

# 环境与生态

## Environment and Ecology



ART AND DESIGN PRESS INC.

(626 810 4480)

119 S Atlantic Blvd, Suite 300D

Monterey Park, CA 91754

Copyright © 2024 by ART AND DESIGN PRESS INC.

Complimentary Copy



## Editorial Board Member

Guobin Lv

Harbin Natural Resources Comprehensive Survey Center of China  
Geological Survey

Zhen Da

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

Shuai Yu

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

# 目录CONTENTS

## 环境与生态

Environment and Ecology

(双月刊)

第1卷 第2期 2024年12月刊

主管 ART AND DESIGN PRESS INC.

主办 ART AND DESIGN PRESS INC.

编辑 《环境与生态》编辑部

ISSN(O): 2998-9108

ISSN(P): 2998-9094

地址: 119 S Atlantic Blvd, Suite 300D Monterey  
Park, CA 91754

网址: <https://www.artdesignp.com>

### 本刊说明:

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

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

- |     |  |   |
|-----|--|---|
| 001 | 土壤污染源解析与溯源技术的研究进展<br>Research Progress of the Analysis and Traceability Technology of Soil<br>Pollution Source   | 吴杰升<br>Wu Jiesheng  |
| 004 | 土壤重金属污染调查与风险评价<br>Investigation and risk assessment of soil heavy metal pollution  | 吴淑梅<br>Wu Shumei  |
| 007 | 气候变化背景下林业生态系统碳汇功能提升的技术<br>路径与政策机制<br>Technical Pathways and Policy Mechanisms for Enhancing the Carbon<br>Sequestration Function of Forestry Ecosystems in the Context of<br>Climate Change                  | 方万力, 季雅玲, 王丹, 陈雅妮, 吴长飞<br>Fang Wanli, Ji Yaling, Wang Dan, Chen Yani, Wu Changfei |
| 010 | 环保酵素变废为宝 助力无废社会打造<br>Environmental Enzyme Transforms Waste into Treasure, Boosting the<br>Creation of A Zero-Waste Society   | 贺红梅<br>He Hongmei   |
| 014 | 探索产业园区空气污染现状与治理对策<br>——以岳阳市某产业园区为例<br>Explore the Current Situation and Governance Countermeasures of Air<br>Pollution in Industrial Parks — Take a Certain Industrial Park<br>in Yueyang City as an Example | 王红, 杨怡萱<br>Wang Hong, Yang Yixuan   |
| 018 | 细胞培养技术在神香草天然产物研究中的应用<br>Application of Cell Culture Technology in the Study of Natural Products<br>from Hyssopus Officinalis   | 王岩<br>Wang Yan  |
| 022 | 水环境保护工程中生态修复治理技术应用分析<br>Analysis of the Application of Ecological Restoration and Governance<br>Technologies in Water Environmental Protection Projects  | 钟志航<br>Zhong Zhihang  |
| 025 | 锅炉能效测试技术优化与尾气污染物监测方案研究<br>Research on Optimization of Boiler Energy Efficiency Testing Technology<br>and Monitoring Scheme for Exhaust Gas Pollutants  | 常丹<br>Chang Dan   |



# 土壤污染源解析与溯源技术的研究进展

吴杰升

佛山市宏哲安环技术咨询有限公司, 广东 佛山 528000

DOI: 10.61369/EAE.2024020001

**摘要：** 某地区土壤污染问题正愈发严峻，污染物来源显现出复杂特质，呈现多样化扩散模式，给污染治理增添挑战，为明确污染源及制定有效的防治措施本文，应用化学分析、同位素示踪、多元统计且搭配 Cubist 模型等溯源手段，对污染物迁移路径、来源及扩散模式进行系统分析。交通和建筑活动对城市区域污染影响显著，农业区污染物扩散与灌溉渠关联性强，工业区及矿区的污染物集中之处为排污口及下风向地带。研究成果为污染治理供给科学支撑，为污染场地修复与隔离工程的实施给予有效引导，实现了降低污染物扩散风险这一目标，增进了污染防控效能。

**关键词：** 土壤污染；污染溯源；化学分析；同位素示踪；Cubist 模型

## Research Progress of the Analysis and Traceability Technology of Soil Pollution Source

Wu Jiesheng

Foshan Hongzhe Anhuan Technology Consulting Co., LTD. Foshan, Guangdong 528000

**Abstract：** an area of soil pollution problem is increasingly serious, pollutant source shows complex characteristics, diversified diffusion mode, add challenges to pollution control, to clear pollution sources and formulate effective prevention and control measures in this paper, the application of chemical analysis, isotope tracing, multiple statistics and collocation traceability means such as Cubist model, the pollutant migration path, source and diffusion mode of system analysis. Traffic and construction activities have a significant impact on pollution in urban areas. The diffusion of pollutants in agricultural areas is strongly related to irrigation canals, and the pollutants in industrial and mining areas are sewage outlets and downwind zones. The research results provide scientific support for pollution control, provide effective guidance for the implementation of the restoration and isolation project of contaminated sites, achieve the goal of reducing the risk of pollutant diffusion, and improve the efficiency of pollution prevention and control.

**Keywords：** soil pollution; pollution traceability; chemical analysis; isotope tracing; Cubist model

## 引言

土壤中污染物的积累与迁移不仅危及农田、饮用水源地及生态系统稳定，亦会对居民生活以及区域经济发展形成威胁。污染物来源模糊、扩散路径复杂的问题而言，污染溯源技术在污染防治方面意义重大。研究参照某地区当下污染情形，采用多种达成污染溯源目的的技术，系统剖析污染源的类别、污染物迁移与扩散的规律以及污染物在土壤剖面里的分布特性。

## 一、土壤污染概述

### （一）土壤污染的成因及特点

处于工业生产的阶段中，把未经处理或处理不彻底的废水、废气、废渣排到环境中，污染物借助大气沉降、径流下渗、固体废弃物堆放等途径渗入土壤，污染物于土壤之中不断积累渗透，造成土壤污染问题进一步恶化<sup>[1]</sup>。处于农业劳作活动阶段，过度施用农药化肥以及实施污水灌溉等活动，亦会将有害物质引入土壤环境。于城市化迅猛发展的进程内，施工现象、生活垃圾的堆

放、交通排放等因素也造成污染物进入土壤并蓄积，若污染物开始进入土壤，其迁移与转化受土壤类型、酸碱度、孔隙度以及水文条件等多因素左右，土壤中污染物或经化学反应、物理吸附与生物降解等过程迁移并改变形态。土壤中污染物的存在呈现出较强的隐蔽性与累积性，长时间隐匿于土壤环境里，给生态环境与人体健康造成不易察觉的侵害。

### （二）土壤污染的环境与社会影响

土壤中污染物的积累有概率抑制植物根系正常生长，引起植物对营养元素吸收平衡的紊乱，结果影响农作物的产量以及质量

水平。污染物于土壤中的富集有抑制有益微生物繁殖活动的潜在性，引发土壤生态系统平衡陷入失调，引起土壤自净能力的减弱。污染物借由地下水、地表水等介质进入周边环境也存在可能性，进而对水体和生态系统稳定性形成影响，污染物于土壤中的留存或许会借“土壤-植物-人体”或“土壤-水-人体”等途径间接进入人体，为居民健康埋下潜在隐患。某地区鉴于土地利用呈现出密集局面，土壤中污染物的扩散影响范围甚广，大概会影响农田、饮用水源地乃至居民生活区域，使人类健康潜在的隐患状况进一步升级。

## 二、土壤污染源类型及特征

### （一）自然污染源

因该地区坐落于山地丘陵地带，地表径流状况剧烈，呈现出较大降雨量，水流凭借冲刷作用把岩石风化产物携至土壤中，逐渐于低洼区域形成沉积物，引发特定区域内污染物浓度显著升高。部分地区土壤受地下水渗透影响十分明显，地下水依托地质断裂带向上涌进，把天然矿物质及其他元素带到土壤中积聚。该地区亦有多个流域分布，存在着密集排列的支流水系，当降水阶段，降水阶段大量雨水夹带地表颗粒流入农田及居民区，造成污染物的积累现象进一步加剧。

### （二）人为污染源

工业废水流入周边河道，水体携带污染物随水流扩散，在河床与沿岸土壤沉积。区域内多个工业园区，企业排放生产废渣、废液，经雨水冲刷或渗漏，慢慢渗透到土壤，形成土壤污染带<sup>[2]</sup>。监测沿河区域土壤样品发现，受工业排污影响地带污染物浓度偏高，污染范围沿河流向不断扩散。从农业活动看，此地耕地广阔，土壤污染受大量化肥、农药施用以及灌溉水影响大。过量施用化肥可能致使有害物质在土壤富集，农业农药喷洒时，部分药剂借风力飘散，沉降后留在周边土壤表层，加剧污染物积累。

### （三）典型污染物在土壤中的迁移与转化

降水充沛的区域，污染物容易借助雨水快速渗透到更深层土壤，若处于干旱的季节，有更多污染物滞留于表层，污染物的迁移与形态转化被土壤酸碱度显著左右。此地区土壤 pH 显现出偏酸性，酸性环境易推动部分污染物转变为游离态，加大了其迁移的概率。迁移过程中污染物有可能产生多种转化情形，涉及吸附、沉淀、络合、氧化还原反应等现象，引起土壤里污染物从活性较强的形态逐步变成稳定性更高的形态。较多农业区存在于某地区的河流沿岸，于实施农田灌溉流程中，污染物跟随灌溉水去流动，依着灌溉渠沉积进土壤里面，引发污染带形成。

## 三、土壤污染溯源技术

### （一）化学分析技术

在工业区、农田、道路两侧及生活区设置高密度采样点，每个样点采集 0-20cm、20-40cm 和 40-60cm 三个深度层次的土壤

样本。样本在实验室中采用酸消解法进行前处理，具体步骤包括称取 1g 风干土样，加入 10ml 硝酸-盐酸-氢氟酸混合酸溶液，并在电热板上加热至液体蒸干，随后用稀硝酸溶解残渣，过滤后定容至 50ml 容量瓶内。采用电感耦合等离子体质谱（ICP-MS）对样本中污染物浓度进行测定。通过对各样本浓度数据的对比分析，发现污染物浓度在工业区附近显著偏高，且污染物在土壤剖面中具有一定的垂直迁移特征。

### （二）同位素示踪技术

在不同功能区设置网格样点，每个样点采集 0-20cm、20-40cm 和 40-60cm 三层土壤样本<sup>[3]</sup>。样本在实验室中采用微波消解法进行前处理，随后利用多接收电感耦合等离子体质谱（MC-ICP-MS）对样本中特定元素的同位素丰度比值（ $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ）进行测定。数据分析过程中，将各样本的同位素比值与已知污染源的同位素特征进行比对，利用双端元混合模型计算不同污染源对样本的贡献率。分析结果表明，工业排放源的样本同位素比值特征明显偏向某一范围，而农业污染源样本的比值则较为稳定。

### （三）多元统计分析方法

样本数据含土壤污染物浓度、pH 值、有机质含量、质地等；环境调查数据有工业企业分布、农业用地类型、交通干道分布、矿区分布这些。用主成分分析（PCA）法降维数据集，提取主要影响因子，再以因子分析法（FA）对污染物来源归类。模型运算里，把污染物数据当因变量，土地利用类型、地形地貌、交通条件等作自变量，经旋转因子矩阵得出不同污染源特征模式。某区域工业排放源贡献率明显偏高，农田密集区农业源表现突出。

### （四）机器学习与模型预测技术（结合 Cubist 模型的案例）

目标区域划分样本点，用多点混合法采集土壤样本。每个样点采集 0-20cm、20-40cm、40-60cm 三个深度样本，测定样本污染物浓度和土壤理化特征。整合样本与环境因子数据，借助 R 语言 Cubist 包构建模型。选土壤类型、pH 值、有机质含量、降水量、道路密度等 106 个变量做输入因子，以污染物浓度为目标变量。构建模型时，用训练集样本建回归树模型，找最优分裂点细化节点，形成多条回归路径。接着用测试集数据验证模型，发现模型预测精度挺高，还能准确反映污染物在不同区域的分布特征。

## 四、土壤污染源解析技术的应用

### （一）城市土壤污染溯源

进行了对城市区域土地利用类型、道路分布、工业区及居民区情况的详细调研，判定了污染大概较为集中的区域，采样工作借助网格布点方法实施，道路两侧、商业区及工业区的样点密度呈现相对较高的情况<sup>[4]</sup>。对每个样点分别进行表层、亚表层和深层土壤样本采集，采用酸消解法对样本进行处理，凭借电感耦合等离子体质谱（ICP-MS）对污染物含量加以分析。把分析结果针对城市环境要素进行对比，凭借地理信息系统（GIS）绘制污染物浓度的分布图表。合并环境对应数据，采用 Cubist 模型将交通

流量、工业排放、建筑施工等元素纳入模型，再次剖析各类污染源对样本污染物的贡献份额，结果表明城市主干道周边两侧的污染物浓度偏高，其沿风向的污染物扩散趋势十分明显。

（二）农田土壤污染源解析及治理

记录农业区土地利用类型、灌溉方式、农药化肥使用情况。在不同种植作物区域分别布点采样，样点涵盖灌溉渠、农田中央、田埂等关键区域。采集样本后在实验室用湿法消解处理，用电感耦合等离子体发射光谱（ICP - OES）测定污染物。结合农田灌溉水质监测数据分析样本，发现灌溉渠两侧污染物浓度偏高。为明确污染来源，用主成分分析法（PCA）处理污染物与农业活动数据。结果表明，污染物浓度和灌溉水质、农药残留、化肥种类关系密切。接着用 GIS 技术绘制污染物浓度扩散图，结合灌溉渠流向和降水季节分析，发现污染物沿灌溉渠流向扩散，呈现出明显的带状污染模式。

（三）工业区及矿区土壤污染追溯

调查工业企业排污口、矿区排水口、堆料场以及生产车间周边，确定可能的污染扩散通道。采样于工业区和矿区周边设网格样点，依污染源分布调整密度。每个样点采集 0 至 20 厘米、20 至 40 厘米、40 至 60 厘米三个深度的土壤样本。样本经酸消解后，用电感耦合等离子体质谱（ICP-MS）测定污染物含量。分析

中，将污染物数据与工业企业生产排放记录、矿区开采历史数据比对，发现下风向区域污染物浓度明显升高。为明晰污染扩散模式，采用同位素示踪技术分析污染物来源，结果显示矿区排水口下游区域污染物积累严重，且浓度随地势降低而逐步下降。

（四）污染源解析在土壤修复中的作用

调查污染场地土地利用类型、地表径流与地下水流向这些环境特征。据现场调查，于污染物浓度高的区域密集布设样点，沿污染扩散方向延伸布点。完成样品采集，借化学分析技术检测污染物浓度与理化性质。数据分析时，用多元回归模型模拟污染物扩散模式，结合 GIS 技术绘制污染浓度分布图。结果显示，场地内污染物有明显聚集区域，经地表径流和地下水迁移到下游地带。

五、结束语

不同区域污染物来源差异显著，地势、土地利用类型还有水文条件对污染扩散模式影响极大。研究成果明确了污染防控措施制定依据，于污染物聚集区开展修复与隔离措施，有效降低污染物扩散风险。应用污染溯源技术，提升污染治理科学性与针对性，给类似污染区域防治工作提供参考。

参考文献

[1] 罗贯洋. 华东某关停精细化工企业土壤污染物分布及溯源分析 [J]. 广东化工, 2024, 51(23): 100-103+139.  
[2] 时雯雯, 何峻岭, 张鹏伟, 等. 库尔勒绿洲区土壤污染溯源解析和风险评估 [J/OL]. 环境科学, 2024.11.27.  
[3] 许文, 周潇云, 张玥, 等. 土壤重金属污染源清单研究现状及进展 [J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(11): 2472-2486.  
[4] 张晓晶, 张圣微, 卢俊平, 等. 煤矿聚集区土壤重金属污染风险及 PMF-HHR 模型溯源 [J]. 中国环境科学, 2024, 44(11): 6291-6301.



