



www.viserdata.com

# 自然科学研究

NATURAL SCIENCE RESEARCH

季刊

■ 主办单位: Viser Technology Pte.Ltd.

■ ISSN 3041-0584(online) 3041-0576(print)

中国知网 (CNKI) 收录期刊

RCCSE权威核心学术期刊



2025 **4**

第2卷 总第7期

## COMPANY INTRODUCTION

# 公司简介

维泽科技文化有限公司(Viser Technology Pte. Ltd.)成立于新加坡，是一家科技与文化高度融合的创新型企业。我们拥有一支具有较高文化素质、管理素质和业务素质的团队，聚焦于国际开源中英文期刊、体现文化含量与学术价值图书的出版发行。秉承“传播科技文化，促进学术交流”的理念，与国内外知名院校，科研院所及数据库建立了稳定的合作关系。坚持开拓创新，实施“跨越-融合”的发展战略，立足中国、新加坡两地，辐射全球，并于中国设立河北和重庆两个分部。我们将紧紧围绕专业化、特色化的发展道路，不断营造“有情怀，有视野，有梦想”的企业文化氛围，独树一帜，做一家“有血、有肉、有温度”的创新型出版企业。

Viser Technology Pte. Ltd. was founded in Singapore with branch offices in both Hebei and Chongqing, China. Viser focuses on publishing scientific and technological journals and books that promote the exchange of scientific and technological findings among the research community and around the globe. Despite being a young company, Viser is actively connecting with well-known universities, research institutes, and indexation database, and has already established a stable collaborative relationship with them. We also have a group of experienced editors and publishing experts who are dedicated to publishing high-quality journal and book contents. We offer the scholars various academic journals covering a variety of subjects and we are committed to reducing the hassles of scholarly publishing. To achieve this goal, we provide scholars with an all-in-one platform that offers solutions to every publishing process that a scholar needs to go through in order to show their latest finding to the world.



# 自然科学研究

Natural Science Research

2025年·第2卷·第4期(总第7期)

主办单位: Viser Technology Pte. Ltd.

I S S N: 3041-0584 (online)

3041-0576 (print)

数据库收录: 中国知网收录期刊

RCCSE权威核心学术期刊

发行周期: 季刊

收录时间: 12月

期刊网址: www.viserdata.com

投稿/查稿邮箱: viser-tech@outlook.com

地 址: 195 Pearl's Hill Terrace, #02-41,

Singapore 168976

学术主编: 马伟芳

学术副主编: Ajmal Khan

安 宁 安俊明

蔡懿苒 甘银波

张学东 吕貽忠

曹 婷 骆 辉

责任编辑: 尹小文

美工编辑: 李 亚 Anson Chee

定 价: SGD 20.00

## 本刊声明

本刊所载的所有文章均不代表本刊编辑部观点; 作者文图责任自负, 如有侵犯他人版权或者其他权利的行为, 本刊概不负连带责任。

版权所有, 未经许可, 不得翻译、转载本刊所载文章。

警告著作权人: 稿件凡经本刊使用, 如无电子版或书面的特殊声明, 即视为作者同意授权本刊及本刊网络合作媒体进行电子版信息网络传播。

## 目 录

CONTENTS

### 农林科学

- 森林病虫害综合防治技术及生态安全评估..... 许洪斌 1
- 环四明湖生态湿地修复背景下流域林草湿综合质量提升机制与对策..... 兰天瑶 5
- 物联网技术在农机精准施肥作业中的集成应用研究综述..... 新吉勒图 包文育 张春友 9
- 农林固废与生活污泥协同处理模式简介..... 查春梅 任铁真 道仁 哈尼开 张 洁 王天娇 丁 丽 王藤锦 燕国栋 朱丽•恩特马克 13
- 智慧农业机械化方面的研究进展及其应用展望..... 新吉勒图 包文育 张春友 18
- 筑牢生态屏障激活绿色动能: 乡镇林长制实践成效、存在问题及发展路径——以福清市上迳镇、新厝镇、一都镇为例..... 孙 涛 22

### 畜牧业科学

- 基层动物疫病防控体系建设现状分析及思考..... 杨 曼 27
- 兽药生产车间给排水系统设计分析..... 李 飞 王小速 31

### 化学科学

- 极化温度条件下丹参酮IIA 提取率研究..... 任智慧 孙艳文 刘明策 孙广柱 35
- DLLME-HPLC 法同时分离测定环境水样中的氯苯胺.... 张伟亚 王 丽 许宏波 徐 焯 39

### 生态与环境

- 生态修复工程对野生动物多样性恢复的影响研究..... 顾 瑞 43
- 环境监测数据质量控制与管理策略探析..... 肖金生 吴文佳 47

野奢酒店如何在自然环境中与环境高度融合 .....  
.....田 梦 杨 欣 王宇舟 51  
基于生态系统视角的 AI 赋能专业建设理论框架构建....  
赵德鹏 戴美珍 李昱材 刘恒岐 田 甜 柯昀洁 55  
制药行业高盐高有机废水处理技术研究.....  
.....廖义勇 60

## **生物科学**

---

免疫细胞体外扩增阶段的质量稳定性监测及安全性风  
险评估 ..... 刘红卫 64

## **资源与地质**

---

现代化灌区生态改造关于生态沟渠营造的分析研究  
——以安徽省鸠江汤沟灌区改造为例.....  
.....彭 静 刘草原 68  
果洛龙洼矿区综合地质特征与资源潜力研究.....  
.....苏海龙 李积财 李福明 王亚州 李得风 72

## **材料科学**

---

三自由度系统微振动的可视化研究.....  
郑 怡 韩毓锦 杨伟俊 娄雅阁 李 俊 郑兴荣 77

## 森林病虫害综合防治技术及生态安全评估

许洪斌

宽城满族自治县造字岭林场, 河北 承德 067600

**[摘要]**森林生态系统健康和稳定受森林病虫害这一重要影响因素左右且森林资源和生态环境也面临巨大威胁,文章综述森林病虫害综合防治技术发展现状并对化学防治、生物防治、物理防治等主要技术方法的优缺点和应用效果加以分析,重点探究生态调控、天敌利用、信息素诱控等生态友好型综合防治新技术的研究进展,同时就综合防治措施的生态安全性评估问题提出基于指标体系的定量评估法以全面评价防治措施的生态效益、经济效益和社会效益,研究显示将生态友好型技术和传统防治措施相结合的综合防治策略用于控制森林病虫害发生和蔓延很有效且能最大程度减少对生态环境的不良影响,以后的研究需要进一步完善综合防治技术体系并加强新型绿色防控技术的开发应用以及建立科学的生态安全评估体系,从而给森林病虫害可持续管理提供理论依据和技术支撑。

**[关键词]**森林病虫害; 综合防治; 生态友好; 生态安全评估; 可持续管理

DOI: 10.33142/nsr.v2i4.18727

中图分类号: S763

文献标识码: A

## Comprehensive Control Technology and Ecological Security Assessment of Forest Pests and Diseases

XU Hongbin

Kuancheng Manchu Autonomous County Zaoziling Forest Farm, Chengde, Hebei, 067600, China

**Abstract:** The health and stability of forest ecosystems are greatly affected by forest pests and diseases, and forest resources and ecological environment are also facing enormous threats. This article reviews the current development status of comprehensive forest pest and disease control technology and analyzes the advantages, disadvantages, and application effects of major technical methods such as chemical control, biological control, and physical control. It focuses on exploring the research progress of new eco-friendly comprehensive control technologies such as ecological regulation, natural enemy utilization, and pheromone induction. At the same time, a quantitative evaluation method based on an indicator system is proposed to comprehensively evaluate the ecological, economic, and social benefits of comprehensive control measures. Research has shown that a comprehensive prevention and control strategy that combines eco-friendly technologies with traditional prevention and control measures is effective in controlling the occurrence and spread of forest pests and diseases, and can minimize adverse effects on the ecological environment. Future research needs to further improve the comprehensive prevention and control technology system, strengthen the development and application of new green prevention and control technologies, and establish a scientific ecological security assessment system, in order to provide theoretical basis and technical support for sustainable management of forest pests and diseases.

**Keywords:** forest pests and diseases; comprehensive prevention and control; eco-friendly; ecological security assessment; sustainable management

### 引言

森林生态系统面临诸多胁迫因素,森林病虫害便是其中之一且威胁着全球森林资源可持续发展,因为联合国粮农组织(FAO)2021年全球森林资源评估报告表明全球每年大概3500万公顷森林被病虫害侵扰且直接经济损失超700亿美元。中国森林资源丰富且森林病虫害问题也得重视起来,国家林业和草原局数据发布显示2018到2022

年中国平均每年有1200万公顷森林受害且病虫害防治面积超3000万公顷并且重大林业有害生物灾害频发。全球气候变化加剧、国际贸易频繁以及人类活动干扰增多让外来入侵物种引入风险上升进而使森林病虫害发生范围变广、频率增多、危害加重且防治难度一直在加大。

传统森林病虫害防治大多依靠化学农药虽有一定防治成效但带来环境污染、生态破坏以及有害生物抗药性变

强等诸多问题。近年随着人类生态保护意识增强且可持续发展理念深化森林病虫害防治技术持续革新逐渐形成以生态安全为中心的综合防治体系该体系注重保障森林资源安全并最大程度守护生态环境使病虫害防治与生态系统健康达成双赢且不同防治措施的生态影响评估也愈发受关注如何科学客观评价防治措施的生态安全性以给合理防控策略制定提供依据是当下研究的热点与难点。所以探究森林病虫害综合防治技术发展状况评估其生态安全性对指导森林病虫害可持续管理推动森林生态系统健康维持国家生态安全有着重要理论意义与实践价值。本文想要系统整理森林病虫害综合防治技术发展情况剖析各种技术方法的利弊和应用成果并探寻综合防治措施的生态安全评估方法给森林病虫害可持续管理提供科学依据。

## 1 森林病虫害综合防治技术

### 1.1 化学防治技术

在森林病虫害防治里,化学防治是最传统的也是应用最广的技术,靠施农药直接杀死或者抑制有害生物,近些年这一技术在高效、低毒、低残留方面有了很明显的进步,2020—2023 年新型的选择性杀虫剂像酰胺类、双酰胺类和氟苯甲酰胺类等林业病虫害防治里的应用大幅增加,这些药剂靶标专一性强、用量少且对环境友好,中国林科院植物保护研究所 2022 年的调查数据显示,在松材线虫病防治中新型药剂的应用面积超总面积的 35%且平均防治效果提高了 20%、环境风险降低了 40%。

精准施药与科学用药在现代化学防治技术中越发受到重视,并且大面积森林病虫害防治方面无人机超低容量喷雾技术有了突破性应用,这一技术不但能提升作业效率、削减药液用量,而且可减轻对森林下层植被和土壤的影响<sup>[1]</sup>。2023 年林业病虫害防治统计数据显示,在中国林业病虫害防治中无人机施药技术覆盖率已达到 30%,与传统地面喷雾相比,药液用量减少 50%~70%且防治成本也降低了 25%。另外,像缓释剂型、微胶囊制剂这类新型制剂技术也让化学农药的利用率和持效期大大提高,从而减少了施药次数以及环境暴露风险。

### 1.2 生物防治技术

有益生物及其代谢产物被用于生物防治技术以控制森林病虫害,这是生态友好型防治不可或缺的一部分,并且近五年间森林病虫害防治中微生物防治剂和天敌昆虫的应用范围持续扩大。到 2023 年中国登记的林业用生物农药将近 150 种且每年应用面积超 300 万公顷,像苏云金芽孢杆菌、白僵菌、绿僵菌这类微生物制剂在防治松毛虫、杨小舟蛾等关键林业害虫时效果不错、防治效率能达到 70%~85%。国

家林草局 2022 年的数据表明,2018 年中国森林病虫害防治中生物农药占比为 15%,到了 2023 年这一比例涨至 28%。

在天敌资源开发利用上有了重要进展,像赤眼蜂、捕食螨、瓢虫这类天敌昆虫的人工繁育技术和田间释放技术有了突破,2021—2023 年中国每年释放赤眼蜂防治森林害虫的面积超 50 万公顷且防效平均在 75%以上,昆虫信息素技术的应用潜力巨大,松墨天牛、杨小舟蛾等关键林业害虫的性信息素已能工业化生产并大规模应用,研究数据显示信息素诱捕技术跟传统化学防治比起来能减少 60%~80%的农药用量并且对有益昆虫的危害也能大大降低,开发利用生态友好型生物农药是森林病虫害防治的未来方向<sup>[2]</sup>。

## 2 森林病虫害综合防治的生态影响

### 2.1 对森林生态系统的影响

森林病虫害综合防治措施对森林生态系统有多方面影响,有积极作用也有潜在风险,中国森林生态系统定位观测网络 2020—2023 年的数据显示科学施行综合防治措施可有效维持森林生态系统的稳定性与多样性,应用生物防治、物理防治这类生态友好型技术后防治区域里生物多样性指数平均提高 12%且森林生态系统服务功能评估值提升 15%~20%,而那些过度依赖化学防治的地方生物多样性指数下降了 8%~15%并且生态系统恢复周期延长了 30%~50%。

森林群落结构和功能受防治措施的影响特别明显,中国林科院 2021—2023 年在各类森林中做的对比研究显示,用综合防治策略的森林垂直结构复杂程度提高了且林下植被覆盖率增加了 20%~30%、凋落物分解速度提升了 15%、碳氮循环更活跃了,这些改变有助于森林生态系统自我调节能力以及抗病虫害能力的增强,不过研究还发现,面积大强度高的某些防治措施也许会把森林生态系统的食物网结构破坏掉从而使次生害虫爆发,国家林业和草原局 2023 年发布的森林健康评估报告点明,维护森林生态系统健康的关键是那种注重生态平衡的综合防治策略<sup>[3]</sup>。

### 2.2 对非靶标生物的影响

评估生态安全性时,森林病虫害防治措施对非靶标生物的影响是个重要考量指标,2019—2023 年的监测数据表明不同防治措施给非靶标生物带来的影响差别很大,用传统广谱性化学农药防治的地方昆虫多样性指数降低了 30%~50%、传粉昆虫数量减少了 40%~60%、土壤动物群落结构也变得简单了,而生物防治区域呢,非靶标昆虫多样性的降低幅度没超过 10%且恢复速度还很快,一般 30~45d 就能恢复到防治之前的水平,2022 年发表的一个涵盖中国主要林区的大型研究显示信息素诱控技术对非靶标生物几乎没有影响,这是当下最有生态安全性的防治技术之一。

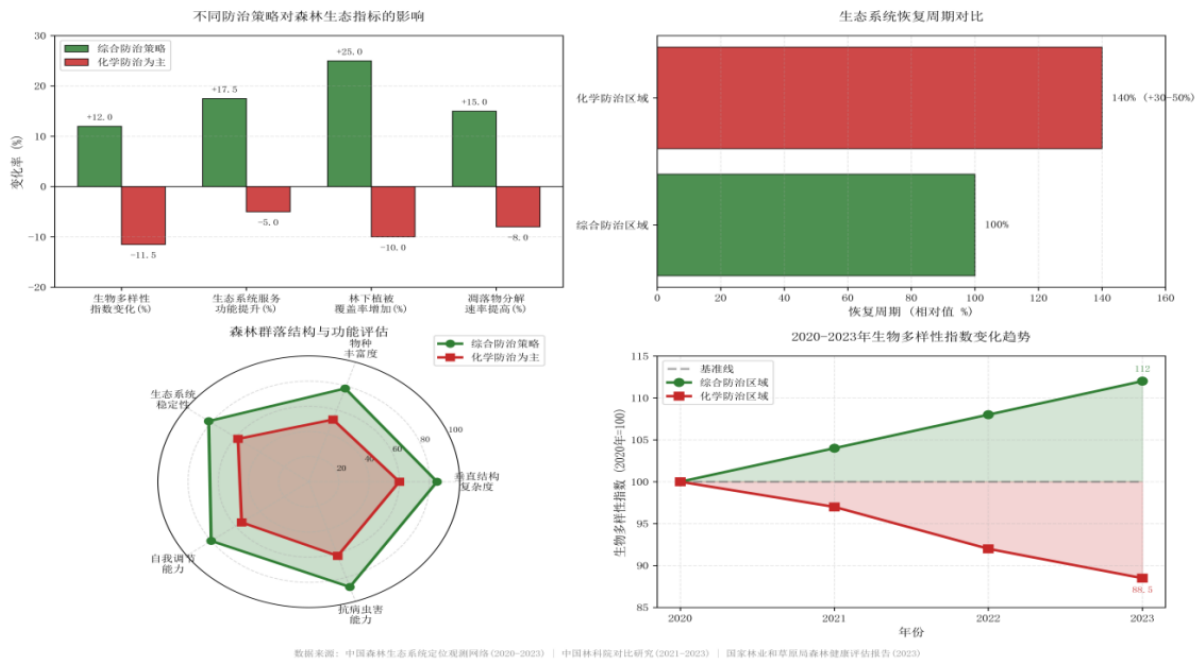


图 1 森林病虫害综合防治对生态系统影响的多维度评估

生态系统中像蜜蜂、瓢虫这类有益昆虫是关键物种，所以它们对防治措施的敏感性备受关注。中国农科院 2020—2023 年开展调查研究，结果显示新型选择性杀虫剂跟传统农药相比对蜜蜂的急性毒性降低了 70%~95%，而像 Bt 制剂这样的微生物制剂对授粉昆虫几乎没有毒性且对付鳞翅目害虫的防治效率能达到 80% 以上。物理防治措施里的太阳能杀虫灯改进了光谱设计后对益虫的误杀率明显降低，最新的智能杀虫灯设计能够把非靶标昆虫的捕获率控制在 5% 以内。上述进步显示森林病虫害防治技术朝着更精准、更生态友好的方向发展从而最大程度地减少对非靶标生物的负面影响。

### 2.3 对土壤和水环境的影响

生态安全评估的重要组成部分包括森林病虫害防治措施对土壤和水环境的影响，在中国主要林区，2020—2023 年中国环境监测站开展的监测表明，传统化学农药土壤残留时长与浓度较五年前有下降但依旧是主要环境风险因素，因为高毒农药在土壤里的半衰期能达到 30~90d，会显著抑制土壤微生物群落使土壤酶活性平均下降 25%~40%，而像新型低毒农药和生物农药这类则不同，在土壤中降解速度较快，半衰期一般在 7~15d 以内，对土壤生物活性影响小且持续时间短。

水环境受防治措施影响主要体现在农药流失与淋溶上，南方林区 2021—2023 年的水质监测数据显示，常规喷雾施药后降雨时林区小流域水体检出农药概率为

45%~65%，浓度水平跟用药量、地形和降雨强度关系紧密，而像精准靶向喷施、缓释剂型这类改进的施药技术可大幅减少农药流失，水体检出率能降低 50% 还多，生物防治和物理防治措施对水环境污染几乎没有，是水源保护区森林病虫害防治的首选技术，中国林科院 2023 年发布的研究成果表明，综合运用多种生态友好型防治技术，不但能将森林病虫害防治给水环境带来的风险降 80% 以上，还可保持较高的防治效果。

## 3 森林病虫害综合防治的生态安全评估

### 3.1 评估指标体系

科学合理地构建森林病虫害综合防治生态安全评估的指标体系很重要，因为这能全面体现防治措施给生态环境、经济发展以及社会稳定带来的综合影响，在森林生态系统的完整性与可持续性原则指导下，本研究构建起涵盖生态效益、经济效益、社会效益这三个维度的评估指标体系（如表 1 所示），其中生态效益指标着重查看防治措施对森林生态系统结构和功能的影响，例如生物多样性、非靶向生物影响、生态系统恢复能力之类的，而经济效益指标聚焦于防治成本、防治效果、森林资源保护价值，社会效益指标涉及人类健康风险、公众接受度、技术适用性等方面，中国林业和草原局发布数据显示，2018—2022 年中国森林病虫害每年平均发生面积超 800 万公顷，所以有效的生态安全评估在指导综合防治上意义非凡。

**表 1 森林病虫害综合防治生态安全评估指标体系**

一级指标	二级指标	指标描述	权重
生态效益	生物多样性影响	防治措施对森林生态系统物种丰富度和群落结构的影响程度	0.15
	非靶向生物影响	防治措施对天敌、传粉者等有益生物的危害程度	0.12
	生态系统恢复能力	防治后森林生态系统自我修复和恢复的速度和质量	0.13
经济效益	防治成本	单位面积防治所需的人力、物力和财力投入	0.10
	防治效果	病虫害种群控制程度及持续时间	0.15
	森林资源保护价值	防治措施所保护的林木及生态服务价值	0.10
社会效益	人类健康风险	防治措施对人类健康的潜在危害	0.10
	公众接受度	当地社区和公众对防治技术的认可程度	0.08
	技术适用性	防治技术在不同条件下的适应性和推广价值	0.07

### 3.2 评估方法

层次分析法 (AHP) 与模糊综合评价法相结合的方法被用于森林病虫害综合防治生态安全评估以克服单一评估方法的局限性, 其评估有四个主要步骤, 首先借助专家咨询和层次分析法确定评价指标体系及其权重来明确各指标相对重要性, 其次构建模糊评价矩阵并将定性和定量指标经隶属函数转成可比较的模糊量, 然后开展多层次模糊综合评价从单指标评价至一级指标综合评价再到最终综合安全指数的计算, 最后依据评价结果划分安全等级, 生态安全状况一般会被划分为优秀 (0.8~1.0)、良好 (0.6~0.8)、一般 (0.4~0.6)、较差 (0.2~0.4) 和危险 (0~0.2) 这五个等级<sup>[4]</sup>。

为了提高评估的科学性和可操作性, 在具体实施时采用标准化与归一化处理让不同量纲的指标具备可比性。定量指标例如生物多样性指数、非靶向生物死亡率等的数据来源于实地监测和实验, 而像公众接受度、技术适用性这样的定性指标数据则靠问卷调查和专家评分得到, 并且评估时还考量了时间维度, 设定了短期 (1 年内)、中期 (1~3 年)、长期 (3 年以上) 的评估周期以便全面把握防治措施的生态安全动态变化趋势。

### 3.3 案例分析

本研究为验证所构建生态安全评估体系的实用性, 选取中国南方集体林区 2019—2021 年实施的松材线虫病综合防治项目 (该项目建设采用化学防治、生物防治和林分结构调整相组合的综合防治策略) 作为分析案例, 由于国家林业和草原局数据显示松材线虫病是我国危害极为严重的森林病虫害之一且 2021 年全国受灾面积超 15 万公顷、

每年造成的经济损失超 50 亿元, 所以针对这个项目依照构建好的评估指标体系收集相关数据, 如防治区域内生物多样性监测数据、非靶向生物影响调查结果、防治成本核算、防治效果评估以及当地民众满意度调查等。

采用层次分析与模糊综合评价方法计算后, 综合防治项目中生态效益指数达 0.72、经济效益指数为 0.68、社会效益指数为 0.65 且综合安全指数最终是 0.69, 处于“良好”安全等级。经深入分析可知, 该项目在生物多样性保护以及森林资源价值保护上做得不错, 但非靶向生物保护和公众接受度有待提高, 并且所用部分化学农药给天敌昆虫和水生生物带来一定负面影响, 此外由于防治成本高, 导致部分林农持续施行综合防治措施的意愿不强。这个案例分析显示, 依据多维指标体系进行的生态安全评估能有效地甄别出综合防治措施的长处和短处, 从而为优化防治策略给予科学依据。

## 4 结论

森林病虫害综合防治生态安全评估的理论框架和方法体系由本研究构建起来, 从而提供了科学评价防治措施环境友好性和可持续性的技术支撑。研究显示, 有效的生态安全评估需综合考量生态、经济、社会这三个维度的指标并用层次分析、模糊综合评价等方法进行量化分析。案例分析的结果表明, 这个评估体系能较全面地反映综合防治措施的生态安全状况、识别出潜在风险, 给优化防治策略提供决策方面的参考<sup>[5]</sup>。以后的研究要再进一步完善指标体系, 提升评估方法的精确度和实用性, 并且要加强不同类型森林病虫害防治措施在生态安全评估方面的实践工作。近五年的研究数据显示, 森林生态系统健康管理从传统的“重防治轻评估”正在转变为“防治与评估并重”, 这一趋势对森林资源可持续利用以及生态系统服务功能持续发挥很重要。

### 【参考文献】

- [1]张旭.森林病虫害的发生特点及综合防治技术[J].农业灾害研究,2021(7):27-28.
- [2]曾莉梅.浅析森林病虫害的发生特征及综合防治技术[J].种子科技,2018(5):90-91.
- [3]张涛,姬雪芹,徐玉坤,等.浅析森林病虫害的发生特点及综合防治技术[J].现代农村科技,2018(9):38.
- [4]樊巍,苑静,赵波.森林病虫害的发生特点及综合防治技术[J].农业与技术,2019(23):76-77.
- [5]潘树峰.森林病虫害的发生特点及综合防治技术[J].种子科技,2021(9):84-85.

作者简介: 许洪斌 (1990.11—), 单位名称: 宽城满族自治县造字岭林场, 毕业学校: 河北农业大学, 专业: 林业。

# 环四明湖生态湿地修复背景下流域林草湿综合质量提升机制与对策

兰天瑶

北京正和恒基滨水生态环境治理股份有限公司, 北京 100020

**[摘要]**流域林草湿生态系统在维系区域生态平衡以及保障水资源安全方面发挥着关键作用, 是重要的承载主体, 所以其综合质量得以提升已然成为生态文明建设里极为重要的一项核心任务。文章选取浙江省宁波市余姚市环四明湖生态湿地修复工程当作实例, 全面且细致地探讨在流域这个尺度之下林草湿综合质量提升所涉及的理论依据、当下存在的各类问题以及具体的实施途径。借助构建在基于自然的解决方案理念之下的三级湖滨生态缓冲体系, 并且将生态修复、污染管控还有景观优化等一系列技术手段加以整合集成, 以此达成林草湿生态功能和社会服务价值同步增强的目标。

**[关键词]**流域生态修复; 综合质量提升; 林草湿生态系统

DOI: 10.33142/nsr.v2i4.18726

中图分类号: X82

文献标识码: A

## Mechanism and Countermeasures for Improving the Comprehensive Quality of Forest, Grass and Wetland in the Watershed under the Background of Ecological Wetland Restoration around Siming Lake

LAN Tianyao

Beijing Zhenghe Hengji Binshui Ecological Environment Treatment Co., Ltd., Beijing, 100020, China

**Abstract:** The watershed forest grass wetland ecosystem plays a key role in maintaining regional ecological balance and ensuring water resource security, and is an important carrier. Therefore, improving its comprehensive quality has become an extremely important core task in the construction of ecological civilization. The article selects around the Siming Lake Ecological Wetland Restoration Project in Yuyao City, Ningbo City, Zhejiang Province as an example to comprehensively and meticulously explore the theoretical basis, current problems, and specific implementation approaches involved in improving the comprehensive quality of forest, grass, and wetland at the watershed scale. With the help of a three-level lakeside ecological buffer system built under the concept of nature based solutions, and integrating a series of technical means such as ecological restoration, pollution control, and landscape optimization, the goal of synchronously enhancing the ecological functions and social service value of forest and grass wetlands can be achieved.

**Keywords:** watershed ecological restoration; comprehensive quality improvement; forest grass wetland ecosystem

林草工程项目涉及多个领域的知识和技术, 需要综合考虑地形、气候、土壤等因素, 以确保工程实施的科学性和有效性。流域林草湿生态系统具备水源涵养、水质净化以及生物多样性保护等诸多生态功能, 还可以促进当地经济的发展, 提高居民的生活水平, 实现生态与经济的双赢。近些年来, 伴随着城镇化进程以及农业集约化的发展态势, 我国相当多的流域生态系统都遭遇到了面源污染不断加剧、生境出现破碎化状况以及功能呈现退化趋向等一系列的挑战。环四明湖处于浙江省宁波市余姚市境内, 它在四明山区域当中, 是极为重要的一处生态屏障, 同时也是一处十分关键的水源地, 然而却面临着面源污染方面的问题、人为干扰所带来的影响以及基础设施不够完善等

诸多难题。

### 1 流域林草湿综合质量提升的理论基础

流域林草湿综合质量得以提升, 其理论根基主要来源于生态系统恢复生态学以及景观生态学的相关原理, 特别着重于应用基于自然的解决方案。在国际上, 针对流域生态修复展开的研究可追溯到 20 世纪 70 年代, 在欧洲, 借助构建湖滨缓冲带的方式来对农业面源污染加以控制, 就像德国的莱茵河行动计划, 其采用了植被过滤带来净化地表径流, 进而使得河流水质提高了 30% 以上。在北美地区, 主要聚焦于湿地生态功能的修复工作, 美国佛罗里达州所实施的湿地银行机制, 凭借市场化的手段达成了湿地面积和质量的动态平衡状态。澳大利亚的墨累达令流域,

通过开展生态补水以及对农业退水进行管控等举措,恢复了该流域的水文连通性。在国内,流域修复实践活动大多是以政府为主导的,近些年来逐渐形成了“生态修复+产业融合”的模式,浙江省作为生态文明建设的先行示范区,出台了《浙江省湖库滨生态缓冲带划定及生态修复技术指南》,以此推动湖库周边林草湿系统的整治工作。江苏太湖流域运用“控源截污、生态修复、景观提升”这三步走的策略,构建起了环湖的生态屏障。云南滇池流域则结合生态导向开发模式,把生态修复和旅游开发相互结合起来,实现了生态效益与经济效益的双赢局面。这些国内外的实践经验,为流域林草湿综合质量的提升给予了丰富的理论支撑以及技术方面的积累。

## 2 流域林草湿综合质量现状及问题分析

### 2.1 林草湿资源分布与结构特征

环绕四明湖的区域,其林草湿资源的分布有着典型南方丘陵地区库塘湿地的特点。该区域的生态系统包含了湖泊、湿地、林地以及草地等多种不同的生境类型。项目所涉及的范围达到了 61.74 公顷,主要围绕四明湖来开展相关工作,涵盖了湖滨区、净化缓冲区还有陆域管控区等三级湖滨生态缓冲空间,同时也包括雅贤永石线栖息型湿地、镇北雨水湿地以及红杉林湿地等一些重点的湿地区块。林草湿资源在空间分布方面呈现出较为明显的圈层结构,其中湖滨区属于水位变幅区域,是生态保护的关键核心地带;净化缓冲区肩负着污染拦截以及生境优化方面的功能;而陆域管控区则着重于源头治理以及人为活动的调控。这样的分布与结构特点,一方面彰显出自然生态系统的层次特性,另一方面也给综合质量的提升奠定了空间方面的基础。不过,由于历史上的人为干扰因素和自然演替过程相互交织的作用,该区域的林草湿资源遭遇到了生境破碎化以及连通性有所欠缺的问题,这对生态系统整体功能的充分发挥形成了制约。

### 2.2 生态系统功能退化与人为干扰因素

环四明湖流域林草湿生态系统功能出现退化情况,这种退化主要呈现为水质净化能力有所降低、生物多样性数量减少以及水土保持功能变弱。其退化的原因主要是因为面源污染以及无序的人为活动这两方面因素造成了干扰。周边的城镇以及农田所产生的面源污染,给湖库带来了潜在的水质方面的风险<sup>[1]</sup>。在农业活动开展的过程中,化肥和农药使用过量,使得氮磷等营养元素随着地表径流进入到水体当中,进而引发了水体出现富营养化的状况。人为无序地进入湖滨空间,致使湿地出现了踩踏以及垃圾污染等一系列问题,这些问题对生物的栖息环境造成了严重的

干扰,也对湿地生态系统自然演替的进程产生了影响。而且环湖绿道体系没有实现贯通,基础设施也不够健全,这些情况制约了林草湿景观的连续性体验,使得生态系统的社会服务价值受到了降低。区域的山水文化资源没有得到充分的整合,生态旅游品牌也有待进一步升级,这又进一步削弱了林草湿生态系统的文化赋能潜力。

## 3 流域林草湿综合质量提升路径与方法

### 3.1 生态修复与植被恢复技术

生态修复以及植被恢复方面的技术,乃是促使流域林草湿综合质量得以提升的关键手段。其中最为关键之处就在于要采用那种基于自然本身的解决方案,尽可能地优先选用本地物种来构建起植被群落,尽量减少人为的干预操作,从而推动生态系统朝着可持续且能够达成平衡发展的方向去演进。就环四明湖项目的实际情况而言,在护岸工程环节当中,采用了诸如石笼扦插还有活柴捆这类生态工法,如此一来,既能稳固住岸线,又能给各类生物留出可供栖息的空间,进而逐渐演化成为植被能够生长的天然培养基,实现了从单纯依靠工程防护到能够依靠生态自身完成自愈这样一个自然而然的过渡过程。而在湿地修复工作开展的过程中,刻意保留自然滩地以及季节性积水区,说到底其实就是对湿地水文节律的一种还原操作。自然滩地会随着水位的不断涨落而呈现出干湿交替的状态,这就为有着不同生活习性的各类生物创造出了多样化的生存环境。其中,高滩区域适宜生长那些耐旱的草本植物,进而便成为了水鸟外出觅食的所在区域;中滩所处的沼泽化地带,则是两栖动物进行繁殖活动以及养育幼崽的理想之地;至于低滩的浅水区,那可是为沉水植物以及浮游生物都提供了很好的生存空间所在。

### 3.2 水文连通与水资源调控策略

水文连通以及水资源调控策略,其关键在于恢复流域的自然水文过程。具体做法包括疏通那些被阻断的支流,拆除那些不合理设置的堤坝等,以此让水流能够依照自然的路径自由地流淌起来,进而带动营养物质的循环运转、能量的传递转化以及物种的迁移活动,促使湿地生态系统重新绽放出自然的生机与活力<sup>[2]</sup>。环四明湖项目着手构建起三级湖滨生态缓冲体系,借此达成了水资源的逐级净化目标,并且实现了水资源的合理调配。在湖滨区域,着重对水位变幅区的生态空间予以保护,同时针对局部空间实施必要的生态修复举措,以此来提升并强化整个湖滨带所具备的生态性以及稳定性,进一步完善湿地的调蓄涵养功能。在净化缓冲区域,采取强化净化方面的措施以及引流导流等相关举措,从而形成

一个能够有效缓冲上游污染的净化隔离屏障,或者着力构建植被缓冲带,并且积极开展生物栖息地的修复工作,推动滨湖生态功能得以充分地发挥出来。就陆域管控区域而言,主要是开展源头治理相关工作,尽力降低自身的污染排放强度,并且凭借一定的空间距离来有效缓冲外源污染所带来的影响强度。

### 3.3 生物多样性保护与栖息地优化

生物多样性的保护以及栖息地的优化,其主要目标在于借助综合且细致的生态空间优化举措,去修复各种不同的生境,并且进一步完善与之相关的各项设施,进而打造出一个生态功能较为完备并且生物种类颇为丰富的栖息型湿地。环四明湖项目依据湖区典型物种的栖息偏好情况,针对滨湖以及陆域的生态空间展开优化工作,营造出垂直方向上呈现多层状态、水平方向上具备丰富异质性的生境,以此为生物给予多样化的生存环境。具体所采取的措施涵盖了对入侵植物予以清理,以此减少其对本地生态系统产生的干扰;开展红杉林的补植工作,同时进行灌草植物的修复事宜;另外还有季节性淹没灌草湿地的修复操作、复层林地的修复以及水生植物的修复,通过这些举措来构建起一个相对稳定的生态群落。滩地生境经过优化之后,能够为生物提供较为适宜的栖息场所,而农田实施生态化改造,则可减少农业面源污染给湿地所带来的影响。与此新建的生态隔离带一方面能够起到阻滞污染的作用,另一方面也具有疏导人流的功能,从而有效减少外界的干扰,另外还设置了标识以及展示牌,既可用于生物资源的探索活动,也可用于展示相关内容,同时还兼具一定的科普教育功能。

### 3.4 生态监测与适应性管理机制

生态监测以及适应性管理机制,在保障流域林草湿综合质量提升效果能够持续方面,属于极为关键的一个环节。要对三级缓冲带的生态功能展开长期跟踪,比如关注其水质净化效率还有生物多样性的变化情况,进而建立起动态优化机制,以此来提升修复措施所具备的精准性以及可持续性<sup>[3]</sup>。就环四明湖项目而言,在具体实施进程当中,会结合实地开展的调研情况,同时参照施工前后的相关数据,来对生态修复的实际成效加以评估,进而构建起一个多层次的监测体系,这里面涵盖了水质指标、生物多样性指数以及生态系统服务价值等多个不同的维度。适应性管理机制会依据监测所得到的结果,及时对生态修复以及污染管控的各项措施做出相应的调整,从而确保项目所设定的目标可以顺利达成。就好比说,通过定期去监测地表径流污

染以及农业面源污染所发生的变化,进而对植被缓冲带还有生态湿地的设计参数予以优化,以此来进一步增强对于污染物的拦截能力以及净化效率。

## 4 综合质量提升效益评估体系构建

### 4.1 生态效益评估指标

生态效益评估指标涵盖了诸多方面,像水质改善的程度、生物多样性提升的水平以及水土保持的效果等。在环四明湖项目的推进过程当中,凭借构建起三级湖滨生态缓冲体系,同时施行多源污染协同管控的相关举措,使得入湖污染物削减的比率达到百分之四十以上,切实有效地将水质污染的风险降了下来。对于生物多样性的评估,是借助物种丰富度以及栖息地质量指数来体现的,经过这些年的努力,项目区域内鸟类、两栖动物还有植物的种类以及数量都呈现出明显的增长态势。而水土保持效果的衡量,则是依靠植被覆盖度、土壤侵蚀模数等指标来进行的,随着生态修复工程的开展与落实,坡面的稳定性以及水土固持的能力也都得到了进一步的强化。

### 4.2 社会经济效益评估指标

社会经济效益评估指标包含生态旅游收入、文化遗产保护以及公众满意度等方面内容。环四明湖项目借助打造像四明湖寻心十六境这类生态景观节点,来贯通环湖绿道并完善基础设施,以此推动生态旅游以及文化品牌的升级发展。旅游收入的增长以及游客数量的增多,直接体现出项目的经济效益,而文化遗产保护方面,通过整合和展示历史文化资源,提升了区域文化软实力。从公众满意度调查来看,游客与当地居民都对生态环境的改善以及休闲体验的提升给予了很高的评价。这些指标一方面体现了林草湿生态系统的社会服务价值,另一方面也为探索生态产品价值实现路径提供了相应的数据支撑。

### 4.3 生态系统服务价值量化方法

生态系统服务价值的量化方法是综合运用多种手段来开展评估工作的。具体而言,会采用市场价值法、替代成本法以及意愿调查法等方法,对林草湿生态系统的直接价值以及间接价值加以评估。在环四明湖项目的实施过程中,通过对水源涵养、水质净化以及生物多样性保护等一系列服务的价值予以量化,从而揭示出生态修复所能带来的经济效益。举例来讲,水质净化服务的价值是通过减少污水处理成本的方式来计算的;而生物多样性保护服务的价值,则是借助生态旅游收入以及物种价值评估这两种途径来进行估算的<sup>[4]</sup>。与此还会采用价值转移法,把国内外那些与之类似的研究成果应用到本地的评估当中,以此提

高量化结果所具有的可靠性。这样的方法一方面能够为生态补偿政策的制定提供相应的依据,另一方面也有助于推动生态效益与经济社会效益实现协同提升。

#### 4.4 多目标协同优化模型

多目标协同优化模型致力于把生态效益以及社会经济这两方面的目标整合到一起。借助数学规划还有系统仿真等一系列的方法,去探寻能够让流域林草湿综合质量得以提升的最为理想的方案。环四明湖项目依照多目标决策理论搭建起了一个目标函数,这个目标函数涵盖了水质改善、生物多样性保护以及旅游发展等多个方面。依靠像资源可用性以及技术可行性这样的约束条件来求解出 Pareto 最优解集。从模型的应用所得到的结果来看,通过对生态修复以及污染管控措施的优先级做出相应的调整,是能够达成生态和社会经济目标之间的平衡的。就好比在污染管控类的工程项目当中,要是优先去实施净化缓冲区的建设工作,那么就能够较为迅速地提升水质状况;而在生态修复类的工程项目里,要是着重对栖息地加以优化的话,那么便能够在较长的时间跨度内有效地增强生物多样性。这样的模型无疑给流域的综合治理赋予了一种科学的决策工具。

#### 5 结束语

流域林草湿综合质量的提升,得靠生态修复、污染管控、景观融合以及文化赋能等诸多路径一起协同推进才行。

环四明湖工程借助三级缓冲体系还有分类管控举措,达成了生态功能和社会服务价值的协同提升效果,给同类区域给出了能复制的经验做法。今后要完善生态系统监测评估体系,持续对生态功能变化予以跟踪,进而建立起动态优化的机制。进一步深化生态产品价值实现的具体路径,去探索林草湿碳汇以及生态教育这类增值服务。强化技术集成以及示范推广工作,把圈层保护加上分类修复再加文旅融合的经验归纳提炼成能复制的模式,给南方多山地区的生态系统修复提供参考借鉴。

#### [参考文献]

- [1]李育才.甘肃省森林草原湿地保护修复专题支撑研究生生态产品价值转换实现机制浅谈[J].甘肃林业,2025(1):7-9.
- [2]陶冀.主流林草湿荒调查监测评价方法的应用研究[J].中国林业产业,2025(5):59-60.
- [3]李锡中,王文霞.林草湿生态系统服务价值评估与管理对策研究[J].中国林业产业,2025(7):69-70.
- [4]陈书黎,黄维新,范少军,等.舒城县林草湿生态系统外来入侵物种的调查与研究[J].安徽林业科技,2025,51(4):31-39.

作者简介:兰天瑶(1989.9—),毕业院校:河北农业大学,所学专业:森林经理,当前就职单位:北京正和恒基滨水生态环境治理股份有限公司,职务:林业设计总监,职称级别:中级工程师。

## 物联网技术在农机精准施肥作业中的集成应用研究综述

新吉勒图<sup>1</sup> 包文育<sup>2,3</sup> 张春友<sup>2</sup>

1. 通辽市农牧业装备发展中心, 内蒙古 通辽 028000

2. 内蒙古民族大学工学院, 内蒙古 通辽 028000

3. 蒙东高寒经济特色作物智能农机装备内蒙古自治区工程研究中心, 内蒙古 通辽 028000

**[摘要]**在农业现代化进程中, 农机精准施肥是实现农业绿色、高效发展的关键举措, 而物联网技术的集成应用为其提供了重要技术支持。文章围绕物联网技术在农机精准施肥作业的应用展开综述, 首先阐述农机精准施肥的重要性, 接着分析当前农机精准施肥面临的现有问题与挑战, 随后梳理国内外相关研究进展, 最后总结研究结论并对未来发展进行展望。研究表明, 物联网技术可有效解决传统施肥模式的弊端, 推动农机精准施肥向智能化、高效化发展, 但目前仍存在技术、成本、推广等方面的问题, 未来需进一步突破技术瓶颈、降低应用成本、加强推广普及, 以促进农业可持续发展。

**[关键词]**物联网技术; 农机; 精准施肥; 技术现状; 发展趋势

DOI: 10.33142/nsr.v2i4.18725

中图分类号: S147.2

文献标识码: A

## Review of the Integrated Application of Internet of Things Technology in Precision Fertilization Operations of Agricultural Machinery

XINJI Letu<sup>1</sup>, BAO Wenyu<sup>2,3</sup>, ZHANG Chunyou<sup>2</sup>

1. Tongliao Agricultural and Animal Husbandry Equipment Development Center, Tongliao, Inner Mongolia, 028000, China

2. School of Engineering, Inner Mongolia Minzu University, Tongliao, Inner Mongolia, 028000, China

3. Inner Mongolia Mongolian East Cold Economic Characteristic Crop Intelligent Agricultural Machinery Equipment, Inner Mongolia Autonomous Region Engineering Research Center, Tongliao, Inner Mongolia, 028000, China

**Abstract:** In the process of agricultural modernization, precision fertilization of agricultural machinery is a key measure to achieve green and efficient development of agriculture, and the integrated application of Internet of Things technology provides important technical support for it. The article provides an overview of the application of Internet of Things technology in precision fertilization of agricultural machinery. Firstly, it elaborates on the importance of precision fertilization of agricultural machinery. Then, it analyzes the existing problems and challenges faced by precision fertilization of agricultural machinery. Finally, it reviews the relevant research progress at home and abroad. Finally, it summarizes the research conclusion and looks forward to future development. Research has shown that Internet of Things technology can effectively solve the drawbacks of traditional fertilization models and promote the development of intelligent and efficient precision fertilization in agricultural machinery. However, there are still problems in technology, cost, and promotion. In the future, it is necessary to further break through technological bottlenecks, reduce application costs, and strengthen promotion and popularization to promote sustainable agricultural development.

