以固态形式存放,融化为液态时受温度等气候要素影响<sup>[1]</sup>。近几年,全国冰川积雪呈现消融趋势,直接影响当地水文,体现在降水、蒸发、融雪等方面<sup>[2-3]</sup>。气候变化增加了冰川积雪区的水文预测研究的复杂性<sup>[4]</sup>。目前对于高原冰川融雪水文环境下径流汇流过程的研究仍存在一定的不充分<sup>[5]</sup>,特别是缺乏完整冰川积雪数据情况下进行的有效径流汇流模拟研究。高原地区关于冰川积雪的径流汇流模型研究有 Singh Vishal等使用 SWAT 模型研究喜马拉雅陡峭山脉流域尺度上积雪和融雪<sup>[6]</sup>。SWAT 模型是一种冰雪消融模拟方法,这种方法计算复杂,需要大量的气象和冰川数据,对于地形复杂、数据稀缺的林芝来说,推广应用存在一定难度。度日模型(Degree-Day Model)是一种简化的冰川消融模拟方法,度日模型在冰雪消融估算中的应用更为广泛。因此,采用度日模型对冰川融雪进行估算,将度日模型纳入径流汇流模型中,使其适应林芝的冰川融雪水文环境,创新性地搭建一个适用于高原融雪径流汇流的模型。

资助项目: 西藏自治区科技厅自然科学基金项目(XZ202101ZR0042G)。

作者简介: 次仁旺姆,女,藏族,大学本科,现有职称: 工程师,研究方向: 应用气象,主要从事气象服务与应用气象研究。E-mail: 313261200@qq.com

通讯作者: 陈宫燕,正高级工程师,主要从事预报技术与方法研究。E-mail: chengongyan\_35@163.com

一、研究区概况及实验区建立

(一) 研究区概况

林芝地处西藏东南部,平均海拔3100m,山高谷深,具有低温的气候条件,使降雨以积雪的形式储存,发育为现代冰川。林芝的冰川和常年积雪面积6728.2km<sup>2</sup>,占土地总面积的5.78%。海洋性冰川主要发育于受海洋性气候影响的地区,特点是积累和消融过程较为频繁,气温相对较高,因此冰川的运动和变化活动性较强<sup>[7-8]</sup>。波密县易贡八玉沟的卡钦冰川是全国最大的海洋性冰川<sup>[9-10]</sup>。

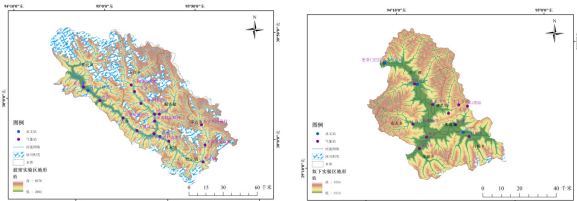


图1-1 林芝水文环境研究区域图 (a.波密 b.奴下)

(二) 研究数据概况

径流汇流模型的设计涉及多种数据,其中一些数据对模拟效果和适应性的影响至关重要。

1. 地形数据

本文收集到的林芝市 DEM数据的分辨率为30米,能够捕捉到林芝区域内的山脉、河流、谷地及地貌特征。

2. 气象数据

气象数据来源于林芝市及周边气象站,包括自动气象站和人工观测站的记录,以2019年、2020年的数据为主。

3. 水位数据

研究的径流汇流模型能够模拟出流域内的径流水位,通过与实测水位数据进行比较,以评估模型的性能和准确性。

4. 冰川积雪数据

采用了一种基于气温的融雪径流汇流模型,该融雪径流汇流模型能够估算冰川融水对水位的影响。

(三) 实验区建立

根据林芝的历史积雪数据,在冰川积雪覆盖度较高的波密和奴下作为融雪水文环境实验区。

表1-1 融雪水文环境实验区

| 简单水文环境实验区 | 水系    | 地形   | 降雨        | 气温        | 附近冰川       | 附近闸坝        | 数据情况              |
|-----------|-------|------|-----------|-----------|------------|-------------|-------------------|
| 波密实验区     | 帕隆藏布江 | 河谷地貌 | 年降雨量977毫米 | 年均气温8.5℃  | 附近冰川覆盖度相对高 | 上游无运行的水电站   | 汛期部分水文数据,少量冰川积雪数据 |
| 奴下实验区     | 雅鲁藏布江 | 大峡谷  | 年降雨量650毫米 | 年平均气温8.2℃ |            | 上游附近无运行的水电站 |                   |

二、径流汇流模拟研究

(一) 简单水文环境径流汇流模拟研究

1. 简单水文环境径流汇流模型

简单水文环境径流汇流模型要充分考虑到地形、降雨、气温、水位因素,具有可以反映出上述因素下对径流产生降雨、蒸发、下渗、扩散等影响的能力。将林芝的流域纳入径流汇流计算,以 Navier-Stokes 方程为指导。

2. 水流运动的 N-S 方程

N-S 方程考虑了流体的质量守恒、动量守恒和能量守恒。公式2-1是 N-S 方程的一部分,用于描述流体的运动行为。由于水流运动是同性和不可压的流体运动,可以视为是无粘性的流体, N-S 公式表达为方程组:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -(u \cdot \nabla)u - \frac{1}{\rho} \nabla p + F \quad (2-1)$$

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (2-2)$$

式中, u 为速度场, ρ 为流体密度, p 为压强, F 是作用于流体上的质量力(外力)。 $\nabla \cdot u = 0$  表示流体是不可压缩的,即质量在流体中是守恒的。

3. 模型模拟结果评价

本研究统计模型模拟的水位结果与真实水位数据进行线性拟合,评价两个数据的相关性和线性拟合系数,作为参数率定、适

应性分析的依据。建立一个自变量与因变量间的线性关系模型。

$$y = \beta_0 + \beta_1 x \quad (2-3)$$

$\beta_0$  是截距,  $\beta_1$  是斜率。通过计算皮尔逊相关系数(Pearson's r)来衡量两个连续变量间线性相关程度的统计量,其范围在-1到1,1表示完全正相关,-1表示完全负相关,0表示没有线性相关,越接近1表明模型模拟的效果越好。

$$r = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2 \sum (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (2-4)$$

式中,  $X_i$  和  $Y_i$  分别是两个变量的观测值,  $\bar{X}$  和  $\bar{Y}$  是它们的平均值。

决定系数(R-Square)来评估模型的拟合优度和可靠性,越接近1表明模型模拟的效果越好。在简单线性回归中,R-Square 值也等于 Pearson's r 的平方。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (2-5)$$

在简单线性回归中  $\hat{Y}_i$  可以通过回归方程  $\hat{Y}_i = \beta_0 + \beta_1 X_i$  计算得到。

(二) 融雪水文环境径流汇流模拟研究

1. 融雪径流汇流模型的构建

在探索径流汇流模型在林芝的应用过程中,首先在简单水文



环境中进行了模型的适应性分析，一定程度上能够反映林芝多变地形、独特气候及降雨蒸发等关键水文特征。而对于林芝特有的冰川融雪现象，现有模型尚缺乏充分的解释能力。为确保径流汇流模型在林芝各流域的适用性，继续深入研究复杂水文环境下的径流汇流模型。

在林芝高山地区，冰川消融对水资源的贡献显著，因此在径流模拟中考虑冰川消融作为水分收入源至关重要，基于度日模型的原理，冰川消融量与超过某一阈值（通常为 $0^{\circ}\text{C}$ ）的累积正气温成正比。度日模型数学表达：

$$M = \begin{cases} MF(T - T_0) & T > T_0 \\ 0 & T \leq T_0 \end{cases} \quad (2-6)$$

其中， $M$ 为日消融量（ $\text{mm}$ ）， $T$ 为日平均气温（ $^{\circ}\text{C}$ ）， $T_0$ 为冰川消融温度阈值（ $^{\circ}\text{C}$ ）， $MF$ 为度日因子（ $\text{mm} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ）。由于林芝市地形起伏大，基于DEM与温度递减率对空间插值后的气温进行了修正。将气温数据插值后代入公式2-6计算得到冰川所在栅格像元的日消融量。栅格单元的降水量加上冰川消融量作为模型的水量输入。

增加冰川消融量后模型的水量平衡公式为：

设 $t_n$ 时刻的中心栅格 $c$ 水位为 $W_c^n$ 。依据水量平衡原理， $t_{n+1}$ 时刻的中心栅格水位 $W_c^{n+1}$ 为：

$$W_c^{n+1} = W_c^n + R_c^n + In_c^n - I_c^n - E_c^n - Out_c^n + M_c^n \quad (2-7)$$

式中， $M_c^n$ 、 $R_c^n$ 分别为中心栅格时间片上的消融量、降水量，由流域气象站小时降水数据插值得到； $In_c^n$ 、 $Out_c^n$ 、 $I_c^n$ 、 $E_c^n$ 分别表示中心栅格时间片上的流入、流出、下渗和蒸发量，依据下透性质设定下渗率和蒸发率，与 $W_c^n$ 相乘得。

在简单径流汇流模型中加入度日模型，建立的融雪径流汇流模型，能更好模拟和预测冰川积雪消融对流域径流的影响。融雪径流汇流模型中增加了融雪温度这一参数，与径流汇流模型的参数率定过程相同，模型基于当地气温数据以手动率定的方式确定实验区融雪温度参数。

### 三、融雪水文环境适应性分析

#### （一）波密实验区适应性分析

融雪径流汇流模型构建后，在波密实验区进行适应性分析，观察融雪水文参数在融雪水文环境中的适用性。

表3-1 波密实验区径流模拟参数

| 参数       | 下渗系数<br>(mm/h) | 蒸发系数<br>(mm/h) | 加速系数<br>(mm/h <sup>2</sup> ) | 扩散系数<br>(mm/h) | 最大水速<br>(m/s) | 融雪温度<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) |
|----------|----------------|----------------|------------------------------|----------------|---------------|--------------------------------|
| 径流汇流模型   | 0.10           | 0.02           | 0.24                         | 0.12           | 2.00          | 无                              |
| 融雪径流汇流模型 | 0.10           | 0.02           | 0.24                         | 0.12           | 2.00          | 8.50                           |

在集成融雪水文参数之前，2020年6月16日0时-20日23时段不含融雪水文参数在波密实验区径流汇流模拟效果和融雪径流汇流模型集成融雪水文参数后在波密实验区20日6时段模拟水位

结果对比，b与a相比，b模拟水位更贴近真实水位，能够捕捉到水位的峰值和低谷，证明融雪径流汇流模型由于考虑到了冰川融水的输入，模拟的效果要更真实。

从结合拟合结果来看，融雪径流汇流模型的Pearson's r和R-Square更高，表明融雪径流汇流模型的预测水位能力更强，在解释水位变异性方面更为有效，模型拟合得更好。

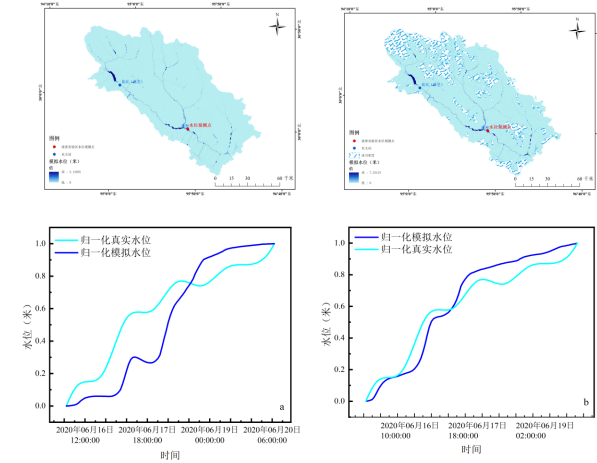


图3-1 20200616案例波密实验区水位模拟结果（a.径流汇流模型 b.融雪径流汇流模型）

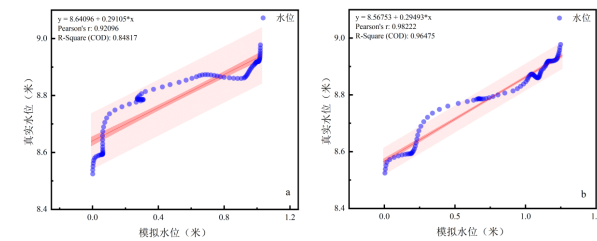


图3-2 20200616案例波密实验区线性拟合结果（a.径流汇流模型 b.融雪径流汇流模型）

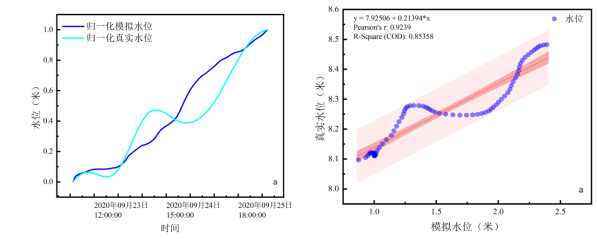


图3-3 20200923案例波密实验区（a.水位模拟结果 b.线性拟合结果）

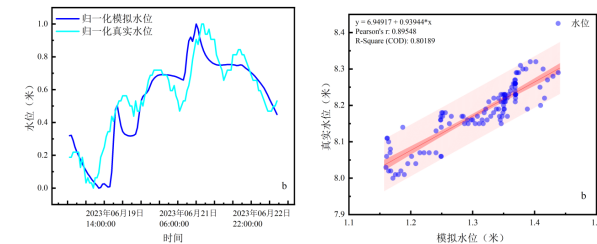


图3-4 20230619案例波密实验区（a.水位模拟结果 b.线性拟合结果）

通过两个案例验证融雪径流汇流模型对冰川融雪的模拟是否具有稳定性和适应性，从模拟结果来看，这两个案例模拟水位线紧密跟随真实水位线，表明这两段时间内融雪径流汇流模型的预测效果较好，在波密实验区适应性分析中模拟水位方面表现优良，具有较高的相关性和解释力。

## （二）奴下实验区适应性验证

进一步在奴下实验区融雪水文环境进行融雪径流汇流模型的适应性验证，确保该径流汇流模型在林芝市融雪水文环境的全面适用性。

表3-2 奴下实验区径流模拟参数

| 参数 | 下渗系数<br>(mm/h) | 蒸发系数<br>(mm/h) | 加速系数<br>(mm/h <sup>2</sup> ) | 扩散系数<br>(mm/h) | 最大水速<br>(m/s) | 融雪温度<br>(°C) |
|----|----------------|----------------|------------------------------|----------------|---------------|--------------|
| 数值 | 0.10           | 0.02           | 0.48                         | 0.12           | 5.00          | 8.00         |
| 固定 | 否              | 是              | 是                            | 是              | 是             | 是            |

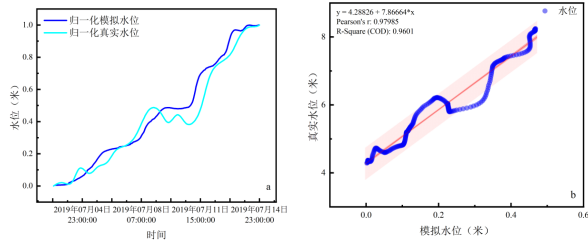


图3-5 20190703案例奴下实验区 (a.模拟水位结果 b.线性拟合结果)

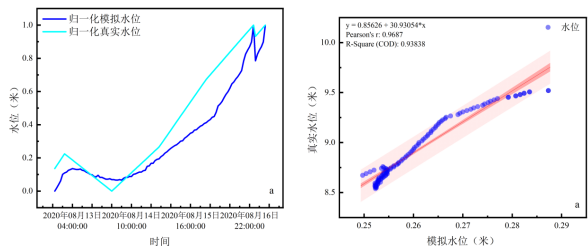


图3-6 20200813案例奴下实验区 (a.模拟水位结果 b.线性拟合结果)

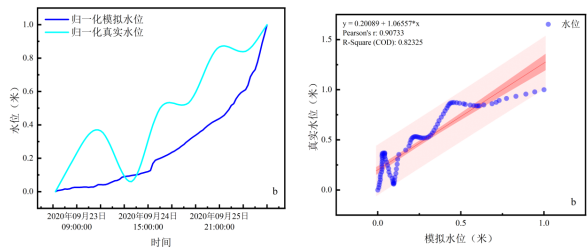


图3-7 20200923案例奴下实验区 (a.模拟水位结果 b.线性拟合结果)

从三个案例模拟结果看，模拟水位与真实水位的变化趋势是

一致的。Pearson's r分别为0.98、0.97、0.91，R-Square 分别为0.96、0.94、0.82，表明模型有很高的相关性和解释力。

结合简单水文与融雪水文环境实验区的对比看，纳入融雪后的径流汇流模型在融雪水文环境模拟效果要优于简单径流汇流模型在简单水文环境的模拟效果，印证了本文分析的即使在简单水文环境中也无法避免径流受到融雪影响的观点，只是融雪水文环境实验区相对于简单水文环境实验区受到的影响更剧烈，当前阶段径流汇流模型中纳入了融雪的计算，更剧烈的冰川融雪影响也能被模型所解释。本文原模型中由于没纳入融雪计算导致的误差在这一阶段得到了减小，径流汇流模拟的效果得到了提升。

## 四、结论与讨论

### （一）结论

（1）基于简单径流汇流模型，创新性地集成度日模型，构建可以模拟林芝流域冰川融雪水源补给融雪径流汇流模型，该模型在融雪水文环境实验区的整体模拟效果要优于简单径流汇流模型，验证了融雪径流汇流模型在林芝流域冰川融雪环境下的稳定性与适应性。

（2）波密实验区经过参数率定，三个不同时段案例模拟水位与真实水位的R-Square和Pearson's r平均值为0.87、0.93，均高于径流汇流模型的模拟结果，证明了融雪径流汇流模型在原模型的基础上增加了融雪水源供给的有效模拟。

（3）奴下实验区经过参数率定，三个不同时段案例模拟水位与真实水位的R-Square和Pearson's r平均值为0.91、0.95，验证了融雪径流汇流模型在林芝流域冰川融雪环境下的稳定性与适应性。

### （二）讨论

在奴下实验区7-8月2个案例中，融雪径流汇流模型展现了良好的模拟效果，9月的案例模拟效果相对较差，这与波密实验区的情况类似，可能是没有将冰川融水和融雪径流作为两个要素精细化研究，影响了模型的预测表现，为了提高模型在类似情况下的准确性，径流汇流模型在未来的研发中应考虑更全面地整合多样化的水文要素。

## 参考文献

- [1]刘秀华,吕军奇.气候变化下寒区水文研究进展[C]//2022中国水利学术大会论文集(第四分册):黄河水利出版社,2022:454-458.
- [2]张建梅.基于CMIP6全球气候模式的澜沧江流域气候变化初步评估[D].南京信息工程大学,2020
- [3]陈活泼,孙建奇,林文青,等. CMIP6和CMIP5模式对极端气候的模拟比较(英文)[J]. Science Bulletin, 2020, 65(17): 1415-1418.
- [4]王磊,刘虎,雍斌,等.陆地冰冻圈水文过程的研究现状及展望[J].北京师范大学学报(自然科学版),2023,59(3):489-496.
- [5]王鹏翔.高原寒区分布式水文模型研究及应用[D].武汉大学,2021
- [6]Vishal Singh, Francisco Muñoz-Arriola. Improvements in Sub-Catchment Fractional Snowpack and Snowmelt Parameterizations and Hydrologic Modeling for Climate Change Assessments in the Western Himalayas[J]. Mdp Ag, 2021, 8(4): 179.
- [7]景才瑞.论海洋性冰川地貌特色及其地学意义[J].华中师范大学学报(自然科学版),2002,(2):233-236.
- [8]李宗省,何元庆,贾文雄,等.中国典型季风海洋性冰川区“冰川-径流”系统的全球变化敏感性研究[J].地理科学,2008,(2):229-234.
- [9]李宗省,何元庆,贾文雄,等.近年来中国典型季风海洋性冰川区气候、冰川、径流的变化[J].兰州大学学报(自然科学版),2008,(S1):1-5.
- [10]苏珍,梁大兰,洪明.贡嘎山海洋性冰川发育条件及分布特征[J].冰川冻土,1993,(4):551-558.

# 工厂多源补水条件下冷却水系统水质处理研究

朱雅蕾

上海洗霸科技股份有限公司, 上海 201801

DOI:10.61369/EAE.2026040012

**摘 要 :** 上海某半导体显示面板制造厂冷却水采用再生水和自来水多源补水, 了解再生水处理工艺, 并对补水数据进行分析, 再生水水质季节差异性较大。冷却水水质随再生水水质波动大, 加药控制难度大, 且出现因补水波动导致的冷却水 pH 值异常下降情况。根据系统补水情况制定加药、排污、补水方案, 进行定期水质检测, 投加含磷缓蚀阻垢剂, 维持总磷含量在 1.5–3mg/L 区间, 合理控制再生水和自来水比例, 使冷却水水质维持合理波动范围。在 pH 值异常下降时, 切断再生水水源, 投加碱度调节剂, 维持冷却水系统稳定。进行月度碳钢、铜挂片监测, 腐蚀率符合 GB/T 50050–2017 工业循环冷却水处理设计规范。

**关 键 词 :** 工业冷却水; 再生水; 多源补水; 含磷缓蚀阻垢剂

## Research on Water Quality Treatment of Cooling Water System under Multi source Water Supply Conditions in Factory

Zhu Yalei

Shanghai Xiba Technology Co., Ltd., Shanghai 201801

**Abstract :** A semiconductor display panel manufacturing plant in Shanghai uses recycled water and tap water to replenish cooling water from multiple sources. The treatment process of recycled water is understood, and the replenishment data is analyzed. The seasonal differences in the quality of recycled water are significant. The quality of cooling water fluctuates greatly with the quality of recycled water, making it difficult to control the addition of chemicals. Additionally, there is an abnormal decrease in the pH value of cooling water due to fluctuations in water replenishment. Develop dosing, sewage, and water replenishment plans based on the system's water replenishment situation, conduct regular water quality testing, add phosphorus containing corrosion and scale inhibitors, maintain the total phosphorus content in the range of 1.5–3mg/L, reasonably control the ratio of recycled water and tap water, and maintain a reasonable fluctuation range of cooling water quality. When the pH value drops abnormally, cut off the regenerated water source, add alkalinity regulator, and maintain the stability of the cooling water system. Conduct monthly monitoring of carbon steel and copper hanging plates, and ensure that the corrosion rate meets the GB/T 50050–2017 Design Specification for Industrial Circulating Cooling Water Treatment.

**Keywords :** industrial cooling water; reclaimed water; multi source hydration; phosphorus containing corrosion and scale inhibitors

## 引言

在工业用水中, 冷却水系统的用水量居首位, 一般占工业总用水量的 80% 以上。<sup>[1]</sup>上海某半导体显示面板制造厂保有水量 400 吨的冷却水系统, 为提高水资源的利用率, 采用再生水与市政自来水的多源补水模式。再生水具有硬度低、碱度低特征, 且受生产调整及自然环境季节性变化影响, 自来水和再生水补水比例差异较大, 导致冷却水系统在运行过程中出现低碱低硬的不稳定状态, 以及 pH 值异常下降等问题。这种水质波动使冷却水浓缩倍数失控, 加药控制困难, 增加了系统的腐蚀风险。

对于该厂冷却水运行的复杂工况, 本人作为水处理技术负责人, 全程参与冷却水系统水质监测、再生水回用的水质风险排查工作。结合再生水补水水质波动特点, 独立完成分季节补水配比试验、磷锌复配药剂选型调试, 计算出不同工况下的浓缩倍数与药剂投加量。牵头制定 pH 值异常的应急处置操作方案, 组织月度碳钢、铜挂片腐蚀监测, 逐步形成整套多元补水水质处理方案, 冷却水系统腐蚀结垢风险得到有效控制。

一、上海某半导体显示面板制造厂冷却水系统概况

（一）冷却水系统概况

该冷却水系统为逆流式冷却塔，2014年正式投入使用，主要材质为碳钢和少量铜合金，全年全天24小时运行。系统配备一套加药设备，包含在线 pH值、电导率检测探头，有三组加药罐和加药泵，分别投加杀菌剂、缓蚀剂阻垢剂以及铜缓蚀剂，通过定时投加进行控制。系统保有水量为400吨，补水水源分为再生水和自来水两路，运行中优先补充再生水。排污采用手动操作，排放至厂内污水处理站。受生产和环境温度影响，冷却水循环量在不同季节表现出显著差异，数据如表1。

表1 不同季节循环水量

| 季节        | 冬季量（3个月） | 春秋季量（4个月） | 夏季量（5个月） |
|-----------|----------|-----------|----------|
| 循环水量 m³/h | 2700     | 3000      | 6000     |

开式系统的蒸发量可按下列公式计算：

$$Q_e=k \cdot \Delta t \cdot Q_r$$

式中：  $Q_e$  —— 蒸发水量（m³/h）；  
 $Q_r$  —— 循环冷却水量（m³/h）；  
 $\Delta t$  —— 循环冷却水进、出冷却塔温差（℃）；  
 $k$  —— 蒸发损失系数（1/℃）。<sup>[2]</sup>

（二）补水水源情况

（1）再生水水源

该厂冷却水的补水源自生产车间废水，生产车间废水统一收集后进入回用处理。回用预处理工艺包含多介质过滤器（MMF），活性炭过滤器（ACF），混凝气浮，膜生物反应器（MBR）等工艺单元，去除悬浮物、有机物。预处理出水进入反渗透系统进行深度脱盐，产出的纯水被回用到超纯水系统中再次利用。

其中部分 MMF 反洗水和 RO 浓水经过滤处理后进入再生水池混合后作为冷却水补水，定期进行取样检测。经观察，再生水的电导率和总碱度、钙硬度具有一定的正相关性，表2是不同月份的再生水水质波动范围：

表2 再生水水质

| 取样时间        | pH      | 电导率（μs/cm） | 总碱度（mg/L） | 钙硬度（mg/L） | 氯离子（mg/L） | 浊度（NTU） |
|-------------|---------|------------|-----------|-----------|-----------|---------|
| 6~9月        | 6.9~7.9 | 45~280     | 7~39      | 1~10      | 6~54      | 0.2~2   |
| 1~5月、10~12月 | 6.8~7.9 | 7~90       | 1~20      | 1~3       | 1~7       | 0.5~4   |

以下为再生水水质特点：

- 1.总碱度和钙硬度偏低：系统循环主要水源为超纯水，导致再生水中的总碱度、钙硬度偏低。计算雷兹纳指数（RSI）和帕克拉兹指数（PSI）均大于6，水质具有强腐蚀倾向。
- 2.氨氮含量的不确定性：MBR工艺能截留大部分污染物，若前端生化处理不稳定，出水中会残留微量氨氮。氨进入到循环水

中可引起硝化菌群繁殖，导致亚硝酸根、硝酸根含量增高，消耗大量氧化性杀生剂，严重时造成循环水 pH 降低。<sup>[3]</sup>

3.腐蚀性离子浓缩：随着系统在运行过程中不断蒸发浓缩，氯离子等腐蚀性阴离子的浓度上升，加剧点蚀风险。

（2）自来水水源

自来水主要用于在再生水供应不足时进行补充。以下是部分水质指标数据：

表3 自来水水质

| 取样时间  | pH      | 电导率（μs/cm） | 总碱度（mg/L） | 钙硬度（mg/L） | 氯离子（mg/L） | 浊度（NTU） |
|-------|---------|------------|-----------|-----------|-----------|---------|
| 1~12月 | 7.2~7.8 | 400~540    | 65~90     | 70~100    | 40~65     | 0.1~0.7 |

与再生水相比，自来水的质地相对稳定，电导率、钙硬度、总碱度较高。作为稳定补水源，自来水较高的钙硬度能有效弥补再生水硬度低的缺陷，为缓蚀阻垢剂提供成膜的阳离子，促进保护膜的形成。较高的碱度可以提高冷却水的缓冲能力，抵抗因再生水波动引入酸性物质，导致 pH值下降的情况。

（三）补水水质波动规律

根据表2数据可以看出，采用再生水作为冷却水补水可以大幅提升浓缩倍数，且再生水的产水量基本保持恒定，每日约为 300 m³。因不同季节的蒸发量不同，导致补水中再生水与自来水的比例呈现季节性波动：

- 1.夏季（高负荷期）：冷却水循环水量高至6000 m³/h，估算蒸发水量为45m³/h，每日的再生水量无法满足全部补水需求，系统运行过程中需补入自来水协同补水。根据多次配比统计，再生水与自来水补水的比例约为1:4。
- 2.春秋季（过渡期）：随着循环水量和气温降低，蒸发量降低，估算蒸发水量为21m³/h，再生水供应量能覆盖大部分补水需求。再生水与自来水比例为2:1左右。
- 3.冬季（低负荷期）：循环水量降至2700m³/h，蒸发量约为13.5m³/h，再生水基本能完全覆盖补水需求。

（四）冷却水水质标准

表4为管理方参考《GB/T 50050-2017工业循环冷却水处理设计规范》制定的冷却水水质标准。

表4 冷却水水质标准

| 检测项目                       | 单位     | 限值                    |
|----------------------------|--------|-----------------------|
| pH值 (25℃)                  | /      | 7.8~9.2               |
| 电导率                        | μS/cm  | <2200                 |
| 总碱度（以 CaCO <sub>3</sub> 计） | mg/L   | 500                   |
| 钙硬度（以 CaCO <sub>3</sub> 计） | mg/L   | 450                   |
| 氯离子                        | mg/L   | <600                  |
| 总铁                         | mg/L   | <1.0                  |
| 铜离子                        | mg/L   | <0.2                  |
| 浊度                         | NTU    | <15                   |
| 氨氮                         | mg/L   | <1                    |
| 游离氯                        | mg/L   | 0.1~0.5               |
| COD                        | mg/L   | <100                  |
| 异养菌总数                      | cfu/mL | < 1 × 10 <sup>4</sup> |



## 二、多源补水条件下的水质风险分析

### （一）再生水水质影响

在2024年5月初再生水补水pH值为6.9，电导率为 $7\mu\text{S}/\text{cm}$ ，钙硬度和总碱度为 $1\text{mg}/\text{L}$ ，冷却塔洗塔过程中一次性补入大量再生水，冷却水pH值持续下降至7.4。冷却水pH值的持续下降，会破坏冷却水系统缓蚀阻垢剂在金属表面形成的保护膜，还会加速金属表面的电化学腐蚀过程，碳钢腐蚀速率呈现上升的趋势，冷却水中铁离子浓度上升。经过多次检测分析及现场排查，分析原因为再生水补水引入了大量酸性物质和氨氮，在系统运行过程中产生了反应，导致pH值下降。

### （二）系统运行循环水量的影响

1. 夏季冷却水补水以自来水为主，经蒸发浓缩后钙硬度、总碱度较高，系统有结垢风险。运行期间需严格控制浓缩倍数，防止因过度浓缩导致结垢。

2. 春秋季冷却水补水中再生水的比例高，混合后的补水钙硬度和总碱度下降，易引入大量酸性物质和氨氮，需关注pH值的稳定性。

3. 冬季几乎全回收水补水，补水几乎不含钙硬度和碱度，属于腐蚀性水质。另外，再生水中的氨氮，在一定条件下会降低碱度。极低的碱度意味着水体缺乏缓冲能力。当局部发生阳极反应 $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ 时，缺乏 $\text{HCO}_3^-$ 或 $\text{OH}^-$ 及时中和产生的 $\text{H}^+$ ，导致金属表面液膜pH值迅速下降，加速了阳极溶解过程。 $\text{Fe}^{2+}$ 的存在不仅会增加系统的腐蚀速率，也可以与水中的 $\text{OH}^-$ 和 $\text{O}_2$ 发生反应，产生含铁的沉淀物，继续降低循环水系统中的碱度，形成恶性循环。<sup>[4]</sup>

## 三、水处理方案优化

### （一）含磷锌系配方的协同效应

目前，国内外学者已开发出磷系、锌系、硅系、钼系等缓蚀阻垢剂，以及脂肪族酰胺、树枝状大分子等缓蚀剂单体，综合经济和性能两方面因素，在工业化应用中仍以磷锌系复合配方为主，大多应用于工业循环冷却水领域。<sup>[5]</sup>针对该项目补水波动较大，确立了“正磷+有机膦+锌盐+聚物”的协同复配策略。

### （二）缓蚀剂加药量控制

在实际运行中将循环冷却水系统的总磷浓度维持在 $1.5\text{--}3\text{mg}/\text{L}$ ，在此加药浓度下，对于本项目钙硬度在 $100\text{--}450\text{mg}/\text{L}$ 、总碱度在 $100\text{--}400\text{mg}/\text{L}$ 波动的情况下，具有良好的缓蚀阻垢性能。经计算和运行实践，夏季可以将浓缩倍数控制在5倍左右。春秋季将浓缩倍数控制在10倍，在满足缓蚀阻垢的效果下，达到了较高的浓缩倍数，减少排污量。在运行过程中，依据定期冷却水水质全分析检测结果及排污量的数据，调整加药泵的开度和加药时间，保证

冷却水中药剂剂量充足。经月度标准挂片腐蚀试验监测，该控制方案效果显著，能够持续满足碳钢腐蚀率小于 $0.075\text{mm}/\text{a}$ ，完全符合《GB/T 50050-2017 工业循环冷却水处理设计规范》要求。

### （三）冬季补水方案优化

针对冬季补水碱度、钙硬度低，导致冷却水缓冲能力不足的情况，建议该厂手动引入适量自来水补水。利用自来水补水的钙硬度和碱度，替代人工投加氯化钙及液碱的调节方式，降低瞬时药剂浓度过高导致的腐蚀结垢风险。通过补水配比计算及试验，将自来水补水的比例控制在每日总补水量的20%至40%区间内，在浓缩倍数为10倍的运行工况下，冷却水钙硬度和总碱度能维持在 $100\text{mg}/\text{L}$ 以上。这一水质环境满足了缓蚀剂阻垢剂的成膜需求。

### （四）pH值异常波动监测预警及处置流程

对于再生水水质波动引发的冷却水pH值异常下降风险，本项目建立了以下监管操作：

#### 1. 多维参数监测

在线监测再生水pH值，并且定期检测氨氮含量。控制系统设定冷却水pH值安全阈值为7.8，低于该阈值时立即报警。

#### 2. 应急加药与水源切换

若监测到冷却水pH值低于7.8，呈现下降趋势时，立即切断再生水补水路径，切换至自来水以阻断酸性物质的持续输入。冲击性投加适量碱性药剂（如碳酸钠）实现系统pH值的快速回升至安全区间。

#### 3. 故障溯源

对再生水来源及前端处理工艺进行溯源排查，确认异常原因。在再生水恢复正常且稳定后，再作为冷却水补水使用。

### （五）方案实施后的运行效益分析

通过当前的冷却水系统运行控制方案，春秋季将浓缩倍数提升至10倍左右，夏季维持在5倍左右。冷却水高浓缩倍数运行直接降低了排污水量及废水处理负荷，系统新鲜水补充量降低约10%–20%。

## 四、结论

结合该厂补水水质及运行数据，冷却水系统再生水与自来水掺混补水模式会增加药剂投加管控难度，再生水的水质波动易造成冷却水pH值异常下降，冬季全再生水补水时碳钢腐蚀等问题。针对上述问题，本研究使用“正磷+有机膦+锌盐+聚合物”复配药剂，并通过总磷监测确认药剂投加量是否充足。动态调整再生水与自来水补水比例，监测冷却水钙硬度、总碱度，降低全再生水补水工况下的腐蚀风险。在厂区常备碱度调节剂，pH值异常时切断再生水补水支路，投加碱度调节剂，迅速将冷却水pH值回调至安全区间内，保障系统水质稳定。

## 参考文献

- [1] 杜松燕. 循环冷却水系统中无磷缓蚀阻垢剂配方的研究[J]. 皮革制作与环保科技, 2023, 4(12): 150–151, 154. DOI: 10.20025/j.cnki.CN10-1679.2023-12-50.
- [2] 住房和城乡建设部. 工业循环冷却水处理设计规范: GB 50050-2017[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
- [3] 徐辉能, 刘小东, 王向明. 低磷高浓缩倍数新技术在低硬度水质中的应用[J]. 工业水处理, 2013, 33(6): 98–100. DOI: 10.3969/j.issn.1005-829X.2013.06.028.
- [4] 郑灿, 田民格, 孟晓刚, 等. 低电导率循环水的腐蚀控制研究和应用[J]. 冶金动力, 2024(1): 52–54, 57.
- [5] 崔振东, 成国辰, 郭浩, 等. 供热管网输配再生水的碳钢缓蚀剂试验研究[J]. 工业用水与废水, 2023, 54(3): 57–60. DOI: 10.3969/j.issn.1009-2455.2023.03.012.