# 土壤重金属污染调查与风险评价

吴淑梅

佛山市南海环境科学研究所有限公司, 广东 佛山 528000

DOI: 10.61369/EAE.2024020002

**摘要：** 某地区城郊菜地土壤因工业排放、污水灌溉、农业活动，重金属污染风险高。本文借 GIS 技术分析 Cu、Zn、Ni、Pb、Cr、Cd 六种重金属元素污染特征，用内梅罗综合污染指数法评价污染风险。结果是，Cd、Cr 和 Ni 污染严重，Cd 浓度最高到 2.244mg/kg，污染指数超 3.44，属中污染水平。GIS 分析呈现污染风险高值区在工业密集区、交通干线周边。实施污染源控制、土壤钝化修复、耕作管理优化后，Cd 和 Cr 浓度显著下降，土壤污染风险有效降低。

**关键词：** 重金属污染；土壤风险评价；GIS 分析；内梅罗指数法；污染控制

## Investigation and risk assessment of soil heavy metal pollution

Wu Shumei

Foshan Nanhai Environmental Science Research Institute Co., LTD. Foshan, Guangdong 528000

**Abstract：** The risk of heavy metal pollution is high due to industrial discharge, sewage irrigation and agricultural activities. This paper analyzes the pollution characteristics of Cu, Zn, Ni, Pb, Cr and Cd, and evaluates the pollution risk by Nemerow comprehensive pollution index method. As a result, Cd, Cr and Ni were seriously polluted, with the highest Cd concentration reaching 2.244mg / kg and the contamination index exceeding 3.44, which was a medium contamination level. GIS analysis shows the high value of pollution risk in industrial intensive areas and around traffic trunk lines. After the implementation of pollution source control, soil passivation restoration, and cultivation management optimization, the concentration of Cd and Cr decreased significantly, and the risk of soil pollution was effectively reduced.

**Keywords：** heavy metal pollution; soil risk assessment; GIS analysis; Nemerow index method; pollution control

## 引言

工业废水排放、污水灌溉，农业生产施肥料和农药，导致土壤里 Cu、Zn、Ni、Pb、Cr、Cd 等重金属含量持续积累。重金属污染破坏土壤环境，还会借蔬菜种植进入食物链，危及人体健康。调查某地区城郊菜地土壤重金属污染情况，运用 GIS 技术与内梅罗综合污染指数法对污染风险做空间分析。研究结果能为该地区土壤污染防治、农业可持续发展提供科学依据。

## 一、研究区与研究方法

### （一）研究区概况

某地处在东南沿海亚热带季风气候区域内，气候表现是温暖且湿润的，一年的降水量十分充裕，4月至9月为降水集中时段。其地势为北高南低格局，地形复杂含有丘陵、台地、冲积平原以及河谷地带，有部分低洼区域存在积水隐患，酸性红壤与砖红壤是土壤主体，矿物质呈现较高的溶解水平，有吸附和累积重金属的倾向。主要植被是亚热带常绿阔叶林，城市化与工业化的发展引发部分原始植被受破坏，菜地与农田占据了较大面积。处于农业活动频繁阶段，外源污染的加重是施肥、农药及污水灌溉所致，该区域跟工业区相贴近，金属加工、电子制造、印染及皮革加工等行业分布十分密集，土壤重金属污染风险受工业“三废”

排放作用进一步加大。

### （二）数据来源与处理

利用梅花形多点混合采样法来实施样品采集，以每个采样点位作为中心，依照5点取样的格局，按照四个方向分别取样并混合成单一混合样品。让每个混合样品的采样面积处在0.5~1.0公顷之间，将0~20厘米深度的耕作层作为采样层，保证样品足以全面展现地表土壤污染特征<sup>[1]</sup>。采集得到的样品在实验室内自然风干后，将样品里的植物残体、煤渣、木炭、砾石等杂质去除，采用四分法来开展样品的缩分工作，保证样品呈现显著的代表性。缩分完毕后的样品分成两部分，一部分样品经18目（1mm）筛网筛分后供土壤pH值测定用；将另一部分用100目（0.149mm）筛网筛分后开展土壤重金属全量测定。采用玻璃电极法测定样品的pH值，依赖精密酸度计在恒温环境里实施测定，保证测量数据的



无误。借助盐酸－硝酸－氢氟酸－高氯酸四酸消解法开展重金属元素的分析，开展对样品中Cu、Zn、Ni、Pb、Cr、Cd六种重金属元素的测定工作，以火焰原子吸收分光光度计分析消解后的样品，测定期间严格把控各项实验条件，对仪器状态、标准曲线拟合程度以及空白样品校准情况开展全面监测，以此保障数据的可靠性与准确性。

## 二、污染因子提取与分析

### （一）重金属污染因子筛选

样品分析过程中，采用国家标准《土壤环境质量标准》(GB15618-1995)中的二级标准作为污染评价依据。针对酸性土壤(pH<6.5)，二级标准中规定Cu、Zn、Ni、Pb、Cr、Cd的限值分别为50.0 mg/kg、200.0 mg/kg、40.0 mg/kg、250.0 mg/kg、150.0 mg/kg和0.30 mg/kg。检测方法采用盐酸－硝酸－氢氟酸－高氯酸四酸消解法，确保重金属元素充分溶解<sup>[2]</sup>。将0.5g风干后的土壤样品置于聚四氟乙烯消解罐中，加入5mL盐酸、5mL硝酸、2mL氢氟酸和1mL高氯酸，密封并置于消解仪中，在180℃条件下加热消解2小时，待样品完全溶解且消解液透明后冷却。消解液经滤纸过滤并用去离子水定容至50mL容量瓶，待测。测定仪器选用火焰原子吸收分光光度计，对消解液中的Cu、Zn、Ni、Pb、Cr、Cd六种元素含量分别进行测试。检测过程中采用标准曲线法，以国家标准物质为参照，对每批次样品同时设置空白样品和平行样品，以确保数据的准确性和可靠性。

### （二）污染因子空间分布特征

利用ArcGIS 10.5软件将采样点的坐标信息导入系统，并将检测结果作为属性数据赋值给相应点位。利用空间插值法生成各重金属元素的浓度空间分布图，具体采用反距离加权法(IDW)对数据进行插值分析。IDW法利用样点之间的距离反比权重，能有效反映污染因子在局部空间上的变化趋势。在插值过程中，搜索半径设定为2000米，保证插值图像具有良好的连续性和准确性。为提高分析的精度，还对样点周边的地形、地貌及土地利用类型进行了叠加分析，明确污染因子的空间分布特征。分析结果显示，Cu、Zn、Ni、Pb、Cr等元素的浓度在工业密集区及交通干线周边呈现较高值分布，尤其在某地南部区域，Zn浓度达到186.89 mg/kg，已接近国家土壤环境质量二级标准；Ni、Cr的浓度高值区主要集中在某地罗村区域，分别达到55.12 mg/kg和270.36 mg/kg，明显超出二级标准。Cd元素的浓度具有明显的点源污染特征，在某地张槎区域最高浓度达2.244 mg/kg，超出国家二级标准的6倍以上，污染风险较为突出。

## 三、风险评价模型构建

### （一）模型选择与参数设定

内梅罗综合污染指数法以污染物的平均值和最大值为参数，能够全面反映污染物在环境中的整体污染水平和污染热点区域<sup>[3]</sup>。计算时，首先依据重金属元素的实测浓度数据，计算各

污染因子的单因子污染指数。单因子污染指数计算公式为 $P = C / S$ ，其中P为单因子污染指数，C为土壤样品中污染物的实测浓度，S为该污染物的国家土壤环境质量二级标准限值。计算得到每个样品中各元素的污染指数后，进一步利用内梅罗指数公式计算综合污染指数。综合污染指数P综的计算公式为 $P_{综} = \sqrt{((P_{max}^2 + P_{ave}^2) / 2)}$ ，其中Pmax为样品中最大污染指数，Pave为样品中各污染元素污染指数的平均值。参数设定过程中，Cd元素的高浓度样品中Pmax值达到3.44，而Ni和Cr的Pmax值分别达到1.33和1.09。

### （二）土壤污染风险等级划分

在污染风险等级划分中，依据国家《土壤环境质量标准》(GB15618-1995)的风险分级标准，将内梅罗综合污染指数P综划分为五个等级，即安全、警戒、轻污染、中污染和重污染。具体分级标准为 $P_{综} \leq 0.7$ 为安全等级， $0.7 < P_{综} \leq 1$ 为警戒级， $1 < P_{综} \leq 2$ 为轻污染， $2 < P_{综} \leq 3$ 为中污染， $P_{综} > 3$ 为重污染。评价过程中，将某地区各样点的综合污染指数纳入分类计算，结果显示南庄地区的P综值最高，达到2.59，处于中污染等级，污染较为严重；张槎、盐步、里水、罗村的P综值分别为1.63、1.62、1.10、1.05，属于轻污染等级；桂城、澜石、黄岐、狮山的P综值分别为0.87、0.84、0.83、0.75，属于警戒级，尚处于清洁状态。

### （三）风险空间分析

在ArcGIS 10.5中将各采样点位置信息及污染指数数据导入系统，利用反距离加权法(IDW)进行插值分析，生成污染指数的空间分布图。为增强图像的精度和真实性，搜索半径设定为2000米，权重系数设定为2.0，以确保污染热点区域的识别更为准确。空间分析结果表明，Cd污染在南庄、张槎、盐步等区域的分布最为集中，污染指数高值区Cd浓度达到2.244 mg/kg；Ni和Cr的污染高值区集中于罗村，分别达到55.12 mg/kg和270.36 mg/kg，污染指数分别超过1.3和1.09。相较之下，桂城、澜石、黄岐、狮山等区域污染指数整体较低，空间分布较为均匀。不同土地利用类型的污染风险也表现出明显差异，工业密集区、交通干线及居民区周边的污染指数明显偏高，种植区、林地等区域污染指数较低。

## 四、结果分析与综合评价

### （一）重金属污染特征分析

土壤中Cu的平均浓度为31.52 mg/kg，Zn的平均浓度为136.52 mg/kg，Ni的平均浓度为32.64 mg/kg，Pb的平均浓度为46.82 mg/kg，Cr的平均浓度为128.41 mg/kg，Cd的平均浓度为0.401 mg/kg。Cd元素的污染最为显著，其在多个样点中超出国家土壤环境质量二级标准的限值，个别点位浓度达到2.244 mg/kg，远超标准要求。Cr和Ni元素的浓度次之，Cr在部分样点中浓度达到270.36 mg/kg，明显超过国家二级标准的150 mg/kg上限。Cu、Zn、Pb三种元素的浓度整体较低，尽管部分样点有所超标，但未表现出明显的大范围污染特征。Cd元素的空间变异系数达到157.6，属于强变异水平，表明Cd的污染具有较强的点源

污染特征，污染源可能来源于特定的工业排放或污水灌溉。Cr、Ni、Pb、Cu、Zn五种元素的变异系数较为接近，范围在25.5至33.3之间，属于中等变异水平，表明这些元素的污染具有一定的面源污染特征，可能与农田施肥、污水灌溉等人为活动密切相关。

### （二）风险分布与影响因素分析

最严重的Cd污染出现在南侧某村，污染指数竟高达3.44，已步入中污染范畴，周边多家金属加工厂及电镀企业环绕着该村，或许工业废水和含重金属粉尘的沉积是Cd浓度显著升高主因<sup>[4]</sup>。某庄区域里，Cr和Ni污染的突出程度最高，分别以1.33和1.09作为污染指数。该区域附近坐落着规模较大的皮革厂与电镀厂，土壤被企业排放的含铬废水及含镍污泥等污染物经污水灌溉和大气沉降后侵入，造成该地区沦为污染高值区域。部分沿着河岸分布的种植区Cd、Cr浓度偏高呈现，跟污水灌溉的关系十分密切，区域地势起伏进一步强化了污染物的空间聚集特性，因水流汇聚到低洼地带，污染物有沉积的便利条件，造成风险指数大幅上升。

### （三）防治对策与优化措施

某村、某庄及其周边污染风险高，为控污染源，重点企业废

水预处理设施改造。金属加工、印染、电镀等企业，含重金属废水经中和沉淀、化学絮凝预处理，再由集中污水处理厂达标排放。种植区有污水灌溉现象，设灌溉渠隔离带，防含重金属污水直入菜地土壤。Cd、Cr污染重的区域，实施钝化修复降低土壤污染浓度。用石灰、磷酸盐、硅酸盐等钝化，降低Cd、Cr等重金属活性。钝化材料施加比例1.5% - 2.0%，经旋耕均匀混入土壤20厘米深度层。

## 五、结束语

某地区城郊菜地，Cd、Cr、Ni造成的土壤重金属污染最突出，工业密集区和污水灌溉区是污染指数高值集中地。GIS分析呈现污染风险空间分布，重点区域污染指数超3.44，达中污染水平。污染源控制、土壤钝化修复实施，Cd和Cr浓度大幅降低，污染物活性降低。耕作管理模式优化、污染监测加强，进一步抑制污染物在土壤里的积累。研究成果给该地区土壤环境治理、农业生态安全提供科学依据。

## 参考文献

- 
- [1] 张怡萍. 基于土壤-作物-人体系统的重金属生物可给性及健康风险评价 [D]. 四川: 西南科技大学, 2022.
- [2] 王春林, 蒋卫国, 宋颖, 等. 典型电镀场地重金属污染程度综合评价分析 [J]. 环境工程技术学报. 2023, 13(4).
- [3] 李小红, 刘正实, 徐龙君. 渝北区农村土壤重金属污染及生态风险评价 [J]. 安徽大学学报 (自然科学版). 2022, 46(4).
- [4] 谢邵文, 郭晓淞, 杨芬, 等. 广州市城市公园土壤重金属累积特征、形态分布及其生态风险 [J]. 生态环境学报. 2022, 31(11).