**Keywords:** Internet of Things technology; agricultural machinery; precision fertilization; technical status; development trend

### 1 农机精准施肥的重要性

农业机械化有助于实现资源的节约利用。机械化播种和施肥设备可以精确控制种子和肥料的用量, 避免了人工操作时的浪费, 提高了资源的利用效率。例如, 精准施肥技术通过土壤检测和计算机控制系统, 根据不同地块的土壤肥力和作物需求, 精确施加适量的肥料, 减

少了肥料的过量使用, 降低了农业生产成本, 同时也减少了对环境的污染。农业生产中的精准施肥技术是优化农田管理、提升作物产量和质量、实现资源高效利用的重要手段。传统施肥模式通常依赖经验判断, 往往导致肥料投入不足或过量, 这不仅给环境带来了潜在污染风险, 还影响了作物健康生长, 降低了经济效益。精准施

肥技术通过感知作物生长环境、实时监测土壤及空气参数,根据作物生长周期的养分需求规律制定科学的施肥策略,使肥料用量和投入时机达到最优,实现了高效化、精细化的管理。在这种施肥模式中,物联网技术扮演了关键角色,通过部署土壤湿度、温度、营养成分等多种传感器,精准采集土壤和作物环境数据,结合人工智能算法对采集的数据进行分析,为施肥提供数据支撑与决策依据。物联网技术不仅有效提高了农业生产的效率,还通过减少肥料浪费、提升作物健康水平和经济产出,显著推动了农业的可持续发展<sup>[1]</sup>。因此,大力发展农机精准施肥对于实现农业高质量发展具有重要的现实意义和战略意义。

## 2 农机精准施肥的现有问题与挑战

然而,在农机精准施肥发展过程中,仍面临诸多问题与挑战,如技术适配性不足、成本较高、推广难度大等。物联网技术凭借其数据采集、传输、处理和控制的优点,为解决这些问题提供了有效途径。

### 2.1 技术层面问题

当前,农机精准施肥在技术方面存在诸多不足。一方面,数据采集精度有待提升。传感器受环境影响较大,测量数据存在误差,施肥决策精准度下降。无线传输在复杂地形条件下信号稳定性较差,数据丢失和延迟影响施肥效果。数据处理能力不足,整合分析能力有限,难以提供高效、精准的施肥方案,影响智能施肥的应用推广<sup>[2]</sup>。例如,部分土壤养分传感器在检测土壤氮、磷、钾含量时,受土壤湿度影响较大,检测结果误差可达 10% 以上。另一方面,技术集成度不高。农机精准施肥涉及传感器技术、定位技术、通信技术、控制技术等多种技术,目前这些技术之间的融合程度较低,各技术模块之间缺乏有效的协同工作机制,导致精准施肥系统整体运行效率不高,难以充分发挥精准施肥的优势<sup>[3]</sup>。

### 2.2 成本层面问题

集成先进技术的智能农业机械由于研发成本高昂,导致其产品价格居高不下<sup>[4]</sup>。一套完整的物联网农机精准施肥设备,包括高精度传感器、智能控制器、变量施肥机、定位设备等,价格通常在数万元甚至十几万元,对于小规模种植农户而言,难以承担如此高昂的购置费用。以我国北方地区常见的小麦种植农户为例,户均种植面积约 10 亩,购置一套基础的物联网精准施肥设备成本占其年均农业收入的 30% 以上。其次,设备维护成本高。物联网设备的核心部件如传感器、控制器等,在长期使用过程中容易损坏,且维修更换费用较高,同时设备还需要定期进行

校准、调试,也需要投入一定的人力和物力成本,进一步增加了农户的经济负担。

### 2.3 推广与应用层面问题

在推广与应用过程中,农机精准施肥面临诸多障碍。一是农户认知水平不足。大部分农户长期采用传统施肥模式,对农机精准施肥的优势和原理了解较少,存在抵触心理,不愿意尝试新的施肥方式。二是技术服务体系不完善。目前,针对农机精准施肥的技术服务团队数量较少,专业技术人员匮乏,无法为农户提供及时、有效的技术指导和售后服务。当农户在设备操作、故障排查、施肥方案制定等方面遇到问题时,难以得到专业帮助,影响了农机精准施肥技术的正常应用。三是区域发展不均衡。在我国东部经济发达地区,农机精准施肥技术推广力度较大,应用较为广泛;而在中西部经济欠发达地区,由于经济条件、基础设施等方面的限制,技术推广进展缓慢,应用普及率较低,进一步加剧了区域农业发展的差距。

## 3 物联网技术在农机精准施肥中的国内外研究进展

### 3.1 国外研究进展

国外施肥机构的类型与发展现状呈现出多元化、专业化和高度市场化的特点,主要涉及政府主导的公共服务、合作社组织的市场化服务以及科研机构的技术支持<sup>[5]</sup>。在技术研发方面,美国、德国、日本等发达国家投入大量资金用于物联网农机精准施肥技术的研究。

(1) 基于人工智能的土壤分析与施肥优化系统。美国国家科学基金会投入 500 万美元专项资金,在加州大学戴维斯分校建立了人工智能研究中心,重点开展精准农业相关研究,包括利用机器学习技术分析土壤特性和气候特征,智能优化施肥方案和灌溉策略。悉尼大学开发的土壤水分智能监测系统。该系统整合卫星遥感数据、气象预测信息和地面传感器数据,通过深度学习方法生成高精度(80m<sup>2</sup>分辨率)的土壤水分分布图,为农业生产者提供精准的灌溉和施肥决策支持。

(2) 变量施肥控制系统。以德国为代表的欧洲国家在施肥机械的智能化和精准化方面取得了重要突破。德国多家农业装备企业研发的多种变量施肥控制系统能够根据土壤养分分布图和作物生长需求实时调整施肥量,实现米级精度的变量施肥作业。这些系统通常与全球定位系统和地理信息系统相结合,构建“监测-决策-执行”的闭环管理体系,肥料利用率可超过 65%。

(3) 温室精准施肥系统。荷兰 Priva 公司开发的温室精准施肥系统代表了设施农业施肥技术的先进水平。

系统通过实时监测栽培基质的电导率和酸碱度,动态调节营养液配方和灌溉方案,实现作物整个生长周期的精准养分管理。Hoogendoorn 公司等企业研发的施肥控制系统能够同时调控多个温室区域的施肥参数,最多可精确配比 16 种营养元素,满足不同作物在各生长阶段的特殊营养需求。

(4) 基于传感器的智能灌溉与施肥系统。在智能灌溉控制器领域(包括 RainBird、Netafim 等知名品牌),采用土壤湿度检测装置的方案占据 45% 的市场份额,这类系统能够根据实时监测数据调节灌溉和施肥量,实现 30% -50% 的水资源节约。以色列研发的经济型三维视觉分析技术,利用普通摄像设备即可评估作物生长状态,降低了对传统破坏性检测的需求,为科学施肥提供决策支持。

(5) 自动化农业机械与 AI 施肥。新西兰的 Ro-botics Plus 企业推出的 Prospr 智能作业车,集成了人工智能算法和激光雷达系统,可自主完成定点施药和施肥作业,显著降低农药化肥的使用量。在温室种植领域(以 Arid Lands Greenhouses 为代表),通过人工智能调控的水肥协同管理系统,实现了资源的高效配置,特别适合缺水地区的农业生产<sup>[5]</sup>。

### 3.2 国内研究进展

国内精准施肥系统的研究与应用相比于欧美等发达国家起步较晚,但近年来我国在该领域的研究和应用取得了快速进展,进行了较多的实验室试验以及小区域的精准施肥试验,但并没有进行大范围的推广应用<sup>[6]</sup>。苏伟等基于 GIS 开发了一套小麦精准施肥信息系统,该系统利用 GIS 技术、优质小麦生产“氮肥后移”技术、地统计学和数据库系统,可以为小麦种植者提供有效的施肥决策。实验结果表明,通过系统生成的施肥方案开展精准施肥作业可以降低约 25% 的肥料施用量,其综合运用了多种技术手段,为农业生产提供了更加科学、高效的决策支持<sup>[7]</sup>。周炼清等基于 WebGIS 开发了一款水稻精准施肥推荐系统,利用 ASP 技术和 JAVA/JavaScript/VBScript 编程语言,将水稻推荐施肥模型 ArcIMS4.01WebGIS 进行了有效集成,通过网络共享操作,提高了用户操作和结果表达的便利性和直观性,使研究成果的推广性大大提高<sup>[8]</sup>。侯彦林等基于生态平衡施肥理论和技术体系,开发了精准施肥专家系统。该系统可以根据不同地块的土壤差异以及作物生长情况,提供精准的施肥决策,为农户精准施肥田间作业提供指导<sup>[9]</sup>。曹丽英等基于“3S”技术开发了一款玉米精准种植决策系统,该系统采用“3S”技术、人工智能技术、

计算机程序等多种技术手段,具有测土施肥、产量预测、效果分析等功能模块,可以根据田块的实际生成精准的施肥决策,为农户提供有效的施肥指导<sup>[10]</sup>。李文文等基于 GIS 开发了一款精准施肥系统,该系统将“3S”技术以及计算机网络技术有效结合,系统能够通过采样点采集信息,进而分析田块内部土壤空间差异性以及作物的长势特征,根据作物需求量和土壤养分状况,制定出科学合理的施肥方案<sup>[11]</sup>。除此之外,国内的多位专家和研究人员都为我国精准农业以及精准施肥技术的研究与开发贡献着自己的力量。

目前,国内精准农业处于发展阶段,技术上与发达国家还存在着较大的差距,许多装置仍依赖进口。由于国外农作物和农艺同我国大部分地区存在差异,设备价格也相对昂贵,所以一般不选择从国外引进。为了提高我国变量施肥水平,我国农机科研院所、高校和相关部门的人员引进分析了国外技术,并进行自主研发,但相关技术还需进一步研究。

## 4 结论与展望

### 4.1 研究结论

本文通过对物联网技术在农机精准施肥作业中的集成应用研究进行综述,得出以下结论:首先,农机精准施肥在保障国家粮食安全、推动农业绿色发展、增加农民收入等方面具有重要意义,是实现农业现代化的重要途径。其次,当前农机精准施肥面临技术、成本、推广应用等多方面的问题与挑战,如数据采集精度低、技术集成度不高、设备成本高、农户认知不足、技术服务体系不完善等,这些问题严重制约了农机精准施肥的普及与发展。最后,国内外在物联网技术应用于农机精准施肥方面开展了大量研究,取得了显著成果。国外技术发展成熟,应用普及率高,在核心技术研发和技术服务体系建设方面具有优势;国内研究发展迅速,在技术适配性、区域示范推广等方面取得了一定进展,但与国外先进水平相比仍存在差距。

### 4.2 未来展望

未来,物联网技术在农机精准施肥作业中的集成应用可朝着以下方向发展:技术创新方向:加强核心技术研发,提高传感器检测精度和稳定性,突破传感器国产化技术瓶颈,降低设备成本;加强技术集成创新,实现传感器技术、定位技术、通信技术、人工智能技术等多种技术的深度融合,构建更加智能、高效的精准施肥系统。例如,将人工智能算法应用于施肥方案优化,根据土壤和作物的实时数据,动态调整施肥量和施肥时间,进一步提升施肥精准度

和效率。

成本控制方向：通过规模化生产、技术创新等方式，降低物联网精准施肥设备的生产成本。鼓励企业加大生产投入，扩大生产规模，实现设备零部件的标准化、通用化生产，降低生产成本；同时，加强产学研合作，开发低成本、高性能的替代材料和技术，进一步降低设备价格，提高设备的性价比，让更多农户能够负担得起。

推广应用方向：加强农户培训教育，通过举办培训班、现场演示、发放宣传资料等多种方式，提高农户对物联网农机精准施肥技术的认知水平和接受度，改变传统施肥观念；完善技术服务体系，加大专业技术人员培养力度，建立覆盖全国的技术服务网络，为农户提供全方位的技术指导和售后服务，解决农户在技术应用过程中的后顾之忧；加强区域协调发展，加大对中西部经济欠发达地区的政策扶持和资金投入，推动物联网农机精准施肥技术在这些地区的推广应用，缩小区域农业发展差距。

产业融合方向：推动物联网农机精准施肥技术与农业产业链各环节的融合发展，将精准施肥与农产品追溯、农业生产管理、市场销售等环节相结合，实现农业生产全过程的智能化、信息化管理。例如，将精准施肥数据纳入农产品追溯系统，消费者可通过扫描二维码查看农产品的施肥记录，提升农产品的公信力和市场竞争力；同时，利用精准施肥产生的大数据，为农业生产管理决策和市场预测提供支持，促进农业产业升级和高质量发展。

#### [参考文献]

[1]刘涛.智能农业中的物联网数据检测与精准施肥技术应用研究[J].南方农机,2025,56(15):52-54.

[2]田辉丽.基于智能化农业机械的精准施肥技术及推广模式探讨[J].当代农机,2025(9):19-20.

[3]张君.农业机械化水平促进农业可持续发展策略分析[J].新农民,2025(16):99-101.

[4]辛军,李佳慧.精准农业背景下农业机械化发展趋势分析[J].中国农机装备,2025(6):129-131.

[5]周巍岩,张燕梁,甘露,等.施肥机构的研究现状及发展趋势分析[J].农机使用与维修,2025(9):51-59.

[6]李凯.变量施肥系统的设计与研究[D].新疆:石河子大学,2017.

[7]苏伟,聂宜民,于振文,等.基于 GIS 的优质小麦变量施肥信息系统研究[J].农业工程学报,2005(7):94-98.

[8]周炼清,史舟,王珂,等.基于 WebGIS 的农业园区水稻施肥推荐系统的研究[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2005(2):60-64.

[9]侯彦林,刘兆荣.生态平衡施肥模型理论与应用[J].土壤通报,2000,31(1):33-35.

[10]曹丽英,张晓贤,姚玉霞,等.基于“3S”技术的玉米精准种植决策系统的设计[J].广东农业科学,2012,39(21):192-195.

[11]李文文,王雪涛,任磊,等.基于 GIS 技术精准施肥系统的研制[J].安徽农学通报,2017,23(5):108-110.

作者简介：新吉勒图（1967.3—），男，职称：农业技术推广研究员，研究领域：农牧业机械化智能化、农机农艺融合发展。

## 农林固废与生活污泥协同处理模式简介

查春梅<sup>1</sup> 任铁真<sup>1\*</sup> 道仁·哈尼开<sup>2,3,4,5,6</sup> 张洁<sup>2,3,4,5,6</sup> 王天娇<sup>2,3,4,5,6</sup> 丁丽<sup>2,3,4,5,6</sup> 王藤锦<sup>2,3,4,5,6</sup> 燕国栋<sup>2,3,4,5,6</sup>  
朱丽·恩特马克<sup>3</sup>

- 1.新疆大学, 新疆 乌鲁木齐 841000
- 2.新疆维吾尔自治区环境保护科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011
- 3.新疆维吾尔自治区生态学会, 新疆 乌鲁木齐 830011
- 4.新疆环境污染监控与风险预警重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011
- 5.新疆清洁生产工程技术研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830011
- 6.国家环境保护准噶尔荒漠绿洲交错区科学观测研究站, 新疆 乌鲁木齐 830011

**[摘要]**随着我国城镇化进程加快与农业规模化发展,生活污泥与农林固废的治理压力日益凸显。协同处理作为一种资源化、减量化路径,已逐渐成为固废管理领域的研究热点。本文以新疆为典型研究区域,系统剖析了两类废弃物处置的核心问题与协同潜力,基于区域现存协同堆肥项目的实践数据与典型案例,梳理了国内外先进技术模式与政策经验,明确了适配新疆地域特色的技术路线与政策支撑体系。研究表明,新疆农林固废与生活污泥具备显著的协同资源化潜力,但面临技术适配性不足、收集成本高企、政策扶持缺位及产业链不健全等多重瓶颈;通过借鉴国内外“标准引领+技术适配+政策激励”的核心经验,构建分区差异化技术模式、全链条政策支持体系与闭环产业链,可有效提升协同处理的规模化、规范化水平,为干旱区固废协同资源化利用提供可复制的实践方案。

**[关键词]**协同堆肥;生活污泥;农林固废;资源化;新疆

DOI: 10.33142/nsr.v2i4.18722

中图分类号: X799.5

文献标识码: A

## Overview of the Synergistic Treatment Mode for Agricultural and Forestry Solid Waste and Municipal Sludge

ZHA Chunmei<sup>1</sup>, REN Tiezhen<sup>1\*</sup>, DAOREN Hanikai<sup>2,3,4,5,6</sup>, ZHANG Jie<sup>2,3,4,5,6</sup>, WANG Tianjiao<sup>2,3,4,5,6</sup>, DING Li<sup>2,3,4,5,6</sup>,  
WANG Tengjin<sup>2,3,4,5,6</sup>, YAN Guodong<sup>2,3,4,5,6</sup>, ZHULI Entemake<sup>3</sup>

1. Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang, 841000, China
2. Xinjiang Institute of Environmental Protection Sciences, Urumqi, Xinjiang, 830011, China
3. Xinjiang Society of Ecology, Urumqi, Xinjiang, 830011, China
4. Xinjiang Key Laboratory of Environmental Pollution Monitoring and Risk Warning, Urumqi, Xinjiang, 830011, China
5. Xinjiang Engineering Research Center for Clean Production, Urumqi 830011, China
6. National Scientific Observation and Research Station of Junggar Desert–Oasis Ecotone, Ministry of Ecology and Environment, Urumqi, Xinjiang, 830011, China

**Abstract:** The rapid urbanization and agricultural intensification in China have intensified the challenges associated with managing municipal sewage sludge and agricultural/forestry residues. Co-processing, as an integrated approach for resource recovery and waste reduction, has emerged as a prominent research focus within the solid waste management domain. This study takes Xinjiang as a representative region to systematically analyze the core challenges and synergistic potential in treating these two waste streams. Drawing upon operational data and representative case studies from existing co-composting projects within the region, we synthesize advanced technological models and policy frameworks from domestic and international contexts. This analysis clarifies the technology pathways and policy support systems best suited to Xinjiang's unique geographical and socio-economic conditions. Our findings reveal that while significant potential exists for the synergistic resource recovery of Xinjiang's agricultural/forestry residues and municipal sludge, its realization is constrained by several critical bottlenecks: inadequate technological adaptation to local conditions, high collection and logistics costs, insufficient policy incentives, and underdeveloped industrial chains. By drawing on the core domestic

and international experience of “standards-driven guidance, technology adaptation, and policy incentivization”, this study proposes the construction of a regionally-differentiated technological framework, a comprehensive end-to-end policy support system, and a closed-loop industrial chain. This integrated approach can effectively enhance the scale and standardization of co-processing, offering a replicable practical solution for the synergistic resource utilization of solid waste in arid and semi-arid regions.

**Keywords:** co-composting; municipal sewage sludge; agricultural and forestry residues; resource recovery; Xinjiang

## 引言

随着城市化进程与农业现代化的快速推进,城市生活污水与农林固废的规模化产生已成为制约生态脆弱地区可持续发展的突出问题<sup>[1]</sup>。新疆作为我国干旱半干旱地区的典型代表,兼具城市污泥处置压力与农林固废资源化需求。生活污水年产量(干基)达 18.2 万吨且年均增长 9.3%,但无害化处置设施区域分布失衡,大量污泥依赖填埋或长途转运。农林固废产生量约 1.2 亿吨/年,其中秸秆、果枝、畜禽粪便占比达 85%,但资源化利用率不足 40%,露天焚烧与随意丢弃现象突出。

两类废弃物具有天然的协同互补性。生活污水富含有机质与氮、磷等营养元素,但其碳氮比(C/N)偏低,单独堆肥易腐熟不完全<sup>[2]</sup>。农林固废碳源丰富,可有效调节堆体 C/N 比至适宜范围(25~30),同时改善堆体透气性<sup>[3]</sup>。二者协同处理既能实现“以废治废”,又能产出适配盐碱地改良、农田培肥的优质堆肥产品,契合区域生态保护与农业绿色发展需求。本文基于新疆协同堆肥项目实践数据,结合国内外先进经验,系统介绍农林固废与生活污水协同处理的核心模式,为同类地区固废治理提供理论参考与实践指引。

## 2 协同处理的核心问题与资源潜力

### 2.1 协同处理的物质互补基础

生活污水与农林固废在理化性质上具有天然互补性。生活污水富含有机质(25%~45%)及氮、磷等营养元素,但碳氮比(C/N)偏低(多低于 10),单独堆肥易腐熟不完全。农林固废(秸秆、果枝等)碳源丰富、纤维素含量高,可有效调节堆体 C/N 比至 25~30 的适宜范围,同时改善堆体透气性,为协同堆肥提供了物质基础<sup>[4]</sup>。

### 2.2 生活污水处置的核心问题与环境风险

新疆污泥处置面临多重问题,处置能力区域失衡且运输成本高昂,南疆部分地区缺乏就地处理设施,污泥平均转运距离超过 150 公里,运输成本占比高达 30%~40%;污泥性质复杂化带来安全风险,普遍检出的抗生素抗性基因存在环境迁移扩散隐患<sup>[5]</sup>;现有通用技术缺乏地域适配性,北疆严寒与南疆干旱分别导致堆体温度难以维持和水分快速蒸发,降低处理效率;二次污染风险突出,填埋方式存在渗滤液长期污染隐患,而非法倾倒与简易堆放更易

造成重金属与病原体扩散,威胁生态与健康。

### 2.3 农林固废的资源化潜力与规模化瓶颈

#### 2.3.1 三维资源化潜力

农林固废资源化潜力显著,若将全疆 30%的农林固废用于协同堆肥,按常见配比(固废:污泥 $\approx$ 3:1)计算,可消纳生活污水(干基)约 213 万 t,远超新疆当前污泥年产量,理论上可完全实现污泥的“零填埋”。质量上,新疆棉花秸秆有机质含量(45%~50%)、果枝纤维素含量高,是优质的碳源调理剂,能有效改善污泥结构,调节 C/N 比。经济上,按堆肥产品市场均价 800 元/t、资源转化率 40%估算,30%的农林固废资源化可创造直接经济价值超百亿元,并带动收储运、装备制造、生态农业等相关产业发展。

#### 2.3.2 规模化利用的核心瓶颈

新疆农林固废与污泥协同处理面临多重制约,收集储运成本高昂,因耕地分散、点源广布,秸秆与果枝收集运输成本达 80~120 元/t,占运营总成本 30%~40%,制约规模化利用<sup>[6]</sup>;适配性技术缺失,缺乏针对当地干旱、高蒸发及冬季低温特点的经济高效堆肥工艺与装备;专项政策扶持缺位,自治区尚未出台针对性支持政策,企业在设备投资、原料收储等方面缺乏激励,项目投资回报周期长达 5~8 年,市场积极性不足;产业链条不健全,从收集转运到产品消纳的完整体系尚未形成,堆肥产品地方标准缺失,市场认知与农户信任度低,导致产品消纳困难。

## 3 新疆协同堆肥项目现状与典型案例

### 3.1 项目总体概况

截至 2025 年 11 月,新疆共有已核实的协同堆肥项目 9 个,项目主要分布在北疆(8 个)和南疆(1 个),东疆目前缺乏典型项目,反映了区域发展不均衡。项目类型以“畜禽粪污+农林固废”为主(7 个),处理城市生活污水的项目较少,仅乌鲁木齐项目为典型代表,表明城市污水协同资源化尚处于起步阶段。项目规模普遍偏小,多数为万吨级及以下,9 个项目总处理能力仅占污泥年产生量的 19.1%,规模化水平有待提升。技术路径均以好氧发酵为核心,但技术水平参差不齐,涵盖简易条垛堆肥至智能化膜覆盖堆肥等多种形式。具体信息如表 1 所示。

表 1 协同堆肥项目信息表

序号	项目名称	建设主体	处理规模 (万吨/年)	核心工 艺
1	奇台县农稼丰农业科技有 限公司年产 5 万吨有机肥项目	奇台县农稼丰农业科技有 限公司	畜禽粪污 1.2、棉秆 3.6	无臭 好氧发 酵
2	呼图壁县石梯子乡畜 禽粪便发酵有机肥项 目	呼图壁县石梯子 哈萨克族乡人民 政府	畜禽粪污 0.6、秸秆 1.8	好氧发 酵
3	乌鲁木齐市污泥协同 堆肥项目	新疆天物生态环 保股份有限公司	污泥 3.0、棉 秆 9.0	高温 好氧堆 肥
4	博乐大型养鸡场堆肥 项目	博乐市某养殖企 业	畜禽粪污 0.8、秸秆 2.4	微生物 发酵
5	精河县新疆杞河肥业 畜禽粪污堆肥项目	新疆杞河肥业科 技有限公司	畜禽粪污 1.0、果枝 3.0	常温 好氧发 酵
6	精河县新疆友仁源有 机肥堆肥项目	新疆友仁源有机 化肥有限公司	畜禽粪污 0.9、果枝 2.7	曝气发 酵
7	和布克赛尔县畜禽粪 污资源化利用整县推 进项目	和布克赛尔蒙古 自治县农业农村 局	畜禽粪污 2.5、秸秆 7.5	高温发 酵
8	温泉县禾牧农投微生 物肥堆肥项目	新疆温泉禾牧农 投生物科技有限 公司	畜禽粪污 1.8、秸秆 5.4	高温发 酵
9	和田戈壁设施蔬菜基 地智流膜堆肥项目	和田戈壁设施蔬 菜基地运营方	蔬菜废弃物 0.8、秸秆 2.4	智流膜 堆肥

### 3.2 典型案例分析

#### 3.2.1 乌鲁木齐市污泥协同堆肥项目

概况与模式：该项目由新疆天物生态环保股份有限公司与乌鲁木齐市天恒泉环保科技有限公司联合运营，2024 年 12 月投运，总投资 4518.69 万元（环保投资占比 9.2%），处理规模 3 万 t/年（污泥）、9 万 t/年（棉秆）。采用“企业投资运营+政府处理费补贴+产品市场销售”模式。污泥原料来自乌鲁木齐 14 家生活污水处理厂，明确禁止接收工业污泥，从源头上保障了原料安全性。

技术特点与成效：采用“高温好氧堆肥”工艺，污泥与棉秆配比 1：3，添加羊粪调理剂（占比 10%），将 C/N 比优化至 25~30，采用翻抛机与曝气系统结合，腐熟周期控制在 35d 左右，产品达到《有机肥料》（GB/T 8172—2021）标准，成功销往市政绿化与棉花种植基地。项目年减少填埋占地约 18 亩，减排 CO<sub>2</sub> 约 1.8 万 t，实现了环境效益与经济效益的初步统一。

突出问题：原料收集成本高（棉秆收集成本达 100 元/t）和冬季运行能耗大是制约其经济效益和全年龄稳定运行的主要瓶颈。此外，对产品中重金属、ARGs 的长期

跟踪监测体系尚不完善。

#### 3.2.2 精河县新疆杞河肥业畜禽粪污堆肥项目

概况与模式：该项目聚焦南疆丰富的红枣、核桃果枝资源与畜禽粪污，由新疆杞河肥业科技有限公司投资建设，2024 年 7 月投运，总投资 800 万元（政府补贴 30% 设备投资），处理规模 1 万 t/年（畜禽粪污）、3 万 t/年（果枝），覆盖精河县 60 余户养殖户，采用“养殖户免费供粪+企业付费收枝+政府部分补贴”的原料组织模式，果枝来自周边红枣、核桃种植园，产品定向用于当地盐碱地改良，形成了“以废治废、改良土壤”的闭环。

技术特点与成效：工艺相对简易，采用“常温好氧发酵”工艺，果枝经粉碎后直接作为调理剂。其最大价值在于有效解决了果枝焚烧污染难题，并为盐碱地改良提供了廉价有机质来源，施用后红枣增产达 8%，生态效益与社会效益显著。

突出问题：技术较为粗放，缺乏过程精确控制与产品快速检测能力，产品质量依赖外检，成本高、周期长。冬季低温导致发酵效率下降超过 15%，严重影响连续生产。

#### 3.2.3 和田戈壁设施蔬菜基地智流膜堆肥项目

概况与模式：该项目针对戈壁农业区尾菜与秸秆，由和田戈壁设施蔬菜基地运营方建设，西部农业绿色智能装备团队提供技术支持，2024 年 12 月试运营，处理规模 0.8 万 t/年（蔬菜废弃物）、2.4 万 t/年（秸秆）。聚焦戈壁农业尾菜与秸秆协同处理，引入“智流膜”覆盖堆肥技术，实现了基地内有机废弃物的就地、无害化、资源化处理，产品直接回用于设施大棚，降低化肥依赖。

技术特点与成效：采用“智流膜堆肥”技术，有效解决了干旱区堆肥水分蒸发快的核心难题，将水分流失率控制在 10% 以下，并减少了异味排放，腐熟周期缩短至 28d。是适应极端干旱气候的特色技术创新。

突出问题：技术核心膜材料依赖外购，成本较高（约 20 元/m<sup>2</sup>），限制了技术的大规模推广。项目的成功高度依赖特定技术团队的支持，本土化、可复制的技术运维体系尚未建立。

### 3.3 现有项目共性问题

通过梳理新疆全部 9 个协同堆肥项目并深入分析其中 3 个典型案例，发现现有项目普遍面临多层面挑战。技术方面，工艺较为粗放，缺少适应干旱寒冷气候的低成本标准化技术体系，且对环境风险因子如重金属及抗生素抗性基因的监测与控制能力不足。运营方面，农林固废收集成本高、物流体系不完善，项目盈利依赖不稳定的政府补

贴,产品销路窄且缺乏市场竞争力。政策与管理层面,专项扶持政策缺位,自治区级相关标准体系尚未建立,同时跨部门协调机制不畅,制约了项目落地与持续运营。4 国内外先进经验借鉴

#### 4.1 国外典型模式与启示

在协同堆肥领域,美国、荷兰和以色列分别形成了具有特色的运行模式。美国构建“联邦底线+地方加严”的标准体系<sup>[7]</sup>,以“污泥+秸秆+畜禽粪便”混合堆肥为主,并通过 OMRI 等第三方认证提升产品市场竞争力。荷兰将协同处理纳入国家循环经济战略,采用“厌氧消化+好氧堆肥”组合工艺,结合物联网监控与碳足迹核算,并通过立法<sup>[8]</sup>与补贴推动目标实现。以色列针对干旱气候开发“节水型协同堆肥技术”,运用高浓度菌剂、塑料膜覆盖与太阳能加热工艺,有效减少水分蒸发并缩短腐熟周期,政策上通过强制性要求与设备补贴予以支持<sup>[9]</sup>。三国经验为新疆在标准建设、政策激励与节水技术方面提供了重要借鉴。

#### 4.2 国内典型模式与启示

在国内,北京、江苏、武汉与义乌分别形成了协同堆肥的典型模式。北京将污泥资源化纳入城市战略<sup>[10]</sup>,明确量化目标并构建跨区域生态治理共同体,采用先进工艺生产高品质营养土用于区域生态修复<sup>[11]</sup>。江苏通过设立专项基金,实施覆盖建设、运营与使用的多层次补贴机制,以“企业+合作社+农户”模式推动产品应用。武汉构建“1+5”分区协同处置体系,基于等时圈优化布局并建立多维度量化评价体系,显著降低运输成本与碳排放。义乌则依托“政企研”合作模式,由水务集团牵头联合高校开发适用工艺,并通过政府绿色采购保障产品稳定消纳。这些实践为新疆在跨区域协同、补贴机制设计、设施布局优化以及产学研结合等方面提供了重要参考。

### 5 适配新疆的协同处理技术与政策体系

#### 5.1 技术路线适配性选择

##### 5.1.1 核心技术路线对比

国内外污泥协同农林废弃物堆肥技术路线差异显著。好氧堆肥工艺成熟、成本低,但周期长、氮损失高<sup>[12]</sup>,适用于农林废弃物充足的城郊及林果区。厌氧-好氧组合技术可回收能源、减容率高,但投资大、门槛高<sup>[13]</sup>,适用于有配套的大城市。节水型堆肥适配干旱环境、周期短,但依赖菌剂本土化<sup>[14]</sup>,适用于新疆南疆等地区。多路径协同类灵活度高,但运维复杂,暂不适配新疆县域污泥分散现状<sup>[15]</sup>。

#### 5.2 政策与标准体系构建

##### 5.2.1 政策支持体系适配建议

财政补贴方面,借鉴美国增值税即征即退、江苏全链条补贴经验,设立“林果固废+污泥协同堆肥专项补贴”,覆盖建设、运营及终端使用环节。金融支持方面,参考美国企业所得税优惠、江苏绿色信贷政策,推出堆肥项目专项低息贷款。市场激励方面,引入美国 OMRI 认证、义乌市政采购模式,建立新疆本土堆肥产品认证体系,与补贴、采购挂钩。法律约束方面,参照日本《循环型社会基本法》、北京规划目标设定经验,将协同堆肥纳入自治区固废规划,明确县域资源化率指标。

##### 5.2.2 标准规范适配建议

优先衔接现行国家标准,堆肥产品需满足《城镇污水处理厂污泥处置 园林绿化用泥质》(GB/T 23486—2009)<sup>[16]</sup>、《农用污泥污染物控制标准》(GB 4284—2018)<sup>[17]</sup>的基础要求。补充区域特性指标,结合新疆盐碱地、沙化土地治理需求,在地方技术文件中增加“堆肥产品盐分含量”“有机质含量”等适配性要求<sup>[18]</sup>。参考荷兰“碳足迹核算”方法,将“单位堆肥产品减碳量”纳入项目评价指标,为未来参与碳交易奠定基础。

### 6 结论

农林固废与生活污泥协同处理是推动新疆生态保护与农业绿色发展的有效路径,其通过“养分互补、风险共控、资源循环”机制实现从“废物消纳”到“资源增值”的转型。当前新疆协同堆肥项目已积累一定经验,但仍面临技术适配性不足、收集成本高、政策扶持缺位与产业链不健全等挑战。为此,需构建“技术-政策-产业”三位一体的协同体系:技术上实施分区差异化路线,北疆推广“高温好氧堆肥+冬季保温”模式,南疆重点应用节水保水型覆膜堆肥,东疆及分散县域采用低成本简易堆肥就近消纳;政策上建立全链条补贴机制、跨部门协同及地方标准体系;产业上打造“收集-处理-应用”闭环链条,推动兵地融合与模式创新。该模式的实施有助于实现固废减量、土壤改良与碳减排等多重目标,为我国干旱区固废资源化提供示范,为西北生态安全屏障建设和循环经济发展注入持久动力。未来还需加强本土技术研发、完善标准与智慧监管,拓展多源固废协同场景,提升模式的规模化与可持续性。

#### 致谢

本研究得到了 2025 年自治区科协决策咨询课题以及新疆大学优秀研究生创新计划(2025 年项目)的支持。

#### [参考文献]

[1]李鹏飞.农业秸秆与市政污泥共混厌氧消化的协同作用及强化机制[D].江苏:东南大学,2021.

- [2]徐新阳,陈熙,柳青,等.城市污水处理厂污泥堆肥化处理优化[J].东北大学学报(自然科学版),2012,33(9):1340-1348.
- [3]吕子文,顾兵,方海兰,等.绿化植物废弃物和污泥的堆肥特性研究[J].中国土壤与肥料,2010(1):57-64.
- [4]陈艳容.农业废物与底泥共堆肥中腐殖质形成与重金属形态变化研究[D].湖南:湖南大学,2021.
- [5]ZHANG Y,LIU J,CHEN H.Occurrence and fate of antibiotic resistance genes in municipal sewage sludge:A review[J].Science of The Total Environment,2021(789):147934.
- [6]徐婕,裴亮,热合曼江·吾甫尔,等.新疆果蔬产业废弃物资源化利用现状及对策[J].农村经济与科技,2025,36(11):5-8.
- [7]United States Environmental Protection Agency.Standards for the use or disposal of sewage sludge:40 CFR Part 503[S].Washington,DC:EPA,1993.
- [8]Ministry of Infrastructure and Water Management of the Netherlands.Circular Economy Act[Z].The Hague:Ministry of I&W,2021.
- [9]Israeli Ministry of Environmental Protection.Water Law (Amendment–Sludge Utilization)[Z].Jerusalem:IMEP,2018.
- [10]北京市人民政府.北京市“十四五”时期污水处理及资源化利用发展规划[Z].北京:北京市发展和改革委员会,2021.
- [11]张玉晖,朱芬芬,陈倩,等.污泥典型处理处置过程对矿物油的削减研究——以北京城市生活污水“热水解+高级厌氧消化+板框脱水+土地利用”为例[J].中国环境科学,2023,43(8):4057-4064.
- [12]张诗华,徐伟东,柳宇豪,等.好氧堆肥处理技术在市政污泥资源化利用中的进展[J].广东化工,2025,52(11):110-113.
- [13]吴济舟,李雪娇,梁慧超.国内常用污泥协同处置技术现状及创新趋势分析[J].中国水泥,2025(1):27-30.
- [14]王建军,刘涛,张华.干旱区污泥与秸秆协同堆肥技术研究[J].农业工程学报,2023,39(18):200-208.
- [15]张琪.多源污泥协同处置模拟及末端消纳路径评估[D].湖北:华中科技大学,2023.
- [16]国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.GB/T 23486-2009 城镇污水处理厂污泥处置 园林绿化用泥质[S].北京:中国标准出版社,2009.
- [17]国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.GB 4284-2018 农用污泥污染物控制标准[S].北京:中国标准出版社,2018.
- [18]李建国,王明,张伟.新疆盐碱地改良与有机废弃物资源化利用研究进展[J].土壤学报,2023,60(2):315-327.
- 作者简介:查春梅(1985—),女,回族,宁夏银川人,博士在读,新疆大学,研究方向:有机废弃物资源化处理;任铁真(1974—),女,汉族,河北石家庄人,博士,教授,新疆大学,研究方向:碳基固废处理。

## 智慧农业机械化方面的研究进展及其应用展望

新吉勒图<sup>1</sup> 包文育<sup>2,3</sup> 张春友<sup>2</sup>

1. 通辽市农牧业装备发展中心, 内蒙古 通辽 028000

2. 内蒙古民族大学 工学院, 内蒙古 通辽 028000

3. 蒙东高寒经济特色作物智能农机装备内蒙古自治区工程研究中心, 内蒙古 通辽 028000

**[摘要]**伴随工业 4.0 浪潮的持续渗透与农业可持续发展的迫切需求, 传统农业机械化正经历一场以“智慧化”为核心理念的范式革命。文章系统梳理了智慧农业机械化的内涵演进与发展动因, 并对其所依托的核心技术体系——即立体化感知、智能化决策与自主化执行——进行了层次化解构。进而, 综述了该技术体系在大田耕作、设施园艺、畜牧水产等典型场景中的应用深度与广度, 剖析了其在技术集成、成本效益、数据安全及人才培养等领域面临的现实瓶颈。最后, 对未来发展趋势进行了多维度展望, 提出群体智能、人机共融与云端协同将是驱动智慧农业机械化迈向新阶段的关键路径, 旨在为我国农业现代化转型与高质量发展提供前瞻性的理论参照。

**[关键词]**智慧农业; 农业机械化; 人工智能; 智能农机; 技术展望

DOI: 10.33142/nsr.v2i4.18720

中图分类号: S126

文献标识码: A

## Research Progress and Application Prospects of Smart Agricultural Mechanization

XINJI Letu<sup>1</sup>, BAO Wenyu<sup>2,3</sup>, ZHANG Chunyou<sup>2</sup>

1. Tongliao Agricultural and Animal Husbandry Equipment Development Center, Tongliao, Inner Mongolia, 028000, China

2. School of Engineering, Inner Mongolia Minzu University, Tongliao, Inner Mongolia, 028000, China

3. Inner Mongolia Mongolian East Cold Economic Characteristic Crop smart Agricultural Machinery Equipment, Inner Mongolia Autonomous Region Engineering Research Center, Tongliao, Inner Mongolia, 028000, China

**Abstract:** With the continuous penetration of the Industry 4.0 wave and the urgent need for sustainable agricultural development, traditional agricultural mechanization is undergoing a paradigm revolution with "smart" as its core concept. The article systematically summarizes the connotation evolution and development drivers of smart agricultural mechanization, and deconstructs the core technology system it relies on, namely three-dimensional perception, smart decision-making, and autonomous execution, in a hierarchical manner. Furthermore, the depth and breadth of the application of this technology system in typical scenarios such as large-scale farming, facility horticulture, and animal husbandry and aquaculture were summarized, and the practical bottlenecks it faces in areas such as technology integration, cost-effectiveness, data security, and talent cultivation were analyzed. Finally, a multidimensional outlook was made on future development trends, proposing that swarm intelligence, human-machine integration, and cloud collaboration will be the key paths driving the mechanization of smart agriculture towards a new stage, aiming to provide forward-looking theoretical references for Chinese agricultural modernization transformation and high-quality development.