# 公共场所健康危害因素监测数据分析 与环境风险综合评估研究

蒋一, 王艳旭, 刘翠玉, 胡钟颖, 李然  
佳木斯市疾病预防控制中心, 黑龙江 佳木斯 154002  
DOI:10.61369/EAE.2026040013

**摘 要 :** 为掌握公共场所健康危害因素污染特征与环境风险, 对2022—2025年佳木斯市公共场所室内空气、物理因素及游泳场所水质开展连续监测分析。结果显示: 室内空气苯系物、无机气体整体达标, PM<sub>2.5</sub>污染突出, 为高风险指标; 物理因素中风速状况良好, 温度、湿度、噪声超标问题显著; 游泳场所微生物指标基本可控, 但游离性余氯、尿素、消毒剂余量合格率较低, 水体消毒与保洁管理缺失。综合评估表明, 当地公共场所整体处于较高环境风险, 2025年卫生状况出现反弹。建议针对性开展设备运维、通风除尘及泳池规范化管理, 筑牢公共卫生安全防线。

**关 键 词 :** 公共场所; 健康危害因素; 监测分析; 环境风险; 水质; 室内空气

## Data Analysis of Health Hazards Monitoring and Comprehensive Assessment of Environmental Risks in Public Places

Jiang Yi, Wang Yanxu, Liu Cuiyu, Hu Zhongying, Li Ran  
Jiamusi City Disease Prevention and Control Center, Jiamusi, Heilongjiang 154002

**Abstract :** This study monitored indoor air, physical factors and pool water quality in Jiamusi's public places from 2022 to 2025. Benzene compounds and inorganic gases met standards, but PM<sub>2.5</sub> was a major hazard. Wind speed was qualified, while temperature, humidity and noise often exceeded limits. Pool water microbes were under control, yet free residual chlorine, urea and disinfectant residues failed widely due to poor management. Public places faced notable environmental risks, with sanitation worsening in 2025. Targeted maintenance and standardized management are recommended for public health protection.

**Keywords :** public places; health hazards; monitoring and analysis; environmental risks; water quality; indoor air

## 引言

公共场所人员密集、流动性大, 室内环境与水质状况直接关联公众身体健康, 各类污染物、物理参数及水质指标超标, 易诱发呼吸道、皮肤及消化道等多种疾病, 是公共卫生管控的重点领域<sup>[1]</sup>。近年来城市公共服务设施不断增多, 公共场所使用频次持续攀升, 常态化开展健康危害因素监测、识别污染隐患、评估环境风险, 具有重要现实意义<sup>[2]</sup>。本文以2022—2025年佳木斯市各类公共场所为研究对象, 连续四年监测室内空气、物理因素、游泳场所水质多项指标, 系统分析各项目达标情况与污染分布特征, 综合研判区域整体环境风险, 剖析问题成因并提出管控方向, 为当地公共场所卫生监督、环境整治及公共健康防护提供科学参考。

## 一、材料与研究方法

### (一) 监测对象与监测周期

本次监测范围为佳木斯市各类经营性公共场所, 涵盖八类室内公共场所, 监测周期为2022—2025年, 连续开展四年常态化抽样监测。监测点位随机选取城区不同区域、不同功能类型的公共场所, 保证样本覆盖性与代表性。

### (二) 监测项目

本次监测分为室内空气质量指标、物理因素指标、游泳场所水质指标三大板块。室内空气指标包含苯、甲苯、二甲苯、甲醛、氨、一氧化碳、二氧化碳、菌落总数、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>共10项; 物理因素包含温度、湿度、噪声、风速4项<sup>[3]</sup>; 游泳场所水质指标包含游离性余氯、浑浊度、pH、尿素、消毒剂余量、菌落总数、大肠菌群、耐热大肠菌群8项, 基本覆盖现行规范中公共场所

基金项目: 佳木斯市市级科技计划创新激励类项目“佳木斯市公共场所健康危害因素监测结果分析及风险评估”(SF2025JL0002)。

作者简介: 蒋一(1986-), 女, 湖南人, 本科, 高级工程师, 研究方向: 环境卫生监测。

通讯作者: 陆子春, 邮箱: 17971024@qq.com

主要健康危害因素。

（三）评价方法

本研究采用单因子合格率评价法开展公共场所污染特征与环境风险分析。各监测指标的评价标准严格依据国家规范执行，其中物理因素指标依据《公共场所卫生指标及限值要求》（GB 37488-2019）判定；室内空气指标结合《室内空气质量标准》（GB/T 18883-2022）与《公共场所卫生指标及限值要求》（GB 37488-2019）双重标准综合判定；游泳场所水质指标依据《公共场所卫生指标及限值要求》（GB 37488-2019）及《公共场所卫生检验方法 第10部分：游泳池水》（GB/T 18204.10-2000）开展达标评价。

在数据统计分析基础上，结合历年监测数据的动态变化趋势，探究各污染指标的超标规律、时空分布特征及风险点位分布规律。同时参照已有研究成果<sup>[4]</sup>，依据指标合格率对公共场所环境风险进行等级划分，具体分级标准如下：指标合格率≥95%为

低风险，80%≤合格率<95%为中等风险，60%≤合格率<80%为较高风险，合格率<60%为高风险。此外，结合各监测指标的理化性质、公共场所运营模式及人群暴露特征，进一步剖析各类环境风险的形成机制，并探讨超标污染物潜在的人体健康危害，为公共场所环境卫生管控提供科学依据。

二、结果与分析

本次研究汇总2022—2025年佳木斯市公共场所全部监测数据，分别从室内空气质量、物理因素、游泳场所水质三个维度展开分析，整体监测样本量大、时间跨度完整，能够真实反映区域公共场所卫生风险现状。

（一）室内空气质量监测结果与分析

2022—2025年佳木斯市公共场所室内空气各项指标监测结果详见表1。

表1 2022—2025年佳木斯市公共场所室内空气质量指标监测结果

| 监测项目              | 2022年 |         | 2023年 |         | 2024年 |         | 2025年 |         | 总计   |         |
|-------------------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|------|---------|
|                   | 样品数   | 合格率 (%) | 样品数   | 合格率 (%) | 样品数   | 合格率 (%) | 样品数   | 合格率 (%) | 样品数  | 合格率 (%) |
| 苯                 | 65    | 100.00  | 79    | 100.00  | 90    | 100.00  | 74    | 100.00  | 308  | 100.00  |
| 甲苯                | 65    | 100.00  | 79    | 100.00  | 90    | 100.00  | 74    | 98.65   | 308  | 99.68   |
| 二甲苯               | 65    | 100.00  | 79    | 100.00  | 90    | 100.00  | 74    | 100.00  | 308  | 100.00  |
| 甲醛                | 65    | 100.00  | 79    | 100.00  | 90    | 100.00  | 74    | 98.65   | 308  | 99.68   |
| 氨                 | 35    | 100.00  | 18    | 94.44   | 20    | 100.00  | 18    | 100.00  | 91   | 98.90   |
| 一氧化碳              | 86    | 100.00  | 99    | 100.00  | 110   | 100.00  | 0     | —       | 295  | 100.00  |
| 二氧化碳              | 86    | 100.00  | 99    | 100.00  | 110   | 100.00  | 88    | 100.00  | 383  | 100.00  |
| 菌落总数              | 86    | 100.00  | 99    | 98.99   | 110   | 100.00  | 88    | 98.86   | 383  | 99.48   |
| PM <sub>10</sub>  | 121   | 100.00  | 126   | 98.41   | 138   | 58.49   | 106   | 90.43   | 491  | 89.81   |
| PM <sub>2.5</sub> | 121   | 33.06   | 126   | 66.67   | 138   | 90.58   | 106   | 30.19   | 491  | 57.23   |
| 综合合计              | 795   | 89.81   | 883   | 94.79   | 986   | 98.58   | 702   | 82.76   | 3366 | 92.22   |

苯、二甲苯连续四年全部达标，甲苯与甲醛仅2025年出现少量不合格样品，苯系物与甲醛整体风险偏低，说明场所装修材料符合卫生要求。一氧化碳、二氧化碳全部合格，氨仅个别年份小幅超标，无机气态污染物管控成效显著。菌落总数整体达标率较高，微生物污染风险可控。颗粒物是主要隐患，PM<sub>2.5</sub>总合格率仅57.23%，多年处于高风险状态，年度波动幅度大；PM<sub>10</sub>在2024

年超标严重。2022—2024年室内空气综合合格率稳步上升，2025年明显回落，颗粒物污染、通风及秸秆焚烧是空气质量波动的主要原因。

（二）物理因素监测结果与分析

2022—2025年佳木斯市公共场所温度、湿度、噪声、风速四项物理因素监测数据如表2所示。

表2 2022—2025年佳木斯市公共场所物理因素指标监测结果

| 监测项目 | 2022年 |         | 2023年 |         | 2024年 |         | 2025年 |         | 总计   |         |
|------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|------|---------|
|      | 样品数   | 合格率 (%) | 样品数   | 合格率 (%) | 样品数   | 合格率 (%) | 样品数   | 合格率 (%) | 样品数  | 合格率 (%) |
| 温度   | 184   | 48.37   | 158   | 41.77   | 166   | 25.30   | 136   | 27.94   | 644  | 36.49   |
| 湿度   | 184   | 35.87   | 158   | 38.61   | 166   | 80.72   | 136   | 54.41   | 644  | 52.02   |
| 噪声   | 184   | 66.15   | 158   | 67.39   | 166   | 63.86   | 136   | 71.32   | 644  | 63.59   |
| 风速   | 184   | 100.00  | 158   | 99.37   | 166   | 100.00  | 136   | 99.26   | 644  | 99.69   |
| 综合合计 | 736   | 62.91   | 632   | 60.60   | 664   | 67.47   | 544   | 63.24   | 2576 | 63.59   |

本研究对公共场所四项物理环境指标监测分析结果显示，各指标达标水平差异显著，整体环境舒适度较差。其中风速指标合格率近乎满分，各场所通风条件优良，通风设施运行正常。温度指标问题最为突出，总合格率仅36.49%，历年达标率持续偏低，为高风险指标；湿度合格率为52.02%，整体达标情况一般，仅2024年改善明显。噪声合格率长期稳定在63%~72%，处于较高

风险水平，主要源于人员活动与设备运转干扰。四项物理指标综合合格率稳定在60%以上，但受温湿度超标问题制约，公共场所整体物理环境质量不佳。

北方特殊的气候条件是区域内公共场所温湿度长期不达标的原因。北方冬季严寒干燥，公共场所为御寒普遍密闭门窗、缩减通风，大幅削弱了室内环境自调节能力。室内热量易快速流

失，供暖、空调等设备高负荷运行仍难以使室温达标，同时干燥的室外空气配合室内持续制热，加速水汽流失，造成室内湿度偏低。为解决该问题，需结合北方气候特征，针对性优化室内环境调控模式，提升公共场所物理环境舒适度。

（三）游泳场所水质监测结果与分析

2022—2025年佳木斯市游泳场所各类水质指标监测结果见表3。

表3 2022—2025年佳木斯市游泳场所水质监测结果

| 监测项目   | 2022年 |         | 2023年 |         | 2024年 |         | 2025年 |         | 总计  |         |
|--------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-----|---------|
|        | 样品数   | 合格率 (%) | 样品数   | 合格率 (%) | 样品数   | 合格率 (%) | 样品数   | 合格率 (%) | 样品数 | 合格率 (%) |
| 游离性余氯  | 14    | 0.00    | 14    | 0.00    | 14    | 42.86   | 16    | 12.00   | 58  | 6.90    |
| 浑浊度    | 14    | 71.43   | 14    | 71.43   | 14    | 100.00  | 16    | 87.50   | 58  | 82.76   |
| pH     | 14    | 71.43   | 14    | 57.14   | 14    | 71.43   | 16    | 68.75   | 58  | 67.24   |
| 尿素     | 14    | 57.14   | 14    | 21.43   | 14    | 42.86   | 16    | 50.00   | 58  | 43.10   |
| 消毒剂余量  | 14    | 28.57   | 14    | 50.00   | 14    | 42.86   | 16    | 43.75   | 58  | 44.83   |
| 菌落总数   | 14    | 57.14   | 14    | 92.86   | 14    | 100.00  | 16    | 87.50   | 58  | 87.93   |
| 大肠菌群   | 14    | 100.00  | 14    | 100.00  | 14    | 100.00  | 16    | 100.00  | 58  | 100.00  |
| 耐热大肠菌群 | 14    | 100.00  | 14    | 100.00  | 14    | 100.00  | 16    | 93.75   | 58  | 98.28   |
| 综合合计   | 104   | 65.38   | 104   | 66.35   | 104   | 76.92   | 119   | 75.63   | 431 | 71.23   |

游泳场所水质综合合格率71.23%，整体为较高风险。大肠菌群全程全部达标，耐热大肠菌群仅有少量样品不合格，致病性微生物管控到位，水体传染性风险较低。游离性余氯总合格率仅6.90%，前两年全部超标，消毒环节存在漏洞。尿素、消毒剂余量合格率不足45%，反映池水更换不及时、消毒药剂投放不规范。pH、浑浊度存在不同程度超标，易刺激人体皮肤与黏膜。菌落总数达标率整体尚可且逐年向好。2022—2024年水质整体逐步改善，但核心消毒指标始终未达标，是游泳场所首要的健康安全隐患。

噪声长期不达标，室内环境舒适度较差。

游泳场所水质风险最为严峻，综合合格率71.23%，致病性微生物管控有效，可游离性余氯、尿素、消毒剂余量持续大面积超标，水体消毒与日常保洁存在明显漏洞，易引发皮肤、消化道感染<sup>[5]</sup>。纵向来看，2022至2024年各类场所卫生条件稳步改善，监管成效有所显现，而2025年多项指标同步下滑。多重风险相互叠加，需针对不同场所分类施策，补齐管理与设备运维短板。

三、环境综合风险评估

结合2022—2025年监测数据综合评估，各类危害因素风险差异显著。室内空气质量综合达标率92.22%，整体风险中等，苯系物、无机气体及微生物指标基本安全，但PM<sub>2.5</sub>超标问题突出，成为首要空气隐患，且2025年空气质量整体出现反弹。物理因素综合合格率仅63.59%，风险偏高，通风状况良好，但温度、湿度、

四、结论

2022—2025年佳木斯市公共场所整体存在较高健康风险。室内空气苯系物等指标达标，PM<sub>2.5</sub>污染问题突出；物理环境温湿度、噪声超标严重，仅通风状况良好。游泳场所致病性微生物管控到位，但水体消毒、保洁管理漏洞明显。2022—2024年卫生状况逐步改善，2025年出现风险反弹。建议强化设备运维与分类管控，重点整治颗粒物、泳池水质等突出问题。

参考文献

[1] 韩旭, 李莉, 宋风景, 刘婷婷, 闫晓娜, 解晓敏, 苏丽琴, 王先良. 基于风险矩阵和排序赋值法的公共场所环境健康风险评估 [J]. 环境卫生学杂志, 2025, 15(10): 885–893.

[2] 田艳梅, 邹悦, 吴惠忠, 杨明, 余小虎. 2022年城市公共场所健康危害因素监测结果分析 [J]. 宁夏医学杂志, 2025, 47(5): 391–394.

[3] 韩凤婵, 陈田, 彭婷, 隋少峰, 郑唯韡, 童玲, 徐铭婧, 詹铭, 施焯闻. 基于上海市2010—2024年监测数据分析游泳场所卫生状况及影响因素 [J]. 环境与职业医学, 2025, 42(10): 1225–1233.

[4] 于洋, 农惠婷, 梁林涵, 黎智, 顾丹. 2022年广西壮族自治区公共场所健康危害因素监测分析 [J]. 广西医学, 2023, 45(14): 1725–1729.

[5] 葛少骏, 严玮文, 伍立志, 吉晓明. 2021–2023年浙江省620家公共场所健康危害因素监测结果 [J]. 环境与健康杂志, 2024, 41(10): 874–881.



# 工业废水中重金属检测技术的创新应用与分析

张东芳

大同万维检测科技有限公司, 山西 大同 037000

DOI:10.61369/EAE.2026040014

**摘 要 :** 工业废水中重金属污染日益严重, 迫切需要发展快速, 灵敏的检测新技术。本研究系统探讨了电化学传感, 光谱分析和智能化检测三类创新技术在工业废水重金属检测中的应用。电化学检测技术通过纳米材料修饰和生物识别元件提高了检测选择性和灵敏度; 光谱分析技术优化了原子化过程和光纤传感系统, 实现了原位实时监测; 智能化检测系统整合物联网和机器学习算法, 建立了远程监控与预警平台。实验验证结果表明, 所建立的检测方法具有良好的精密度的 ( $RSD < 5.2\%$ ) 和准确度 (回收率  $92.5\% \sim 106.8\%$ ), 在实际工业废水样品分析中表现出优异的性能, 为重金属污染防治提供了可靠的技术支撑。

**关 键 词 :** 重金属检测; 电化学传感器; 纳米材料; 阳极溶出伏安法; 工业废水

## Innovative Application and Analysis of Heavy Metal Detection Technology in Industrial Wastewater

Zhang Dongfang

Datong Wanwei Testing Technology Co., Ltd., Datong, Shanxi 037000

**Abstract :** The heavy metal pollution in industrial wastewater is becoming increasingly severe, and there is an urgent need to develop rapid and sensitive detection technologies. This study systematically explored the application of three innovative technologies, namely electrochemical sensing, spectroscopic analysis, and intelligent detection, in the detection of heavy metals in industrial wastewater. The electrochemical detection technology enhanced the selectivity and sensitivity of detection through the modification of nanomaterials and biological recognition elements; the spectroscopic analysis technology optimized the atomization process and the optical fiber sensing system, enabling in-situ real-time monitoring; the intelligent detection system integrated the Internet of Things and machine learning algorithms to establish a remote monitoring and early warning platform. Experimental verification results showed that the established detection methods had good precision ( $RSD < 5.2\%$ ) and accuracy (recovery rate  $92.5\% - 106.8\%$ ), and demonstrated excellent performance in the analysis of actual industrial wastewater samples, providing reliable technical support for the prevention and control of heavy metal pollution.

**Keywords :** heavy metal detection; electrochemical sensor; nanomaterials; anodic stripping voltammetry; industrial wastewater

### 引言

工业废水中的重金属污染已成为严重的环境问题, 涉及冶金, 电镀, 采矿, 化工等多个工业领域, 重金属污染物具有累积性强, 持久性高, 毒性显著等特点, 对生态系统和人体健康构成重大威胁<sup>[1]</sup>, 传统的重金属检测方法在检测精度和准确度方面表现优异, 但普遍存在设备昂贵, 操作复杂, 检测时间长等局限性, 难以满足快速监测和现场检测的需求, 近年来, 纳米材料科学和电化学分析技术的快速发展, 为重金属检测技术创新提供了新的研究思路, 新型纳米材料的独特物理化学性质和优异的电化学活性, 结合便携式检测设备的开发, 推动了重金属检测技术向高灵敏度, 快速响应, 原位监测的方向发展。

## 一、工业废水重金属污染特征

现代工业生产过程中产生的重金属废水呈现出污染物种类多样化, 浓度分布不均匀, 理化性质复杂等特点, 废水中重金属离子往往与有机物, 无机物共存, 形成多相体系, 增加了污染物检测和处理的难度, 工业废水重金属污染具有持久性和隐蔽性, 微量重金属在环境中长期存在, 通过地表水, 地下水系统扩散传播, 随着环保法规日益严格, 工业废水重金属污染物的检测和监控面临更高要求, 需要发展快速, 准确, 灵敏的检测新技术, 为污染防治提供可靠的数据支持。

## 二、重金属检测技术的创新应用

### (一) 电化学检测技术创新

#### 1. 原子吸收法

原子吸收法通过测定原子基态对特征辐射的吸收来定量分析重金属含量。该技术采用空气-乙炔火焰或氮气-乙炔火焰作为激发光源, 将待测液体样品雾化成气态, 在高温条件下使重金属离子还原为基态原子。基态原子对特定波长光的吸收遵循朗伯-比尔定律, 通过测量吸光度与待测元素浓度建立定量关系<sup>[2]</sup>。ICE 3500型原子吸收分光光度计工作波长范围为180-900nm, 灵敏度达 $\mu\text{g/L}$ 级别, 相对标准偏差控制在3%以内。针对不同重金属元素, 通过优化空心阴极灯电流、燃烧器高度、乙炔流量等关键参数, 显著提升检测准确度。通过采用溶剂萃取、离子交换树脂分离等预处理方法, 有效消除基体干扰, 降低检出限。石墨炉原子化技术的应用进一步提高了检测灵敏度, 通过程序升温实现基体分离, 控制原子化过程, 检出限可达 $\text{ng/L}$ 水平。原子吸收法在工业废水重金属检测中具有选择性强、精密度高、线性范围宽等显著优势, 为环境监测提供了可靠的分析手段。

#### 2. 生物电化学传感技术

生物电化学传感技术结合生物识别元件与电化学传感原理, 为重金属检测提供了新的技术路径, 如图1所示, 该技术利用特异性生物分子对重金属离子的选择性识别作用, 将生物学信号转换为可测量的电化学信号, 酶催化传感系统通过金属酶活性受重金属离子抑制程度的变化实现检测, 酶电极表面固定化的辣根过氧化物酶, 脲酶等在与目标重金属离子结合后, 引起电极表面电子转移速率改变, 产生相应的电流响应信号<sup>[3]</sup>, DNA适体传感器利用特异性DNA序列与重金属离子的选择性结合, 基于构象变化导致的电化学阻抗变化进行定量分析, 微生物电化学传感则通过监测重金属离子对电活性微生物产电活性的影响, 建立了响应灵敏, 成本低廉的检测新方法, 生物电化学传感技术具有选择性好, 灵敏度高等优点, 在复杂基质中的重金属检测方面显示出独特优势, 为环境监测领域提供了创新性解决方案。

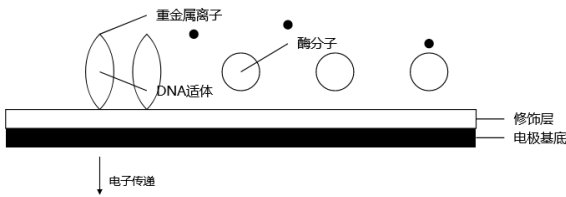


图1 生物电化学传感器结构示意图

### (二) 光谱分析技术创新

#### 1. 原子光谱检测技术

原子光谱检测技术在工业废水重金属分析中发挥着关键作用, 通过优化火焰原子吸收光谱法的雾化效率和温度控制, 显著提升了检测灵敏度, 石墨炉原子化技术采用程序升温方式, 实现了基体分离和原子化过程的精确调控, 根据朗伯-比尔定律, 吸光度 $A$ 与重金属离子浓度 $c$ 之间存在线性关系:

$$A = \epsilon bc$$

式中:  $A$ 为吸光度(无量纲);  $\epsilon$ 为摩尔吸光系数( $\text{L}/(\text{mol} \cdot \text{cm})$ );  $b$ 为光程( $\text{cm}$ );  $c$ 为待测组分浓度( $\text{mol/L}$ ), 通过谱线强度 $I$ 与激发态原子数 $N$ 的关系:

$$I = h\nu A_m N$$

式中:  $I$ 为谱线强度( $\text{W}/\text{m}^2$ );  $h$ 为普朗克常数( $\text{J} \cdot \text{s}$ );  $\nu$ 为跃迁频率( $\text{Hz}$ );  $A_m$ 为自发辐射跃迁概率( $\text{s}^{-1}$ );  $N$ 为激发态原子数(个), 改进的原子发射光谱技术结合高频等离子体激发源, 降低了基体干扰, 实现了痕量重金属的准确定量, 该技术在实际应用中表现出优异的重现性和稳定性, 检出限达到 $\mu\text{g/L}$ 级别。

#### 2. 高效液相色谱法

高效液相色谱技术依托U3000型色谱系统实现工业废水中重金属离子的分离检测。该技术通过反相色谱柱将不同重金属离子分离, 操作波长范围在200-600nm之间, 实现 $\text{ng/L}$ 级别的检测灵敏度。色谱系统配备自动进样器和恒温柱温箱, 确保分析过程的稳定性和重现性。以磷酸二氢钾缓冲液为流动相, 通过调控pH值、流速和有机相比例优化分离条件, 实现重金属离子的完全分离<sup>[4]</sup>。采用梯度洗脱程序有效降低分析时间, 提高分离效率。后柱衍生法与荧光检测器联用, 通过金属离子与特定螯合剂形成荧光衍生物, 进一步提升检测灵敏度和选择性。系统集成数据采集和处理软件, 实现峰面积自动积分和定量分析, 相对标准偏差控制在2%以内。该技术在复杂基质条件下表现出优异的抗干扰能力, 为工业废水中痕量重金属的精确定量提供了可靠的分析方法。

### (三) 智能化检测系统创新

#### 1. 远程监控与预警系统

智能化远程监控预警系统采用物联网技术实现工业废水重金属污染的实时监测与风险预警, 如图2所示, 该系统由现场监测单

元,数据传输网络 and 智能分析平台构成,现场监测单元集成多参数传感器阵列,通过微控制器采集重金属浓度, pH 值, 温度等关键参数,数据经滤波降噪和初步处理后,通过 4G/5G 无线网络或工业以太网传输至云端服务器,智能分析平台基于深度学习算法建立污染物浓度变化趋势模型,结合历史数据和环境标准,对污染物超标风险进行预测和评估<sup>[5]</sup>,系统设置了多级预警阈值,当检测数据达到预警值时,自动向管理人员推送预警信息,并联动相关控制设备进行应急处理,该系统实现了废水处理全流程的智能化监管,大幅提升了重金属污染防治的及时性和准确性,为工业企业环境管理决策提供了可靠的数据支持。

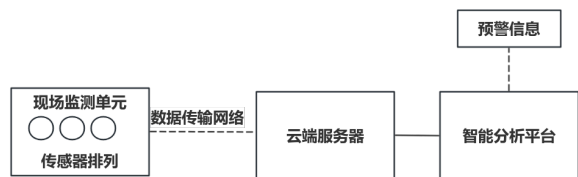


图2 工业废水重金属污染远程监控预警系统结构示意图

2.在线监测与数据分析

在线监测系统采用多参数传感器阵列实现重金属污染物的连续检测,传感器信号经过小波变换去噪处理,建立重金属浓度与响应信号的定量关系,传感器阵列响应值通过主成分分析方法进行数据降维和特征提取,其数学表达式为:

$$X = TP' + E$$

式中: X 为原始数据矩阵 (m×n); T 为得分矩阵 (m×k); P 为载荷矩阵 (n×k); E 为残差矩阵 (m×n); m 为样本数; n 为变量数; k 为主成分数,

数据分析平台基于机器学习算法建立污染物浓度预测模型,采用随机森林回归方法进行数据建模:

$$y = \frac{\sum (w_i h_i(x))}{N}$$

式中: y 为预测值; w<sub>i</sub> 为第 i 个决策树的权重; h<sub>i</sub>(x) 为第 i 个决策树的输出值; N 为决策树总数; x 为输入变量,系统通过在线校正和自适应算法优化,实现了检测数据的实时分析和准确预测,相对误差控制在 5% 以内,该技术为工业废水处理过程优化和污染物排放管控提供了精确的数据支持。

三、创新检测技术实验验证

(一) 实验方案设计

实验方案设计采用单因素与正交试验相结合的研究方法,系统评价多种重金属检测技术的分析性能。重金属标准溶液采用国家标准物质 (GBW08619) 配制,使用 Milli-Q 超纯水系统制备实验用水。气相色谱仪 (GC-7890B) 配备 FID 检测器,色谱柱采用 HP-5 毛细管柱 (30m×0.32mm×0.25μm); 高效液相色谱仪 (LC-20A) 选用 C18 柱,配备二极管阵列检测器。火焰原子

吸收分光光度计 (AA-7000) 工作参数为: 乙炔流量 2.0L/min, 空气流量 15.0L/min, 狭缝宽度 0.7nm; 无火焰原子吸收分光光度计采用石墨管原子化器, 氩气流量 3.0L/min。电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 射频功率 1300W, 采样深度 8.0mm。样品采集点布设于工业园区污水处理厂进水池、出水池及周边地表水系统, 采样装置和容器经 10% 硝酸溶液浸泡 24h。现场测定 pH 值、水温, 样品采集后立即于 4℃ 冷藏保存。实验室前处理采用高压微波消解系统, 消解条件为 180℃, 15min。

(二) 精密度评估

精密度评估采用标准工作曲线法, 选取 Cu<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup> 作为目标分析物, 在三个浓度水平下进行重复测定, 如表 1 所示, 通过连续六次测定计算方法的重复性, 相对标准偏差 (RSD) 均小于 4.5%, 在五个不同实验日内进行批间精密度评估, 测定结果 RSD 均低于 5.2%, 表明该方法具有良好的重复性和稳定性, 采用双因素方差分析, 评估操作人员, 仪器设备等因素对测定结果的影响, 结果显示 95% 置信水平下各因素间无显著性差异。

表 1 重金属检测方法的精密度评估结果

| 重金属离子            | 浓度水平<br>(μg/L) | 日内 RSD<br>(%, n=6) | 日间 RSD<br>(%, n=5) |
|------------------|----------------|--------------------|--------------------|
| Cu <sup>2+</sup> | 10.0           | 3.2                | 4.1                |
|                  | 50.0           | 2.8                | 3.8                |
|                  | 100.0          | 2.5                | 3.5                |
| Pb <sup>2+</sup> | 5.0            | 4.3                | 5.1                |
|                  | 25.0           | 3.6                | 4.2                |
|                  | 50.0           | 3.1                | 3.9                |
| Cd <sup>2+</sup> | 2.0            | 4.5                | 5.2                |
|                  | 10.0           | 3.8                | 4.5                |
|                  | 20.0           | 3.4                | 4.0                |

(三) 准确度评估

准确度评估采用多种基质水样进行验证, 选取工业废水, 地表水和自来水三种典型水样, 研究基质效应对检测结果的影响, 如表 2 所示, 在复杂基质的工业废水中, 即使重金属浓度较高 (Cu<sup>2+</sup> 50.0 μg/L), 方法仍表现出良好的准确性, 回收率达到 102.4%, 对于低浓度样品 (如自来水中 Cd<sup>2+</sup> 2.0 μg/L), 方法同样保持稳定的检测性能, 回收率为 95.0%, 通过国家标准物质 (GBW08619) 与 ICP-MS 方法比对验证, 结果显示在 95% 置信水平下无显著性差异, 研究表明, 该方法在不同浓度范围和基质条件下均保持良好的准确度, 满足工业废水中痕量重金属检测的实际需求。

表 2 不同水样中重金属离子的加标回收实验结果

| 水样类型 | 重金属离子            | 加标量<br>(μg/L) | 测得值<br>(μg/L) | 回收率 (%) |
|------|------------------|---------------|---------------|---------|
| 工业废水 | Cu <sup>2+</sup> | 50.0          | 51.2          | 102.4   |
|      | Pb <sup>2+</sup> | 25.0          | 24.3          | 97.2    |
|      | Cd <sup>2+</sup> | 10.0          | 10.4          | 104.0   |
| 地表水  | Cu <sup>2+</sup> | 20.0          | 18.5          | 92.5    |
|      | Pb <sup>2+</sup> | 10.0          | 10.7          | 106.8   |
|      | Cd <sup>2+</sup> | 5.0           | 4.8           | 96.0    |
| 自来水  | Cu <sup>2+</sup> | 10.0          | 9.8           | 98.0    |
|      | Pb <sup>2+</sup> | 5.0           | 5.2           | 104.0   |
|      | Cd <sup>2+</sup> | 2.0           | 1.9           | 95.0    |

## 四、结语

基于电化学，光谱和智能化技术的创新应用，建立了一套完整的工业废水重金属检测技术体系，纳米材料修饰电极和生物电化学传感技术显著提升了检测灵敏度和选择性；改进的光谱分析方法实现了痕量重金属的准确定量；智能化检测系统则为污染物

实时监控提供了系统解决方案，通过精密度和准确度评估，验证了方法的可靠性，未来研究应着重提高检测系统的抗干扰能力，优化数据分析算法，进一步降低检出限，扩大应用范围，同时，需要加强检测技术的标准化和规范化，推进其在工业污染防治中的实际应用。

## 参考文献

- [1] 许海港. 重金属检测技术在水质检测分析中的应用 [J]. 清洗世界, 2025, 41(03): 163–165.
- [2] 姚京裕, 李玉锋, 徐久盛, 等. 化工废水中重金属离子检测与去除技术研究 [J]. 中国轮胎资源综合利用, 2025, (03): 112–114.
- [3] 王浩安, 满玉凯, 金硕. 水质中重金属元素的高效检测方法与应用研究 [J]. 实验室检测, 2025, 3(02): 136–139.
- [4] 公诚, 李路娟. 水环境中重金属污染的现状及其检测技术探究 [J]. 清洗世界, 2024, 40(09): 115–117.
- [5] 桑爽, 鲁丽花, 高杨, 等. 水产品中重金属污染的快速检测技术研究 [J]. 食品安全导刊, 2024, (25): 184–186.