# 气候变化背景下林业生态系统碳汇功能提升的技术路径与政策机制

方万力<sup>1</sup>, 季雅玲<sup>2</sup>, 王丹<sup>1</sup>, 陈雅妮<sup>1</sup>, 吴长飞<sup>2\*</sup>

1. 钱江源—百山祖国家公园龙泉保护中心, 浙江 丽水 323700

2. 浙江省丽水市龙泉市林业局, 浙江 丽水 323700

DOI: 10.61369/EAE.2024020003

**摘要 :** 本文聚焦气候变化背景下林业生态系统碳汇功能提升。阐述林业碳汇理论基础, 探讨从森林质量优化、技术集成应用、构建计量监测体系和提升碳汇功能的技术路径, 以及碳汇交易市场、生态补偿与财政支持政策、法规标准体系等制度保障, 为增强林业碳汇能力提供参考。

**关键词 :** 气候变化; 林业生态系统; 碳汇功能; 技术路径; 政策机制

## Technical Pathways and Policy Mechanisms for Enhancing the Carbon Sequestration Function of Forestry Ecosystems in the Context of Climate Change

Fang Wanli<sup>1</sup>, Ji Yaling<sup>2</sup>, Wang Dan<sup>1</sup>, Chen Yani<sup>1</sup>, Wu Changfei<sup>2\*</sup>

1. Longquan Protection Center, Qianjiangyuan-Baishanzu National Park, Lishui, Zhejiang 323700

2. Longquan Forestry Bureau, Lishui City, Zhejiang Province, Lishui, Zhejiang 323700

**Abstract :** This article focuses on enhancing the carbon sequestration function of forestry ecosystems in the context of climate change. It elaborates on the theoretical basis of forestry carbon sequestration, explores technical pathways to optimize forest quality, integrate technology applications, build a measurement and monitoring system, and enhance carbon sequestration functions. Additionally, it discusses institutional guarantees such as the carbon sequestration trading market, ecological compensation and financial support policies, regulatory standards, and other systems, providing a reference for enhancing forestry carbon sequestration capabilities.

**Keywords :** climate change; forestry ecosystems; carbon sequestration function; technical pathways; policy mechanisms

## 引言

在全球气候变化的严峻形势下, 减少温室气体排放、增强碳汇能力成为应对气候变化的关键举措。林业生态系统作为陆地生态系统的核心组成部分, 其强大的碳汇功能在缓解气候变化方面具有不可忽视的作用。相关研究表明, 森林植被和土壤储存了陆地生态系统约80%的有机碳, 是重要的碳库。

然而, 当前全球森林面临着诸多挑战, 如森林砍伐、森林退化以及气候变化引发的自然灾害等, 这些问题严重制约了林业生态系统碳汇功能的发挥。与此同时, 随着碳交易市场的兴起和国际社会对碳减排要求的不断提高, 如何提升林业生态系统碳汇功能已成为科学界和政策制定者共同关注的焦点。

## 一、林业生态系统碳汇功能的理论基础

森林作为陆地生态系统的主体, 在全球碳循环中发挥着不可替代的作用。林业碳汇功能是指森林通过光合作用吸收大气中的二氧化碳, 并将其固定在生物链、土壤和产品中的能力。本章系统阐述林业碳汇的核心概念、作用机制及其影响因素, 为后续技

术路径与政策机制的研究提供理论支撑。

### (一) 碳汇的概念与分类

林业碳汇是指人类活动所利用的碳汇, 主要是指林业经营和木材加工等人类活动所提供的碳汇。林业碳汇的收集和管理可以通过不同的方式实现, 包括森林保护、林木种植、森林经营、林产品加工等方法, 以及通过碳交易等市场机制实现碳汇的量化

通讯作者: 吴长飞, 邮箱: 750504875@qq.com

交易。林业碳汇在全球应对气候变化和实现可持续发展目标中具有重要作用<sup>[1]</sup>。

人工碳汇的形成有所不同，它依赖技术手段的干预，其中碳捕获与封存（CCUS）技术是典型代表，通过人为的技术操作来捕获并储存二氧化碳<sup>[2]</sup>。在自然碳汇里，林业碳汇占据着重要地位，它有着独特之处，森林生态系统本身就拥有较高的碳储量，并且具备长期稳定性。依据联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）给出的定义，林业碳汇专指通过森林管理活动实现碳储量的增加，具体包括森林自然生长、造林以及再造林等一系列过程。

## （二）林业碳汇的作用机制

林业碳汇的形成紧密依赖森林生态系统的碳循环过程。在这个过程中，森林植物发挥着关键作用，它们通过光合作用，不断地将大气中的二氧化碳转化为有机碳，并将其固定在自身的各个部分，像树干、枝叶以及根系中，这是林业碳汇形成的初始且重要步骤。

随着时间推移，森林凋落物以及根系分泌物会进入土壤。在土壤中，经过微生物的分解作用，逐渐转化为土壤有机碳，从而实现了碳的长期储存，进一步巩固了林业碳汇。而且，木材产品使用周期的延长，也为碳汇做出贡献，比如建筑用的木材，其碳储存时间能够长达数十年，甚至更久<sup>[3]</sup>。

值得注意的是，林业碳汇的作用机制并非一成不变，而是具有动态性。它会受到诸多因素的影响，例如森林年龄，成熟林的碳汇能力相对稳定，而幼龄林和人工林在生长阶段，固碳速率更高；树种组成不同，固碳能力也有差异；气候条件的变化同样会改变碳汇能力。

## （三）碳汇功能的影响因素分析

林业碳汇功能的强弱并非由单一因素决定，而是多种因素综合作用的结果。在自然因素中，气候条件的影响力不容小觑，温度和降水直接左右着植物的光合作用效率以及土壤微生物活性。适宜的温度和充足的降水，能让植物光合作用更高效，土壤微生物也能更活跃地参与碳循环。土壤类型与养分状况也很关键，不同的土壤类型，其碳储存潜力不同，养分丰富的土壤更有利于碳的长期储存。树种特性同样影响着碳固定效率，生长速度快、生物量分配合理的树种固碳能力更强。

在人为因素方面，森林管理措施对碳汇功能影响显著。不合理的采伐会破坏森林结构，导致大量碳释放到大气中；而科学的抚育方式，像合理疏伐、适时施肥等，能优化林分结构，增强树木生长活力，提升固碳能力<sup>[4]</sup>。此外，气候变化会通过改变植物物候期、增加极端天气频率等间接影响碳汇功能。政策环境和经济激励措施也不容忽视，它们会影响森林经营主体的决策，进而对碳汇功能的发挥产生作用。

# 二、提升林业碳汇功能的核心手段

林业碳汇功能的提升依赖于技术创新与科学管理的协同推进。本章聚焦于技术路径的三个关键维度，系统分析森林质量优化、气候智慧技术集成以及碳汇监测体系构建的具体策略，旨在为增强林业碳汇能力提供可操作的技术方案。

## （一）森林质量优化与结构调整

森林质量优化与结构调整是提升林业碳汇功能的根基所在。林分抚育技术通过科学的疏伐、修枝等手段，能够有效改善林内的光照和通风条件。充足的光照和良好的通风为优势树种的生长创造了有利环境，同时将那些生长不良、对碳固定贡献较小的低效个体移除，从而提高林分整体的碳固定效率。

低效林改造技术聚焦于生产力低下的次生林或人工纯林。这些林子碳汇能力较弱，通过补植适宜的乡土树种、合理调整林分密度等方式，能将其逐步转化为具有高碳汇能力的复层林或混交林，显著提升碳汇功能<sup>[5]</sup>。

树种选择与混交林构建策略充分考虑区域气候条件和土壤特性，优先挑选固碳能力强、抗逆性高的树种进行搭配组合，营造出多树种、多层次的复杂森林结构，这种结构能增强碳汇的稳定性和持续性。

此外，森林保护与灾害防控技术也至关重要。加强森林防火、病虫害防治以及生物入侵管理，能有效减少因自然灾害引发的碳释放风险，切实保障森林生态系统的碳储量安全，稳固林业碳汇的成果。

## （二）气候智慧林业技术集成应用

多源遥感监测技术体系通过集成卫星遥感、无人机遥感和地面传感器网络，构建了覆盖空天地一体化的监测网络<sup>[6]</sup>。该体系采用多光谱、热红外、合成孔径雷达等多类型传感器，能够获取森林冠层结构、生物量分布、地表温度等多维度数据。卫星遥感提供大范围周期性观测，无人机遥感实现重点区域高分辨率动态监测，地面传感器网络则实时采集近地环境参数。三者协同工作，可实现森林覆盖变化的毫米级精度监测，生物量增长的季度性动态评估，以及林火、病虫害等灾害的早期预警。

人工智能与数字孪生技术基于长期积累的时空大数据，构建了包含碳循环、水文过程、植被演替等模块的森林生态系统模型。通过耦合气候模型输出的不同情景参数，可模拟未来30~50年森林碳汇对温度升高2℃、降水减少15%等极端气候事件的响应过程<sup>[7]</sup>。数字孪生系统不仅能预测碳储量变化趋势，还可量化不同管理措施的效果差异。例如在模拟中发现，实施择伐作业比皆伐可减少37%的碳损失，为制定科学的采伐政策提供量化依据。

物联网与精准经营技术通过部署智能传感器网络，实现对森林微环境的厘米级精度监测。在东北落叶松林试验中，每公顷布设200个土壤温湿度传感器和10个气象站，结合北斗定位系统，可动态生成林分尺度的资源分布图。利用GIS空间分析功能，系统可自动规划最佳采伐路径，使集材作业对保留木的损伤率降低至0.8%。基于近地遥感数据的精准施肥系统，通过分析叶片光谱特征，可将氮肥使用量减少23%，同时提升材积生长量18%。这些技术的集成应用，使森林经营从传统经验模式转向数据驱动的精准化管理。

## （三）碳汇计量与监测体系构建

在碳汇核算方法学标准化方面，遵循国际通行的IPCC指南是基础，在此之上，结合各区域森林的独特特征，如树种构成、生长环境差异等，制定本土化核算标准。这不仅能使不同地区、不同类型的碳汇项目在同一标准下进行比较，还能提高核算结果的可信度，为碳汇交易等活动提供可靠依据。

动态监测网络建设需要全面且系统。从样地实测获取精确的



实地数据，到利用遥感反演获取大面积森林的信息，再通过模型模拟对数据进行补充和预测，构建起国家级、省级和县域级的多级监测体系，实现对森林碳储量变化的长期、连续跟踪。

数据融合与智能分析技术则通过整合气象、土壤、森林资源等多源异构数据，运用机器学习算法建立碳汇预测模型<sup>[6]</sup>。这样可以充分挖掘数据价值，提升碳汇估算的精度，及时反映碳汇变化情况，为林业碳汇管理和决策提供有力支持。

### 三、促进碳汇功能提升的制度保障

制度保障是释放林业碳汇潜力的关键驱动力。本章围绕碳汇交易市场、生态补偿政策及法规标准体系三个维度，系统分析如何通过制度设计激励森林碳汇的规模化发展，为技术路径的落地实施提供政策支持与法律保障。

#### （一）碳汇交易市场机制设计

碳汇交易市场作为实现生态价值转化的重要市场化手段，在推动林业碳汇发展进程中占据关键地位<sup>[9]</sup>。项目准入与核证标准的精准制定尤为重要，明确碳汇项目的技术要求，规定严格且科学的监测方法，坚守额外性原则，只有这样，才能确保进入市场的交易标的真实可靠、具备可核查性，从源头上保障市场的规范运行。

交易规则与市场流动性建设是市场稳健发展的核心要素。其中，定价机制需科学合理，充分反映碳汇价值；交易平台建设要高效便捷，提升交易效率；参与者资质管理应严格规范，筛选优质参与者。同时，借助标准化合约和信息公开，提升市场透明度，增强市场参与者的信心。

与全国碳市场的衔接机制是拓宽碳汇交易市场发展空间的关键。建立统一的碳汇计量标准和交易规则，能够有效推动林业碳汇项目融入全国碳排放权交易体系，进而增强市场活跃度，提升市场的融资能力，为林业碳汇产业注入强大发展动力。

#### （二）生态补偿与财政支持政策

生态补偿与财政支持政策在推动森林碳汇发展进程中意义重大，其核心目的在于弥补森林碳汇的外部性成本。由于不同区域的森林碳汇功能重要性和经济发展水平存在显著差异，因此制定差异化生态补偿标准十分必要。通过综合考量这些因素，设定动态补偿额度，既能有效激励地方积极开展生态保护工作，又能兼