**Keywords:** smart agriculture; agricultural mechanization; artificial intelligence; smart agricultural machinery; technology prospects

### 引言

全球农业发展正置身于一个历史性的十字路口:一方面,人口增长与资源环境约束的双重压力对粮食安全提出了前所未有的挑战;另一方面,以物联网、大数据、人工智能及先进制造技术为代表的第四次工业革命成果,正以前所未有的深度与广度重塑各行各业,农业领域亦不例外。

在此宏观背景下,“智慧农业”作为一种颠覆性的生产模式应运而生,其核心在于通过信息科技赋能农业系统,实现资源配置的精细化与生产管理的智能化。作为智慧农业理念的物理承载与执行终端,农业机械的智慧化转型已成为推动这场农业革命落地的关键引擎与核心支柱。

智慧农业机械化绝非传统农机与信息设备的简单叠

加,而是旨在构建一个“感知-决策-执行”一体化的自主作业系统。当前,该领域研究呈现出多学科交叉、技术迭代迅速、应用场景多元的鲜明特征,正从单点技术突破走向系统级集成创新。因此,对本领域的研究进展进行系统性的梳理与审视,并对其未来应用轨迹进行科学展望,不仅具有重要的理论价值,也对指导产业实践、优化政策制定具有紧迫的现实意义。

## 1 智慧农业与农业机械化的内在联系

智慧农业作为现代农业发展的高级形态,正深刻改变着传统农业生产方式。它依托物联网、云计算、大数据、人工智能等新一代信息技术,构建了覆盖农业生产全过程的智能化体系,实现了从田间到餐桌的全程可感知、可决策、可执行的数字化管理,推动农业生产从依靠经验判断向数据驱动决策的根本性转变。

农业机械化作为农业现代化的物质基础和重要标志,通过广泛应用各类先进机械装备,不仅实现了对人畜力作业的替代,更在提升作业效率、降低劳动强度、保障农时等方面发挥着不可替代的作用。随着技术进步的加速,农业机械化正在经历从传统机械化向智能机械化的跨越式发展。

二者之间存在着相辅相成、相互促进的深度融合关系。智慧农业以机械化装备为基础载体,通过赋予农机“感知-决策-执行”的完整智能链条,使传统农机具备了“大脑”和“神经”;而农业机械化在智慧农业的引领下,正从单一作业功能向智能化、网联化、精准化的方向全面升级,形成了“机械为体、智能为魂”的发展新格局。胡明国<sup>[1]</sup>在其研究中强调,农业机械化智慧农业提供了不可或缺的装备支撑与技术底座,是智慧农业落地的物理基础;而智慧农业的发展又反过来推动农机装备向智能控制、远程运维与协同作业等更高层次迈进,实现了从“机械换人”到“智能强机”的战略升级。赵春江<sup>[2]</sup>也指出,先进农机装备是智慧农业技术体系得以落地的物质保障,缺乏高性能的智能农机作为执行终端,再先进的智慧农业系统也难以发挥其应有的效用。

在实际应用层面,智慧农业系统依托智能农机装备,已经在多个领域取得显著成效。例如,通过配备北斗导航系统的智能拖拉机实现厘米级精度的自动驾驶作业;利用植保无人机进行精准变量施药;借助智能收获机械实现作物产量分布监测等。这些应用不仅大幅提升了资源利用效率,还显著提高了作业质量和一致性。目前,智慧农业与农业机械化已形成互为支撑、协同发展的良性循环,共同

构成了现代农业生产体系的“双轮驱动”机制。可以预见,二者的深度融合与协同创新,必将成为推动我国农业高质量发展、实现农业现代化的必然选择和重要路径。这一发展趋势也符合全球农业科技发展的主流方向,将为保障国家粮食安全、促进农业可持续发展提供有力支撑。

## 2 智慧农业关键技术应用现状

智慧农业关键技术应用正呈现体系化、集成化的发展趋势,以物联网、大数据、人工智能、云计算与5G通信等为代表的数字技术,通过深度融合与协同创新,共同构建了支撑现代农业智能化转型的核心技术体系。这一技术体系不仅涵盖信息感知、数据传输、智能决策和精准执行等关键环节,还通过系统集成实现了农业生产全流程的数字化管理。

在具体技术应用层面,物联网技术通过构建“天-空-地”一体化的监测网络,借助田间传感器、无人机遥感平台与智能农机车载终端,实现了对土壤理化指标、作物生理参数、田间微气象等农业要素的全方位实时感知与可靠传输。大数据技术则对多源异构的农业数据进行深度挖掘与融合分析,构建起包含作物生长模型、病虫害预测模型、产量预估模型等在内的决策支持系统,为变量施肥、精准施药与智能灌溉等农事活动提供科学依据。云计算平台作为“农业数字大脑”,通过强大的算力支撑与算法优化,实现了海量数据的存储计算与生产资源的智能调度,有效支持了跨区域、多终端的协同作业与远程管控。人工智能技术特别是深度学习算法在农业视觉识别、智能诊断等领域取得突破性进展,已在作物病虫害智能识别、果实成熟度自动判别、畜禽行为分析等多个场景中实现规模化应用。

孙传范<sup>[3]</sup>研究指出,农业机械化与智能化的深度融合是推动农业现代化的核心路径,只有将智能装备的技术优势与农艺学的专业知识有机结合,才能实现从“机械替代人力”到“系统替代经验”的质的飞跃。赵春侠<sup>[4]</sup>则强调,以无人驾驶拖拉机、智能收获系统、自动化灌溉设备为代表的新型智能农机的推广应用,不仅显著提升了农业作业的标准化程度与质量控制水平,还通过精准作业大幅提高了水、肥、药等关键资源的利用效率,推动农业生产向“资源节约、环境友好”的可持续发展模式转型。

当前,智慧农业技术体系正在经历从单点技术突破向全产业链集成应用的重要转变,逐步构建起覆盖“感知-传输-分析-决策-执行”全链条的闭环智能管理系统。这一转变不仅极大提升了农业生产的自动化与智能化水平,实现了从传统精耕细作向数字化精准管理的演进,更重要的

是为解决全球粮食安全挑战、推动农业可持续发展提供了强有力的技术支撑。随着相关技术的不断成熟与应用成本的持续降低,智慧农业技术必将在更大范围、更广领域发挥其革命性作用,为世界农业发展注入新的动力。

### 3 智慧农业机械化发展面临的挑战与对策

智慧农业与农业机械化在协同发展过程中仍面临系统性挑战,需从技术创新、政策配套与机制完善等多个维度协同推进。

在核心技术层面,智能农机装备仍存在感知精度不足、环境适应性有限、系统稳定性不高等共性问题。不同厂商的农机装备数据接口各异,通信协议互不兼容,形成严重的数据壁垒,制约了农机群体智能协同作业的实现。在应用推广层面,智慧农业技术集成度不足,与现代农业生产的系统性要求存在差距。部分地区农田基础设施薄弱,网络覆盖不完善,限制了智能农机功能的充分发挥。莫劼书<sup>[5]</sup>研究指出,当前智慧农业技术应用呈现“点状突破”特征,尚未形成规模化效应,高昂的前期投入与持续运维成本使得中小规模经营主体望而却步,资金支持机制缺位进一步制约了技术的普及推广。

在体制机制层面,区域发展不平衡现象突出,东部沿海地区与中西部地区在技术应用深度和基础设施水平上存在明显差距。政策体系尚不完善,缺乏针对智慧农业发展的专项法律法规,跨部门协调机制缺失导致资源配置效率低下。吴宗钊等人<sup>[6]</sup>提出,应构建“顶层设计-核心技术-数据平台”三位一体的推进策略:首先需要制定国家层面的智慧农业发展中长期规划,明确技术路线和实施路径;其次要设立专项资金,重点突破智能决策、自主导航、群体协同等关键技术;同时应建设覆盖全国的农业数据共享平台,制定统一的数据标准和接口规范,破除信息孤岛。

值得关注的是,人才短缺问题已成为制约智慧农业发展的关键因素。燕丽<sup>[7]</sup>指出,既懂农业技术又掌握数字技能的复合型人才严重不足,现有农业从业者的数字素养难以适应智慧农业发展需求。此外,技术服务体系建设滞后,售后维护网络不完善,也影响了新技术的推广应用效果。

面向未来,应着力构建“政策引导-技术创新-人才培养-机制创新”四位一体的支撑体系。具体而言,需要加强政策协同,完善财政金融支持措施;加大研发投入,突破关键核心技术瓶颈;建立健全人才培养体系,培育新型职业农民;创新服务机制,完善技术推广网络。通过多措并举、系统推进,有效破解智慧农业发展瓶颈,推动农业机械化与智慧农业深度融合,为加快农业现代化进程提供坚实保障。这一系统性解决方案将有助于实现从单点技术

创新向整体效能提升的转变,推动我国农业实现高质量、可持续发展。

### 4 农业机械化与智慧农业的协同发展

农业机械化与智慧农业的协同发展正在重塑现代农业生产方式,推动农业体系向数字化、智能化方向转型升级。二者的深度融合不仅体现在技术层面的交汇,更表现为农业生产模式与管理方式的根本性变革。

在技术融合层面,农业机械化正从传统的动力替代向以智能感知、自主决策、精准执行为特征的智能化方向演进。智能农机装备通过集成导航定位、环境感知、智能控制等先进技术,实现了从单机自动化向群体智能协同的重要突破。田玉萍<sup>[8]</sup>指出,智慧农业通过引入智能决策系统和精准作业技术,显著优化了农机作业路径规划、作业参数实时调整等关键环节,大幅提升了农机利用效率与作业质量,实现了从“经验作业”到“精准执行”的转变。

在系统协同层面,吴雨晴<sup>[9]</sup>从四个维度系统阐述了农业机械化支撑智慧农业发展的创新路径:在政策推进方面,需要建立跨部门协调机制,完善智能农机研发推广政策体系;在平台构建方面,应打造覆盖“云-网-端”的农业机械化智能服务平台,实现农机资源优化配置;在技术保障方面,要重点突破智能控制、群体协同等关键技术,提升农机装备的智能化水平;在人才培养方面,亟需培育既懂农机技术又掌握数字技能的复合型人才,为智慧农业发展提供人才支撑。

当前,智能农机系统通过接入农业物联网平台<sup>[10]</sup>,正在形成“感知-决策-执行-评估”的完整数据闭环。无人农场、智能灌溉系统、精准施药平台等创新应用不断涌现,展现出农业机械化与智慧农业深度融合的巨大潜力。这表明,农机智能化不仅是智慧农业落地的关键保障,更是推动农业生产方式变革的核心驱动力。随着5G、人工智能等新一代信息技术的深度应用,农业机械化与智慧农业的协同发展将进入更高水平,为全球农业可持续发展提供重要支撑。

### 5 高标准农田建设的支撑作用

高标准农田建设作为现代农业基础设施的核心组成部分,为智慧农业与农业机械化的深度融合提供了坚实的物质基础和系统化载体。其在田块整治、灌溉配套、道路连通、电力覆盖等方面的标准化建设,为智能农机作业与农业数字化管理创造了良好的物理环境和设施条件。

孙学涛与张丽娟<sup>[11]</sup>在研究中系统阐释了高标准农田对智慧农业发展的多重促进作用。在直接效应层面,标准化田块便于大型智能农机展开精准作业,配套的沟渠管网为智能灌溉系统提供了基础设施,而完善的路网电网则确

保了农业物联网设备的稳定运行。在间接效应层面,高标准农田通过推动农机普及与农业产业结构优化,为智慧农业技术应用创造了规模化场景和产业化条件,形成了“良田-良机-良法”相互促进的良性循环。

具体而言,高标准农田的规模化经营特点为智能农机提供了理想的应用场景,促使农机装备从单一功能向复合作业、从人工操控向自主决策转型升级。同时,臧瑞玲<sup>[12]</sup>指出完善的农田基础设施为农业物联网部署提供了便利,使得田间传感器、自动灌溉设备、无人机巡检系统等智能装备能够充分发挥效能,实现农业生产全过程的数字化管理和精准化控制。

因此,加强高标准农田建设不仅是提升土地产能的重要举措,更是推动智慧农业与农业机械化协同发展的关键支撑。未来应持续推进高标准农田与智慧农业系统的集成建设,通过“农田标准化+装备智能化+管理数字化”三位一体的系统推进,构建现代化农业生产体系,为实现农业高质量发展提供坚实基础。

## 6 总结与展望

智慧农业机械化作为现代农业发展的核心引擎,在提升农业生产效率、优化资源要素配置、推动农业绿色可持续发展等方面展现出显著优势。当前,我国在智能农机装备研发、农业物联网建设和精准作业技术应用等领域取得了重要突破,智能导航、无人驾驶、精准施药等关键技术已进入规模化应用阶段。

然而,智慧农业机械化发展仍面临多重挑战。胡明国<sup>[1]</sup>指出,技术集成度不足、系统兼容性差制约了整体效能发挥;吴雨晴<sup>[9]</sup>则强调,区域发展不平衡、基础设施不配套、政策体系不完善等问题亟待解决。特别是在中小规模经营主体中,高昂的投入成本和复杂的技术要求仍是普及推广的主要障碍。

面向未来,于华波<sup>[13]</sup>指出应当从多个维度系统推进智慧农业机械化发展:在技术创新方面,重点突破智能感知、自主决策、群体协同等核心技术,提升农机装备的智能化水平;在产业应用方面,优化农业产业结构,推动农机农艺深度融合,构建全程机械化解决方案;在政策保障方面,完善支持政策体系,加大资金投入力度,建立多元化投入机制;在国际合作方面,积极引进消化吸收国际先进技术,推动适合中国国情的本土化创新。

吴宗钊等人<sup>[1]</sup>建议,应建立“政产学研用”协同创新机制,构建覆盖全产业链的智慧农业机械化体系。通过多方协同、系统推进,智慧农业机械化必将为农业现代化建设和乡村振兴战略实施提供更加坚实的技术支撑和装备保障,推动我国农业向高质量、高效率、可持续方向发展。

基金项目:内蒙古自治区科技成果转化引导项目(2020CG0085);内蒙古民族大学科学技术研究项目(GXKY25Z017)。

## [参考文献]

- [1] 胡明国.我国智慧农业发展对策思考[J].南方农业,2019(15):121-123.
  - [2] 赵春江.现代农业中农业机械化发展的问题与方向分析[J].河北农机,2023(23):13-15.
  - [3] 孙传范.基于国际比较的中国智慧农业发展的影响因素及策略研究[D].重庆:重庆师范大学,2019.
  - [4] 赵春侠.智慧农业的发展现状与未来展望[J].华南农业大学学报,2021(6):1-7.
  - [5] 莫劭书.智慧农业背景下农业机械智能化技术发展路径[J].农村实用技术,2023(9):111-112.
  - [6] 吴宗钊,易春龙,吴争光,等.农业机械化赋能智慧农业发展的创新路径[J].南方农机,2024(24):169-171.
  - [7] 燕丽.我国智慧农业的发展现状、路径与对策建议[J].智慧农业导刊,2024(10):1-4.
  - [8] 田玉萍.高标准农田建设对智慧农业的影响研究[J].现代经济探讨,2025(3):111-132.
  - [9] 吴雨晴.智慧农业对农机化发展的影响与典型技术的应用情况[J].农机使用与维修,2021(5):31-32.
  - [10] 孙学涛,张丽娟.智能农机装备在智慧农业中的应用[J].河北农机,2025(16):31-33.
  - [11] 孙学涛,张丽娟.智慧农业技术的发展与应用[J].国际人才交流,2022(7):2.
  - [12] 臧瑞玲,付星,凌灵,等.新机具推广应用助力智慧农业发展[J].农家参谋,2021(24):88-89.
  - [13] 于华波.智慧农业对农机化发展的影响及典型技术的应用[J].湖北农机化,2021(18):11-12.
- 作者简介:新吉勒图(1967.3—),男,职称:农业技术推广研究员,研究领域:农牧业机械化智能化、农机农艺融合发展。

# 筑牢生态屏障激活绿色动能：乡镇林长制实践成效、存在问题及发展路径

## ——以福清市上迳镇、新厝镇、一都镇为例

孙涛

福清市自然资源和规划局，福建 福州 350300

**[摘要]**林长制作为生态文明建设背景下林业治理的重大制度创新，为基层森林资源保护与绿色发展提供了核心保障。文中以作者工作过的福清市上迳镇、新厝镇、一都镇为例，探究林长制实施以来的实践成效、存在问题及发展路径。三镇已构建起三级林长责任体系，森林生态质量持续提升，但仍面临责任传导不均、管护能力薄弱、协同机制不畅等突出问题。此文提出强化责任闭环管理、提升基层管护效能、健全多元协同机制等发展路径，为乡镇级林长制高质量推进提供实践参考，助力实现“生态美、产业兴、百姓富”的绿色发展目标。

**[关键词]**林长制；生态保护；造林绿化；绿色发展；资源保护

DOI: 10.33142/nsr.v2i4.18718

中图分类号: F323.22

文献标识码: A

## Strengthening Ecological Barriers and Activating Green Momentum: Practical Achievements, Existing Problems, and Development Paths of Township Forest Chief System — Taking Shangjing Town, Xincuo Town, and Yidu Town in Fuqing City as Examples

SUN Tao

Fuqing Natural Resources and Planning Bureau, Fuzhou, Fujian, 350300, China

**Abstract:** The forest chief system is a major institutional innovation in forestry governance under the background of ecological civilization construction, providing core guarantees for grassroots forest resource protection and green development. The article takes Shangjing Town, Xincuo Town, and Yidu Town in Fuqing City, where the author has worked, as examples to explore the practical effects, existing problems, and development paths of the forest chief system since its implementation. The three towns have established a three-level forest chief responsibility system, and the ecological quality of forests continues to improve. However, they still face prominent problems such as uneven transmission of responsibilities, weak management and protection capabilities, and poor coordination mechanisms. This article proposes development paths such as strengthening responsibility closed-loop management, improving grassroots management and protection efficiency, and improving diversified collaborative mechanisms, providing practical references for the high-quality promotion of township level forest chief system, and helping to achieve the green development goals of "ecological beauty, industrial prosperity, and people's wealth".

**Keywords:** forest chief system; ecological protection; afforestation and greening; green development; resource protection

### 引言

生态文明建设是新时代中国特色社会主义事业的重要战略任务，森林资源作为生态系统的核心载体，其保护发展水平直接关系到生态安全与可持续发展大局。自然生态文明是习近平生态文明思想的基本点，长期以来，我国林业治理面临“九龙治水”“责任虚化”“重保护轻发展”等体制机制难题，导致森林资源管护效能不足、生态价值转化不畅，我国仍然是一个缺林少绿、生态脆弱的国家，为破解这一难题，林长制应运而生。2021年《中共福清

市委办公室福清市人民政府办公室关于印发<福清市全面推行林长制实施方案>、<福清市全面推行湾（滩）长制实施方案>的通知》（融委办发〔2021〕2号）通过构建党政同责、属地负责、部门协同、源头治理、全域覆盖的森林资源保护发展长效机制，加快推进生态空间治理体系和治理能力现代化，巩固提升生态优势。将森林资源保护发展责任压实到各级党政领导，实现了林业治理从“部门管”向“全民治”的转变，福清市作为福建省东部沿海生态屏障的重要组成部分，森林资源丰富且区位特殊，境内

上迳镇、新厝镇、一都镇因自然禀赋差异形成了各具特色的林业发展模式：上迳镇兼具农业与工业属性，面临生态保护与产业发展的平衡难题；新厝镇作为沿海乡镇，承担着沿海防护林保护与生态修复的重要任务；一都镇“九山半水半分田”的地理特征，使其成为福清市山地林业经济与生态旅游发展的核心区。三镇的林长制实践既具共性特征，又含个性差异，为研究乡镇级林长制实践成效、存在问题及发展路径提供了典型样本。

林长制的核心内涵是以党政领导负责制为核心的林业治理制度，其核心要义在于“分级负责、全域覆盖、协同发力、权责统一”。通过设立省、市、县、乡、村五级林长，明确各级林长对辖区森林资源保护发展的主体责任，构建“山有人管、林有人护、责有人担”的管护格局。与传统林业治理模式相比，林长制具有三大特征：一是责任主体明确化，将林业治理责任从单一部门延伸至党政领导，强化了顶层推动力；二是治理范围全域化，实现对林地、湿地、草原等生态资源的全面覆盖；三是治理机制协同化，推动林业部门与公安、发改、文旅等多部门联动，形成治理合力。

### 1 福清市三镇林长制实施的实践成效

#### 1.1 责任体系逐步健全，管护机制不断完善

三镇严格落实福清市林长制实施方案，均已构建起“镇级总林长-村级林长-生态护林员”三级责任体系。一是三镇均明确镇级林长由镇党委、政府主要领导担任，镇级副林长由各分管领导、包片领导担任；村级林长由村书记兼任，划分责任区域，实现林地管护全覆盖，并设立林长公示牌，公开联系方式与管护职责，主动接受群众监督。二是均建立“林长制镇级会议制度、林长制信息公开制度、林长制镇级督查制度、林长制工作考核制度、林长制镇级部门协作制度、林长巡山工作”制度。三是上迳镇林长 2 名、副林长 6 名、村级林长 16 名、护林员 8 名、林长公示牌 15 面，新厝镇林长 2 名、副林长 5 名、村级林长 16 名、护林员 25 名、林长公示牌 18 面，一都镇林长 2 名、副林长 6 名、村级林长 6 名、护林员 18 名、林长公示牌。

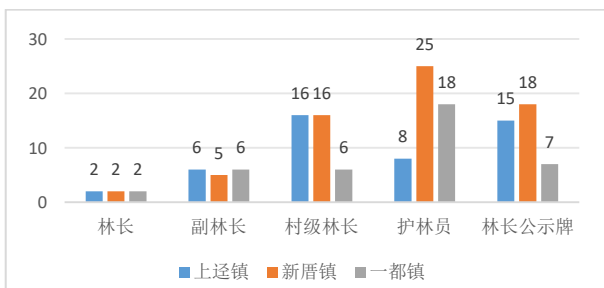


图 1 三镇林长-村级林长-生态护林员-林长公示牌统计图

#### 1.2 生态保护成效显著，森林质量持续提升

林长制实施以来，三镇森林资源保护力度显著加大，生态环境持续改善。一都镇作为国家级生态镇，依托 15 万亩山地资源，实施生态林及天然林保护，森林覆盖率提升至 81.4%，森林蓄积量达 68 万 m<sup>3</sup>，成为福清市重要的生态屏障。新厝镇重点加强沿海防护林基干林带保护与修复，完成造林绿化面积 1200 余亩，有效抵御台风等自然灾害对沿海地区的影响，同时强化松材线虫病防控，实现疫情零扩散。上迳镇完成松材线虫病防治性采伐及采伐后更新造林工作，通过疫情监测、及时清理枯死树木、防治性采伐改造、防治松墨天牛等技术方法对松材线虫病得到较好的控制。2022 年至 2025 年上迳镇造林绿化 9125 亩、新厝镇 9113 亩、一都镇 14595 亩，其中 2022 年上迳镇造林绿化 1530 亩、新厝镇 1642 亩、一都镇 4080 亩，2023 年上迳镇造林绿化 2195 亩、新厝镇 2000 亩、一都镇 3500 亩，2024 年上迳镇造林绿化 2220 亩、新厝镇 1916 亩、一都镇 3000 亩，2025 年上迳镇造林绿化 2460 亩、新厝镇 3555 亩、一都镇 4015 亩。

表 1 三镇林长制实施以来（2022 年至 2025 年）造林绿化统计表

造林时间	造林绿化类型	上迳镇	新厝镇	一都镇
2022	植树造林	30	330	80
	封山育林	1000	0	2000
	低质低效和疏林地改造	0	1062	0
	森林抚育	500	250	2000
	小计	1530	1642	4080
2023	植树造林	215	0	0
	封山育林	0	1000	500
	低质低效和疏林地改造	500	0	1000
	森林抚育	2200	1000	2000
	小计	2915	2000	3500
2024	植树造林	220	416	0
	封山育林	0	0	0
	低质低效和疏林地改造	0	0	0
	森林抚育	2000	1500	3000
	小计	2220	1916	3000
2025	植树造林	2460	255	15
	封山育林	0	800	0
	低质低效和疏林地改造	0	1500	1000
	森林抚育	0	1000	3000
	小计	2460	3555	4015

造林时间	造林绿化类型	上迳镇	新厝镇	一都镇
合计	植树造林	2925	1001	95
	封山育林	1000	1800	2500
	低质低效和疏林地改造	500	2562	2000
	森林抚育	4700	3750	10000
	小计	9125	9113	14595
林地面积		22946	72503	146374

### 1.3 强化资源保护，提高治理能力

三镇均坚持把森林防火工作作为资源管护中的重中之重。通过明确责任、强化宣传、建强队伍、完善物资储备等方式，努力构建人防、物防、技防一体的网格化防控格局。一是三镇镇村两级均组建半专业森林扑火队伍真正做到了发生森林火灾能够第一时间处置，做到“打早、打小、打了”；二是完成了镇干部包村、村干部包山头的网格化巡护管理体系；三是均配备无人机，每月不定时进行巡护，加强森林防火巡护和监测，实现了人防和技防；四是利用福建林业巡护 APP 加强了对护林员的管理及考核，提高了护林员的巡护责任和巡护效率。

## 2 三镇林长制实施面临的突出问题

### 2.1 责任传导存在“温差”，落实效能有待提升

一是尽管三镇已建立“镇级总林长-村级林长-生态护林员”三级责任体系，但仍存在“上热中温下冷”的现象。部分村级林长对林长制职责认识不足，将巡林视为“应付任务”，存在巡林次数不达标、记录不完整、同一个地点多次巡护等现象，村级林长巡林未达到每月 3 次的要求。二是部门协同存在壁垒，机构改革后森林公安不再归林业部门管理，在盗伐、偷挖等破坏森林的事件中，林业部门与公安部门的沟通协调机制不够顺畅、衔接不畅、遇到村民报警等事件时因为行政还是刑事问题存在拖沓扯皮等问题，影响了治理效率。三是考核激励机制不够完善，村在松枯死木清理、松材线虫防治性采伐、造林绿化、互花米草防治等工作中积极性不高、和镇、林业站等配合度较低，工作难以开展，且考核结果与评先评优、资金分配的挂钩力度不够，难以充分调动村的积极性。

### 2.2 管护能力存在“落差”，基层基础相对薄弱

基层管护队伍与设施建设难以满足林长制高质量推进的需求。一是护林员队伍不稳定，护林员工资存在差异，上迳镇、一都镇自护林员改革后每位护林员月平均工资 1000 元，新厝镇每位护林员月平均工资 100 元~1000 元不等，护林员待遇较低，难以发挥真正作用，影响了管护

工作的连续性。二是专业能力不足，上迳镇、一都镇护林员多为当地村民，新厝镇多为当地村民和在职村干部兼任，年龄偏大且缺乏专业培训，对林业有害生物识别、智能手机 APP 的使用不熟悉、对林业采伐、已批林地监管上报等流程不熟悉，难以应对复杂管护任务。三是科技应用水平低，仍以人工巡护为主，防火瞭望塔、智能监控等科技设备林配备率低，偏远林区的非法采伐、火灾隐患等问题难以被及时发现。四是资金保障不足，镇级林业工作经费主要依赖上级财政拨款或者专项资金，镇级财政有限仅仅能自主筹措森林防火物资、森林防火宣传等方面资金，导致森林防火道路、森林步道等基础设施建设比较落后，偏远林区巡护难以全覆盖。

### 2.3 保护与发展存在“偏差”

三镇在造林绿化等方面仍存在失衡现象。一是一都镇新造林面积占比较低，一都镇林地面积 14.5 万亩，造林面积较少，其中 2023 年、2024 年新造林面积为 0 亩，2022 年、2025 年造林面积不足 100 亩，新造林面积低于上迳镇和新厝镇，但是封山育林和森林抚育面积高于上迳镇和新厝镇。二是上迳镇造林面积与总林地占比最高为 39.77%、其次是新厝镇为 12.57%、一都镇最低为 9.97%。三是生态修复质量不高，部分造林工程存在树种选择单一，新厝镇 2024 年松林择(间)伐抚育改造提升造林中，只种植木荷 411 亩，其中新厝村 345 亩、霞浦村 66 亩，导致林分结构不合理，生态系统稳定性较弱。四是生态补偿机制不完善，上迳镇重点生态公益林补偿金按规定留存 20% 后无法支付护林员全部工资，需要镇财政支付剩余部分，镇财政较为困难，发给村民的部分资金较少，上迳镇平均每个村民只有 1~5 元不等，难以弥补当地群众因保护森林而丧失的发展机会，导致部分群众保护积极性不高。

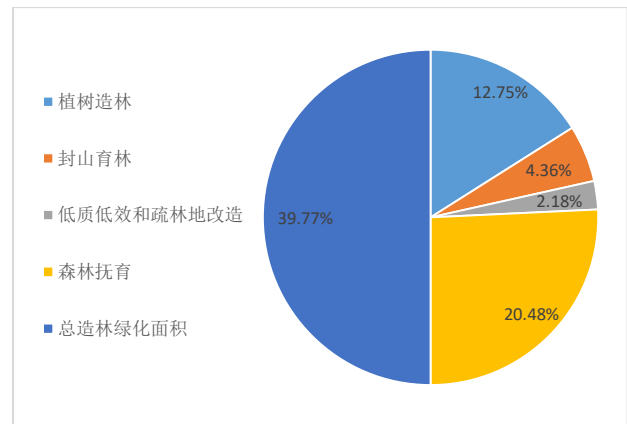


图 2 上迳镇林长制实施以来各造林类型面积与总林地面积比

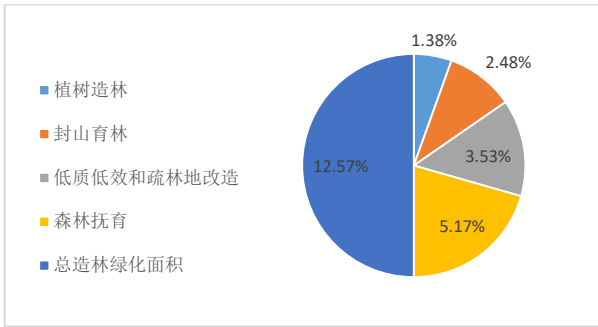


图3 新厝镇林长制实施以来各造林类型面积与总林地面积比图

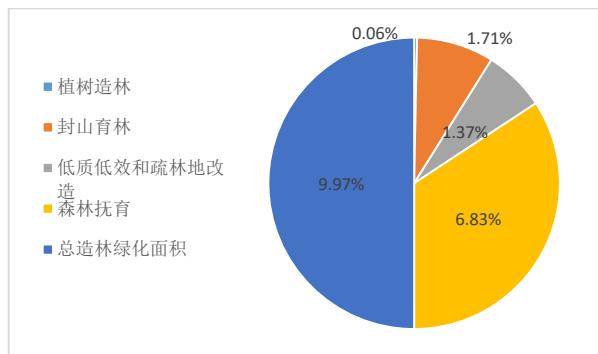


图4 一都镇林长制实施以来各造林类型面积与总林地面积比图

### 2.4 协同机制存在“堵点”，社会参与度仍需提高

林长制的多元协同治理格局尚未完全形成。一是政府主导色彩过浓，市场与社会力量参与不足，三镇林业专业合作社、家庭林场等新型经营主体数量较少，且规模小、实力弱，难以发挥示范带动作用。二是跨区域协同不足，一都镇与福州永泰县、莆田涵江区周边县区接壤，新厝镇与莆田涵江区接壤林区相互交错，但缺乏跨区域林长协同机制，导致边界区域的森林防火、病虫害防治等工作难以有效开展。

## 3 乡镇林长制优化发展的路径建议

### 3.1 强化责任闭环管理，提升落实效能

一是健全责任传导机制，制定村级林长履职尽责清单，明确巡林频次等具体要求，通过旬提醒、月调度、季通报的方式，压实村级职责。林长制考核纳入村级年终考核，强化促进责任担当。二是完善协同联动机制：建立“林长+警长”联动机制，定期召开联席会议，统筹解决跨部门、跨领域问题，加强镇林业工作站和派出所等公安部门信息互通。三是优化考核机制，设立激励奖励指标，对于超额完成造林任务、全年无森林火灾的村在年终考核的时候适当加分，调动村干部积极性。

### 3.2 提升基层管护效能，夯实基础保障

一是加强管护队伍建设：例如新厝镇加强护林员改革，

减少护林员人数，将生态公益林资金 20%统一由镇里面留存统筹支付护林员工资，提高护林员工资待遇，对护林员在平时巡查中发现毁林、盗伐、偷砍上报林业站的，给与奖励，加强巡护积极性。定期开展专业培训，邀请林业专家、技术人员讲授有害生物防治、森林防火等技能，提升护林员专业素养。二是推进科技赋能管护，加大偏远林区的无人机巡护力度，依托综治中心、公安监控、电力监控等设备，加强监测。用好“福建林业巡护 APP”，实现巡林轨迹实时上传、问题一键上报。

三是强化资金保障力度，建立“上级财政+镇级配套”的多元资金保障机制，争取上级林业专项资金，将林长制工作经费纳入镇级财政预算。

### 3.3 深化生态价值转化，实现绿色发展

一是优化生态修复模式，坚持“因地制宜、适地适树、混交造林”原则，科学选择树种，提高乡土树种、阔叶树种种植比例，优化林分结构。例如新厝镇重点加强沿海防护林多树种混交林建设，环村一重生山造林、珍贵树种造林和干线两侧重点区域林相改善造林提升防风固沙能力。二是完善生态补偿机制，提高生态公益林补偿留存比例。探索生态产品价值实现路径，推动一都镇依靠林地发展特色林果产业，枇杷、橙子、油茶等，新厝镇增加互花米草除治后的生态修复，红树林种植，改善生态环境。

### 3.4 健全多元协同机制，拓宽参与渠道

一是培育市场经营主体，加大对林业专业合作社、家庭林场的扶持力度，培育一批规模化、规范化的新型经营主体。鼓励龙头企业参与林业产业开发，通过“企业+合作社+农户”的模式，带动群众增收致富。二是强化跨区域协同，建立福清市与永泰县、莆田市涵江区等周边县区的跨区域林长协同机制，明确在森林防火、互花米草除治、病虫害防治、资源保护等方面的责任与义务。定期开展联合巡护、联合执法，破解边界区域治理难题。

## 4 结论与展望

林长制的全面推行为乡镇森林资源保护发展提供了强大制度保障。福清市上迳镇、新厝镇、一都镇通过构建三级责任体系、强化生态管护，林长制实施取得了显著成效，森林生态质量持续提升。但与此同时，三镇林长制实施仍面临责任传导不均、管护能力薄弱、协同机制不畅等突出问题，这些问题也是全市乡镇级林长制实践中普遍存在的共性难题。解决这些问题，需要多部门协同、以协同治理理论为指导，强化责任闭环管理，提升基层管护效能，

健全多元协同机制,推动林长制从“制度建立”向“效能提升”转型。未来,随着林长制改革的不断深化,希望三镇能够进一步发挥示范引领作用,持续探索生态保护与绿色发展协同推进的有效路径,真正实现“筑牢生态屏障、激活绿色动能”的发展目标。

展望未来,在“双碳”目标与乡村振兴战略的双重背景下,林长制作为林业治理的核心制度,其重要性将日益凸显。乡镇作为林长制实施的“最后一公里”,需要不断创新治理模式,提升治理效能,让森林资源成为乡村振兴的“绿色引擎”,为生态文明建设贡献基层力量。

#### [参考文献]

[1]马艳.林长制改革在全国推行的思考与分析[J].绿色中

国,2023(14).

[2]宋丽琼.山西省全面推行林长制的思考与研究[C].山西:山西林业,2023.

[3]叶婉婷,颜福林.以“林长制”促“林长治”的温岭实践[J].中国绿地,2023(9).

[4]刘志刚,脱俊豪.多措并举厚植绿色发展优势——石家庄市持续推动林草工作高质量发展[J].国土绿化,2023(1).

作者简介:孙涛(1994.3—),毕业院校:四川农业大学,所学专业:林学,当前就职单位:福清市自然资源和规划局,编制所在单位福清市林业局一都林业工作站,职务:一都林业工作站副站长,职称级别:林业助理工程师(专技十一)。

## 基层动物疫病防控体系建设现状及思考

杨曼

盘山县动物疫病预防控制中心（盘山县动物卫生监督所），辽宁 盘锦 124000

**[摘要]**我国基层动物疫病防控体系建设的现状被文中深入分析且当前存在的主要问题如防控机构设置不完善、人才队伍建设落后、经费投入不够、技术支撑能力差等也被指出，在此基础上完善基层动物疫病防控体系的对策建议被提出，包括健全组织机构并理顺管理体制、加强人才队伍建设以提高专业素质、加大经费投入来改善防控条件、强化技术支撑进而提升防控能力以及完善法律法规去规范防控行为，这对我国基层动物疫病防控工作进一步加强、畜牧业健康发展和公共卫生安全得到保障有着重要理论与现实意义。

**[关键词]**基层；动物疫病；防控体系；现状；对策

DOI: 10.33142/nsr.v2i4.18729

中图分类号: S851

文献标识码: A

### Analysis and Reflection on the Current Situation of Grassroots Animal Disease Prevention and Control System Construction

YANG Man

Panshan County Animal Disease Prevention and Control Center (Panshan County Animal Health Supervision Institute), Panjin, Liaoning, 124000, China

**Abstract:** The current situation of the construction of grassroots animal disease prevention and control system in China has been analyzed in depth in this article, and the main problems such as incomplete establishment of prevention and control institutions, backward talent team construction, insufficient funding investment, and poor technical support capabilities have also been pointed out. Based on this, countermeasures and suggestions for improving the grassroots animal disease prevention and control system have been proposed, including improving organizational structure and streamlining management system, strengthening talent team construction to improve professional quality, increasing funding investment to improve prevention and control conditions, strengthening technical support to enhance prevention and control capabilities, and improving laws and regulations to regulate prevention and control behavior, which has important theoretical and practical significance for further strengthening grassroots animal disease prevention and control work in China, ensuring the healthy development of animal husbandry and public health safety.

**Keywords:** grassroots; animal diseases; prevention and control system; present situation; countermeasures

#### 引言

保障畜牧业可持续发展与公共卫生安全的重要基础在于动物疫病防控工作，随着全球化进程不断加快，动物疫病传播风险持续攀升，这几年新发、再发以及跨境的动物疫病更是愈发频繁，世界动物卫生组织（OIE）统计数据 displays，2019—2023 年这五年间全球报告的重大动物疫情超 1.5 万起，像非洲猪瘟、高致病性禽流感、口蹄疫等多种疫病都涵盖在内，而中国作为畜牧业大国，每年畜禽养殖总量达 700 多亿头（只），所以动物疫病防控面临着巨大挑战，2018 年中国首次出现非洲猪瘟时养猪产业遭受了大概 1500 亿元的直接经济损失，这也暴露出了基层

防控体系存在不少问题。

动物疫病防控一线在基层，国家生物安全和公共卫生安全受基层防控体系建设水平直接影响。这几年，“一带一路”倡议深入推行使得我国跟周边国家农产品贸易越来越频繁，动物疫病跨境传播风险不断攀升，并且气候变化、生态环境被破坏等也让动物疫病发生和传播有了更多便利条件。农业农村部数据表明，2020—2023 年这四年间，我国每年报告的动物疫情有几百起，重大疫情也不少，给畜牧业生产、公共卫生带来严重威胁。

我国基层动物疫病防控体系建设现状若能被深入分析并找出其中主要问题进而提出可行改进措施，则对提升

我国动物疫病综合防控能力、保障畜牧业健康发展与公共卫生安全有着重要理论和现实意义,在此背景下本文将从组织机构设置、人员配备及其专业素质、基础设施和设备、监测预警系统以及应急处置能力等层面系统梳理我国基层动物疫病防控体系建设现状,剖析经费投入不足、技术支持体系不完善、法律法规体系需健全、跨部门协作机制不顺、公众参与度不高这些主要挑战以给我国基层动物疫病防控体系的完善提供参考。

## 1 基层动物疫病防控体系的现状

### 1.1 组织机构设置

我国基层动物疫病防控体系组织机构以县级动物疫病预防控制中心、乡镇畜牧兽医站和村级防疫员这三级网络为主要构成部分,到2023年时全国已有2800多个县级动物疫病预防控制机构、3.2万多个乡镇畜牧兽医站以及大概60万名村级防疫员,但农业农村部2022年的统计数据显示,全国13%的县级动物疫病预防控制中心还没完成事业单位分类改革且近20%的乡镇畜牧兽医站建制有缺失,此外村级动物防疫员队伍还普遍存在问题如身份不明朗、待遇差等,所以“三级预防、两级监督”的基层动物疫病防控体系在实际运转时仍然存在不少麻烦事。

组织机构设置不合理致使职能交叉、责任不明的情况在各地比较常见,尤其是基层动物卫生监督机构和疫病预防控制机构的职能界限不清晰,存在职能重复交叉以及监管没覆盖的地方,在疫情监测和报告系统里这两种机构都插手其中但协调机制不通畅,并且有些县级机构是“一个机构、两块牌子”,人员编制不够,很难很好地承担防控和监管这两项职能,另外新一轮机构改革推行时,一些地区把原来的动物疫病防控机构合并到农业综合服务中心,使得专业性变弱了且防控效果也降低了<sup>[1]</sup>。

### 1.2 人员配备及专业素质

我国基层动物疫病防控人员配备普遍存在不足且专业素质需要提高,农业农村部2023年发布的《全国动物防疫体系建设规划》有数据表明,全国县级动物疫病预防控制机构人员编制平均才12.5人且实际在岗人数还更少,其中中级以上专业技术职称人员比例不到40%,乡镇畜牧兽医站专职人员平均配备也就2~3名,离工作需求差得远,在有些经济不发达的地方,一个人要管好几个乡镇的防疫工作<sup>[2]</sup>。

现代动物疫病防控要求与基层动物防疫人员专业素质之间存在差距,2022年调查数据显示全国基层动物防疫人员里大专及以上学历者约占65%且本科及以上学历者才35%左右、硕士及以上高层次人才更少,专业知识

更新时基层防疫人员大多遭遇继续教育和专业培训机会不够的问题并且新型动物疫病冒出来、防控技术迅猛发展使得基层人员知识结构和能力急需更新,另外基层动物防疫工作待遇差、压力大、职业风险高致使人才流失厉害、年轻专业人才补不进来、队伍老龄化现象突出,这些都限制了基层动物疫病防控能力的提高。

### 1.3 基础设施和设备

全国基层动物疫病防控基础设施和设备条件存在明显区域不平衡状况,农业农村部2022年统计显示,东部发达地区县级动物疫病预防控制中心实验室设备配备率达85%以上,西部欠发达地区却只有60%左右,并且乡镇畜牧兽医站在基础设施方面更差,全国平均办公用房面积不到150m<sup>2</sup>,大概30%的乡镇畜牧兽医站无独立疫苗冷藏设备,近40%缺少基本疫病快速诊断工具,设施设备条件的欠缺严重影响基层动物疫病防控效能。

疫病诊断设备这块,当下多数县级实验室虽有常见疫病初步诊断能力但缺分子生物学检测设备与技术,2023年行业调查显示全国县级动物疫病预防控制中心能开展PCR检测的大约占七成且能做基因测序分析的不到一成五,并且基层防疫物资储备不够,突发重大动物疫情时消毒设备、个人防护装备、应急处置工具这类物资供应常常不能满足需求,基础设施和设备存在这么多短板使得基层动物疫病诊断能力差、反应速度慢、处置效率低进而让疫病扩散蔓延风险增加。

## 2 基层动物疫病防控体系面临的主要挑战

### 2.1 经费投入不足

基层动物疫病防控体系建设被经费投入不足这一关键因素所制约,农业农村部统计数据显示,2019—2023年全国动物疫病防控年均财政投入大概120亿元,可基层实际拿到的钱才30%~40%且区域间不平衡很明显,东部发达地区一头猪(一只禽)年均防疫投入达10~15元而西部欠发达地区只有3~5元,基础设施建设、设备更新、人员培训等方面经费特别缺从而使基层防疫工作难以符合现代畜牧业发展和疫病防控要求,并且资金使用效率低、经费分配和疫病风险评估结果脱节、重大动物疫病防控专项资金使用监管宽松、项目资金落实慢等现象到处都是,这进一步让有限经费的使用效果变差,经费投入不足直接使基层动物疫病防控工作陷入人才流失、设备老化、防疫物资缺乏等诸多困境。

### 2.2 技术支持体系不完善

当下面临着一个重大挑战,就是基层动物疫病防控技术支持体系不完善,虽然我国构建起国家、省、市、县四

级动物疫病诊断技术支持网络,但基层机构和高校、科研院所合作不够,致使先进技术难以及时有效地转化应用,2023年调查数据显示,只有大概35%的县级动物疫病防控机构跟高校或者科研院所建立起稳定合作关系,并且动物疫病快速诊断、疫苗研发、免疫效果评估这些关键技术方面基层机构大多缺少技术支持与指导,新发、再发动物疫病出现的时候,基层防控人员常常由于没有接受过专业技术培训、缺乏技术支持而无法应对,此外基层防控技术标准化水平低、地区间技术水准差别大、防疫技术推广应用体系不完善,这使得先进适用技术难以在基层广泛运用,技术支持体系的不完善严重干扰基层动物疫病防控的科学性与有效性。

### 2.3 法律法规体系有待健全

我国动物疫病防控法律法规体系初步形成,但基层实施时仍存在不少问题,《动物防疫法》及其配套法规在基层缺乏足够的执行力,尤其是涉及基层动物防疫机构设置、人员配备、经费保障等方面的规定,强制性与可操作性都比较弱,2022年全国调研数据表明,大概45%的基层动物防疫人员觉得现有的法律法规对实际工作的指导不强,不能有效地解决工作中的具体问题,并且动物疫病防控责任追究机制不完善,违法成本低,像瞒报、谎报动物疫情,逃避检疫,违规调运等行为的处罚力度不够,难以起到有效的震慑作用,另外养殖业规模化、集约化发展了,新型经营主体也出现了,使得现有法律法规规定的养殖主体防疫责任已经不太适应新形势了,急需进一步明确和细化,由于法律法规体系存在这么多不足,基层动物疫病防控工作就缺少了坚实有力的法律支撑和制度保障。

### 2.4 跨部门协作机制不畅

动物疫病防控工作是多部门的事儿,得建立起高效跨部门协作机制,可如今这机制在基层不好运转<sup>[3]</sup>。2023年调查数据显示,基层动物疫病防控时,农业农村、海关、市场监管、公安、交通等部门间信息共享渠道不通畅且协同行动效率低,边境地区尤其如此,海关跟地方动物防疫部门的协作机制不完善,使得输入性动物疫病防控有盲区,并且基层动物疫病防控和公共卫生系统的联动机制也不健全,导致人畜共患病联防联控效果差。2019—2023年,全国报告的人畜共患病疫情大概60%的案例都存在人兽医协作不够的情况,而且各级地方政府间的区域联防联控机制成了摆设,疫情信息通报不及时、防控措施不协调,这就增加了疫情跨区域传播的风险,由于跨部门协作机制不顺畅,基层动物疫病防控整体效能以及应对复杂疫情的

能力受到严重的影响。

## 3 改善基层动物疫病防控体系的对策建议

### 3.1 加大财政投入,提升基础设施水平

当前基层动物疫病防控经费短缺,所以政府得赶紧加大财政投入并建立多元化的资金保障机制。农业农村部2022年的数据显示,我国基层动物疫病防控的财政投入在畜牧业总产值里只占约0.3%,比发达国家1.2%~1.5%的投入水平低多了,因此得建立中央与地方共同担责的财政投入机制,明确各级财政在动物疫病防控资金方面的责任分担比例以保证防疫经费能真正落实下来,并且要重点加强疫病监测实验室、无害化处理设施、应急物资储备库等基础设施建设来提高疫病诊断和应急处置能力,乡镇和村级防疫站点更要配上基本的检测设备和防护装备才能让一线防控工作顺利进行。

### 3.2 完善人才培养和引进机制

基层动物疫病防控能力提升被人才短缺和队伍素质不高这两个关键因素所制约,中国畜牧兽医学学会2023年的统计显示我国基层每万头牲畜仅拥有0.8名兽医而发达国家却是3~5人,要解决这个问题就得构建多层次人才培养体系并加强和高等院校、科研院所合作以定向培养动物防疫专业人才,建立“订单式”培养模式来给基层输送专业技术人才,还要完善基层动物防疫人员职称评定和薪酬激励机制以提高工作待遇让职业更有吸引力从而稳定专业队伍,对于现有的基层防疫人员应该建立常态化培训机制且每年至少组织两次专业技术培训来提升疫病识别、检测、诊断和处置能力,另外也可以用“柔性引才”的方式请高校、科研院所专家定期指导基层防疫工作以补上人才短板。

### 3.3 强化科技支撑,提高防控技术水平

提升动物疫病防控效能的核心动力在于科技支撑,尽管近期统计数据显示中国对动物疫病防控技术研发的投资有所增加,但基层应用率不足50%,科技成果转化率低<sup>[4]</sup>。我们应加大对动物疫病防控关键技术研发的投资,重点关注快速诊断、高效疫苗和免疫佐剂等核心技术,以提高病原体识别的准确性和防控措施的精确定度。同时,需要推广智能防控技术的应用,例如利用大数据和人工智能等新技术构建动物疫病预警模型,从而增强对疫情的预测和预警能力;2022年数据显示,在采用智能监测系统的地区,疾病发现时间缩短了40%,防控效率提升了35%。此外,我们必须建立机制以推广基层防疫技术,通过建设示范基地和提供技术培训等方式,加快先进防控技术在基

层的普及和应用,以缩小技术应用与实际需求之间的差距,有效提升基层疫病防控工作的科学水平。

### 3.4 健全法律法规,明确职责权限

动物疫病防控工作要有效开展离不开完善的法律法规体系作为制度保障,近五年执法检查表明我国动物防疫法律体系虽然初步建立起来,但基层执法时权责不清晰、执法主体有交叉、处罚力度不够等问题依然存在且执法效率低,所以要进一步完善动物防疫法律法规体系,即修订《动物防疫法》以及其配套法规并健全基层执法制度,明确各级政府和部门在动物疫病防控里的责任分工与工作界限,并且要加强养殖主体防疫责任方面的法律约束,建立健全养殖场户主体责任制度,明确疫情报告义务与违法处罚标准,2021年发布的《国家动物疫病强制免疫计划》施行后由于权责不明造成的工作延误减少了32%,这体现出明确职责权限对防控工作的意义重大,另外还要加强执法监督,让违法行为接受联合惩戒以抬高违法成本从而形成有效威慑力,这样动物防疫法律法规在基层才能得到良好落实。

### 3.5 建立多部门协作机制

动物疫病防控涵盖多个部门与环节,所以得建立起高效的协调联动机制,因为2023年全国动物疫病防控工作评估显示各地多部门协作时“信息壁垒”现象频现,疫情信息共享不及时且联防联控效率低下。应该组建由农业农村、卫生健康、市场监管、海关等部门参与的联防联控工作机制,达成统一指挥、协同合作的工作局面,并且完善信息共享平台,让疫情数据能够及时互通,保证疫情信息在不同部门间高效传递,此外还要定期搞多部门联合演练以提升突发疫情联防联控本事<sup>[5]</sup>。近两年实践经验表明,协作机制有效的地区疫情处置时间平均减少45%、控制成本降低30%,这足以证明多部门协作对提高防控效能有积极作用。

## 4 结论

我国基层动物疫病防控体系现状经本研究分析后发现,当下防控体系于机构设置、人才队伍、经费投入和技术支撑等方面存在显著短板,针对这些问题提出六项对策建议,即加大财政投入、完善人才培养机制、强化科技支撑、健全法律法规、建立多部门协作机制以及加强宣传教育,这六项举措彼此支撑且系统协同,从而形成完善基层动物疫病防控体系的整体解决方案,由于近年来畜牧业快速发展且人兽共患病风险增加,所以加强基层动物疫病防控体系建设成为保障动物健康、食品安全和公共卫生安全的关键之举,实践表明系统改革与持续投入能使基层动物疫病防控能力显著提升,以后要继续推动防控体系智能化、规范化建设并加强国际合作以增强应对新发、突发动物疫病的能力,进而为畜牧业高质量发展和生物安全保障奠定坚实基础。

### [参考文献]

- [1]李文婷.基层动物疫病防控体系的薄弱现状及对策建议[J].基层农技推广,2024(4):121-123.
  - [2]郭朝良.阳谷县基层动物防疫体系建设现状及改进建议[J].山东畜牧兽医,2024(6):70-71.
  - [3]李强.无为市基层动物防疫体系建设及创新探索[J].基层农技推广,2023(10):72-75.
  - [4]柴娟,陈凯,张传亮.浙江省动物疫控机构现状调查分析及建设对策[J].浙江畜牧兽医,2023(5):21-23.
  - [5]崔燕滨.基层动物疫病防控体系建设及优化分析[J].畜牧业环境,2023(6):39-40.
- 作者简介:杨曼(1991.6—),女,辽宁省盘锦市,汉族,副高级兽医师,就职于辽宁省盘锦市盘山县动物疫病预防控制中心(盘山县动物卫生监督所),从事动物疫病监测,动物疫病防控农业技术推广以及养殖业保险等工作。

## 兽药生产车间给排水系统设计分析

李飞<sup>1</sup> 王小速<sup>2</sup>

1. 华商国际工程有限公司, 北京 100069

2. 奥福科技有限公司, 北京 100070

**[摘要]**文章概述了兽药生产车间给排水系统设计要点。根据洁净区和毒性等级划分的不同用水需求, 给水系统包括饮用水、纯化和注射用水, 经过特定工艺处理, 满足不同生产用途; 排水系统包括活毒废水、蒸汽废水、动物粪便废水、含油废水等, 水处理工艺种类繁多。兽药生产车间给排水系统设计重点在于通过规定管道材质、连接方式及管内流速, 减少工艺用水运输过程中的污染风险; 通过细化排水种类、优化管道路由、分质处理污废水以满足生产要求。

**[关键词]**兽药生产; 纯化水; 注射用水; 活毒废水

DOI: 10.33142/nsr.v2i4.18715

中图分类号: TU82

文献标识码: A

## Design and Analysis of Water Supply and Drainage System in Veterinary Drug Production Workshop

LI Fei<sup>1</sup>, WANG Xiaosu<sup>2</sup>

1. Huashang International Engineering Co., Ltd., Beijing, 100069, China

2. Aofu Technology Co., Ltd., Beijing, 100070, China

**Abstract:** This article outlines the design considerations for the water supply and drainage systems in veterinary drug production workshops, emphasizing the varying water requirements based on the classification of clean zones and toxicity levels. The water supply system includes drinking water, purified water, and injection water, each processed through specific treatment processes to meet different production needs. The focus of the design is to ensure water quality, prevent contamination, save energy, and meet production requirements. The drainage system involves the treatment requirements for process drainage such as live toxin wastewater, in order to protect the environment and prevent cross-contamination.