# 基于层次分析法的乌鲁木齐地区引种月季综合评价与优良品种筛选

徐磊<sup>1</sup>, 陈焕焕<sup>2</sup>, 张颖<sup>3</sup>, 张宁<sup>4</sup>, 卢彦刚<sup>2</sup>

- 1. 乌鲁木齐市林业和草原局 (乌鲁木齐市园林管理局), 新疆 乌鲁木齐 830000
  - 2. 乌鲁木齐市公园建设发展中心种苗场, 新疆 乌鲁木齐 830000
  - 3. 乌鲁木齐市公园建设发展中心人民公园, 新疆 乌鲁木齐 830000
  - 4. 乌鲁木齐市公园建设发展中心水上乐园, 新疆 乌鲁木齐 830000
- DOI:10.61369/EAE.2026040015

**摘 要 :** 为破解乌鲁木齐干旱大陆性气候下园林植物种类单一的困境, 本研究选取 20 个引种月季品种, 于 2024—2025 年在乌鲁木齐市种苗场开展抗寒、抗旱及抗病虫害试验。基于层次分析法 (AHP) 构建包含花部特性、生长特性、抗逆性 3 个约束层及 14 个标准层的综合评价模型, 采用 1—9 标度法确定指标权重, 通过线性加权法计算综合得分。结果表明, 花部特性 (权重 0.454)、抗逆性 (权重 0.275) 和生长特性 (权重 0.271) 共同决定品种优劣; 抗寒在抗逆性指标中的权重最高 (0.5396), 花色 (总排序权重 0.1970)、抗寒 (0.1484) 和花朵数 (0.1331) 为关键指标。综合排序显示, 樱桃伯尼卡 (D1, 83.66 分)、巨型玫迪兰 (D2, 82.96 分)、猩红伯尼卡 (D3, 82.14 分)、红宝石冰 (D4, 81.54 分)、乔治一世国王 (D5, 80.46 分) 综合表现优异, 抗逆性强且观赏价值突出, 适宜在乌鲁木齐及相似干旱、半干旱城市推广。本研究为西北地区月季引种筛选提供了量化决策依据。

**关 键 词 :** 乌鲁木齐; 引种月季; 层次分析法; 综合评价; 品种筛选

## Comprehensive evaluation of introduced roses and selection of excellent varieties in Urumqi area based on Analytic Hierarchy Process

Xu Lei<sup>1</sup>, Chen Huanhuan<sup>2</sup>, Zhang Ying<sup>3</sup>, Zhang Ning<sup>4</sup>, Lu Yangang<sup>2</sup>

- 1. Urumqi Forestry and Grassland Bureau (Urumqi Landscape Management Bureau), Urumqi, Xinjiang 830000
- 2. Urumqi Park Construction and Development Center Seed Farm, Urumqi, Xinjiang 830000
- 3. Urumqi Park Construction and Development Center People's Park, Urumqi, Xinjiang 830000
- 4. Urumqi Park Construction and Development Center Water Park, Urumqi, Xinjiang 830000

**Abstract :** In order to solve the dilemma of a single variety of garden plants in the arid continental climate of Urumqi, this study selected 20 introduced rose varieties and conducted cold resistance, drought resistance, and pest and disease resistance experiments at the Urumqi Seed Farm from 2024 to 2025. A comprehensive evaluation model is constructed based on Analytic Hierarchy Process (AHP), which includes three constraint layers of floral characteristics, growth characteristics, and stress resistance, as well as 14 standard layers. The weights of the indicators are determined using a 1–9 scale method, and the comprehensive score is calculated using linear weighting method. The results showed that flower characteristics (weight 0.454), stress resistance (weight 0.275), and growth characteristics (weight 0.271) jointly determine the quality of the variety; Cold resistance has the highest weight in stress resistance indicators (0.5396), with flower color (total ranking weight 0.1970), cold resistance (0.1484), and number of flowers (0.1331) as key indicators. According to the comprehensive ranking, Cherry Bernica (D1, 83.66 points), Giant Meidilan (D2, 82.96 points), Scarlet Bernica (D3, 82.14 points), Ruby Ice (D4, 81.54 points), and King George I (D5, 80.46 points) have excellent overall performance, strong stress resistance, and outstanding ornamental value, making them suitable for promotion in Urumqi and similar arid and semi-arid cities. This study provides a quantitative decision-making basis for the selection of rose introduction in the northwest region.

**Keywords :** Urumqi; introduction of roses; analytic hierarchy process; comprehensive evaluation; variety screening

引言

月季观赏价值高、应用形式多样，是城市园林绿化的重要花卉。乌鲁木齐冬季严寒、夏季干旱且昼夜温差大，外来品种在越冬存活、持续开花和病虫害适应方面存在显著差异。传统筛选常依赖单项性状或经验判断，难以兼顾观赏性、生长势与抗逆性。层次分析法能够将定性判断与定量指标结合，为多指标品种比较提供统一尺度。因此，本研究以20个引种月季品种为对象，构建由花部特性、生长特性和抗逆性组成的综合评价体系，重点提高抗寒指标在抗逆性层中的权重，并据此筛选适宜乌鲁木齐及相似干旱寒冷地区推广的优良品种。

一、乌鲁木齐地区引种月季概述

（一）气候特点对月季的影响

乌鲁木齐属中温带大陆性干旱气候，年均气温6.8℃，降水量311.4 mm，日照时数2733 h，无霜期165 d<sup>[1]</sup>。冬季受西伯利亚—蒙古高压控制，最低可达-41.5℃；夏季受印度洋低压影响，最高可达47.8℃。高温与低温胁迫均会抑制月季生长、降低花质，并导致冻伤、根系受损甚至植株死亡，故引种筛选须将抗寒与抗旱性作为核心指标<sup>[2-4]</sup>。

（二）月季引种的主要难点

品种抗逆性与本地生态系统的兼容性是引种成败的关键。乌鲁木齐冬季极端低温远超多数月季耐寒极限（-15℃~ -20℃），夏季强光高温加剧蒸腾胁迫，春秋季节白粉病、锈病及夏季蚜虫、红蜘蛛等病虫害频发，显著增加养护成本与管理复杂度<sup>[5-9]</sup>。因此，抗寒性、抗旱性与抗病虫害性是引种筛选的优先评价指标。

二、基于层次分析法的综合评价体系构建

（一）试验材料

供试品种共20个：樱桃伯尼卡（D1）、巨型玫迪兰（D2）、猩红伯尼卡（D3）、红宝石冰（D4）、乔治一世国王（D5）、艾拉绒球（D6）、阳光玫迪兰（D7）、琥珀地毯（D8）、甜蜜漂流（D9）、可爱粉玫迪兰（D10）、美斯泰玫迪兰（D11）、微笑（D12）、绝代佳人（D13）、柠檬酒玫迪兰（D14）、天鹅绒地毯（D15）、桃色漂流（D16）、梦巴黎街景（D17）、黄金城堡（D18）、果汁绝代佳人（D19）、樱桃霜玫迪兰（D20）。2024—2025年在乌鲁木齐市种苗场统一开展抗寒、抗旱及抗病虫害试验，并同步观测花部与生长性状，作为综合评价的数据基础。

（二）层次结构模型与判断矩阵

采用AHP法建立递阶层次结构（表1），运用1—9标度法构造判断矩阵。经一致性检验，各判断矩阵的C.R.均小于0.1，满足一致性要求。

表1 月季综合评价层次结构模型

| 目标层 A        | 约束层 B    | 标准层 C                                             |
|--------------|----------|---------------------------------------------------|
| 乌鲁木齐引种月季综合评价 | 花部特性（B1） | 花色（C1）、花型（C2）、花朵数（C3）、初花期（C4）、盛花期（C5）             |
|              | 生长特性（B2） | 平均花径（C6）、株高（C7）、株幅（C8）、株型（C9）、平均叶长（C10）、平均叶宽（C11） |
|              | 抗逆性（B3）  | 抗病虫害（C12）、抗旱（C13）、抗寒（C14）                         |

表2 花部特性判断矩阵及权重（ $\lambda_{\max}$ =5.197, C.R.=0.044）

| 指标  | 花色  | 花型  | 花朵数 | 初花期 | 盛花期 | 权重     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------|
| 花色  | 1   | 4   | 2   | 5   | 5   | 0.4339 |
| 花型  | 1/4 | 1   | 1/3 | 2   | 3   | 0.1298 |
| 花朵数 | 1/2 | 3   | 1   | 4   | 5   | 0.2933 |
| 初花期 | 1/5 | 1/2 | 1/4 | 1   | 3   | 0.0909 |
| 盛花期 | 1/5 | 1/3 | 1/5 | 1/3 | 1   | 0.0522 |

表3 生长特性判断矩阵及权重（ $\lambda_{\max}$ =6.006, C.R.=0.001）

| 指标   | 平均花径 | 株高  | 株幅 | 株型  | 平均叶长 | 平均叶宽 | 权重     |
|------|------|-----|----|-----|------|------|--------|
| 平均花径 | 1    | 2   | 5  | 2   | 2    | 2    | 0.3170 |
| 株高   | 1/2  | 1   | 2  | 1   | 1    | 1    | 0.1524 |
| 株幅   | 1/5  | 1/2 | 1  | 1/2 | 1/2  | 1/2  | 0.0735 |
| 株型   | 1/2  | 1   | 2  | 1   | 1    | 1    | 0.1524 |
| 平均叶长 | 1/2  | 1   | 2  | 1   | 1    | 1    | 0.1524 |
| 平均叶宽 | 1/2  | 1   | 2  | 1   | 1    | 1    | 0.1524 |

表4 抗逆性判断矩阵及权重（ $\lambda_{\max}$ =3.009, C.R.=0.008）

| 指标   | 抗病虫害 | 抗旱  | 抗寒  | 权重     |
|------|------|-----|-----|--------|
| 抗病虫害 | 1    | 1/2 | 1/3 | 0.1634 |
| 抗旱   | 2    | 1   | 1/2 | 0.2970 |
| 抗寒   | 3    | 2   | 1   | 0.5396 |

（三）层次总排序与评分标准

将约束层权重归一化后（花部特性0.454，生长特性0.271，抗逆性0.275），计算各标准层总排序权重（表5）。

表5 层次总排序权重

| 约束层  | 权重    | 标准层  | 单排序权重  | 总排序权重  |
|------|-------|------|--------|--------|
| 花部特性 | 0.454 | 花色   | 0.4339 | 0.1970 |
|      |       | 花型   | 0.1298 | 0.0589 |
|      |       | 花朵数  | 0.2933 | 0.1331 |
|      |       | 初花期  | 0.0909 | 0.0413 |
|      |       | 盛花期  | 0.0522 | 0.0237 |
| 生长特性 | 0.271 | 平均花径 | 0.3170 | 0.0859 |
|      |       | 株高   | 0.1524 | 0.0413 |
|      |       | 株幅   | 0.0735 | 0.0199 |
|      |       | 株型   | 0.1524 | 0.0413 |
|      |       | 平均叶长 | 0.1524 | 0.0413 |
|      |       | 平均叶宽 | 0.1524 | 0.0413 |
| 抗逆性  | 0.275 | 抗病虫害 | 0.1634 | 0.0449 |
|      |       | 抗旱   | 0.2970 | 0.0817 |
|      |       | 抗寒   | 0.5396 | 0.1484 |

依据专家咨询与文献调研，制定百分制评分标准（表6），对14个指标划分4个等级（100、80、60、40分）。由5位资深专家独立打分，取均值作为各品种分项得分。

| 表6 综合评价指标评分标准 |                |                    |            |          |         |
|---------------|----------------|--------------------|------------|----------|---------|
| 维度            | 指标             | 100分               | 80分        | 60分      | 40分     |
| 花部            | 花色             | 4项均满足              | 满足3项       | 满足2项     | ≤1项     |
|               | 花型             | 完整、优美、饱满、整齐（4项均满足） | 满足3项       | 满足2项     | ≤1项     |
|               | 花朵数            | ≥50朵               | 30~49朵     | 10~29朵   | ≤9朵     |
|               | 初花期（相对对照）      | ±3 d以内             | 4~7 d      | 8~10 d   | >10 d   |
|               | 盛花期            | ≥60 d              | 50~59 d    | 40~49 d  | ≤39 d   |
| 生长            | 平均花径           | ≥8 cm              | 7~7.9 cm   | 6~6.9 cm | ≤5.9 cm |
|               | 株高             | ≥60 cm             | 45~59 cm   | 30~44 cm | ≤29 cm  |
|               | 株幅             | ≥40 cm             | 30~39 cm   | 20~29 cm | ≤19 cm  |
|               | 株型（直立性）        | 大花无弯曲              | 稍微弯曲       | 弯曲       | 非大花亦弯曲  |
|               | 平均叶长           | ≥15 cm             | 10~14.9 cm | 6~9.9 cm | ≤5.9 cm |
|               | 平均叶宽           | ≥8 cm              | 5~7.9 cm   | 3~4.9 cm | ≤2.9 cm |
| 抗逆            | 抗病虫害 / 抗旱 / 抗寒 | 强                  | 较强         | 中等       | 弱       |

三、综合评价结果与优良品种筛选

（一）各品种综合得分

采用线性加权法计算各品种综合评价价值：  
 $S=0.454F+0.271G+0.275R$ （F、G、R分别表示花部特性、生长特性和抗逆性得分），全部20个品种的得分及排名见表7。

| 排名 | 品种代号       | 花部特性得分 | 生长特性得分 | 抗逆性得分 | 综合评价价值 |
|----|------------|--------|--------|-------|--------|
| 1  | D1（樱桃伯尼卡）  | 83.66  | 82.17  | 85.14 | 83.66  |
| 2  | D2（巨型玫迪兰）  | 82.45  | 81.36  | 85.37 | 82.96  |
| 3  | D3（猩红伯尼卡）  | 82.01  | 80.79  | 83.67 | 82.14  |
| 4  | D4（红宝石冰）   | 81.79  | 80.14  | 82.49 | 81.54  |
| 5  | D5（乔治一世国王） | 81.23  | 79.58  | 80.05 | 80.46  |
| 6  | D6（艾拉绒球）   | 80.88  | 77.77  | 80.23 | 79.86  |
| 7  | D7（阳光玫迪兰）  | 79.36  | 75.33  | 79.50 | 78.31  |
| 8  | D8（琥珀地毯）   | 78.17  | 74.19  | 76.62 | 76.67  |

参考文献

[1] 刘盛梅, 张红, 刘莉. 试论气候变化对农业生态的影响——以乌鲁木齐地区为例 [J]. 吉林农业, 2019(18): 112.

[2] 张东旭, 刘天生. 月季抗寒性研究综述 [J]. 种子科技, 2021, 39(16): 7-8.

[3] 王海涛. 月季养护管理要点与病虫害综合防治 [J]. 花木盆景, 2025(10): 8-9.

[4] 彭洁, 王武英, 吉乃楠, 等. 基于层次分析法的13个月季新品种性状综合评价 [J]. 北京农学院学报, 2024, 39(2): 108-114.

[5] 李玉亮, 王尚华, 鱼亚兰, 等. 低温胁迫下不同月季品种的抗寒性评价 [J]. 寒旱农业科学, 2024, 3(4): 349-353.

[6] 刘科伟, 杨虹, 杨军, 等. 8种蓝紫色月季引种栽培比较试验 [J]. 陕西农业科学, 2022, 68(1): 60-63.

[7] 徐晓艳. 藤本月季（欧月系列）在日照地区的引种及综合评价研究 [D]. 日照：日照市园林环卫集团有限公司, 2023.

[8] 王奉军, 高博, 车红兵, 等. 兰州地区引种切花月季适应性研究及品种筛选 [J]. 农业工程技术, 2023, 43(15): 42-46.

[9] 贾晓丽, 陈忠洋, 吴圆圆, 等. 15种大花月季在北疆地区的观赏特性综合评价 [J]. 江苏农业科学, 2020, 48(15): 182-186.

[10] 赵卫华, 姜马兰, 商阳, 等. 基于层次分析法的常州道路适生月季品种筛选 [J]. 南方农业, 2023, 17(3): 28-35.

[11] 曾力, 孟永禄, 金红燕. 7种月季引种适应性的灰色关联度分析评价 [J]. 绿色科技, 2022, 24(7): 37-40.

[12] 李立文, 阳春明, 裴泓松, 等. 湘中地区露地栽培月季品种的筛选与综合评价 [J]. 湖南农业科学, 2022(3): 67-71.

[13] 付存念, 潘可可, 杨程鹏, 等. 基于层次分析法的温州月季资源适应性评价 [J]. 安徽农业大学学报, 2021, 48(5): 763-770.

[14] 武荣花, 刘引, 卜燕华, 等. 北京地区138个月季品种夏秋观赏效果综合评价 [J]. 中国园林, 2021, 37(10): 118-122.

[15] 董万鹏, 吴楠, 金晶, 等. 藤本月季品种资源表型性状分析及综合评价体系构建 [J]. 分子植物育种, 2022, 20(15): 5115-5124.

[16] 杨春胤, 雷利锋, 刘新伟, 等. 应用层次分析法建立微型盆栽月季品种综合评价体系 [J]. 农业科学研究, 2018, 39(4): 89-93.

| 排名 | 品种代号        | 花部特性得分 | 生长特性得分 | 抗逆性得分 | 综合评价价值 |
|----|-------------|--------|--------|-------|--------|
| 9  | D9（甜蜜漂流）    | 76.69  | 70.15  | 73.44 | 74.02  |
| 10 | D10（可爱粉玫迪兰） | 76.38  | 70.46  | 73.11 | 73.88  |
| 11 | D11（美斯泰玫迪兰） | 75.75  | 69.36  | 70.19 | 72.49  |
| 12 | D12（微笑）     | 75.13  | 69.06  | 66.47 | 71.10  |
| 13 | D13（绝代佳人）   | 71.63  | 69.01  | 65.29 | 69.18  |
| 14 | D14（柠檬酒玫迪兰） | 70.66  | 67.55  | 64.77 | 68.20  |
| 15 | D15（天鹅绒地毯）  | 69.69  | 66.33  | 63.01 | 66.94  |
| 16 | D16（桃色漂流）   | 69.60  | 65.47  | 63.74 | 66.87  |
| 17 | D17（梦巴黎街景）  | 70.64  | 63.26  | 62.73 | 66.46  |
| 18 | D18（黄金城堡）   | 68.75  | 62.74  | 60.17 | 64.76  |
| 19 | D19（果汁绝代佳人） | 67.36  | 61.11  | 61.44 | 64.04  |
| 20 | D20（樱桃霜玫迪兰） | 64.42  | 60.23  | 60.09 | 62.09  |

（二）优良品种判定与区域推荐

结合综合得分分布与抗逆性表现，以综合评价价值≥80.00且抗逆性得分≥80为筛选阈值，樱桃伯尼卡（D1）、巨型玫迪兰（D2）、猩红伯尼卡（D3）、红宝石冰（D4）、乔治一世国王（D5）显著优于其他品种<sup>[10-11]</sup>。上述5个品种在抗寒（-30℃越冬存活率>90%）、抗旱（持续干旱30 d生长正常）及抗病性方面表现突出，且盛花期超过55 d、花色艳丽，能够满足乌鲁木齐市园林绿化需求。建议将樱桃伯尼卡与巨型玫迪兰作为城市骨干绿化品种，猩红伯尼卡与红宝石冰用于边缘粗放管理区域，乔治一世国王作节点缀<sup>[12-16]</sup>。

四、结束语

本研究基于AHP法构建了适用于乌鲁木齐地区的引种月季综合评价体系，明确了花部特性（权重0.454）、抗逆性（0.275）和生长特性（0.271）为主要评价维度。经核验并修正判断矩阵后，抗寒在抗逆性层中的权重最高（0.5396），花色（总排序权重0.1970）、抗寒（0.1484）和花朵数（0.1331）为关键指标。对20个品种的系统评价表明，樱桃伯尼卡（83.66分）、巨型玫迪兰（82.96分）、猩红伯尼卡（82.14分）、红宝石冰（81.54分）和乔治一世国王（80.46分）综合表现优异，适宜在乌鲁木齐及相似干旱、半干旱城市推广。本研究验证了AHP法在多指标、多品种筛选中的可操作性，为乌鲁木齐地区月季引种决策提供了量化工具。

# 区域地质灾害与生态协同治理路径探析

杨倩

新疆地质局昌吉地质大队，新疆 昌吉 831100

DOI:10.61369/EAE.2026040016

**摘 要：**当前区域地质灾害防控与生态修复存在治理割裂、技术脱节、机制碎片化等突出问题，传统单一治理模式易引发次生生态灾害、治理成效难以长效。本文摒弃工程防灾与生态修复分治的传统思维，立足新疆地质与生态耦合互馈机理，系统剖析协同治理现实梗阻，从理念重构、技术融合、空间统筹、机制联动、长效运维五个维度搭建一体化治理体系，提出全过程、实操性协同治理路径，可为新疆生态脆弱、灾害高发区域统筹筑牢地质安全与生态安全屏障提供理论与实践参考。

**关 键 词：**区域地质灾害；生态协同；新疆治理路径

## Analysis of the Collaborative Governance Path for Regional Geological Disasters and Ecology

Yang Qian

Xinjiang Geological Bureau, Changji Geology Team, Changji, Xinjiang 831100

**Abstract：**Currently, there are prominent problems such as governance fragmentation, technological disconnection, and fragmented mechanisms in regional geological disaster prevention and ecological restoration. The traditional single governance model is prone to triggering secondary ecological disasters and the governance effectiveness is difficult to be sustained in the long term. This paper abandons the traditional thinking of separate engineering disaster prevention and ecological restoration, and based on the coupling and mutual feedback mechanism of geology and ecology in Xinjiang, systematically analyzes the practical obstacles of collaborative governance. It builds an integrated governance system from five dimensions: concept reconstruction, technology integration, spatial coordination, mechanism linkage, and long-term operation and maintenance, and proposes a practical and holistic collaborative governance path. This can provide theoretical and practical references for the overall construction of geological safety and ecological safety barriers in ecologically fragile and disaster-prone areas in Xinjiang.

**Keywords：**regional geological disasters; ecological synergy; governance path of Xinjiang

### 引言

我国山地、流域地貌广布，地质灾害高发区与生态脆弱区空间高度重叠，新疆典型高寒干旱山区该特征尤为突出。地质灾害造成的损毁岩土和植被资源，加重了生态退化，生态系统破损又削弱了边坡稳定性，放大了灾害风险，形成了灾害与生态互相损毁的恶性循环。目前区域治理存在着工程防灾和生态修复相互割裂的碎片化问题，治理体系不能适应系统性风险防控的要求。因此本文冲破传统单向治理观念，探寻多元协同治理途径，破解二元治理困境，推进新疆区域地质安全和生态安全的共同创建。

### 一、区域地质灾害与生态治理耦合机理

地质环境和生态系统存在着紧密的双向互馈关系，地质结构、地形、水文条件决定区域生态稳定性，滑坡、泥石流等地质灾害破坏水土、植被体系，造成生态功能衰退，生态退化、植被

裸露又会削弱边坡固土保水能力，加剧岩土失稳风险，形成灾害与生态恶化的链式恶性循环。地质灾害防控和生态治理在空间、目的、周期上高度契合，二者治理区域重叠、安全目标一致，工程防灾短效控险和生态修复长效固本优势互补，是开展新疆一体化协同治理、破解区域系统性风险的主要基础。

作者简介：杨倩（1984.01—），汉族，新疆昌吉人，本科，中级工程师，研究方向：生态修复，地质环境治理。



## 二、当前区域协同治理的现实梗阻

### （一）治理理念割裂，二元思维突出

目前区域治理普遍存在着重工程、轻生态、重修复、轻防灾的二元认知偏差。地质灾害治理过度依靠刚性支护、削坡减载、挡土加固等传统工程手段，只注重灾害隐患的迅速消除，而忽视了工程施工给原生地形地貌、植被群落、土壤结构带来的破坏，易引发边坡硬化、生物栖息地破坏、水土交换阻断等次生生态问题，新疆干旱区生态承载力本就偏弱，此类问题影响更为突出。生态修复工作大多集中于植被复绿、景观改善，缺少地质安全前置评价，未结合区域岩土稳定情况、灾害风险分布展开有针对性的修复，部分植被种植、地形改造工程反而加大了边坡荷载、改变了地表径流，引发新的地质隐患，形成“治理即隐患”的被动局面<sup>[1-2]</sup>。

### （二）技术体系脱节，融合应用不足

地质防灾技术和生态修复技术属于两个相对独立的技术体系。传统的地质治理技术以刚性岩土加固为主，生态兼容性差，难以满足区域生态涵养功能的要求；常规生态修复技术侧重植被培育、土壤改良，缺少岩土体稳定、灾害风险防控的技术设计，不能适应新疆灾害高风险区的治理需求。数字化监测、动态预警技术没有实现全域融合，地质灾害监测主要关注岩体位移、雨量数据，生态监测主要关注植被覆盖、水土指标，两种监测数据壁垒明显，数据不能互通共享、联动分析，造成治理工作滞后、精准度不够<sup>[3]</sup>。

### （三）管控机制碎片化，全域统筹缺失

行政管控上存在着条块分割、属地壁垒、权责脱节的状况。地质灾害防控以自然资源部门为主导，主要进行隐患排查、工程治理、风险管控；生态修复以生态环境、林业、水利等部门为主，主要对生态功能修复、水土保持、植被管护等进行修复，各职能部门的治理目标、考核标准、工作时序不统一，缺少跨部门常态化联动机制。区域上没有形成统一的协同治理规划，国土空间规划没有把地质风险管控和生态保护修复进行刚性融合，新疆跨界流域、山地连片风险区普遍存在分段治理、重复治理、治理空白等问题<sup>[4]</sup>。

### （四）长效运维缺失，治理持续性不足

目前治理工作存在重建设、轻运维、轻养护的短期化问题，大多数治理工程以项目竣工为终点，缺少长期动态管护、生态培育、风险迭代管控机制。地质工程治理后，未同步实施生态修复和植被养护，刚性工程设施长时间裸露在外，易受到雨水冲刷、风化侵蚀而逐渐失效；生态修复工程完成后，缺少对地质风险的动态监测以及边坡稳定性管理，新生植被群落的抗灾能力差，无法抵抗极端天气造成的地质扰动。同时，新疆偏远山区管护缺位问题凸显，造成部分区域治理效果逐年下降，难以形成地质安全和生态稳定的长效稳态格局<sup>[5]</sup>。

## 三、区域地质灾害与生态深度协同治理创新路径

### （一）理念重构：建立地质—生态一体化治理逻辑

彻底打破二元治理思想，树立起以地质安全为基础、生态赋

能固本、全域系统统筹的协同治理新观念，由原来的“被动防灾、单向修复”转变为现在的“主动控险、生态固本、双向赋能”。治理前期坚持地质风险前置管控，把区域地质灾害风险评价、岩土体稳定性分析当作生态修复、国土空间开发的刚性前置条件，所有的生态治理项目都要经过地质安全论证，不能随意开展生态改造造成地质隐患。在治理过程中坚持生态优先、柔性治理的原则，抛弃过于刚性的工程治理模式，尽可能地使用生态适配型的治理技术，最大程度上保留原生地形地貌和生态肌理，减小工程干预给地质生态系统带来的影响，适配新疆脆弱干旱生态基底。治理后期坚持双向提质，依靠地质结构稳固来保证生态系统稳定，依靠生态功能恢复来加强地质抗灾能力，创建起地质安全和生态修复互相支撑的良性循环格局<sup>[6]</sup>。

### （二）技术融合：构建耦合型综合治理技术体系

创建“柔性防灾、生态修复、数字赋能”三者并行的技术体系来解决技术断层的问题。一是推广岩土生态复合治理技术，代替传统的纯刚性工程模式，针对边坡、沟谷、危岩等典型的隐患区，使用生态固坡和岩土加固相结合的技术，用松木桩、石笼、植被固土等柔性技术固定浅表岩土体，搭配适度锚杆、框架梁等轻型刚性结构控制深层风险，在消除地质隐患的同时，恢复土壤结构、培育原生植被群落，达到防灾治理和生态修复的双重目的，适配新疆河谷、山前带治理场景。对泥石流、水土流失链式灾害区，创建起分级生态拦截体系，用沟谷生态堰坝、坡面植被缓冲带、水土保持林分级消能控沙来完成灾害防控和流域生态修复。

二是创建全域数字化协同监测体系，冲破数据壁垒。整合地质灾害监测、生态环境监测、水文气象监测资源，创建统一的“地质—生态”耦合监测数据库，打通岩体位移、土壤含水率、植被覆盖度、径流变化等主要数据，达成数据实时共享、联动分析。利用大数据、遥感技术建立耦合风险动态预警模型，准确找到地质退化导致的生态风险、生态破坏造成的地质隐患，提前发现、提前预判、提前处置风险，给精准协同治理提供技术支持<sup>[7-8]</sup>。

### （三）空间统筹：完善全域一体化规划管控体系

以国土空间规划为载体，把地质灾害防控和生态修复统一到全域空间统筹上来，解决碎片化的治理问题。一是建立空间刚性约束机制，把地质灾害风险分区、生态保护红线、水土保持管控区域进行空间叠加融合，划分协同治理核心区、重点区、一般区，实行差异化管控策略。核心重叠区禁止高强度开发建设，主要布局一体化治理工程；重点区域兼顾风险防控和生态提质，改善地形地貌和植被结构；一般区域加强常态化管理，防止风险迭代升级，该分区管控模式可直接落地新疆国土空间管控工作<sup>[9]</sup>。

二是推行全过程规划衔接，把地质生态协同治理的要求贯穿于国土空间规划、乡村建设、流域治理、矿山修复等各种专项规划之中，确定各个区域的治理目标、技术标准、管控要求，防止各种规划之间出现脱节和冲突。就跨行政区域、跨流域连片的风险区而言，创建全域统一规划、联合治理的机制，冲破属地治理的壁垒，达成分段治理到全域共治的转变，清除治理空白和重复

治理的情况。此外，建立规划动态修订制度，按照区域地质生态变化、风险变化情况及时对治理规划、管控措施做出修订完善。

**（四）机制联动：搭建多维度协同治理运行体系**

创建跨部门、跨区域、全流程的联动治理体系来破解权责分离、治理割裂的问题。一是创建跨部门常态化的联动机制，整合自然资源、生态环境、水利、林业、应急等各方面的职能，成立区域协同治理专班，统一制定治理方案、统筹项目资金、开展联合排查、落实联合管护、统一治理考核标准，避免多头管理、各自为政。创建治理信息互通、问题会商、应急联动工作制度，使隐患排查、治理实施、风险管控、应急处置全流程协同<sup>[10]</sup>，适配新疆多部门协同管护需求。

二是健全跨区域联防联控共治机制，对于跨界流域、山区等地质生态风险连片区域，参照跨区域联防联控的经验，创建起毗邻区域常态化协同治理机制，达成雨情水情、地质隐患、生态状况数据共享的目的，实施联合排查、联合预警、联合治理、联合管护，系统性地解决跨界碎片化治理难题。三是改进资源统筹配置机制，整合地质防灾、生态修复、水土保持等专项资金和项目资源，集中力量投向重点治理区，提高资源利用率，保证协同治理工程落地生根。

**（五）长效运维：构建全过程动态管护体系**

立足长效治理目标，创建“工程管护、生态培育、动态监测、公众参与”四者相互联系的闭环运维体系，杜绝出现短期化治理的弊端。一是建立工程和生态一体化的管护机制，地质治理工程

竣工之后，同时配套生态养护措施，不断培育植被群落、改善土壤结构，促使原生生态系统自然演替；生态修复区同频开展常态化的地质隐患巡查，实时观测边坡稳定状况、岩土体变动情况，迅速应对新的危险，缓解新疆野外治理工程管护难题。

二是创建风险动态迭代管控体系，依照极端天气、工程扰动、生态演替等外部要素，定时执行区域地质生态耦合风险评定，动态改良治理办法，保证治理成果不断巩固。三是创建多元参与格局，组建基层专业化管护队伍，实行常态化巡查养护；健全公众参与、监督、反馈机制，推广地质生态协同保护知识，调动群众参与隐患上报、生态管护的积极性，塑造起政府统筹、专业运维、社会参与的长效治理局面。

**四、结论**

区域地质灾害防控和生态治理是深度耦合、双向赋能的有机系统，传统的单向度、碎片化的治理方式存在着理念割裂、技术脱节、机制分散、运维短期化等主要缺陷，不能应对区域系统性的地质生态风险。本文根据二者耦合共生的规律，创新性地提出了一条理念、技术、空间、机制、运维五位一体的协同治理路径，提出一体化的实操治理方案，将地质安全防控和生态修复融合在一起。该路径可有效地解决二元治理矛盾，提高区域综合治理能力，筑牢地质和生态双重安全屏障，为新疆灾害高发、生态脆弱区域治理提供可复制的创新实践范式。

**参考文献**

[1] 李丹. 矿区地质灾害治理与生态矿业建设的协同发展路径研究 [J]. 中国金属通报, 2025, (10): 16–18.

[2] 林湧湧. 浅析水文地质因素诱发地质灾害的预防与控制 [J]. 中国减灾, 2025, (11): 50–51.

[3] 蔡靖. 地质灾害防治与地质环境利用研究 [J]. 中国减灾, 2025, (6): 56–57.

[4] 李丹. 矿区地质灾害治理与生态矿业建设的协同发展路径研究 [J]. 中国金属通报, 2025, (10): 16–18.

[5] 曾勇. 地质灾害治理工程勘察设计和施工中的难点分析 [J]. 城市建设, 2025, (16): 34–36.

[6] 蔡颖, 张涵, 唐歆. 面向生态修复的地质灾害治理工程技术创新与实践 [J]. 江西建材, 2025, (7): 199–201.

[7] 冯永刚. 水工环地质勘查在地质灾害治理中的应用 [J]. 城市建筑空间, 2025, 32(S1): 269–270.

[8] 龙光达. 边坡地质灾害治理技术的研究与对策措施 [J]. 农业灾害研究, 2025, 15(5): 305–307.

[9] 池永锋. 高陡边坡地质灾害治理工程施工应用要点 [J]. 中国金属通报, 2025, (3): 234–236.

[10] 席轩. 地质灾害治理工程勘察设计和施工中的难点分析 [J]. 四川建材, 2024, 50(11): 68–70.

# 环保理念下长钢护筒桩在桥梁防撞墩中的应用

沈高均

上海市凯达公路工程有限公司, 上海 201600

DOI:10.61369/EAE.2026040017

**摘 要 :** 针对松蒸公路7#桥墩南侧防撞墩撞击破损的应急抢险工程,为适应Ⅲ级航道水域施工的要求,避免传统桩基施工造成的污染问题,提高防撞防护能力,本文对钻孔灌注桩和长钢护筒桩施工、环保、造价、抗撞性能进行了对比分析,该工艺适合于航道水域应急抢险施工场景,可以较好地满足施工效率、工程质量、生态保护等各方面的需要,阐述了长钢护筒桩施工准备、预制移运、沉桩及接桩等全套施工工艺。经过实践证明,该工艺工期短、生态环保,形成的钢混组合结构可以明显提高防撞墩的抗侧撞能力,适合水域应急绿色施工。

**关 键 词 :** 长钢护筒桩;桥梁防撞墩;桥梁安全;绿色施工

## Application of Longsteel Shield Piles under Environmental Protection Concept in Bridge Anti-collision Piers

Shen Gaojun

Shanghai Kaida Highway Engineering Co., Ltd. Shanghai 201600

**Abstract :** Regarding the emergency rescue project for the damaged anti-collision pier on the south side of No. 7 bridge abutment of Songzhen Road, in order to meet the construction requirements of the III-level waterway area, avoid the pollution problem caused by traditional pile foundation construction, and improve the anti-collision protection capability, this paper conducts a comparative analysis of the construction of bored cast-in-place piles and long steel casing piles, as well as their environmental protection, cost, and anti-collision performance. This technology is suitable for emergency rescue construction scenarios in waterway areas and can effectively balance multiple demands such as construction efficiency, engineering quality, and ecological protection. This paper elaborates on the entire construction process of long steel casing pile construction, including preparation, prefabrication and transportation, pile sinking, and connection. Through practice, it is known that this technology has a short construction period and is environmentally friendly. The formed steel-concrete composite structure can significantly improve the lateral collision resistance of the anti-collision pier and is suitable for green emergency construction in waterways.