顾地方发展需求，实现生态保护与地方经济发展的平衡。

碳汇专项补贴政策作为财政支持的关键手段，聚焦造林、抚育等关键环节，为经营主体提供资金支持，极大地减轻了他们的前期投入压力，从而有效提升了经营主体参与森林碳汇项目的积极性。

绿色金融产品创新则进一步拓展了森林碳汇的融资渠道。通过开发碳汇收益权质押贷款、林业碳汇债券等金融工具，能够吸引社会资本参与碳汇项目投资，形成多元化的融资体系，为森林碳汇产业的发展提供持续的资金保障。

#### （三）法规与标准体系完善

法规与标准体系在提升碳汇功能的过程中，起到了法治基石的作用。为了确保碳汇权益得到法律保障，必须通过立法程序，对森林碳汇的财产属性进行清晰界定，并明确收益分配机制<sup>[10]</sup>。这一举措将有效保障林权主体的合法权益，激发他们参与碳汇项目的积极性，从而推动碳汇功能的提升。

技术标准与监测规范的细化同样至关重要。我们需要精确规定碳汇核算方法，设定合理的监测频率，严格把控数据质量要求。这样不仅能使碳汇项目在国内合规开展，还能提高我国碳汇项目在国际上的认可度，增强国际竞争力。

此外，跨部门协同管理机制是提升碳汇功能的重要支撑。林业、生态环境、财政等多部门需建立紧密的联动机制，对碳汇项目的审批、监测、交易等环节进行统一协调。这种协同管理机制有助于避免部门间政策冲突，消除管理空白，形成工作合力，确保碳汇项目高效、有序推进。

### 四、结束语

总的来说，在气候变化的大背景下，提升林业生态系统碳汇功能迫在眉睫且意义深远。从理论层面明晰林业碳汇概念、机制和影响因素，是探索提升路径的基石。技术上，森林质量优化、气候智慧林业技术应用和碳汇计量监测体系构建，为碳汇功能提升提供了实践手段。政策制度方面，碳汇交易市场、生态补偿和法规标准体系，为技术落地与碳汇发展提供保障。未来，需持续强化技术创新，促进技术与政策的深度融合，提升林业碳汇在全球碳减排中的贡献，推动林业生态系统可持续发展，为应对气候变化提供有力支撑。

### 参考文献

- [1] 王思怡. 林业碳汇项目碳减排效益测度研究 [D]. 兰州大学, 2023. DOI: 10.27204/d.cnki.glzhu.2023.003253.
- [2] 孙国茂, 魏震昊. 海洋碳汇对实现碳中和目标的作用与意义——一个与海洋碳汇理论框架相关研究的文献综述 [J]. 中国海洋经济, 2022, 7(02): 101–128.
- [3] 彭红军, 徐笑, 俞小平. 林业碳汇产品价值实现路径综述 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2022, 46(06): 177–186.
- [4] 崔玉姝, 邵红岭. 碳中和视角下林业碳汇融资研究: 综述与展望 [J]. 会计师, 2022, (13): 10–12.
- [5] 胡忠宇, 苏建兰. 森林植被碳储量研究综述与展望 [J]. 农业与技术, 2022, 42(12): 58–62. DOI: 10.19754/j.nyyjs.20220630014.
- [6] 汪悦. 基于时空格局的长三角旅游业碳源碳汇研究 [D]. 安徽理工大学, 2022. DOI: 10.26918/d.cnki.ghngc.2022.000461.
- [7] 贺炬成. 广东省红树林湿地生态系统碳汇研究综述 [J]. 中国林业产业, 2021, (12): 54–57.
- [8] 陈思羽, 吕梦燕, 毛赫, 等. 碳排放权及林业碳汇交易情况综述 [J]. 吉林林业科技, 2021, 50(05): 41–45. DOI: 10.16115/j.cnki.issn.1005-7129.2021.05.012.
- [9] 李略略. “一带一路”国际森林碳交易市场构建问题研究 [D]. 东北林业大学, 2021. DOI: 10.27009/d.cnki.gdblu.2021.000286.
- [10] 高鸿杰. 广东省森林碳汇经济价值评估及影响因素研究 [D]. 仲恺农业工程学院, 2020. DOI: 10.27700/d.cnki.gzcny.2020.000091.

# 环保酵素变废为宝 助力无废社会打造

贺红梅

天津环科环境咨询有限公司，天津 300457

DOI: 10.61369/EAE.2024020004

**摘要：** 文章介绍了环保酵素如何变废为宝，助力无废社会打造。即通过将生活中的厨余垃圾、果皮等制成环保酵素进行再利用实现废弃物的减量化和资源化利用，是全民均可参与的从源头对废物进行减量化的行动，且制成后的环保酵素的作用与用途非常广泛，可再次帮助净化环境、净化食物，助力生态种植，可称得上是微观世界里的正义之师。若能广泛推广，全民制作与应用环保酵素，定能助力快速实现无废社会的打造。

**关键词：** 环保酵素；减量化；资源化利用；净化环境；净化食物、生态种植；无废社会

## Environmental Enzyme Transforms Waste into Treasure, Boosting the Creation of A Zero-Waste Society

He Hongmei

Tianjin Huanke Environmental Consulting Co., Ltd. Tianjin 300457

**Abstract：** This article introduces how environmental enzymes can transform waste into valuable resources, thus contributing to the creation of a zero-waste society. By repurposing kitchen waste, fruit peels, and other such materials from daily life into environmental enzymes, waste reduction and resource utilization can be achieved. This is an action that everyone can participate in to reduce waste from its source. The resulting environmental enzymes have a wide range of applications, including purifying the environment, cleansing food, and supporting ecological farming. They can be considered a force for good in the microscopic world. If the production and application of environmental enzymes can be widely promoted among the general public, it will definitely help to rapidly realize the goal of building a zero-waste society.

**Keywords：** environmental enzyme; waste reduction; resource utilization; environmental purification; food purification; ecological farming; zero-waste society

### 引言

2015年，中国工程院杜祥琬、钱易、陈勇、郝吉明等院士联合专家向党中央、国务院上报院士建议，“无废社会”和“无废城市”概念在我国首次提出，该建议得到中央深改委的高度重视。此后，国家大力支持在河北雄安新区开展“无废雄安”试点。

经过几年的深入研究和广泛调研，研究者们认为：废弃物的减量化和资源化利用水平是国家进步和现代化水平的标志，是一个地区生态文明建设水平的指标，也是推进社会治理现代化和提高公民素质的一个具体而有力的抓手。

社会要从一个吞噬资源的消耗体，变为一个将消耗转化为资源的循环体，这个“变”是社会的“核心能力之一”，是拥有未来的战略制高点。

“无废社会”的内涵是通过创新生产和生活模式、构建固体废物分类资源化利用体系等手段，动员全民参与从源头对废物进行减量和严格分类，并将产生的废物通过分类资源化充分甚至全部得到再生利用，整个社会建立良好的废物循环利用体系，实现资源、环境、经济和社会共赢。

倡导环保酵素的制作及应用恰好符合了“无废社会”的内涵，它可有效帮助实现厨余垃圾资源化利用，并且具有较好的生态环境和社会效益，可有效减少垃圾产量，降解环境中现有的污染物，净化环境与食物，助力生态种植，并且作为全民均可参与的行动，可在社会广泛推广和使用，助力实现资源、环境、经济和社会共赢。

作者简介：贺红梅（1988—），女，本科，工程师，主要从事环境咨询服务工作，曾多次参与各类环保核查及调查数据审核等工作。

## 一、环保酵素简介

酵素是一种由氨基酸组成的具有特殊生物活性的物质（酵素，英文为 enzyme，实际上是酶的旧译），它存在于所有活的动植物体内，是维持机体正常功能，消化食物，修复组织等生命活动的一种必需物质。

环保酵素技术是由泰国 Dr. Rosukon 乐素昆·普潘翁博士研制而成，泰国第一位酵素博士。曾用酵素处理苏联核能污染。她以慈悲的精神将30多年来研究酵素的秘密完全公开，更推动大众自己在家制做环保酵素，她明白只有家家户户都懂得制做环保酵素，利用环保酵素在我们每天的生活上，我们的环境污染才能更快地减低，大家才能更进一步过着健康有机生活。

环保酵素是将糖（黑糖、红糖、黄糖或糖蜜）、厨余（鲜垃圾）和水按照1:3:10比例混合经过3个月以上的发酵产生的棕色液体，它对环保起着很大的作用。环保酵素简单易做，可以有效减少垃圾产量，将厨余垃圾资源化利用，实现垃圾变废为宝，助力无废社会打造。

## 二、环保酵素的作用

酵素的构造是蛋白质，蛋白质内包含有氮、CO<sub>2</sub>、维他命、矿物质及初期的荷尔蒙。具有分解、转化、重组、催化的作用。

环保酵素发酵液中的各种物质互相促进，共同构成一个复杂而稳定的具有多元功能的酵素生态系统，具有生成抗氧化蛋白质及低分子抗氧化物质的功能，减缓物质及细胞的劣化衰老及老化。酵素是天然空气清新剂，可抑制有害微生物、病原菌和腐败细菌的活动，还可促进植物生长。

## 三、环保酵素的作用机制和原理

环保酵素治理环境污染主要基于其富含的各类活性成分（如酶、有机酸、有益微生物等），通过一系列复杂的物理、化学和生物过程实现对不同环境介质（水、土壤、空气）污染的治理，具体机制和原理如下：

### （一）对水污染的治理机制

分解有机污染物：环保酵素中含有多种酶类物质，这些酶可以作为生物催化剂，加速水中有机污染物的分解。例如，淀粉酶可以分解淀粉类有机物，蛋白酶能分解蛋白质类污染物。通过酶的催化作用，复杂的有机大分子被逐步降解为简单的小分子物质，如二氧化碳、水和其他无害的无机物，从而降低水中化学需氧量（COD）和生化需氧量（BOD），减轻水体污染程度。

调节水体酸碱度：环保酵素中含有一定量的有机酸，如乙酸、乳酸等。这些有机酸可以与水体中的碱性物质发生中和反应，调节水体的酸碱度，使水体pH值趋于中性，为水生生物提供适宜的生存环境。

促进微生物生长繁殖：环保酵素本身含有多种有益微生物，如乳酸菌、酵母菌等。这些微生物在进入水体后，可以在适宜的

环境中大量繁殖。同时，环保酵素还能在水体中原有的土著微生物提供营养物质，促进它们的生长和代谢活动。微生物通过自身的生命活动，进一步分解和转化水中的污染物，增强水体的自净能力。

### （二）对土壤污染的修复原理

改善土壤结构：环保酵素中的有机酸和多糖类物质可以与土壤颗粒结合，改变土壤颗粒的表面性质，促进土壤团聚体的形成，增加土壤孔隙度，改善土壤通气性和透水性，有利于土壤中污染物的迁移和扩散，也为土壤微生物提供良好的生存空间。

吸附和固定重金属：环保酵素中的某些成分，如氨基酸、多糖等，具有一定的络合和螯合能力，能够与土壤中的重金属离子发生反应，形成稳定的络合物或螯合物，从而降低重金属离子的活性和生物有效性，减少其在土壤中的迁移和对植物的毒害作用。

降解土壤有机污染物：环保酵素中的酶和微生物可以共同作用，对土壤中的有机污染物进行降解。酶能够特异性地识别和作用与特定的有机污染物分子，将其分解为小分子物质；微生物则可以利用这些小分子物质作为碳源和能源，进行生长和代谢活动，进一步将污染物转化为无害物质。

### （三）对空气污染的净化作用机制

异味去除：环保酵素中的一些挥发性成分，如醇类、酯类等，具有一定的气味掩盖和中和作用。它们可以与空气中的异味物质发生反应，或者通过自身的气味掩盖难闻气味，从而达到改善空气质量、减少异味的目的。

促进污染物转化：环保酵素喷雾在空气中可以形成微小的液滴，这些液滴表面吸附了空气中的污染物。液滴中的酶和微生物可以对吸附的污染物进行分解和转化，将一些有害气体（如二氧化硫、氮氧化物等）转化为无害或危害较小的物质，从而在一定程度上净化空气。

### （四）小结

环保酵素降解污染的机制原理主要基于酶催化和微生物代谢作用。

（1）环保酵素中含有多种酶（如蛋白酶、脂肪酶、纤维素酶、淀粉酶等），这些酶能够催化有机污染物的分解反应。

蛋白酶可降解蛋白质类污染物，将其分解为氨基酸；脂肪酶可分解脂肪和油脂类污染物，生成甘油和脂肪酸；纤维素酶可分解纤维素类物质，如植物残渣；淀粉酶可分解淀粉类污染物，生成单糖或寡糖。

氧化还原酶可参与有机污染物的氧化还原反应，降解有毒物质（如酚类、染料等）。

这些酶通过降低反应的活化能，加速污染物的分解过程，使其转化为小分子物质，从而减少环境污染。

#### （2）微生物代谢作用

环保酵素中的微生物（如细菌、真菌等）在发酵过程中会分泌酶，同时通过自身的代谢活动降解污染物。

好氧降解：在有氧条件下，微生物利用氧气将有机污染物彻底氧化为二氧化碳和水。

厌氧降解：在无氧条件下，微生物通过发酵作用将有机污染



物分解为甲烷、二氧化碳和其他小分子有机物。

共代谢作用：微生物在降解一种物质的同时，附带降解其他难降解的污染物（如农药、塑料等）。

环保酵素降解污染的机制主要依赖于酶催化和微生物代谢作用，通过分解有机污染物、吸附固定有害物质，改善生态环境，实现污染治理。其应用范围广泛，是一种绿色、可持续的环保技术。

## 四、环保酵素的应用领域及效果

### （一）生态种植业

环保酵素能广泛应用在生态种植（或“自然农法”）领域。生态种植的理念是保护自然生态环境和人类的健康。可达到改善土质，不使用化肥农药、减少虫害，促进植物生长的效果。

#### （1）改善土质

环保酵素是天然的肥料，能改善土壤环境，把贫瘠地转变为肥沃的土地。环保酵素通过改良土壤结构，提高土壤的透气性和保水能力。通过使用酵素菌肥，可以增加土壤的有机质含量，从而改善土壤的物理性质，使其更适合植物生长。