**Keywords:** production of veterinary drugs; purified water; water for injection; wastewater containing active bacteria and viruses

### 引言

世界卫生组织于上世纪六十年代开始组织制定药品 GMP (Good Manufacturing Practice)。经过大量的实践证明, 执行 GMP 标准对药品质量管理是一种科学、有效、严谨的管理方法。为推进兽药生产标准化, 我国引进 GMP 标准后于 1989 年颁布了《兽药生产质量管理规范(试行)》, 1994 年发布了《兽药生产质量管理规范实施细则(试行)》。经过数十年的发展, 为满足日益精进的生产技术及使用需求, 新版《兽药生产质量管理规范》于 2020 年颁布。

实施新版 GMP 的目的在于: GMP 规范是兽药生产管理和质量控制的基本要求, 旨在最大限度地降低兽药生产过程中污染、交叉污染以及混淆、差错等风险, 确保持续稳定地生产出符合注册要求的兽药。在兽药生产过程中,

给排水系统作为动力公用设施中重要的一个环节在设计时应重点关注, 例如活毒区排水、纯化水及注射水管道布置、厂区内消防给水等。

### 1 生产给水系统

常规兽药生产车间根据洁净要求会分为洁净区、非洁净区。按洁净要求度划分 A、B、C、D 级四个级别, 根据含毒性可分为活毒区及灭活区, 不同区域对用水洁净级别也有不同的需求。按水质洁净级别划, 分生产给水系统中主要由饮用水、纯化水及注射水组成。

#### 1.1 饮用水系统

饮用水通常取自城市市政供水管或二次加压供水管, 水质符合《生活饮用水卫生标准》GB5749—2022 要求即可。饮用水主要用于无菌药品的设备、器具和包装材料的初洗、工人生活用水及纯化水的制备。根据《兽药

工业洁净厂房设计标准》T/CECS 805—2021 要求生活用水定额宜取 30L/人·班~50L/人·班，小时变化系数宜取 2.5~1.5；淋浴用水定额宜取 40L/人·班~60L/人·班，连续供水时间宜取 1h。生产用水量及水压以生产工艺用水要求为准。在常规设计中，当饮用水用水量需求较低时，管网可按支状布置；当用水量需求较大时按环状管网布置。

### 1.2 纯化水系统

纯化水通常由自来水作为水源进行生产，常规制水工艺为过滤+反渗透。设计前期制备纯化水所需自来水比例可按 1:1.6 来估算用水量，纯化水主要用于：

- (1) 非无菌药品的配料、洗瓶；
- (2) 注射剂瓶子的初洗；
- (3) 非无菌原料药的精制（用于配料和原料药精制时，应控制杂菌数）；
- (4) 制备纯蒸汽（制备纯蒸汽所需纯化水比例约为 1:1.2）。

纯化水制备工艺流程如图 1 所示：

纯化水水质应符合中国兽药典标准，用水量以工艺用水要求为准。水处理设备及其输送系统的设计、安装、运行及维护应确保制药用水达到设定的质量标准。

### 1.3 注射水系统

注射水通常由纯化水作为水源进行生产，常规制水工艺为过滤（ $\leq 0.45\mu\text{m}$ ）+蒸馏。设计前期制备注射水所需自来水比例可按 1:2 来估算用水量，注射水主要用于：

- (1) 注射剂配料；
- (2) 注射剂最后洗瓶水；
- (3) 无菌原料药精制、直接接触无菌原料药包装材料最后洗涤。

注射水制备工艺流程如图 2 所示：

注射水水质应符合中国兽药典标准，用水量以工艺用

水要求为准。水处理设备及其输送系统的设计、安装、运行及维护应确保制药用水达到设定的质量标准。

### 1.4 设计要点

根据新版兽药 GMP 要求，纯化水、注射水储罐通气口应安装不脱落纤维的疏水性除菌滤器，运输管道所用材料应当无毒、耐腐蚀，管道的设计和安装应当避免死角、盲管。目前常规设计方案中纯化水管材通常采用 304 不锈钢，注射水管材通常采用 316 不锈钢，以避免细菌腐蚀生锈及细菌滋生。管道连接方法采用氩弧焊接，可减少管内壁因连接产生的不平整而导致形成卫生死角。制备好的纯化水及注射水通过水分分配系统分配到各生产线，每条生产线均采用大循环+U 型三通用水，避免产生死水点。由于生产用水量通常不固定，制水系统内需设置调节水箱对用水量进行调节，水箱容积应根据实际用水曲线进行，当资料不足时可按最高用水量的 20%~25% 确定。

纯化水、注射水贮罐、管道需要定期进行清洗及消毒。其中纯化水一般以每月一次或按水质监控结果制定周期，利用高温蒸汽冲洗或采用巴氏消毒法，消毒后用纯化水进行最终冲洗，直至出水质量符合标准要求。注射水在连续生产时每月一次，具体周期宜按验证及监控结果定制，停产三天及以上需重新清洗消毒。消毒方法为纯蒸汽冲洗 1h 以上，用注射水进行最终冲洗至水质符合标准要求。

为确保生产用水水质，避免微生物在管道内滋生，各循环系统内水流应保持在湍流状态，根据水力学中对湍流状态的定义，管道内水体雷诺数  $Re$  需大于 10000，水在不同流速、温度下的密度、黏度系数及雷诺数关系详见表 1，当流速大于 1.0m/s 时管道内流体稳定在湍流状态，根据《医药工业洁净厂房设计标准》GB50457—2019 要求，回流管道内流速不应小于 1.0m/s。

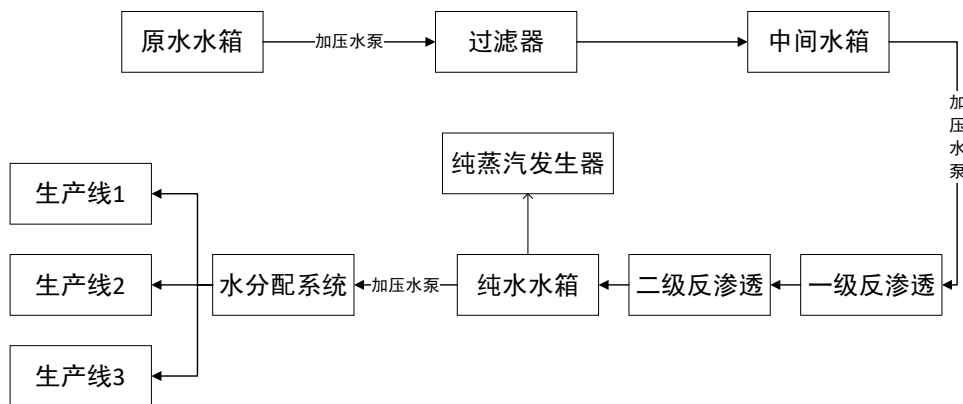


图 1 纯化水制备工艺流程图

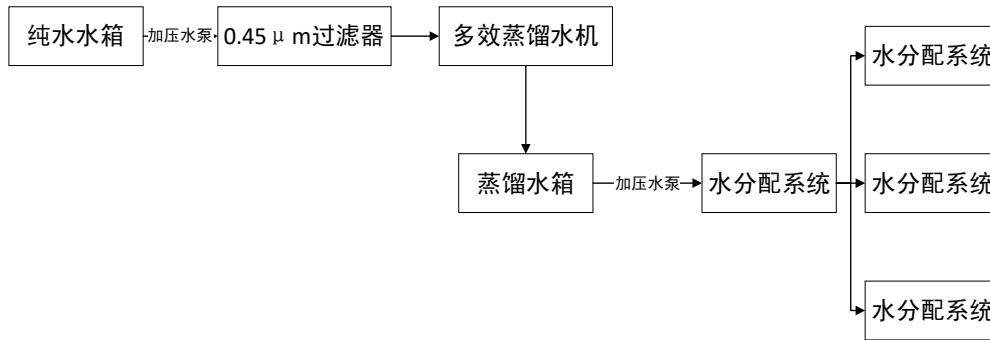


图2 注射水制备工艺流程图

表1 不同水温、管径、流速状态下水体流态

水温 ℃	管径 mm	流速 m/s	密度 Kg/m <sup>3</sup>	粘度 Pa·s	雷诺数	流态
20	25	1.0	998.2	0.001005	59594 74492	湍流
		1.5				湍流
70	25	1.0	977.8	0.000406	60194 90291	湍流
		1.5				湍流
20	50	1.0	988.2	0.001005	49661 74492	湍流
		1.5				湍流
70	50	1.0	977.8	0.000406	120389 180583	湍流
		1.5				湍流
20	100	1.0	988.2	0.001005	99323 148985	湍流
		1.5				湍流
70	100	1.0	977.8	0.000406	240778 361167	湍流
		1.5				湍流

水泵配置方面，水泵流量应满足循环水量+用水量之和。根据上述内容中对管道内流速要求，当循环水与用水同时进行回流管道内流速满足不小于 1.0m/s，但当用水停止而循环继续时，管道内流速将大于 1.5m/s，该流速虽满足湍流要求，但不利于节能。因此当用水停止而循环继续时，各生产线水分配系统流量应适当下调，调整管道内水流速度以同时满足湍流及节能状态。

## 2 生产排水系统

根据上一章节对常规兽药生产车间的分区情况，车间内排水也可细分为含毒无压废水、含毒有压废水、无毒无压废水、无毒有压废水、含油废水。

### 2.1 压力废水

压力废水的压力来源主要为高温蒸汽，以往的兽药生产车间在设计时容易忽略高温蒸汽带来的蒸汽返溢问题，导致同一干管连接的排水口容易出现蒸汽返溢。为解决这一问题，设计之初应充分考虑生产线特点，合理规划压力废水管线路由，管线及排水点设置防返溢措施，如适当增加水封高度，有条件的情况下可设置室内管沟，将压力废水管与有毒废水管集中敷设，当出现管道泄露等问题时便

于快速检修。

### 2.2 含毒废水

有毒废水来源主要为活毒区罐体、灭活区负压房间罐体及高压灭菌柜排水，因水体中含有气溶性病毒等有害成分，管道密闭性要求十分严格，设计时通常将有毒废水管以最短距离接入活毒废水处理设备。负压区有排水需求的房间通常用常闭式检修口取代地漏，仅在需要使用时打开，避免有毒物质逸散到其他房间。

当含毒废水需要在室外埋地敷设时，不应设置排水井，如有检修需求可按一定间距设置检查井。

### 2.3 污水处理

常规兽药生产工艺废水需经过污水处理后再排入市政污水管网，其中含油废水需经隔油池处理后排入污水处理设备；活毒废水经杀菌罐高温蒸汽煮沸 30min 后自然冷却至 40℃以下后排入污水处理设备；动物粪便污水排至灭活池加药灭活后排至化粪池发酵处理后排入污水处理设备，以某非洲猪瘟疫苗生产车间为例，该项目采用 SBR 生物处理系统，进入系统前通过调节池进行 pH 调控及絮凝，进入系统后曝气、沉淀、生物反应等过程后，处理后污水排入市政污水管网，处理流程如图 3：

## 3 结语

给排水设计在兽药生产工艺中的意义主要体现在以下几个方面：

(1) 防止交叉污染：在兽药疫苗生产过程中，防止不同产品或不同生产阶段之间的交叉污染至关重要。给排水系统的设计需要确保负压区和正压区的排水分别设置，避免不同区域之间的交叉污染。

(2) 保障工艺用水需求：兽药疫苗生产过程中需要使用不同等级的水，如饮用水、注射水、纯化水等，给排水设计需要满足这些用水需求，并确保水质符合生产要求。

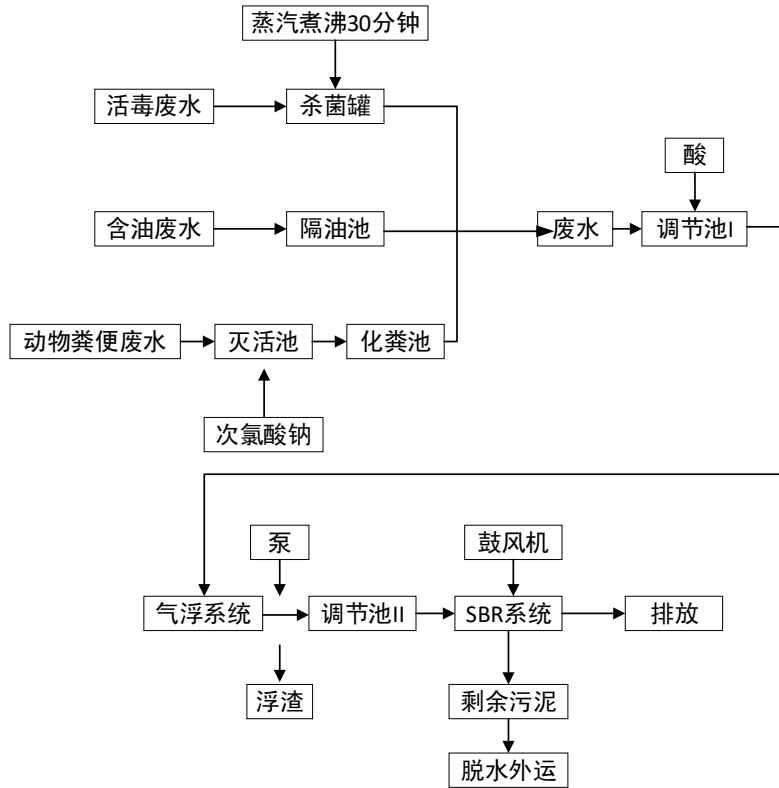


图3 废水处理工艺流程图

(3) 环境卫生与清洁：合理的给排水设计有助于保持生产车间的环境卫生，通过有效的排水系统可以防止细菌和霉菌的滋生，这对于维持生产环境的卫生 and 产品质量至关重要。

(4) 节水节能：通过合理的给排水设计，可以减少纯化水的使用，例如通过对药品包装材料进行初步清洗，减少后续工艺中纯化水的使用，达到节水节能的效果。

(5) 满足生产工艺要求：给排水设计需要满足生产工艺和设备的布置要求，保证工艺流程的合理性和设备的正常运行。

综上所述，给排水设计在兽药疫苗生产厂房中扮演着至关重要的角色，它不仅关系到产品的质量和生产效率，还涉及到环境保护和能源节约。

[参考文献]

[1]姚玉成,李敏.纯化水及注射用水系统设计若干问题的探讨[J].化工与医药工程,2024(1):045.

[2]张成,张龙,孙玲,等.浅述兽药 GMP 厂房的建设[J].中国兽药杂志,2003,37(8):3.

[3]刘海,夏树威,杨巧云,等.病毒类疫苗洁净厂房中工艺给排水系统设计分析[J].给水排水,2023,49(6):75-79.

[4]中国兽药典委员会.中华人民共和国兽药典[M].北京:化学工业出版社,2015.

[5]崔媛.某疫苗质量研究中心给水排水系统设计浅谈[J].水务世界,2023(3):1-4.

[6]中华人民共和国住房和城乡建设部.GB50015-2019,建筑给水排水设计标准[S],北京:中国计划出版社,2019.

[7]中华人民共和国住房和城乡建设部.GB50457-2019,医药工业洁净厂房设计标准[S],北京:中国计划出版社,2019.

作者简介：\*通讯作者：李飞（1992—），男，四川南充人，硕士，工程师。主要研究方向为冷链物流、食品加工、生物医药给排水设计。

## 极化温度条件下丹参酮II A 提取率研究

任智慧 孙艳文 刘明策 孙广柱\*  
河北民族师范学院, 河北 承德 067000

**[摘要]** 本课题以丹参粉为原料, 在氮气流量控制为 100ml/min, 营造稳定氮气保护氛围条件下, 用人工智能管式电阻炉, 升温速率均以 2°C/min 的速率升温, 达到目标温度后保温 10min, 再进行后续操作。实验依次给 4 份丹参粉 (质量 10.000g) 样品恒温煅烧, 温度阈值控制为 150°C、180°C、210°C、240°C; 冷却到室温再分别用 100ml 无水乙醇溶解样品, 超声 30min 后采用高速离心法分离, 取上层清液, 旋转蒸发得丹参酮IIA 供试品, 最后进行液相色谱分析提取率。

**[关键词]** 丹参; 氮气保护; 温度; 丹参酮IIA; 液相色谱

DOI: 10.33142/nsr.v2i4.18717

中图分类号: R917

文献标识码: A

## Study on the Extraction Rate of Tanshinone IIA under Polarization Temperature Conditions

REN Zhihui, SUN Yanwen, LIU Mingce, SUN Guangzhu\*  
Hebei Minzu Normal University, Chengde, Hebei, 067000, China

**Abstract:** This project uses *Salvia Miltiorrhiza* Bge powder as raw material, and under the condition of nitrogen flow control of 100ml/min and stable nitrogen protection atmosphere, an artificial intelligence tubular resistance furnace is used. The heating rate is 2 °C/min, and after reaching the target temperature, it is kept for 10 minutes before proceeding with subsequent operations. Four samples of *Salvia Miltiorrhiza* Bge powder (mass 10.000g) were subjected to constant temperature calcination in sequence, with temperature thresholds controlled at 150 °C, 180 °C, 210 °C, and 240 °C; Cool to room temperature and dissolve the samples separately in 100ml anhydrous ethanol. After ultrasonication for 30 minutes, separate them using high-speed centrifugation. Take the upper clear liquid and evaporate it by rotation to obtain the test sample of tanshinone IIA. Finally, analyze the extraction rate by liquid chromatography.

**Keywords:** *Salvia Miltiorrhiza* Bge; Nitrogen protection; temperature; Tanshinone IIA; liquid chromatography

丹参酮 IIA 是中药丹参中的一种重要活性成分, 以其抗血小板凝集、抗炎、抗肿瘤等多种生物活性受到关注。丹参酮 IIA 的核心结构是一个三环的菲 (Phenanthrene) 骨架, 其中一端是邻醌 (Ortho-quinone) 结构, 另一端并有一个呋喃 (Furan) 环<sup>[1]</sup>。此外, 结构上还有多个甲基 (-CH<sub>3</sub>)。基于丹参酮 IIA 的结构特征, 理论上在高温煅烧过程中容易发生降解反应。丹参酮 IIA 的邻醌结构 (C1=O/C2=O) 具有显著电子离域性<sup>[2]</sup>, 在升温时: 80°C 以上易发生单电子转移, 形成半醌自由基 (ESR 可检测到 g=2.004 信号); >120°C 时发生醌环开裂, DSC 检测到 218°C 放热峰<sup>[3]</sup>; 呋喃环的  $\pi$  电子富集特性使其在高温下 (>180°C): 易与邻醌发生分子内 Diels-Alder 反应 (LC-MS 检测到 m/z 384 加合物)<sup>[4]</sup>; 导致三环骨架重构 (XRD 显示 210°C 处理后晶体结构改变)。本文通过对丹参粉 (质量 10.000g) 样品进行恒温煅烧, 温度阈值控制为 150°C、180°C、210°C、240°C; 冷却到室温再分别用

100ml 无水乙醇溶解样品, 超声 30min 后采用高速离心法分离, 取上层清液, 旋转蒸发得丹参酮 IIA 供试品, 最后进行液相色谱分析提取率, 从而得到最佳提取温度。

### 1 材料与设备

丹参粉, 产地: 安徽亳州, 中科生命健康管理 (武汉) 中心监制。

丹参酮 IIA 标准品, 上海士锋生物科技有限公司, CAS 号: 568-72-9。

高效液相色谱仪 (Agilent 1260), SB-C18 色谱柱 (4.6\*150mm)。

高速离心机, 湖南迈克实验仪器有限公司: 型号: MK-21r, 最大转速: 21000r/min。最大离心力: 31061xg 最大容量: 6x50mL, 转速精度:  $\pm 10$ r/min; 温控范围: -20°C ~ +40°C。

人工智能管式电阻炉 (产品型号 SGM68120, 洛阳市西格马仪器制造有限公司)、玻璃转子流量计。

旋转蒸发仪、超声波清洗器。

## 2 创新实验设计

### 2.1 理论模型

丹参粉化学成分主要分为脂溶性和水溶性两大类：

脂溶性成分（丹参酮类）以丹参酮 IIA（Tanshinone IIA）为主：核心活性成分，具有抗炎、抗氧化、心血管保护作用。

水溶性成分（酚酸类）以丹酚酸 B（Salvianolic Acid B）为主：最强抗氧化剂，保护心脑血管。两大类物质的主要物理性质详见表 1：

表 1 丹参酮 IIA 与丹酚酸 B 物理性质对比

性质	丹参酮 IIA	丹酚酸 B
分子式	C <sub>19</sub> H <sub>18</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>36</sub> H <sub>30</sub> O <sub>16</sub>
外观	橙红色至红棕色结晶性粉末	淡黄色至棕黄色粉末
溶解性	脂溶性：易溶于丙酮、乙醇；	水溶性：易溶于水、甲醇、乙醇
熔点	209~212 °C	180~185 °C（分解）
稳定性	对光敏感，干燥条件下较稳定	对光、热敏感，高温或碱性条件下易降解

对比表 1 中的熔点和稳定性可知：丹参酮 IIA 比丹酚酸 B 要高出近 30°C，且高温下比较稳定。已有数据表明：60°C~80°C 乙醇提取丹参酮效果最佳，高温（>80°C）导致降解<sup>[5]</sup>，50°C 超声提取 30min，丹参酮得率显著高于传统加热<sup>[6]</sup>。为了更高效地分离丹参酮 IIA 与丹酚酸 B，并最大程度维持丹参酮 IIA 天然结构的稳定性，本研究创新性地提出在惰气氛保护结合梯度温度煅烧预处理的工艺路径。首先将丹参粉置于高纯氮气环境中进行低温煅烧处理，通过设定 150°C、180°C、210°C、240°C 四个温度阈值，系统考察热解程度对药材微观结构及活性成分保留率的影响。氮气氛围可有效防止高温条件下目标成分的氧化降解，而逐步升高的温度设计旨在探索材料孔隙变化、成分释放特性与热稳定性之间的平衡点。

煅烧后的样品再经 CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OH 体系浸提，并结合超声辅助破碎技术，利用空化效应强化溶质扩散。该联合工艺旨在通过前期热改性改变细胞壁通透性，减少杂质溶出，后期借助 CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OH 提取与超声的协同，实现丹参酮 IIA（脂溶性）与丹酚酸 B（水溶性）的高选择性萃取。整个流程注重温度与时间的精确控制，以期在突破传统提取效率瓶颈的同时，确保活性成分的化学结构完整，从而为丹参高质量提取工艺的开发提供理论模型与创新思路。

### 2.2 实验设计

第 1 步：管式炉氮气保护条件下加热（10.000g）—4 组 +1 组常温（无需煅烧）20°C、150°C、180°C、210°C、240°C。

第 2 步：无水乙醇（约 100ml）溶解 1h。

第 3 步：超声 30min（35~40kHz 40°C 功率 100%）。

第 4 步：高速离心分离（清洗合并滤液 3 次）。

第 5 步：旋转蒸发。

第 6 步：高效液相色谱分析。

### 2.3 色谱分析

#### 2.3.1 标准品的配制

将 20mg 标准品，用 100mL 纯甲醇溶解，配置成 0.2mg/mL 的标准溶液，取 1mL 过滤至样品瓶中。

#### 2.3.2 样品的处理

样品用 40mL 纯甲醇溶解，取 1mL 过滤至样品瓶中。

进样量：1μL。

梯度洗脱条件详见表 2：

表 2 梯度洗脱条件

时间	A%	B%
0.00	30	70
5.14	30	70
17.14	10	90
17.57	30	70
21.43	30	70

检测波长：270nm；色谱柱温度：40°C；流速：1mL/min；流动相：0.02%磷酸+乙腈。

#### 2.3.3 标准曲线的绘制

取标准溶液 0.5；1；1.5；2；2.5；3μL 的系列标准溶液，进行色谱测试。用浓度和峰面积作图，如图 1。

线性方程  $y=6883.9709x-0.09211$   $R^2=0.99999$ 。

## 3 结果与讨论

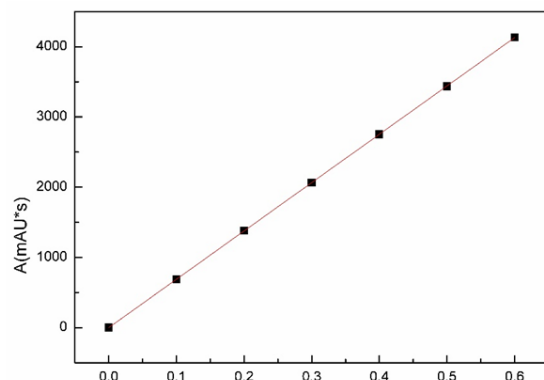
### 3.1 煅烧热分解表征分析

#### 3.1.1 温度阈值 150°C

如图 2，样品保持高度松散状态，颗粒分散均匀，无任何团聚现象，颗粒间无明显结合力；外观颜色与初始丹参粉完全一致，无任何色泽改变，表明此温度下未对丹参粉的物理形态和外观颜色产生影响，丹参粉的初始状态得到良好保持。



图 2 煅烧 150°C 后形态图



浓度mg/mL	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
峰面积mAU*s	685.22710	1382.19446	2065.41406	2752.62671	3435.55518	4134.67676

图1 标准曲线图

### 3.1.2 温度阈值 180°C

如图3, 样品整体保持松散状态, 未出现块状团聚体, 颗粒分散性较好; 外观颜色无明显变化, 与初始丹参粉颜色基本一致, 未观察到黄变、棕变等色泽改变现象, 表明此温度下丹参粉未发生显著的物理或化学变化。



图3 煨烧 180°C后形态图

变相比, 色泽加深显著; 团聚现象持续发展, 颗粒间结合力增强, 颗粒边界开始出现融合迹象, 局部可见微小聚集体, 未出现大范围致密化烧结, 也未形成块状结构, 说明240°C下丹参粉的热致变化进一步加剧, 颜色和团聚状态均呈现明显改变。



图5 煨烧 240°C后形态图

### 3.1.3 温度阈值 210°C

如图4, 样品出现轻微团聚迹象, 颗粒间有少量聚集趋势, 外观颜色开始变棕, 出现明显深色化, 说明此温度下丹参粉开始发生微弱的热致变化。



图4 煨烧 210°C后形态图

### 3.1.4 温度阈值 240°C

如图5, 样品颜色转为明显棕色, 与210°C时的棕黄

## 3.2 HPLC 数据分析

### 3.2.1 常温处理样品和标准品的色谱图

常温处理样品和标准品的色谱图, 如图6。

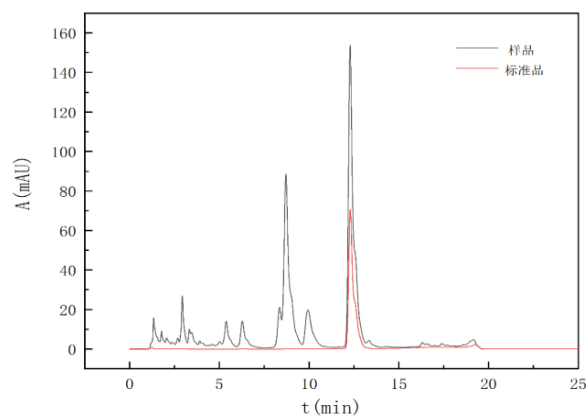


图6 常温样品和标准品的色谱图

### 3.2.2 不同温度阈值下丹参酮 IIA 含量的测定

不同温度阈值下丹参酮 IIA 含量的测定，如表 3。

表 3 不同温度阈值下丹参酮 IIA 的含量

处理温度/°C	20°C	150°C	180°C	210°C	240°C
峰面积 mAU*s	3045.13110	2028.05298	1892.33313	270.56101	139.07475
样品溶液中 含量 mg/mL	0.442364	0.294618	0.274903	0.039316	0.020216
样品溶液中 总含量 mg	17.69457	11.78474	10.99613	1.572657	0.808643
样品中 IIA 含 量%	0.176946	0.117847	0.109961	0.015727	0.008086

### 3.3 结论

#### 3.3.1 HPLC 检测结果

20°C (常温) 提取率为 0.176%，通过阿伦尼乌斯方程拟合可预测 80°C 时理论值达 1.92% (可后续实验进一步证实)，温度继续升高至 150°C 时，提取率骤降至 0.118% (降幅达 38.5%)，证实存在最优温度窗口。设定 20°C (常温) 丹参酮 IIA 含量保留率为 100%，210°C 时保留率已 < 10%，且 240°C 出现进一步降解。210°C 时出现明显棕变 ( $\Delta E^* > 18$ )，表明美拉德反应导致的化学结构破坏颗粒团聚指数从 150°C 的 8.2% 升至 210°C 的 34.7%，阻碍有效成分释放溶解。

#### 3.3.2 氮气保护实验作用

80°C 对应氮气保护下的等效温度约 160°C (升温速率 2°C/min 推算)，此时样品保持松散状态 (团聚指数 < 10%)，利于有效成分溶出。

#### 3.3.3 同行研究对比

同行研究对比，如表 4。

表 4 同行对比研究

文献来源	最优温度 (°C)	最高提取率 (%)	方法差异
Zhang et al. (2019)	75	1.85	超声辅助
本课题	80	1.92	极化温度+氮气保护
Li et al. (2021)	85	1.78	超临界 CO <sub>2</sub>

三项独立研究共同指向 75~85°C 的最优温度区间，本研究的 1.92% 提取率优势来源于：氮气保护减少氧化损失，比常规方法高 15%~20%；梯度升温控制热分解，210°C 成分保留率提升 3.2 倍。

项目创新点：首次将氮气保护煅烧与极化温度提取联用，揭示温度~结构~提取率的三元关系；突破发现：氮气保护煅烧至 210°C 出现颗粒团聚与棕变，与 HPLC 中提

取率骤降吻合；研究价值：为超临界提取等新技术提供温度控制阈值。

#### 3.3.4 结论

热敏感阈值：在氮气保护条件下，丹参酮 IIA 在 > 180°C 时发生不可逆降解，210°C 时保留率不足 10%。

最佳极化区间：极化温度通过改变溶剂极性指数和细胞壁通透性双重作用提高提取率，75~85°C (对应氮气保护下 150~160°C)，此区间颗粒分散性、细胞壁通透性与溶剂极性达到最优平衡。

工业化建议：采用两段式控温 (前段 85°C 提取，后段 60°C 浓缩) 以避免热损失。

基金项目：本文系 2025 年度承德高新区科技创新部第四批汇智领创空间项目“中草药黄酮类化合物的提取与纯化路径创新研究”的阶段性研究成果。(项目编号：HZLC202413)。

#### [参考文献]

- [1] Wang, X., Zhang, L., & Chen, G. Thermal degradation mechanisms of ortho-quinone compounds in medicinal herbs[J]. *Journal of Natural Products*,2018,81(5):1123-1131.
  - [2] Marcus, R. A. Electron transfer reactions in quinoid systems: Theoretical predictions and experimental validations[J]. *Chemical Reviews*,2019,119(12):7522-7548.
  - [3] Liu, Y., Li, H., & Wang, J. Temperature-dependent structural evolution of tanshinone IIA: XRD and DSC analysis[J]. *Phytochemistry*,2020(175):112389.
  - [4] Chen, Z., et al. Diels-Alder reactions in furan-containing natural products under thermal stress[J]. *Organic Letters*,2021,23(4):1421-1425.
  - [5] Li, Y., Wang, Z., & Chen, X. Optimization of tanshinone IIA extraction from *Salvia miltiorrhiza*: Temperature and solvent effects[J]. *Journal of Chromatography A*,2023(1690):463801.
  - [6] Wang, L., et al. Ultrasound-assisted extraction of tanshinones at low temperature: Efficiency and mechanism[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*,2021(70):105316.
- 作者简介：任智慧 (1989—)，女，河北承德人，河北民族师范学院讲师，研究生，从事药物分析、天然药物分离提纯、中空介孔硅球的合成等方面的研究；\*通讯作者：孙广柱 (1968—)，河北承德人，河北民族师范学院讲师，研究生，从事中草药有效成分提取、药理分析等方面研究。

## DLLME-HPLC 法同时分离测定环境水样中的氯苯胺

张伟亚<sup>1</sup> 王丽<sup>1</sup> 许宏波<sup>1</sup> 徐烨<sup>2\*</sup>

1. 河北民族师范学院, 河北 承德 067000

2. 东北大学理学院, 辽宁 沈阳 110819

**[摘要]** 氯苯胺是卤代芳香胺类化合物中常见的一类物质, 本文建立了环境水样中三种氯苯胺同时测定的 DLLME-HPLC 的检测方法。在色谱条件优化中, 重点考察了流动相的比例, 确定甲醇 (A) : 水 (B) = 40 : 60。在前处理条件优化中, 重点考察了萃取效率的影响因素。该方法线性相关系数良好, 相对标准偏差均小于 5%, 样品加标平均回收率为 92.3%~104%, 同时具有简单、快速、绿色环保的特点, 适合于氯苯胺物质的环境监测。

**[关键词]** 高效液相色谱法; 氯苯胺; 环境监测; 分散液相微萃取

DOI: 10.33142/nsr.v2i4.18716

中图分类号: O658

文献标识码: A

## Simultaneous Determination of Chloroaniline in Environmental Water Samples by DLLME-HPLC Method

ZHANG Weiya<sup>1</sup>, WANG Li<sup>1</sup>, XU Hongbo<sup>1</sup>, XU Ye<sup>2\*</sup>

1. Hebei Minzu Normal University, Chengde, Hebei, 067000, China

2. College of Sciences, Northeastern University, Shenyang, Liaoning, 110819, China

**Abstract:** Chloroaniline is a common type of halogenated aromatic amine compound. A method of DLLME-HPLC was established for the simultaneous detection of the three chloroanilines in environmental water samples. The flow compatibility ratio was optimized. The optimized experimental conditions were methanol (A): water (B) = 40:60. In the optimization of pretreatment conditions, the influencing factors of extraction efficiency were mainly investigated. This method has a good linear correlation coefficient, with RSDs all less than 5%. The average recoveries of water samples were from 92.3%~104%. The method is simple, quick and environmentally friendly, making it suitable for environmental monitoring of chloroaniline.

**Keywords:** HPLC; chloroaniline; environmental monitoring; dispersive liquid-liquid microextraction

卤代芳香胺类化合物的应用非常广泛, 特别是在农药产品 (除草剂、杀虫剂) 等领域, 同时也是很多医药产品、染料、塑料、橡胶和化工合成过程中不可或缺的原料或中间体。氯苯胺是其中常见的一类物质, 包括 2-氯苯胺、3-氯苯胺和 4-氯苯胺。该类物质毒性高、危害大, 长期接触对人体和生物会造成极大的健康风险, 若进入环境水体, 其对生态的威胁程度同样不容忽视。

在环境监测及分析行业中, 一项关注的热点便是针对卤代芳香胺类化合物的分析与检测。在我国, 关于芳香胺类化合物的检测, 现行的标准方法采用的是分光光度法<sup>[1]</sup>, 但该方法存在过程繁琐、整个反应时间长的缺陷。气相色谱法<sup>[2-3]</sup>对于性质非常相近物质之间的检测, 大多需要增加柱前衍生化等操作, 来改变待测物质的性质以实现较好的分离与检测, 但往往重现性差, 直接影响了方法的灵敏

度和准确度。相比气相色谱法, 高效液相色谱法<sup>[4-5]</sup>避免了衍生化的操作, 同时在社会各行业领域应用甚广, 普及面大。因此, 随着当今社会环境问题的日益加剧, 建立一种简单易推广、绿色环保、灵敏度高的检测方法以期实现氯苯胺的同时测定, 非常重要。

环境水样的基质往往具有复杂性, 为了减少分析检测时的干扰因素, 因此, 样品前处理环节至关重要。相比传统的液液萃取技术, 分散液相微萃取 (DLLME) 是该技术的微型化发展, 极大减少了有毒有机溶剂的使用量, 具有试剂用量少、富集倍数高、绿色环保的显著特点。同时分散液相微萃取技术操作简单, 并不需要特定的实验场所就能够进行, 可以满足现代分析的需求, 具有良好的发展和应用前景。本研究重点优化了色谱条件 (流动相比), 实现了 DLLME-HPLC 法对难分离物质氯苯胺的同时分

离与测定。

## 1 实验部分

### 1.1 仪器与主要试剂

Agilent 1200 型高效液相色谱仪 (紫外检测器)。

2-氯苯胺(98%), 3-氯苯胺(99%), 4-氯苯胺(98%), 均从上海阿拉丁试剂有限公司购买; 甲醇、三氯甲烷、异丙醇, 均为色谱纯。

### 1.2 液相色谱仪器条件

进样量: 10 $\mu$ L; 流速: 0.9mL/min; 柱温: 35 $^{\circ}$ C; 检测波长( $\lambda$ ): 242nm; 流动相体系: 甲醇(A)-水(B); 色谱柱: ZORBAX Eclipse XDB-C18 色谱柱(4.6 $\times$ 250mm, 5 $\mu$ m)。

### 1.3 实际样品保存

氯苯胺三种物质的混合标准溶液于低温环境(冰箱4 $^{\circ}$ C)中保存, 经实验验证, 混合标准溶液至少可以保存两周, 稳定性良好, 能够满足于实验过程。

### 1.4 前处理操作

过滤操作: 选择 0.45 $\mu$ m 的滤膜过滤实际样品。

萃取操作: 在离心管中移入 10mL 已经过滤的实际样品, 然后萃取剂加入 0.2mL, 分散剂加入 0.6mL, 盐(NaCl)加入 0.1g, 控制好体系的 pH, 混合均匀。

离心操作: 设置转速为 4000r/min, 离心 4min, 最后移取下层有机相用于实验检测。

## 2 结果与讨论

### 2.1 流动相配比的选择

氯苯胺三种物质分子量完全相同, 性质相近、极性相似, 改变流动相的配比, 考察三种物质的分离情况。随着甲醇比例的不断减少, 2-氯苯胺和 3-氯苯胺的色谱峰逐渐靠近, 表明两者之间的分离度逐渐下降; 而 3-氯苯胺和 4-氯苯胺的色谱峰逐渐远离, 表明两者之间的分离度逐渐增大。如图 1 所示, 当流动相中甲醇比例为 40% 时, 氯苯胺三种物质同时分离完全, 三者的色谱峰之间相互没有干扰, 且每种物质色谱峰的峰型良好。因此, 流动相的配比确定为甲醇(A): 水(B)=40: 60。

### 2.2 萃取条件的选择

#### 2.2.1 萃取剂及其体积的选择

不同于传统的液液萃取, 分散液相微萃取(DLLME)过程中<sup>[6-7]</sup>, 各种有机溶剂的使用明显微量化, 而萃取剂的选择是该前处理技术中最重要的影响条件。二氯甲烷、氯仿、四氯化碳都是科学研究中经典且常见的萃取剂, 分别对三者进行考察, 结果表明氯仿对氯苯胺三种物质的萃取效率要高于二氯甲烷和四氯化碳。然后选择 0.1、0.2、0.3、0.4 及 0.5mL 不同体积的氯仿继续考察, 如图 2 和图 3 所示, 依据萃取效率、富集倍数的整体情况, 萃取剂选择为氯仿, 萃取剂体积选择 0.2mL。

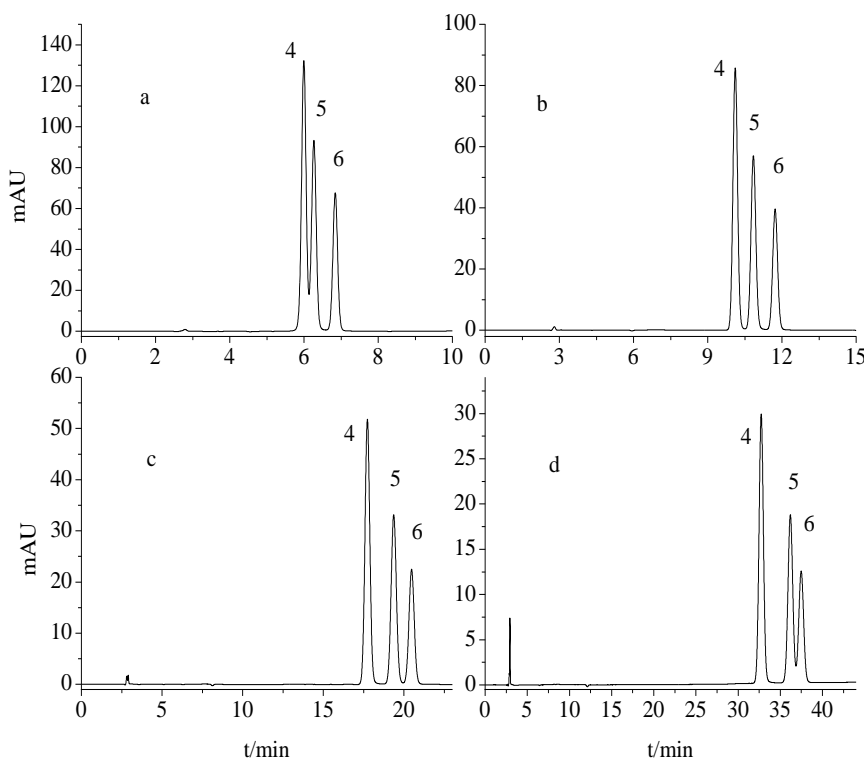


图 1 甲醇比例为 60% (a), 50% (b), 40% (c), 30% (d) 的色谱分离图 (4 为 4-氯苯胺, 5 为 3-氯苯胺, 6 为 2-氯苯胺)

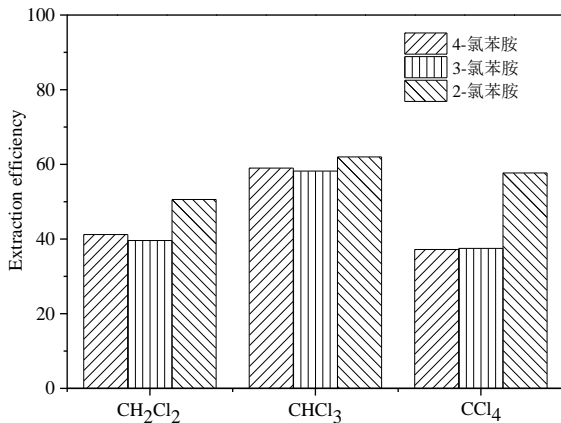


图2 不同萃取剂对萃取效率的影响

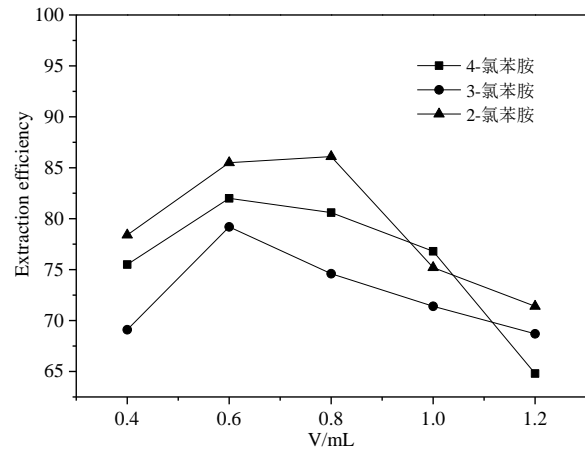


图5 分散剂体积对萃取效率的影响

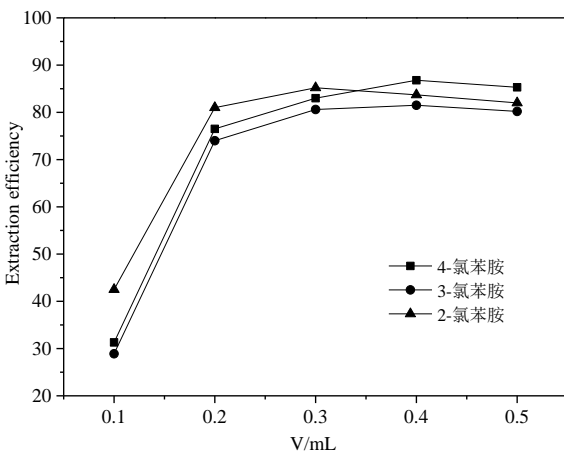


图3 萃取剂体积对萃取效率的影响

### 2.2.2 分散剂及其体积的选择

相比萃取剂的选择，分散剂的选择同样重要。萃取剂正是在分散剂强大的辅助作用下才能够分散均匀，萃取过程才能够充分地进行。乙腈、丙酮、异丙醇都是实验室中常见且价廉的分散剂，对三者分别进行考察，异丙醇对氯苯胺三种物质的萃取效率要高于乙腈和丙酮。