**Keywords :** long steel casing pile; bridge anti-collision pier; bridge safety; green construction

### 引言

本项目为松蒸公路7#桥墩南侧防撞墩被撞抢修,沉水打捞并破碎河底线以下2m处废桩。在桥墩南侧新建独立式防撞墩,桩基打设44米, DN1000钢管桩5根,新建防撞墩墩身加装钢覆复合设施。该河道属于Ⅲ级航道,桥梁防撞墩损坏之后桥梁墩已经没有防护措施,通航船舶众多,最近极端天气频繁发生,桥梁安全问题不容忽视,防撞墩的建设迫在眉睫。

本次采用长钢护筒桩工艺,可以有效地解决传统工艺的环保问题,并且保证工程抢险效率以及水域生态环境的保护。该工艺全过程没有泥浆外排、没有水体扰动污染源,最大限度地保护河道水生植被和水体水质,符合水域绿色施工控制要求,有效地避免了应急施工中生态破坏的风险。本文以本应急抢险工程为依托,对常规钻孔灌注桩和长钢护筒桩的综合性能展开比较,就长钢护筒桩作为防撞墩永久基础的施工技术及应用价值做出详细的论述。



一、施工方案确定

下部结构采用桩基5根长44米，DN1000桩，对钻孔灌注桩和钢管护筒桩两种方案进行比选（如图1所示），选用适合的结构形式。

表1：灌注桩与钢管护筒桩的比较

| 序号 | 项目   | 灌注桩                                                                                  | 钢管护筒桩                                                      |
|----|------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| 1  | 工艺区别 | 水中钻孔成桩，搭设水上平台，水中钻孔需设置外护筒或围堰，泥浆排放，钢筋笼安放，灌注混凝土，成孔。                                     | 钢管护筒沉桩，水中支架或船上平台，钢管护筒捶打，钢管护筒焊接连接，下钢筋笼，灌注混凝土，成孔。            |
| 2  | 施工难度 | 钻孔中易受到损坏岩石、老防撞墩遗留物的阻碍，导致钻孔难以控制。                                                      | 钢管护筒施打具有一定的冲击力，护筒尖头有很强的突进能力。                               |
| 3  | 外界影响 | 水中平台、围堰施工要求高、难度大。                                                                    | 船只专用平台施工，工艺成熟可靠。                                           |
| 4  | 工期   | 施工准备至完工，45天。                                                                         | 25天，工期短。                                                   |
| 5  | 环境影响 | 钻孔灌注桩泥浆制作、循环，泥浆的排放，容易对周边水系产生污染。                                                      | 无泥浆排放，施工全过程密闭作业，杜绝渣土、废水散落水体，大大减少施工扬尘、水体扰动，全方位保护河道生态环境。     |
| 6  | 造价   | 1800元/米，水中围堰费用另计，造价高。                                                                | 2400元/米，略有增加。                                              |
| 7  | 防撞能力 | 钻孔灌注桩是桥梁常用的下部基础，强度大、抗压能力强，但是钻进成孔过程中孔内塌孔、孔底清渣沉渣过厚、钢筋笼偏位、水中混凝土浇筑等对桩质量整体性有影响，防侧向撞击能力一般。 | 钢管护筒灌注桩长钢管护筒内灌注钢筋混凝土，整体性好、质量稳定，在足够荷载能力的同时外包钢管护筒提高了抗侧向冲击能力。 |

经过比选，钢管护筒桩与传统的钻孔灌注桩相比，在桥梁防撞墩功能上具有明显的优势，在造价略有增加的情况下，施工简便，质量有保证，安全性能好，作为永久结构型，长钢管护筒直接作为防撞墩的钢管桩基，与内部混凝土共同形成钢管混凝土组合桩，利用钢材延性吸收船舶撞击能量，提高抗侧推和抗弯能力。同时该工艺有效地解决传统桩基施工泥浆污染、水体浑浊的问题，具有绿色环保的优势，符合生态河道施工的要求。本次应急抢险项目中能够很好地应用。

二、施工准备

（一）锤击拆除防撞墩

松蒸公路7#桥墩南侧防撞墩被撞沉水，本次需将沉水打捞至泥面线以下2m。通过侧扫声纳图像和 DIDSON 识别声纳图像可以发现7#桥墩南侧原分离式混凝土防撞墩在水下倒塌，呈向西侧伏状，根据探测图像量测可知，坍塌在泥面上的混凝土防撞墩在泥面上长11米、宽6米，高出泥面4米。

规范水上钻探施工，严格按照水上勘探工艺和管线保护方案进行孔位钻探，孔位确定后不得随意变更。钻探过程中专人观测参数及环境，紧急情况发生时启动应急预案，联合各方面的人员进行处理。拆除打捞全过程使用密闭清运的方式，打捞的废渣全部上岸集中处理，防止废渣散落在河道中造成水体悬浮物超标，

保护水域生态平衡<sup>[1]</sup>。

（二）桩基工程施工参数

本项目防撞墩桩基采用5根 DN1000长钢管护筒桩，钢材为 Q345C，桩长 L = 44m，上下节壁厚 20、16mm。相邻桩基连接处需错开1m以上。钢管桩内填 C30 细石混凝土，填芯长16m，顶标高与设计标高一致。

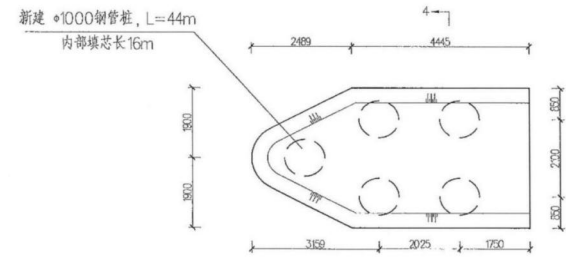


图1 钢管护筒示意图

三、长钢管桩专项施工工艺

（一）钢管桩预制与移运

1. 钢管桩预制

钢管桩委托有资质的专业单位进行预制加工，工厂制作保证钢管的线型、尺寸及焊缝的质量。主要指标是对焊缝超声探伤检测，保证无裂纹、气孔等缺陷、直径大小一致，线型顺直不弯曲。

长钢管桩桩端设尖底，端部淬火增强穿透力，适应各种地质状况。工厂预制避免了现场露天作业引起的污染，焊接废渣、废料统一回收处理，杜绝建筑垃圾随意排放，践行绿色施工理念<sup>[2]</sup>。

2. 钢管桩的运输

钢管桩陆上先用平板车水平运输至现场，钢管多点支撑，并在管体中部和两端加装橡胶垫块，用钢索捆绑固定。运至现场后安放于平整的硬地，分层堆放，层间用方木衬垫，保持稳定<sup>[3]</sup>。

水上运输安装采用专用船舶，桩体吊装采用两点起吊，水平固定放置在运输架上，水上运输全过程封闭防护，避免建材碎屑、油污进入河道，防止船舶运输工程中造成的水域污染。



图2 钢管桩防撞墩

（二）导向支架安装与定位

1. 导向架安装

打桩前先制作钢制导向架，在桩周围打入钢板桩，桩与桩之间采用钢管连接，安装导向架，支架保证垂直度和稳定性，内设限位钢板，使长钢管桩安装时垂直下沉，不偏位、跑位<sup>[4]</sup>。



## 2. 桩定位

用全站仪在导向架顶部、底部分别放出桩位中心线。打桩船就位后,抛锚固定,保证施工期间稳定不移动,全站仪测量校核桩位,控制偏差满足设计要求,准备桩的施打。

### (三) 钢管桩施工

#### 1. 桩机就位

液压静力压桩机在船上平台自行就位,调节桩机水平度和垂直度,使压桩平台保持水平状态。

将钢管桩起吊至导向架上方,缓慢下放桩尖入水至河底,再次调整吊机,保持桩的垂直度,校核后启动压桩机进行初压,行进中全程观测桩体位置及垂直度的变化,及时调整压桩机的位置及角度<sup>[6]</sup>。

#### 2. 静压桩沉桩控制

长钢管桩采用先轻后重、逐级加压的方法,开始依靠桩的自重,有导向支架轻入河底淤泥层,再次进行定位校准,然后低压力慢慢压入,桩体稳定后再逐渐加大压力。压入速度不能过快,防止土体快速挤压造成桩体偏移。

压桩时实时监测桩体垂直度,偏差大于设计值时立即停止压桩,采用顶升纠偏或者局部挖土调整。

#### 3. 纠偏措施

##### 1) 锤击辅助沉桩

当静压桩受阻,遇到硬夹层或者孤石的时候,可用锤击模式辅助沉桩。锤击力度根据静压时的极限压力来计算确定,锤击能量控制在设计允许范围内,防止桩身受到损伤。锤击时用高频小能量击打,同步检测桩身应力应变,防止出现裂缝。

##### 2) 补桩

当桩位倾斜或偏位严重或桩无法打入至设计标高,不能满足设计的要求,对原桩位在设计高度位置进行截除,并进行填芯处理,测定其承载力,经设计验算后确定,补桩时在处理桩临近位置打桩,全程检测数据需得到设计同意方可进入后续施工。

#### 4. 沉桩布置

钢管桩按设计间距布置,以减少土体挤压对已压入桩的影响,用间隔跳打法,间隔跳打工艺可以减小土体扰动,防止河道底泥大面积翻涌,减少水体污染和生态破坏。

### (四) 桩头处理与接桩

#### 1. 桩头处理

沉桩到设计标高后,用角磨机打磨桩头,去除毛刺、锈迹到平整光滑,露出金属光泽。桩顶焊接钢板封口,对需要接长的钢

管桩,在桩头两侧对称焊接连接法兰,给后续接桩工序提供定位基准。

#### 2. 接桩施工

采用焊接接桩法,清除上下节桩端的污物,用定位销装置使上下桩体轴线重合,偏差不大于2mm。并设置4块对称加劲板提高连接强度。

焊接时采用多层多道焊,先焊坡口后焊外口,接桩焊接作业设防护围挡,焊渣集中处理,防止污染河道水体和周围环境。

沉桩结束后对桩顶进行切割平整,将大于设计标高的部分切除掉。在桩顶焊接封口钢板,和管体满焊连接,防止后续施工时泥土、杂物进入管内<sup>[7-8]</sup>。

### (五) 管内填芯

#### 1. 填芯材料制备

填芯材料采用自密实高强灌浆料,配合比中加入膨胀剂和减水剂,保证流动性及抗离析性。

填芯前用测绳检测桩内积水深度,清除管内积水,不超过50cm,防止填芯材料稀释降低强度影响填芯质量。

#### 2. 填芯施工质量控制

采用导管法填芯,导管底口距离桩底300mm左右,初始灌注时导管埋深 $\geq 1.0\text{m}$ (根据管径计算首次灌浆方量)。填芯时缓慢提升导管,提升速度和混凝土灌注速度相适应,防止断桩或者夹层<sup>[9-10]</sup>。

填芯至桩顶设计标高后,超灌200mm以上,振捣密实,抹平。填芯完毕用超声波检测仪检测桩身完整性,对缺陷部位进行钻孔补浆。

### (六) 防撞墩及防撞装置的安装

桩基浇筑养护完成后,紧接着进行防撞墩制作、水上交通标志、钢覆复合材料防撞装置安装等工作。

## 四、结论

本次桥梁防撞墩应急工程使用长钢护筒桩施工工艺,比传统的钻孔灌注桩施工工期短、无泥浆污染,符合河道生态保护的要求。钢护筒和混凝土一起受力的组合结构,明显提高桩基整体性和抗船舶侧向撞击能力。该工艺施工方便、质量稳定、绿色环保,完全符合航道水域防撞墩应急抢险施工要求,有较好的工程推广应用价值。

## 参考文献

- [1] 周文玮. 侧向碰撞下钢护筒复合桩的力学特性及峰值位移预测方法研究 [D]. 华中科技大学, 2023.
- [2] 胡健, 马新风. 超厚砂卵石层地质条件下大直径钢护筒沉放技术 [J]. 中国水运 (下半月), 2021, 21(2): 121-122.
- [3] 周文玮, 高荣雄. 基于损伤性能的钢护筒复合桩抗撞设计方法 [J]. 土木工程与管理学报, 2023, 40(1): 71-77+84.
- [4] 项伟康. 关于绿色观念引导下的公路桥梁钻孔灌注桩的施工技术研究 [J]. 中国航建, 2022(15): 231-234.
- [5] 王涛. 桥梁施工中钻孔灌注桩施工技术的应用 [J]. 四川建材, 2025, 51(8): 149-151, 155. DOI:10.3969/j.issn.1672-4011.2025.08.042.
- [6] 江门职业技术学院, 广东祥禾建设工程有限公司. 一种桥梁建设用绿色环保的基桩施工方法 :CN202411696845.9[P]. 2025-03-18.
- [7] 郭志仁, 孙圣明, 尤宏坤. 新型锁口钢管桩基坑支护施工技术在人工填海地区的应用 [C]//2011年中国城市地下空间开发高峰论坛论文集. 2011: 233-239.
- [8] 陈延龙. 绿色环保理念在道路桥梁施工中的技术运用 [J]. 大众标准化, 2025, (16): 142-144.
- [9] 潘忠平. 基于环保理念的特殊桥梁工程路基路面材料选择与性能研究 [J]. 交通科技与管理, 2024, 5(14): 68-70.
- [10] 蔡志标, 刘盼盼. 绿色环保理念在道路桥梁施工中的技术运用分析 [J]. 云南水力发电, 2021, 37(12): 288-290.

# 生态环境管理与咨询项目编写的合规性框架及优化策略研究

陈伟鸿

广东 惠州 516000

DOI:10.61369/EAE.2026040018

**摘 要：** 生态环境管理及咨询项目属于专业机构所提供的合规性专业服务，开展编写工作时需搭建包含政策根据、技术标准等要素的合规方案。项目编写面临全流程的合规隐患，受管理体制、专业水平等多种因素限制。研究提出优化措施：完备管理方案、加强技术保障、健全保障体制，为项目规范性的提高提供理论参考与实践办法，促进该行业的健康进步。

**关 键 词：** 生态环境管理与咨询项目；合规性框架；优化策略

## Research on Compliance Framework and Optimization Strategy for Ecological Environment Management and Consulting Project Writing

Chen Weihong

Huizhou, Guangdong 516000

**Abstract：** The ecological environment management and consulting project belongs to the compliance professional services provided by professional institutions. It is necessary to build a compliance plan including policy basis, technical standards and other elements when compiling the project. Project writing is faced with the hidden danger of compliance in the whole process, which is limited by many factors such as management system and professional level. The research proposes optimization measures: complete management plan, strengthen technical support, improve the security system, provide theoretical reference and practical methods for the improvement of project standardization, and promote the healthy progress of the industry.

**Keywords：** ecological environment management and consulting projects; compliance framework; optimization strategy

## 引言

生态环境治理与咨询类项目是连接生态环境政策落实与实际治理的重要载体，其编制的合规程度直接关系到治理成效的提高。随着生态文明建设持续推进，2023年生态环境部修订发布的《建设项目环境影响评价技术导则 总纲》对项目编写的技术规范和合规要求进行更细致的规定，传统依靠经验的编写模式已难以适应政策动态变化和技术标准提高的需要。本研究针对项目编写合规性框架搭建、风险辨别以及优化途径开展探讨，全面梳理政策遵循、技术规范与流程准则，确定合规性主要要素，给出全过程管控、数字化技术融入、专业素养提高等措施，意在为加强项目编写水准、规避合规方面的风险提供理论支撑与实践办法，推动生态环境治理体系的现代化建立。

## 一、生态环境管理与咨询项目编写合规性框架的理论基础

### （一）生态环境管理与咨询项目的基本内涵

生态环境治理与咨询项目是专业组织根据生态环境相关法规、标准准则及政策规定，为政府部门、企业或者社会组织所提供的包含环境规划编制、影响评估、污染治理方案谋划、生态修复策略拟定等方面的专业服务事项，其主要特性表现为科学性、专业性和合规性的融合<sup>[1]</sup>。项目包括的主要内容有环境现状的调

查和评估、环境管理体系的搭建、环保政策的解读以及合规性审查、污染防治技术方面的咨询、生态保护与修复方案的编制等。既要实现委托方的需求，又要符合区域生态环境质量改善的整体目标。在治理方案里，这类项目是衔接政策拟定与实践执行的重要桥梁，通过专业咨询促使治理主体履行环保职责，提高环境管理精准化程度，并且为政府监管提供技术保障。

### （二）合规性框架构建的必要性与核心要素

搭建合规性框架的必要性，是由于生态环境领域政策法规存在动态性、项目实施较为复杂。随着生态文明建设的推进，项目

撰写要同时符合环评、排污许可、生态修复等多方面合规要求，传统经验型撰写容易造成政策衔接欠佳、标准执行有误，建立系统性合规框架成为提高项目质量与风险防控水平的要点。合规性方案的主要要素包含政策支撑、技术准则、流程要求和质量把控；政策支撑包含国家及地方生态环境相关法律法规，保证与上位法符合；技术准则涉及监测、治理、评估等方面规范，保障科学性；流程要求明确公众参与、专家评审等流程环节，确保合法性与透明度；质量把控通过内部审核、第三方评估等机制检验文本完整性与数据精确性<sup>[2]</sup>。

## 二、生态环境管理与咨询项目编写中的合规性问题分析

### （一）项目编写流程中的合规风险表现

前期规划环节易产生政策标准符合误差，例如未全面识别生态保护红线、环境质量标准等规定，导致方案和区域管控政策相悖<sup>[3]</sup>。数据整理阶段存在信息完备性风险，一些项目依靠二手资料，或者未对监测数据开展合规性核查，例如污染源资料未更新到最新规范，或者生态敏感区域调查范围未包括法定区域。在流程衔接方面，策划工作和资料整理工作的脱离，或许会造成数据收集的方向和项目目标不一致。在成果编制环节，要是没有严格根据技术规范执行，比如预测模型的选择不符合导则要求，或者公众参与程序未达到规定的时限，就会直接对成果的合规性产生影响。在技术运用方面，GIS、遥感等手段倘若未经过数据校准以及算法验证，可能会造成评估结果和实际情况出现偏差，进一步放大合规方面的风险。

### （二）影响项目编写合规性的关键因素

管理机制的健全状况直接作用于合规基础，责任界定含混、部门协作欠佳易造成合规落实脱节。专业素养是合规落实的主要，咨询人员对法规准则的理解程度和更新效率，影响着项目撰写是否符合最新政策规定，条款阐释有误或许会造成分类失误或内容遗漏。技术支持体系的完善程度影响合规精确性，若缺少标准化核查工具或数据库的支撑，将会提高人工审核的差错率。审核体系的严密性是合规的最终防线，要是内部审核徒具形式或者外部评审专家专业包括不充分，就难以察觉隐蔽的合规风险<sup>[4]</sup>。这些要素彼此关联，要进行系统分析来清楚优化的方向。

## 三、生态环境管理与咨询项目编写合规性优化路径研究

### （一）完善项目编写管理体系

#### 1. 建立全过程合规管理机制

项目开启阶段要清晰法律法规、行业准则以及地方政策规定，利用合规性审查列表对项目目的、技术路径开展初步评价，保证方向符合合规方案。在编制进程里设立合规管理岗位，其职责为追踪政策的更新情况（例如碳排放核算标准、环评导则的修订），把最新的要求融入技术方案以及数据采集的环节。审查节点

包括初稿、中稿以及终稿环节，引入多部门联合审核机制，针对生态敏感区域保护、污染物限制等主要要点开展交叉核验。全流程管理要通过数字化手段搭建合规数据库以及风险预警体系，实现政策自动推送和内容智能筛选，提高管理效能与精准程度<sup>[5]</sup>。

### 2. 强化项目质量审核与监督机制

搭建三级审查机制，包含项目团队自查、技术部门复审以及外部专家评审，构筑多方面质量管控闭合回路。在进行内容审核时，要根据《建设项目环境影响评价技术导则》等相关规范，对污染物核算办法、生态保护措施等主要内容的合规性展开核查<sup>[6]</sup>。技术根据审查需专注数据源头的权威性和时效性。成果质量监管可引入第三方评价，运用量化打分体系评判报告逻辑严密性与措施可行性，同时建立审核责任追溯机制。通过上述办法降低合规性差异，给环境管理决策提供可靠保障。

### （二）提升项目编写技术支撑能力

#### 1. 优化数据分析与技术应用方法

数据收集应包括污染源监测、生态基础调查等多方面信息，保证数据合法性与代表性<sup>[7]</sup>。开展分析评价需与环评技术导则相结合，通过层次分析法、情景模拟等方式对环境风险进行量化。在技术应用领域，引入GIS、大数据平台等手段提高数据处理效能，帮助合规性核查。优化方向应重点于数据质量管控体系搭建，设立数据追溯与交叉核验流程；加强分析模型和合规标准的匹配度，研发模块化分析工具以减少人为偏差；推进技术应用规范化，把合规性指标融入数据处理与评估环节，建立全流程技术保障体系。

### 2. 推动信息化手段融入项目编写

信息化方式的主要在于运用数字化手段重塑编写进程，实现合规规定的精确落实与动态监管。能够通过搭建标准化模板库、合规性智能校验模块，把《建设项目环境影响评价技术导则》等法规规定转变成可量化的参数，嵌入撰写系统的实时校验步骤，实现从人工审核到智能筛查的转变。通过大数据技术建立的项目数据库能够自动关联同类型项目的合规案例与风险隐患；区块链技术可保障项目数据具有不可篡改的特性，满足信息公开追溯的相关要求<sup>[8]</sup>。数字化管理系统通过权限分级以及流程节点把控，确定各阶段合规责任的主体，建立编写、审核、修改、归档的闭环式管理，让项目编写的整个过程和最新法规实现同步。

## 四、生态环境管理与咨询项目编写优化策略的实施保障

### （一）加强制度建设与标准体系完善

#### 1. 健全项目编写制度规范

生态环境管理及咨询项目编写的优化策略实施保障应以制度建立为核心，通过完善项目编写制度准则来清楚各环节的要求，以此保障实施的规范性和一致性。项目撰写制度需包括整个流程，从初期立项评估，到中期规划编制，再到后期成果提交，都要详细明确操作规范与责任范围。对于各类不同的项目（像环境影响评估、生态修复规划），要拟定有差别的内容方案与技术指



标,保障制度相匹配性。制度需清晰界定编写主体的资质条件、数据来源的合规性审查办法以及成果质量的审核程序,防止因人为操作的不同而造成项目出现偏差。建立动态更新体系,根据政策法规的变动以及行业实践的反馈情况,定时对制度内容加以修订,保证其时效性和科学性。此外制度应配备监督和问责相关条款,针对违反规范之举设定清晰的惩戒办法,加强制度的执行力度。通过上述制度规范的完善,能够确实减少项目编写期间的合规隐患,提高生态环境管理与咨询服务的总体质量<sup>[9]</sup>。

## 2.完善技术标准应用机制

在生态环境管理与咨询项目撰写优化策略的执行保障方面,健全技术标准运用机制是重要环节。技术标准于项目编写时具备核心引领意义,其清晰的指标系统、技术手段与流程准则,可为项目的合规性和科学性提供基础支撑。强化标准施行要建立全流程嵌入体制,在项目立项时期就比照《生态环境咨询服务技术导则》等标准确定编写方案,在数据收集、模型搭建等阶段通过标准化模板规范内容产出,并且引入第三方技术审核步骤,根据标准对主要参数和结论开展合规性核查。在动态优化领域,要建立标准和项目实践的反馈循环,定时收集项目执行过程里的技术难题以及标准适配状况,结合生态环境管理政策的更新和技术发展走向,每隔1-2年安排行业专家对标准予以修订,保证标准的时效性和适用性。另外对于复杂项目里多标准交叉的情形,需建立标准优先级的判定准则,清晰界定不同层级、不同领域标准的适用次序,防止执行出现冲突,加强标准应用的精确性<sup>[10]</sup>。

## (二)强化专业人才培养与团队协同

### 1.提升编写人员专业能力

加强编写人员专业素养要搭建多方面培育体系,关注生态环境管理与咨询项目编写的主要要求。编撰人员要全面熟知生态环境相关法律法规、政策标准以及行业准则,通过定时开展政策阐释会、案例研讨会议,加深对双碳目标、生态保护红线等政策的认识,保证项目编撰符合最新合规规定。在技术应用方面,需加强环境影响评估、碳排放计算、生态修复方案规划等专业技能的训练,引入GIS空间解析、生命周期评估(LCA)等工具的实际操作课程,提高数据处理和模型运用能力。建立导师制和项目复盘机制,让资深专家引领编写人员投身实际项目,通过复盘分析以往项目的合规漏洞以及优化余地,把理论知识转变为实践能力。另外激励编写人员参加行业协会举办的专业认证测试,像注册环境影响评价工程师、碳管理师等,通过资质认证促使专业能力提高,保证项目编写在专业知识、政策领悟和技术运用方面达到行业高水准,为生态环境管理与咨询项目的合规性和质量提供人才保障。

### 2.优化跨领域协同工作模式

专业人才培养需重点于法规、管理准则以及咨询方式的体系化培训,通过案例教学和实践操作来加强多领域知识融合能力。团队协作要建立常态化的交流机制,清晰界定职责范围,通过定

期研讨和任务分解推动信息互通,防止因信息隔阂造成合规方面的漏洞。跨领域协作要破除环境管理、技术咨询和项目管理的领域障碍,在项目前期组建跨职能团队(包括环境工程师、咨询顾问、项目管理人员),一同开展需求分析与合规审查,实现知识深度整合,降低单一视角误区。通过数字化协同平台整合跨领域的的数据资源,实现实时同步和动态调控,保证项目编写进程里合规性与专业性相符合,提高编写质量和实施成效。

## (三)构建持续改进的评价反馈体系

### 1.建立项目编写效果评价机制

生态环境管理及咨询项目撰写优化策略的执行保障需搭建持续完善的评估反馈体系,其中设立项目撰写成效评估机制是主要部分。此机制要围绕合规性、科学性、实用性这三个方面来建立指标体系。合规性指标包含项目内容和生态环境相关法律法规、行业标准的相符程度,像环评文件审批规定、排污许可技术准则等硬性规定的执行状况;科学性指标重点于项目技术方法的合理性,例如环境影响预测模型的适用性、数据来源的可靠性以及论证逻辑的严密性;实用性指标主要关注项目成果对管理决策的支持作用,包括方案可实施性、风险防控措施的有效性等方面。评估机制应运用定量与定性相融合的方法,通过专家评定、管理部门回馈、项目执行后评价等多途径收集数据,建立闭环反馈程序。评估结果要和项目编撰团队的绩效相联系,确定改进的方向和时间限制,促使编撰人员有针对性地完善技术路径、增添合规根据,最终实现项目质量的动态提高,保证生态环境管理与咨询项目既符合政策规定,又能够确实解决实际环境难题。

### 2.推动优化策略动态调整

生态环境管理及咨询项目编写优化策略的执行保障要搭建持续改进的评估反馈系统,此系统应包含项目全流程的多方面指标,例如合规性文件的完备度、技术参数的精准度、政策衔接的贴合度以及实践应用的成效性。通过搭建项目参与主体的周期性反馈体系,搜集项目编写进程里政策更新、技术迭代以及实际施行时暴露的难题,建立结构化的反馈数据仓库。通过此数据库,结合管理需求的动态改变以及技术发展走向,促进优化策略的动态改革。比如对于新颁布的生态环境标准,迅速更新项目编写的技术准则与合规规定;对于实践里察觉的流程繁杂问题,精简编写环节的审批程序,提高项目编写效能。动态调整体系要依靠以数据为驱动的分析模型,对评价指标和优化策略的关联度进行量化,保证调整方向和合规性框架的核心目标相符,提高框架对于政策、技术以及实践变化的适应能力,让优化策略一直符合生态环境管理与咨询项目的现实需求。

## 五、总结

本研究专注生态环境管理与咨询项目编制的合规性框架搭建及优化措施展开,全面梳理项目编写进程中遭遇的合规性难题,清楚



合规性框架的核心方面与主要要点。研究通过分析政策法规规定、技术标准准则以及行业实际需求，搭建包含项目立项、方案规划、内容编写、审核查验等全流程的合规性方案，为项目撰写提供体系化的合规指引。通过此情况，给出优化对策，包括健全项目编写的管理方案，经由明确责任主体、细化流程准则提高管理成效；加强技术保障，运用数字化工具、智能审核体系提高合规性审查的精准

程度和效率；完善保障制度，通过强化人员培训、建立动态更新机制保证合规要求确实落实。这些研究所得不仅为生态环境管理及咨询项目撰写的规范性加强提供理论根据，也为行业实践里规避合规方面的风险、提高项目品质提供可实施的途径，对促进生态环境管理与咨询领域的良性发展具备重要价值。

## 参考文献

---

- [1] 梁欢. 环境咨询服务在环境保护中的运用 [J]. 生态环境保护与修复, 2026, 39(5): 174–176.
- [2] 黎美婷. 环境咨询服务在企业环保合规中的应用策略 [J]. 生态与资源, 2026, (4): 178–180.
- [3] 许强. 环境咨询在企业污染治理与环保责任履行中的作用与优化策略分析 [J]. 皮革制作与环保科技, 2026, 7(5): 194–195+198.
- [4] 季云, 殷碧云, 顾云. 浅谈智能化技术在环境污染监测与环保咨询中的作用 [J]. 皮革制作与环保科技, 2026, 7(1): 43–45.
- [5] 李洪耀. 基于环境咨询服务形式的探讨 [J]. 皮革制作与环保科技, 2023, 4(21): 161–162+168.
- [6] 倪伟. 关于环评报告技术评估的研究 [J]. 皮革制作与环保科技, 2021, 2(4): 104–105.
- [7] 周毅. 环评报告编制质量的常见问题分析 [J]. 环境与发展, 2020, 32(8): 223–224.
- [8] 梁光源. 解读《建设项目环境影响报告书(表)编制监督管理办法》[J]. 环境, 2019, (11): 48–53.
- [9] 生态环境部环境发展中心环境管理研究所——国内领先的环境管理政策研究与治理技术咨询机构 [J]. 中国环境管理, 2019, 11(5): 143.
- [10] 徐福海. 环境影响评价报告质量常见问题及对策建议 [J]. 资源节约与环保, 2018, (8): 123.

# 环境应急下基层生态环境安全风险排查实践思考

吉文锦

扬州市宝应生态环境局，江苏 扬州 225800

DOI:10.61369/EAE.2026040019

**摘 要：** 目前我国处于突发环境事件的高发期，基层生态环境部门应当充分意识到自身所承担的风险防控责任与义务，不断强化自身的风险排查能力，为当地生态环境水平的提升提供全面保障。本文将站在环境应急角度，综合分析基层生态环境安全风险排查现状，在这一基础上构建与之相符的基层场景风险排查框架，保证生态环境安全风险排查工作取得良好成果。

**关 键 词：** 环境应急；基层生态环境；安全风险；风险排查

## Practical Reflection on Grassroots Ecological Environment Safety Risk Investigation under Environmental Emergency

Ji Wenjin

Baoying Ecological Environment Bureau of Yangzhou City, Yangzhou, Jiangsu 225800

**Abstract：** Currently, China is in a high-risk period for sudden environmental incidents. Grassroots ecological and environmental departments should fully realize their risk prevention and control responsibilities and obligations, continuously strengthen their risk assessment capabilities, and provide comprehensive guarantees for the improvement of local ecological and environmental levels. This article will stand from the perspective of environmental emergency response, comprehensively analyze the current situation of grassroots ecological environment security risk investigation, and build a corresponding grassroots scenario risk investigation framework on this basis to ensure that the ecological environment security risk investigation work achieves good results.