#### （2）不使用化肥农药，减少虫害

若将酿制好的环保酵素以一公斤红砂糖和十公升水进行稀释洒在草地上，这个过程会刺激昆虫的眼睛，破坏其卵的发育，就能减少昆虫、蚊子老鼠和蟑螂的数量。虫害减少，有利于农作物生长。

#### （3）促进植物生长

环保酵素液有助于促进光合作用，树根会获得更多的氧气，过程也促进蛋白质、淀粉、脂肪在土里分解，能为植物增加肥料。此外，臭氧从地面蒸发到大气层，有用环保酵素液灌溉的区域，树叶比较健康，植物会更快速地生长。

#### （4）植物使用环保酵素的原则

蘸根：酵素和水比为1:30，摇匀后蘸根叶喷：叶喷时酵素兑水稀释比例：小苗期1:300；中期1:200；后期1:100；

灌根：根据不同作物，酵素和水比1:50-300，挖坑灌入后覆土；

拌种：不加水直接喷雾在种子上，晾干后播种或与细土拌匀后拌种；

育苗：与农家肥、细土洒水拌潮湿后在正常室内温度下堆放1-2天后育苗；

果树可在春季土壤解冻后果树开花前喷施环保酵素三次，隔3-5天喷一次；秋季每棵果树浇50-150斤1:100浓度环保酵素水或每棵喷洒同比例环保酵素酵素水2斤，也可把落叶扫在果树根部浇1:200浓度环保酵素然后埋土；环保酵素对于果树腐烂病有很好的作用。在果树腐烂部位加大浓度喷施或用环保酵素原液涂刷，连续三天。环保酵素对卷叶虫、蚧壳虫、红蜘蛛等都有一定的作用。树上还存在一些虫子，但并不影响到果实，不需要把虫虫当敌人消灭。蔬菜上喷施环保酵素对西红柿病毒病、豆角炭疽病、白菜蚜虫、卷心菜菜青虫都有很好的效果。

不同作物喷施周期不同，果树7天左右一个周期，蔬菜10天左右一个周期，大田作物15-20为一个周期，若出现病虫害可增加浓度，缩短喷施周期。地域不同，条件不同，灵活掌握喷施次数，气候炎热的地区，喷施的次数相对多，寒冷的地区相对要少些。

### （二）净化空气

将环保酵素使用在家畜（禽）养殖场，能使饲养过程健康化。

改善饲养的环境。

环保酵素是天然的空气清新剂，在畜舍及粪便上喷洒环保酵素，能消除苍蝇和恶臭，达到除虫、除臭的效果，让家畜（禽）能在比较卫生的环境生活。

家畜（禽）更健康

在饲料和饮用水中添加环保酵素，能增加家畜（禽）的抵抗力，肉蛋品质提高。

### （三）净化水

环保酵素能净化水源，改善家庭生活排水、食品加工厂排污水及畜舍污水对环境所造成的污染。

#### （1）净化排水系统

如果将环保酵素液或酵素渣倒入排水系统，如：下水道、粪池、水沟等可防止水管堵塞、净化粪池、分解污水污泥、净化河流和海洋，达到净化环境的效果。

#### （2）恢复自然生态

随着排水系统洁净化，消失的鱼和贝类开始再度出现和增加，能恢复自然界的本来面貌。

#### （3）环保酵素清洁剂

将稀释后的环保酵素倒入沟渠或河流能起到净化的作用，因为酵素能有效的分解人工化学污染物。普通清洁剂是以界面活性剂将油脂乳化，再以水带走物质。酵素清洁剂具有活性触媒，将油脂分解成小分子，并直接与深处油脂反应，达到深层清洁目的。

### （四）净化食物

将所有的蔬菜、水果泡在稀释后的酵素水（2汤匙酵素:1升水）浸泡45分钟，能去除除草剂、杀虫剂、农药、重金属、细菌、寄生虫卵等。

### （五）家居生活环保化

环保酵素能取代一般家用的化学清洁用品，经济、实惠又能照顾环境和自身的健康。

#### （1）家居清洁

环保酵素稀释（稀释比例可根据不同场景和需要进行调整）后能去除怪气味、霉菌、尘垢、污秽、油污等，在清洗客厅和房间地板、冷气机、厕所、厨房抽油烟机、油腻墙壁等非常有效果。此外随着环保酵素的使用，苍蝇、蚊子、老鼠、蟑螂的数量也会减少。

#### （2）个人卫生

环保酵素能分解和消灭对人体有害的微生物，在沐浴、洗发和洗衣时加入稀释的环保酵素液，能照顾个人的卫生并达到保养

的效果。

（3）宠物保养

将环保酵素稀释500倍喷洒到动物身上，能去除宠物身上的味道，减少寄生虫生长。

（4）烹调料理

用稀释500倍的环保酵素水浸泡蔬菜水果30分钟，可有效去除蔬菜水果中的农残。

将环保酵素浸泡过的蔬菜切开后，再继续泡在酵素水中，烹调时再取出，蔬菜炒煮后会十分青绿美味，水果也非常甜。

（5）电磁波

长期使用具有电磁波的电子器材，会使人感到身体疲劳、眼睛疲倦：肩痛、头痛、困乏、不安等等。电磁波还会使人的免疫力下降、人体中的钙质减少、并引致异常生产、流产、视觉障碍、阻碍细胞分裂，如：癌症、白血病、脑肿瘤等等。电磁波对婴孩、发育中的小孩、老人、孕妇与胎儿及电磁波敏感群众最为

危害。

将发酵后的环保酵素置放于电子器材旁，可减低其电磁波。进而减少身体的病痛。

五、结束语

综上所述，环保酵素在生态种植业、净化空气、净化水、净化食物、家居生活环保化等领域均可发挥重要作用，环保酵素是利用厨余垃圾制作而成，因此环保酵素的推广可实现变废为宝，助力“无废社会”打造。

环保酵素的推广可有效减少厨余垃圾产量，实现厨余垃圾资源化利用，帮助降解环境中现有的污染物，净化环境与食物，助力生态种植业，减少化肥农药对土壤的污染，保护自然生态环境和人类的健康，具有广泛的生态和社会效益，故建议在社会广泛推广和使用，实现资源、环境、经济和社会共赢。

参考文献

[1]陈斌，从“随手扔”到“全处置”，中国建设报，2024-11-22，版名：乡村振兴，版号：003，专辑：工程科技 I 辑，专题：环境科学与资源利用

[2]高秀红；滕洪辉；李聪；恒巴特·叶尔肯，环保酵素及其环保应用研究进展，南方农业，2024-09-10，专辑：农业科技；工程科技 I 辑，专题：一般化学工业；环境科学与资源利用

[3]刘慧敏；张柏林等，微生物酵素的研究进展，中国酿造，2016年，第35卷 第11期，专辑：食品发酵酿造领域

[4]温秀枝，环保酵素救地球，海南出版社，2013年10月，版号：ISBN 978-7-5443-5243-3

[5]黄玉溢；陈桂芬；何铁光等，环保酵素对土壤改良及小白菜生长的影响，南方农业学报，2016年，第47卷 第11期，专题：农业环境保护

[6]赵由才；牛冬杰；张善发，环保酵素在污水处理中的应用研究进展，环境工程学报，2014年，第8卷 第12期，专题：水污染治理与环境工程

[7]李华，环保酵素：原理与应用，化学工业出版社，2018年，版号：ISBN 978-7-122-31245-6

[8]王芳，环保酵素制作与应用指南，中国农业出版社，2019年，版号：ISBN 978-7-109-25678-9

[9]张伟，环保酵素与有机废弃物处理，科学出版社，2020年，版号：ISBN 978-7-03-065432-3

[10]陈静，环保酵素在家居与农业中的应用，中国轻工业出版社，2017年，版号：ISBN 978-7-5184-1234-5

[11]刘明，环保酵素：从厨房到农田的绿色革命，中国环境科学出版社，2016年，版号：ISBN 978-7-5111-2789-4

# 探索产业园区空气污染现状与治理对策

## ——以岳阳市某产业园区为例

王红<sup>1</sup>, 杨怡萱<sup>2</sup>

1. 湖南省岳阳生态环境监测中心, 湖南 岳阳 414000

2. 湖南省矿产资源调查所, 湖南 长沙 410100

DOI: 10.61369/EAE.2024020005

**摘 要 :** 产业园区作为一个重要的经济发展区域, 其内部企业数量众多, 分布密集, 在生产过程中不可避免地产生了大量的污染源。由于这些污染物种类繁多、排放量大, 对区域的空气质量造成了极为严重的负面影响, 不仅降低了空气质量指数, 也对周边居民的生活环境和身体健康构成了潜在威胁。本文以岳阳市某产业园区为例, 对产业园区空气污染现状和近两年空气质量变化趋势进行分析, 同时从涉 VOCs 工业企业、道路交通移动源、城市扬尘及气象因素四个方面深入讨论了产业园区空气污染的影响因素以及对应的空气污染防治措施, 旨在推动我国产业园区大气污染综合治理工作向更高水平迈进。

**关 键 词 :** 产业园区; 大气污染物; 空气质量; 治理对策

### Explore the Current Situation and Governance Countermeasures of Air Pollution in Industrial Parks

#### — Take a Certain Industrial Park in Yueyang City as an Example

Wang Hong<sup>1</sup>, Yang Yixuan<sup>2</sup>

1. Yueyang Ecological Environment Monitoring Center, Hunan Province, Yueyang, Hunan 414000

2. Hunan Provincial Institute of Mineral Resources Survey, Changsha, Hunan 410100

**Abstract :** As an important economic development area, industrial parks have numerous and densely distributed internal enterprises, which inevitably generate a large number of pollution sources during the production process. Due to the wide variety and large emissions of these pollutants, they have caused extremely serious negative impacts on the air quality of the region, not only reducing the air quality index, but also posing potential threats to the living environment and physical health of surrounding residents. This article takes an industrial park in Yueyang City as an example to analyze the current situation of air pollution in the industrial park and the trend of air quality changes in the past two years. At the same time, it deeply discusses the influencing factors of air pollution in industrial parks and corresponding air pollution prevention and control measures from four aspects: VOCs related industrial enterprises, road traffic sources, urban dust, and meteorological factors. The aim is to promote the comprehensive management of air pollution in industrial parks in China to a higher level.

**Keywords :** industrial park; atmospheric pollutants; air quality; governance countermeasures

## 引言

随着全球经济的不断发展和国内经济的持续增长, 产业园区作为推动产业集聚和经济发展的重要平台, 其市场需求不断增长。根据中国开发区审核公告目录(2018年版)的数据显示, 当前我国共有2543家省级以上的工业园区, 其中国家级开发区552家, 省级开发区高达1991家<sup>[1]</sup>, 目前, 湖南省有国家或省级产业园区139个, 其中岳阳市11个。在国家政策的推动和引导下, 工业园区已经成为目前我国地区经济发展和区域核心竞争力提升的理想模式和重要力量<sup>[2-3]</sup>。然而, 工业园区在推动我国经济快速发展, 为社会带来巨大经济效益的同时, 也导致了大量温室气体和其他有害大气污染物的大量排放, 从而加剧了空气质量的恶化<sup>[4-5]</sup>。本文以岳阳市某产业园区为研究对象, 深入探讨产业园区周边空气污染现状, 分析污染产生的原因, 并根据工业园区周边空气污染特性提出针对性的防治措施, 以期岳阳市产业园区空气污染的治理工作提供理论支持和实践指导。

一、产业园区概况

本文的研究区域位于岳阳市中心城区东部，总面积898.76公顷，共划分为七个区块。该产业园区以先进装备制造、高端生物医药为主导产业，总部经济为特色产业，现代物流、新能源、新材料为辅助产业，构建了“两主一特三辅”的产业新格局。截至目前为止，该园区内已落户企业75家，其中先进装备制造、高端生物医药等辅助产业企业的有39个，占比52%。该园区现入驻企业主要排放的污染物包括挥发性有机物（VOCs）、氮氧化物（NO<sub>x</sub>）、二氧化硫（SO<sub>2</sub>）和粉尘，其全年排放量分别为80.97 t/a、68.06 t/a、34.60 t/a和53.07 t/a。VOCs是该园区的主要特征污染物。

二、产业园区空气质量现状

了解园区的空气质量现状，根据2022–2023年园区空气质量年报以及岳阳市生态环境部门政府信息公开数据，对该工业园区空气质量现状及变化趋势进行简单分析。

（一）产业园区空气质量状况

2022年，此产业园区所在区域空气质量综合指数为3.72。其中，PM<sub>2.5</sub>的浓度均值为34 μg/m<sup>3</sup>，在岳阳市各站点中排名第3；PM<sub>10</sub>的浓度均值为50 μg/m<sup>3</sup>，在岳阳市各站点中排名第4；SO<sub>2</sub>的浓度均值为9 μg/m<sup>3</sup>，在岳阳市各站点中排名第3；NO<sub>2</sub>的浓度均值为24 μg/m<sup>3</sup>，在岳阳市各站点中排名第3；O<sub>3</sub>–8h第90百分位数浓度均值为162 μg/m<sup>3</sup>，在岳阳市各站点中排名第1；CO第95百分位数浓度均值为1.1 mg/m<sup>3</sup>，在岳阳市各站点中排名第2。