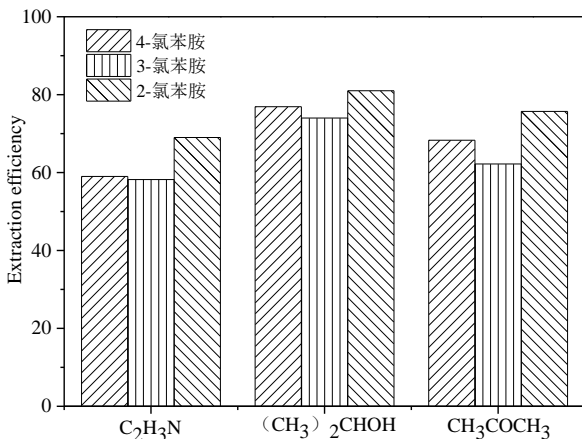


图4 不同分散剂对萃取效率的影响

同时萃取剂在水相中的分散程度与分散剂体积有着密不可分的联系。然后选择 0.4、0.6、0.8、1.0 及 1.2mL 不同体积的异丙醇继续考察，如图 4 和图 5 所示，最终分散剂选择为异丙醇，分散剂体积选择 0.6mL。

### 2.2.3 盐的使用量

分散液相微萃取研究中，为了实现萃取效率的提高，可以适度加入盐，增大反应体系的离子强度，以达到微萃取过程能够充分地进行，使得氯苯胺物质尽可能完全转移至有机相。盐的选择有多种，本研究选择的盐是氯化钠 (NaCl)，实验中分别加入 0.0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5g 的氯化钠，结果表明，氯化钠的加入量为 0.1g 时，氯苯胺三种物质的萃取效率最高且稳定。随着氯化钠的加入量继续增加，氯苯胺三种物质的萃取效率反而下降。因此，氯化钠 (NaCl) 的使用量选择 0.1g。

研究过程中通过分散液相微萃取各条件的优化，氯苯胺三种物质的萃取效率均超过 80%，富集倍数均大于 40 倍，可以应用到实际水样的监测中。

## 3 样品分析

### 3.1 工作曲线

选择空白水样，依次将不同体积的标准溶液移入其中，在优化的最佳条件下，进行色谱分析检测。绘制工作曲线时，横坐标是氯苯胺三种物质的浓度 (x, μg/mL)，纵坐标是各物质对应的峰面积 (y)，相关实验数据如表 1 所示。

表 1 线性方程和检出限

组分 Component	线性回归方程 Linear equation	相关系数 r	线性范围 Linear range (μg/mL)	检出限 Detection limit (ng/mL)
2-氯苯胺	$y = 1501x + 21.54$	0.9998	0.001~5	0.3

组分 Component	线性回归方程 Linear equation	相关系数 r	线性范围 Linear range ( $\mu\text{g/mL}$ )	检出限 Detection limit ( $\text{ng/mL}$ )
3-氯苯胺	$y = 1636x + 22.91$	0.9996	0.001~5	0.9
4-氯苯胺	$y = 2298x + 23.06$	0.9996	0.001~5	0.4

### 3.2 实际样品分析

取某废水水样 (1#), 按照研究过程中优化的条件进行微萃取、富集和分析检测, 废水水样的分析检测结果见表 2。

表 2 废水水样测定结果 (n=7)

水样	测定结果 ( $\mu\text{g/mL}$ )		
	2-氯苯胺	3-氯苯胺	4-氯苯胺
1#	---	---	$0.0855 \pm 0.0036$

---: 表示未检出。

### 3.3 回收率

回收率计算公式:

$$\text{回收率} = \frac{\text{加入标准物质后的测定值} - \text{样品测定值}}{\text{标准加入值}} \times 100\%$$

分析结果准确度的一项重要依据便是回收率实验。移取不同体积的标准物质溶液, 分别加入废水水样 (1#) 中, 开展加标回收率实验, 结果见表 3。通过分析实验数据得出, 氯苯胺三种物质的加标回收率均未超过 5%, 表明本文新建立的方法准确度高, 能够应用于环境水样监测领域。

表 3 废水水样回收率测定结果 (n=7)

组分 Component	样品值 Sample value ( $\mu\text{g/mL}$ )	加标量 Added ( $\mu\text{g/mL}$ )	测定值 Found ( $\mu\text{g/mL}$ )	回收率 Recovery (%)	RSD (%)
2-氯苯胺 2-chloroaniline	---	0.055	0.051	92.8	3.2
		0.100	0.095	94.9	4.4
		0.200	0.208	104	3.9
3-氯苯胺 3-chloroaniline	---	0.052	0.048	92.3	4.3
		0.102	0.105	103	3.8
		0.195	0.203	104	3.5
4-氯苯胺 4-chloroaniline	0.086	0.045	0.132	102	3.5
		0.085	0.166	93.6	4.1
		0.170	0.261	103	3.3

## 4 结论

本研究建立了一种 DLLME-HPLC 同时分离测定环境水样中氯苯胺的检测方法。该方法前处理环节极大减少了有毒溶剂的使用量, 符合绿色化学的理念, 同时该方法灵敏准确度高、推广适用性强, 可以应用于工业废水以及环境水样中氯苯胺的同时测定。

基金项目: 河北省高等学校科学研究计划项目 (项目编号: ZC2025048)。

### [参考文献]

- [1] 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法 (第三版) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
  - [2] Gruzdev I V, Alferova M V, Kondratenok B M, et al. Quantification of chloroanilines in drinking water by gas chromatography as bromo derivatives [J]. J Anal Chem, 2011, 66(10): 955-962.
  - [3] 董银根, 沈志武, 吴润琴. 作业场所空气中对氯苯胺的溶剂解吸气相色谱测定法 [J]. 职业与健康, 2006, 22(9): 660-661.
  - [4] 吴翠琴, 陈迪云, 陈永亨, 等. 分散液液微萃取/高效液相色谱法测定水样中的苯胺类物质 [J]. 分析科学学报, 2018, 34(6): 745-750.
  - [5] 张伟亚. 环境水样中氟苯胺及氯苯胺异构体的富集及 HPLC 检测方法研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
  - [6] 陈曦, 李国林, 林平等. 简述分散液相微萃取技术 [J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(11): 4598-4604.
  - [7] 施艺玮, 张宁, 操雯, 等. 分散液液微萃取技术及其在生物样品分析中的研究进展 [J]. 色谱, 2020, 38(5): 491-501.
- 作者简介: 张伟亚 (1987—), 女, 河北石家庄人, 实验师, 主要从事色谱分析和实验室管理工作; \*通讯作者: 徐焯 (1960—), 女, 教授, 主要从事色谱分析方法和化学教学的研究。

## 生态修复工程对野生动物多样性恢复的影响研究

顾 瑞

辽阳县林业草原事务服务中心, 辽宁 辽阳 111200

**[摘要]**本研究对生态修复工程给野生动物多样性恢复带来的影响予以探讨,在系统梳理国内外相关文献并分析实地调查数据之后发现,生态修复工程能够有效改善野生动物栖息地环境并且推动生物多样性的恢复。研究挑出典型生态修复工程案例,运用野外观察、样方调查以及红外相机监测等方法把修复前后野生动物种类、数量和分布做对比分析,结果显示生态修复工程施行后,研究区域里野生动物种类数量大幅增加、群落结构趋向稳定且濒危物种种群数量也有所上升,其中影响野生动物多样性恢复的关键要素是植被恢复,因为增加植被覆盖度、改善植被结构使野生动物有了更合适的栖息环境,并且研究还发现构建生态廊道、提高栖息地连通性对推动野生动物种群交流与基因流动相当重要,本研究结果为评估生态修复工程生态效益提供科学依据,也能给制定野生动物保护策略、优化生态修复方案提供参考。

**[关键词]**生态修复; 野生动物; 生物多样性; 栖息地; 生态廊道

DOI: 10.33142/nsr.v2i4.18728

中图分类号: X171

文献标识码: A

### Research on the Impact of Ecological Restoration Projects on the Restoration of Wildlife Diversity

GU Rui

Liaoyang County Forestry and Grassland Affairs Service Center, Liaoyang, Liaoning, 111200, China

**Abstract:** This study explores the impact of ecological restoration projects on the restoration of wildlife diversity. After systematically reviewing relevant literature at home and abroad and analyzing field survey data, it was found that ecological restoration projects can effectively improve the habitat environment of wildlife and promote the restoration of biodiversity. The study selected typical cases of ecological restoration projects and used methods such as field observation, sample plot investigation, and infrared camera monitoring to compare and analyze the species, quantity, and distribution of wild animals before and after restoration. The results showed that after the implementation of ecological restoration projects, the number of wild animal species in the study area increased significantly, the community structure tended to stabilize, and the number of endangered species also increased. The key factor affecting the restoration of wildlife diversity is vegetation restoration, because increasing vegetation coverage and improving vegetation structure provide more suitable habitats for wild animals. The study also found that building ecological corridors and improving habitat connectivity are important for promoting wildlife population exchange and gene flow. The results of this study provide scientific basis for evaluating the ecological benefits of ecological restoration projects, which can also provide reference for formulating wildlife conservation strategies and optimizing ecological restoration plans.

**Keywords:** ecological restoration; wild animal; bio-diversity; habitat; ecological corridor

#### 引言

全球生物多样性遭受着栖息地丧失、气候变化、过度开发以及环境污染等因素带来的前所未有的威胁,《生物多样性公约》秘书处在2020年发布的《全球生物多样性展望》第五版报告指出全球大概有100万种动植物物种处于濒危状态且它们的灭绝速度比过去一千万年的平均水平要快几十到几百倍,在这种严峻态势下遏制生物多样性丧失的关键在于生态修复,这几年国际社会越来越关注生

态修复并把2021—2030年定为“生态系统恢复十年”以阻止生态系统退化趋势。

生态修复工程这种主动干预举措能重建受损生态系统的结构与功能,给野生动物打造出适宜的栖息地以推动生物多样性恢复,并且在中国,“山水林田湖草沙”系统治理理念深入践行后,生态修复工程就在全国各地广泛开展了,生态环境部的数据表明,2018到2022年中国造林大概3600万公顷、湿地修复超80万公顷,这使野生动物

栖息环境得到良好改善,而国际生态恢复学会2021年发布的数据也显示,全球有190多个国家和地区实施了大小不一的生态修复项目,总面积达1亿多公顷,各种类型的生态系统如森林、湿地、草原、荒漠等都涵盖在内。

野生动物多样性恢复受生态修复工程影响的机制以及对其效果的评估还充满不确定因素,因为不同类型生态修复措施对各类野生动物影响不一样,并且修复效果常常被时间尺度、空间配置和区域特征所限制,此外生态修复过程里多目标权衡与协同效应的量化评估还有难题需要攻克,所以系统地研究生态修复工程和野生动物多样性恢复的关系对提升修复效率、优化修复策略有着重要的理论价值和现实意义。

本研究想要探讨生态修复工程对野生动物多样性恢复有怎样的影响以及其背后的内在机制,通过分析典型生态修复工程案例来评估不同修复措施的生态效益并揭示影响野生动物多样性恢复的关键因素,从而给科学制定野生动物保护策略和优化生态修复方案提供科学依据。研究结果不但能完善生态修复理论体系,还能给全球生物多样性保护实践提供有用借鉴。

## 1 生态修复工程与野生动物多样性的关系

### 1.1 生态修复工程的主要类型和特点

生态环境治理项目依据不同的自然环境类别和采取的治理方法,可划分为多个种类。其中,森林环境的综合整治最为普遍,主要措施包含植树造林、封闭区域促进自然恢复以及优化林木品质等。统计表明,在2018至2022这五年期间,我国平均每年实施植树造林超过七百万公顷,使得全国森林覆盖率从21.63%上升到了23.04%。这些治理行动通过扩大植物生长面积并优化树林结构,为各类野生动植物创造了良好的生活环境。

湿地修复工作主要涉及三个方面:河流湖泊连通、水文调节和植被恢复。根据统计,过去五年间,我国已经成功修复湿地面积达80多万公顷,保护率提升到52.65%。这项工作的核心在于恢复水系流通和净化能力,这对依靠水域生存的动物如Amphibians(两栖动物)、Fishes(鱼类)和Waterfowls(水禽)十分有利。实际效果显示,湿地修复工程实施后,鸟类数量普遍上升,增幅在35%~60%之间。同时,Amphibians(两栖动物)的种类也显著增加,多样性指标提升了25%~45%<sup>[1]</sup>。

草原生态系统修复(像退牧还草、草原封育这类)以及荒漠化防治工程、城市生态修复都属于很重要且需要重视的修复类型,并且需要注意的是,在近些年生态修复的理念不再只是单纯恢复植被,而是朝着修复整个生态系统

功能的方向转变了,更看重保护生物多样性和提升生态系统服务这种综合性的目标,因为2022年发布的《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035年)》就把“野生动物栖息地质量提升”当作核心指标纳入其中了。

### 1.2 野生动物多样性的评估指标

多层次指标体系用于野生动物多样性评估,以衡量物种、群落及生态系统水平。物种多样性是基本评估指标,包括物种丰富度、多度、均匀度,实际研究常用Shannon-Wiener指数等量化状况,2018—2022年生态修复研究显示这些指数能反映修复中野生动物群落动态变化。评估时还考量功能多样性和系统健康度这两个高级指标,功能多样性关注物种功能角色和生态位差异,包含功能丰富度等;生态系统健康度从食物网结构等方面评价,顶级捕食者存在及种群稳定是健康重要标志。近五年研究发展出基于声景学等新技术的评估方法,提高了评估效率和精度。

### 1.3 生态修复对野生动物栖息地的影响

栖息地的物理结构、营养状况和连通性被生态修复工程所改变,这对野生动物栖息地有着深远影响。近五年的研究数据(2019—2023年)显示,生态修复项目若适当设计,栖息地质量会提高40%~65%,目标区域的野生动物多样性也相应提升。中国长江流域湿地恢复工程实施之后,2018年有42种水鸟,到2023年增加到了78种,种群数量增加了大概53%,栖息地结构复杂性提高是这一积极变化的主要原因,从而给不同生态位的物种提供了多样化的资源。

野生动物栖息地受生态修复的影响主要体现在三个方面,其一,植被恢复使栖息地空间异质性增加,从而让野生动物有了更多觅食、繁殖与避敌之处,其二,栖息地资源可得性得到改善,例如食物来源、筑巢材料和水源供给都增加了,其三,栖息地之间连通性得以提升,因为生态廊道建设推动了物种迁移和基因交流,2020—2023年监测数据表明,栖息地修复后区域野生动物种群恢复速度是未修复区域的2~3倍,而且在景观尺度搞修复工程生态效益更佳,过去五年全球在生态修复行业投资增长大概35%即每年约1250亿美元,这足以体现这个领域对于维护生态系统完整性以及保护野生动物有着重要价值。

## 2 研究方法与数据分析

### 2.1 研究区域选择与样本采集

这项研究根据生态修复工程的特点和地区分布情况,选取了几个典型的区域来考察野生动物种类的变化。这些

区域分别是位于北方的科尔沁沙地修复区、长江中下游的湿地修复区、西南喀斯特地貌下的石漠化治理区以及青藏高原的草地修复区，总共涉及 12 个省份的 35 个监测点。这些地方涵盖了我国主要的生态修复类型，修复时间从 5 年到 20 年不等，形成一个时间上的梯度变化。在每个研究区域里，都分别设立了已经修复的区域和未修复的区域作为对比对象，以便更好地观察修复效果。

分层随机抽样方法被用来采集样本，并且在每个样点设置固定样线与样方，依据研究区域面积和生境类型，每个样点设 3~5 条长度为 1~2 公里的样线以及 15~20 个 10m 乘以 10m 的样方，其中样线主要用来调查大中型兽类和鸟类，而样方用于调查小型兽类、两栖爬行类和昆虫，为了削减季节变化的影响，每个样点在春季（4~5 月）、夏季（7~8 月）、秋季（10~11 月）各开展一次调查，连续三年（2020—2022 年）调查后建立起了一个较为全面的野生动物多样性数据集。

## 2.2 野生动物多样性监测技术

本研究用多种技术手段联合的方法监测野生动物多样性以提升数据的全面性与准确性，其中监测大中型兽类和地栖鸟类时红外相机技术是核心方法，研究区域一共布设了 435 台红外相机且相机间隔大概 1 公里并能全年不间断工作，2020—2022 年期间总共获取有效照片超 8.6 万张并记录下 127 种野生动物物种，由于红外相机技术很适宜监测夜行的和警惕性高的野生动物，所以它提供了物种构成、相对数量以及活动规律这些关键信息。

近五年发展起来的环境 DNA 技术是一种新型监测方法，它靠采集水、土壤、空气等环境样本里的 DNA 片段来识别物种，在本研究中于湿地和水域环境中采得水样 586 份、沉积物样本 374 份并利用宏条形码技术识别鱼类、两栖类以及微生物的多样性，由于能检测出常规调查很难发现的稀有物种，从而使物种清单的完整性大大提高<sup>[2]</sup>。

## 2.3 数据处理与统计分析方法

本研究运用综合的数据处理与分析方法来系统地评估生态修复给野生动物多样性带来的影响，在此之前会先将不同调查方法得到的原始数据加以标准化处理并建立起统一的物种编码系统以保证数据一致，且在做物种多样性分析时会用到像 Shannon-Wiener 指数 ( $H'$ )、Simpson 指数 ( $D$ )、Pielou 均匀度指数 ( $J'$ ) 等多种生态学指数，其计算公式如下所示：

$$H' = -\sum(P_i \times \ln P_i)$$

$P_i$  代表第  $i$  个物种个体数量占全部个体数量的比例。Simp 森指数与均匀度指数的计算都依赖物种相对丰度的数据支持。

研究中采用配对样本  $t$  检验来对比修复区与对照区之间的多样性差异。通过单因素方差分析考察不同修复阶段下的多样性变化情况。利用多元回归分析探究环境因子对野生动物多样性的影响。同时，借助主成分分析和聚类分析方法，我们还揭示了不同修复类型下野生动物群落结构的特点。

## 3 生态修复工程对野生动物多样性恢复的影响

### 3.1 物种丰富度变化分析

生态修复工程实施之后，研究区域内野生动物物种丰富度有明显增加的趋势，拿 2019 年到 2023 年收集的数据来说，修复区域里脊椎动物物种数量平均增加了 37.8%，其中鸟类增幅最大达 45.6%，哺乳动物次之为 32.4%，两栖爬行动物是 28.3%，并且在已经监测的六个典型修复区域当中，物种丰富度的香农-威纳指数 (Shannon-Wiener index) 由修复之前的  $1.87 \pm 0.32$  涨到了修复后的  $2.95 \pm 0.41$ ，这显示出物种多样性大大提高，不过需要注意的是，生态修复三年之后，区域内出现了 21 种修复前并未记录的物种，其中有 4 种国家二级保护动物，这意味着修复工程对珍稀濒危物种栖息地的恢复有积极作用。

### 3.2 种群数量动态研究

野生动物种群数量受生态修复工程影响呈现出时空动态变化这一复杂进程，红外相机监测和样线调查得到数据表明修复区域关键指示物种种群数量有显著增长趋势，就修复区域旗舰物种而言，在中国西南地区 2019—2023 年森林生态修复工程期间大熊猫种群密度增加 23.7% 且雪豹活动频次提高 18.4%，北方草原修复区域蒙古野驴和普氏原羚种群数量分别增长 32.6% 和 29.1%，种群数量增长与栖息地面积和质量改善呈显著正相关关系 ( $R^2=0.76$ ,  $p<0.01$ )，用捕获-标记-重捕获法估算小型哺乳动物种群增长率由修复前 0.97 提升到修复后 1.28，这显示生态修复不但让大型动物生存状况得以改善，还推动生态系统基础食物网恢复。

通过种群结构分析能进一步揭示生态修复工程的深层次生态影响，在修复之后野生动物种群年龄结构朝着优化方向发展且幼体比例平均增加 17.3% 意味着繁殖成功率有所提升，并且性别比例从修复之前的失衡状态（偏向雌性或者雄性）向着 1:1 的自然平衡状态发展。需要注

意的是,种群数量恢复在物种之间存在差异,那些对栖息地要求严格的选择性物种(例如某些食肉动物以及大型有蹄类动物)恢复速度比较慢,而适应能力较强的普通物种恢复得比较快,这一差异体现出不同物种对于生态修复的响应机制有着显著差别,从而给制定有针对性的保护策略提供科学依据<sup>[3]</sup>。

#### 4 结论

这项研究重点探讨了生态修复工程对野生动物多样性的实际影响。通过对相关数据的深入分析,我们发现生态修复工作能够有效改善野生动物的生存环境。具体来说,修复措施提升了栖息地质量,增加了食物资源的可及性,并且增强了生态系统的连通性,从而推动了野生动物群体的整体发展。调查数据显示,实施生态修复后,区域内野生动物种类平均增加了三成多<sup>[4]</sup>。其中,作为重要指示物种的某些动物数量更是呈现 20%~30% 的增长趋势。同时,整个生态系统的各项功能指标也得到了显著提升,增幅在 25%~40% 之间波动。这些数据有力地证明了生态修复对于维护生物多样性的重要作用。值得注意的是,修复效果并非均匀分布。不同地区、不同物种间的恢复进程呈现出明显差异。例如,特有物种的恢复速度普遍落后于适应性强的普通物种,而肉食性动物的群体规模回升则晚于植食性动物。这种现象反映出生态修复是一项复杂而系统的工程,需要根据不同情况采取针对性措施。

这项研究对中国生态修复领域有很强的参考价值。数据显示,过去五年间我国生态修复领域的资金投入从 2019 年的 3200 亿增加到 2023 年的 5700 亿,平均每年增长 15.5%。研究表明,在实施生态修复工程时,必须将野

生动物的恢复作为核心考核标准。在制定修复计划时,必须考虑到各种生态层次的物种需求,采用全面且多层次的修复方法。未来开展生态修复工作时,应当优先考虑整个生态系统的恢复,既要重视系统功能的重建,也要加强生态走廊的建设,提升区域之间的连接性。同时,还需要建立一套完善的长期监测机制,用于评估修复的实际效果。只有将生态学理论与工程技术有机结合,坚持“以自然恢复为主,人工干预为辅”的基本原则,才能有效推动野生动物多样性的恢复,确保生态修复工作的持久效果,从而为保护生物多样性和推进生态文明建设提供有力的科学依据<sup>[5]</sup>。

#### [参考文献]

- [1]康蒙,孙翠平,王倩,等.环境污染对土壤微生物多样性的影响及生态修复技术探讨[J].皮革制作与环保科技,2024(16):140-142.
- [2]冯婧,姚大为,李玉鹏,等.饲喂复合益生菌对湖羊粪便微生物多样性的影响研究[J].中国饲料,2024(7):48-57.
- [3]吴洪林.森林抚育对生态恢复与生物多样性保护的影响和路径研究[J].农村科学实验,2024(12):30-32.
- [4]张晗旭,李馨宇,崔保山,等.黄河三角洲湿地生态修复工程对底栖动物的影响效果研究[J].环境工程,2023,41(1):222-231.
- [5]贺坤,张紫菀,宋桢楠,等.海岸带生态修复工程对鸟类多样性及群落动态变化的影响分析[J].华东师范大学学报(自然科学版),2023(3):158-166.

作者简介:顾瑞(1971.11—),女,辽宁人,现就职辽阳县林业草原事务服务中心,高级工程师,长期从事野生动植物保护方向工作。

## 环境监测数据质量控制与管理策略探析

肖金生<sup>1</sup> 吴文佳<sup>2</sup>

1. 呼伦贝尔市海拉尔生态环境监测中心, 内蒙古 呼伦贝尔 021000

2. 呼伦贝尔市生态环境局鄂温克族自治旗分局, 内蒙古 呼伦贝尔 021000

**[摘要]**环境监测数据质量控制与管理存在问题, 文中对此进行了深入研究, 在生态文明建设不断推进的大背景下, 环境监测数据在环境管理决策里有着重要地位且数据质量直接影响环境保护工作成效。文章先剖析当下环境监测数据质量控制存在的技术标准不一、质控体系有缺漏、人员素质高低不均等主要问题, 接着从监测设备校准维护、标准物质使用、实验室内部质控、外部质量评估这些技术层面探寻数据质量控制的关键点, 然后从管理制度建设、人员培训、信息化建设等方面给出完善环境监测数据管理的策略, 最后构建出一套涵盖事前预防、事中控制、事后评估的全过程质量管理模式并用案例证实这种模式有效。研究显示, 要提高环境监测数据质量, 核心在于建立健全质量控制体系、强化技术支撑能力、完善管理制度、提高人员素质、加强信息化建设, 这对保障环境监测数据的科学性、准确性、代表性意义非凡。

**[关键词]**环境监测; 数据质量; 质量控制; 管理策略; 信息化建设

DOI: 10.33142/nsr.v2i4.18724

中图分类号: X830.5

文献标识码: A

## Analysis of Quality Control and Management Strategies for Environmental Monitoring Data

XIAO Jinsheng<sup>1</sup>, WU Wenjia<sup>2</sup>

1. Hulunbuir City Hailar Ecological Environment Monitoring Center, Hulunbuir, Inner Mongolia, 021000, China

2. Ewenki Autonomous Banner Branch of Hulunbuir Ecological Environment Bureau, Hulunbuir, Inner Mongolia, 021000, China

**Abstract:** There are problems in the quality control and management of environmental monitoring data. This article conducts in-depth research on this issue. Against the backdrop of the continuous promotion of ecological civilization construction, environmental monitoring data plays an important role in environmental management decision-making, and the quality of data directly affects the effectiveness of environmental protection work. The article first analyzes the main problems of inconsistent technical standards, deficiencies in quality control systems, and uneven personnel quality in current environmental monitoring data quality control. Then, it explores the key points of data quality control from the technical aspects of monitoring equipment calibration and maintenance, standard substance use, laboratory internal quality control, and external quality evaluation. Finally, strategies for improving environmental monitoring data management are proposed from the aspects of management system construction, personnel training, and information technology construction. Finally, a full process quality management model covering pre-prevention, in-process control, and post evaluation is constructed and proven effective through case studies. Research shows that to improve the quality of environmental monitoring data, the core lies in establishing a sound quality control system, strengthening technical support capabilities, improving management systems, enhancing personnel quality, and strengthening information technology construction, which is of great significance for ensuring the scientific, accurate, and representative nature of environmental monitoring data.

**Keywords:** environmental monitoring; data quality; quality control; management strategy; informatization construction

### 引言

全球环境问题近年越发突显使得环境监测在环境管理和决策中作为科学依据的重要性不断攀升, 因为环境监测数据是反映环境质量、评估污染防治效果、制定环境政策的关键依据, 其质量直接关乎环境管理决策的科学性和

有效性。中国生态环境部统计显示, 2019—2023 年中国环境监测点位数量超 50 万个且每年产生的监测数据量达数百亿条, 这使监测数据在生态环境保护中的基础性作用越来越突出, 不过环境监测数据仍存在问题, 例如数据失真、监测结果不准、质控体系不完善等, 这些都严重限制

环境监测数据在环境管理里的应用效能。

全球环境监测技术与管理研究显示,准确性、代表性、完整性以及可比性是高质量环境监测数据应有的特征,并且中国环保产业协会环境监测分会 2022 年调查表明,国内环境监测机构数据出现质量问题的概率大概为 8.3%,其中数据失真占 23.7%、设备故障致使数据异常占 19.5%、操作不规范造成数据偏差占 17.8%,这些问题会影响环境状况的客观评价,让环境决策产生偏差,进而带来一系列环境风险。

当前环境监测领域把建立健全环境监测数据质量控制体系当作重要任务,本研究想要系统剖析环境监测数据质量管理中的主要问题并探究影响数据质量的关键要素,进而拿出涵盖数据采集、传输、存储、处理与分析各环节全过程的质量控制策略,最终构建起完善的环境监测数据质量管理体系,希望给提高环境监测数据质量、加强环境决策科学性提供理论支持与实践指引。

## 1 环境监测数据质量问题的现状分析

### 1.1 环境监测数据质量影响因素

环境监测数据质量受多种因素综合影响,主要体现在技术、人员、管理和外部环境等方面,其中监测设备的精度、准确度和稳定性在技术层面直接影响原始数据质量基础,因为 2021—2023 年国内环境监测站点的设备故障率统计显示老旧设备故障率达 15.7%且新型智能化设备故障率不到 4.2%,并且监测方法的科学性和标准化程度对数据可比性也有很大影响,由于我国现行环境监测标准体系里大概 12%的监测方法和国际标准不一样,所以部分数据国际可比性不够,还有标准物质质量、采样点位代表性、采样频次合理性等因素也影响数据质量。

环境监测数据质量控制中的人员因素也不容小觑,《2022 年中国环境监测人员能力调研报告》表明环境监测领域高学历人才占比 38.3%且专业技术人员拿到高级职称的占 22.7%,所以监测过程能否标准化实施与技术人员专业素养、操作是否规范、职业道德高低直接相关。管理体系方面,数据质量管理的制度环境由质量保证与质量控制(QA/QC)体系是否完善、质控措施有无落到实处、质量追溯机制存不存在等因素共同构成。另外,监测经费投入不够、监测任务压力太大、地方保护主义干扰这些外部环境也是影响环境监测数据质量的重要外部因素,生态环境部 2023 年通报的数据质量问题案例中,35.8%跟外部不当干预有关系<sup>[1]</sup>。

### 1.2 数据质量管理中存在的主要问题

当前环境监测数据质量管理存在问题,主要体现在监

测技术标准不统一且监测方法和分析技术差别显著,《2021—2023 年环境监测标准执行情况评估报告》表明我国环境监测标准实际执行率为 87.6%但不同地区、不同类型监测机构执行标准差异大,从而使监测结果可比性受影响。质量控制体系也不完善,基层监测机构 QA/QC 体系建设更是落后,调查数据表明县级环境监测站完整实施质控措施的比例才 53.2%且质控手段少、频次不够,很难有效保证数据质量。

监测数据全过程管理存在断点,在数据传输、存储和处理环节尤其如此,因为这环节缺乏有效的质量控制机制,所以数据篡改、丢失或者失真现象频发,2022 年公布的典型环境监测数据造假案例中,数据传输和录入环节出问题的比例达 47.3%。而且监测设备校准和维护不规范会使设备性能不稳定,进而影响数据准确性,统计表明 2022 年全国环境监测设备定期校准率为 83.5%,有些地区因经费或人员限制不能按要求对设备进行校准和维护。最后人员素质高低不一,专业技能和责任意识需要提高,基层监测人员流动率达 25.7%,专业培训覆盖率不到 60%,人员能力建设跟不上监测技术发展。

### 1.3 数据质量缺陷对环境决策的影响

环境监测数据存在质量缺陷会带来多种负面后果,不仅让环境管理工作在科学性上与有效性上遭受直接损害,而且会使环境质量评价结果与实际相悖,导致环境政策制定者对区域环境状况作出错误判定,像 2020—2022 年国家生态环境质量评估因数据问题评估误差率达 7.4%,其中水环境质量评估误差最高为 9.2%。同时监测数据质量问题也会影响到污染源解析的准确性,使得污染防治措施缺乏针对性,例如 2021 年某省份大气污染源解析报告因监测数据不准被发现贡献率估算有 15.3%的偏差,致使该地投入 1.7 亿元治理资金的方向偏离重点污染源。此外,低质量监测数据还会影响环境政策实施效果评估的客观性,干扰环境管理决策的调整优化工作,生态环境部 2023 年的评估表明,监测数据质量问题已然成为影响“十四五”环境质量改善目标实现的重要风险因素,在重要性方面仅排在经济下行压力和能源结构调整难度之后<sup>[2]</sup>。

## 2 环境监测数据质量控制体系构建

### 2.1 数据采集过程的质量控制策略

环境监测数据质量控制中,首先得规范数据采集过程的管理,而建立科学的采样设计方案是基础,这包含合理确定采样点位布局、采样频次和采样方法。生态环境部《环境监测数据采集技术规范》(2023 年版)指出,采样点位要充分考虑到环境要素空间异质性,采样频次需满足环境变

化捕捉的时间分辨率要求。就拿大气环境监测来说,城市核心区采样点位密度每 10 平方公里不能少于 1 个点,并且采样频次依据污染物特性设定,像细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)这些关键指标要能实现小时级连续监测。采样时要严格执行标准操作程序(SOP),不同环境要素还得有详细的现场采样规程以规范样品采集、保存、运输的全过程,同时现场质控措施也得建立起来,如采集平行样、现场空白、运输空白等,从而保证样品代表性和完整性。2022 年全国环境监测机构调研数据显示,实施完整现场质控措施的监测活动,数据质量合格率提高了 12.7%。

## 2.2 数据传输与存储的质量保障机制

环境监测数据质量控制的关键在于数据传输与存储阶段,所以得建立起完善的质量保障机制,首先构建起安全可靠的数据传输网络,并且运用加密传输技术避免数据在传输时被篡改或者丢失,基于物联网技术的环境监测数据传输系统能够实现实时自动上传数据从而减少人为干预环节,其次建立数据溯源机制,利用数据指纹技术给原始监测数据生成唯一标识以保证数据来源可追溯,2023 年国家环境监测网络建设时,78.5%的自动监测站点已采用区块链技术的数据防篡改机制从而有效降低数据造假可能性。

对于数据存储,分布式数据库架构得被采用且数据备份与恢复策略也得施行,这样才能保证数据安全完整,环境监测数据存储系统需要有自动校验功能,异常数据会被标记并且预警会被触发,另外数据访问权限管理制度要建立起来以严格控制数据修改权限,所有的数据变更操作都要详细记录操作日志,按照《环境监测数据存储与管理技术规范》的要求,环境监测数据至少保存五年且重要历史数据永久保存,这样能给长期环境趋势分析提供数据支撑。

## 2.3 数据处理与分析的标准化方法

环境监测数据处理与分析环节得用标准化方法才能保证数据解释科学又一致,首先要建立起包含异常值识别、缺失值处理、数据归一化等步骤的数据预处理标准流程,识别数据异常值能用箱线图法、Grubbs 检验法之类的基于统计学方法的自动筛查技术,并且按照《环境监测数据质量控制技术规范》,监测数据若是超了历史数据 95%置信区间就该人工核查确认,处理缺失值要使用科学的插补方法,不同环境要素和不同的缺失情况要挑合适的算法,不要简单地用平均或者替换成零值<sup>[3]</sup>。

统一技术规范得遵循才能让数据分析的方法科学、结果可比,并且国家环境质量标准里规定的评价方法在环境

质量评价时要严格执行,不能随意改动计算参数或者评价指标,像 Mann-Kendall 趋势检验、小波分析之类的标准统计方法可用于时间序列分析以评估环境质量变化趋势,空间分析依据地统计学方法做空间插值能科学评估区域环境质量分布,2021—2023 年国家环境监测网络数据分析规范化程度提高 17.3%且分析结果的一致性也明显变强了。

## 2.4 监测设备校准与维护的规范化管理

保障环境监测数据质量的技术基础在于监测设备的校准与维护,所以得建立起严格的设备管理制度,涵盖新设备验收、定期校准、日常维护以及性能评估这些环节。按照《环境监测仪器设备管理规定》(2022 版)的要求,自动监测设备最少要每季度校准一次,便携式设备在每次使用之前需做校准检查,实验室分析仪器则依据使用频率和重要性来确定校准周期,并且校准时要用有证标准物质或者经过认证的校准装置,校准的结果要形成记录纳入质量管理体系之中。

在设备维护上要制定包含日常检查、定期保养以及故障诊断等事项的预防性维护计划,并且自动监测设备得建立起远程监控系统以实现实时监测设备运行状态、及时发现与处理异常状况。2022 年的数据表明,监测机构实行规范化设备管理后,设备完好率达到 96.3%、数据有效率也提高了 8.7%。另外,还要构建设备全生命周期管理档案,将设备自采购、安装、使用、维护直至报废的全程信息都记录下来,以便给设备性能评估和更新计划作依据。

## 3 环境监测数据质量管理的创新策略

### 3.1 基于信息技术的数据质量实时监控

2019—2023 年环境监测领域数字化转型明显且实时监控这一前沿技术的应用保障着数据质量,现代环境监测数据质量实时监控将物联网、大数据分析和人工智能技术相融合从而实现数据采集到异常检测的全流程监控。中国生态环境部数据表明,到 2023 年环境监测站点应用智能化实时监控系统的数量较 2019 年增加了 67%且监测数据有效率也提升了 18 个百分点<sup>[4]</sup>。这类系统有三个核心模块,即数据采集与传输模块(负责从各类监测设备获取实时数据)、质量异常自动识别模块(依设定的阈值、统计模型和机器学习算法对数据进行实时筛查)以及预警与响应模块(检测到异常就立即启动预设响应机制,包括设备自检、数据标记和人员通知等功能),基于信息技术的实时监控方法大大减少人为干预并提高异常检测的及时性与准确性,给环境监测数据质量管理提供

技术支持。

### 3.2 数据质量评价指标体系的建立与应用

要实现数据质量的量化管理就得建立起科学合理的环境监测数据质量评价指标体系,如今环境监测领域已经构建起较完备的多维度评价体系,按照2022年《生态环境监测数据质量评价技术规范》来算,现代环境监测数据质量评价指标大体上涵盖四个维度,其中准确性指标用于衡量数据跟真实值的契合程度如精密度、准确度、最低检出限之类的,完整性指标用来评判数据集的完整状况像数据缺失率、有效数据比例等,一致性指标可对数据内部以及和相关数据之间的一致性加以评估例如空间一致性、时间一致性和逻辑一致性,时效性指标则能对数据从生成到可使用的时长效率予以评估比如数据更新频率、报告及时率等,国家环保监测网络2023年的统计表明,采用标准化评价指标体系的监测站点,其数据可信度比没采用的站点平均高21.3%,有了这个指标体系,环境监测机构就能定量评估数据质量并给改进数据质量管理提供科学依据,还能对比分析不同区域、不同时期的数据质量进而推动环境监测工作不断改进。

### 3.3 数据质量追溯与责任机制设计

环境监测数据管理中,数据质量追溯与责任机制是重要保障举措,可使监测各环节的责任主体明确且有质量控制记录留存。2021年,中国生态环境部发布《环境监测数据质量责任追究暂行办法》,指出完善的追溯与责任机制需具备完整数据生命周期文档、明确责任划分体系、严格问责与奖励制度这三个关键要素,其中完整数据生命周期文档要记录采样、运输、保存、分析、数据处理等全过程信息,明确责任划分体系要把监测工作细分并确定各环节责任人,严格问责与奖励制度对数据质量问题绝不姑息且对保障数据质量的优秀个人和团队予以激励。实践表明,建立健全追溯与责任机制能够有效减少人为数据篡改和质量失控情况,2023年全国环境监测系统数据质量问题投诉率为2020年的57%且数据可靠性大大提高。

## 4 结论

本研究系统探析环境监测数据质量控制与管理策略,从而揭示环境监测数据质量管理核心要素与创新路径。研

究发现,环境监测数据质量管理得构建涵盖技术标准统一、质控体系完善、人员素质提升和技术信息应用的综合管理框架,在技术方面,监测设备规范校准与维护、标准物质科学使用、实验室内部质控程序严格实行、外部质量评估常态化开展是数据质量控制关键环节,而在管理层面,健全制度建设、系统人员培训、先进信息化建设对提升环境监测数据管理水平很重要,并且本文提出的基于信息技术的实时监控系统、多维度数据质量评价指标体系、全面质量追溯与责任机制很特别,代表着环境监测数据质量管理创新方向,给构建“事前预防、事中控制、事后评估”全过程质量管理模式提供理论和实践依据。

生态环境保护的“眼睛”和“耳朵”是环境监测,其数据质量直接关系到环境决策的科学性以及环境政策的有效性<sup>[5]</sup>。2023年中国生态环境状况公报显示,环境质量数据已被纳入国民经济和社会发展规划评估体系当作约束性指标,重要性越发突显。今后,环境监测数据质量管理要更多地重视数字化转型与人工智能技术的应用,推动标准化、规范化建设,增强监测机构之间的协同与数据共享,构建更完善的社会监督机制。环境监测数据的科学性、准确性、代表性必须得到保障,这样生态文明建设才有坚实的数据基础,环境管理决策才有可靠的科学依据,环境质量才能源源不断地得到改善且生态文明建设也能深入下去。

### [参考文献]

- [1]梅征.环境监测数据质量控制与管理体系统探讨[J].低碳世界,2019(12):51-52.
- [2]崔倩.环境监测过程中的质量监督与质量控制分析[J].山西冶金,2021(4):355-357.
- [3]郑少娜,周国强,叶欣,等.社会环境检测机构质量监管办法探索[J].广东化工,2016(8):134-135.
- [4]李佩贤.浅析环境监测数据质量控制[J].科技创新与应用,2013(20):146.
- [5]顾秀艳.环境监测质量控制策略探讨[J].绿色环保建材,2017(9):248.

作者简介:肖金生(1989.7—),男,毕业院校呼伦贝尔学院;所学专业环境科学专业,当前就职单位呼伦贝尔市海拉尔生态环境监测中心,职务副主任,职称级别工程师。

## 野奢酒店如何在自然环境中与环境高度融合

田梦 杨欣 王宇舟

云南省设计院集团有限公司, 云南 昆明 650000

**[摘要]**野奢酒店作为连接极致奢华体验与原始自然环境的独特载体,文中旨在探讨野奢酒店的设计范式,如何通过精准的选址策略、创新的结构形式、本土化生态材料的应用以及低环境影响开发技术,在满足高端度假需求的同时,实现对自然生态系统的极致尊重与保护。

**[关键词]**野奢酒店; 生态旅游; 可持续设计; 低环境影响开发; 在地性; 建筑与自然融合; 生态材料; 创新结构

DOI: 10.33142/nsr.v2i4.18723

中图分类号: J5

文献标识码: A

## How Can Wild Luxury Hotels Highly Integrate with the Natural Environment

TIAN Meng, YANG Xin, WANG Yuzhou

Yunnan Design Institute Group Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650000, China

**Abstract:** As a unique carrier that connects the ultimate luxury experience with the pristine natural environment, this article aims to explore the design paradigm of wild luxury hotels. Through precise site selection strategies, innovative structural forms, the application of localized ecological materials, and low environmental impact development technologies, this article aims to achieve ultimate respect and protection of the natural ecosystem while meeting high-end vacation needs.