**Keywords：** environmental emergency; grassroots ecological environment; security risks; risk investigation

在现代化社会背景下，国家注重工业化发展与城镇化建设，对应的工业污染、极端天气次生灾害，导致突发环境事件时有发生，严重威胁了当地的生态安全与公众健康。为了维系生态环境稳定，实现可持续发展，基层生态环境部门需要从传统的风险排查模式中脱离出来，适应当前环境应急需求，构建科学且完善的基层生态环境安全风险排查体系，保证风险排查覆盖面更加广阔，同时可以精准识别风险，采取有效整改措施，为生态环境安全提供保障。

### 一、基层生态环境安全风险排查理论基础

基层生态环境安全风险排查，主要指向区县、乡镇层级的生态环境管理主体，负责突发环境事件应急处置工作，常态化且系统化的分析辖区内风险源、环境敏感点与应急资源，做好信息采集、风险识别与隐患评估工作。本项工作开展的核心目的在于能够在事故发生前全面掌握风险底数，从而为应急响应的决策与处置提供真实可靠的数据参考<sup>[1]</sup>。

与普通环境监管检查存在不同，环境应急导向下风险排查主要具有以下核心特征：其一为时效性。对于排查到的数据信息，需要保证在发生突发环境事件时可以实时调用，支撑小时级甚至分钟级的应急决策；其二为全面性，在进行调查的过程中，需要全面细致化的调查当地大气、水、土壤与生态等多个环境要素，可以发现常规污染风险与极端天气次生衍生风险。其三为实用

性，所有的排查指标需要精准对接应急处置需求，严禁停留在形式上，从而提升基层生态环境风险排查水平。

### 二、目前基层生态环境安全风险排查现状分析

虽然当前各地基层生态环境部门已经制定了科学且完善的风险排查制度，但是在实际各种中依然存在各种问题。首先，风险排查体系的标准有待统一。大部分基层地区并没有结合当地生态环境制定对应的排查指标，不同检查人员的排查范围、判定的标准存在一定差异化，从而出现“同类隐患不同认定”的情况。一些区域还可能存在排查的盲区，对偏远地区的中小企业、农村饮用水源地与分散式尾矿库的监管不到位，无法及时且全方位的发现潜在的安全风险；其次，职责划分过于模糊。基层生态环境部门岗位职责划分过于模糊，导致工作人员权责未细化落地。环境

安全专员、生产技术员、风险评估师等关键岗位的排查职责缺少清晰的书面化清单，从而在实践工作中可能会出现责任交叉或者责任真空的情况。并且应急管理、工信与交通运输与环境安全相关技术人员之间的协同不到位，无法形成工作合理，导致后续工作出现断层；另外，技术支撑有待更新<sup>[2]</sup>。目前大部分基层站点的应急监测设备配置不充足，在排查的过程中基本都是依靠人工，无法精准且快速识别到隐藏在环境中的风险，并且对于排查中获取的数据，也基本都是通过纸质表格的方式储存，整个工作模式过于落后，无法满足数字化发展需求，在发生突发环境事件后，无法快速调取风险源信息，导致应急处置工作效率受到严重影响。最后，整改机制有待完善。大部分基层生态环境安全风险的排查工作还停留在“发现问题一下发通知”这一层面上，缺少科学且完善的监督整改机制，导致许多排查出来的安全隐患并未得到及时且有效的处理，同类风险反复出现，环境安全问题从没有得到真正的根治<sup>[3]</sup>。

### 三、环境应急下基层生态环境安全风险排查体系的构建

在环境应急背景下，基层生态环境安全风险排查体系的构建需要全面深化“服务实战、全面覆盖、闭环管理”的核心原则，构建“指标体系—实施流程—职责划分—结果应用”的四位一体完整框架，保证及时发现基层辖区内生态环境风险与隐患，快速做出响应，保证生态环境安全。

#### （一）分级分类排查指标体系

基层生态环境部门需要从江苏扬州地区的实际场景出发，制定科学完善的排查指标：其一为风险源排查模块，主要包括了工业企业、施工工地、加油站、污水处理厂等场所，排查重点集中在危险物质存储量、污染防治设施运行、防渗措施落实情况等多个方面，从而可以及时发现威胁生态环境安全的风险源；其二为环境敏感目标排查模块，主要包括了饮用水源地、自然保护区、居民区、学校与医院等关键场所，重点排查等级保护等级、地理位置、人口分布等基础信息，了解当地比较敏感的排查目标；第三为应急能力排查模块，全面且系统化的排查当地辖区内的应急队伍、应急物资储备库、应急监测设备与应急避难场所的分布情况，及时发现当地在应急资源方面存在不足，从而及时的调整与补充<sup>[4]</sup>。

在这一基础上，还需要建立风险分级机制，将排查发现的隐患详细划分成重大风险、较大风险、一般风险三个等级。并且根据风险等级，面对不同的排查对象需要制定差异化的管理。对于重大风险源，每月都需要进入现场排查，对于较大风险源排查间隔时间可以调整为每个季度一次，一般风险源只需要半年排查一次。在极端天气或者重大活动等特殊时间段，可以适当增加排查的次数，保证风险发现更加及时。

#### （二）制定标准化排查工作流程

基层风险排查工作开展分为四个阶段：第一阶段为排查准备阶段，基层工作人员需要提前制定专项工作方案，并且将排查人

员组织到一起，为其提供专业化培训，同时还需要准备好便携监测设备与标准化排查表单，明确本次的排查范围、重点与时间节点等细节信息，为工作开展指明方向；第二阶段为现场实施阶段，生态环境排查需要运用“四不两直”的直查方式，通过现场勘察、快速监测与人员访谈的方式，获取丰富的数据信息，同时还可以通过无人机拍摄的方式，采集现场影像资料，将隐患位置、风险类型与严重程度更加直观的记录下来；第三阶段为风险评估阶段，基层工作人员需要将所有采集到的资料与信息整理归纳到一起，邀请专业技术人员进行分级判定，形成辖区生态环境风险隐患清单；第四阶段为台账更新阶段，工作人员需要将所有排查数据上传到基层生态环境风险数字化管理平台内，保证风险台账动态化更新，从而提升数据的可用性<sup>[5]</sup>。

#### （三）多部门协同职责划分机制

构建覆盖生态环境全岗位、跨部门的责任清单：在生态环境系统内部，排查策略制定与结果审核主要由环境安全主管来负责；现场勘察与报告的撰写则是由环境安全专员来负责；辖区内中小企业初步风险识别由生产技术人员负责。在跨部门协同的背景下，还需要邀请应急管理部门联合参与到安全生产次生环境风险的排查中，邀请水利部门联合进行汛期水环境风险排查等，促使整个排查工作的权责划分更加清晰，同时可以实现高效协同。并且，生态环境部门还需要将工作落实的情况融入到部门与个人绩效考核中，每半年进行一次职责履行情况的审查，保证所有工作人员都能够明确分工，同时端正自身的工作态度。

#### （四）排查结果的闭环应用机制

针对排查所发现的隐患，需要构建科学且完善的整改台账，明确整改责任主体、整改时限与整改要求，保证隐患处理工作能够全面落实。对于重大隐患的治理，可以通过挂牌督办的方式来落实，使生态环境可持续发展；同时，还需要利用排查数据构建基层环境风险预警体系，使其在极端天气、重污染天气等特殊时间段自动触发风险预警，制定对应的防控措施；在隐患整改结束后，还需要委派专业人员进行现场核查、采样检测，只有在验收达到合格标准后才可以进行销号，促使所有排查隐患都能够得到整改<sup>[6]</sup>。

### 四、环境应急下基层生态环境安全风险排查能力提升的有效措施

#### （一）强化基层人才队伍建设

一线排查人员的工作能力与水平将会直接关系到基层生态环境安全风险排查的精准度、响应速度与整改质量。针对扬州基层排查人员能力短板，制定分层分类培训体系，根据不同岗位核心职责、能力缺口精准匹配培训内容，保证所有参训人员的能力都能够得到明显提升。首先对于一线执法人员的培训，内容主要包含了环境法律法规、现场排查实操与在线监控数据分析等，并且还可以列举当地大运河沿线工地裸土覆盖不到位、重污染天气应急期间违规施工等问题进行深入研究，帮助工作人员掌握执法流程，具备良好的隐患识别意识与快速研判能力，在后续工作中

可以精准捕捉风险信号，从被动接警向着主动预警的模式进行转变；对于企业环境管理专员的培训，主要包括了扬州本地排污许可管理要求、污染防治设施日常运维、隐患自查方法的内容，使其明确在违规后将会面临的行政处罚与信用惩戒后果，进而从根源上提升企业生态环境保护责任意识。为了避免培训停在形式上，还需要构建完善的培训效果评估机制，将培训内容转化为实际排查能力。在培训结束后，需要设置考核环节，通过现场实操考核或者案例研讨等方式检验培训的成果，保证学员真正的掌握。

### （二）加大基层应急检测装备投入

补齐扬州地区基层生态环境风险排查短板，为县区一级生态环境站点配备关键硬件支持，促使县区级站点现场快速检测能力显著提升。首先，应当配备便携式有毒有害气体检测仪、水质快速检测设备，同时还需要优化装备适配性，保证所有设备都满足防爆认证的基本要求，并且搭建3.5寸高清彩屏，可以实现声光震动三重报警、4G数据实时上传等功能，满足基层执法人员户外移动作业的习惯，促使整个操作逻辑更加简单，降低设备使用的难度。其次，需要进一步升级现场排查能力。在完成现场排查后，可以现场完成有毒有害气体、特征水质污染物快速定性定量的分析，不需要实验室送检，实现排查即检测。并且在发生涉危化品泄漏、大运河水质异常等突发环境事件后，基层站点可以第一时间在现场而安城污染影响范围的评估，分析污染物扩散的趋势，为后续应急处置决策提供数据支持，降低因为检测效果低下所造成的风险。最后，配套保障机制。对于应急检测装备，需要制定定期校准、年度检定制度。在此期间可以依托扬州本地或者周边仪器校准机构，按照法规要求每半年或者一年完成设备的计

量校准，并且还需要储备一些易损耗的配件，避免设备因故长期闲置。

### （三）数字化排查平台建设

在目前互联网与各种先进技术迅猛发展背景下，扬州地区需要引入大数据、GIS技术，构建基层生态环境风险智慧管理系统，线上完成排查任务派发、隐患整改、风险数据动态更新，优化传统数据分散、流程割裂、更新滞后的痛点，促使基层生态环境风险排查向着智慧化与信息化方向转型与升级<sup>[7]</sup>。在数字化平台背景下，将会打通扬州生态环境局现有的监控、污染源普查与排污许可管理等多源异构数据结口，形成全范围生态环境风险大数据库。管理人员可以在平台上根据辖区的风险分布情况，生成周度、月度排查任务，并且精准派发到基层排查人员身上，对于排查工作开展，系统也会全程记录，实现线上留痕，进而在出现问题后可以追究责任。

## 五、结束语

根据文章叙述，环境应急背景下基层生态环境安全风险排查工作目前已经引起了人们的广泛重视。然而在实际开展排查工作中，基层受到各方面因素的影响，导致排查工作无法顺利开展，对应的排查的精准度与时效性得不到保障。因此江苏扬州地区需要构建科学完善的生态环境安全风险排查体系，在这一基础上完善人才队伍建设，加大应急检测装备投入与数字化排查平台建设，保证排查工作更加高效开展，为筑牢江淮生态大走廊安全防线奠定坚实基础。

## 参考文献

- [1] 落志筠，刘子建. 总体国家安全观视域下外来物种入侵法律防控省思 [J]. 沈阳工业大学学报 (社会科学版), 2025, 18 (5): 573-582.
- [2] 邢芳，易达，赵芮，等. 云南省尾矿库环境风险评估分析与对策措施建议 [J]. 再生资源与循环经济, 2025, 18 (8): 46-50.
- [3] 邢奕鹏. 汛期洪涝灾害次生突发环境事件的风险特征、处置难点及应对策略 [J]. 农业灾害研究, 2025, 15 (8): 263-265.
- [4] 刘军义，祝汉方，史会玉. 乡村化工产业发展中的生态环境安全风险及应对措施 [J]. 农村科学实验, 2025, (14): 40-42.
- [5] 张晓鹏，施晓宁，曹伟伟. 生态环境监测工作的安全风险及防控措施 [J]. 清洗世界, 2025, 41 (7): 196-198.
- [6] 赵富利. 生态环境监测工作的安全风险及防控措施 [J]. 黑龙江环境通报, 2024, 37 (10): 78-80.
- [7] 陈亮，胡馨匀. 生态环境法典编纂视阈下生态安全风险的法治化应对 [J]. 中南林业科技大学学报 (社会科学版), 2024, 18 (3): 59-69.



# 积云对流参数化方案对厄尔尼诺背景下对流层——平流层 ENSO 温度信号模拟的影响

于超越, 关浩, 王婷

民航吉林空管分局, 吉林 长春 130000

DOI:10.61369/EAE.2026040022

**摘 要 :** 当前全球处于厄尔尼诺活跃周期, 厄尔尼诺通过海气耦合与对流层-平流层相互作用引发全球大范围温度异常, 提升气候模式对 ENSO 温度信号的模拟能力是季节气候预测的核心前提。为厘清积云对流参数化方案对对流层、平流层 ENSO 温度异常模拟的调控机理, 基于 SAMIL 全球大气环流模式, 分别采用 MNB、TDK 两套积云对流参数化方案开展数值敏感性试验, 结合 GPCP、CMAP 降水资料与多源大气再分析资料, 对比两类方案在厄尔尼诺气候背景下的模拟差异并开展偏差归因。

**关 键 词 :** 厄尔尼诺; 积云对流参数化; SAMIL 模式; 对流层-平流层相互作用; ENSO 温度信号; 模拟偏差

## The Influence of Cumulus Convection Parameterization Scheme on Simulating Tropospheric Stratospheric ENSO Temperature Signals under El Niño Background

Yu Chaoyue, Guan Hao, Wang Ting

Civil Aviation Jilin Air Traffic Control Branch, Changchun, Jilin 130000

**Abstract :** Currently, the world is in an active El Niño cycle, which triggers large-scale temperature anomalies worldwide through the coupling of air sea and the interaction between the troposphere and stratosphere. Improving the simulation ability of climate models for ENSO temperature signals is the core prerequisite for seasonal climate prediction. To clarify the regulatory mechanism of cumulus convection parameterization schemes for simulating ENSO temperature anomalies in the troposphere and stratosphere, numerical sensitivity experiments were conducted using two sets of cumulus convection parameterization schemes, MNB and TDK, based on the SAMIL global atmospheric circulation model. Combined with GPCP and CMAP precipitation data and multi-source atmospheric reanalysis data, the simulation differences between the two schemes under El Niño climate background were compared and bias attribution was carried out.

**Keywords :** El Niño; Parameterization of cumulus convection; SAMIL mode; Tropospheric stratospheric interaction; ENSO temperature signal; simulation deviation

### 引言

厄尔尼诺-南方涛动 (ENSO) 是热带太平洋最强的年际海气振荡模态, 厄尔尼诺事件发生时, 赤道中东太平洋海表温度 (SST) 异常偏高, 通过海气热量、水汽交换激发强烈热带对流, 不仅造成全球热带区域旱涝格局反转, 还通过遥相关波列、经圈环流调整、对流层-平流层波流相互作用, 引发全球对流层高低纬、平流层整层温度异常 (黄荣辉等, 2016)。平流层温度异常存在显著的季节内、季节尺度下传效应, 可反向调制对流层环流, 是中高纬冬季寒潮、持续性极端雨雪过程的重要前兆信号 (平流层-对流层相互作用研究课题组, 2022)。当前厄尔尼诺持续发展, 全球极端气候事件频发, 客观评估气候模式对厄尔尼诺背景下全球温度异常的模拟能力, 订正模式系统性偏差, 具有重要的业务预报价值。

全球大气环流模式 (AGCM) 是复现、预判厄尔尼诺气候效应的核心工具, 次网格积云对流活动无法通过模式网格直接解析, 必须依靠积云对流参数化方案进行表征。积云对流参数化直接决定热带对流强度、凝结潜热释放、对流层顶高度、穿透性对流发展程度, 是连接热带海温强迫与全球大气温度异常的核心中间过程 (李建平等, 2018)。在当前厄尔尼诺背景下, 系统对比不同积云对流参数化方案下对流层、平流层 ENSO 温度信号模拟差异, 厘清偏差形成机理, 能够为模式参数优选、系统性偏差订正提供直接支撑。

作者简介: 于超越 (1986.09-) 女, 汉族, 吉林白城人, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 航空气象预报、安全管理。

## 一、研究内容与技术路线

本文以 SAMIL 全球大气环流模式为试验平台，设置 MNB、TDK 两组积云对流参数化敏感性试验，依托 GPCP、CMAP 两套全球降水观测资料与大气再分析资料，开展三项核心研究：（1）定量对比两套参数化方案对流层、平流层 ENSO 温度信号的模拟差异；（2）完整梳理厄尔尼诺驱动对流层—平流层温度异常的动力物理机制；（3）阐明积云对流参数化的调控路径，归因模式共性系统性偏差。

技术路线：模式敏感性试验设计→温度场、环流场、降水场空间分布与纬向平均对比→ENSO 温度异常动力机制诊断→参数化方案调控机理分析→模拟偏差归因→结论与模式优化启示。

## 二、试验方案、模式与资料方法

### （一）SAMIL 模式简介

本文采用中国科学院大气物理研究所研发的 SAMIL 全球大气环流模式，模式具备完整的对流层—平流层垂直框架，可完整刻画积云对流、Hadley 环流、西风急流、行星波上传等关键过程，在东亚季风、热带太平洋海气振荡、对流层平流层相互作用模拟中得到广泛应用。相较于传统 AMIP 模式，SAMIL 模式对 ENSO 型海温外强迫的响应敏感度更高，更适用于厄尔尼诺气候效应模拟研究（周天军等，2019）。

### （二）数值试验设计

两组试验采用相同的模式分辨率、辐射方案、边界层方案、陆面过程方案，仅更换积云对流参数化方案，下边界统一采用厄尔尼诺观测海表温度作为外强迫，积分时段覆盖厄尔尼诺冬季（12月—次年2月），保证 ENSO 大气响应充分发展。

试验1（MNB试验）：采用 MNB 积云对流参数化方案，优先表征边界层浅对流、层积云凝结与局地小尺度对流；

试验2（TDK试验）：采用 TDK 积云对流参数化方案，优化热带深对流、穿透性对流参数化过程，放宽深对流触发条件。

### （三）观测与再分析资料

（1）大气再分析资料：全球多源再分析数据集，用于校验对流层（850 hPa、700 hPa、300 hPa）、平流层低层（100~200 hPa）温度异常、纬向环流、经圈环流、西风急流的模拟效果；

（2）降水观测资料：GPCP、CMAP 两套全球逐月降水数据集，规避单一观测资料不确定性，校验热带对流降水与凝结潜热释放模拟偏差；

（3）对流层顶表征：以 300 hPa 温度场表征热带对流层顶高度，300 hPa 温度偏高对应对流层顶抬升、对流活动增强。

### （四）分析方法

采用合成分析法，合成 El Niño 减去 La Niña 的温度、环流、降水异常场，表征标准化 ENSO 信号；通过空间场合成图、纬向平均高度—纬度剖面图对比模拟差异；基于绝热冷却原理、Kelvin 波东传理论、Hadley 环流动力学开展物理机制诊断。

## 三、结果分析

### （一）两套参数化方案 ENSO 温度信号整体模拟差异

整体来看（图1），SAMIL 两组试验对厄尔尼诺海温异常的响应强度显著优于 AMIP 模式，温度异常空间分布与再分析资料一致性较好，但两套方案存在显著区域分异。从赤道区域 T300 时序变化能够看出，对流层顶高度年际演变和 ENSO 冷暖事件高度对应，TDK 方案对流层顶抬升幅度整体高于 MNB 方案，体现出二者热带对流模拟强度的固有差异。

对流层层面：高纬度对流层区域 TDK 方案模拟效果较 MNB 方案改进明显；北半球副热带纬向平均温度场上，TDK 方案模拟的冷异常振幅更大，整体温度较 MNB 方案偏冷；两组试验在全球热带对流层均表现出一致的系统性偏暖特征。

平流层层面：TDK 方案对热带对流层顶抬升的模拟显著强于 MNB 方案，穿透性对流向上输送冷空气效率更高，最终表现为平流层低层 ENSO 冷信号模拟明显偏强；MNB 方案对流层顶高度更贴近观测结果，平流层温度异常振幅更为适中。

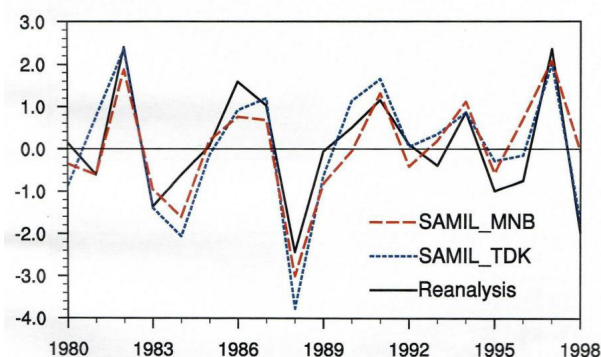


图1 冬季平均赤道东太平洋地区（10° S–10° N，120° W）T300的时间序列

### （二）厄尔尼诺驱动对流层—平流层温度异常的完整物理机制

厄尔尼诺期间赤道中东太平洋 SST 异常偏高是全球大气温度异常的初始强迫，温度异常由热带对流层向副热带、中高纬对流层、平流层逐层传导，分为三个完整过程（图2）。

第一，热带对流层整体增暖。赤道中东太平洋海温偏高加剧海气蒸发，赤道辐合带水汽辐合显著增强，旺盛积云对流释放大质量凝结潜热，成为热带大气最主要的加热热源；热带暖异常激发赤道 Kelvin 波，沿赤道快速向东西两侧传播，实现全球热带对流层同步增暖（Graham，1995）。

第二，副热带与中纬度对流层降温。热带大范围加热导致 Hadley 环流形态收缩、经向跨度减小，扰动激发异常经圈环流；在南北半球副热带地区形成大范围异常上升运动，空气上升过程绝热膨胀冷却，绝热冷却效应超过短波加热，造成副热带、中纬度对流层温度显著降低。剖面图直观体现出 TDK 方案模拟的副热带上升运动强度高于 MNB 方案，绝热冷却更强，对应副热带冷偏差更突出。

第三，平流层低层形成冷异常。对流层顶上下大气温度垂直递减率发生反转，热带强穿透对流突破对流层顶，将对流层上层

干冷空气向上输送至平流层低层，冷空气持续堆积形成平流层大范围冷异常；对流层顶抬升幅度越大，冷空气上传通量越高，平流层低层冷异常越强。

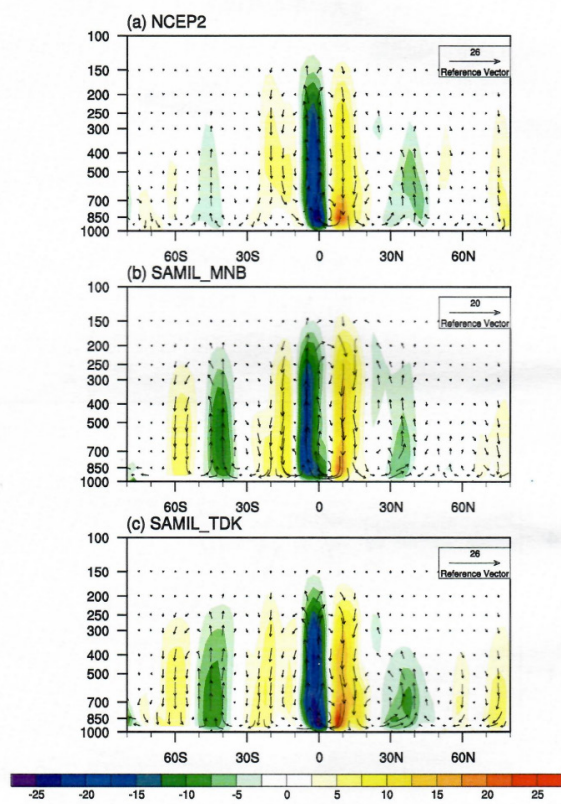


图2 根据 ENSO 事件合成的冬季经向平均垂直速度（单位： $10^{-3}\text{Pas}^{-1}$ ，阴影）与经圈环流异常（经向风，单位： $\text{ms}^{-1}$ ，经向平均垂直速度，单位： $10^{-3}\text{Pas}^{-1}$ ，矢量）的高度-纬度剖面图

### （三）积云对流参数化方案的双重调控机制

积云对流参数化方案是衔接海温外强迫与大气温度异常的核心物理过程，从对流层、平流层两个圈层形成双重调控路径，高层 200hPa 西风急流分布可直观佐证环流调控机理。

对流层调控路径：参数化方案决定热带对流触发阈值、对流强度与总潜热释放量，同时调制中纬度西风急流强度、副热带异常上升运动幅度，直接决定副热带对流层温度冷异常的模拟精度。TDK 方案深对流触发阈值更低，更容易激发副热带异常上升运动，绝热冷却作用更强，因此北半球副热带对流层温度模拟整体偏冷。

平流层调控路径：两类方案对穿透性对流的表征能力存在本

质差异，直接造成热带对流层顶高度模拟分歧。TDK 方案下赤道西太平洋、拉丁美洲、非洲中部、邻近印度洋等区域对流层顶高度模拟偏高、对流活动偏强，冷空气向平流层低层输送更多，最终导致平流层 ENSO 冷信号模拟偏强。

### （四）模式共性系统性偏差及成因解析

两套积云对流参数化试验存在两类共性偏差，无法通过调整积云对流参数化方案完全消除。

其一，热带对流层普遍模拟偏暖。两套方案均显著高估厄尔尼诺冬季赤道中东太平洋降水强度，对流凝结潜热释放总量高于观测值，持续对热带对流层施加异常加热，形成稳定的热带对流层偏暖偏差。

其二，南半球副热带对流层温度显著偏冷。模式扰动激发的异常经圈环流在南半球副热带上升运动整体偏强，绝热冷却过度引发区域性冷异常；相关性检验表明，该冷偏差与 MNB、TDK 两套积云对流参数化方案关联性较弱，说明偏差并非由积云对流单一过程主导，而是 SAMIL 模式动力框架、边界层参数化、长波辐射方案、地形强迫等多物理过程耦合的综合结果。

## 四、结论

（1）厄尔尼诺气候背景下，SAMIL 模式对 ENSO 海温异常的整体模拟能力优于传统 AMIP 模式；对流层高纬区域 TDK 方案模拟效果更优，北半球副热带纬向平均温度 TDK 方案模拟偏冷，平流层低层 TDK 方案模拟的 ENSO 冷信号振幅显著大于 MNB 方案。

（2）厄尔尼诺通过三级动力过程调制全球温度场：赤道海温异常驱动热带对流潜热释放引发热带对流层增暖；Hadley 环流收缩激发副热带异常上升运动，绝热冷却造成中纬度对流层降温；热带穿透对流向上输送冷空气，在平流层低层形成大范围冷异常。

（3）积云对流参数化方案是影响对流层—平流层 ENSO 温度信号模拟的关键物理过程，一方面通过调控西风急流、副热带异常上升运动改变对流层温度异常分布，另一方面通过改变热带对流层顶高度，调控平流层低层 ENSO 温度异常强度。

（4）模式存在热带对流层偏暖、南半球副热带对流层偏冷的共性系统性偏差；热带偏暖源于赤道中东太平洋降水与潜热释放模拟高估，南半球副热带冷偏差受模式整体物理框架多因子协同控制，仅依靠优化积云对流参数化无法实现完全订正。

## 参考文献

- [1] Graham N E. Simulation of El Niño–Southern Oscillation with a global atmospheric general circulation model[J]. Journal of Climate, 1995, 8(10): 2321–2339.
- [2] 周天军, 吴统文, 宇如聪, 等. SAMIL 大气环流模式研发与应用进展 [J]. 大气科学, 2019, 43(01): 1–22.
- [3] 黄荣辉, 陈文. 厄尔尼诺 / 南方涛动 (ENSO) 对全球气候异常的影响及其机理 [J]. 中国科学: 地球科学, 2016, 46(01): 1–16.
- [4] 李建平, 罗勇. 积云对流参数化方案对 ENSO 模拟影响的综述 [J]. 气象学报, 2018, 76(03): 321–336.
- [5] 平流层—对流层相互作用研究课题组. 厄尔尼诺影响平流层环流的动力机制 [J]. 高原气象, 2022, 41(02): 289–301.



# 《国家公园法》实施下生态保护与土地权利平衡的冲突与调适

祝如怡

浙江农林大学, 浙江 杭州 311300

DOI:10.61369/EAE.2026040024

**摘 要 :** 2026年1月1日,《中华人民共和国国家公园法》正式施行,我国国家公园建设迈入了法治化、规范化的新阶段。生态保护与土地权利的关系的协调因此具备了基本的法治框架,但在法律适用过程中,传导机制缺失、跨区域协调不足、社区利益冲突等结构性矛盾突出,难以满足实际治理的需求。究其根本,在于《国家公园法》存在法条原则性过强、权利保障条款模糊、关键制度空白等立法冲突,使其难以有效化解生态保护刚性要求与土地权利主体合法诉求之间的冲突。基于《国家公园法》实施这一时代背景下,本文立足《国家公园法》的实施现状,剖析生态保护与土地权利平衡的法律适用痛点,深挖根源性制度冲突,提出针对性的制度完善路径,助力破解生态保护与民生保障的双重难题,推动国家公园法治体系实现高质量发展。

**关 键 词 :** 国家公园法; 生态保护; 土地权利; 法律适用; 制度完善

## The Conflict and Adjustment between Ecological Protection and Land Rights Balance under the Implementation of the "National Park Law"

Zhu Ruyi

Zhejiang A & F University, Hangzhou, Zhejiang 311300

**Abstract :** On January 1, 2026, the "National Park Law of the People's Republic of China" came into effect, marking a new stage of legalization and standardization in the construction of national parks in China. The coordination of the relationship between ecological protection and land rights thus has a basic legal framework. However, in the process of legal application, structural contradictions such as the lack of transmission mechanisms, insufficient cross-regional coordination, and conflicts of community interests are prominent, making it difficult to meet the needs of actual governance. The root cause lies in the legislative conflicts in the "National Park Law", such as overly principle-based legal provisions, ambiguous rights protection clauses, and blank key systems, which make it difficult to effectively resolve the conflicts between the rigid requirements of ecological protection and the legitimate demands of land rights holders. Based on the implementation of the "National Park Law" in this era, this paper, based on the current implementation status of the "National Park Law", analyzes the legal application pain points of balancing ecological protection and land rights, delves into the root institutional conflicts, and proposes targeted institutional improvement paths to help solve the dual problems of ecological protection and livelihood security, and promote the high-quality development of the national park legal system.

**Keywords :** "National Park Law"; ecological protection; land rights; legal application; institutional improvement

### 引言

国家公园是国家生态安全屏障的基本骨架,在我国自然保护地体系中起到最突出的作用。<sup>[1]</sup>2026年1月1日,《中华人民共和国国家公园法》(以下简称《国家公园法》)正式施行,作为我国首部国家公园领域的专门立法,其以立法形式固化了国家公园体制改革成果,坚持自然生态系统原真性和完整性保护的首要任务,明确生态保护与民生改善相统一的立法目标,改变了国家公园建设过程中无法可依的局面,为调和公众与土地权利人之间的利益矛盾提供了根本遵循。

基金项目:浙江省大学生科技活动计划暨新苗人才计划资助项目(2025R412A036)。



但从现实来看,我国国家公园范围内的土地权属复杂,所涉及的土地不都是全民所有的国有土地,还包含了宅基地、自留地、自留山等集体所有土地;土地权利主体多元,包括政府、集体经济组织、原住民、企业等多方人员。可见,在生态保护要求下,国家公园限制土地利用的要求与权利主体追求其自身合法权益的诉求之间始终存在着天然的张力。其中,钱江源、武夷山和南山国家公园试点区的集体土地占比分别为 79.6%、71.3%和 58.5%,属于典型的人多地少、权属复杂区域,对应表现尤为激烈。<sup>[2]</sup>如果土地权属争议、生态补偿失衡、权利救济不畅等各种问题继续顽固存在,不仅原住民、集体经济组织、承包农户等土地权利主体的合法权益会收到损害,更会制约国家公园生态保护目标的实现,影响国家公园的治理效能与全社会的稳定。

## 一、《国家公园法》在生态保护与土地权利平衡中的冲突

生态保护与原住民土地权利维护之间的矛盾,成因错综复杂。但究其根本,在于作为国家公园领域基础性上位法的《国家公园法》存在着一定冲突。一方面,立法秉持着“生态优先”的价值导向,侧重生态保护的刚性需求,对土地权利主体的合法私益考量不足;另一方面,立法缺乏精细化、实操化设计,大量核心条款只停留在原则性倡导层面,法律适用无据,行政执法无依;其次,在关于生态保护与土地权利平衡过程中的一些高发问题,其关键制度存在着一定的立法空白,无法全面回应现实治理需求。要想实现国家公园的长远可持续发展,解决生态保护与权益维护之间的难题,必须首先破除《国家公园法》自身立法冲突这一根源性问题。

### (一) 立法价值忽视公共利益与私人权益的平衡

《国家公园法》第一章中明确规定“坚持生态保护第一、统筹保护和发展”,实现生态保护、绿色发展、民生改善相统一。该立法目的为真正实现立法的价值目标提供明确指引。<sup>[3]</sup>但该立法价值过度侧重于生态保护的刚性需求,弱化了保护和发展之间的统筹关系,未能构建起公共利益与私人权益协同平衡的规范体系,忽视了两者之间的协调问题。据统计,该法“社会公益型”条款占比 46.7%、“国家公益型”条款占比 37.69%、而“个人公益型”条款占比仅 12.28%<sup>[4]</sup>。其中,法条多侧重于国家公园的保护与管理、保障与监督,生态破坏的法律责任等方面,对集体土地所有权、土地承包经营权、宅基地使用权等私人土地权利的保障条款则较少,并不能满足相应权利人的需要,且极易加剧生态保护与土地权利之间的对立,影响生态保护公共利益的实现。

### (二) 法律规范过于原则化缺乏实施细则

《国家公园法》作为国家公园领域的基础性立法,其法律规范多呈现原则化特征,缺乏具体明确的实施细则。只从维护生态保护与土地权利平衡的角度来看,在“明晰财产权”“保障权利人合法权益”以及“建立生态补偿机制”等事项上,法律仅做了原则性规定,对关键事项并未作出细化规制。如法条规定国家公园原住民的活动不能超出“现有规模和利用强度”,但这一标准不仅无法帮助双方界定土地权利行使的范围,更是不合理地限制了国家公园内原住民的发展权,使其难以寻求更广阔的发展空间;其次,《国家公园法》第四十七条明确写明“国家健全‘生态补偿机制’”但却并未对与生态补偿有关的具体要求作出规定,如生态补偿的主体、来源、其标准的核算依据、支付方式与动态调整机制等。这种粗线条的立法模式,无法为基层执法与司法裁判提供明确的参考依据,难以实现平衡土地权利的立法目标。

### (三) 关键制度存在立法空白无法全面回应现实治理需求

从目前国家公园日常生态管护工作来看,在严守生态保护红线、统筹园内土地权属、保障相关主体合法权益的治理工作当中,各类现实矛盾问题始终凸显。无论是国家公园内的历史遗留权属重叠、跨区域纠纷、新旧凭证冲突问题,还是生态补偿失衡、权利救济缺位,乃至跨省域公园的特殊管理这样的难题<sup>[5]</sup>,《国家公园法》尚未作出有针对性的立法安排,无法以正规的法治化途径化解难题,存在明显的制度空白。现阶段的法律,仅为宏观的生态保护框架搭建起基础规范,却并未针对实际操作中的疑难痛点给出实用的专项细化条款。现有的相关法治配套制度尚不能完全贴合现实情况,基础兜底管控的保障能力明显不足,无法适配我国国家公园精细化、常态化的综合治理需求,回应现实治理需求。

## 二、破解《国家公园法》法律冲突的调适

### (一) 矫正立法价值使其落实“统筹保护和发展”的宗旨

立法价值是在立法过程中需方依据一定的衡量标准同供方发生的需求关系,“它表现为立法主体通过立法活动所要追求实现的道德准则和利益”<sup>[6]</sup>。现行国家公园立法过度侧重生态保护价值需求,而该偏向的根源则在于对“生态保护第一”原则的机械理解,其将生态保护与权益保障简单的对立起来,反而忽视了二者在根本目标上的一致性,弱化了“统筹保护和发展”这一价值取向。要破解这一价值偏差,不宜通过频繁修改《国家公园法》主干法律条文,而应将优化重心放在专项实施细则与配套管理办法等下位规范层面上,全程严格对标并贴合《国家公园法》“统筹保护和发展”这一核心立法宗旨,在层级化专项规范体系中,把立法原则逐项细化、拆解,直至落地。其中,依托国家级专项实施条例,夯实细化国家公园内私人合法土地权属常态化保障的完整制度框架,划定权责边界,明确底线要求;再同步联动各地主管部门出台专项配套办法,规定具体的操作流程、统一量化执行标准,将立法原则贯穿于国家公园配套制度设计、落地与执行的全过程。