2023年，此产业园区所在区域空气质量综合指数为3.82，空气质量优良率为87.1%。其中，PM<sub>2.5</sub>的浓度均值为37 μg/m<sup>3</sup>，在岳阳市各站点中排名第1；PM<sub>10</sub>的浓度均值为57 μg/m<sup>3</sup>，在岳阳市各站点中排名第1；SO<sub>2</sub>的浓度均值为9 μg/m<sup>3</sup>，在岳阳市各站点中排名第1；NO<sub>2</sub>的浓度均值为24 μg/m<sup>3</sup>，在岳阳市各站点中排名第1；O<sub>3</sub>–8h第90百分位数浓度均值为148 μg/m<sup>3</sup>，在岳阳市各站点中排名第1；CO第95百分位数浓度均值为1.1 mg/m<sup>3</sup>，在岳阳市各站点中排名第1。上述六项污染物指标中，对综合指数贡献率最大的污染物是PM<sub>2.5</sub>，其次是O<sub>3</sub>，这两项污染物的贡献率分别为28%和24%；贡献率最低的是SO<sub>2</sub>，其贡献率为4%。因此，PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>是影响该工业园区空气质量综合指数的主要污染物。

（二）工业园区空气质量变化趋势

2022年至2023年此产业园区所在区域空气质量同比变化情况如表1所示。由表可知，2023年该园区的空气质量综合指数较2022年退步了2.7%。其中，PM<sub>2.5</sub>的浓度均值同比上升8.8%；PM<sub>10</sub>的浓度均值同比上升14%；O<sub>3</sub>–8h第90百分位数浓度均值同比下降8.6%；SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>和CO的浓度均值同比持平。因此，这两

年该产业园区所在区域的环境空气质量整体呈下滑趋势，空气质量有所退步，园区内PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>浓度均明显升高，然而特征污染物O<sub>3</sub>浓度下降，较2022年有所改善。

表1 2022–2023年产业园区空气质量同比变化情况

	特征污染物						综合指数
	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	CO	
2022年	34	50	9	24	162	1.1	3.72
2023年	37	57	9	24	148	1.1	3.82
同比变化率	8.8%	14%	0%	0%	-8.6%	0%	2.7%

三、产业园区空气污染影响因素

（一）受工业企业污染物排放直接影响

根据调查，该产业园区以先进装备制造、高端生物医药为主导产业，在这此产业中，涉及使用胶水、油漆、胶黏剂、涂料等原辅材料，采用胶装、涂布、印刷及喷涂等生产工艺时，均会不同程度有组织或无组织排放VOCs，而园区配套的供热锅炉则是SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>及颗粒物排放的主要污染源。产业园区内企业作业期间释放的废气污染物，不仅仅给周边的自然环境造成不良影响，同时也在产品的流通和原料的流转链条中亦排放出多种污染物。有多项研究表明，VOCs、SO<sub>2</sub>及NO<sub>x</sub>及是形成PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>的重要前体物质。结合2.1中的分析数据可知，该园区空气质量受PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>影响较大。与此同时，经调查发现，该园区内部分涉VOCs工业企业目前仍存在含VOCs原辅材料源头替代率低、生产过程全过程污染物治理不到位、废气收集末端治理效果不佳等问题。

（二）受道路交通移动源影响

道路交通移动源主要指的是在城市道路运输过程中，由于能源消耗（如燃油、天然气等）而产生的各种污染排放的交通工具，包括汽车、货车等。这些交通工具尤其是柴油货车在行驶过程燃料不完全燃烧时会排放出NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>、CO和颗粒物等多种污染物，大量研究表明，移动源产生的NO<sub>x</sub>对夏季臭氧浓度贡献很高。现代物流作为该产业园区的辅助产业，使得物流车辆数量大幅增加，而园区内机动车数量一直呈快速增长趋势，导致机动车尾气污染日益严重，尤其在不利天气的影响下，大气污染物难以向外扩散。

（三）受城市扬尘影响

根据数据统计，该产业园区现有工业企业70多家，且产业规模仍在不断增长，工业密集度较高。近年来，随着经济的高速发展和政策的日益完善，该产业园区积极引进工业企业，多个建设项目同时进行，由于部分项目未在场内配备降尘设施、围挡上未安装喷淋设施、场内以及沿线的扬尘撒漏等，导致园区内多条道路的路面上存在大量的扬尘和积泥积土，并随着车辆经过扩散至空气中，造成严重的扬尘污染。

（四）受气象因素影响

岳阳市处在东亚季风气候区中，其气候特征表现出中亚热带



向北亚热带的过渡性质，属于湿润的亚热带季风气候。在夏秋两季，由于空气对流强度显著增强，加之台风外围下沉气流与副热带高压的共同作用，大气循环变得尤为强劲，不利于灰霾物质的积聚和化学反应的进行，从而减少了灰霾天气的出现。然而，冬春季节时情况则截然不同。此时，北方冷空气受到地形的阻隔，难以越过南岭，导致岳阳市降雨的频率和强度都大幅下降，加之冬季强烈的日光照射容易形成逆温层，同时地面风速的下降等因素均为灰霾的形成提供了有利条件<sup>[6]</sup>。在多种因素的共同作用下，岳阳市在冬春季节极易出现灰霾天气。产业园区的灰霾现象与气象条件也密切相关，在冬春时节，由于逆温层的笼罩，大气层的扩散能力受限，加之工业污染源的连续排放，致使污染物不断累积，最终引发了严重的污染天气。

### （五）产业园区环境管理水平的问题

尽管我国不遗余力地推广产业园区环保意识，并在其环境管理水平有所提升。即便如此，推进绿色产业园的建设目前仍然面临诸多挑战，尤其是在产业园区的管理职责分工、基础设施建设、园区小微站管理、环境监管能力上均存在一些问题，如在项目引进环节，园区常常过度关注收益，而将环境的制约因素和环境质量持续改善的要求抛诸脑后，甚至有些产业园区规划环评执行不力，一些产业园区在规划环评方面的执行力度不足，未能充分发挥规划环评的前置指导作用，导致经济形势展虽然展现出短暂的上升势头，但由此带来的环境空气质量问题也依然表现尤为突出。

## 四、产业园区大气污染防治对策

### （一）加强工业污染源治理力度

为确保产业园区减污降排工作的有效推进，必须严格把关园区内建设项目的环评影响评价流程以及“三同时”制度的落实，从源头上遏制污染，实现对新建、扩建、改建项目污染物排放量的精确控制。针对涉 VOCs 工业企业，必须加速推进低 VOCs 含量原辅材料的源头替代进程，促进重点行业企业绿色转型发展。

对于新、改、扩建项目以及涉 VOCs 工业企业，必须严格按照要求安装 VOCs 净化设备，并在相对密闭室内进行，避免 VOCs 无组织排放。对现有的 VOCs 收集与治理设施进行全面评估，适时进行更换或升级改造，积极推广使用蓄热式热氧化（RTO）、催化热氧化（RCO）等高效的 VOCs 治理技术，逐渐取代光氧化、光催化、水喷淋等低效治理措施<sup>[7]</sup>，以此来显著提升 VOCs 废气的收集效率、确保治理设施的同步高效运行，并增强污染物的去除率。

### （二）加强道路交通移动源防控力度

为有效管控道路交通移动污染源，环保部门需联合交管部门不断强化源头管理措施，并持续专项实施道路监管与执法行动。针对进出产业园区的大型货车、工程运输车等应开展专项移动源执法行动，并加强跨部门联合监管机制，严查严控，即生态环境

部门负责监测取证，公安交管部门负责实施处罚，交通运输部门负责监督维修。狠抓造成道路扬尘及尾气超标车辆，对查获的抛、漏、滴、洒扬尘污染道路的车辆和尾气排放超标的车辆依法进行处罚。尤其在 O<sub>3</sub> 污染高发时期，应进一步加大路面检查力度，严厉惩处违反限行规定及超标排放等违法行为。此外，应积极推广机动车尾气净化装置的使用，并鼓励采用优质燃油，以降低机动车尾气中有害物质的排放量。

### （三）加强扬尘污染防治力度

首先，需要加强施工扬尘的综合治理。建设单位需严格遵守《岳阳市扬尘污染防治条例》<sup>[8]</sup>等相关规定，在项目施工期间，做好扬尘源及施工机械污染的防治工作，督促施工单位规范作业流程，确保扬尘在施工过程中得到有效治理，同时对来往运输车辆必须进行严格的覆盖和出入清洗工作。其次，需要加大道路扬尘的综合整治力度。相关部门应按需增加各区域路面的清洁设备以及保洁人员的投入，督促其严格执行“一冲洗、二清扫、三保洁”的标准化作业程序；针对扬尘污染严重区域，增加道路两旁洒水喷雾的降尘频率，保持道路的清洁，防止二次扬尘的产生。最后，严格落实露天禁烧工作方案，坚决禁止垃圾露天焚烧行为，在重大节日时期，适时发布禁止或限制燃放烟花爆竹的公告，以期减轻烟花爆竹燃放对环境空气质量造成的负面影响。

### （四）加强空气质量精细化管控

强化与上级气象部门和生态环境部门的沟通协调机制，以便提前掌握气象条件的变化动态。在面临不利气象条件时，增加大气加密会商次数，从而提升污染天气预警预报的时效性和精确度，为迅速启动应对方案提供坚实的技术保障。同时，充分利用气象预警与预报信息，并依据《岳阳市重污染天气应急预案》的相关规定，综合考虑 AQI 数据、气象数据、重点大气污染源在线监测数据，预测污染发生强度、发展趋势、持续时间、影响范围等，按照预警等级，按程序报请市政府发布预警信息<sup>[9]</sup>，并立即启动不利天气应对机制，确保不利气象条件下的应对措施得到有效落实。

### （五）“规划 + 环保 + 安全 + 运维”一体化模式提升产业园区管理水平

一是依托环保管家专业知识，开展一连串业务，其中包括环保政策的详细阐释、环境质量监测与管控，以及环境品质的全面提升；二是打造集高新技术于一体的智能化产业集聚地，协助园区内企业实现智能化装备和系统的全面应用，整合物联网、海量数据等先进科技，促进一系列融合智能化、信息化、数字化、网络化特性的技术革新项目落地；三是增强对环境风险的管理控制程度，增强风险管控技巧与行为准则<sup>[10]</sup>。对环境污染与安全隐患的审查与分析，统筹公共环境设施的规划、施工和管理流程。提升风险防控策略的综合融合层级，提高应急反应效率并增强系统整体效能，强化风险管理及应急预案方案的完整性及其间的互助配合作用；四是搭建合作共赢的运营维护管理框架，争取排污企

业与行业监管机构携手投资，打造自主运营的项目主体。全力推动服务业的扩展及细致入微的管理，因应园区内企业特殊要求，度身定制全方位运维方案，确保实现稳健而持续的快速扩张。

## 五、结束语

产业园区作为推动区域工业经济发展的关键引擎，其在大气污染的防治工作上显得尤为关键。本文以岳阳市某产业园区为研

究对象，针对该园区2022–2023年度空气质量状况及变化趋势进行简单分析。该产业园区空气质量状况整体呈下滑趋势，PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>是影响该产业园区空气质量综合指数的主要污染物。与此同时，本文从涉VOCs工业企业、道路交通移动源、城市扬尘、气象因素及园区管理水平五个方面深入分析和讨论了工业园区空气污染的影响因素以及对应的空气污染防治措施，以期持续改善工业园区空气环境质量。

## 参考文献

[1] 国家发展改革委，科技部，国土资源部，住房城乡建设部，商务部，海关总署.《中国开发区审核公告目录》（2018年版）[OL]. 2019–08–10.

[2] 蔺尾燕，何静，祝婕，等. 米东工业园区大气污染物排放对乌鲁木齐市空气质量影响[J]. 新疆环境保护，2022，44(02): 9–15.

[3] 田金平，刘巍，臧娜，等. 中国生态工业园区发展现状与展望[J]. 生态学报，2016，36(22): 7323–7334.

[4] Wen Z, Hu Y, Lee J C, et al. Approaches and policies for promoting industrial park recycling transformation (IPRT) in China: Practices and lessons[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 172: 1370–1380.

[5] Yu F, Han F, Cui Z. Evolution of industrial symbiosis in an eco-industrial park in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 87: 339–347.

[6] 周刚，夏慧. 我国灰霾天气的成因分析及研究进展综述[J]. 广州化工，2013，41(12): 168–170.

[7] 刘嘉. VOCs污染现状及减排对策——以我国汽车喷涂行业为例[J]. 皮革制作与环保科技，2023，4(03): 112–113.

[8] 岳阳市生态环境局.《岳阳市扬尘污染防治条例》[OL]. 2019–11–26.

[9] 岳阳市人民政府.《岳阳市重污染天气应急预案》[OL]. 2020–12–19.

[10] 郭慧宇. 大气污染原因和环境监测治理技术探微[J]. 清洗世界，2022，38（6）：138–140.

# 细胞培养技术在神香草天然产物研究中的应用

王岩

齐齐哈尔市实验中学, 黑龙江 齐齐哈尔 161006

DOI: 10.61369/EAE.2024020007

**摘 要 :** 神香草是重要的药用植物, 具有抗氧化、抗真菌和止咳等多种活性。利用现代细胞培养技术获得神香草次级代谢产物, 对于开发新型药物具有重要意义。本文介绍了神香草细胞悬浮培养技术和农杆菌介导转基因毛状根培养技术的研究现状及影响因素, 同时提出了未来的研究方向。

**关 键 词 :** 神香草; 愈伤组织; 悬浮培养; 毛状根; 次级代谢产物

## Application of Cell Culture Technology in the Study of Natural Products from *Hyssopus Officinalis*

Wang Yan

Qiqihaer shiyan middle school, Qiqihar University, Qiqihar, Heilongjiang 161006

**Abstract :** The *Hyssopus officinalis* is an important medicinal plant used for antispasmodic, antioxidant, antifungal and cough treatment. The harvest of the secondary metabolites of *H. officinalis* uses modern cell culture technology, which is of great significance for the development of new drugs. This paper introduced the research status and influencing factors of cell suspension culture technology and *Agrobacterium*-mediated transgenic hairy root culture technology, and proposes future research directions.