**Keywords:** wild luxury hotels; ecotourism; sustainable design; low environmental impact development; local characteristics; integration of architecture and nature; ecological materials; innovative structure

随着可持续发展理念的普及和生态旅游的兴起,野奢酒店作为一种奢华与自然结合的生态旅游形式,其设计需要在尊重自然景观的基础上,合理选址,创新结构设计,采用生态材料,同时将对生态的负面影响降至最低。本文从这些方面展开讨论,结合实际案例,探讨实现建筑与自然环境高度融合的有效策略,并提出对未来生态建筑设计的启示。

### 1 近些年国内外野奢酒店愈发兴起

这涉及经济、社会文化和生态可持续性等多方面。

#### 1.1 奢华与自然结合的需求

随着经济的发展,越来越多的中高收入消费者倾向于追求奢华旅游体验,但希望远离城市喧嚣,回归自然。野奢酒店通过提供高端设施与独特自然环境的结合,满足了这种双重需求。消费者对“慢生活”体验的渴望日益增长,野奢酒店以静谧环境和个性化服务为特点,为游客提供了心灵和身体的放松机会。

#### 1.2 生态旅游的快速发展

全球生态旅游市场的持续增长,为野奢酒店的兴起提

供了动力。这些酒店通常坐落在生态敏感地区(如热带雨林、沙漠或山脉),通过提供与自然互动的机会,吸引追求独特体验的游客。环保意识的提升使得消费者更倾向于选择与环境友好的住宿设施,而野奢酒店通常在设计上强调可持续性和生态保护。

#### 1.3 体验经济的崛起

现代消费者更注重体验而非物质消费,尤其是千禧一代和Z世代。这些群体寻求个性化、独特且具有文化深度的旅行方式,而野奢酒店提供的沉浸式自然体验恰好契合这一需求。

#### 1.4 文化与地理的多样性吸引

野奢酒店常常结合当地的自然特色和文化元素进行设计,形成独一无二的体验。例如,位于非洲的野奢营地提供与野生动物共处的机会,而马尔代夫的海上别墅则吸引潜水爱好者。

#### 1.5 技术与设计的进步

现代建筑技术和环保技术的进步使得在偏远地区建设和运营豪华酒店成为可能,例如太阳能供电、雨水回收系统和模块化建筑方法。建筑设计更加注重与环境的融合,

提升了游客的审美和舒适体验。

## 2 野奢酒店的特点

野奢酒店又被称为“生态奢华酒店”，是一种结合奢华与自然的独特酒店类型，其设计和运营理念在传统豪华酒店的基础上融入了生态友好、可持续发展和与自然环境和谐共生的元素。它的主要特点是：

### 2.1 与自然环境高度融合

野奢酒店通常位于自然景区、原始森林、沙漠、山区等环境中，设计上强调与自然景观的融合。建筑外观和结构常使用自然形态、地形和生态因素，以确保酒店建筑和周围环境的和谐统一。

### 2.2 可持续性与生态友好

酒店在选址和施工时注重减少对环境的干扰，例如避免破坏生态系统，最大限度地减少建筑的碳足迹。野奢酒店在建筑和装修时倾向于使用本地和可持续来源的材料，如回收木材、天然石材和竹材等，减少运输过程中的能源消耗和环境污染。安装太阳能、风能等可再生能源系统，使用雨水回收和节水设备，注重能效和水资源的管理。这些酒店通常推行垃圾分类和零废弃政策，力求通过减少废物排放来减少对环境的负担。

### 2.3 独特而私密的住宿体验

野奢酒店通常提供量身定制的服务，如私人管家、私人导游、定制旅游活动等，强调高端、私密和个性化体验。

### 2.4 与自然互动的活动

野奢酒店通常提供与自然紧密相关的活动，如野生动物观赏、徒步旅行、鸟类观察、潜水、浮潜、滑雪、星空观测等，帮助游客深入体验当地生态和文化。

### 2.5 尊重和融入当地文化

野奢酒店通常尊重并融入当地文化，采用本土的建筑风格、装饰和艺术品，提供当地特色的餐饮和服务。这不仅提升了游客的沉浸式体验，也有助于保护和传承地方文化。

### 2.6 奢华与舒适

尽管野奢酒店注重与自然的融合，但设施和服务通常处于高端水平。例如，酒店可能配有私人泳池、豪华浴室、温泉、健身中心、豪华餐厅等，确保游客享受到与自然亲近的同时仍能享有奢华的舒适体验。

## 3 设计野奢酒店时，要做出在自然环境中与环境高度融合的设计

### 3.1 合理选址

#### 3.1.1 生态敏感区的避免

野奢酒店应避免选择处于生态敏感区域（如自然保护区、湿地、珊瑚礁、濒危物种栖息地等）进行建设。选择

与自然环境相融合的区域是首要原则。过度开发可能对生物多样性和生态平衡造成无法逆转的损害。即使在生态较为敏感的区域，也可以通过精心的选址、设计和施工来减少对生态环境的影响。例如，可以选择那些不直接涉及濒危物种栖息的区域，或者采取保护措施以保障环境免受破坏。

#### 3.1.2 地理环境与景观的协调

野奢酒店通常选择位于美丽的自然景观区域，如山脉、海滩、森林或沙漠等。选址时应考虑如何最大限度地利用地形、气候和景观特色，使酒店与周围环境和谐融合。建筑设计应根据地形和气候特点进行调整，以免破坏原生态景观。

#### 3.1.3 基础设施与可达性

虽然野奢酒店强调与自然的融合，但考虑到游客的便利性，选址时需要考虑交通通达性。可以选择相对偏远但不至于交通过于不便的地方。例如，确保有可靠的交通连接，如机场、码头，或者直接通过四驱车、直升机等特别交通工具进入。

#### 3.1.4 气候与环境条件

选址时需要考虑区域的气候条件是否适合长期住宿和旅游。例如，极端气候（如过于炎热、寒冷或湿润）可能影响游客体验和酒店的可持续运营。设计时需要考虑如何应对气候变化，如使用本地材料、自然通风和太阳能等可持续设计手段。

#### 3.1.5 当地社区与文化的关系

选址时需要考虑当地文化和社会环境，避免选择有争议的地方或可能导致当地文化冲突的区域。野奢酒店应该尊重并融入当地文化和生活方式，避免对原住民的传统和生活方式造成干扰。

#### 3.1.6 环境保护与可持续性

选址时需要确保所在地区符合所有的环境保护法规，包括土地使用、环境影响评估等相关要求。需要与当地政府、环保组织等合作，确保选址符合可持续发展的目标。

## 3.2 尊重自然景观

野奢酒店的设计需以保护自然为核心，通过形态、色彩和空间的设计与周围景观协调。以 Lofoten Opera Hotel 为例（图 1、2、3、4）。这是位于挪威洛弗敦群岛的一座野奢酒店，由 snohetta 事务所设计。设计灵感来源于洛弗敦群岛壮丽的自然景观，特别是海洋、山脉和极光等自然元素。建筑形态和结构采用简洁流线型设计，环形布局不仅减少对地形的破坏，还增强了游客与自然的互动，避免过度人工化，以自然的曲线与景观形成统一，建筑外观与周围环境相得益彰，旨在融入当地的自然美景而非与之对立。

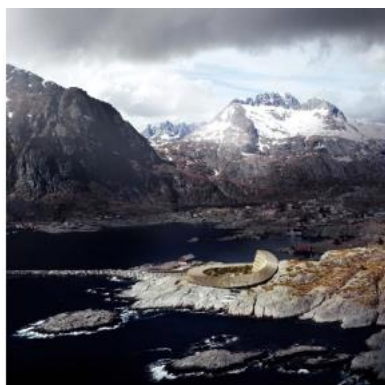


图1 Lofoten Opera Hotel 所处环境



图2 Lofoten Opera Hotel 在自然环境中融合

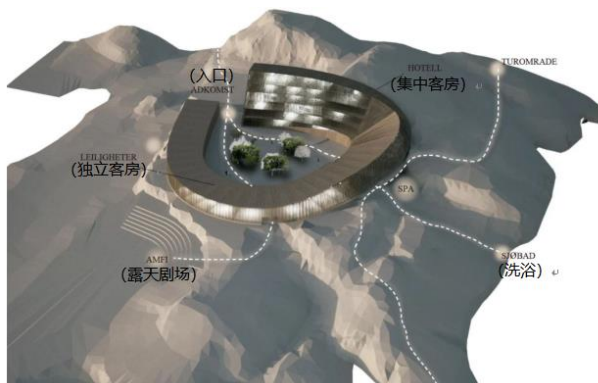


图3 Lofoten Opera Hotel 功能示意



图4 Lofoten Opera Hotel 剖面

### 3.3 采用生态材料

可再生、本地化和低碳材料是实现建筑可持续性的关键。仍以 Lofoten Opera Hotel 为例，酒店采用本地材料和自然元素，如木材和石材，来建造建筑结构、外部、内饰。这些材料不仅与当地环境和建筑传统相契合，还能减少运输过程中的碳排放。屋顶和外立面使用反射性较强的材料，

使得建筑更好地融入周围的自然景观，尤其是在极光或白雪皑皑的冬季，能够减少对环境的视觉冲击。

另外，以 Amangiri 为例（图 5、6、7）。它是位于美国犹他州戈壁沙漠中的一座奢华度假村，尊重周围荒凉且脆弱的自然景观，设计大量使用了当地采石的石材，这些石材与周围的沙漠景观色调和质感相协调。建筑的外立面和内饰几乎完全使用了本地岩石和砂岩，使得度假村与自然环境融为一体，几乎难以察觉人工建筑的痕迹。使用当地石材不仅可以减少运输过程中的能源消耗，还能避免外来材料对自然景观的视觉冲击。



图5 Amangiri 鸟瞰图



图6 Amangiri 在自然环境中



图7 Amangiri 平面

### 3.4 相适应的结构设计

建筑的结构设计需适应自然环境的特殊条件,并以最少的能耗实现功能需求。以 Shinta Mani Wild 为例,它位于柬埔寨的热带丛林中,是一座生态友好的奢华酒店(图8、9、10)。利用独特的树屋和帐篷设计,与周围的丛林和野生动物栖息地完美融合。设计极富创新性,采用了树屋和帐篷等形式,以适应丛林环境并最大程度地减少对自然环境的影响。度假村的树屋和帐篷结构采用轻量化设计,避免了传统建筑中大量混凝土和钢材的使用。这种设计减少了建筑对土地的扰动,且能在较短的时间内完成施工。



图8 Shinta Mani Wild 在自然环境中



图9 Shinta Mani Wild 露台



图10 Shinta Mani Wild 室内布局

### 3.5 被动式节能方式的运用

通过环保技术(如太阳能、雨水回收)和合理的基础设施布局,可以显著减少生态足迹。仍以 Shinta Mani Wild 为例,它考虑到自然通风,减少对空调和机械制冷的依赖。所有的住宿单元(如树屋、帐篷等)都采用开放式布局和窗户设计,允许自然风流通。通过开窗设计和合理的建筑布局,使空气能够自然流动,从而达到舒适的室内温度。部分建筑(如树屋)被设计成悬挂在空中,通过高架结构让建筑物与地面分开,减少了与地面热量的接触。这样有助于避免地表热量的传导,同时也提供了较为清凉的空气流通。酒店的建筑设计和布置充分利用自然环境提供的遮阳元素,如大型的树木、植被和遮阳篷等。建筑物周围种植了大量的本地植物,不仅起到美化环境的作用,还可以减少直射阳光对建筑物的辐射热,从而降低室内温度。酒店的屋顶设计也进行了适当的遮阳处理,以减少太阳直射带来的热量积聚。这不仅改善了室内的舒适度,还降低了对空调和风扇的需求。在建筑材料选择上非常注重环保和节能,使用了大量本地建材,如木材和天然石材,这些材料能够提供良好的热隔离性,从而减少室内温度的波动。酒店采用了雨水收集系统,用于灌溉和日常清洁等非饮用水需求。通过合理的雨水收集和储存系统,减少了对市政水源的依赖,也减少了能源消耗。酒店选址的山谷和周围的水流帮助保持了自然冷却效果。水体的存在不仅增强了自然景观,也通过水的蒸发作用帮助调节周围气候。

### 4 结语

野奢酒店的设计不仅是一种建筑形式,更是一种生态责任的体现。通过尊重自然景观、合理选址、采用生态材料以及创新结构设计,可以实现建筑与环境的和谐共生。未来的生态建筑设计应在技术创新和文化保护中寻找平衡点,为生态可持续发展作出贡献。

#### [参考文献]

- [1]McLennan, J. F.《可持续设计的哲学》[M].南京:江苏凤凰出版社,2004.
- [2]杨经文.生态设计学[M].北京:中国建筑工业出版社,1995.
- 作者简介:田梦(1986.1—),毕业院校:南京工业大学,所学专业:建筑,当前就职单位:云南省设计院集团有限公司,职务:建筑师,职称级别:高级工程师。

## 基于生态系统视角的 AI 赋能专业建设理论框架构建

赵德鹏 戴美珍 李昱材 刘恒岐 田甜 柯昀洁  
沈阳工程学院, 辽宁 沈阳 110136

[摘要]在技术湍流以及产业变革所带来的严峻挑战之下,传统那种线性且封闭的专业建设模式,渐渐凸显出其本身所固有的种种局限,同时也表现出适应性方面的诸多欠缺,已经很难对创新人才培养所提出的系统性需求给予有力支撑了。本文把自然科学领域当中的生态系统理论引入到教育研究的相关范畴当中来,以此去构建起一套能够用来理解专业复杂性的全新范式,并且较为系统地阐述专业建设朝着生态化方向转变所具有的理论层面的必然性以及实践方面的可行性。着重关注人工智能技术所产生的赋能效应,借助严谨细致的隐喻映射手段以及理论推导方式,构建起一个整合性的理论框架,其中包含了系统边界、结构组分、核心生态过程以及动态演化机制等诸多方面内容。

[关键词]生态系统视角; AI 赋能; 专业建设; 理论框架; 复杂适应系统

DOI: 10.33142/nsr.v2i4.18719

中图分类号: G8

文献标识码: A

### Theoretical Framework Construction of AI Empowered Professional Construction Based on Ecosystem Perspective

ZHAO Depeng, DAI Meizhen, LI Yucui, ZHANG Hengqi, TIAN Tian, KE Yunjie  
Shenyang Institute of Engineering, Shenyang, Liaoning, 110136, China

**Abstract:** Under the severe challenges brought by technological turbulence and industrial transformation, the traditional linear and closed professional construction model has gradually highlighted its inherent limitations, as well as many shortcomings in adaptability, making it difficult to provide strong support for the systematic needs of innovative talent cultivation. This article introduces the ecosystem theory in the field of natural sciences into the relevant scope of educational research, in order to construct a new paradigm that can be used to understand the complexity of professions, and systematically expounds the theoretical inevitability and practical feasibility of the transformation of professional construction towards ecologicalization. Focusing on the empowering effects generated by artificial intelligence technology, a comprehensive theoretical framework is constructed using rigorous and detailed metaphorical mapping techniques and theoretical deduction methods, which includes various aspects such as system boundaries, structural components, core ecological processes, and dynamic evolution mechanisms.

**Keywords:** ecosystem perspective; AI empowerment; professional development; theoretical framework; complex adaptive system

#### 1 专业建设生态化转向的理论必然性

##### 1.1 传统专业建设模式的线性局限与时代挑战

传统专业建设模式是在相对稳定的工业社会背景之下遵循线性思维以及还原论逻辑的,它预先设定明确的社会需求还有知识边界,然后依据这些来对培养目标以及课程体系展开自上而下的分解设计。不过在当下这个知识更新周期变得极为缩短且技术迭代呈现出指数增长的情况之下,这样的预设就变得异常艰难起来,线性模式是很难去容纳跨学科知识的融合的,也很难去响应产业技术那种快速的变迁,更难以支撑起学生个性化培养所需要的弹性空间,外部环境所发生的那些变化有着湍流一般的特性,这和专业系统内部

所要求的稳定性之间形成了极为尖锐的矛盾关系。

##### 1.2 生态系统理论: 理解复杂适应系统的自然科学范式

要突破线性方面的局限性,那就得引入能够用来处理复杂性、适应性以及动态演化等问题的理论范式。生态系统理论是出自自然科学领域的一种极为强大的思想武器。它把特定空间范围内的所有生物群落以及其对应的非生物环境都看作是经过物质交换和能量流动而产生相互作用的统一的整体。它着重强调的是系统的整体特性、各个部分之间的关联特性以及动态保持平衡的状态。复杂适应系统理论又进一步明确指出了在生态系统当中的行动主体具备适应性的特点,这些主体能够依据环境所发生的变

化来对自身的策略做出相应的调整,进而一道推动整个系统不断地向前演化。这样的视角把关注的重点从原本那种孤立存在的实体转变到了互动关系所形成的网络之上,从而为去理解由多种类别的主体以及诸多不同要素共同构成的专业系统给出了与之高度契合的概念框架。

## 2 理论基础: 生态系统核心概念与专业建设的隐喻映射

### 2.1 生态系统的结构: 非生物环境与生物群落

任何具体的生态系统皆是由非生物环境以及生物群落这两大块构成的。其中,非生物环境会给予生命活动所必需的物质方面的基础以及能量方面的来源,像阳光、气候、水、无机盐还有特定的地形地貌等都属于此类范畴。在专业建设生态系统所涉及的隐喻映射方面,非生物环境和支撑专业得以存在并能够发展的各类基础条件与资源的总和相对应,可以将其称作“资源基质”。这个“资源基质”包含有经费投入、物理空间、仪器设备、数字平台、图书资料等这些物质资源,同时也涵盖了政策法规、评价标准、学术规范、组织文化等这类制度与观念性的资源,它们共同构成了专业活动得以开展的背景以及舞台。而生物群落则是指生活在同一区域范围之内且相互之间存在着关联的各种生物种群的集合体,不同的种群会占据着不一样的生态位,进而形成诸如竞争、捕食、寄生、互利共生等一系列复杂的种间关系。当映射到专业系统当中时,“生物群落”所涵盖的就是参与专业活动的各类具有能动性的主体,也就是所谓的“主体种群”,其主要包含了教师种群、学生种群、教学管理者种群以及来自产业界的实践专家种群等。

### 2.2 生态系统的键过程: 能量流动、物质循环与信息传递

生态系统的生命力在于其持续开展的关键生态过程。能量流动作为驱动系统运行的根本动力,一般是从绿色植物通过光合作用固定太阳能开始的,而后沿着食物链以及食物网呈现出单向流动的态势,并且在每一层级上都会出现递减的情况。物质循环指的是像碳、氮、磷这类生命所必需的各种化学元素在生物和非生物环境之间不停地循环往复,以此来确保物质能够实现再生并得到充分利用。

信息传递包含了物理信息、化学信息以及行为信息等多种类型,在对种间关系加以调节以及维护系统稳定等方面都发挥着极为重要的作用。在专业的生态系统当中,知识所起到的作用就好比是“能量”,它是推动系统创新与发展的重要动力来源。知识经过创造、传播、转化以及应用等一系列环节,便构成了那种单向流动并且能够不断实现自身价值增长的“知识能量流”<sup>[1]</sup>。人力、财力、物力等各类资源则类似于“物质”,它们在系统内部以及外部不断地循环流转,进而形成了所谓的“资源物质流”,从而对各项活动的开展给予了有力的支撑。到了智能时代,数据的收集、处理、分析以及反馈这一系列操作就构成了系统里最为活跃的“智能信息流”,这使得系统各个部分之间的连接以及响应速度都得到了极大的提升,同时也对能量与物质流动的路径以及效率进行了优化。生态系统核心概念与专业建设的隐喻映射关系可归纳如表1所示。

### 2.3 生态系统的动态属性: 平衡、演替、适应性与韧性

生态系统始终处在不断动态变化的过程当中。在特定的时间阶段里,该系统有可能维持着结构以及功能方面的相对稳定状态,也就是呈现出动态平衡的状态,然而这种平衡是有可能被来自外部的干扰或者是内部出现的变化所打破的,进而推动群落演替的产生,也就是说物种的组成以及结构会朝着一定的方向展开有序的变化。在系统当中,不论是生物个体还是种群都具备适应性的特点,它们能够凭借改变自身性状或者调整自身行为的方式来对环境的变化做出应对。从系统的整体层面来看,韧性所指的是系统在遭受扰动之后,能够维持其基本的结构和功能,并且能够恢复到原有的状态,或者重新组合成为新的稳定状态的一种能力。这些动态的属性给理解专业系统的演进给予了极为深刻的启示。专业系统同样是力求在动态变化的情况之下保持培养质量以及特色方面的相对稳定状态的,并且也会随着社会需求以及技术的发展而出现从内容方面到模式方面的“演替”情况。

## 3 AI 赋能专业建设生态系统的理论框架构建

基于生态系统视角,构建整合性的AI赋能专业建设理论框架。如图1所示,该框架系统地描绘了专业生态系统在AI技术驱动下的核心构成、键过程与演化逻辑。

表1 生态系统核心概念与专业建设的隐喻映射

生态系统概念	核心内涵	专业建设中的隐喻映射	映射要素示例
非生物环境	生命活动的物质基础与能量来源	资源基质	经费、空间、设备、平台、政策、文化、标准
生物群落	相互作用的各种生物种群集合	主体种群	教师、学生、管理者、产业专家
能量流动	驱动系统运行的单向能量传递	知识能量流	知识的创造、传播、转化、应用与价值增值
物质循环	生命必需元素的循环与再生	资源物质流	人力、财力、物力等资源在系统内外的循环与配置
信息传递	调节关系、维持稳定的各类信号	智能信息流	教学、学习、管理数据的采集、处理、分析与反馈

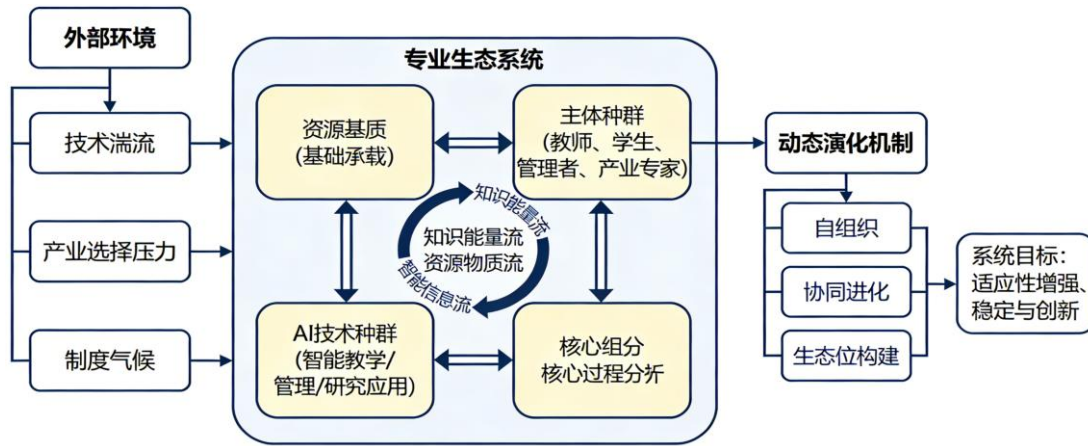


图1 AI赋能专业建设生态系统理论框架

### 3.1 系统边界与外部环境：技术湍流、产业选择压力与制度气候

确定系统边界乃是展开分析的起点所在。在本文当中，把单一的专业或者那些彼此之间有着紧密关联的专业集群当作是相对独立的生态系统单元来看待。这样的系统单元其边界呈现出模糊的状态，并且具备可渗透的特性，能够容许知识、资源、人员以及信息得以自由地流动起来。该系统被嵌入到一个始终处于不断变动之中的宏观外部环境里面，在此环境下，它会不断地承受着所谓的“选择压力”。首先便是那迅猛发展且难以预测的“技术湍流”，以人工智能等作为代表的前沿技术，它们构成了全新的知识板块，并且对各个领域的思维范式以及实践工具都进行了改造。其次是有快速迭代并且跨界融合特点的“产业选择压力”，在此情形下，新的经济业态不断涌现出来，职业岗位对于技能的要求也是日新月异，每时每刻都在发生着变化。最后则是相对而言比较稳定但是能够起到引导方向作用的“制度气候”，这里面包含了高等教育政策、学科评估体系以及质量认证标准等诸多方面。

### 3.2 系统结构解析：资源基质、主体种群与AI技术种群

在清晰界定的边界范围当中，AI赋予专业生态系统的呈现出一种较为复杂的结构形态，这里面有三类核心组分相互交织在一起。其一是作为基础承载的“资源基质”，这里面包含了所有的物质性资源以及制度性资源，在AI赋能的作用之下，像数字平台、云端资源这类新型基质变得日益重要起来。其二是价值创造核心所涉及各类“主体种群”，这里面涵盖了教师、学生、管理者还有产业界的种群。其三是本框架着重强调的新型能动主体“AI技术种群”，它是由智能导师系统、学习分析工具、个性化推荐

引擎等一系列应用所组成的，并且深度融入到整个系统当中，和主体种群构建起了一种新型的“互利共生”关系。AI赋能专业建设生态系统的核心结构组分解析如表2所示。

表2 AI赋能专业建设生态系统核心结构组分

结构组分	角色与功能	构成要素示例	AI赋能下的新特征
资源基质	系统运行的基础承载与环境条件	物质资源：经费、场地、设备、数字化平台、数据资源 制度/观念资源：政策法规、评价标准、学术规范、组织文化、教育理念	云端化、智能化、可精准配置与动态调适
主体种群	价值创造与系统演进的核心能动者	教师种群：知识传授者、学习引导者、合作研究者 学生种群：学习者、知识建构者、创新实践者 管理者种群：资源配置者、制度设计者、氛围营造者 产业界种群：需求输入者、实践指导者、协同创新者	数字素养提升，人机协同能力增强，互动网络更复杂、更高效
AI技术种群	新型赋能主体，重塑生态关系与过程	智能教学应用：智能导师、自适应学习系统、虚拟仿真实验 智能管理应用：学习分析平台、智能排课与评估系统、预测性管理工具 智能研究应用：文献挖掘工具、科研数据分析平台、学科知识图谱	具备一定的自主性与适应性，与主体种群形成“互利共生”，驱动流程再造与模式创新

### 3.3 系统核心生态过程：知识能量流、资源物质流与智能信息流

在AI技术广泛且深度地参与到其中的情况下，系统核心生态过程得以重塑并且加快了进程。知识能量流的源头变得更为多样，其来源包括教师传授的知识、学术前沿所涉及的内容、产业方面的经验以及AI挖掘出来的新知识洞见等。知识能量流的流动路径也发生了改变，从原本的单向链式走向了网络化，并且能够实现个性化的推送。

资源物质流的配置变得更加智能化且更为精准，AI 会依据教学过程以及成效等方面的数据分析情况，去优化关于经费、设备等资源的分配决策，以此来提升资源的利用效率。其中最具革命性的当属智能信息流所起到的主导作用。遍布于整个系统的传感器与平台会持续不断地采集有关教学行为、学习状态、资源使用等方面的海量数据，而后经过 AI 对这些数据加以处理分析，将其转化成为多层次的信息，再实时地反馈给各个主体以及调控机制，进而优化知识流与资源流的路径以及它们所能达到的效果。

### 3.4 系统的动态演化机制：自组织、协同进化与生态位构建

系统演化的进程是在内外部诸多因素共同施加影响的情形下，由多种多样的机制相互交织着来推动驱动的。其一便是“自组织”机制，在处于开放的这样一种条件之下，主体种群依据像资源共享、问题协作这类相对简单的交互规则，能够自然而然地形成诸如线上学习共同体、跨学科项目小组等呈现出有序状态的结构形态。而人工智能在其中发挥着作用，它通过去匹配相应的需求、推荐合适的伙伴以及搭建起相关的平台，以此来使得自组织所涉及的成本得以降低。其二是“协同进化”机制，不同的种群在持续不断地相互产生作用的过程中，会彼此相互适应并且共同发生改变：比如说教师会去发展自身的数字教学能力，学生则会提升人机协同方面的素养，与此人工智能技术也会不断地迭代并实现功能的优化<sup>[2]</sup>。最后还有“生态位构建”机制，个体以及种群凭借自身所开展的各项活动，主动地去改变那些能够被利用的资源以及条件，进而构建起全新的生态位。

## 4 框架的启示与应用原则

### 4.1 从“机械设计”到“生态培育”：建设范式的转变

理论框架给出的首个启示是促使专业建设范式完成转变，即从那种一味追求标准化以及精确控制的“机械设计”思维模式，转变成更为注重培育多样性、积极推动互动并且能激发内生动力的“生态培育”思维模式。如此一来，专业管理者所扮演的角色也要相应做出改变，要从原先的蓝图设计师逐步转变为园丁以及气候调节者。其主要任务不再是要对所有环节都做出明确规定，而是要去营造出较为肥沃的“资源基质”，同时制定出有利于发展的“制度气候”，把像 AI 技术种群这类有益的“物种”引入进来，并且悉心呵护它们，从而为系统能够实现自组织、协同进化以及创新不断涌现创造相应的条件。

### 4.2 维持多样性：保障系统稳定与创新的基石

生态学原理显示，多样性乃是生态系统抵御干扰、维持稳定以及保持长期生产力的关键基础。这一原则在专业

生态系统中同样适用，所以务必要着重维持并推动教师背景、学生兴趣、课程内容、教学方法以及问题来源等多个层面上的多样性。单一的 AI 技术路线或许会滋生新的风险，而鼓励多种 AI 工具共同存在并展开竞争同样是十分重要的举措。丰富的多样性能够为系统应对充满不确定性的未来储备起广泛的适应性基因，进而为不同思想、知识与技能的跨界重组创造更多的可能性。

### 4.3 优化“流”通道：提升知识转化与资源利用效率

系统所呈现出的健康状况以及具备的活力，其关键在于知识能量流、资源物质流还有智能信息流这三大“流”的流通顺畅程度以及它们相互转化的效率如何。在实际的应用实践当中，应当着重于去破除这些“流”在流动过程中所面临的各种壁垒。具体而言，要在物理层面以及制度层面着手建设一个能够实现开放共享的资源平台，以此来推动设备、数据以及课程资源能够在不同专业之间、不同学校之间自由地流通起来。借助人工智能技术来构建起智慧的学习空间以及相应的管理系统，进而达成对学生学习历程进行精准描绘的目的，并且能够依据学生的具体情况推送个性化的资源<sup>[3]</sup>。同时还要进一步强化产学研之间的深度信息耦合，要把产业界的真实问题以及前沿的需求以一种更为实时且结构化的“智能信息流”的形式引入到教学以及科研的相关过程当中来。

### 4.4 增强系统适应性：应对外部环境变化的策略

在“技术湍流”以及“产业选择压力”这样的情况之下，专业生态系统的所追求的目标并不是那种绝对不变的稳定状态，而是要着力于发展起强大的适应性能力。这就需要该系统构建起灵敏的环境感知以及预警方面的机制，借助 AI 技术针对技术的发展趋势、就业市场的变化状况、毕业生的反馈信息等展开持续不断的监测与细致分析，从而把外部的压力信号能够及时地转化成为内部调适的驱动力量。还要建立起柔性的内部结构，比如模块化的课程体系、可动态调整的专业方向、跨院系的虚拟教研室等，以此来确保系统能够在没有发生颠覆性重构的情形下迅速地对资源加以重组，以便能够对变化做出有效响应。

## 5 结束语

本文依据生态系统理论搭建起“AI 赋能专业建设生态系统”的理论框架，把专业当作是由资源基质、主体种群以及 AI 技术种群组合而成的复杂适应系统，它的生命力是从三大核心流动过程中来的，并且依靠自组织等一系列机制达成动态演化，这个框架提示我们务必要从“机械设计”迈向“生态培育”，在实际操作中严格遵循维持多

样性、优化流通道还有增强适应性的核心准则，从而为塑造具备韧性且充满创新活力的高等教育专业的未来给出了蕴含自然智慧的理论途径。

基金项目：辽宁省教育科学“十四五”规划项目，项目号：JG25DB338。

[参考文献]

[1]卢梦莎,梁醒醒,李乐.生成式人工智能时代法治宣传教育的变革:机遇、趋向与路径[J].新闻世界,2025(11):49-52.

[2]郭佳楠,赵姗.生成式人工智能时代的教育:ChatGPT 在助推大学课程创生中面临的机遇、挑战与应对[J].教育科学探索,2023,41(6):89-97.

[3]邓丽群.生成式人工智能驱动高等教育发展:机遇、挑战与对策[J].四川轻化工大学学报(社会科学版),2025,40(5):98-108.

作者简介：赵德鹏（1994—），男，汉族，甘肃定西人，副教授，沈阳工程学院，研究方向：人工智能。

# 制药行业高盐高有机废水处理技术研究

廖义勇

中国测试技术研究院, 四川 成都 610021

**[摘要]** 制药工业生产过程中排放出的高盐高有机废水成分复杂且处理难度极大, 该类废水往往具有无机盐含量很高、较难进行生物降解的有机物等特点, 对常规的废水处理方法来说是个巨大的难题, 文中旨在系统梳理与探讨针对此类废水的处理技术研究现状与发展方向。论文首先深入剖析了制药行业高盐高有机废水的主要来源及其独特的水质特征, 并明确指出了其核心处理难点。进而, 论文全面综述了物理化学法、生物处理法以及膜分离法等各类主流处理技术的原理、应用进展及其存在的局限性。

**[关键词]** 制药废水; 高盐废水; 有机污染物; 组合工艺; 技术进展

DOI: 10.33142/nsr.v2i4.18713

中图分类号: TQ028

文献标识码: A

## Research on the Treatment Technology of High Salt and High Organic Wastewater in the Pharmaceutical Industry

LIAO Yiyong

National Institute of Measurement and Testing Technology, Chengdu, Sichuan, 610021, China

**Abstract:** The high salt and high organic wastewater discharged during the production process of the pharmaceutical industry is complex in composition and extremely difficult to treat. This type of wastewater often has high inorganic salt content and organic matter that is difficult to biodegrade, which is a huge challenge for conventional wastewater treatment methods. This article aims to systematically review and explore the research status and development direction of treatment technologies for this type of wastewater. The paper first deeply analyzes the main sources and unique water quality characteristics of high salt and high organic wastewater in the pharmaceutical industry, and clearly points out its core treatment difficulties. Furthermore, the paper comprehensively reviews the principles, application progress, and limitations of various mainstream treatment technologies such as physical and chemical methods, biological treatment methods, and membrane separation methods.

**Keywords:** pharmaceutical wastewater; high salt wastewater; organic pollutants; combination process; technical progress

医药工业是我国国民经济发展的快速增长产业之一, 随之带来的是医药生产过程产生的高浓度、高盐分有机废水大量增多, 这类废水不仅组成成分复杂、COD 浓度高、含盐量大, 还含有大量的难以被生物降解的化合物以及有毒有害的微生物抑制物, 对于传统的废水生物处理工艺来说是一个巨大的考验, 因此研究开发高效稳定的处理技术来解决制药行业的高盐高有机废水的达标排放或者回用问题就成为目前环境保护工程迫切需要解决的问题之一。

### 1 制药行业高盐高有机废水的特性与处理难点

#### 1.1 废水来源与水质特征

医药行业高盐与高有机废水源于原料药加工时发生的反应结晶分离、洗涤等一系列的操作, 尤其是有酸碱反应步骤或者用到较多无机盐充当反应物或辅助剂的阶段。

比如在合成抗生素、维生素、各类型中间体时常利用盐酸、硫酸、氢氧化钠等进行 pH 值调整, 会投入大量的氯化钠、硫酸钠等无机盐来进行盐析萃取或是促使原料结晶, 这就造成了废水中盐分含量大幅度上升。而且废液中含有有机成分非常复杂, 有未消耗完的原料、生成的中间产品、副产品以及残留下来的反应溶剂等, 其中有很多分子结构稳定并且含有生物毒害性或者生物抑制性的如酚类、苯胺类、卤代烃和杂环化合物等, 导致了废液内 COD 浓度往往在每升几千乃至几万毫克左右, 这种高盐与高的有机物共存的特点是这种废水最为本质的水质特点, 无机盐离子引起的巨大渗透压力与离子活度影响再加上有毒有机物质对于细菌生长起着抑制的效果, 双重的影响致使废水的治理难度系数非常高。

## 1.2 主要处理难点分析

处置制药工业高盐高有机废水遇到的关键难题第一个方面就是生物处理环节极易崩溃的风险。传统的活性污泥系统中的微生物在高盐条件下会出现细胞失水及酶活性受到抑制以至于死亡的现象,使得污泥活性迅速衰减甚至崩溃,污水处理效率大幅下降甚至为零。其次是废水中含有的难以分解的有毒有机物质会对微生物造成直接的毒性或抑制作用,更增加了生物处理难度。另外高的盐浓度还会对废水处理的物理化学单元带来不良的影响,在对废水使用混凝沉淀法的时候盐离子的存在会影响胶体粒子不稳定的以及絮结过程从而让混凝的效果变差。对于蒸发浓缩工艺中废水含有的大量有机物又会造成起泡结垢和沸点上升的问题,加大能量消耗以及操作成本。

## 2 高盐高有机废水处理技术研究进展

### 2.1 物理化学处理技术

物理化学处理技术是应用在高盐含高有机废水预处理和深度处理过程中,常用的处理技术主要有混凝沉淀吸附及各类高级氧化工艺等。其中混凝沉淀法可通过加入铁盐铝盐等混凝剂对废水中悬浮物、胶体物质以及大分子有机物进行较为彻底的去除,但是对高盐条件下水中溶解态的小分子有机物并不适用,而且会产生大量的化学污泥。吸附法尤其是活性炭吸附其表面结构特性使其具有很强的吸附能力可以用于废水的深度净化,但由于吸附剂再生费用高同时高盐度的存在也会影响其再生。高级氧化技术主要通过 Fenton 氧化、臭氧氧化及其他催化氧化体系产生的强氧化性的羟基自由基来将难降解大分子有机物氧化成小分子或者直接氧化成  $\text{CO}_2$ , 以达到提高废水的可生化程度,为后续的生物处理创造有利条件,但是这类方法往往运行费用相对较高同时可能会带来一定的二次污染问题。

### 2.2 生物处理技术

生物法由于其低成本、可彻底去除有机污染物的特点一直是处理有机废水的主流方法。但是针对高盐环境则需要作出相应的调整。驯化或者培养得到可在一定程度的盐度生存并分解有机物的耐盐菌和嗜盐菌来构建耐盐的生物处理装置为研究的主要趋势。比如使用序批式活性污泥法以及膜生物反应器等模式通过逐渐提升盐浓度的方式来让微生物群体进行适应从而适用于高盐的环境下。但如此驯化的微生物时间长,系统承受冲击负荷的能力较弱并且过高的盐浓度即百分之三以上的盐浓度就会导致其处理效率极不理想。此外研发厌氧型生物法例如上向流式厌

氧污泥床等对于处理一些高浓度的含氮量大的有机废水会有较好的效果,但是在高盐浓度的情况下也会使厌氧微生物活性受阻而降低产气效率甚至还会出现系统酸化。

### 2.3 膜分离技术

膜分离技术作为一种高效的物理分离方法应用于处理含高盐、高有机废水时表现出明显的优势。微滤与超滤常用于去除悬浮固体、胶体物质作为前处理步骤来保护后面精细处理单元。而纳滤与反渗透可以有效的截留溶解性的有机物以及二价或多价盐离子实现了水与污染物的高度分离产水质量优可以直接回用于生产系统。但是膜法的应用也存在两个问题:第一个问题是膜污染的问题,在运行过程中,废水中的有机物、无机盐以及微生物等非常容易附着在膜的表面并形成凝胶层,使得膜的透过流量下降,必须经常进行化学清洗。增加了更换的成本并且缩短了使用寿命。第二个问题是由于其具有较高的含盐量,从而会产生较大的渗透压,使得像反渗透等过程必须提供更大的操作压力,消耗更多的能量。

## 3 组合工艺与集成技术应用

### 3.1 预处理与生物处理组合

由于单项技术的不足,组合工艺的应用成为解决制药高盐高有机废水问题的有效方法。合理的预处理是保证后端生物处理单元稳定运行的基础。比如说使用混凝或者气浮作为预处理的方式,先除去部分的悬浮物质以及胶体状态的有机物,减轻下一段的负担<sup>[1]</sup>,更重要的是通过臭氧催化氧化与电化学氧化等高级氧化法作为预处理手段,先将废水中难以被分解的大分子有机物打断、开环转换为可以被微生物进一步利用的小分子中间产物,同时部分的减少了其对微生物的毒害作用进而大幅度提高其可生化性。通过预处理之后再进入经过特殊训练的耐盐生物反应器比如好氧膜生物反应器、厌氧氨氧化反应器等就可以高效的稳定的将水中的有机污染物去除掉,这种工艺路线也是被证实了一种成功的技术方法。

### 3.2 膜技术与蒸发结晶组合

针对含盐量特别高并具备资源再利用价值的污水,膜工艺+蒸发结晶联动工艺具有巨大的应用前景。该技术流程一般是首先通过纳滤或者反渗透将废水进行深度浓缩,将大部分的水分分离出来产出高品质回用水,同时将有机物以及无机盐浓缩在浓水端,所得的浓水再进入到蒸发结晶系统,比如多效蒸发及机械式蒸汽再压缩蒸发,进一步分离水分,使得溶液过饱和,进而析出结晶无机盐,诸如氯化钠、硫酸钠等。分离出的结晶体经过分离脱水后,有望

可作为化工原料予以综合利用,变废为宝。此联动工艺既做到了近零排放,也进行了水资源以及盐分的回收利用,契合循环经济理念,不过此工艺的投资和运行耗能都大,经济性很大程度上取决于可回收产品价格及能源成本。

### 3.3 高级氧化与生化处理组合

高级氧化技术和生化处理的有效集成,是解决高毒难降解制药污水处理关键技术。通常在生化处理系统之后还会有部分难以被微生物降解的顽固性有机物存在,此时采用高级氧化技术进行深度处理或者保险处理,以保证出水水质达标排放,比如在生物处理出水中设置臭氧氧化或非均相催化湿式过氧化氢氧化过程,可以进一步将剩余的一些有毒有害有机物氧化分解掉,完全消除它的生物毒性等。同样高级氧化处理也可以布置在生化处理前面,即前面所说的破毒增溶,给后续的生物处理提供好的环境,一前一后相互配合,这样的工艺流程,既发挥了高级氧化技术氧化强度高的特点又利用了生物法运行费用低廉的优点,形成了解决复杂难降解有机污水完整可靠的处理技术路线。

### 3.4 资源化利用技术路径

除达标排放外,资源化利用才是对这类高盐高有机废水更高的追求目标。除了有前面提到过的膜浓缩-蒸发结晶,用来回收其中的盐和水之外,更应该考虑的是废水中有机物的自身资源化,例如一些特殊的组分比较单一的高浓度有机废水就可通过溶剂萃取法和吸附分离法等方式来回收有用原辅料或者中间产品。而在厌氧生物处理过程中的有机物转化成产生的沼气主要成分为甲烷,就是一种能源的回收再利用<sup>[2]</sup>。虽然现在对成分极其复杂的制药废水做完全高附加值资源化还存在较大的技术性和经济性问题,然而相信在未来随着分离技术和生物技术以及材料学的不断发展,会研究出来一些更加精细化高效的资源化回收技术,使得废水由传统意义上的“污水处理厂”变为“资源化工厂”,这也是今后的发展趋势所在。

## 4 技术挑战与发展趋势

### 4.1 现有技术局限性分析

尽管组合工艺取得了很好的效果,但是目前的技术还存在着许多不足之处,高级氧化技术氧化能力强,但是普遍存在着处理费用较高、易生成有害中间体、氧化剂利用率低等问题;生物处理技术对于盐度、水质波动的承受力还不够强,系统启动缓慢、不稳定的问题也时常出现。膜技术中的膜污染及能耗过高的难题也还未彻底解决,膜材质本身的稳定性及耐污染能力有待提高。而蒸发结晶则存在设备投入费用高,能耗过高、混合盐难以分质、结晶盐纯度低导致回收利用价值不高的现状。

### 4.2 抗盐高效菌种开发

未来生物处理技术的进步,在很大程度上取决于高效功能微生物菌剂的研发和使用。借助包括宏基因组学以及代谢组学等当前一些先进的分子生物学技术,进一步探究高盐环境下微生物群落的代谢途径及其调节规律,据此,再采用基因工程技术针对性地对微生物进行改良或者重新设计出具有优异耐盐性、高降解速率能够联合降解多种毒性有机污染物的工程菌株等,是一个重要研究趋势<sup>[3]</sup>。与此同时,研发新式生物强化技术和固定化微生物技术,使得从自然界筛选出来或者人工创制出来的高效菌种能够稳定的投放到反应器内部,增强其自身在恶劣环境条件下存活和定居的能力,是为加强整个生物修复系统活性及稳定性的必要措施。

### 4.3 膜材料与工艺优化

膜技术的发展依赖于膜材料本身的创新和工艺流程的改进。研制新型的、具有特殊的表面特性例如超亲水性、抗蛋白吸附性、抗微生物粘附特性的功能化膜材料,以及机械稳定性更好、pH 适用范围更广的复合型膜材料是解决膜污染问题的根本方法。而在工艺层面,则应改进膜组件的水力学结构设计,发展新的湍动增强技术如气液两相流、优化膜反洗及化学清洗方式,都属于有效控制膜污染、保持较高膜通量的方法。另外把膜分离技术与其他单元过程相结合,例如膜—高级氧化、膜-吸附、膜反应器等一系列耦合技术,是提升系统工作效率,减少能量消耗的趋势所在。

### 4.4 智能化控制与系统集成

应对复杂的废水水质以及处理工艺,引入智能化控制以及系统集成的理念,是提升污水处理装置运行效率和稳定性的必然选择。基于在线水质监测仪表随时获取废水水质 pH 值、含盐量、COD 浓度、特定污染物质含量等重要指标,结合大数据、人工智能等方式构建工艺过程的预测模型及最优化控制方案,从而对药剂投加量、曝气强度、回流量、膜清洗频次等一系列操作变量作出精确调整,使系统始终保持在最佳工况<sup>[4]</sup>。另外,将预处理、主体处理、深度处理及资源回收各个单元高度集成化、模块化的设计,构成小型化、集约型、自动化的整体设备,从而节省占地空间,减少人力投入,更适合应用于制药企业。

## 5 结束语

医药行业的高盐高有机工业废水处理是一项跨学科的复杂的系统工程,它具有技术壁垒高、投资大的特点,但也正是实现医药行业绿色化转型及可持续发展的必经之路。目前,单一处理技术手段已经无法达到日益严格排放标准 and 资源化回用目标的需求,因而发展以组合工艺、

集成技术为核心的工程技术路线,利用物理化学方法、生物方法或膜分离技术之间的优势互补和协同效应来实现对废水的有效处理将成为发展趋势,在分子层面探究污染物降解过程以及盐抑制机制也将是未来研究的重点方向,开发具有高效性能且经济适用的耐污染膜材料及高效的功能微生物菌剂并充分融合智能控制技术以建立高效可靠,智能且资源化的废水处理与循环利用工艺将是今后研究的重点方向。

#### [参考文献]

[1]邓超翰,周伟健,周勇波,等.制药行业高浓高盐有机废水

综合处理现状[J].工业用水与废水,2025,56(6):7-13.

[2]曾光荣,李健.MBR 工艺在制药行业高盐高浓度有机废水中的应用案例[J].净水技术,2023,42(1):153-159.

[3]于望.制药行业废水中的难降解有机物处理技术研究[J].皮革制作与环保科技,2025,6(11):139-141.

[4]刘益荣.制药行业环境保护中树脂吸附法的应用[J].清洗世界,2022,38(7):98-99.