同时,在法律实施层面,建立起“生态保护成效与权益保障情况并重”的双重考核导向,将原住民合法权益的实际保障成效纳入国家公园建设成效的评价体系之中,将其列为基层管护履职、属地部门工作评优的硬性评价指标。通过指向性考核倒逼执法队伍转变思路,摒弃“重保护、轻权益”的片面履职模式,主动寻求生态保护与民生权益保障之间的平衡。前后两期双向发力,真正使得“兼顾保护与发展”这一立法理念从文本走向实践、从原则走向行动,切实保障《国家公园法》的核心立法宗旨贯穿于国家公园治理的每一个环节之中。

## （二）以层级化立法助力原则性规定实现可操作可执行

我国《国家公园法》共七十二条，其中，涉及权益保障、生态补偿机制等核心制度的条款多为授权性、宣示性规定，难以为基层执法提供准确参考。想要破解法律条文过于原则化的现实困境，可以通过构建“法律+实施条例+专项配套办法”的三级规范体系，切实提升制度的可操作性与可执行性。首先，严格遵循“中央层面立法定原则、主管部门细化实操细则、地方补充特色管控规则”的分层立法思路。一方面，由国务院牵头加快制定《国家公园法实施条例》，针对现行法律中表述模糊、边界不清、缺乏实操效果的原则性条款，开展集中统一的细化。如关于生态补偿问题，重点完善国家公园生态保护补偿机制，明确补偿标准的核算依据、支付主体、给付时限、保障渠道等，建立按年动态调整的法定机制，杜绝补偿随意性<sup>[7]</sup>；在土地纠纷问题上，系统厘清国家公园范围内国有土地、集体连片林地、原住民宅基地等各类地块的权属认定标准，明确历史遗留权属重叠、新旧产权凭证冲突、跨界土地边界争议等问题的统一处置流程，彻底解决基层管护中土地权属认定无标准、纠纷处置无依据的突出问题。

另一方面，国家公园主管部门应当针对园内关键治理事项，分类出台专项配套管理办法。以原住民合法权益保障为例，主管部门可以通过专门编制《国家公园原住民权益保障办法》，把法律主干中笼统表述的“保障权利人合法权益”的原则性要求，拆解转化为可明确、可落地的具象权利清单，包括生产参与权、园区事务知情权、生态管护收益共享权、矛盾纠纷全程救济权等实际内容，直白明确展示原住民应享有的权利。

在此基础上，进一步通过地方补充特色管控规则。各地方国家公园可以结合其辖区内的资源禀赋差异、原生村落分布情况以及生产生活习惯等等，在不违背上位法统一规定的前提下，因地制宜出台属地管护实施细则，弥补统一制度难以完全适配各个区域的缺陷。通过这样层级分明、上下联动的规范体系建设，让法律原有的笼统规定，落实到园区管护、权属划分、权益保障以及生态治理等全流程的具体工作中，形成清晰可依的执行准则。

## （三）通过法律修订与专项制度回应高发难题

针对当前国家公园现实治理场景中所展现出来的的各类问题，应首先关注国家公园管控实施过程中的高发难题，坚持以问题为导向，通过“法律修订+专项制度补位”补齐立法空白，全面回应实务需求。严格秉持“问题出在哪里，制度就补到哪里”

的工作原则，在精准对标现实高频难题的同时补齐专项条款。例如针对国家公园内高发的土地权属争议问题，专项增设适配国家公园的土地权属争议解决制度，统一规定处理标准，明确国家公园内历史权属重叠、凭证冲突等陈年疑难问题的标准化处理程序，规范确权登记、行政调解、司法裁判等解决问题的机制，厘清产权归属，从源头解决问题；在关于跨省域公园的特殊管理难题方面，专门建立起跨区域国家公园的法律协同制度，明文敲定跨省域国家公园的管理主体、权责划分以及纠纷管辖规则等待落实内容，破除属地管理割裂的阻碍。除此之外，还应加快建立起专门适配国家公园使用场景的特殊救济法律体系，为原住民与周边群众个人合法权益受损问题提供有效的法治解决路径，细化关于生态补偿核算给付纠纷、违规强制管控产生的侵权行为等问题的裁量处置细则，全方位补齐法治空白，满足国家公园治理现代化的综合需求。

## 三、结语

国家公园作为我国生态文明制度建设的先行示范区，其空间用途管制不仅关系生态保护成效，也影响国土空间治理能力的现代化水平。当前，我国国家公园体制建设已进入深化阶段，国家公园作为国土空间治理的重要生态空间，承担着生态保护、资源利用与公众游憩等多重功能，实践中却面临法律体系不健全、传导机制缺失、工具体系单一、跨区域协调不足、社区利益冲突等结构性矛盾，难以满足多样化生态治理需求<sup>[8]</sup>。2026年，《国家公园法》的正式实施，为我国国家公园法治化建设筑牢了坚实的制度根基，也为统筹推进生态保护与土地权利保障方面提供了重要的法治遵循。但从客观来看，立法价值失衡、条文表述过于原则化、关键制度存在空白等立法冲突，仍然会带来法律适用不畅、权属纠纷多发、原住民权益保障不足等现实困境，制约国家公园治理效能的进一步提升。唯有从根源上纠偏立法价值取向、细化配套法律规范体系、回应高发难题，才能真正维持生态公共利益与私人土地权益之间的良性平衡。未来，应持续完善国家公园法治体系，不断优化制度，在守住生态安全红线的同时不忘切实保障群众的合法土地权益，以法治建设推动国家公园体系行稳致远，助力生态文明建设在新时代实现更高质量的发展。

## 参考文献

- [1]唐小平,栾晓峰.构建以国家公园为主体的自然保护地体系[J].林业资源管理,2017,(06):1-8.DOI:10.13466/j.cnki.lyzygl.2017.06.001.
- [2]黄宝荣,王毅,苏利阳,等.我国国家公园体制试点的进展、问题与对策建议[J].中国科学院院刊,2018,33(1):76-85.
- [3]吕忠梅,唐丽云.《国家公园法》解析:基石概念、立法目的与基本原则[J].中国人口·资源与环境,2026,36(02):15-23.
- [4]李亮.《国家公园法》的权益结构及其完善[J].国家公园(中英文),2025,3(09):587-594.DOI:10.20152/j.np.202507250093.
- [5]李朝阳.我国自然保护区范围内集体土地权益保障研究[D].中南林业科技大学,2021.DOI:10.27662/d.cnki.gznlc.2021.000216.
- [6]汤善鹏.立法价值衡量的法理分析[J].河南大学学报(社会科学版),2002,(02):25-28.DOI:10.15991/j.cnki.411028.2002.02.009.
- [7]李治.国家公园生态保护补偿法律制度研究[D].兰州大学,2025.
- [8]潘维琪,吴承照.国家公园空间用途管制的国际经验与启示[J/OL].中国园林,1-10[2026-04-27].https://link.cnki.net/urlid/11.2165.tu.20251104.1652.002.

# 基于珠峰区域北斗探空与 L 波段探空数据对比分析

格桑次旺<sup>1</sup>, 达确<sup>1</sup>, 旦增伦珠<sup>2</sup>, 久美南加<sup>1</sup>

1. 西藏自治区日喀则市定日县气象局, 西藏 定日 858200

2. 西藏自治区气象局, 西藏 拉萨 850000

DOI:10.61369/EAE.2026040025

**摘 要 :** 为掌握高空探测资料观测精度, 科学评估北斗探空系统在高空气象探测中的业务适用性, 本文选取2025年1–7月定日县高空观测站北斗探空与 L 波段探空同步观测资料, 综合运用偏差分析、Pearson 相关分析等方法, 对比分析两种探测方式下在各规定等压面的温度、风速、风向等数据差异, 结果表明: 北斗导航探空系统与 L 波段探空系统温度、风速数据一致性较高, 对应 Pearson 相关系数分别为0.999714、0.9791, 风向 Pearson 相关系数为0.8598。两套探测系统温度一致性最优, 风速次之, 而风向相关性较弱。相较于传统 L 波段探空, 北斗卫星导航探空系统抗干扰能力突出, 在复杂气候条件、复杂地形地貌之下探测稳定性与数据可靠性更优, 可满足定日县高空气象业务需求, 为定日县乃至藏西高原区高空气象观测提供强有力的数据支撑。

**关 键 词 :** 北斗探空; L 波段探空; 数据; 差异; 定日县

## Based on the Beidou Sounding Data And L-Band Sounding Data from the Everest Region comparative Analysis

Gesang Ciwang<sup>1</sup>, Da Que<sup>1</sup>, Danzeng Lunzhu<sup>2</sup>, Jumei Nanjia<sup>1</sup>

1. Meteorological Bureau of Dingri County, Shigatse City, Xizang Autonomous Region, Dingri, Xizang 858200

2. Xizang Autonomous Region Meteorological Bureau, Lasa, Xizang 850000

**Abstract :** To understand the observation accuracy of high-altitude detection data and scientifically evaluate the operational applicability of the Beidou sounding system in high-altitude meteorological detection, this paper selects the synchronous sounding data of Beidou sounding and L-band sounding at Dingzhen County High-altitude Observation Station from January to July in 2025. By comprehensively applying deviation analysis and Pearson correlation analysis methods, the differences in temperature, wind speed, wind direction and other data on each prescribed isobaric surface under the two detection methods are compared and analyzed. The results show that the temperature and wind speed data of the Beidou navigation sounding system and the L-band sounding system are highly consistent, with corresponding Pearson correlation coefficients of 0.999714 and 0.9791, and the Pearson correlation coefficient of wind direction is 0.8598. The temperature consistency of the two detection systems is the best, followed by wind speed, while the correlation of wind direction is relatively weak. Compared with the traditional L-band sounding, the Beidou satellite navigation sounding system has outstanding anti-interference ability.

**Keywords :** Beidou sounding; L-band sounding; data; difference; Dingri County

### 引言

21 世纪以来, 随着科学技术的突飞猛进, 各种现代化技术手段在大气探测领域得以广泛应用, 助力大气探测效率与质量实现了显著提升。北斗卫星导航探空即为其中之一, 并凭借其高精度定位、高可靠性、高稳定性、全球覆盖等优势, 逐渐发展成为高空气象探测的重要技术手段。该系统由地面系统和探空仪构成, 探空仪可通过气象气球携带, 以自由升空方式获取地球表面至几万米高度空间内温度、湿度、风向、风速、气压等气象信息, 为气象预报精准性等提供强有力的数据支撑<sup>[1]</sup>。当前, 国内外不少专家与学者针对北斗卫星导航探测开展了大量研究工作, 其中赵世军<sup>[2]</sup>等指出北斗高空探测系统可精准测量高空风向风速, 满足气象业务所需; 祁小娟<sup>[3]</sup>等指出北斗定位技术在提高轨迹监测精准度、达到实时追踪、增强数据传输可靠性等方面成效显著。

L 波段探空雷达作为我国气象业务当中广泛应用的常规探测设备, 通过携带无线电探空仪升空, 可直接测量不同高度层的温、压、

项目名称: L 波段雷达与北斗探空数据质量对比分析 (rkzqxj202504) 2025 年日喀则市气象局局设科研项目资助。

作者简介: 格桑次旺 (1993.05) 男, 藏族, 西藏拉萨, 本科学历, 工程师, 研究方向: 综合气象观测。



湿、风等气象要素，其权威性与参考价值较高。沈晔<sup>[4]</sup>等对比分析同一高度北斗测风与雷达测风数据，得出两者所测空中风的变化趋势与幅度大体一致；林彩艳<sup>[5]</sup>等对比延安观测站北斗导航与 L 波段探空数据，发现两者温度、海拔、风向、风速的差值较小，相关性高，其中北斗卫星导航系统探测性能较好。

定日县（86°20′~87°70′E，27°80′~29°10′N）地处青藏高原西南部，境内地形地貌复杂且气候多变<sup>[6]</sup>，高空气象条件受高原地形、季风环流等因素影响，垂直空间气象要素变化显著，对高空探测数据的稳定性与精准度提出了高标准要求。当前，定日县高空气象探测以北斗探空、L 波段探空为常用技术手段。为掌握以上两种方式的差异，本文选取 2025 年 1–7 月定日县北斗探空与同址 L 波段雷达探测资料，对比分析两者在规定等压面之上温度、风向、风速等差异，旨在为本地高空气象观测数据质量控制、高原气象服务业务发展等提供有力参考。

## 一、资料与方法

### （一）资料来源

选取 2025 年 1 月至 7 月定日国家高空气象站北斗导航探空观测数据与 L 波段高空观测数据，对比每日 08 时与 20 时以上两种观测方式的观测数据。一旦北斗探测与 L 波段高空探测当中任意一种探测高度低于 20hPa，则剔除该时次探测数据。借助 L 波段高空气象探测系统数据处理软件对所有探空数据进行处理，获得各时次规定等压面，分别为 100hPa、150hPa、200hPa、250hPa、300hPa、400hPa、500hPa、600hPa，记录各等压面气温、海拔、风向风速等探测资料。其中 L 波段探空资料在各班次后人工进行质量控制，以防“飞点”与异常记录，而北斗导航探空则由中心站与观测站共同完成自动质量控制。

### （二）数据处理

为精准对比两套探测系统数据，需按流程开展以下数据处理。

时间匹配。为使两种方式探测时间窗口对应，选用 08 时与 20 时的温度、风向、风速数据进行配对，以消除观测时间不同步带来的偏差；（2）质量控制。剔除资料缺失、信噪比过低及明显异常的样本，保留有效数据；（4）偏差计算。在相同高度与时间条件下，计算北斗导航探测与 L 波段探空的温度差、风速差与风向差，形成用于后续分析的风场偏差数据集<sup>[7]</sup>。

### （三）分析方法

本研究重点选用偏差分析、Pearson 相关分析法开展数据对比分析，具体如下。

#### 1. 偏差分析

计算北斗导航系统高空探测值与 L 波段高空气象探测值之间的差值，公式如下：

$$\Delta X = X_{\text{北斗}} - X_{\text{L波段}}$$

按照以上公式统计并计算两种观测方式在各等压面层的平均偏差，据此评估两个系统的差异性。

#### 2. Pearson 相关分析法

通常情况下，选用 Pearson 相关系数 r 衡量两组数据线性相关程度<sup>[8]</sup>，其计算公式如下。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

上述公式当中，X、Y 对应北斗、L 波段对应要素序列，r 取值在 -1 到 1 之间，该数值越接近 1，代表数据变化趋势一致性越强。分层计算温度、风速、风向在各规定等压面相关系数，定量区分两个系统在以上三种气象要素数据观测上的一致性。

## 二、探空观测原理对比

L 波段探空观测系统以 GFE（L）型二次测风雷达与 GTS 系列探空仪为核心探测单元。观测时，探空仪由充入氢气或氦气的气象气球搭载升空，可完成地面至 36 km 高空范围内大气温度、湿度、气压要素的直接探测<sup>[9]</sup>；同时雷达还可持续追踪探空仪位置，获取斜距、仰角、方位角等定位参数，经时序运算解算探空仪移动速率与方位，反演不同高度层的风向、风速信息，实现气象要素垂直剖面观测<sup>[10]</sup>。

而北斗导航探空系统依托搭载基带射频 SoC 一体化定位模块的专用探空仪开展观测，同样可完成地面至 36 km 高空温、湿、压、风的一体化探测。该系统通过北斗卫星导航定位获取高精度三维位置信息，直接解算高空风场参数，规避传统雷达定位的空间偏差；观测数据经 GFSK 无线调频调制，通过 P 波段实时传输至地面接收处理终端，兼具高空间分辨率与数据传输实时性，可同步输出定位信息与设备工况状态<sup>[11]</sup>。

## 三、观测结果对比分析

### （一）规定等压面上的温度对比

由图 1a 可知，2025 年 1–7 月定日县北斗导航探空与 L 波段探空温度数据均符合正态分布<sup>[12]</sup>，两者之间的 Pearson 相关系数为 0.999714，可见两种探测方式温度观测数据存在极显著的正相关关系，即两种探测方式结果具有较强一致性。由图 1b 可见，在各规定等压面之下，气温平均差介于 -1.49 ~ 0.72 之间，08 时与 20 时两种探测方式的气温平均差也存在一定差异。其中 08 时



150hPa以下高度差值为负值，即L波段探空测得的温度高于北斗导航探空温度，150hPa以上则为正；而20时所有高度差值均为负，即各等压面北斗导航探空温度均低于L波段探空获取的温度数据。对比可见，20时300hPa高度温度平均差绝对值最大，差值为-1.49℃；而20时100hPa高度温度平均差绝对值最小，差值为-0.09℃。

对规定等压面上两种探测方式温度均方差偏差进行计算得出，08时与20时两种探测方式均方差偏差分别为0.47℃、0.79℃，可见20时两种探测方式温度偏差高于08时，即08时数据一致性更好。结合各规定等压面可见，除300hPa等压面之外，其余等压面温度均方差偏差均小于1℃，且低层差异明显小于高层。两套系统观测温度差异性较小。

表1 各规定等压面北斗与L波段探空系统温度均方差偏差

| 等压面/hPa   | 100  | 150  | 200  | 250  | 300  | 400  | 500  | 600  |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 温度均方差偏差/℃ | 0.43 | 0.17 | 0.50 | 0.91 | 1.14 | 0.63 | 0.34 | 0.51 |

## (二) 风数据对比

### (1) 风速数据对比

如图2a给出了2025年1-7月定日县北斗导航探空与L波段探空风速散点图，计算两套探测系统下风速数据相关性得出，两者之间的Pearson相关系数为0.9791，可见两套探测系统风速观测数据相关性良好，即两套探测系统风速整体一致性较高，由图2b可见，在各规定等压面之下，风速平均差介于-1.33~3.89m/s之间，08时与20时两套探测系统的风速平均差也存在一定差异。其中08时仅600hPa高度风速差值为正，即L波段探空测得的风速低于北斗导航探空风速，其余等压面风速差值均为正；而20时所有等压面风速差值均为正，即北斗导航探空风速均高于L波段探空风速。对比可见，20时200hPa高度风速平均差绝对值最大，差值为3.89m/s；而20时600hPa高度风速平均差绝对值最小，差值为0.07m/s。

对规定等压面上两套探测系统风速均方差偏差进行计算得出，08时与20时两套探测系统均方差偏差分别为0.76m/s、2.63m/s，可见20时两套探测系统风速偏差明显高于08时，即08时数据一致性更好。结合各规定等压面可见，100~300hPa等压面两套探测系统风速偏差较大，而400~600hPa等压面两套探测系统风速偏差较小，其中500hPa两套探测系统风速偏差最小，均方差偏差为0.14m/s，可见对流层中层两套探测系统一致性良好。

表2 各规定等压面北斗与L波段探空系统风速均方差偏差

| 等压面/hPa       | 100  | 150  | 200  | 250  | 300  | 400  | 500  | 600  |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 风速均方差偏差/(m/s) | 2.58 | 2.77 | 2.91 | 2.04 | 1.54 | 0.61 | 0.14 | 0.57 |

### (2) 风向数据对比

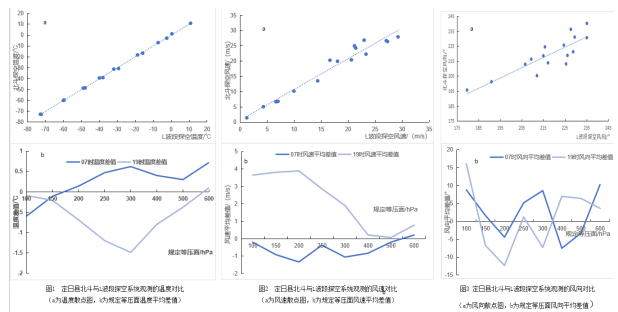
如图3a给出了2025年1-7月定日县北斗导航探空与L波段探空风向散点图，计算两套探测系统下风向数据相关性得出，两者之间的Pearson相关系数为0.8598，可见两套探测系统风向观测数据也存在一定的正相关关系。由图3b可见，在各规定等压面之下，风向平均差值介于-12.32~16.03°之间，08时与20时两套探测系统的风向平均差也存在显著差异，20时100hPa高度风速

平均差绝对值最大，差值为16.03°；而20时250hPa高度风向平均差绝对值最小，差值为1.22°。

对规定等压面上两套探测系统风向均方差偏差进行计算得出，08时与20时两套探测系统均方差偏差分别为6.82°、8.74°，可见20时两套探测系统风速偏差明显高于08时，即08时数据一致性更好。结合各规定等压面可见，各规定等压面风向均方差偏差均较大，表明两套探测系统一致性偏差。

表3 各规定等压面北斗与L波段探空系统风向均方差偏差

| 等压面/hPa     | 100   | 150  | 200  | 250  | 300  | 400  | 500  | 600  |
|-------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| 风向均方差偏差/(°) | 12.93 | 4.88 | 9.25 | 3.74 | 7.95 | 7.24 | 5.08 | 7.71 |



### (3) 定日县一次降水过程大气层结特征及两类探空资料对比分析

结合2025年7月13日定日县降水天气过程的两组探空观测数据可知，降水发生前后区域大气层结特征出现明显演变。过程前期对流有效位能CAPE仅为0.46 J/kg，对流抑制能量CIN为-88.78 J/kg，低层稳定层结显著，大气对流发展受到强烈抑制，暂不具备降水发生的热力条件；随着天气系统移动与局地热力作用影响，后期CAPE升至83.2 J/kg，CIN减小至34.7 J/kg，对流抑制作用大幅减弱，不稳定能量逐步释放，抬升凝结高度、自由对流高度及平衡高度的垂直配置更加利于空气块抬升，大气不稳定性明显增强，为本次降水过程提供了有利的热力基础。本次观测分别采用L波段与北斗两套探空系统，对比来看，北斗探空依托卫星定位技术，规避了传统L波段雷达观测受地形、电磁干扰及大气折射带来的误差，在风速、位势高度等要素上观测精度更高，数据连续性更好，结合定日县高海拔区域特点，北斗探空数据能够更精准地反映降水过程中大气温、湿、风及层结结构的动态变化，观测结果可靠性优于L波段探空。

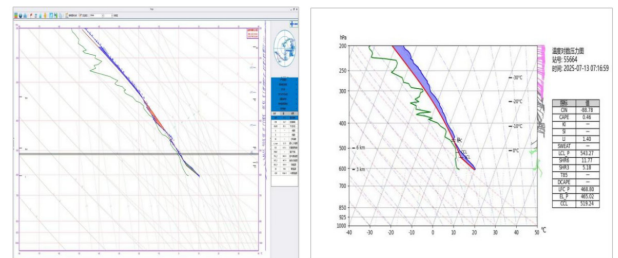


图4 定日县一次降水过程大气层结特征及两类探空资料图

(左为L波段探空t-lnp图，右为北斗探空t-lnp图)

## 四、结论与讨论

### （一）主要结论

本文通过对定日县 2025 年 1–7 月北斗导航探空与 L 波段探空观测数据进行对比，得出以下结论：

北斗导航探空与 L 波段探空温度、风速数据一致性较高，其 Pearson 相关系数分别为 0.999714、0.9791，风向 Pearson 相关系数为 0.8598。可见，两套探测系统温度一致性最优，风速次之，而风向相关性较弱；

两种探测系统在时次与垂直分层上存在明显差异。温度偏差 08 时整体优于 20 时，300 hPa 偏差最大；风速偏差 20 时显著大于 08 时，中高层偏差突出；风向偏差整体偏大，100 hPa 偏差最为显著，且 20 时偏差普遍高于 08 时。

### （二）讨论

两套探测系统的偏差主要源于定位体制与探测环境差异<sup>[13]</sup>。

其中 L 波段探空依赖雷达二次应答定位，易受地面电磁干扰、雷达测角误差影响，在高层易出现空间定位偏差；北斗探空采用卫星导航定位，定位精度更高，但受电离层延迟影响，中高层风场反演易引入系统性误差，导致 20 时偏差显著增大。综合来看，北斗导航探空在定位精度、时空分辨率上更具优势，整体精准度优于传统 L 波段探空，尤其在对流层低层表现稳定，仅中高层风场数据需进一步优化。

在今后的探测工作中，可从以下三方面提升探测质量。其一，构建北斗探空数据的分层误差校正模型，针对不同时次、高度层的偏差特征进行订正，重点优化中高层风场数据<sup>[14]</sup>；其二，优化风场反演算法，引入电离层延迟修正参数，降低中高层风向风速偏差；其三，开展多站点、多天气背景下的对比观测，完善不同区域的误差评估方案。此外，在实际的业务应用当中，可以 L 波段探空为基准，对北斗探空数据进行动态质量控制，实现两套系统的优势互补，提升高空气象观测的整体可靠性与稳定性<sup>[15]</sup>。

## 参考文献

- [1] 覃晓玲, 胡程峻, 覃月凤等. 北斗探空与 L 波段探空湿度对比分析 [J]. 气象水文海洋仪器, 2026, 43 (01): 23–25.
- [2] 赵世军, 高太长, 马英等. 利用北斗导航系统探测高空风的研究 [J]. 测绘科学, 2013, 38 (05): 13–15+45.
- [3] 祁小娟. 北斗定位技术在高空探测气球轨迹监测中的应用研究 [J]. 农业灾害研究, 2026, 16 (02): 181–183.
- [4] 沈晔, 陶莉. 北斗探测系统与 L 波段雷达高空风对比分析 [J]. 气象水文海洋仪器, 2024, 41 (02): 58–62.
- [5] 林彩艳, 曹梅, 白燕荣等. 北斗导航与 L 波段探空数据对比分析 [J]. 气象水文海洋仪器, 2026, 43 (02): 26–28+32.
- [6] 久美南加, 达确, 巴桑等. 定日县气温与降水变化特征 [J]. 西藏科技, 2025, 47 (07): 48–53.
- [7] 郑燕, 刘立群, 董方有等. 北斗与 L 波段探空系统探测对比分析 [J]. 气象水文海洋仪器, 2025, 42 (01): 26–29.
- [8] 郭磊, 高梅. 北斗与 L 波段探空系统在荣成高空站某时段观测数据对比分析 [J]. 数字农业与智能农机, 2026 (03): 60–64.
- [9] 郝文强. 对比分析 L 波段测风雷达与北斗探空系统性能 [J]. 内蒙古科技与经济, 2025 (10): 134–136+148.
- [10] 张明, 杜裕, 汤森. 北斗测风与 L 波段雷达测风的差异性分析 [J]. 气象研究与应用, 2023, 44 (02): 63–68.

# 长春龙嘉国际机场罕见复合型天气过程诊断分析及航班影响研究

于超越, 朱有义

民航吉林空管分局, 吉林 长春 130062

DOI:10.61369/EAE.2026040023

**摘要 :** 2026年4月3日长春龙嘉机场降雨、降雪、雷暴冰雹、大雾叠加的罕见复合型灾害天气过程, 对长春龙嘉国际机场航班起降、地面运行造成极大影响。本文利用 ECMWF 全球预报场、CMA-MESO 中尺度逐小时模拟产品、长春高空探空观测、龙嘉机场精细化气象要素实况及单站温湿风垂直速度剖面等多源气象资料, 开展系统性诊断分析。从大尺度环流背景、冷暖空气交汇、中低层水汽输送、垂直动力分层结构、热力不稳定层结、对流潜势、近地面辐合条件6个维度揭示多相态天气共存的物理机制。结果表明: 500hPa 短波槽快速东移引导强冷空气南下; 高低层垂直分层水汽输送提供充沛水汽条件; 整层贯通式上升运动为天气发展核心动力; 0℃层与 -20℃冰晶层高度配置适宜, 冰水共存层厚度充足, 配合锋面强迫抬升, 促成了局地雷暴冰雹; 早间 CAPE 近乎为0, 但依靠锋面强迫与强垂直风切变依然能够触发强对流, 是本次过程预报难点。

**关键词 :** 雷暴冰雹; 大雾; 垂直环流; 对流不稳定; 冰水共存层

## Diagnosis and Analysis of Rare Composite Weather Processes and Their Impact on Flights at Changchun Longjia International Airport

Yu Chaoyue, Zhu Youyi

Civil Aviation Jilin Air Traffic Control Branch, Changchun, Jilin 130062

**Abstract :** On April 3, 2026, a rare composite disaster weather process involving rainfall, snowfall, thunderstorms, hail, and dense fog occurred at Changchun Longjia Airport, causing significant impacts on flight take-offs and landings as well as ground operations. This study utilized ECMWF global forecast fields, hourly simulation products from CMA-MESO, high-altitude sounding observations in Changchun, real-time meteorological data at Longjia Airport, and vertical velocity profiles of temperature, humidity, and wind at individual stations to conduct a systematic diagnostic analysis. From six dimensions including the large-scale circulation background, convergence and divergence of cold and warm air masses, water vapor transport in the middle and lower layers, vertical stratification structure, thermal instability layering, convective potential, and near-surface convergence conditions, the physical mechanism of the coexistence of multiple phases of weather was revealed. The results show that the rapid eastward movement of the 500 hPa short-wave trough guided strong cold air southward; vertical stratified water vapor transport in both upper and lower layers provided abundant water vapor conditions; the entire layer's continuous upward motion was the core driving force of the weather; the height configuration of the 0℃ layer and the -200℃ ice crystal layer was appropriate, with sufficient thickness of the ice-water coexistence layer, and combined with frontal forcing uplift, local thunderstorms and hail were formed; the early morning CAPE was nearly zero, but the combination of frontal forcing and strong vertical wind shear still enabled the triggering of strong convection, which was the difficulty in the forecast of this process.

**Keywords :** thunderstorm and hail; dense fog; vertical circulation; convective instability; ice-water coexistence layer

# 引言

春季东北地区处于西风带短波槽活跃期，冷暖空气交汇频繁，极易出现连续性阴雨、平流雾与局地突发雷暴冰雹叠加的复合型灾害天气<sup>[1-3]</sup>。这类天气往往具备突发性强、局地特征显著、天气相态转换快等特点，常规早间探空热力指标常常难以预判午后对流爆发，对民航机场气象预报、航班运行管控带来较大挑战<sup>[4]</sup>。2026年4月3日长春龙嘉国际机场经历了先连续性降雨、中午前后局地雷暴冰雹、傍晚快速雨转雪的完整天气演变，过程中伴随阶段性低能见度，龙嘉机场出现航班绕飞、延误、备降等情况。

现有的东北地区春季灾害天气研究，多单独针对暴雪、暴雨、强对流或大雾单一天气开展诊断分析，对一日内同步出现雨、雪、雷暴冰雹、大雾四类天气的复合型个例的诊断研究较少。本文针对本次典型个例开展精细化诊断，厘清多相态天气形成物理机制，总结预报着眼点与民航保障策略，旨在为长春龙嘉国际机场春季多灾害叠加天气精细化预报、航空气象服务提供理论支撑。

## 一、资料与分析方法

本文使用国内常规天气实况分析场，ECMWF全球预报，CMA-MESO区域中尺度模式逐小时输出产品，长春站08时高空探空观测资料，长春龙嘉机场地面实况观测数据。采用天气学环流分型、冷暖空气锋面分析、垂直环流分层诊断、探空热力参数定量判读、单站时序剖面演变、多相态天气区分判识相结合的综合诊断手段<sup>[5]</sup>。综合各物理量场构建“雨-雪-雾-强对流”复合型天气物理概念模型，总结同类复合型灾害天气预报判别指标。

## 二、天气实况与机场影响

### （一）天气实况概述

受高空冷涡及地面倒槽共同影响，2026年4月3日长春龙嘉国际机场出现雷暴伴冰雹、降雨、降雪、大雾等多种天气叠加的复合型天气过程，10:59—19:20为小到中雨，其中12:07—12:46出现雷暴，12:18—12:21伴有冰雹，13:56—17:21出现大雾，期间主导能见度最低400米，RVR最低800米。19:20—4日02:48转为小雪天气。

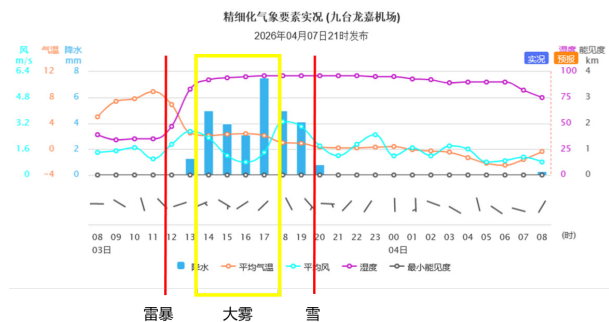


图1 2026年4月3日龙嘉机场逐时精细化气象要素实况时序图

### （二）航班运行影响

连续性降雨长时间造成跑道湿滑、刹车效应下降；雷暴冰雹时段机场周边对流云团发展旺盛，空管启动流量管控，限制起降间隔，大量进港航班采取空中盘旋、航线绕飞措施，部分航班备降至周边机场；大雾导致能见度下降，影响起降标准；傍晚雨雪转换后面面积雪结冰风险上升，增加了机场除冰保障压力，全天航班准点率明显下滑。

## 三、环流背景诊断分析

### （一）500 hPa 高空环流形势

欧亚中高纬呈两槽一脊经典环流分型，贝加尔湖低涡中心不断分裂短波槽沿西北气流快速东移南下，4月3日白天短波槽主体过境吉林省中部，槽后西北气流引导干冷空气东移南下。高空急流位于40° N附近，急流轴抽吸作用为对流发展提供动力条件。

### （二）700 hPa 环流形势

700 hPa处于短波槽前西南气流控制，西南急流建立稳定的水汽与动量输送通道，同时中层整层维持大范围上升运动，既是低层水汽向上输送的关键载体，也是冰雹云垂直发展的核心层次。中层冷暖交汇剧烈，为持续性降水与局地强对流提供中层动力支撑。

### （三）850 hPa、925hPa 环流形势

850 hPa、925hPa存在显著低空西南急流，作为主力水汽输送环流，持续将黄渤海海域充沛水汽向北输送至吉林省中部。温度槽随低空急流同步东移过境，层内气温快速下降，形成低层暖湿环流、700 hPa中层冷环流的垂直环流配置，为雨雪共存的降水相态转换提供环流温度梯度。急流出口区存在显著气旋性切变与风向辐合环流，低层辐合环流向上与700 hPa中层上升环流垂直衔接，一方面维持大范围系统性上升环流与层状降水，另一方面局地环流扰动为零散积雨云触发提供初始抬升动力。

### （四）地面气压场与锋面配置

地面环流场上，蒙古冷高压主体东移，华北低压倒槽向北伸展，冷暖锋面在吉林省中部交汇，长春处于锋面核心影响区域。锋面环流附近水平气压梯度增大，局地环流风速短时增强，冷暖空气环流直接碰撞交汇；锋前暖区高湿静稳环流催生持续性大雾环流；锋面过境阶段，锋面辐合环流强迫抬升，触发局地雷暴冰雹对流环流；锋后西北气流持续南下降温，本场快速转为降雪天气。

## 四、水汽条件定量分析

### （一）高低层垂直分层水汽输送结构

925 ~ 850 hPa低层西南急流为主输送层，持续将黄渤海暖湿水汽输送至长春锋面交汇区；700 hPa中层西南气流依托系统性上升运动，构成垂直水汽输送通道，形成地面至400 hPa深厚的饱



和湿层，垂直厚度达6 km以上。过程时段长春低层水汽通量稳定高于 $12\text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ，水汽通量散度均为负值，水汽持续强净流入，为大范围雨雪、雾、强对流提供充足水汽条件。