**Keywords :** *Hyssopus officinalis*; callus; suspension culture; hairy roots; secondary metabolites

神香草 (*Hyssopus officinalis*) 属于双子叶植物纲、唇形科、神香草属、神香草种, 生长于欧洲、西南亚和中亚以及印度西北部的干燥、石灰质的土壤上, 是一种集观赏、药用、烹饪和芳香为一体的植物<sup>[1-2]</sup>。神香草的基因具有高度变异性, 到目前为止, 已有报道了包括 *Hyssopus officinalis* L.<sup>[3]</sup>、*Hyssopus officinalis* subsp. *aristatus* (Godr.)<sup>[4]</sup>、*Hyssopus officinalis* subsp. *Aristatus*<sup>[5]</sup>、*Hyssopus officinalis* L. subsp. *pilifer* (Pant.) Murb.<sup>[6]</sup>在内的多个亚种。

神香草已于2017年被美国食品药品监督管理局 (Food and Drug Administration, FDA) 列入 GRAS (Generally Recognized as Safe) 数据库, 其植株可合成多种具有重要活性的次级代谢产物, 包括占干重0.3-1%的精油 (顺式-pinocamphone、松果体酮、 $\beta$ -pine烯、1,8-cineole、 $\beta$ -水芹烯、烯基甲基醚、肉豆蔻醇、月桂烯和反式 pinocamphone 等)、迷迭香酸和紫草酸等<sup>[7-8]</sup>, 赋予神香草抗菌<sup>[9]</sup>、抗氧化<sup>[6]</sup>、抗肿瘤<sup>[10]</sup>、抗病毒<sup>[11]</sup>等多种活性, 使其在医药、食品、化妆品行业具有重要应用价值。然而, 由于受植物生理和环境变化等各种原因的影响, 神香草的次级代谢产物产量极低, 因此, 为了满足其在医药和食品中的需求, 迫切需要应用非常规方法来增加这些生物活性天然产物的产量。愈伤组织培养能够产生与植株栽培相同类型的次级代谢产物<sup>[12]</sup>。愈伤组织作为接种物, 可用于细胞悬浮培养、植株再生、诱导体细胞胚和不定根培养中<sup>[13-16]</sup>。将体外细胞培养技术用于植物次级代谢产物的研究, 不仅可以获得产量高、回收率高的目的产物, 而且质量和产量不受季节和地理限制<sup>[17]</sup>。因此, 植物细胞培养已成为在植物中获得次生代谢产物的主要方法<sup>[18]</sup>。

本文对神香草悬浮细胞培养法和转基因毛状根培养法产次级代谢产物的影响因素进行了探讨, 以期为了更好的开发神香草在医药领域的应用价值奠定基础。

### 一、悬浮细胞培养法

细胞悬浮培养方法是连续大规模生产次级代谢产物的主要方法之一。基于植物细胞全能性原理, 将愈伤组织或毛状根接种到具有适当生长刺激剂的液体培养基中, 经过细胞悬浮培养生产次

级代谢产物。愈伤组织是产生完全遗传自亲本植物的代谢产物的良好来源, 因此, 悬浮培养物中的所有细胞都能够产生与整个植物相同的化合物, 且产物浓度更高并更易于分离<sup>[19]</sup>。

#### (一) 愈伤组织的诱导及发育

在不同浓度激素的作用下, 发育后的愈伤组织呈紧密型或松



脆型。松散型愈伤组织细胞间隙大、易分散，是进行悬浮培养的适宜材料。外植体类型、植物生长调节剂（plant growth regulators, PGR）及其浓度、营养环境对愈伤组织的诱导及发育有重要影响<sup>[20]</sup>。

植物的叶片、叶柄、根、下胚轴和茎均可以作为诱导愈伤组织的外植体。Pakseresht研究发现，*H. Officinalis*的下胚轴和叶片作为外植体对愈伤组织诱导和愈伤组织发育没有显著影响；但是，当调整培养基中的植物生长调节剂种类和浓度时，会产生显著的影响<sup>[21]</sup>。

植物生长调节剂是对植物生长具有特定作用的简单分子，即使在低浓度下也有效刺激植物生长、代谢及次级代谢产物的产量<sup>[22-23]</sup>。 $\alpha$ -萘乙酸（NAA）和6-苄基氨基嘌呤（BAP）是常用的植物生长调节剂<sup>[24]</sup>。Pakseresht发现，在不同的NAA（N，分别是0、0.5、1、2 mg/L）和BAP（B，分别是0、0.5、1 mg/L）水平下*H. Officinalis*的不同外植体会引起愈伤组织发育的显著差异。结果表明，添加N2B1和N0.5B1的培养基分别显示出最高的愈伤组织诱导和愈伤组织生长速率。N<sub>0.5</sub>B<sub>0.5</sub>和N<sub>1</sub>B<sub>0.5</sub>培养基对叶片外植体的愈伤组织诱导最高，N<sub>2</sub>B<sub>1</sub>培养基对下胚轴外植体的愈伤组织诱导最高。另外，叶外植体愈伤组织在N<sub>0.5</sub>B<sub>0.5</sub>和N<sub>2</sub>B<sub>0.5</sub>培养基中生长速率最高；下胚轴外植体愈伤组织在N<sub>0.5</sub>B<sub>1</sub>培养基中生长速率最高。添加N<sub>2</sub>B<sub>1</sub>和N<sub>0.5</sub>B<sub>1</sub>的培养基分别表现出最高的愈伤组织诱导和愈伤组织生长速率<sup>[21]</sup>。Kochan等以神香草下胚轴作为外植体诱导愈伤组织，研究发现当MS琼脂培养基添加0.2 mg/LNAA和0.1 mg/L BAP时会导致愈伤组织生长不良；当将NAA和BAP浓度提高至1 mg/L和0.2 mg/L时即产生较好的效果<sup>[25]</sup>。Skrzypek对牛膝草下胚轴愈伤组织的细胞悬浮培养进行了研究，在B5培养基中补充1 mg/mL NAA和0.2 mg/mL BAP，在100 rpm/min、26℃条件下连续光照培养21天，在细胞悬浮培养物中检测到谷甾醇、豆甾醇，以及几种具有齐墩果烯和熊果烯骨架的五环三萜<sup>[26]</sup>。上述研究表明，生长素与细胞分裂素的协同使用加速了神香草愈伤组织的启动并增加了愈伤组织的诱导率。

不同的生长调节剂的协同使用会导致愈伤组织产生不同种类和不同产量的次级代谢产物。枸杞愈伤组织培养时，BA/NAA的组合能显著增加绿原酸和咖啡酸的产生和积累；TDZ/IAA组合、TDZ和TDZ/NAA组合分别显著提高了香草酸和芦丁、没食子酸、槲皮素的合成<sup>[27]</sup>。

## （二）悬浮培养的引发剂

悬浮培养细胞经过几次传代后，次级代谢产物生产力可能会下降。因此，研究愈伤组织在液体培养基中悬浮培养条件很重要。为了提高目的产物的产量，悬浮培养时往往需要添加茉莉酸甲酯、酵母提取物等作为引发剂<sup>[28]</sup>。

Pakseresht等研究了酵母提取物（0、5、10、20和40 mg/L）、水杨酸（0、2、4、8和16 mg/L）和柠檬酸（0、2、4、8和16 mg/L）对*H. officinalis*悬浮细胞培养物中 $\beta$ -蒎烯、1,8-桉树脑、顺式松香油等次级代谢产物产量的影响。结果发现，上述引发剂不仅没有引起 $\beta$ -蒎烯、1,8-桉树脑产量的提高，在实验范围内产量还显著降低了，但是顺式松香油的产量随着酵母提

取物含量的提高有显著增加<sup>[21]</sup>。

## 二、转基因毛状根培养技术及其影响因素

近年来，农杆菌介导的水平基因转移的机理和应用都取得了重大进展，特别是农杆菌介导的基因瞬时转化技术被开发用于植物生物技术领域<sup>[29-30]</sup>。已有多种报道应用转基因植物细胞培养技术生产重要药用植物的次级代谢产物<sup>[31-32]</sup>。

高等植物的根系生长较慢，并且收获根部代谢产物也较困难。毛状根培养系统是器官（根）培养的替代方法，适用于植物生化和药理研究，是药用化合物的重要来源之一<sup>[33-34]</sup>。发根农杆菌（*Agrobacterium rhizogenes*）通过伤口感染植物后，它的Ri质粒的T-DNA片段插入植物基因组，参与控制植物生长素和细胞分裂素的生物合成。*A. rhizogenes*诱发双子叶植物毛状根病，毛状根在适宜条件下生长迅速。经*A. rhizogenes*遗传转化的毛状根与植物相比具有相同或更高的次级代谢产物生产能力<sup>[35]</sup>。另外，毛状根遗传稳定，生长速度通常快于细胞培养物，并且培养基中不需要添加激素。营养物质、共培养时间等条件是制约毛状根培养法生产效率的主要因素。

### （一）营养物质对毛状根生产次级代谢产物的影响

在许多毛状根培养物中，毛状根生物量及次生代谢产物合成都受到初始糖浓度的影响，例如，西洋参（*Panax quinquefolium*）毛状根中皂苷的积累<sup>[35]</sup>、松果菊毛状根中菊苣酸的合成以及青蒿中青蒿素的合成等。Kochan等利用带有Ri1855质粒的发根农杆菌LBA 9402感染神香草四周龄的幼苗叶柄诱导了毛状根形成，并研究了蔗糖浓度对毛状根产迷迭香酸的影响。研究发现，经过四次传代培养后，B5培养基中高浓度的蔗糖对毛状根生长速率和迷迭香酸的产生有积极的影响，当B5培养基中的蔗糖浓度从3%w/v增加到10%w/v时，毛状根（新鲜\干燥）生物量逐渐增加，10%蔗糖培养基中生物质干重较3%蔗糖的高出5倍以上，所含的迷迭香酸几乎是3%蔗糖中的2倍。该水平比一年生田间生长的植物的愈伤组织、细胞悬浮培养物和根中的水平至少高出60%<sup>[25]</sup>。

不同的培养环境会导致毛状根分泌代谢产物的不同。Murakami等研究了不含激素的MS、1/2 MS、Woody Plant（WP）和B5培养基对*H. officinalis*毛状根产酚类化合物的影响。在WP液体培养基中培养第7周时迷迭香酸产量最大，达到干重的8.03%，该水平是观察到的在亲本植物的叶子部分水平的8倍以上，培养至第8周时紫草酸B产量达到最大，是干重的3.89%。在MS培养基中培养时，转化根中的紫草酸产量最大，占干重0.18%。

### （二）共培养时间的影响

*A. rhizogenes*和植物细胞在无抗生素的培养基中共培养可以实现农杆菌对植物细胞的转化，共培养时间的长短对转化率有显著的影响。如果共培养时间太短，则外源基因将不能完全整合，转化率会降低；如果共培养时间过长，将导致*A. rhizogenes*过度生长，从而破坏愈伤组织细胞对养分的正常吸收，抑制植物细胞

的正常生长,导致外植体褐变甚至死亡。

获得 *H. officinalis* 转基因毛状根通常需要较同为唇形科的黄芩、丹参更长的共培养时间。Kochan 等选择 *H. officinalis* 叶片作为外植体,在 B5 培养基中与发根农杆菌黑暗条件下 26℃ 共培养了 21–28 天,至出现不定根(长 1–2 cm)后通过氨苄西林抗性筛选获得了毛状根培养物<sup>[25]</sup>。Murakami 等将发根农杆菌 ATCC 15834 菌株通过针刺接种到 *H. officinalis* 的茎的切端,在 YEB 琼脂培养基上共培养 20 天获得了转化的根,在 1/2 MS 琼脂培养基上经克拉霉素筛选获得了毛状根培养物。

此外,外植体类型、乙酰丁香酮(acetosyringone, AS)浓度也是影响毛状根产物合成的主要因素。在土牛膝(*Achyranthes aspera*)毛状根诱导研究中发现,体外生长的幼龄叶片对发根农杆菌的转化高度敏感,其次是下胚轴和子叶,茎的毛状根诱导率极低,根和愈伤组织不能诱导形成毛状根。AS 对土牛膝的毛状根形成的诱导的最佳浓度也是 100  $\mu\text{mol/L}$ ,当共培养培养基中缺乏

AS 时不产生毛状根,当 AS 的浓度增加到 300  $\mu\text{mol/L}$  以上时,对外植体产生毒性,发根诱导率显著下降。

### 三、展望

通过 *H. officinalis* 悬浮细胞培养法和转基因毛状根培养法获得次级代谢产物的研究在上个世纪就已见报道,但是进展缓慢,还存在较大的研究空间。未来研究可以从以下几方向进行:(1) *H. officinalis* 的基因组信息不足,使通过体外和体内方法增加其产物合成的设计受到了限制。通过不同外植体积累植物化学物质的基因组序列信息可广泛了解 *H. officinalis* 各种代谢过程,可为设计活性化合物高效生物合成途径提供支持;(2) *H. officinalis* 次级代谢产物种类繁多,功能多样,通过悬浮细胞培养法和转基因毛状根培养法可以深入挖掘次级代谢产物并分析其功能,为 *H. officinalis* 在医药领域的应用奠定理论基础。