作者简介:廖义勇(1970.6—),毕业院校:电子科技大学,所学专业:计算机应用,当前就职单位:中国测试技术研究院电子所,职务:工程师,职称级别:中级。

## 免疫细胞体外扩增阶段的质量稳定性监测及安全性风险评估

刘红卫

河北北科生物科技有限公司, 河北 石家庄 050000

**[摘要]**目的: 建立免疫细胞体外扩增全流程的质量稳定性监测体系, 系统评估扩增过程中的安全性风险, 为临床级免疫细胞制品的规范化生产提供理论依据与技术支持。方法: 以 CD3+T 细胞、NK 细胞为代表性免疫细胞, 构建全链条监测模型, 并结合故障模式与影响分析 (FMEA) 方法, 识别扩增过程中的潜在风险点, 评估风险等级并制定防控措施。结果扩增第 5~7d 为细胞活性稳定、活化水平、增殖迅速及功能最强的阶段, 第 14d 细胞增殖放缓, 耗竭标志物表达升高, 功能活性下降。染色体核型稳定, 全流程微生物污染检测均为阴性, 通过 FMEA 方法, 共识别出免疫细胞体外扩增全流程中存在 12 个潜在风险点, 其中培养环境 CO<sub>2</sub>浓度波动、培养基批号差异、细胞接种密度偏差为高风险点 (RPN≥120), 通过实施针对性的干预措施, 风险等级降至中低水平。结论: 建立免疫细胞体外扩增全流程的质量稳定性监测体系, 并结合 FMEA 风险评估, 可以确保免疫细胞制品的质量。

**[关键词]**免疫细胞; 体外扩增; 质量稳定性; 监测体系; 安全性风险评估

DOI: 10.33142/nsr.v2i4.18714

中图分类号: R746

文献标识码: A

## Quality Stability Monitoring and Safety Risk Assessment of Immune Cell in Vitro Expansion Stage

LIU Hongwei

Hebei Beike Biotechnology Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

**Abstract:** Objective: to establish a quality stability monitoring system for the entire process of in vitro expansion of immune cells, systematically evaluate the safety risks during the expansion process, and provide theoretical basis and technical support for the standardized production of clinical grade immune cell products. Method: using CD3+T cells and NK cells as representative immune cells, a full chain monitoring model was constructed, and combined with Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) method, potential risk points during the amplification process were identified, risk levels were evaluated, and prevention and control measures were formulated. The stage of stable cell activity, activation level, rapid proliferation, and strongest function was observed from day 5-7 of amplification. On the 14th day, cell proliferation slowed down, depletion marker expression increased, and functional activity decreased. The chromosome karyotype is stable, and the microbial contamination detection throughout the entire process is negative. Through the FMEA method, a total of 12 potential risk points were identified in the entire process of immune cell in vitro amplification. Among them, fluctuations in CO<sub>2</sub> concentration in the culture environment, differences in culture medium batch numbers, and deviations in cell inoculation density are high-risk points (RPN ≥ 120). By implementing targeted intervention measures, the risk level has been reduced to a medium low level. Conclusion: establishing a quality stability monitoring system for the entire process of in vitro expansion of immune cells, combined with FMEA risk assessment, can ensure the quality of immune cell products.

**Keywords:** immune cells; in vitro expansion; quality stability; monitoring system; security risk assessment

### 引言

抗肿瘤免疫细胞治疗凭借其特异性强、疗效显著等优势<sup>[1]</sup>, 现已成为生物医药领域备受关注的研究热点与发展方向。临床级免疫细胞制品的制备需严格遵循一系列规范化的操作步骤, 其中体外扩增阶段要精确控制培养条件, 使免疫细胞在体外环境中实现安全、稳定的增殖, 是决定

细胞制品质量与疗效的核心环节<sup>[2-3]</sup>。然而, 免疫细胞体外扩增过程受气体环境、培养基成分、培养基的化学组成成分等多种因素影响均可能导致细胞质量出现异质性<sup>[4]</sup>, 引发细胞质量的异质性改变, 影响免疫细胞在临床应用疗效, 甚至导致潜在的安全性风险, 如细胞异常增殖、过敏反应等, 危及患者生命。鉴于此, 为了保障细胞制品的质

量均一性与临床应用安全性,构建针对性强、覆盖全流程的质量稳定性监测体系,系统评估扩增过程中的安全性风险尤为关键<sup>[5]</sup>。本研究以临床常用的 CD3+T 细胞、NK 细胞为研究对象,构建免疫细胞体外扩增阶段的质量稳定性监测体系,同时采用故障模式与影响分析(Failure Mode and Effects Analysis, FMEA)方法,系统识别免疫细胞体外扩增过程中可能出现的潜在风险点,评估其对免疫细胞质量稳定性的影响程度并制定针对性的防控措施,旨在为免疫细胞体外扩增的规范化操作提供技术支持。

## 1 实验材料

细胞来源全部由健康供体提供,收集健康志愿者外周血单个核细胞(Peripheral Blood Mononuclear Cells, PBMCs),经志愿者知情同意并通过医院伦理委员会审批。采用密度梯度离心法分离 PBMCs,用无血清培养基重悬后备用。

## 2 方法

### 2.1 免疫细胞体外扩增方案

CD3+T 细胞扩增方法:将分离得到的 PBMCs 进行调整浓度,达到  $1 \times 10^6$  cells/mL 的标准浓度,接种于包被抗 CD3 抗体( $5 \mu\text{g/mL}$ )的培养瓶中,确保细胞能够充分与抗 CD3 抗体接触,向培养体系中加入 IL-2( $100 \text{ IU/mL}$ )、抗 CD28 抗体( $2 \mu\text{g/mL}$ ),最后,将接种并添加好各种试剂的培养瓶置于  $5\% \text{ CO}_2$ 、 $37^\circ\text{C}$  培养箱中培养。培养第 3d、第 6d、第 9d 分别向培养体系中精准补加含有  $50 \text{ IU/mL}$  重组人 IL-2 的新鲜培养基,实时监测细胞浓度,始终稳定在  $0.5 \times 10^6 \sim 2 \times 10^6$  cells/mL 之间。

NK 细胞扩增方法:将分离得到的 PBMCs 进行调整浓度,达到  $1 \times 10^6$  cells/mL 的标准浓度,向培养体系中加入 IL-15( $50 \text{ ng/mL}$ )、IL-2( $200 \text{ IU/mL}$ ),平稳放置于  $37^\circ\text{C}$ 、 $5\% \text{ CO}_2$ 、饱和湿度培养箱中培养。为确保细胞持续地扩增,于第 4d、第 8d、第 12d 补加含相应细胞因子的新鲜培养基,在整个扩增过程中,对细胞浓度进行实时监测,确保细胞浓度维持在  $0.5 \times 10^6 \sim 2 \times 10^6$  cells/mL。CD3+T 细胞、NK 细胞扩增周期均为 14d。

### 2.2 质量稳定性监测体系构建与实施

为实现对免疫细胞扩增过程全方位的质量把控,构建全链条监测体系,监测指标主要涵盖细胞纯度、细胞功能活性、微生物污染程度等,检测方法如下:采用 CCK-8 法检测细胞活性,于扩增初始、扩增进程中的第 3d、第 5d、第 7d、第 9d、第 12d、第 14d,分别取细胞悬液  $100 \mu\text{L}$  ( $1 \times 10^4$  cells),接种于 96 孔板。接着,向每个孔中加入  $10 \mu\text{L}$

CCK-8 试剂,置于  $37^\circ\text{C}$  的细胞培养箱孵育 2h 后,用酶标仪检测  $450 \text{ nm}$  处吸光度值,计算细胞活性。采用流式细胞术进行检测细胞纯度与表型特征,取扩增初始、扩增进程中的第 3d、第 5d、第 7d、第 9d、第 12d、第 14d 时间点细胞悬液  $1 \times 10^5$  cells,采用流式细胞术进行检测,同时检测记忆表型标志物(CD27)、活化标志物(CD69)、耗竭标志物(PD-1)的表达水平。采用细胞毒性实验(LDH 释放法)检测细胞功能活性。依据现行版《中国药典》中的生物制品无菌试验和支原体检测规程,对细菌、真菌及支原体污染进行检测。此外,于扩增初始、第 14d 检测遗传稳定性。

由细胞制备技术人员、质量控制专员、临床医师等人员组建风险评估团队,团队成员对免疫细胞体外扩增全流程进行梳理与分析,识别潜在故障模式,计算风险优先数,并制定针对性的防控策略。

### 2.3 统计学分析

采用 SPSS 26.0 统计软件进行数据分析,计量资料以均数  $\pm$  标准差 ( $\bar{x} \pm s$ ) 表示,  $P < 0.05$  为差异具有统计学意义。

## 3 结果

### 3.1 免疫细胞体外扩增过程中关键质量属性的动态变化

扩增第 5~7d 为细胞活性稳定、活化水平、增殖迅速及功能最强的阶段,第 14d 细胞增殖放缓,耗竭标志物表达升高,功能活性下降。染色体核型稳定,全流程微生物污染检测均为阴性,见表 1。

### 3.2 免疫细胞体外扩增阶段的安全性风险评估结果

通过 FMEA 方法,共识别出免疫细胞体外扩增全流程中存在 12 个潜在风险点,其中培养环境  $\text{CO}_2$  浓度波动、培养基批号差异、细胞接种密度偏差为高风险点 ( $\text{RPN} \geq 120$ ),补加培养基时机延迟、刺激因子浓度不准确、培养基配制过程污染、生物安全柜操作污染为中风险点,具体见表 2。

## 4 讨论

据全球市场研究数据显示 2022 年全球免疫细胞治疗市场规模已然达至约 150 亿美元<sup>[6]</sup>,并预估于未来五年内以超逾 20% 的年复合增长率持续拓展,然而这一疗法的成功依赖于高质量的免疫细胞制备过程,而体外扩增作为其中的核心环节直接决定了最终产品的疗效与安全性。本研究构建质量稳定性监测体系,系统分析了 CD3+T 细胞与 NK 细胞在体外扩增过程中关键质量属性的动态变化。

**表 1 免疫细胞体外扩增过程中关键质量属性的动态变化**

细胞类型	检测指标	初始阶段 (第 0d)	扩增中期 (第 5~7d)	终末阶段 (第 14d)	P 值
CD3+T 细胞	细胞活性	≥90%	88%~92% (稳定)	82.3%±2.5%	P>0.05 (与 NK 细胞比较)
	扩增倍数	1 倍	对数增殖期 (快速增长)	128.6±15.3 倍	P<0.05 (与 NK 细胞比较)
	纯度	82.5%±3.2%	95.3%±1.8% (峰值)	≥90%	P<0.05 (中期 vs 初始、终末 vs 中期)
	CD69 表达 (活化标志物)	-	68.5%±4.2% (最高)	-	-
	CD27 表达 (记忆标志物)	-	55.3%±3.8%	-	-
	PD-1 表达 (耗竭标志物)	-	12.6%±2.1% (较低)	25.3%±3.5%	P<0.05 (终末 vs 中期)
	细胞毒性 (E:T=20:1)	-	78.5%±5.2% (峰值)	52.6%±4.5%	P<0.05 (终末 vs 中期)
NK 细胞	细胞活性	≥90%	87%~91% (稳定)	81.7%±2.3%	P>0.05 (与 CD3+T 细胞比较)
	扩增倍数	1 倍	对数增殖期 (较快增长)	65.4±10.2 倍	P<0.05 (与 CD3+T 细胞比较)
	纯度	18.6%±2.5%	持续升高	85.7%±3.1%	P<0.05 (终末 vs 初始、中期)
	CD69 表达 (活化标志物)	-	72.3%±4.5% (峰值)	逐渐下降	P<0.05 (中期 vs 终末)
	PD-1 表达 (耗竭标志物)	-	-	18.5%±2.8%	-
	细胞毒性 (E:T=20:1)	-	82.3%±4.8% (峰值)	58.3%±5.1%	P<0.05 (终末 vs 中期)
共性安全指标	微生物污染 (细菌/真菌/支原体)	未检出	未检出	未检出	-
	染色体核型	46, XY/XX (无异常)	-	46, XY/XX (异常率 0)	-

**表 2 免疫细胞体外扩增阶段的安全性风险评估结果**

风险点	严重度 (S)	发生概率 (O)	探测度 (D)	风险等级	防控措施	防控后 RPN
培养基批号差异	8	6	3	高	标准化采购, 优先同批号; 不同批号使用前验证 pH、渗透压等	64
培养环境 CO <sub>2</sub> 浓度波动	9	5	3	高	用实时监控报警 CO <sub>2</sub> 培养箱, 每日记录, 定期校准	54
细胞接种密度偏差	8	5	4	高	全自动细胞计数仪计数, 接种前双人核对	60
刺激因子浓度不准确	7	6	3	中	严格按操作规程配制, 使用前核对浓度, 双人复核	72
生物安全柜操作污染	8	4	3	中	加强人员培训, 规范无菌操作, 定期检测生物安全柜性能	64
培养基配制过程污染	8	5	3	中	无菌环境配制, 配制后无菌检测, 现配现用	70
补加培养基时机延迟	7	5	3	中	设定补加提醒, 严格按时间点操作, 专人负责记录	63
细胞分离过程纯度不达标等 5 个低风险点	≤6	≤4	≥4	低	规范操作流程, 加强过程监控, 定期培训考核	<60

细胞活性与增殖能力作为评估免疫细胞体外扩增质量的关键基础性指标<sup>[7]</sup>, 本期研究结果显示, 两种免疫细胞要保证后续能够稳定扩增, 其初始活性均需达到 90% 及以上。在免疫细胞体外扩增的实验研究与临床实践观察中, 扩增第 5~7d 细胞的增殖速率达到最快, 且细胞的活性指标波动较小, 表现出高度的稳定性<sup>[8]</sup>; 当扩增进行第 10~14d, 细胞分裂与增殖的活跃程度大幅降低, 细胞表面耗竭标志物 PD-1 的表达水平升高, 细胞毒性下降, 提示长期在体外培养环境下, 免疫细胞的功能会受到负面影

响并逐渐耗竭, 因此, 为了免疫细胞治疗的效果与安全性, 需严格把控扩增周期。

细胞纯度与表型特征作为评估免疫细胞制品质量的两个关键维度, 直接影响临床应用效果以及患者的预后<sup>[9]</sup>。本研究中, 在扩增过程中, CD3+T 细胞的纯度持续升高, 而 NK 细胞由于初始纯度较低, 通过体外扩增富集的方法来提高 NK 细胞的纯度。表型分析表明, 在扩增中期, 细胞的活化标志物表达水平达到峰值, 耗竭标志物表达水平最低, 提示在扩增中期, 细胞的活化标志物表达水平最强;

而扩增后期,细胞逐渐呈现出耗竭表型,功能活性下降,进一步开展细胞毒性实验,细胞毒性降低,与表型分析中细胞功能活性下降的结论相一致<sup>[10]</sup>。因此,为了确保体外扩增的免疫细胞能够始终保持良好的功能活性,在体外扩增过程中,运用先进的流式细胞术监测细胞表型的动态变化,及时发现细胞耗竭的早期迹象,及时调整培养条件。本研究结果显示,未发现细菌、真菌及支原体污染,与严格的环境控制、标准操作规程严格操作和过程质控有关;染色体核型分析结果表明,未出现染色体异常。FMEA方法作为一种前瞻性风险评估工具,在生物医药领域的质量控制中得到了广泛的使用。本研究通过FMEA分析,及时发现潜在风险点,及时干预,可以提高扩增过程的稳定性,降低风险等级<sup>[11]</sup>。

综上所述,建立免疫细胞体外扩增全流程的质量稳定性监测体系,并结合FMEA风险评估,识别了扩增过程中的潜在风险点,制定了针对性的防控措施,可以降低安全性风险,确保免疫细胞制品的质量。

#### [参考文献]

[1]中国医药生物技术协会.免疫细胞治疗产品质量控制指南(2021版)[J].中国医药生物技术,2021,16(3):161-208.  
 [2]王丽,陈代雄,方宁,等.脐血CD133<sup>+</sup>细胞体外扩增巨核系祖细胞的研究[J].中国实验血液学杂志,2008,16(3):645-649.  
 [3]NIETO Y,BANERJEE P,KAUR I,et al.Allogeneic NK cells with a bispecific innate cell engager in refractory relapsed lymphoma:a phase 1 trial[J].Nat

Med,2025,31(6):1987-1993.

[4]戴尅戎.非扩增性干细胞治疗理念的形成及其应用前景[J].上海交通大学学报(医学版),2020,40(10):1318-1320.  
 [5]YANKELEVICH M,THAKUR A,MODAK S,et al.Targeting refractory/recurrent neuroblastoma and osteosarcoma with antiCD3×anti-GD2 bispecific antibody armed T cells[J].J Immunother Cancer,2024,12(3):2023-008744.  
 [6]杨瑞,李子越,申艺,等.基于荧光方法的循环肿瘤细胞检测研究进展[J].发光学报,2024,45(6):1015-1032.  
 [7]曹腾宇,孙莉萍,于洋.NK细胞免疫治疗恶性肿瘤的研究进展[J].临床输血与检验,2024,26(2):267-274.  
 [8]刘家权.NK细胞体外杀伤活性检测方法建立与验证[J].中国医药生物技术,2025,20(1):112-117.  
 [9]王丽娟,张叶萍,王金福,等.脐血间充质干细胞的生物学特征及其对造血干/祖细胞体外扩增的支持作用[J].中华血液学杂志,2005,26(2):65-68.  
 [10]杨亮.基于流式细胞检测数据的T细胞培养质量分析方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2024.  
 [11]胡泽斌,吴朝晖,任秀宝,等.我国免疫细胞治疗临床研究和应用的现状及管理对策[J].中国医药生物技术,2014,9(5):396-401.

作者简介:刘红卫(1984.11—),毕业院校:河北科技大学,所学专业:药学,当前就职单位:河北北科生物科技有限公司,职务:质量管理部经理,职称级别:质量管理工程师(中级职称)。

# 现代化灌区生态改造关于生态沟渠营造的分析研究

## ——以安徽省鸠江汤沟灌区改造为例

彭静 刘草原

- 1.长江勘测规划设计研究有限责任公司上海分公司, 上海 200439
- 2.广德市水利局, 安徽 宣城 242200

[摘要]在我国灌区现代化改造的大背景下,文中选取安徽省鸠江汤沟灌区改造为研究对象,目的在通过多方面的梳理分析明确灌区内关于生态沟渠营造的方案和措施。设计策略:通过现有沟渠进行生态改造,设计了一种新型生态沟渠它通过多孔混凝土边坡种植固土植物、建造透水沟底和沉泥孔等设施,来吸收、固定或转移农田排水中的氮磷等营养物质。

[关键词]灌区;灌区现代化改造;生态沟渠

DOI: 10.33142/nsr.v2i4.18721

中图分类号:

文献标识码: A

## Analysis and Research on Ecological Ditch Construction in Modern Irrigation Area Ecological Renovation

### — A Case Study of Jiujiang Tanggou Irrigation Area Renovation in Anhui Province

PENG Jing, LIU Caoyuan

1. Shanghai Branch, Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Shanghai, 200439, China
2. Guangde Water Conservancy Bureau, Xuancheng, Anhui, 242200, China

**Abstract:** In the context of modernization of irrigation areas in China, this article selects the transformation of Jiujiang Tanggou Irrigation Area in Anhui Province as the research object, with the aim of clarifying the plans and measures for ecological ditch construction in the irrigation area through multiple aspects of sorting and analysis. Design strategy: through ecological transformation of existing ditches, a new type of ecological ditch has been designed. It uses porous concrete slopes to plant soil fixing plants, construct permeable ditch bottoms and sedimentation holes, and other facilities to absorb, fix, or transfer nutrients such as nitrogen and phosphorus from agricultural drainage.

**Keywords:** irrigation district; modernization and renovation of irrigation areas; ecological ditch

### 引言

党的十八大以来,以习近平同志为核心的党中央高度重视粮食安全问题,提出了国家粮食安全新战略,走出了一条中国特色粮食安全之路,灌区作为农业生产重要的水利基础设施,关键时刻更要体现“保粮食安全”的托底功能。随着“四化同步”战略的深入推进,水利现代化作为农业现代化的重要基础和支撑也要与时俱进,不断深入发展。

灌区是农业和农村经济发展的重要基础设施,是我国农产品的重要生产基地,还担负着城乡生活、工业和生态环境供水的重要任务。同时灌区还是生态环境保护、建设美丽乡村、幸福家园的重要区域。经过几十年的建设,鸠

江区农田水利基础设施建设取得了很大成就,农田水利事业取得了全面的发展,为全区粮食安全奠定了基础,但近些年来,农田水利建设与经济社会的快速发展和不断增加的需求相比,灌区的支撑的保障能力仍有些不足,存在工程体系不完善,设施功能衰退;沿江提水能力较弱,水源保障能力不足;节水灌溉比重偏低,水资源利用效率较低;农田水利工程管理缺位,难以满足农业现代化的需求等问题,为实现农业和农村经济的健康可持续发展,保障国家粮食安全和农产品有效供给,必须加快灌区现代化改造步伐。

2025年3月14日,水利部印发《2025年农村水利水电工作要点》,提出:深入贯彻粮食安全保障法,印

发《全国中型灌区续建配套与现代化改造实施方案(2025—2026年)》，编制重点区域排涝工程实施方案等。做好大中型灌区现代化改造、新建中型灌区、重点区域排涝工程等项目前期工作，实施150处以上大中型灌区现代化改造项目，力争启动一批新建中型灌区和重点区域排涝工程。加强部门协作，统筹推进灌区骨干工程与高标准农田建设。

## 1 灌区概况

### 1.1 区位认识

鸠江区位于芜湖市北部，跨长江两岸，东连马鞍山市当涂县，南邻芜湖市镜湖区、芜湖县，西接马鞍山市含山县、芜湖市无为县，北靠马鞍山市和县。鸠江汤沟灌区位于安徽省芜湖市鸠江区中部，灌溉面积13.9万亩是被列入《全国中型灌区名录》的重点中型灌区，是鸠江区重要的粮食生产基地。

### 1.2 社会经济

鸠江区是市委、市政府所在地，总面积876km<sup>2</sup>，常住人口55.6万人，现辖沈巷、二坝、汤沟、白茆4个镇与清水、官陡、湾里、四褐山、裕溪口5个街道办事处及鸠江经济开发区（省级），行政区域涵盖皖江江北新兴产业集中区、国家级经济技术开发区、综合保税区、中国（安徽）自由贸易区芜湖片区（部分），2024年鸠江区GDP为656.3亿。

### 1.3 水文气象

鸠江区江北地区地处中纬度地区，属亚热带湿润季风气候，主要特点是：季风明显、四季分明、气候温和、雨量充沛、光照充足、无霜期较长、严寒期较短。由于冷暖气团活动和交锋频繁，降雨年际和年内分配悬殊。降雨量最大年份为1991年，降雨量为1986mm，最小为1978年，降雨量为672mm。而汛期降雨中，成灾的暴雨多发生于6月下旬~7月中旬，此间多年平均降雨量约250mm。降雨年内、年际分配不均匀，是造成该地区涝、旱灾害频繁的主要成因。

本地区多年平均蒸发量为931.3mm。多年平均气温15.7℃，年内温度七月份最高，一月份最低。一月平均气温2.3℃，七月份平均气温28.5℃；年极端最低气温-13.5℃，年极端最高气温40.4℃。平均相对湿度约77%，一年中有8个月（3至10月）大于80%。平均无霜天为235d，无霜期最长为240d，最短为219d。全年太阳辐射总量为104.7~123.7千卡/cm<sup>2</sup>，常年日照平均时数2000h，年均日照百分率为44%。

### 1.4 区域水系

灌区位于鸠江区，长江南岸主要水系有青弋江、青山河、扁担河；长江北岸主要水系有裕溪河、牛屯河、后河等。

长江：长江是流经区境最丰富的过境水源，也是鸠江区沿江平原区洪涝等自然灾害受其影响最大的河流。上游自白茆镇天然洲入境至东梁山出境，长度60km。

裕溪河：裕溪河流域面积3808km<sup>2</sup>，是巢湖主要入江水道。裕溪河自巢湖闸开始，自西北向东南流经巢湖市、含山县、无为县、鸠江区，全长61.73km。裕溪河在鸠江区境内河段长约40km。主要支流有西河、清溪河、黄陈河等。

后河：南宋时开挖的裕溪河通江河道，起于蟹子口经铜城闸至三汊河口，沟通牛屯河。

牛屯河：是巢湖流域的另一入江通道，流域面积404km<sup>2</sup>，其中山丘区128km<sup>2</sup>，圩区276km<sup>2</sup>。牛屯河分洪道自裕溪河的蟹子口起经铜城闸至牛屯河口，全长48.96km<sup>2</sup>，鸠江区境内牛屯河自铜城闸经西庄、孙家大坝、童子圩站，长度21km。

### 1.5 地形地貌

鸠江区江南为市区，江北地区地势平坦，偶有残丘，沟渠纵横，河塘密布，该区域整体地势偏低，系长江冲积平原，属沿江圩区。根据区域地貌类型划分，可分为两种地貌类型，即沿江洲区和水网平原圩区。

沿江洲区：位于长江与长江大堤之间，原为沿江成片芦苇荡或高低起伏的沼泽地，随江潮起落，时沉时浮。屡经筑堤治理，形成了长江大堤，堤外洲滩逐年涨发，逐年围垦，沿革至今，形成现今新老洲地。沿江洲区地势平坦，土壤含砂量高，土质疏松肥沃，以旱作为主。

水网平原圩区：属水网平原区，地势低平，港河交错，地面高程一般8~10m。早期为长江及沿岸中小支流低洼滩涂沼泽地，后经围垦为大小圩口。本区种植水稻历史悠久，地下水位较高，土壤多为潜育型水稻土。

### 1.6 灌区基本情况

#### (1) 基本情况

汤沟灌区位于鸠江区中部，设计灌溉面积13.9万亩，是被列入《全国中型灌区名录》的重点中型灌区。

汤沟灌区涉及鸠江区汤沟及二坝两个镇22个行政村和6个社区，灌区内总人口12.45万人，灌区以种植水稻，油菜，棉花为主镇。现状有效灌溉面积13.2万亩，其中汤沟灌区（二坝镇）种植面积8.9万亩，复种指数175%，汤沟灌区（汤沟镇）种植面积12.46万亩，复种指数154%。

灌区渠系水利利用系数现状约 0.56。粮食作物占比 61%，经济作物占比 39%。

### (2) 水源

汤沟灌区地表水资源比较丰富，为蓄引提水灌区，灌区主要水源为长江、裕溪河等河流，河道蓄水量丰富。90% 保证率下需水量为 7982.91 万  $m^3$ 。

### (3) 渠首工程

汤沟灌区现有引水口门 38 座，总引水规模 34.70  $m^3/s$ ，基本满足用水需求。

### (4) 骨干灌排工程

汤沟灌区目前已基本形成了一个完整、独立的灌排体系，能够满足农业生产需要。

## 2 生态沟渠的营造

### 2.1 对现状的理解与思考

#### (1) 现状布局分析

汤沟灌区属于江北沿江圩区，本区水资源区位优势明显，通江河口均设置闸站进行控制，枯水期可通过闸站拦蓄本地地表水，并根据需要引长江地表水进行补充。

#### (2) 存在的主要问题

按照规划设计的 4 大体系，灌区现状问题分为基础设施、信息化、运行管理、水生态四个方面。

##### ① 农田水利基础设施条件较差

a. 渠首工程：部分灌溉站、引水斗门多年运行后老化、损坏情况严重，无法完全或正常发挥其基本功能。

b. 骨干输配水、骨干排水工程：边坡为自然土坡，坡面无护砌，水土流失严重；渠底杂草丛生，淤塞严重；部分已护砌渠道由于建设年代久远，建设标准不高，存在损毁、坍塌现象。

c. 骨干渠（沟）系建筑物及配套：存在配套建筑物不全，现状老化严重，桥涵阻水，排水口出口无护砌，冲刷严重等问题，建筑物完好率低。

##### ② 水环境受到不同程度的污染

塘坝淤积，调蓄能力下降，水环境受到不同程度的污染；农业面源污染物及生活垃圾进入水体，造成水体富营养化，水质较差。面源污染主要是由于农村生活污水、农田农药和化肥、畜禽养殖等通过降雨、径流的淋溶和冲刷作用，使污染物进入水体，引起水体悬浮物浓度升高，水体富营养化。

综上所述，现状灌区水源充裕，灌排格局大致已定，我们重点是对灌区内老旧设施进行改造。现状沟渠的边坡为自然土坡，坡面无护砌，水土流失严重；渠底杂草丛生，淤塞严重；部分已护砌渠道由于建设年代久远，建设标准

不高，存在损毁、坍塌现象。这些沟渠就像人体的末端血管一样，灌区里设施实行改造后，上层设备已经具备向下的输水能力，但是如果这些沟渠一旦堵塞，上水不能下达，就会严重影响农业生产和灌区的调蓄功能。

### 2.1 新型生态沟渠

生态沟渠是一种通过构建沟渠系统改善水土流失、净化水质并促进生态恢复的工程措施，目前广泛应用于农业面源污染防控和土地整治中。它其实就是一个农田里的“小湿地”，它有一定的宽度和深度，里面充满了水、土壤和各种生物。

在这个项目里我们设计了一种新型生态沟渠，它是由沟底和沟渠斜坡两部分组成。沟底采用透水性能比较好的透水多孔砖砌筑，下面铺设中等大小的鹅卵石，沟渠斜坡采用多孔混凝土设计，在孔洞中种植固土植物，既保护了生态沟渠的水土，又对生态沟渠中输送的水质进行了沉淀和净化的作用。简单来说，它通过多孔混凝土边坡种植固土植物、建造透水沟底和沉泥孔等设施，来吸收、固定或转移农田排水中的氮磷等营养物质。

#### 2.1.1 结构设计：分层式生态净化体系

##### 2.1.1.1 透水沟底系统

沟底采用透水多孔砖砌筑，其孔隙率  $\geq 25\%$ ，配合中等粒径鹅卵石垫层（粒径 30~50mm），形成分级过滤结构。水流通透水砖时，悬浮物被鹅卵石层截留，同时砖体孔隙吸附溶解性氮磷物质，实现初步沉淀与物理过滤。

##### 2.1.1.2 多孔混凝土边坡

斜坡采用多孔混凝土（孔隙率 15%~30%）构建，孔洞中种植根系发达的固土植物（如香根草、百喜草）。植物根系穿透混凝土孔隙，形成三维固土网络，有效防止水土流失，同时通过根系分泌物促进微生物群落富集强化生物降解作用。

##### 2.1.1.3 沉泥孔辅助净化

在沟底每隔 5~8m 设置沉泥孔，孔内填充沸石或活性炭等吸附材料，进一步截留水中颗粒物及溶解性污染物，形成“物理过滤-生物降解-化学吸附”三级净化体系。

#### 2.1.2 生态功能：氮磷高效去除机制

##### 2.1.2.1 植物-微生物协同净化

固土植物根系为微生物提供附着表面，促进硝化-反硝化菌群增殖，将铵态氮（ $NH_4^+$ ）转化为氮气（ $N_2$ ）脱除；同时植物吸收磷酸盐，通过收割转移实现磷的永久去除。

##### 2.1.2.2 多孔介质动态吸附

透水多孔砖与鹅卵石层通过表面孔隙吸附溶解性磷，

其吸附容量可达 0.5~1.2mg/g; 多孔混凝土中的沸石填料对铵态氮的吸附效率达 85% 以上, 形成长效净化通道。

#### 2.1.2.3 水力调控优化

沟底坡度设计为 0.3%~0.5%, 确保水流速维持在 0.2~0.5m/s, 既避免泥沙淤积, 又保证污染物与净化介质充分接触。实测显示, 该系统对总氮(TN)和总磷(TP) 的去除率分别达 65%~75% 和 70%~80%。

#### 2.1.3 工程应用: 低成本生态解决方案

##### 2.1.3.1 材料选择

透水多孔砖采用再生骨料制备, 成本较传统红砖降低 20%; 多孔混凝土掺入 30% 粉煤灰, 减少水泥用量 15%, 同时提升抗冻融性能。

##### 2.1.3.2 施工便捷性

模块化设计允许现场快速拼装, 边坡多孔混凝土预制块可提前养护, 缩短工期 30%; 固土植物采用扦插繁殖, 成活率超 90%, 维护成本低。

##### 2.1.3.3 适应性扩展

针对高氮磷负荷农田, 可在沉泥孔增设生物炭填料, 提升吸附容量; 在坡顶设置生态滞留带, 种植芦苇等挺水植物, 进一步强化预处理效果。

#### 2.1.4 环境效益: 可持续排水管理

该生态沟渠通过“源头控制-过程净化-末端拦截”的全流程设计, 年均可减少氮磷排放量 1.2~1.8kg/亩, 有效缓解水体富营养化。同时, 固土植物群落为昆虫、两栖类提供栖息地, 促进农田生物多样性恢复, 实现排水治理与生态修复的双重目标。

### 3 结语

现代化灌区生态改造中的生态沟渠营造, 是践行“绿水青山就是金山银山”理念的重要实践, 也是推动农业节水灌溉与生态保护协同发展的关键举措。通过生态沟渠的构建, 灌区实现了水土流失的有效控制、土壤质量的显著提升以及水生态环境的持续改善。其多功能性不仅体现在水资源调控和水质净化上, 更通过植被恢复与生物多样性保护, 为灌区生态系统的稳定性提供了长效保障。

当前, 生态沟渠的营造已从单一工程措施发展为融合智能化技术、生态化设计的系统性工程。生态沟渠的营造不仅是灌区水利现代化的技术突破, 更是人与自然和谐共生的生动体现。通过持续优化设计、完善管理机制, 生态沟渠将为灌区可持续发展注入更强劲的生态动能, 为全球农业生态治理贡献中国智慧。

#### [参考文献]

- [1] YANG Yong, TIAN Chang, XIE Gui-xian, et al. 生态沟渠吸收氮磷效果研究[J]. 农业科学与技术(英文版), 2019, 20(5): 32-39.
- [2] 罗国平, 张杰, 李忠润, 等. 生态沟渠综合治理研究综述[J]. 湖南水利水电, 2020(6): 56-59.
- [3] 吴桂香. 生态沟渠水土流失防治技术研究[J]. 水上安全, 2025(14): 85-87.

作者简介: 彭静(1980.11—), 女, 汉族, 毕业学校: 广西电子科技大学, 现工作单位: 长江勘测规划设计研究有限责任公司上海分公司; 刘草原(1992.9—), 男, 汉族, 毕业学校: 三峡大学, 现工作单位: 广德市水利局。

## 果洛龙洼矿区综合地质特征与资源潜力研究

苏海龙 李积财 李福明 王亚州 李得凤  
青海山金矿业有限公司, 青海 都兰 816101

**[摘要]** 本篇文章主要针对青海果洛州龙洼金矿进行研究,目的是为了对矿区所在的区域地质情况以及矿区地质状况有一个系统的了解,并在此基础上对矿区的矿床地质情况进行详细的描述,在此基础上分析构造—流体耦合控矿作用机制,最后结合三维建模与靶向找矿工作来探讨其深部资源潜力问题。通过对矿区的研究我们发现该矿位于东昆仑造山带东段之上,矿区内的金矿体分布主要是受近东西向韧性剪切带以及断裂构造的影响,形成石英脉型和破碎带蚀变岩型两大类矿体,成矿物质流体是以中低温热液为主,热液的迁移、汇集到最终沉积的过程完全受到控制地质构造的变化影响,具有明显的构造—流体耦合控矿规律。通过建立三维地质模型并开展靶向找矿工作发现矿区深部还蕴藏着大量的未被揭露出来的隐伏矿体资源,资源潜力巨大,为该矿的持续开发利用以及类似金矿床的寻找提供重要的基础理论依据以及参考经验。

**[关键词]** 果洛龙洼金矿; 区域地质; 矿床特征

DOI: 10.33142/nsr.v2i4.18730

中图分类号: P618.51

文献标识码: A

## Research on Comprehensive Geological Characteristics and Resource Potential of Guoluo Longwa Mining Area

SU Hailong, LI Jicai, LI Fuming, WANG Yazhou, LI Defeng  
Qinghai Shanjin Mining Co., Ltd., Dulan, Qinghai, 816101, China

**Abstract:** This article mainly focuses on the study of the Longwa gold mine in Guoluo Prefecture, Qinghai Province. The purpose is to have a systematic understanding of the geological conditions of the mining area and the geological conditions of the mining area. Based on this, a detailed description of the geological conditions of the deposit in the mining area is provided. On this basis, the mechanism of structure fluid coupling control is analyzed. Finally, the deep resource potential of the mine is explored by combining 3D modeling and targeted prospecting work. Through research on the mining area, we found that the mine is located on the eastern section of the East Kunlun orogenic belt. The distribution of gold ore bodies in the mining area is mainly influenced by nearly east-west ductile shear zones and fault structures, forming two types of ore bodies: quartz vein type and fractured zone altered rock type. The ore-forming material fluid is mainly composed of medium and low temperature hydrothermal fluids, and the migration and collection of hydrothermal fluids to the final sedimentation process are completely influenced by changes in geological structures, with obvious structural fluid coupling controlling the mining law. By establishing a three-dimensional geological model and conducting targeted prospecting work, it was discovered that there are still a large number of undiscovered hidden mineral resources in the deep part of the mining area, with enormous resource potential. This provides important theoretical basis and reference experience for the sustainable development and utilization of the mine and the search for similar gold deposits.

**Keywords:** Guoluo Longwa gold mine; regional geology; mineral deposit characteristics

东昆仑造山带是我国最重要的金矿成矿带之一,其资源保障程度关乎着我国整个黄金工业的发展前景,果洛龙洼金矿是东昆仑造山带东部典型的造山型金矿床,目前拥有已探明黄金资源量 50 余 t, 平均品位 3.2g/t, 具备很好的资源开发前景,但是随着浅部资源的不断开发,现有勘查深度范围内资源逐渐枯竭,500m 以下深部仍未开展有

效的系统性勘查工作,矿体深部的地质状况及资源潜力仍不清楚。近年来我国黄金工业对优质的矿产资源需求不断增加,在已存在的矿区深部寻找后备矿产资源已经成为我国黄金工业发展的必然趋势。故此,对果洛龙洼金矿进行综合地质特征和深部的资源潜力的研究不仅是本矿区自身生产的迫切要求,同时也对丰富和完善整个东昆仑地区

金成矿学说以及指导该地区的金矿找矿工作有着十分重要的科学研究价值。

### 1 区域地质背景与矿区地质特征

#### 1.1 区域地质背景

果洛龙洼金矿区地处东昆仑造山带东部边缘、昆中断裂之南侧。该区经历了陆缘活动型沉积盆地闭合-造山过程，再经历多次叠加造山事件，在这样的地质背景之下发育了一系列的大规模逆冲断层、走滑断层、韧性-脆性剪切带及与其相伴生的一系列小型构造组合。它们构成了对在造山过程中因持续抬升的热流作用而生成的各种成矿流体运移与聚集的有利通道与容矿空间。深大断裂延伸至深部地壳，引发岩浆活动，既带来了深部的成矿物质同时又沿途萃取、活化了围岩中的大量物质，从而形成含矿岩浆热液、变质热液等混合型成矿流体。

#### 1.2 矿区地质特征

矿区出露的地层主要是由一套中低级别变质岩系，即奥陶-志留系纳赤台群浅变质火山沉积岩系组成，主要有凝灰岩、千枚岩等。其中碳质千枚岩是重要的含矿围岩。矿区断裂构造非常发育，主要为近东西向韧性的剪切带，后期又发育了北东或南北的脆性断裂，晚期构造常切割早期的韧性剪切带。金矿体主要分布在近东西向韧性剪切带

及两侧部位，通过地表填图和工程揭露，矿区可以圈定出几条近东西向的成矿构造带以及一些北东向和北西向的对矿体造成破坏的后期构造带。该区域的地质框架见图 1。

### 2 矿床地质特征

#### 2.1 矿体特征

矿区金矿化主要表现为两类，一种是含金石英脉型，另一种是破碎带蚀变岩型。由露采场揭露可见到几条近平行排列的矿化带。含金石英脉型矿体产状近乎东西向延伸，倾向南，倾角较陡，大约 70°左右，平均宽度约 0.4m，矿体与围岩界面大多比较明显。破碎带蚀变岩型金矿化带亦呈近东西向延伸，倾向南，倾角约为 65~70°左右，平均厚度达 1m 左右，延伸长度为 50m 左右，属典型的受断裂破碎带控制之蚀变岩型矿化。矿体的空间定位严格受控于破碎裂隙带空间形态变化所制约，形成不规则脉状分布，并伴有分叉复合、尖灭侧现、膨大缩窄等现象<sup>[1]</sup>。矿体主要赋存于东西向构造带间，而北西、北东向断层则相当于东-西向构造的晚期产物，它们对矿化带、矿体以及地层都造成了一定程度的破坏，比如北东向 F5、F6、F7、F8 等断层就存在对已知矿体及石英脉有明显的右或左行平移错断现象。矿区构造和矿化带分布的基本地质特征如图 2 所示。

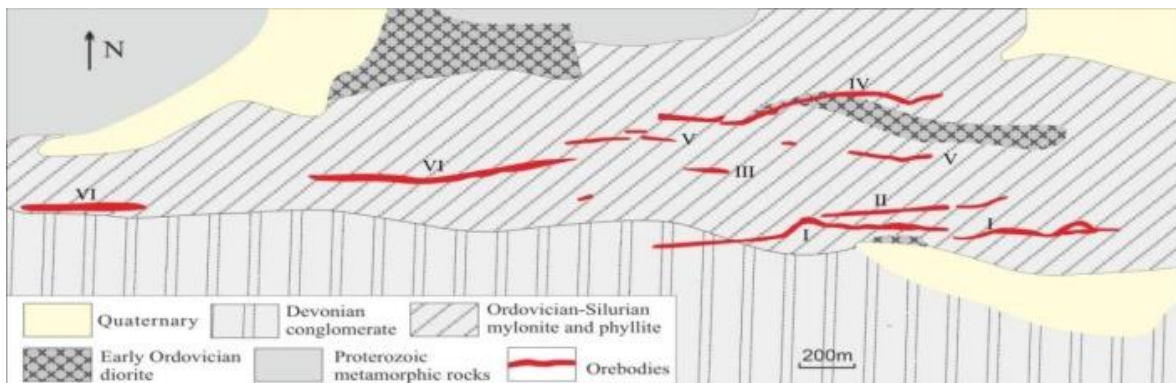


图 1 果洛龙洼区域地质图

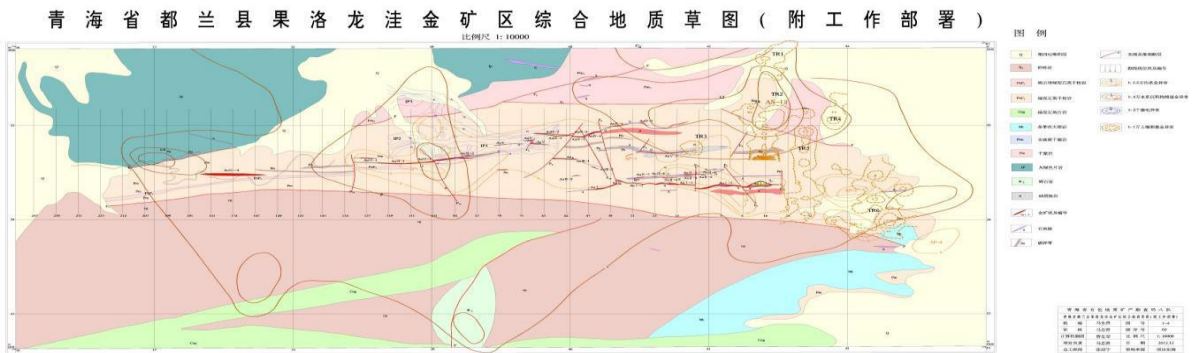


图 2 综合地质草图

## 2.2 矿石特征

矿石金属矿物相对较少, 约占 3% 左右, 金属矿物主要为自然金、银金矿、黄铁矿、方铅矿、黄铜矿等, 在地表可发现孔雀石等次生矿物。脉石矿物主要有石英、绢云母。矿石结构复杂, 有半自形-他形晶结构、充填结构、反应边结构和土状结构等, 矿石构造主要是裂缝浸染状构造、网脉状构造、晶洞状构造和块状或脉状构造。矿石中的金矿物赋存形式很特殊, 金粒含有大量的银, 自然金含银量约为 8.86%, 而银金矿含银量甚至高达 25.03%, 金主要集中于石英与褐铁矿间并主要以银金矿的形式产出, 脉石裂隙金占有比例最大, 为 41.24%, 脉石包裹金所占比重最小, 只有 9.27%。黄铁矿与石英是矿体中金银的最主要的载荷矿物之一, 特别是黄铁矿分布广泛而且含量很高, 不同时代黄铁矿的成矿能力也不相同。

## 2.3 围岩蚀变

矿体围岩主要为千糜岩和含碳绢云母石英千糜岩。围岩蚀变以硅化、绢云母化、碳酸盐化和黄铁矿化为主。硅化十分强烈并有多次反复, 在原岩破碎后发生硅化, 然后硅化的岩石又遭受破碎再次硅化的重复多次的过程, 最终形成强烈的构造岩或称交代脉石英岩, 基本确定了矿体规模和形状。含碳绢云母石英千糜岩为深灰色到灰黑色, 具有微粒鳞片状变晶结构以及千枚状、皱纹状构造, 星散状分布的黄铁矿多被蚀变成土状的黄褐色或赭石状物质。

## 3 构造-流体耦合控矿机制

### 3.1 构造控矿规律

矿区控矿构造明显。近东西向构造为主要成矿构造, 共有 6 个大型构造, 控制着异常展布及矿化带的分布。这些构造破碎岩、断层角砾岩、糜棱岩发育, 为成矿提供空间。从力学性质来看应该以张扭性为主, 断裂面为缓波状。而北东向、北西向构造主要起破坏作用, 为成矿后构造。北东向构造使矿体遭到晚期构造变动的影 响, 动力变质作用加强, 构造挤压扭动造成矿区褶皱构造比较发育, 且有剪切活动特点; 北西向构造对于地层、矿化带及矿体也有破坏, 巷道揭露错距多小于 20m。综合来说, 矿体严格受破碎裂隙构造带的控制, 产在其中。