（二）单站垂直湿层与零度层时序演变

长春站逐小时温湿垂直剖面显示，4月3日全天自地面至400 hPa均维持饱和湿区，相对湿度接近100%。零度层高度随冷空气南下快速下降，是雨雪转换的核心判定因子：上午零度层位于700 hPa以上，午后冷空气渗透，零度层下降至800 hPa附近，中层低温区产生冰晶，近地面始终饱和，无明显干层。九台龙嘉机场时序实况图完整复现该演变规律（图2），13–19时湿度曲线维持饱和，20时后气温快速下降对应零度层下降、降水相态转换。

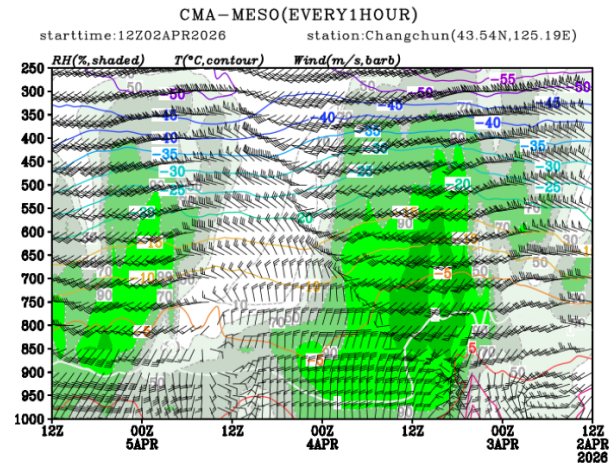


图2 2026年4月2日12时–5日12时长春站CMA-MESO相对湿度、温度和风向风速的高度–时间剖面图

（三）水汽与多类天气耦合机制

充沛深厚水汽在不同垂直温度、动力条件下分化出四类天气：①近地面气温 $>0^{\circ}\text{C}$ 、弱上升：液态降雨；②中层700 hPa气温 $<0^{\circ}\text{C}$ ：固态降雪；③强辐合贯通整层、热力不稳定：积雨云发展，出现雷暴、冰雹；④近地面静稳饱和：水汽凝结形成大雾。水汽充足是四类天气同步出现的基础，垂直温度分层、动力强弱差异决定不同时段主导天气类型。

五、大气垂直动力分层结构

本次过程垂直动力核心特征为地面至对流中高层贯通式整层持续上升；从08–20时长春龙嘉机场时间–高度垂直速度剖面可见，大范围负垂直速度自近地面1000 hPa向上延伸至300 hPa高空，强上升中心长期盘踞400~700 hPa中层，14时前后上升强度达到全天峰值，充沛垂直抬升是持续性雨雪、短时局地对流冰雹同步发生的核心动力基础。

（一）低层强辐合上升（近地面—850 hPa）

低空西南急流与地面锋面辐合触发近地层系统性抬升，低层上升运动持续向上扩张，将近地面饱和暖湿气流向上输送，与中层上升气流打通完整抬升通道。低层持续辐合长时间维持机场层

状降雨，造成跑道持续湿滑，同时为局地对流单体提供初始启动抬升。

（三）中层上升输送作用（850 hPa—400 hPa）

700 hPa是本次上升运动的核心主体层，全天被强上升区覆盖，14时对流爆发前后上升强度达到峰值，垂直速度接近 $-0.45\text{ Pa/s}$ ，是连接低层水汽与高空冰晶层的关键通道。低层暖湿水汽借助中层强上升持续输送至 $0^{\circ}\text{C}$ 融化层与 $-20^{\circ}\text{C}$ 冰晶层之间的冰水共存区，为冰雹胚胎反复碰并过冷水、径向生长提供持续托举动力。

（四）高空急流抽吸增强上升（400 hPa以上高空）

200 hPa高空急流通过高层分流抽吸效应，与低层、中层上升气流上下联动，进一步放大整层垂直抬升幅度，延长降水与对流生命周期。

六、对流层结与冰雹形成条件分析

（一）环境热力与风切变特征

08时探空显示区域对流有效位能CAPE数值趋近于0，环境预置不稳定能量匮乏，整体层结趋于稳定；但高低空垂直风切变显著，叠加地面锋面强外部强迫，弥补了预置CAPE不足，具备触发局地突发对流的潜势，也是本次过程早间探空难以预判午后冰雹的核心原因。

（二）垂直风切变的对流维持作用

较强的高低空垂直风切变能够延长对流单体生命周期，避免对流云快速消散，配合中层强上升气流，为冰雹粒子循环升降增长提供环境保障，是低CAPE环境下脉冲式冰雹能够落地的重要支撑条件。

（三） $0^{\circ}\text{C}$ 层与 $-20^{\circ}\text{C}$ 冰晶层配置

探空廓线实测 $0^{\circ}\text{C}$ 融化层高度为2012 m， $-20^{\circ}\text{C}$ 冰晶层高度为5085 m，冰水共存层垂直厚度可达3073 m，充足的云内冰水共存厚度为冰雹胚胎碰并过冷水滴、径向增长提供了优越的垂直空间，完全满足局地冰雹形成与发展的温度结构条件，但因上午热力稳定，仅在午后锋面强迫抬升阶段可短时生成冰雹。

七、结论

- （一）2026年4月3日长春雷暴冰雹天气由500 hPa东移短波槽主导，高空干冷叠置低层暖湿形成对流不稳定层结，低空急流与地面锋面辐合为天气发展提供基础抬升条件。
- （二）水汽呈现高低层垂直分层输送结构，低层西南急流负责水平水汽汇聚，中层依托上升运动完成垂直水汽输送，共同构建深厚饱和湿层，支撑降雨、大雾、冰雹多相态天气共存。
- （三）地面至对流中高层贯通式整层上升运动是本次过程核心动力，700 hPa中层为上升运动核心，峰值上升气流既维持持续性降水，又为冰雹粒子循环增长提供关键托举。

(四) 本次冰雹属于典型低CAPE、强风切变、锋面强迫型对流, 0℃层、-20℃层满足冰雹落地生长的理想层结条件; 早间热力稳定特征增加了预报难度。

(五) 吉林省中部春季天气预报需重视前倾槽、风切变、锋

面强迫等动力因子, 不能仅依靠热力参数判断对流潜势, 通过多要素综合研判可显著提升复合型灾害天气的预报准确率和机场服务保障能力。

## 参考文献

- 
- [1] 孙继松. 强对流天气预报的基本原理与技术方法 [M]. 北京: 气象出版社, 2014.
  - [2] 陈艳秋, 王东海, 张立祥. 东北地区春季强对流冰雹天气环境参数特征分析 [J]. 气象与环境学报, 2018, 34(02): 28-34.
  - [3] 王秀娟, 孙力, 李尚锋. 吉林省春季雨雾共存天气环流分型及物理机制 [J]. 东北师大学报 (自然科学版), 2020, 52(03): 118-124.
  - [4] 民航局空管局. 机场气象服务与航班运行保障规范 [Z]. 2022.
  - [5] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法 (第4版) [M]. 北京: 气象出版社, 2007.

# 钢渣—脱硫渣固废协同处置减碳工艺及效益分析

崔宝松

北京资源循环科技有限公司, 河北 迁安 064400

DOI:10.61369/EAE.2026040020

**摘 要 :** 钢铁流程每一年都产出数亿吨的钢渣以及脱硫渣, 要是开展单一的治理工作, 那就难以为继, 而协同处置正从设想得以实现变为现实情况, 本文鉴于两类渣的物化特性以及处置困境来开展工作, 梳理了进行预处理协同、开展全固废胶凝材料制备以及进行建材化利用这三条工艺主线, 并且讨论钢渣碳酸化固碳与矿化养护在减碳链条当中的位置以及可行性, 并且务实地去开展对环境、经济以及社会这三重效益的评估工作。

**关 键 词 :** 钢渣; 脱硫渣; 协同处置; 固废资源化; 减碳

## Carbon Reduction Process and Benefit Analysis of Collaborative Disposal of Steel Slag Desulfurization Slag Solid Waste

Cui Baosong

Beijing Resource Recycling Technology Co., Ltd., Qian'an, Hebei 064400

**Abstract :** The steel process produces hundreds of millions of tons of steel slag and desulfurization slag every year. If a single treatment work is carried out, it will be difficult to continue. Collaborative disposal is becoming a reality, and the physical and chemical characteristics of the two types of slag and the disposal difficulties are taken into account to carry out the work. This article summarizes the three main processes of pre-treatment collaboration, the preparation of solid waste cementitious materials, and the utilization of building materials. It also discusses the position and feasibility of steel slag carbonation carbon fixation and mineralization maintenance in the carbon reduction chain, and pragmatically carries out the evaluation of the triple benefits of environment, economy, and society.

**Keywords :** steel slag; desulfurization slag; collaborative disposal; solid waste resource utilization; carbon reduction

### 一、问题的提出

钢铁行业属于典型的流程制造业, 在长流程炼钢产出钢材的时候, 同时也会产出大量的冶金渣, 转炉钢渣所具有的碱度高、游离氧化钙含量大等特性, 使得它安定性不良, 而这方面的问题一直都是开展转炉钢渣建材化利用工作的难题; 铁水预处理以及烧结烟气治理所产生的脱硫渣、脱硫灰, 也就是硫含量偏高的这些渣和灰, 长期以来只能进行堆存, 或者是低价向外售卖。两类渣是从同一个厂区出来的, 不过它们的成分有所不同, 一个是偏钙的, 另一个是偏硫的。长期以来都是各自排放、各自治理, 这样就导致处置线出现了重复建设的情况, 同时也浪费了资源互补的潜力<sup>[1]</sup>。

这样的割裂所带来的代价正在逐渐显现出来, 堆存占地以及扬尘污染属于显性成本, 而隐性成本会更高。这主要是因为钢渣当中的硅酸钙矿物没有得到利用, 也就意味着上游要开展更多石灰石的烧制工作, 并且会排放更多的二氧化碳。在双碳目标的约束之下, 钢铁企业进行碳排放核算时会覆盖固废处置这个环节, 碳市场履约的压力会逐年增大, 把钢渣以及脱硫渣放在同工艺线当中来统筹去处理, 这既是资源方面的问题, 也是碳账方面的问题。

### 二、两类渣的处置困境与协同基础

#### (一) 钢渣: 活性有, 但激发难

钢渣所具有的胶凝活性是源于硅酸三钙以及硅酸二钙, 它和水泥熟料的来源相同, 不过其生成温度要高于水泥烧成温度, 并且矿物结晶粗大且致密, 从而导致水化非常缓慢。游离氧化钙以及氧化镁遇到水会发生膨胀, 把它们掺入到建材当中之后, 安定性方面的风险比较大。在多数建材应用当中, 钢渣粉的掺量较低, 其消纳速度远远比不上产出速度, 预处理这个环节开展起来可不轻松, 热闷、热泼以及风淬这些方式各有各的利弊。热闷处理也就是去处理热闷方面的工作, 它发展得稳定且成熟, 不过能耗、水耗以及周期会受到限制, 压蒸环节所存在的防爆安全问题也困扰着各个厂<sup>[2]</sup>。综合来看呢, 钢渣并不是没有出路, 而是在单打独斗的情况下, 每一条出路走起来都会很费劲。

#### (二) 脱硫渣: 成分杂, 出路窄

脱硫渣的处境那就更加尴尬了, KR法脱硫渣当中含有大量的金属铁以及脱硫剂残留, 烧结半干法脱硫灰主要是以亚硫酸钙为主, 硫、氯这些杂质会让它难以进入常规的建材体系。实践当中的改进大多集中在回收这个方面, 对脱硫渣开展二次焖渣工

作，它的含水量极大程度上低于首次焖渣的，这样就可以满足上生产线的要求；配合进行翻条筛改造以及除铁器调整，开展渣铁分级回收工作，让铁资源回到炼铁炼钢流程，而剩余尾渣的去向还需要确定<sup>[3]</sup>。也就是说，即便去开展脱硫渣金属回收的工作再精细，还是会有一大块低值尾渣的问题悬而未决，而这也就是协同处置需要去承接的方面。

### （三）成分互补：协同的化学依据

这样把两类渣放在一块儿，它们当中的互补关系就会很清晰，钢渣当中富含钙元素，但缺乏硫元素，在水化过程当中会生成氢氧化钙，进而提供碱性环境；脱硫渣当中富含硫元素，它的硫酸盐是大家公认的碱性胶凝材料的激发组分。矿渣添加进去之后，这三者进行水化从而形成接力的状况：在硫酸盐的激发之下，矿渣会先进行水解，使得浆体的碱度得以提升，进而加速钢渣当中硅酸盐矿物的水化，让液相到固相反应的转变提前了。协同并不是进行简单的物理混堆，而是有明确反应路径所支撑的化学配合，这也就是近年来钢渣、矿渣、脱硫石膏体系研究升温的缘由。

## 三、协同处置的工艺路线

### （一）预处理协同：一条线吃两类渣

预处理也就是协同处置这方面所开展的首道工序，热闷线完成改造之后，就可以在同一渣线先去处理脱硫渣，然后再去处理转炉渣，借助脱硫渣焖渣余水的碱度以及温度，同时来改善钢渣粉化的效果；把脱硫渣回收的渣铁返回进行炼铁，KR脱硫渣开展热态循环利用之后，铁水的温降相对减少了大概10℃，脱硫剂的消耗降低了大约四成，这样节能也就是减碳。热态循环还有常被忽略的意义：要是脱硫渣携带的显热随着堆存而散失，那么再加热到工作温度就需要补充燃料；而要是把热量保留在流程内，那就可以减少一部分碳排放。

预处理协同的要点是开展调度方面的工作，而并非设备方面，对于渣罐进行配置、开展打水制度的制定以及焖渣周期的设定，会根据两类渣也就是脱硫渣和转炉渣的特性分别来开展。鉴于脱硫渣量比较小，可以把罐攒起来集中去处理；转炉渣则要马上趁热进坑。这两种处理节奏会被并入到一张排产表中，采用一套人马以及一条主线，将投资进行摊薄，来开展集中管理工作。脱硫渣在进行二次焖渣之后，它的含水率会变得更低，这样就可以直接满足后续粉磨以及配料环节的入料要求，这一点决定了它能不能顺畅地接入胶凝材料线，并且不需要再增加烘干工序。烘干虽然看起来是一件小事，但实际上是能耗的大户。要是在协同线路上存在需要另外燃烧燃料来补充热量的环节，那就会对整体的减碳收益造成侵蚀。在进行工艺设计的时候，应当优先把流程余热利用起来去控制水分。

### （二）全国废胶凝材料：协同的主战场

胶凝材料是钢渣以及脱硫渣开展协同工作价值最高的出口方面，把钢渣粉以及烧结烟气脱硫灰复配起来形成全固废胶凝材料，同时借助粉煤灰来调整硅铝相，添加少量有机胺类激发

剂，净浆强度能够获得数量级的提升，单一掺入20%的粉煤灰就会明显促进水化硅酸钙的生成，让十四天抗压强度得以提高将近两倍<sup>[4]</sup>。要是把体系弄得更复杂一些，往里面加入矿渣，也就是选用钢渣30%、矿渣60%、脱硫石膏10%的配合比来开展配置，二十八天的抗压强度能够达到四十兆帕出头，各项性能可以契合现行标准的要求，微观方面，钙矾石以及水化硅酸钙凝胶持续地生成，这证明了各组分之间存在着协同反应，而并非是简单的叠加<sup>[5]</sup>。

胶凝材料在减排方面的逻辑是双向性的，一方面，把钢渣、脱硫渣当作水泥熟料来使用，开展替代工作，这样就省掉了熟料煅烧过程当中碳酸钙分解排碳以及燃煤排碳的情况；另一方面，尾矿以及废石等固体废弃物骨料也就有了开展胶结的出路，全固废混凝土这一情况得以实现。借助钢渣、水渣以及脱硫石膏当作原料开展复合胶凝材料的制作工作，把它用来替代水泥制作混凝土，全替代的时候，二十八天抗压强度能够达到水泥对照组的近乎八成，契合C30工程的需求，减少碳排放以及性能这两个方面当中的平衡点能够很明显地看到<sup>[6]</sup>。对于年产达到千万吨级钢渣的头部企业而言，这条线把固废不出厂这个口号转变为了排产计划。

### （三）建材化利用的边界

除了胶凝材料以外，路基料、免烧砖以及回填材料等低值产品的出口，仍然需要保留下来，全固废胶凝材料的早期强度与凝结时间对配合比高度敏感，质量波动是批量应用的现实风险，掺合料与骨料中的氯、硫杂质也需要在入厂检验中卡住。建材化利用的边界应当由产品标准以及工程验收来进行划定，而并非是消纳压力。要是为了消纳固废而放宽标准，那就会把全固废材料的口碑给砸了。

## 四、减碳工艺与效益分析

### （一）碳酸化固碳：把渣变成碳汇

借助钢渣碳酸化这个反应过程，也就是让渣中的游离氧化钙、硅酸钙以及二氧化碳展开反应来生成稳定的碳酸钙，这个反应会放热，并且产物比较稳定，矿化每吨钢渣的时候，理论上能够固定的二氧化碳固碳量可达数百千克。基于钢渣来开展的矿物碳酸化工艺和钢铁行业天然契合，二氧化碳排放源以及碱性固废都在同一个厂区，这样就省去了长距离运输，得以实现减排以及固废高值化双重收益的叠加<sup>[7]</sup>。经济性是决定这项技术能不能走出实验室的关键因素。钢渣固碳方面的原料成本比较低、容量又大，鉴于经济以及环境方面的考量，其前景是比较可观的，不过大部分工艺还停留在实验室以及小试阶段，气固反应动力学较慢以及矿化装备放大存在困难是主要的拦路虎<sup>[8]</sup>。

在矿化路径方面，直接矿化以及间接矿化分别有着各自的优势和劣势，直接矿化会把二氧化碳直接和渣进行接触反应，从而省去了中间步骤。湿法矿化的效率要比干法的好，反应的温度、时间、渣的粒径以及液固比会影响钙镁离子的扩散以及转化速度，提升效率的思路基本上是推动反应朝着生成碳酸钙的方面推



进；间接矿化先着手去开展钙镁离子的浸出工作，然后再进行固碳，其效率会取决于浸出率。把酸浸环境进行选择、开展浸出液的净化工作以及对碳酸钙沉淀分级加以利用，这些构成了更长的工艺链，从而换来产品的纯度以及附加值。完善热力学以及动力学的理论体系、开展大规模的工业化试点工作、开发固碳后钢渣方面的高值化出路，是该线产业化的三个前置条件<sup>[9]</sup>。

### （二）矿化与胶凝材料的耦合

那么真正具备工程想象力的方面，是把耦合碳酸化固碳与全固废胶凝材料这一操作开展起来，运用钢渣以及粉煤灰来制作复合碱激发胶凝材料，并且开展二氧化碳矿化养护，氧化钙的掺量和固碳率是成正比的，矿化产物也就是方解石会填充孔隙，这样能同时实现固碳以及增强的效果，进行的经济性分析方面同样给出了正面的结论<sup>[10]</sup>。这就意味着矿化养护可以在制品这个环节来完成，养护窑当中二氧化碳的浓度、压力以及时长是可以控制的，固碳率能够测量、减排量可以核证，这样就契合了碳交易市场对于可计量方面的要求拥有可以进行报告、可以去进行核查的要求。制品养护相较于散体渣直接矿化，对反应界面的利用效率会更高，并且避开了大规模气固反应装备放大这个难题，是现阶段更为适宜的减碳切入点。

### （三）三重效益的务实核算

环境效益的核算开展的是三笔账的核算工作，第一笔也就是替代账，把每吨全固废胶凝材料用来替代水泥熟料，按照熟料碳排放强度来进行折算，减排量能够达到数百千克二氧化碳，这是最大并且最确定的一笔；第二笔也就是矿化账，碳酸化封存二氧化碳的数量是由固碳率来决定的，能够进行核证，不过量级较为有限；第三笔也就是处置账，开展堆存占地、扬尘以及碱性渗滤液的环境风险消除工作，虽然这方面难以实现货币化，但是风险是真实存在的。经济方面的账得面对现实情况：全固废胶凝材料

的成本优势是由熟料替代以及固废零售价带来的，要是处置费以及产品价格随着市场发生波动，那么账面利润马上就会被摊薄；碳交易收入目前还难以覆盖开展矿化装备投入的成本，指望碳价一下子就达到理想水平是不现实的。在社会效益方面，通过让固废不出厂，得以释放堆存土地、空出处置线岗位，以及实现区域环境的改善，这对于企业以及地方政府而言是有吸引力的，也是各地示范项目进行立项的底层缘由。

综合起来进行判断，在现阶段，协同处置效益结构需要把替代减排当作基本盘，将建材产品收入作为现金流，并且把碳汇以及碳交易视为增量，这三个方面缺一不可，任何只计算环保方面的账、不计算经济方面的账的方案，都很难在钢厂成本考核体系当中挺过两个预算年度。

## 五、结论

钢渣以及脱硫渣进行协同处置，本质上就是用流程思维来替代末端思维，也就是预处理一条线对这两类渣开展统筹工作，借助胶凝材料让钙硫相互补充从而形成强度，并且通过碳酸化让富钙组分变成碳汇，三条工艺线在同一个厂区当中实现了闭合。它的效益不是用单一环节的盈亏来进行衡量的，而是凭借以替代减排当作基本盘、产品收入当作现金流、碳汇当作增量的结构来取得胜利，现阶段所面临的瓶颈大多集中在标准、核算以及考核机制这些方面，并非是反应机理。鉴于技术路线已经明确，需要把实验室以及示范线的数据转换成为标准条文以及碳市场所认可的凭证。那么，固废协同处置的减碳成效，最终并非取决于论文当中所说的固碳率，而是取决于钢厂年度采购计划当中全固废胶凝材料占的百分点。

## 参考文献

- [1] 王吉凤，付恒毅，闫晓彤，等. 钢渣综合利用研究现状 [J]. 中国有色冶金，2021，50（6）：77-82.
- [2] 黄丽，徐杰. 浅谈钢渣热闷的现状与发展 [J]. 工业加热，2016，45（4）：68-70.
- [3] 陈虎，王少军，乔爽，等. 脱硫渣综合回收利用技术研究 [J]. 江西冶金，2022，42（3）：16-23.
- [4] 孙睿，王栋民，房中华，等. 钢渣-脱硫灰基全固废胶凝材料及其砂浆界面过渡区的研究 [J]. 金属矿山，2022，51（1）：41-52.
- [5] 栗东平，平浩岩，张凯帆，等. 钢渣-矿渣-脱硫石膏复合胶凝材料的制备及水化机理 [J]. 科学技术与工程，2023，23（6）：2558-2566.
- [6] 杨志强，赛音巴特尔，时朝昆，等. 多固废耦合水泥制备 C30 混凝土性能研究 [J]. 环境工程，2023，41（3）：143-147.
- [7] 王瑞，颜峰，郭荣鑫，等. 钢渣矿物碳酸化及生命周期评估研究进展 [J]. 材料导报，2023，37（增刊2）：282-289.
- [8] 刘文昊，陈庆彩，徐腾飞，“双碳”战略背景下的钢渣固碳技术研究进展 [J]. 环境工程，2024，42（5）：172-182.
- [9] 谢元涛，封孝信. 钢渣矿化固化二氧化碳研究现状及展望 [J]. 金属矿山，2023（11）：45-54.
- [10] 宋夏，赵传文，宋雨佳，等. 钢渣-粉煤灰固废复合碱激发胶凝材料矿化养护 [J]. 洁净煤技术，2024，30（10）：88-99.

# 国土空间规划背景下县域土地资源集约利用 优化路径研究

杨雅丽

天津市蓟州区第一土地和规划管理所，天津 301900

DOI:10.61369/EAE.2026040021

**摘 要：** 国土空间规划体系得以重构之后，县域土地资源的配置逻辑从增量扩张转变为存量提质，不过，土地粗放利用的惯性并没有得到扭转，那么本文借助县域现实困境来切入，梳理了建设用地粗放扩张、空间错配以及低效存量的形成机理，同时结合三区三线划定、城镇开发边界管控以及双评价技术，来讨论一下规划框架对于集约利用方面所开展的刚性约束以及弹性引导工作。在这个基础之上，沿着存量盘活、全域综合整治以及数字化差别化驱动这三条路径来提出优化方面的方向，县域土地集约利用的核心并非单点技术的突破，而是要把规划约束、评价方法以及实施机制进行贯通，形成可以落地的管控链条。

**关 键 词：** 国土空间规划；县域；土地资源；集约利用；优化路径

## Research on the Optimization Path of Intensive Utilization of County-Level Land Resources under the Background of National Spatial Planning

Yang Yali

Tianjin Jizhou District First Land and Planning Management Office, Tianjin 301900

**Abstract：** After the reconstruction of the national spatial planning system, the allocation logic of land resources in counties has shifted from incremental expansion to stock improvement. However, the inertia of extensive land use has not been reversed. Therefore, this article takes the practical difficulties of counties as an entry point to sort out the formation mechanism of extensive expansion, spatial mismatch, and inefficient stock of construction land. At the same time, combined with the delineation of the three zones and three lines, urban development boundary control, and dual evaluation technology, it discusses the rigid constraints and flexible guidance work of the planning framework for intensive use. On this basis, optimization directions are proposed along three paths: revitalizing existing resources, comprehensive improvement of the entire area, and driving digital differentiation. The core of intensive land use in counties is not a single technological breakthrough, but rather the integration of planning constraints, evaluation methods, and implementation mechanisms to form a practical control chain.

**Keywords：** national spatial planning; county level; land resources; intensive utilization; optimized path

### 一、问题的提出

国土空间规划体系的重构，属于近些年土地治理方面所进行的最深层次的制度性变动，县域作为城乡融合的枢纽单元，承接了城镇建设用地的下达指标，来承担起耕地以及生态保护的底线，它的土地资源合理配置会直接关系到三区三线能不能落地。然而呢，长期以来进行粗放扩张所形成的惯性，不会因为规划体系的更替就自动进行消解。很多县城在工业用地方面的容积率比较低，农村居民点呈现出散乱空心的状态，并且城镇扩张这个现象和人口流失的情况是同时存在的，存量的低效以及增量的粗放在同一个空间当中进行了叠加<sup>[1]</sup>。在增量时代沿袭下来的把土地当作生财途径的路径依赖，导致了建设用地指标出现紧缺的情况，同时还存在土地闲置浪费的现象，这一矛盾的主要原因并

不在于指标的总量，而是在于配置结构以及利用方式。

集约运用土地资源并非一个全新的命题，鉴于国土空间规划，它的内涵得到了重新界定，也就是不只是使单宗地块的利用强度得以提升，而是要对全域全要素的空间开展配置方面的优化，这需要在生态保护、在粮食安全以及城镇发展之间来寻求达成动态的平衡。县域成了这个命题的关键尺度，主要原因是它一头连接着城镇开发边界内的建设需求，一头连接着广袤乡村的耕地以及生态底色，它的土地利用合理性会直接决定城乡融合的成色，这种转向需要把评价方法、规划管控以及实施机制进行贯通，而不是各自管理一段。本文鉴于县域的现实困境来开展研究，沿着评价逻辑、规划管控以及优化路径的方面逐层展开，尝试来实现破解“划了管不住、评了用不上”这一困局，提供贯通的思路。

## 二、县域土地资源集约利用的现实困境

### （一）粗放扩张与空间错配

县域的建设用地呈现出粗放状态，首先出现的情况是增量扩张以及功能错配这两者叠加了，工业用地沿着公路开展蔓延工作，农村居民点呈现分散状态，县城新区以摊大饼的方式向外开展扩展工作，这是大多数中西部县城的共同写照。问题的主要原因在于当前开展的土地计划管理工作缺乏弹性调节机制，把指标下达以及实际落地进行匹配时存在空间错配，不同主体功能区农用地转建设用地数量方面存在过量配置的情况，拥有帕累托改进的空间，也就是在功能区划理念下，差别化管制还没有真正转化成配置规则<sup>[9]</sup>。这样带来的直观后果是，重点开发区的指标没办法充分使用、限制开发区的指标不够拿来用，并且耕地保护以及生态约束会让增量空间变得更加逼仄，指标紧缺以及用地粗放同时存在的这种悖论，其主要原因就在于此。更需要引起警惕的是，采用粗放的方式进行扩张时会伴随着功能错配的情况，比如工业用地被圈定之后却不加以使用、住宅用地的情况脱离了人口实际状况、公共服务设施随着新区的蔓延而被摊薄，土地虽然被占用了，但是所产出的经济以及社会效益和占用的空间远远不能匹配。

### （二）集约利用水平偏低与空间分异

那么就算是在东部的发达地区，县域建设用地集约方面的水平也并不乐观，以宁夏为例，22个县当中只有6个的综合得分超过了80，整体上从北向南逐渐递减，空间集聚特性明显，不过分布极大程度上不平衡<sup>[9]</sup>。浙江县城城镇土地整体有着集约的特性，不过存在人地关系不协调以及局部粗放现象并存的问题，当中主要的影响因素包括财税以及产业、自然条件以及发展水平、经济区位等方面，并且，各个因素之间呈现出非线性的增强效果<sup>[4]</sup>。这就意味着会是集约地借助非单一线性关系，也就是多要素进行交互的结果，简单地增减指标很难触及到它结构方面的主要原因，那么困境的另一面是开展存量盘活工作出现了迟滞情况。老旧厂区、闲置校舍以及低效村镇建设用地散布在县城和乡村之间，也就是产权碎片化、功能被锁定并且退出机制缺失这些原因，导致它们长期处于闲置状态，占用了空间却没有产生效益。那么这些地块夹在建成区之间，征收成本比较高，并且改造收益比较薄，市场资本不愿意进入，政府财政也负担不起，这样就形成了“看得见却动不了”的僵局。

## 三、集约利用的评价逻辑与内生动力

要把“集约”从口号转变为可测度以及可考核的对象，需要以开展重构评价体系这项工作为前提，从要素这个方面来看，建设用地集约利用的内在动力来源于人口、自然以及经济这三类要素，像政策制度、规划管制以及技术进步等外在动力会借助供需、聚集以及替代机制来作用于内在要素，会形成不同的集约类型以及水平；相应的评价不应该只局限于单一的土地要素，而是应该涵盖人口、能源以及经济要素的集约度<sup>[6]</sup>。这一框架的要点

是，并非对非建设用地进行集约，而是要提高人、地、业在空间方面的匹配效率，那些出现了人口流失情况，然而建设区却仍然在扩张的县城，即便指标再紧张，也很难说得上是开展了集约工作；那么产业呈现空心化但厂房林立的园区，即便是容积率再高，那也是一种浪费。

评价还得落实到空间分异这方面来进行考量，县域当中各个主体的功能、发展阶段以及区位条件存在着差异，土地集约利用水平在南北之间和城乡之间也有所不同，要是采用一刀切的标准，那就会把短板掩盖起来，并且还会挫伤先进地区的积极性。把评价结果与差别化管制关联起来，而不是搞平均化施策，这是破解整体水平不高问题的可行方向，目前的主要短板在于，评价大多是在学术研究方面开展的，没有嵌入县域规划编制以及年度考核的常规流程当中，导致评价与应用相脱节的现象较为常见。要是评价不与规划实施、指标分配以及干部考核挂钩，那就只是论文数字，很难去转化为实际管控的约束力。

## 四、国土空间规划框架下的管控逻辑

### （一）三区三线划定与底线约束

县域国土空间规划的核心抓手也就是三区三线，划定不应该是把各类规划进行简单叠加，而是应该在尊重已有的法定成果的基础上，首先借助生态保护重要性评价来锁定生态空间，然后凭借城镇建设以及农业生产适宜性承载能力评价方面会把城镇和农业空间进行协调，并且将各类管制分区与控制线整合成图<sup>[6]</sup>。那么这个先后次序的逻辑也就是生态优先、底线思维，也就是先开展不可侵占红线的保护工作，然后在其余空间来对城镇以及农业进行分配，而不是先确定建设区之后再对生态进行弥补。三区三线的划定工作当中，难点并非是在技术方面，而是在于开展协调工作，目前在开展现状园地规划工作时，林地以及耕地的属性存在重叠情况、重大项目的落址与基本农田发生冲突、城镇扩张的诉求和生态红线产生抵触，这些都是县域规划编制当中高频出现的矛盾。去处理这些矛盾工作，依靠的并非是部门博弈的强弱情况，而是用途决策当中有依据的规则体系，双评价也就是资源环境承载能力评价以及国土空间开发适宜性评价，给这套规则提供了技术底座，不过底座并不等同于结论，像承载力阈值、适宜性权重的确定问题，那么还得结合县域实际情况来反复开展校核工作，可能把一套参数直接套用就完事了。

### （二）城镇开发边界与弹性管控

城镇开发边界也就是约束城镇无序蔓延的关键控制线，它的属性并非纯刚性，需要兼顾建设的动态性以及不确定性，刚性方面体现在规模约束上，弹性能够体现在布局形态以及阶段性控制方面。那么以福州为例，把管控约束条件嵌入到土地利用模拟当中，凭借时空元胞自动机模型能够引导城镇、农业以及生态空间进行合理布局，并且规模能够得到控制，所划定的边界可以有效避让保护用地<sup>[7]</sup>。县域方面尤其需要运用刚性边界以及弹性布局的思路来开展工作：也就是在规划期当中把建设总量进行锁定，布局可以在预留区依照规定来进行调整，这样既能够守住底线，



同时还能留下发展的空间。那么预留区比例、开展调整程序以及进行监管权限方面的工作，是这个思路能不能落地的关键细节。要是缺乏明确的规则，弹性就会沦为随意，现实当中，有的县城借助弹性这个名义来开展扩张工作，边界划分之后又进行调整，调整之后又开展扩张，最终底线被掏空了。

## 五、县域土地资源集约利用优化路径

### （一）存量盘活与低效用地再开发

增量空间收紧了之后，存量盘活就成了开展集约利用工作的主战场，珠三角以往借助三旧改造来开展存量盘活工作，然而鉴于国土空间规划改革以及土地政策有所转变，以往的再开发模式难以契合新要求了，需要从发展理念、政策构建等方面来着手解决开发模式以及管理平台系统开展转型工作<sup>[8]</sup>。县域低效再开发比城市开展起来更难，这是因为项目收益比较薄、社会资本力量比较弱、产权比较零碎，要是只凭借市场的力量，那就很难将其撬动，可行的做法是把再开发以及产业升级、设施补短板进行捆绑，凭借综合收益来覆盖改造成本，而不是孤立地看待地块。要是把老厂区加以改造，同时将新兴产业进行导入，以及对周边道路开展更新工作，那就可以把账算过来了；要是只看单宗地容积率，那么多数项目收益平衡就会受到影响，再开展开发工作的关键在于产权以及收益分配机制，也就是包括谁来主导、收益要怎么分、历史遗留问题该如何清理等内容，这些制度方面的细节比容积率指标更加能够决定项目的成败。

### （二）全域土地综合整治与城乡融合

那么农村居民点分布散乱以及农用地呈现细碎化，这是县域开展集约利用工作的又一个症结所在，全域土地综合整治开展地类结构以及布局的调整工作，来实现农村生产生活生态空间的重构，其内在机制也就是人地业权要素协同，这样能够促进城乡要素配置均衡、空间结构调整以及功能价值统一<sup>[9]</sup>。县域是城乡融合的关键尺度，开展整治工作不能仅仅着眼于农田整理，而应该把农用地整理、建设用地整理以及生态修复统筹到一个项目包当中，这样能让整治工作既产出耕地指标，又产出产业空间，还改善人居环境。这就要求开展跨部门以及村域的协同工作，而不是只靠国土部门一家去处理相关工作，在实践当中，最大的阻力通

常是来自于权属调整以及群众意愿。要是在整治方面不落实全过程参与机制，强行去推进，那就只会埋下后续纠纷的隐患。开展整治所需资金的来源是现实当中的瓶颈，大多县域财政较为吃紧，依靠上级专项以及土地指标交易进行反哺，要是资金链出现断裂，那就会导致项目烂尾。

### （三）数字化驱动与差别化策略

数字化能够为县域土地集约利用开展提供新诊断以及驱动工具的工作，鉴于 TOE 框架来开展研究发现，县城土地资源利用效率的提升具有组织 - 技术、组织 - 环境、技术 - 环境、组织 - 技术 - 环境这四类驱动路径，各县应当依据自身条件来选用差异化路径，把数字技术建设、数字化治理以及数字经济发展等条件因素组合起来<sup>[10]</sup>。这给出了两点提示：其一，开展数字化非统一处方的工作，鉴于东中西部县域的资源禀赋以及发展阶段差异较大，要是把发达地区的路径照搬过来，那就会出现水土不服的情况；其二，数字化的价值是用于诊断而非炫耀，把土地利用的家底摸清、将低效地块识别出来，会比构建大屏更有用。县域财政以及技术能力是有限的，数字化方面应该优先开展低效用地识别、规划实施监测以及考核数据留痕的服务工作，而不是去追求花哨的展示系统。

## 六、结论

国土空间规划体系的重构给县域土地资源集约利用创造了制度上的契机，不过契机并不等同于结果，那么粗放扩张的惯性、空间错配的结构以及存量盘活的迟滞这些情况，还需要从评价方法、规划管控一直到实施机制来进行系统性的回应。那么对路径进行优化并非单线推进：三区三线也就是划定底线，城镇开发边界会对规模进行约束，低效再开发能够激活存量，全域综合整治来重构乡村空间，借助数字化工具去诊断家底，五者开展协同工作，集约才可以从口号落实到地块方面。对于县域土地集约利用来讲，真正所面临的考验，并非是规划图的线条有多么漂亮，而是它能不能对扩张冲动加以约束，并且把沉睡的存量予以激活，规划的意义最终是要把它落到地块，也就是落到每一块开展盘活工作的低效用地以及每一片开展保护工作的耕地和生态空间当中。

## 参考文献

- [1] 朱昱，于敏，李伟伟. 区域土地节约集约利用问题及规划应对——以江苏省4地为例[J]. 杭州师范大学学报（自然科学版），2020（6）：112-122.
- [2] 姜海，陈磊. 县城国土空间主体功能区土地资源空间配置效率及管制策略——以江苏赣榆为例[J]. 自然资源学报，2021，36（9）：2424-2436.
- [3] 冯丽媛，米文宝，赵金梅. 基于空间自相关的宁夏县城建设用地节约集约利用水平空间分异特征研究[J]. 中国农学通报，2019，35（29）：97-102.
- [4] 刘逸辉，彭伟斌. 异速增长视角下浙江县城城镇土地集约利用及影响因素研究[J]. 四川师范大学学报（自然科学版），2022，45（4）：543-553.
- [5] 祖健，郝晋珉，艾东，等. 基于要素视角的建设用地集约利用内生动力及评价研究[J]. 北京大学学报（自然科学版），2020，56（4）：745-754.
- [6] 丁乙宸，刘科伟，程永辉，等. 县级国土空间规划中“三区三线”划定研究——以延川县为例[J]. 城市发展研究，2020，27（5）：1-9.
- [7] 陈霆，徐伟铭，吴升，等. 国土空间规划视角下的城镇开发边界划定和空间管控体系构建[J]. 地球信息科学学报，2022，24（2）：263-279.
- [8] 向守乾，陈威，李吉庸. 从“三旧”改造到低效用地再开发——国土空间背景下珠海存量用地高质量发展探索[J]. 城市发展研究，2023，30（5）：127-136.
- [9] 孙婧雯，陆玉麒. 城乡融合导向的全域土地综合整治机制与优化路径[J]. 自然资源学报，2023，38（9）：2201-2216.
- [10] 李立清，石慧赞，李燕凌. 提升县土地资源利用效率的数字化驱动路径研究[J]. 农业经济与管理，2023（5）：50-61.