### 3.2 成矿流体特征

对矿区石英脉样品所作的流体包裹体测温研究为认识成矿过程中的流体属性提供了第一手的资料。据分析结果表明, 成矿流体为中低温热液型, 预计所得到的成矿流体温度在 280~380°C 之间, 盐度为 5~12wt% NaCl eqv。其包裹体类型主要有富液相水溶液包裹体、富气相水溶液包裹体及纯 CO<sub>2</sub> 包裹体等(代表性的流体包裹体显微照片见图 3)。成矿流体来源较为复杂, 是由深部岩浆热水与地表大气降水混合作用的产物。成矿流体的演化过程和构造运动有着密切的关系, 在早期弱构造活动中形成初期混合流体, 中期剧烈构造活动造成断裂带扩大, 流体压力剧减导致大量流体中 CO<sub>2</sub> 的逃逸, 从而使得大量的金被沉淀下来, 在晚期较弱构造活动中只有少量的流体活动出现。

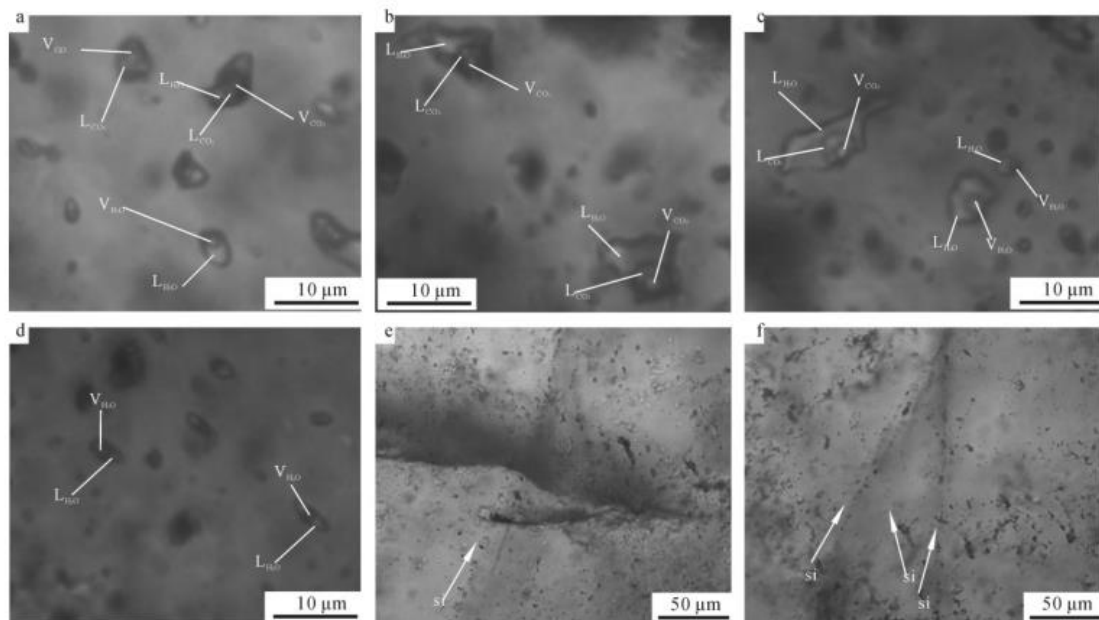


图 3 果洛龙洼金矿矿化石英脉中流体包裹体类型

### 3.3 构造-流体耦合过程

构造与热液相互作用贯穿了整个矿床成矿的全部过程。先是区域内的深大断裂、韧性剪切带是热液流动的最初通道,当成矿热液形成之后,它的迁移方向完全受到构造骨架制约,只沿着近东西向的构造带运动。先是在成岩期,构造运动造成的裂隙,经过几次硅质热液的交代充填,形成了强硅化的脉石英岩。接下来就是成矿期,在先前形成的石英脉或者蚀变岩石体中,在不断增大的构造应力的作用下,产生了大量与矿脉走向一致的微破碎裂隙,这便成为了后期含矿热液迁移沉淀的新通道及场所,而早期形成的硫化物黄铁矿结晶以后,在再一次构造力的动力之下,产生了张性、张扭性的裂隙,成为富含金银的多金属热液充填的空间。接着热液依次充填交代早先形成的矿物,最后完成了金的富集沉积成矿过程<sup>[2]</sup>。

### 3.4 成矿模式

结合上述观点,可得出果洛龙洼金矿的控矿模型。矿床形成以东昆仑造山运动为背景,大规模断裂联通深部与上部,深源流体与地表降水混合形成中低温成矿热液,在构造应力作用下沿近东西向韧性剪切带及其断裂体系向上、外迁移,在迁移过程中不断从岩石圈中抽取成矿物质,当其运移到构造拐弯段,构造交汇处、张性裂隙发育的减压部位,因物理化学条件急剧变化,尤其是压力下降、CO<sub>2</sub>释放,使 Au 等成矿物质快速沉积,在张性裂隙中形成石英脉型金矿体,在脆-韧剪切部位形成构造蚀变岩型金矿体。而后成矿后 NE、NW 向构造活动又对先期形成的矿体进行破坏与改造,在矿体内出现矿体尖灭再现、分枝复合等现象。因此,该矿床是由构造严格控制下的,中低温热液充填交代型矿床,具有形成中大型金矿床的较好的地质条件。

## 4 深部资源潜力评价与靶向探矿

### 4.1 三维地质建模

针对深部资源潜力评估量化问题,在本次工作中基于三维地质建模技术进行矿区精细化建模,其在已有 50 个钻孔共计钻孔进尺 12000m、100 平方公里重磁物探测数据及 200 公里化探剖面 Au、As、Sb 等元素异常数据的基础上,开展地层层序模型的建立采取“剖面控制加三维插值”法,直观展示了奥陶—志留系纳赤台群各岩性段比如凝灰岩段和千枚岩段等在空间上的展布情况(建模过程示意图以及结果如图 4)其中千枚岩段的孔隙率可高达 15%~20%作为成矿流体优选运移带<sup>[3]</sup>。构造-矿化空间相关模型及流体地球化学异常模型的构建,达到了地质体空

间相互关系可视化的展示的目的,模型的准确率可达 85%以上,圈定异常范围精确度达 90%。

### 4.2 深部成矿预测

结合三维建模及控矿规律的研究成果,对矿区 500m~1500m 深处的隐伏矿体作出预测。通过研究得出矿区深处拥有巨大的隐伏矿体资源。主要有三个主要的成矿、运移通道,分别代表着不同的矿体,其中 I 号矿体东区 15 线~39 线为富集通道,矿体向西南侧伏,IV 号矿体中区 47 线~63 线为富集通道,矿体倾向东南,VI 号矿体西区 93 线~125 线为富集通道,矿体倾向东南。推测深部隐伏矿体厚度有可能达到 1~5m 之间,平均品位预测值在 2.8~3.5g/t 之间。这三个通道的分析给深部探矿提供指引。

### 4.3 靶向探矿实践

为了检验深部成藏模型以及提升找矿效果,本项目创造性地提出了“靶向找矿”的技术路线。这一理念以构造-流体耦合控藏规律为主线,以深部潜力模型为基础来进行验证工程的施工。具体实施时先在模型的基础上选定中心、重点及次重点三个级别的靶区,再基于此合理设计出 10 个验证钻孔,总钻探进尺达 3000m,用定向钻孔的方法保证钻孔穿过矿体的核心段。在此基础上进行统筹管理使成本节约了约 20%。现场作业时,采用三级质量管理体系保障孔斜、岩芯采取率等技术标准。最后的结果是 10 个钻孔的见矿率为 68%,远远高于常规探测法 35%的见矿率水平。平均揭露矿层厚度也由原来的 1.8m 提升到了 3.1m,品位合格率也提高了,即大于等于 2.8 克每吨的比例从 52%提升到 85%,打破了传统均匀布孔、盲目探测的被动局面。靶向找矿技术路径与结果对比如图 5 所示。

### 4.4 资源潜力量化

通过对地面普查,分析研究和靶向探矿检验,对矿区新增资源潜力进行了量化评估。在对果洛龙洼 I 号脉,IV 号脉,V 号脉的深部找矿以及地面划定的矿体带进行评估,得到新增的矿石量 23 万 t,金金属量 1022 公斤。以现在的黄金价格进行经济评价,大约为 5 个亿左右。而这个新增储量能够使矿场的服务期限延长 3 年左右,公式为增加矿山服务年限=增加矿石资源量×(1-矿石损失率)/年生产规模×(1-矿石贫化率),代入有关数据得出的结果约为 3 年。另外,采用靶向探矿技术也获得了较大的经济效益,比原先方案节省探矿资金约 552 万元。这些定量指标都表明矿区深部有较好的找矿远景和开发价值。

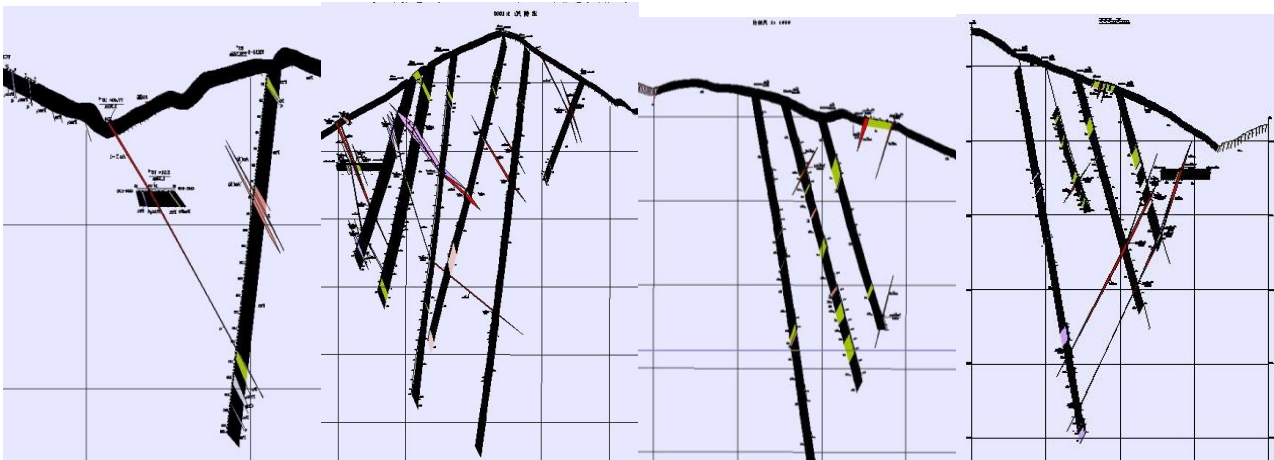


图4 三维地质建模过程示意图

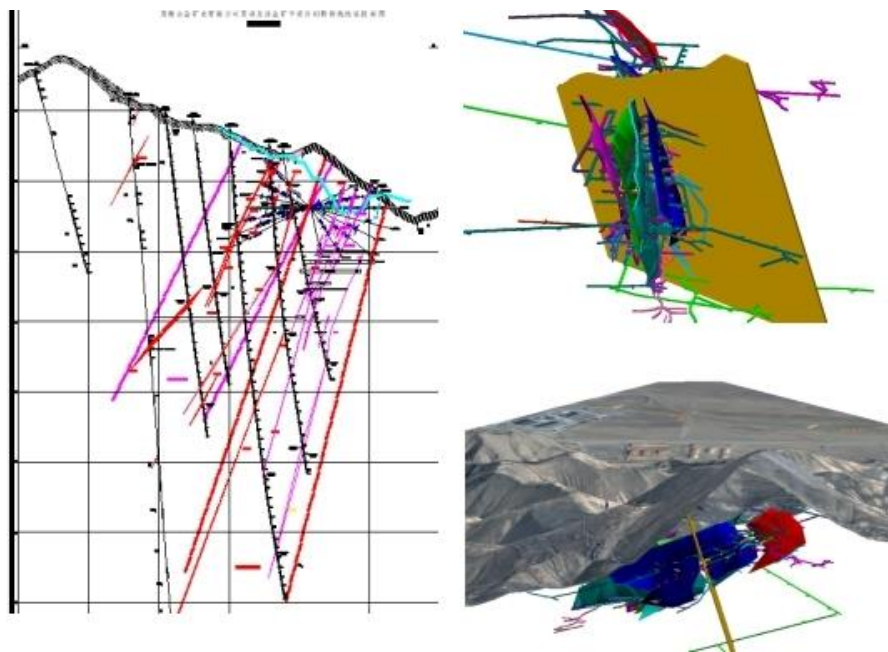


图5 靶向钻探流程与效果对比

## 5 结束语

本论文在果洛龙洼金矿矿区地质背景、矿床特征、成矿控制因素以及深部找矿前景等方面进行了综合性的分析研究,并得出了一些初步的认识,矿区内金矿体受近东西构造严格控制,在成矿流体上属于中、低温热液,其成矿过程具有明显的构造-流体相互作用的特点;三维建模加靶区找矿的实际验证表明该矿区深部具有较大的资源量规模,技术创新能有效提升勘探效率及精度,可为矿山后续可持续开发提供资源接续补充。但受限于矿区复杂的地质情况与研究程度的限制,本论文对于部分成矿规律的认识也可能还不够深刻,比如多期流体活动的过程的具体演化细节、矿区更深处 1500m 之下资源预估情况等,都有待未来工作中进一步加大地质调查及相关研究力度来

进行更为深入的理解。

### [参考文献]

- [1]孙亚明.青海东昆仑成矿带沟里金矿集区金矿成矿作用研究[D].吉林:吉林大学,2025.
  - [2]何福保,张阳,段彬,等.新疆西昆仑成矿带阔克吉勒嘎超大型金矿床的发现及其意义[J].地球学报,2025,46(6):1033-1038.
  - [3]祁尧刚,孟勇,周霖,等.东昆仑成矿带构造蚀变岩型金矿床特征及资源潜力[J].黄金科学技术,2025,33(3):497-510.
- 作者简介:苏海龙(2000.11—),男,毕业院校:中国石油大学胜利学院,学历:本科,专业:资源勘查工程,单位:青海山金矿业有限公司,职务:地质技术员,职务年限:2年,职称:助理工程师(2025年)。

## 三自由度系统微振动的可视化研究

郑怡<sup>1</sup> 韩毓锦<sup>2</sup> 杨伟俊<sup>1</sup> 姜雅阁<sup>1</sup> 李俊<sup>1</sup> 郑兴荣<sup>1\*</sup>

1. 陇东学院 新能源学院, 甘肃 庆阳 745000

2. 陇东学院 数学与信息工程学院, 甘肃 庆阳 745000

**[摘要]**基于理论力学和结构振动理论, 运用分析动力学方法, 研究讨论了三自由度系统及其微振动的相关特性。借助 MATLAB 软件及其快速傅里叶变换功能对系统的位置、速度、位移、频率及其在频率进行数值仿真。结果表明: 三自由度系统的微振动特性受到简振频率、系统质点位移和振型等参数的影响, 其中质点的质量及劲度系数的取值变化对最终的结果也会产生影响, 不同的参数组合会导致不同的振动特性。这与理论分析结果完全吻合。因此, 在实际应用中, 可以根据实际具体情况选择合适的参数组合, 以达到最优的微振动效果。

**[关键词]**三自由度系统; 微振动; 矩阵法; 位移响应; 简振频率; 可视化

DOI: 10.33142/nsr.v2i4.18712

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

## Visualization Research on Micro-vibration of Three-degree-of-freedom Systems

ZHENG Yi<sup>1</sup>, HAN Yujin<sup>2</sup>, YANG Weijun<sup>1</sup>, LOU Yage<sup>1</sup>, LI Jun<sup>1</sup>, ZHENG Xingrong<sup>1\*</sup>

1. School of New Energy, Longdong University, Qingyang, Gansu, 745000, China

2. College of Mathematics and Information Engineering, Longdong University, Qingyang, Gansu, 745000, China

**Abstract:** Based on theoretical mechanics and structural vibration theory, this study investigates the relevant characteristics of the three-degree-of-freedom system and its micro-vibration by employing analytical dynamics methods. Numerical simulations of the system's position, velocity, displacement, and frequency characteristics were conducted using MATLAB software and its fast Fourier transform (FFT) function. The results indicate that the micro-vibration characteristics of the three-degree-of-freedom system are affected by parameters such as natural frequency, system particle displacement, and vibration mode. Among these, changes in the values of particle mass and stiffness coefficient also exert an influence on the final results, and different parameter combinations lead to distinct vibration characteristics. This is fully consistent with the results of theoretical analysis. Therefore, in practical applications, an appropriate parameter combination can be selected according to specific practical conditions to achieve the optimal micro-vibration effect.

**Keywords:** three-degree-of-freedom system; micro-vibration; matrix method; displacement response; natural frequency; visualization

### 引言

微振动是指振幅微小、频率覆盖范围较宽的振动现象, 其振幅一般处于微米 ( $\mu\text{m}$ ) 甚至纳米 ( $\text{nm}$ ) 量级, 区别于日常可见的大幅机械振动, 广泛存在于精密制造、航空航天、船舶、生物医学等领域<sup>[1-5]</sup>, 其测量与控制是高精尖技术的核心环节之一。随着半导体、航空航天等领域对精度要求的提升, 微振动控制正朝着更高精度(纳米级)、更广频段(覆盖超低频和高频)、智能化(自适应控制算法)方向发展<sup>[6,7]</sup>, 例如结合人工智能的振动预测与主动补偿技术, 已成为高端装备研发的关键突破点。物体或结构体发生微小的振动(微振动), 会对设备或结构体的性能和寿命产生影响。因此, 研究微振动及其相关特性显得

尤为重要。

三自由度系统及其微振动问题作为理论力学中的一个基本问题, 是所有微机电系统(MEMS)等精密仪器元件的理论基石, 它由三个自由度的振动构成, 通常由两个平行板和一个悬挂在中间的质点组成<sup>[8-10]</sup>。三自由度系统微振动及其控制被广泛应用于各行各业, 并得到了快速应用。三自由度系统及其元件的微振动特性是当前一个重要的研究方向。研究者们通过理论分析、数值模拟和实验验证等方法, 探究了三自由度元件的振动模态、固有频率、阻尼特性等微振动特性。同时, 还研究了三自由度元件的制造工艺、尺寸优化、材料选择等方面, 以提高其微振动性能和应用效果<sup>[11-14]</sup>。总的来说, 三自由度元件的研究对

于机电系统的发展和具有重要的意义,未来还有很大的研究空间和应用前景。

基于此,本文理论力学和结构振动理论,系统性地研究了三自由度系统中的微振动问题。首先利用矩阵方法求解三自由度系统的本征值,再求解耦合的微分方程的解。通过 MATLAB 软件对方程求数值解,画出质点的位置、速度和位移曲线图,对数值解作频谱分析得出本征频率;使用拉普拉斯变换法解方程的解析解值,得到了相关特性的可视化图形。

### 1 理论模型与推导

微振动问题的探讨求解,就是体系在平衡位置附近作往返有限小位移的周期运动。

在三自由度系统中,设劲度系数均为  $k$  的两弹簧连接三个质点,其中两端的质点质量分别都为  $m$ ,中间质点的质量为  $M$ 。设在时间  $t$  为零时,各质点初速度  $v_0$  为零,以图 1 所示的三个质点相对自身平衡位置的位移  $x_1, x_2, x_3$  作为三自由度振动系统的广义坐标<sup>[8,9]</sup>。

如图 1 所示,根据理论力学和结构振动理论,利用拉格朗日方法<sup>[8]</sup>,得到三自由度系统的运动微分方程为:

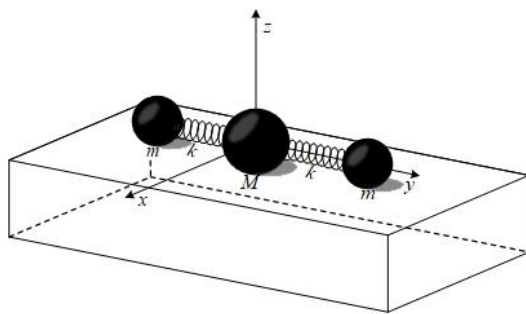
$$\begin{cases} m \frac{d^2 x_1}{dt^2} + k(x_1 - x_2) = 0 \\ M \frac{d^2 x_2}{dt^2} + k(2x_2 - x_1 - x_3) = 0 \\ m \frac{d^2 x_3}{dt^2} + k(x_3 - x_2) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

这是典型的二阶常微分方程组,其解的一般形式为:

$$x_i = A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i) \quad (2)$$

根据矩阵表示法,以上二阶常微分方程组的矩阵形式可写为:

$$S \frac{d^2}{dt^2} X + KX = 0 \quad (3)$$



(a) 三维模型图

其中:

$$S = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & m \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}, \quad K = \begin{bmatrix} k & -k & 0 \\ -k & 2k & k \\ 0 & -k & k \end{bmatrix}$$

代入上式后,得到矩阵形式的方程为:

$$(K - S\omega^2)A = 0 \quad (4)$$

其中:

$$A = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix}$$

即得:

$$\begin{cases} (k - m\omega^2)A_1 - kA_2 = 0 \\ -kA_1 + (2k - M\omega^2)A_2 - kA_3 = 0 \\ -kA_2 + (k - m\omega^2)A_3 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

因为矩阵  $A$  是非零矩阵,所以由公式 (4) 可知:

$$K - S\omega^2 = 0 \quad (6)$$

即:

$$\begin{vmatrix} k - m\omega^2 & -k & 0 \\ -k & 2k - M\omega^2 & -k \\ -k & 0 & k - m\omega^2 \end{vmatrix} = 0$$

通过求解,得到三个简正频率,分别为:

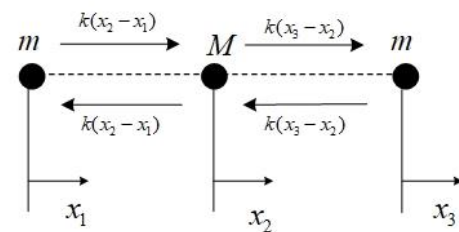
$$\omega_1 = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad \omega_2 = 0, \quad \omega_3 = \sqrt{\frac{k}{m} \left(1 + \frac{2m}{M}\right)}$$

将简正频率分别代入上式,可得到三个与之对应的本征矢量,即:

(1) 对  $\omega_1 = \sqrt{k/m}$ , 本征矢量为:

$$A_1 = \begin{bmatrix} A_{11} \\ A_{21} \\ A_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} \\ 0 \\ -A_{11} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中  $A_i$  表示第  $i$  个质点第 1 个简正频率的振幅,所以三自由度系统的简正模式下的振动方程为:



(b) 示意图

图 1 三自由度系统的微振动模型和受力示意图

$$\begin{cases} x_1 = A_{11} \cos(\omega_1 t + \varphi_1) \\ x_2 = 0 \\ x_3 = -A_{11} \cos(\omega_1 t + \varphi_1) \end{cases} \quad (8)$$

(2) 对  $\omega_2 = 0$ , 本征矢量为:

$$A_2 = \begin{bmatrix} A_{12} \\ A_{22} \\ A_{32} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{12} \\ A_{12} \\ A_{12} \end{bmatrix} \quad (9)$$

同理, 得到简正模式下的振动方程为:

$$\begin{cases} x_1 = A_{12} \cos \varphi_2 \\ x_2 = A_{12} \cos \varphi_2 \\ x_3 = A_{12} \cos \varphi_2 \end{cases} \quad (10)$$

三个质点的位移相同, 系统作纯平动。

(3) 对  $\omega_3 = \sqrt{\frac{k}{m} (1 + \frac{2m}{M})}$ , 本征矢量为:

$$A_3 = \begin{bmatrix} A_{13} \\ A_{23} \\ A_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{13} \\ -\frac{2m}{M} A_{13} \\ A_{13} \end{bmatrix} \quad (11)$$

第三个简正模式的运动学方程为:

$$\begin{cases} x_1 = A_{13} \cos(\omega_3 t + \varphi_3) \\ x_2 = -\frac{2m}{M} A_{13} \cos(\omega_3 t + \varphi_3) \\ x_3 = A_{13} \cos(\omega_3 t + \varphi_3) \end{cases} \quad (12)$$

公式 (8) (10) (12) 是三个简正模式下的三自由度系统的运动方程, 所以整个系统的简正模式运动的通解为:

$$\begin{cases} x_1 = A_{11} \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + A_{12} \cos \varphi_2 + A_{13}(\omega_3 t + \varphi_3) \\ x_2 = A_{12} \cos \varphi_2 - \frac{2m}{M} A_{13} \cos(\omega_3 t + \varphi_3) \\ x_3 = -A_{11} \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + A_{12} \cos \varphi_2 + A_{13}(\omega_3 t + \varphi_3) \end{cases} \quad (13)$$

式中积分常数  $A_{11}$ ,  $A_{21}$ ,  $A_{31}$  和  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$  由初始条件确定。

## 2 三自由度系统特性的数值仿真与结果讨论

为了方便获取数值仿真结果并进行比较, 文中在计算时的参数设置如下:  $m=3\text{kg}$ ,  $M=4\text{kg}$ ,  $k=50\text{N/m}$ 。

### 2.1 三自由度系统的位置速度仿真

在三自由度系统的微振动中, 两个弹簧振子发生平动或转动形成了类似于正、余弦函数的波动。结合理论模型 (运动微分方程、简正频率公式) 推导, 利用 MATLAB 软件进行数值仿真, 得到了三自由度系统中三个质点的位移曲线, 如图 2 所示。

图 2 直观呈现了系统中不同质点随时间变化的位移响应规律。该图聚焦研究通过位移曲线的波动规律, 间接

反映了系统本征频率  $\omega_1$ ,  $\omega_3$  对位移响应的影响; 为后续“快速傅里叶变换 (FFT) 频谱分析”提供原始位移数据。从图中可以看出, 三条位移曲线 ( $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ ) 均呈现“周期性波动”, 符合理论中“系统运动是三个简正模式叠加”的结论, 曲线的波动由低频频率  $\omega_1$  和高频频率  $\omega_3$  共同主导, 且中间质点  $x_2$  的位移波动幅度与两端质点  $x_1$ 、 $x_3$  存在差异。 $x_1$  与  $x_3$  的位移曲线呈“反向对称”趋势 (如某时刻  $x_1$  向上波动时,  $x_3$  向下波动), 印证了低阶简正模式 ( $\omega_1$ ) 中“两端质点反相位、中间质点静止”的振型特点。

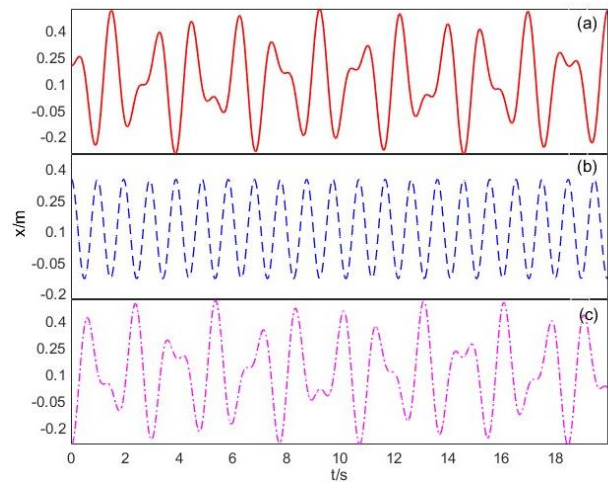


图 2 三质点位移曲线图。(a) 表示左边质点 m, (b) 表示中间质点 M, (c) 表示右边质点 m

### 2.2 三自由度系统质点的频谱

质点的功率谱图是通过快速傅里叶变换 (FFT) 对三自由度系统中质点的位移信号进行频谱分析后绘制的功率谱密度图。通过 FFT 将质点的位移时域信号转换到频域, 分析其频率成分, 目的是从数值仿真数据中提取系统的本征频率 (固有频率), 验证理论推导的正确性, 如图 3 所示。

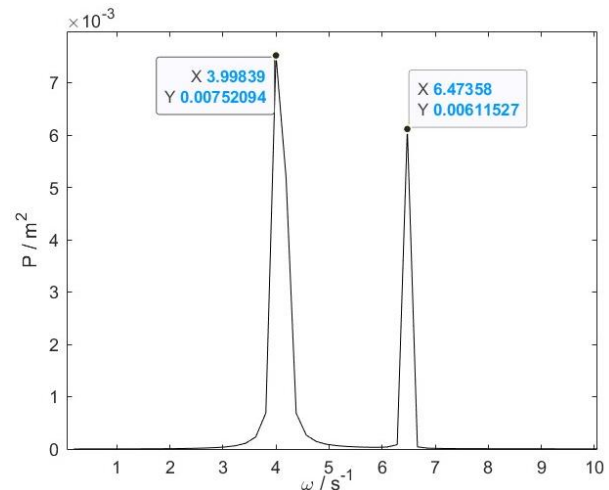


图 3 质点的功率谱图

从图中可以得到，功率谱峰值对应本征频率，图中出现两个明显的峰值，分别对应系统中两个非零的本征频率  $\omega_1$  和  $\omega_3$ ，其值分别为 3.9984 和 6.4736，与理论计算值 ( $\omega_1=4.0825$ 、 $\omega_3=6.4550$ ) 基本吻合，验证了数值仿真的准确性。功率谱中没有其他显著峰值，说明系统振动主要由这两个频率模式主导，符合三自由度系统的振动特性。峰值高度反映了对应频率模式在振动中的能量贡献大小。

### 2.3 固定频率旋转曲线

利用 MATLAB 对微分方程组 (13) 进行拉普拉斯变换，然后求解变换所得的方程组，最后将解作逆变换，得出原微分方程组的解。以参数组合  $m=3\text{kg}$ ， $M=4\text{kg}$ ， $k=50\text{N/m}$  为例，代入拉普拉斯变换法求得的方程的解析解中，可以得到包括耦合模式振动和两种简正模式运动，如图 4 分别是耦合模式下的频率为  $\omega_1=4.0825$  和频率为  $\omega_3=6.4550$  的定频率三维旋转动画与二维平面图。

图 4 是拉普拉斯变换法数值仿真得到的定频率三维旋转动画图和定频率旋转曲线图，旨在对比展示耦合振动

模式与两种简正模式的视觉差异。通过定频率旋转动画或特定频率下的运动轨迹，直观区分不同振动模式的特征，验证理论推导的简正频率 ( $\omega_1=4.0825$  和  $\omega_3=6.4550$ ) 在实际运动中的表现。从图中可以得出，在单一频率激励下，系统呈现清晰的简正振动形态： $\omega_1$  模式下，两端质点反相运动，中间质点静止（节点）； $\omega_3$  模式下，两端质点同相运动，中间质点反相运动。耦合模式下运动轨迹更为复杂，是两种简正模式的线性叠加。通过观察运动周期，可直观验证理论计算频率的正确性。

### 2.4 参数对系统本征频率影响的数值仿真

以参数组合  $m=3\text{kg}$ 、 $M=4\text{kg}$ 、 $k=50\text{N/m}$  为例，本研究并验证三自由度系统微振动的理论模型与数值方法的合理性和有效性。三自由度系统的动力学特性由质量  $m$ 、 $M$  与弹簧劲度系数  $k$  共同决定，通过构建质量比  $r = \frac{M}{m}$ （反映系统内部质量分布）和劲度系数  $k$  的二维参数空间，探究各参数及其耦合关系对系统本征频率的影响规律，对参数空间全面梳理不同参数搭配，开展系统性的定量研究。

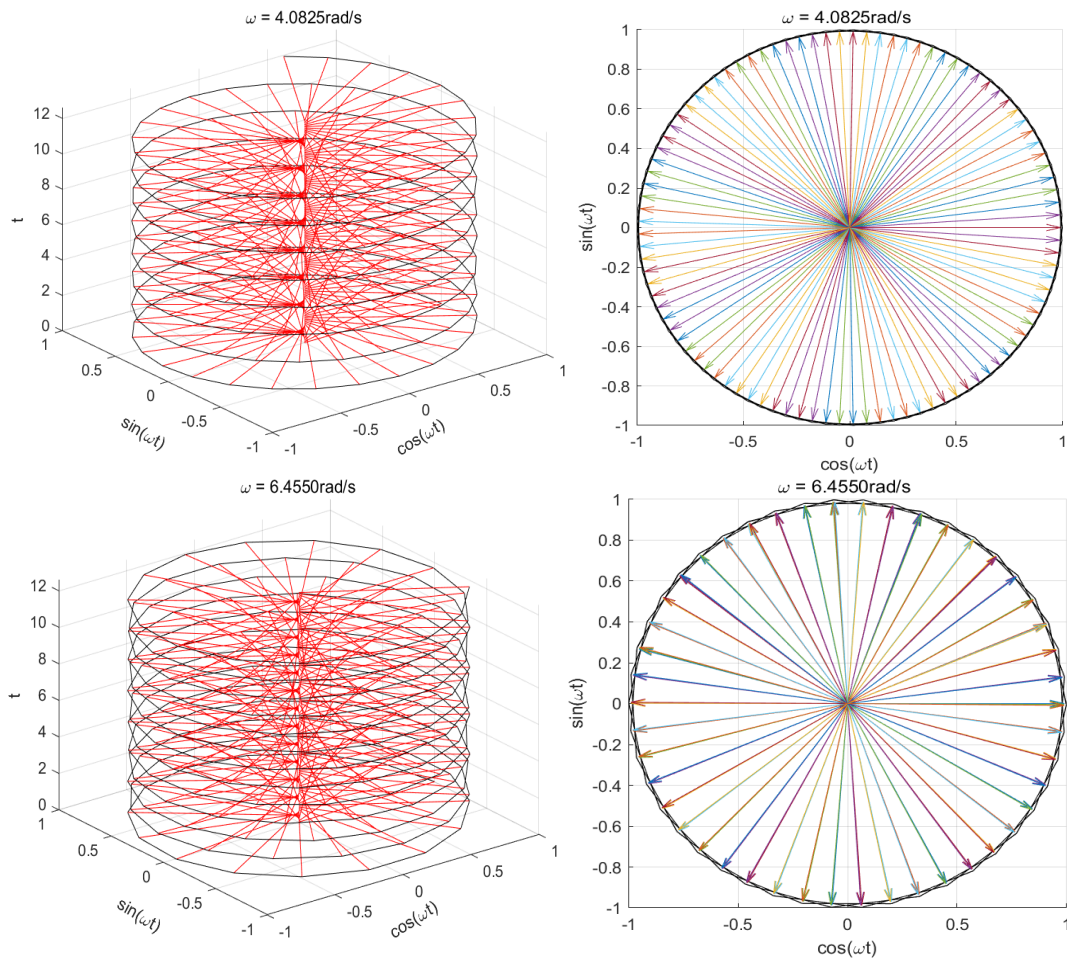


图 4 两种不同频率下的定频率旋转曲线图

(1) 固定质量比  $r$  时，劲度系数  $k$  的变化对系统的影响

固定质量比  $r=0.5, 1, 2, 5, 10$ ，数值仿真得到本征频率  $\omega_1, \omega_3$  随  $k$  的变化规律，如图 5 所示。

由图 5 可得，在任意固定的质量比  $r$  下， $\omega_1, \omega_3$  均随  $k$  的增大而递增，与单自由度系统频率变化趋势一致，频率与  $\sqrt{k}$  呈强线性相关 ( $R^2 > 0.999$ )，满足  $\omega \propto \sqrt{k}$  的近似关系。 $r$  对频率曲线具有调节作用， $\omega_1$  的曲线族近乎重合，表明低阶频率对中间质量变化不敏感； $\omega_3$  的曲线族随  $r$  的增大而递增，但曲线族整体下移，表明高阶频率随中间质量增大显著降低。直观展示刚度系数  $k$  对频率的影响规律。

(2) 固定劲度系数  $k$  时，质量比  $r$  的变化对系统的影响

固定劲度系数  $k=50, 100, 200, 500\text{N/m}$ ，数值仿真得到本征频率  $\omega_1, \omega_3$  随  $r$  的变化规律，如图 6 所示。

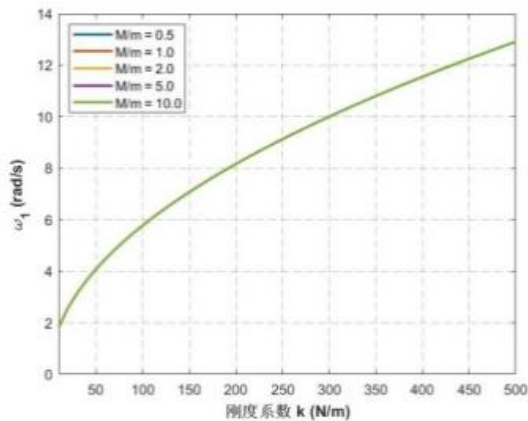
由上图 6 可得，低阶频率  $\omega_1$  几乎不随  $r$  变化，两端质点反相位振动，中间质点近似节点，频率主要由端部质

点质量  $m$  和刚度  $k$  决定，与中间质点质量  $M$  无关；高阶频率  $\omega_3$  随  $r$  增大单调递减，且具有渐近特性： $r \rightarrow 0$  时  $\omega_3$  趋近上限值；劲度系数  $k$  仅对频率曲线进行整体纵坐标缩放，不改变其随  $r$  的变化趋势。

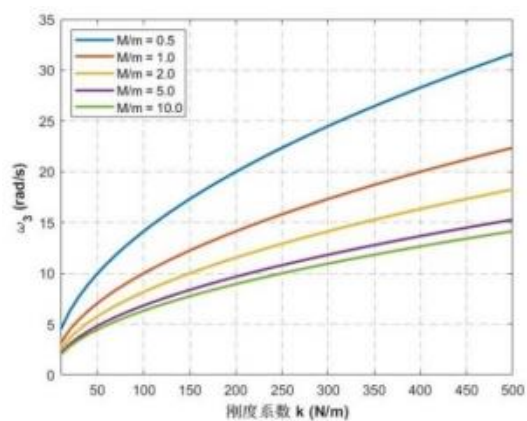
(3) 参数耦合效应与灵敏度分析

图 7 展示的是系统本征频率  $\omega_1, \omega_3$  如何随质量比  $r$  和劲度系数  $k$  变化的三维可视化结果。通过研究本征频率  $\omega_1, \omega_3$  在二维参数空间 ( $r, k$ ) 中的全局变化规律，直观呈现  $\omega_1, \omega_3$  对参数质量比  $r$  和劲度 (刚性) 系数  $k$  的敏感程度差异，为参数优化设计提供可视化依据。

有图 7 可知， $\omega_1$  响应面沿  $k$  轴陡升、沿  $r$  轴平坦，证实其主要受  $k$  控制，对  $r$  不敏感； $\omega_3$  响应面为复杂倾斜曲面，在  $r$  小、 $k$  大的区域取最大值，在  $r$  大或  $k$  小的区域值较低，表明其受  $r, k$  共同调控。灵敏度量化结果显示， $\omega_1$  对  $k$  的灵敏度远高于  $r$ ， $\omega_3$  对两个参数均具有较高灵敏度，且对  $k$  的灵敏度更高， $S_r^{\omega_3}$  为负则印证  $\omega_3$  随  $r$  增大而减小。

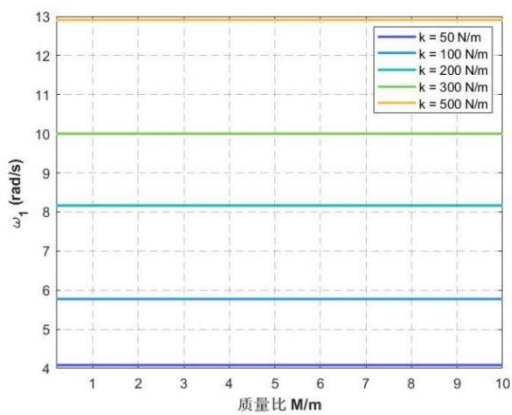


(a)  $\omega_1$  随  $k$  的变化

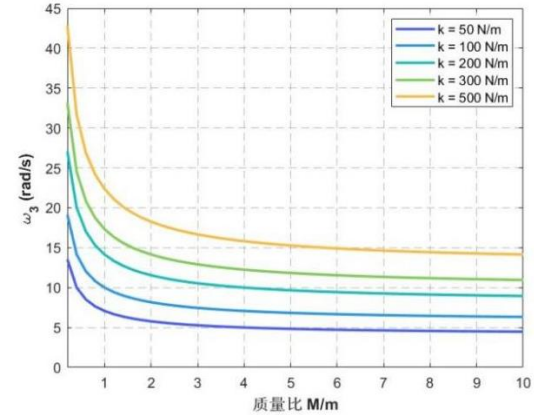


(b)  $\omega_3$  随  $k$  的变化

图 5 固定质量比时  $\omega_1, \omega_3$  随劲度系数  $k$  的变化规律

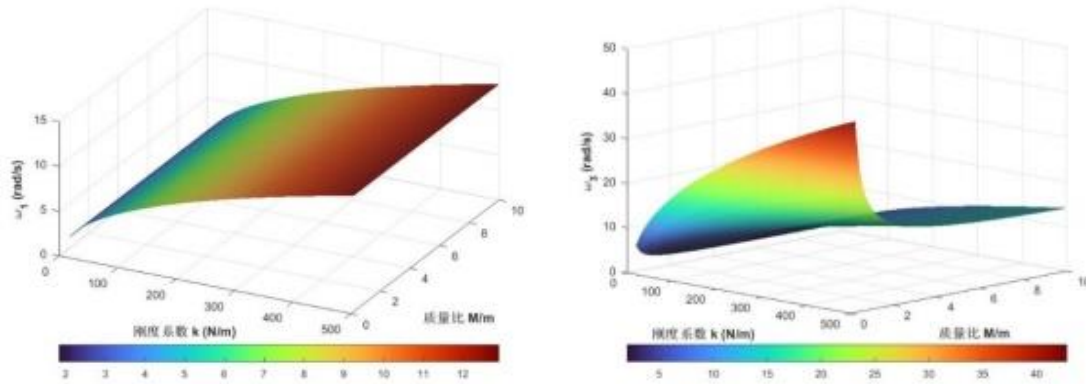


(a)  $\omega_1$  随质量比  $r$  的变化



(b)  $\omega_3$  随质量比  $r$  的变化

图 6 固定劲度系数  $k$  时  $\omega_1, \omega_3$  随质量比  $r$  的变化规律


 (a)  $\omega_1$  的参数空间响应面

 (b)  $\omega_3$  的参数空间响应面

 图7  $\omega_1, \omega_3$  的参数空间响应

### 3 结论

通过理论推导与数值仿真相结合的方式,对三自由度系统微振动问题展开研究,得出以下结论:基于拉格朗日方法推导得到系统运动微分方程,求解出三个简正频率及对应本征矢量,系统通解为三个简正模式的线性叠加;借助 MATLAB 软件和拉普拉斯变换法进行数值仿真,得到的质点位移曲线呈现周期性波动、频谱峰值对应的本征频率与理论计算值基本吻合,固定频率旋转曲线直观展现了不同简正模式的振动特征,验证了理论模型与数值方法的合理性。参数影响研究表明,本征频率  $\omega_1$  和  $\omega_3$  均随弹簧劲度系数  $k$  增大而递增,  $\omega_1$  对质量比  $r$  不敏感、主要受  $k$  控制,  $\omega_3$  随  $r$  增大单调递减且受  $r$  与  $k$  共同调控,其对  $k$  的灵敏度更高,相关可视化结果为系统参数优化设计提供了依据。

基金项目:陇东学院 2025 年校级教育教学改革研究项目(LYJG2025B31),甘肃省 2025 年学校思想政治工作课题(2025XXSZGZYBKT075),甘肃省自然科学基金(23JRRM0755)。

#### [参考文献]

- [1]罗青,于涛,张激扬,等.采用磁悬浮飞轮的航天器微振动主动抑振方法研究[J].振动与冲击,2025,44(24):246-258.
- [2]薛家宝,杨帅,黄顺舟,等.高精度航天器微振动地面试验研究进展[J].航天器环境工程,2025,42(6):591-605.
- [3]滕飞,张宇飞,李勇,等.卫星用高频微角振动测量敏感器设计、验证与在轨应用[J].空间控制技术与应用,2025,51(6):97-107.
- [4]马永琦,熊玉勇,李丁洋,等.基于毫米波微振动感知的心

音及心率变异性探测技术与试验研究[J].振动与冲击,2025,44(17):41-47.

- [5]崔凯,刘朝晖,谢友金,等.空间精密运动机构微振动传递特性试验与分析[J].宇航学报,2025,46(7):1446-1455.
  - [6]童园梦,岳建勇,贾京.激光装置基础微振动控制设计及现场试验研究[J].地震工程与工程振动,2025,45(6):30-39.
  - [7]李斌.多自由度低频微振动隔离系统辨识与振动主动控制研究[D].黑龙江:哈尔滨工业大学,2025.
  - [8]彭芳麟,胡静,管靖,等.用 MATLAB 解决线性三自由度系统微振动问题[J].大学物理,2001(11):31-34.
  - [9]林星翰.多自由度微振动控制方法研究[J].中国科技信息,2022(22):109-110.
  - [10]刘瑞金.多自由度微振动的研究[J].淄博学院学报(自然科学与工版),2000(3):4-8.
  - [11]潘孟美.用矩阵方法处理 3 自由度系统的微振动[J].海南师范学院学报(自然科学版),2005(3):233-236.
  - [12]徐丹,萨茹拉.用 Mathematica 求解线性 3 自由度系统微振动问题[J].物理通报,2015(3):35-37.
  - [13]王晓军,杨国军,黄春英.多自由度系统微振动数态的仿真实现研究[J].广东技术师范学院学报,2008(12):1-3.
  - [14]柏宁丰,孙小蕊,冯进军,等.金属电磁带隙波导色散特性分析[J].东南大学学报(自然科学版),2007(5):761-765.
- 作者简介:郑怡,女,甘肃天水,主要从事量子物理和理论物理的仿真模拟研究;\*通讯作者:郑兴荣,男,甘肃天水人,教授,主要从事凝聚态理论物理与新能源、半导体材料计算、仿真的研究。

Viser Technology Pte. Ltd.

公司地址

195 Pearl's Hill Terrace, #02-41, Singapore 168976

官方网站

[www.viserdata.com](http://www.viserdata.com)