# 阿里国家大气本底观测站观测业务现状与发展研究

索朗曲珍<sup>1</sup>, 白玛曲珍<sup>1</sup>, 白玛坚增<sup>2</sup>, 索朗塔杰<sup>3</sup>, 豆永丽<sup>1</sup>

1. 西藏自治区气象信息网络中心, 西藏 拉萨 850000

2. 西藏阿里地区气象局, 西藏 阿里 859000

3. 西藏高原大气环境科学研究所, 西藏 拉萨 850000

DOI:10.61369/EAE.2026040026

**摘 要 :** 为落实中国气象局《大气本底建设指导意见》, 实现中国十六个气候关键区大气本底观测全覆盖, 按照中国气候观测网 (CCOS) 的规划布局, 中国气象局启动了西藏阿里国家大气本底站选址论证观测试验, 在狮泉河区域开展了为期两年的全要素连续观测, 填补青藏高原西部大气本底长期观测空白。本文以阿里国家大气本底站试验观测实践为基础, 从站址基础条件、观测系统配置、数据质控传输、当前业务短板等方面阐述了阿里国家大气本底管制观测业务现状, 并提出适宜阿里国家大气本底观测站点的发展策略, 旨在为我国高海拔边境地区同类大气本底建设发展以及应用提供参考。

**关 键 词 :** 阿里国家大气本底观测站; 观测业务现状; 发展

## Current Status and Development Study of the Ali National Atmospheric Background Observation Station's Operational Activities

Solang Quzhen<sup>1</sup>, Baima Quzhen<sup>1</sup>, Baima Jianzeng<sup>2</sup>, Suolang Tajie<sup>3</sup>, Dou Yongli<sup>1</sup>

1. Xizang Autonomous Region Meteorological Information Network Center, Lasa, Xizang 850000

2. Xizang Aila Meteorological Bureau, Aila, Xizang 850000

3. Xizang Plateau Atmospheric Environment Research Institute, Lasa, Xizang 850000

**Abstract :** To implement the Guidelines for the Construction of Atmospheric Baseline Stations issued by the China Meteorological Administration (CMA) and achieve full coverage of atmospheric baseline observations in China's sixteen key climatic regions, the CMA launched the site demonstration and observational experiment for the Ngari National Atmospheric Baseline Station in accordance with the layout plan of the China Climate Observing System (CCOS). Two years of continuous full-element observations were carried out in the Shiquanhe area, filling the gap in long-term atmospheric baseline observations over the western Qinghai-Xizang Plateau. Based on the experimental observation practice of the Ngari National Atmospheric Baseline Station, this paper elaborates on the current status of its observation services from the perspectives of site basic conditions, observation system configuration, data quality control and transmission, and existing operational deficiencies. Development strategies suitable for the Ngari National Atmospheric Baseline Station are proposed, aiming to provide references for the construction, development and application of similar atmospheric baseline stations in high-altitude border areas of China.

**Keywords :** Ngari National Atmospheric Baseline Station; status of observation services; development strategy

## 引言

大气本底观测站主要是对温室气体、大气臭氧、气溶胶、太阳辐射、基本气象要素等开展不受人类活动直接影响的连续定点观测<sup>[1]</sup>。大气本底观测资料是研判全球温室气体收支、气溶胶输送、区域大气化学循环的重要依据<sup>[2]</sup>。我国大气本底观测网络经过几十年的建设, 已形成覆盖东部平原、中部丘陵以及青海高原的站点布局<sup>[3]</sup>, 但藏西阿里高原长期缺少标准化国家大气本底观测点位, 无法完整捕捉西风带跨境大气输送、高原陆气交换、南亚污染物远距离传输等重要过程。阿里站地处藏西噶尔县扎西岗乡, 海拔 4272.2m, 属高原亚寒带干旱荒漠地貌, 人烟稀少、人为排放干扰极低, 具备开展区域大气本底观测天然优势。试验阶段同步搭载国产、进口两套温室气体观测设备, 配套反应性气体、气溶胶、梯度三维超声风、地面常规气象全要素监测, 是我国首个边境高海拔综合大气本底试验站点。

作者简介: 索朗曲珍 (1999.08-) 女, 藏族, 西藏日喀则, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向: 气象信息技术。

本文根据阿里站全套试验资料、运维台账等相关资料，分析阿里国家大气本底观测站观测业务运行现状，剖析现存瓶颈，并提出发展对策，助力站点正式投运后形成稳定、高质量长序列观测数据集，为“双碳”评估、青藏高原生态气候研究以及跨境大气污染溯源工作提供有价值的指导依据。

## 一、阿里国家大气本底观测站观测业务现状

### （一）基础条件与观测业务架构

#### （1）站址探测环境基础条件

阿里国家大气本底站位于西藏阿里地区噶尔县扎西岗乡东南部，距狮泉河镇11KM处（东经79° 56′ 北纬32° 31′，海拔高度4271.9米），西部有西北向东南的伊拉日居山脉，北部有拉梅拉山。台站周围山势平缓，地形开阔，下垫面主要为高原荒漠。属高原亚寒带干旱气候区，年平均降水量为70.7毫米，年平均温度为1.7℃；年平均相对湿度为30.8%。站址不属于城市规划当中，距离站址离最近的建筑物有7公里（下风口）；站址处于边境乡镇，距离边境线60公里左右。

阿里国家大气本底站观测室由两个15m<sup>2</sup>的方舱组成，放置在观测场的南面，距离观测场20米。方舱采用缓冲区与设备室分体设计，缓冲区隔绝人员活动扰动，室内恒温控制 25±5℃，

分别配置 1 匹、2 匹变频冷暖空调，配套防静电地板、专用仪器操作台、独立供电回路、视频监控、防雷接地、二氧化碳灭火装置<sup>[4]</sup>。区域基础设施配套完整，完成 4 亩临时用地征地、10kV 配电工程、100M 联通光纤专线铺设，搭建野外站点、阿里局办公楼双办公工位，可以满足 24 小时远程监控、数据处理、台账归档需求。

#### （2）全要素观测系统配置

按照国家大气本底观测规范，阿里站试验观测系统分为温室气体在线观测系统、气溶胶质量浓度在线观测系统、反应性气体在线观测系统、地面自动气象站、梯度气象观测系统五大模块，覆盖气候关键区全部核心观测要素，各系统观测要素、数据记录频率以及主要组成配置如表1所述。整套观测设备配套统一采集软件，同步实现多源设备数据归集、本地双机备份，每月采用光盘、移动存储介质完成异地双备份，落实“三处两地”数据存储安全机制。

表1 观测系统及观测要素信息

| 观测系统名称        | 观测要素                                                             | 数据记录频率       | 系统主要组成                                          |
|---------------|------------------------------------------------------------------|--------------|-------------------------------------------------|
| 温室气体在线观测      | CO <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub>                                 | 秒级           | 测量单元、样气采集与处理单元、样气选择单元、标气单元、数据采集与处理单元等           |
| 气溶胶质量浓度在线观测系统 | PM <sub>10</sub> 、PM <sub>2.5</sub>                              | 1h           | 仪器主机、切割器、采样系统                                   |
| 反应性气体在线观测系统   | O <sub>3</sub> 、C <sub>0</sub> 、SO <sub>2</sub> 、NO <sub>x</sub> | 5min         | 臭氧分析仪、一氧化碳分析仪、二氧化硫分析仪、氮氧化物分析仪、臭氧标定仪、动态校准仪、零气发生器 |
| 地面自动气象站       | 气温、气压、湿度、风向、风速、降水                                                | 参照《地面气象观测规范》 | 传感器、采集器、系统电源、通信接口及外围设备（计算机）等                    |
| 梯度气象观测系统      | 三维超声风                                                            | 参照《地面气象观测规范》 | 传感器、采集系统、供电系统、通信系统、安装辅件                         |

### （二）观测全流程运行规范与数据管理模式

#### （1）仪器运维

高原低温、多风沙环境大幅提升设备损耗速率，试验方案针对观测系统制定差异化周期性维护清单，形成常态化质保机制。标校工作严格执行周期要求，温室气体固定 6 小时标气序列运行；气溶胶每季度流量校准、半年校准膜比对；反应性气体依托零气、动态校准仪完成零点、多点斜率订正，所有标校操作同步录入标校报告书，随数据日志同步上传。

#### （2）故障处置分级响应机制

建立三级故障上报处置流程：仪器出现数据异常、流量偏移、报警停机时，当班人员第一时间现场排查；24 小时内无法修复的故障上报区装备中心，装备中心 24 小时内远程技术响应；故障持续 72 小时未恢复观测，由区观测处上报中国气象局综合观测司，全程填写《大气成分观测仪器故障维修填报表》，完整记录故障时段、现象、维修步骤、备件更换明细。试验期间因电网检修、线路故障发生多次长时间停电，断电后设备自动停机，来电后多次出现采集软件崩溃、传输中断，均按流程上报厂家远程修复。

### （三）数据采集、传输与质控体系

#### （1）数据命名与存储规范：严格执行国内大气成分交换报文

标准，温室、气溶胶、反应性气体分别采用专属命名格式<sup>[5]</sup>，文件名包含 5 位站号、世界时 UTC 时间、设备类型、观测要素编码，文本格式存储，缺测值统一标注 - 999.9；气象梯度、辐射配套独立小时报文格式，区分多类仪器字段排布规则。

（2）传输链路：依托 100M 光纤搭建站 - 区局 - 国家气象信息中心三级传输通道，观测数据实时推送省级 FTP 服务器，由省通信节点分发给国家级平台；设备运维、故障、标校记录生成 LOG 日志文件，每日定时通过气象政务邮箱、天元系统双线报送。

（3）分层质量控制：建立现场初筛、平台二次质控两级校验规则。温室气体执行光腔温压检查、水汽订正、极值阈值筛查；气溶胶采用 5 倍标准差变率检验、连续恒定数据剔除；反应性气体实施 3 倍标准差过滤、零跨多点订正。每三个月编制阶段性数据分析报告，梳理数据完整率、异常成因、设备运行短板，形成季度复盘机制。

## 二、阿里国家大气本底站观测业务现存问题

依托阿里国家大气本底站观测台账、传输统计报表、故障记

录,梳理制约观测业务稳定运行的主要问题,具体如下所述。

#### （一）供电稳定性不足,引发持续性数据缺失

阿里站点仅依托单路 10kV 国家电网供电,无独立备用储能系统,电网计划性检修、野外线路风沙破损极易造成长时间断电。停电不仅造成原始数据缺失,频繁开关机加剧分析仪、冷阱、抽气泵损耗,缩短仪器使用寿命。

#### （二）方舱温控设备适配性差,干扰温室气体观测精度

阿里夏天太阳直射较强,方舱内空调功率较小(2匹),难以维持 $25\pm 5^{\circ}\text{C}$ 的恒温要求,导致温室气体光腔温度过高造成国产温室气体无法正常运行。温室气体冷却器的蠕动泵偶尔出现温度过高现象。频繁出现过热报警,厂家备用配件物流周期长达半月,故障空窗期数据有效性大幅下降。

#### （三）高原运维人才储备薄弱,故障处置效率偏低

现有业务人员虽完成基础培训,但缺少长期高海拔设备维修实操经验,仅能完成滤膜更换、管路清洁等基础运维,仪器出现故障时解决效率较低。同时缺乏与国家局、省级业务单位的常态化技术交流机制。

### 三、优化阿里国家大气本底站观测业务发展对策

结合阿里地区大气本底观察站业务试验阶段暴露的问题,对照《大气成分观测业务运行管理暂行规定》《大气本底观测业务质量提升行动方案》,从硬件改造、运维机制、人才培养方面构建长效发展对策。

#### （一）完善供电与方舱硬件适配改造

为了保障阿里地区大气本底观测站业务的高效高质量开展,需要完善供电与方舱硬件适配改造。首先,需要增设储能备用系统。配套大容量工业储能蓄电池组以及小型光伏辅助供电,电网断电后保障 72 小时仪器恒温、数据采集持续运行,落实“台站-省级-国家”三级故障处置响应体系对供电应急的需求,规避长时间缺测;升级野外供电线路防风沙绝缘防护,定期巡检架空线缆,降低线路故障频次<sup>[6]</sup>。

#### （二）建立分层分级高原运维保障机制

针对阿里地区高原特殊环境,构建分层分级的运维保障体系。在维护策略上,实行差异化周期管理:将气溶胶采样罩和进气滤网的清洁频率由每季度一次调整为每月一次,大风及沙尘天

气过后 24 小时内完成气路全面吹扫,以减少颗粒物积聚对观测数据造成的干扰;冬季低温时段适当延长仪器预热时间,并每日增加一次零点核查;技术支持方面,采取远程与现场相结合的模式,与设备厂家签订高原专项服务协议,开通 $7\times 24$ 小时远程诊断通道。同时每季度安排工程师进站进行现场巡检和整机标定;联合瓦里关、香格里拉等国内其他成熟本底站建立定期交流学习机制。每半年开展一次交叉技术指导和仪器比对试验,以修正高低海拔间的系统观测偏差。

#### （三）构建复合型高原观测人才队伍

为加强阿里国家大气本地展观测队伍建设,可以采取分层分类、常态化的培养方式。每年安排在职人员前往内地大气本底站进行跟班实操,并本底站观测人员轮流赴气科所等区局业务单位跟岗学习,重点提升精密仪器故障诊断、多源数据综合质控以及温室气体标校比对等高级别业务能力。同时邀请探测中心和气科院专家赴阿里开展现场授课,重点围绕高原大气数据订正、跨境输送数据分析等专题进行教学。在人员管理方面,适当增加专职运维岗位,推行季度轮岗和轮休安排,以缓解长期在高海拔地区工作带来的身体压力和工作疲劳。培养既懂设备维护、又能开展大气数据研究的复合型人才,使其既能承担日常观测任务,也能参与站址论证和高原气候变化研究,促进观测与科研的深度融合。

### 四、结语

阿里国家大气本底站是我国布局在藏西边境高寒荒漠区首个综合大气本底观测点位,为期一年的选址论证观测试验完整搭建了标准化观测、运维、数据传输业务体系,站点洁净探测环境、全要素监测配置能够客观反映青藏高原西部大气本底真实状态。但是受高海拔偏远环境制约,站点现阶段仍存在供电保障薄弱、方舱温控设备适配不足、专业运维人才不足等问题,制约观测业务长期稳定运行与数据精度提升。通过采取配套光伏储能供电、方舱隔热制冷改造、建立分层分级高原运维保障机制、分层人才培养等发展对策,能够有效补齐业务短板。阿里本底站正式投运后,将填补我国西部边境大气长期观测空白,为全球气候变化研判、青藏高原生态安全保护提供科学指导。

### 参考文献

- [1] 靳军莉,周青,张勇,等.新形势下我国大气本底观测研究型业务发展概述[J].气象科技进展,2021,3(3):183-188.
- [2] 权维俊,姚波,刘伟东,等.我国大气本底观测站创新发展的思考和建议[J].科学通报,2021,66(19):2367-2377.
- [3] 车慧正,张晓春,王剑琼,等.瓦里关30年大气本底观测研究回顾和展望[J].气候变化研究进展,2025,21(2):186-197.
- [4] 赵竹君,何清,刘新春,等.中国大气本底站站址环境及部分观测要素变化特征[J].气象科技进展,2022(5):135-143.
- [5] 张勇,颜鹏,靳军莉,等.中国大气本底观测:减污降碳背景下主要大气成分变化趋势[J].气象科技进展,2022(1):19-25.
- [6] 张国庆,虎文珺,刘鹏,等.“十四五”中国大气本底基准观象台发展思路[J].气象科技进展,2023(4):96-97.

# 丽江机场鸟类与气象要素的相关性研究

张明欣, 曹凌燕\*, 李天怀

云南航空产业投资集团丽江区域机场管理分公司, 云南 丽江 674100

DOI:10.61369/EAE.2026040027

**摘 要 :** 鸟类活动与气象条件密切相关, 探究二者之间的内在联系对于机场鸟击防范工作具有重要意义。本研究以丽江机场为研究对象, 收集2020年至2024年间气象台有关气温、日最低气温、日最高气温、平均修正海平面气压、日最低修正海平面气压、日最高修正海平面气压、相对湿度等气象要素的历史数据资料, 对比历史监测记录下鸟类的种类及数量, 分析出四季中, 分别出现的鸟种及数量, 形成机场鸟击防范可参考的鸟情预判参考信息。

**关 键 词 :** 丽江机场; 鸟类种类; 鸟类数量; 气象要素; 相关性

## Research on the Correlation between Birds and Meteorological Factors at Lijiang Airport

Zhang Mingxin, Cao Lingyan\*, Li Tianhuai

Yunnan Aviation Industry Investment Group Lijiang Regional Airport Management Branch, Lijiang, Yunnan 674100

**Abstract :** The activities of birds are closely related to meteorological conditions. Exploring the intrinsic connection between the two is of great significance for the prevention of bird strikes at airports. This study takes Lijiang Airport as the research object and collects historical data on meteorological elements such as temperature, daily minimum temperature, daily maximum temperature, average corrected sea level pressure, daily minimum corrected sea level pressure, daily maximum corrected sea level pressure, and relative humidity from the meteorological station from 2020 to 2024. By comparing the types and quantities of birds in historical monitoring records, the bird species and quantities that appear in each season are analyzed, forming reference information for bird situation prediction in airport bird strike prevention.

**Keywords :** Lijiang airport; bird species; bird quantity; meteorological elements; correlation

## 引言

随着民航业的快速发展, 鸟击事件已成为威胁航空安全的重要因素之一。鸟类活动受多种环境因素影响, 其中气象条件是最为关键的自然因素之一。气温、气压、相对湿度等气象要素的变化不仅直接影响鸟类的生理活动和行为选择, 还会通过影响昆虫等食物资源的活跃程度间接改变鸟类的分布和活动强度。因此, 深入探究鸟类活动与气象要素之间的相关性, 对于提升机场鸟击防范工作的科学性和主动性具有重要意义。

丽江机场位于26.6° N, 100.2° E, 海拔高度2242.8m, 坐落于云南省丽江市古城区七河镇三义行政村, 故取名“丽江三义国际机场”(以下简称丽江机场)。丽江机场属于低纬度高原季风气候, 冬无严寒夏无酷暑, 干湿季节分明, 四季不分明, 鸟类资源较为丰富。不同季节受不同天气系统控制, 气象条件差异显著, 为研究鸟类活动与气象要素的相关性提供了良好的天然条件。2020年至2024年间, 丽江机场历史记录监测到的鸟类隶属19目38科, 共104种、59858只, 其中春季74种、夏季61种、秋季68种、冬季51种, 四季鸟类组成差异明显。了解这些鸟类在不同季节的活动规律及其与气象要素之间的关系, 对制定有针对性的鸟击防范策略具有重要的实践价值。

## 一、研究方法

通过收集丽江机场2020年-2024年间, 气象台包括气温、日

最低气温、日最高气温、平均修正海平面气压、日最低修正海平面气压、日最高修正海平面气压、相对湿度等气象要素的历史数

据资料, 计算出特定的数值, 并关联2020年-2024年间历史监测

作者简介:

张明欣(1993—), 男, 汉族, 云南华坪人, 大学本科, 助理工程师, 从事气候变化研究及航空气象服务工作。

李天怀(1997—), 女, 汉族, 云南临沧人, 大学本科, 助理工程师, 从事气候变化研究及航空气象服务工作。

通讯作者: 曹凌燕(1996—), 女, 汉族, 云南个旧人, 大学本科, 助理工程师, 从事气候变化研究及航空气象服务工作。



记录下的鸟类种类及数量，分析出四季中丽江机场鸟类与气象要素的相关性，形成机场鸟击防范可参考的鸟情预判参考信息。

## 二、研究结果与分析

### （一）历史统计情况

2020年春季至2024年冬季，丽江机场历史检测记录鸟种类共104种，59858只。其中春季共74种，13760只；夏季共61种，19563只；秋季共68种，14415只；冬季共51种，12120只。隶属19目，38科。

### （二）优势种分析

在2020—2024年历史记录数据中，由于丽江机场鸟类资源较为丰富且四季出现的优势种不同，故本研究中分别选取四个季节中数量占比超过2%的鸟种进行相关性分析。春季（3—5月）选

取小云雀、家燕、白鹡鸰、小鸺、麻雀、云雀、中白鹭7种鸟类为春季优势种，累计11968只，占春季数量86.9%；夏季（6—8月）选取家燕、麻雀、小云雀、白鹡鸰、斑文鸟、普通雨燕、戴胜、棕背伯劳、云雀、中白鹭10种鸟类为夏季优势种，累计17297只，占夏季数量88.4%；秋季（9—11月）选取小云雀、家燕、白鹡鸰、田鸫、普通雨燕、黑翅鸢、戴胜、棕背伯劳、鸽子9种鸟类为秋季优势种，累计12535只，占秋季数量86.9%；冬季（12—2月）选取小云雀、白鹡鸰、家燕、黑翅鸢、田鸫、金眶鸻、小鸺7种鸟类为冬季优势种，累计11081只，占夏季数量91.4%。

### （三）鸟类与气象要素的相关性分析

研究采用 SPSS 统计软件进行数据分析，选取气象要素中的平均气温、日最低气温、日最高气温、平均修正海平面气压、日最低修正海平面气压、日最高修正海平面气压、平均相对湿度指标与春季优势种鸟类进行了 Pearson 相关性分析，结果见表1。

表1 丽江机场春季气象要素与鸟种数量相关系数

|            | 小云雀    | 家燕      | 白鹡鸰    | 小鸺     | 麻雀     | 云雀     | 中白鹭     |
|------------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|---------|
| 平均气温       | -0.344 | 0.248   | 0.224  | -0.267 | 0.491  | 0.287  | 0.290   |
| 日最低气温      | -0.476 | 0.386   | 0.139  | -0.459 | 0.647* | 0.498  | 0.385   |
| 日最高气温      | -0.253 | 0.169   | -0.030 | -0.024 | 0.492  | 0.488  | 0.171   |
| 平均修正海平面气压  | 0.204  | -0.434  | -0.061 | 0.035  | -0.302 | -0.053 | 0.474   |
| 日最低修正海平面气压 | -0.083 | -0.579* | 0.054  | -0.387 | -0.150 | -0.168 | -0.605* |
| 日最高修正海平面气压 | 0.306  | 0.233   | 0.027  | 0.387  | 0.092  | 0.383  | 0.197   |
| 平均相对湿度     | -0.358 | 0.834** | -0.383 | 0.257  | 0.351  | 0.523  | 0.836** |

分析结果发现，丽江机场春季7种优势种鸟类对气象要素的反应是不同的，家燕与日最低修正海平面气压呈负相关，与平均相对湿度呈正相关且相关性最强；麻雀与日最低气温呈正相关；中白鹭与与日最低修正海平面气压呈负相关，与平均相对湿度呈正相关且相关性最强；小云雀、白鹡鸰、小鸺、云雀则与这几类气象要素相关性不强。

气象要素与夏季优势种鸟类相关性分析结果发现，丽江机场夏季10种优势种鸟类对气象要素的反应各有不同，小云雀与平均修正海平面气压、日最高修正海平面气压呈负相关，与日最高修正海平面气压相关性最强；白鹡鸰与平均修正海平面气压、日最低修正海平面气压、日最高修正海平面气压、平均相对湿度呈正相关，与日最低修正海平面气压相关性最强；戴胜与平均相对湿度相关性最强且呈正相关；棕背伯劳与平均修正海平面气压、日最低修正海平面气压、日最高修正海平面气压呈正相关；家燕、麻雀、斑文鸟、普通雨燕、云雀、中白鹭则与这几类气象要素相关性不强。

气象要素与秋季优势种鸟类相关性分析结果发现，丽江机场秋季9种优势种鸟类对气象要素的反应也是不同的，家燕与日最低气温相关性强呈正相关；黑翅鸢与平均相对湿度相关性强呈负相关；其余小云雀、白鹡鸰、田鸫等7种鸟类与这几类气象要素的相关性不强。

气象要素与冬季优势种鸟类相关性分析结果发现，丽江机场冬季7种优势种鸟类对气象要素的反应是各不相同的，小云雀与与日最高修正海平面气压相关性最强呈负相关；白鹡鸰与日最低修正海平面气压相关性最强呈正相关；田鸫与平均修正海平面气压

相关性最强且呈正相关；家燕、黑翅鸢、金眶鸻、小鸺与这几类气象要素的相关性皆不强。

## 三、鸟类与气象要素的相关性管理建议

有效的鸟击防范需从“应对已出现的鸟情”向“预测将发生的鸟情”转变。深度利用鸟类活动与气象要素之间的相关性规律，是实现这一转变的关键。通过构建“气象监测—风险预测—精准防控—生态治理”的闭环管理体系，可以显著提升鸟防工作的主动性、科学性和经济性。

### （一）实施精细化、季节化的鸟情预警机制

研究表明，不同鸟种对气象要素的反应具有显著的季节性和物种特异性。因此，建议建立以季节和优势鸟种为核心的动态预警模型。例如，在春季和秋季，需重点关注降雨导致的相对湿度变化，这可能会显著增加家燕、中白鹭及黑翅鸢的活动量。而在夏季，应警惕午后雷暴天气和升温影响的低气压对白鹡鸰活动的抑制，以及雷雨前后时段风险的潜在增加。冬季则需关注晴朗日出后对小云雀活动的促进作用，以及阴天对田鸫活动的影响。管理措施应从粗放式的“全天候警戒”转向基于具体气象条件与鸟种组合的“靶向预警”。

### （二）将关键气象参数纳入鸟击风险评估体系

建议将相关性分析识别出的与鸟类活动强相关的关键气象要素，如“日最低修正海平面气压”、“平均相对湿度”、“日最高修正海平面气压”等，作为鸟击风险评估模型的重要输入变量。例如，当预报显示平均相对湿度将显著升高时，系统可自动提升

对家燕、中白鹭等鸟种活动区域的监控等级和驱赶准备。通过量化气象要素与特定鸟种活动强度的相关性，可以实现从定性经验判断到定量风险评估的升级，提前部署防控资源。

**（三）依据气象要素与鸟情规律优化驱鸟作业时段**

相关性分析揭示了鸟类活动与一日内特定时间气象变化的关联。例如，夏季午后常出现日最低气压，与白鹡鸰活动受抑制相关，但雷雨前后风险可能增加；冬季日出后出现的日最高气压则与小云雀活动增加相关。建议驱鸟作业不应平均用力，而应依据这些规律进行优化，在夏季午后高温时段，可适当调整对白鹡鸰的防控强度，但需加强雷雨前后的监控；在冬季清晨，则需提前加强对小云雀等鸟种的主动驱离。这种基于因果关系的策略调整，能提升防控效率，降低运行成本。

**（四）加强生态治理与气象条件的联动分析**

鸟类活动最终受食物链驱动，而气象直接影响昆虫等食物的活跃度。相关性分析指出，家燕作为空中觅食者，其活动受气温影响显著，气温越低受影响越严重；降雨导致的湿度增加会使昆虫活动频繁，进而吸引以昆虫为食的鸟类。因此，建议在生态治理中（如割草、杀虫、水体管理）融入气象分析。例如，在预测将出现高温低湿天气时，可预判昆虫活动减少，某些鸟类的威胁自然降低；反之，在降水天气来临前，可提前加强场区及周边的虫害治理，从食物源头上降低鸟类聚集风险。

**（五）建立长期数据监测与模型迭代机制**

当前的相关性分析是基于特定期和地点的观测结果。鸟类行为、种群数量及气候模式本身都可能发生变化。建议建立长期的鸟类活动与高精度气象数据的同步监测数据库。定期（如每2-3年）对相关性模型进行复核与更新，纳入新的优势鸟种，验证原有关系的稳定性。通过持续的数据积累和模型迭代，使管理建议能够动态适应环境变化，保持其科学性和前瞻性。

**四、结论**

综合以上分析结果表明：

（1）春季受西风气流控制，机场多晴朗少云天气，极少出现强降水、降雪等天气，因平均相对湿度与家燕、中白鹭呈正相关，如若出现降雨导致相对湿度增加、昆虫活动频繁，家燕、中白鹭活动量会明显上升，尤其中白鹭主要在水域边缘觅食鱼类和水生无脊椎动物，其活动量会相对更大。

（2）夏季受西南气流控制，机场湿度大，降水多，午后至傍晚多局地性“热雷暴”，日最低修正海平面气压常常出现在午后，因与白鹡鸰呈正相关，表明雷暴及高温天气的出现对白鹡鸰活动产生抑制作用，但雷雨前后的时段风险可能增加；日最高修正海平面气压常常出现在日出后，因与小云雀呈负相关，表明清晨露水叠加当日持续升温，小云雀活动会呈现增加的模式。

（3）秋季兼有干季、雨季天气特点，日最低气温常常出现在日出前后，与家燕呈正相关，且家燕属于空中觅食者，其食物资源是飞行中的昆虫，昆虫活动受气温影响显著，表明气温越低，家燕受的影响越严重；因平均相对湿度与黑翅鸢呈正相关，如若出现降雨导致相对湿度增加、昆虫活动频繁，黑翅鸢活动量会进一步增大。

（4）冬季日照充足，湿度小，降水少，温差大，日最高修正海平面气压常常出现在日出后，与小云雀呈负相关，表明当清晨天气较为晴朗，日出升温后小云雀活动量会增加；日最低修正海平面气压常常出现在午后，与白鹡鸰呈正相关，表明持续高温对白鹡鸰活动产生抑制作用；因平均修正海平面气压与田鹭呈正相关，表明当本场冬天为多云或阴天时叠加昆虫活动受阴雨天影响显著，田鹭活动量也会随之提升。其他鸟种活动相对稳定。

**参考文献**

[1] 刘振江,王正,曹玉洁,等.基于改进CRITIC-云模型法的机场鸟击风险评价[J].生态环境学报,2025,34(1):135-144.DOI:10.16258/j.cnki.1674-5906.2025.01.015.  
[2] 张俊,张洁,高云,等.武汉天河国际机场鸟类多样性时空分布特征及鸟击防范策略[J].生态学杂志,2024,43(10):3142-3151.DOI:10.13292/j.1000-4890.202410.020.  
[3] 谷德海,黄筑,赵青山,等.全球大型鸟类持续增加背景下应加强中国鸟击防范工作[J].动物学杂志,2025(2).DOI:10.13859/j.cjz.202524121.