### 参考文献

- [1] Jhantigh O, Najafi F, Naghdi Badi H, et al. Essential oil composition of Hyssop (*Hyssopus officinalis* L.) under salt stress at flowering stage[J]. *Journal of Essential Oil Research*, 2016, 28(5): 458–464.
- [2] Rashidi S, Eikani M H, Ardjmand M. Extraction of *Hyssopus officinalis* L. essential oil using instant controlled pressure drop process[J]. *Journal of Chromatography A*, 2018, 1579: 9–19.
- [3] Kara N, Baydar H. Morphogenetic, ontogenetic and diurnal variabilities of hyssop (*Hyssopus officinalis* L.) [J]. *Res. Crop*. 2012, 13: 661–668.
- [4] Venditti A, Bianco A, Frezza C, et al. Essential oil composition, polar compounds, glandular trichomes and biological activity of *Hyssopus officinalis* subsp. *aristatus* (Godr.) Nyman from central Italy[J]. *Industrial Crops & Products*, 2015, 77: 353–363.
- [5] Borrelli F, Pagano E, Formisano C, et al. *Hyssopus officinalis* subsp. *aristatus*: An unexploited wild-growing crop for new disclosed bioactives[J]. *Industrial Crops and Products*, 2019, 140(11): 111594.
- [6] Džamić A M, Soković M D, Novaković M, et al. Composition, antifungal and antioxidant properties of *Hyssopus officinalis* L. subsp. *pilifer* (Pant.) Murb. essential oil and deodorized extracts[J]. *Industrial Crops and Products*, 2013, 51: 401–407.
- [7] Özer H, Sökmen M, Güllüce M, et al. In vitro antimicrobial and antioxidant activities of the essential oils and methanol extracts of *Hyssopus officinalis* L. ssp. *angustifolius* [J]. *Italian Journal of Food Science*, 2006, 18(1): 73–84.
- [8] Murakami Y, Omoto T, Asai I, et al. Rosmarinic acid and related phenolics in transformed root cultures of *Hyssopus officinalis* [J]. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 1998, 53(1): 75–78.
- [9] Hristova Y, Wanner J, Jirovetz L, et al. Chemical composition and antifungal activity of essential oil of *Hyssopus officinalis* L. from Bulgaria against clinical isolates of *Candida* species[J]. *Biotechnology and Biotechnological Equipment*, 2015, 29: 592–601.
- [10] Kizil S, Guler V, Kirici S, et al. Some agronomic characteristics and essential oil composition of Hyssop (*Hyssopus officinalis* L.) under cultivation conditions[J]. *Acta Scientiarum Polonorum– Hortorum Cultus*, 2016, 15: 193–207.
- [11] Mohan M, Seth R, Singh P, et al. Composition of the Volatiles of *Hyssopus officinalis* (L.) and *Thymus serpyllum* (L.) from Uttarakhand Himalaya[J]. *National Academy Science Letters*, 2012, 35(5): 445–448.
- [12] Nikolaeva T N, Zagorskina N V, Zaprometov M N. Production of phenolic compounds in callus cultures of tea plant under the effect of 2,4-D and NAA[J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2009, 56: 45–49.
- [13] Mustafa N R, De Winter W, Van Iren F, et al. Initiation, growth and cryopreservation of plant cell suspension cultures[J]. *Nature Protocol*, 2011, 6(6): 715–742.
- [14] Ikeuchi M, Sugimoto K, Iwase A. Plant callus: mechanisms of induction and repression[J]. *The Plant Cell*, 2013, 25(9): 3159–3173.
- [15] Abbasi B H, Ali H, Yücesan B, et al. Evaluation of biochemical markers during somatic embryogenesis in *Silybum marianum* L.[J]. *3 Biotech*, 2016, 6(1): 71–78.
- [16] Sivakumar G, Yu K, Paek K. Production of biomass and ginsenosides from adventitious roots of *Panax ginseng* in bioreactor cultures[J]. *Engineering in Life Sciences*, 2005, 5: 333–342.
- [17] Jiao J, Gai Q Y, Wang W, et al. Remarkable enhancement of flavonoid production in a co-cultivation system of *Isatis tinctoria* L. hairy root cultures and immobilized *Aspergillus niger* [J]. *Industrial Crops and Products*, 2018, 112: 252–261.
- [18] Mulabagal V, Tsay H S. Plant cell cultures—an alternative and efficient source for the production of biologically important secondary metabolites[J]. *International Journal of Applied Science and Engineering*, 2004, 2: 29–48.
- [19] Ma J K, Drake P M, Christou P. Genetic modification: the production of recombinant pharmaceutical proteins in plants[J]. *Nature Reviews Genetics*, 2003, 4: 794–805.
- [20] Khan T, Abbasi B H, Zeb A, et al. Carbohydrate-induced biomass accumulation and elicitation of secondary metabolites in callus cultures of *Fagonia indica* [J]. *Industrial Crops and Products*, 2018, 126: 168–176.

- [21] Pakseresht G, Kahrizi D, Mansouri M, et al. Study of callus induction and cell culture to secondary metabolite production in *Hyssopus officinalis* L.[J]. Journal of Reports in Pharmaceutical Sciences, 2016, 5(2): 104–111.
- [22] Zhao J, Davis L C, Verpoorte R. Elicitor signal transduction leading to production of plant secondary metabolites[J]. Biotechnology Advances, 2005, 23 (4): 283–333.
- [23] Teale W D, Paponov I A, Palme K. Auxin in action: signalling, transport and the control of plant growth and development[J]. Nature Reviews Molecular Cell Biology, 2006, 7 (11): 847–859.
- [24] Mohammad S, Khan M A, Ali A, et al. Feasible production of biomass and natural antioxidants through callus cultures in response to varying light intensities in olive (*Olea europaea*. L) cult. Arbosana[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 2019, 193(4): 140–147.
- [25] Kochan E, Wysokinska H, Chmiel A, et al. Rosmarinic acid and other phenolic acids in hairy roots of *Hyssopus officinalis*[J]. Zeitschrift Fur Naturforschung C, 1999, 54c: 11–16.
- [26] Skrzypek Z, Wysokińska H. Sterols and triterpenes in cell culture of *Hyssopus officinalis* L.[J]. Zeitschrift für Naturforschung C, 2003, 58(5–6): 308–312.
- [27] Karakas F P. Efficient plant regeneration and callus induction from nodal and hypocotyl explants of goji berry (*Lycium barbarum* L.) and comparison of phenolic profiles in calli formed under different combinations of plant growth regulators[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2020, 146(1): 384–391.
- [28] Máthé Á, Hassan F, Kader A A. In Vitro micropropagation of medicinal and aromatic plants. Berlin: Springer 2015: 305–336.
- [29] Guo M L, Ye J Y, Gao D W, et al. Agrobacterium-mediated horizontal gene transfer: Mechanism, biotechnological application, potential risk and forestalling strategy[J]. Biotechnology advances, 2019, 37(1): 259–270.
- [30] Hussain M S, Fareed S, Saba A M, et al. Current approaches toward production of secondary plant metabolites[J]. Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences, 2012, 4: 10–20.
- [31] Yin Y C, Zhang X D, Gao Z Q, et al. Over-expressing root-specific  $\beta$ -amyrin synthase gene increases glycyrrhizic acid content in hairy roots of *glycyrrhiza uralensis*[J]. Chinese Herbal Medicines, 2019, 11(2): 192–199.
- [32] Vinterhalter B, Savić J, Zdravković-Korać S, et al. Agrobacterium rhizogenes-mediated transformation of *Gentiana utriculosa* L. and xanthones decussatin-1-O-pri-meverside and decussatin accumulation in hairy roots and somatic embryo-derived transgenic plants[J]. Industrial Crops & Products, 2019, 130: 216–229.
- [33] Deepthi S, Satheeshkumar K. Effects of major nutrients, growth regulators and inoculum size on enhanced growth and camptothecin production in adventitious root cultures of *Ophiorrhiza mungos* L. [J]. Biochemical Engineering Journal, 2017, 117: 198–209.
- [34] Wang J, Li J L, Li J, et al. Production of active compounds in medicinal plants: from plant tissue culture to biosynthesis[J]. Chinese Herbal Medicines, 2017, 9(2): 115–125.
- [35] Kochan E, Szymańska G, Szymczyk P. Effect of sugar concentration on ginsenoside biosynthesis in hairy root cultures of *Panax quinquefolium* cultivated in shake flasks and nutrient sprinkle bioreactor[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2014, 36: 613–619.

# 水环境保护工程中生态修复治理技术应用分析

钟志航

清远市共创环保工程技术有限公司, 广东 清远 511500

DOI: 10.61369/EAE.2024020009

**摘要：** 本文基于当前水环境恶化、生态系统受损的背景，对水环境保护工程中生态修复治理技术的应用进行了系统分析，从生态修复技术体系分类、应用路径及优化策略三方面展开论述。通过梳理物理、化学、生物修复技术的作用机理，解析基底修复、植物配置、微生物调控等技术的应用路径，并提出精准化调控、科学化设计等优化策略。其中，物理修复的数字化升级、化学修复的绿色化转型及生物修复的基因工程创新，增强了污染物去除能力，提出的闭环管理体系与多功能生态系统构建方法，能够为水环境保护工程提供了理论依据与实践指导。旨在借助多技术协同与动态优化方式，有效解决传统修复技术效率低、易二次污染等问题，提升修复效果。

**关键词：** 水环境；保护工程；生态修复；治理技术

## Analysis of the Application of Ecological Restoration and Governance Technologies in Water Environmental Protection Projects

Zhong Zhihang

Qingyuan Gongchuang Environmental Protection Engineering Technology Co., LTD Qingyuan, Guangdong 511500

**Abstract：** Based on the current background of deteriorating water environment and damaged ecosystems, this paper conducts a systematic analysis of the application of ecological restoration and governance technologies in water environmental protection projects, and discusses it from three aspects: classification of ecological restoration technology systems, application paths, and optimization strategies. By sorting out the action mechanisms of physical, chemical and biological repair technologies, analyzing the application paths of technologies such as substrate repair, plant configuration and microbial regulation, and proposing optimization strategies such as precise regulation and scientific design. Among them, the digital upgrade of physical remediation, the green transformation of chemical remediation and the genetic engineering innovation of biological remediation have enhanced the pollutant removal capacity. The proposed closed-loop management system and the construction method of multi-functional ecosystem can provide theoretical basis and practical guidance for water environmental protection projects. The aim is to effectively solve the problems of low efficiency and easy secondary pollution of traditional restoration technologies by means of multi-technology collaboration and dynamic optimization, and improve the restoration effect.

**Keywords：** water environment; conservation project; ecological restoration; governance technology

随着工业化与城镇化进程加速，水体污染与生态退化问题日益严峻，富营养化、重金属污染、有机污染物积累等现象威胁着水生态系统健康与人类用水安全。传统工程治理手段虽能在短期内降低污染物浓度，但存在成本高昂、生态扰动大、修复效果不可持续等弊端。在此背景下，生态修复治理技术凭借其环境友好、长效稳定的特性，逐渐成为水环境保护的核心手段。从物理隔离污染物到化学改变污染物形态，从生物代谢降解到生态系统结构重塑，各类技术不断推陈出新。然而，现有研究多聚焦单一技术应用，缺乏对技术体系系统性与协同性的深入探讨。因此，全面剖析生态修复治理技术的应用路径与优化策略，对推动水环境保护工程高质量发展具有重要现实意义。

### 一、生态修复技术体系分类

#### （一）物理修复技术

物理修复技术以物质迁移转化规律为基础，通过物理手段实现污染物的隔离、去除与生态系统结构重塑。机械清除技术通过

挖掘、筛分等方式直接移除污染土壤或沉积物，是处理高浓度污染场地的的重要手段。热脱附技术则利用污染物沸点差异，通过加热将挥发性有机物从介质中分离，适用于石油烃类污染修复。近年来，物理修复技术与数字化手段深度融合，发展智能定位清淤、微波热解等新型技术。基于三维激光扫描与GIS技术的精准



清淤系统,可根据污染分布动态调整施工参数,降低修复成本的同时减少二次污染风险<sup>[1]</sup>。磁分离技术通过添加磁性纳米材料吸附污染物,再利用磁场实现高效分离,突破传统物理方法对细微颗粒去除效率低的瓶颈。

## （二）化学修复技术

化学修复技术借助化学反应改变污染物的形态与毒性,在重金属、有机污染治理中发挥关键作用。化学淋洗技术通过添加螯合剂、表面活性剂增强污染物的溶解性,实现污染物从固相到液相的转移。化学氧化还原技术利用芬顿试剂、零价铁等强氧化剂或还原剂,将有机污染物矿化为二氧化碳和水,或将重金属转化为低毒价态<sup>[2]</sup>。新型化学修复材料不断涌现,纳米零价铁复合材料兼具吸附与还原性能,可定向降解卤代烃类污染物。光催化材料在自然光激发下产生羟基自由基,实现对持久性有机污染物的深度矿化。化学修复技术正朝着绿色化方向发展,生物可降解螯合剂的研发减少了修复过程中的二次污染风险,体现了生态修复的可持续理念。

## （三）生物修复技术

生物修复技术依托生物体代谢功能实现污染物降解与生态系统重建,具有环境友好、成本低廉的显著优势。植物修复技术利用超积累植物对重金属的富集能力,通过连续种植收获实现土壤重金属稳定化或去除。微生物修复依赖土著微生物或外源优势菌种的代谢活动,将有机污染物转化为无害物质。近年来,微生物-植物联合修复成为研究热点,植物根系分泌物为微生物提供碳源与生存空间,微生物则促进植物对污染物的吸收与转化<sup>[3]</sup>。基因工程技术的应用进一步拓展了生物修复的边界,通过改造微生物基因提高其对污染物的降解效率,可以将甲苯降解基因导入土著菌,显著增强石油污染土壤的修复能力。酶修复技术利用漆酶、过氧化物酶等胞外酶催化污染物降解,避免活体生物对环境条件的苛刻要求,展现出广阔的应用前景。

# 二、水环境保护工程中生态修复治理技术应用路径

## （一）实施基底修复技术

实施基底修复技术能够恢复水体底部生态系统的稳定性与承载力,为水生生物提供适宜的栖息环境。开展基底现状调查,通过地质雷达、沉积物采样分析等手段,明确底泥厚度、污染物分布及理化性质,评估基底受损程度。针对富营养化底泥,可采用原位覆盖技术,铺设土工布、黏土等材料,阻隔底泥污染物向上覆水体释放<sup>[4]</sup>。对于重金属污染底泥,可通过原位钝化,添加铁锰氧化物、生物炭等材料,降低重金属活性。在河道修复中,基底重构是重要手段,通过重塑河床形态,构建深潭-浅滩交替的微地形,增强水体流动性与自净能力。铺设砾石、卵石等基质,为水生生物提供附着和产卵场所。基底修复还需结合水动力调控,通过调节水位、流速,促进基底与水体间的物质交换,加速生态系统的恢复进程。

## （二）应用植物配置技术

应用植物配置技术需遵循生态适应性原则,构建具有净化功

能与景观价值的水生植物群落。根据水体的水文条件、光照强度、营养水平等,筛选合适的植物种类,挺水植物如芦苇、香蒲,浮叶植物如睡莲、荇菜,沉水植物如苦草、轮叶黑藻等,均有各自的生态位与净化优势。在植物种植阶段,需科学规划种植密度与布局<sup>[5]</sup>。在水流较缓区域优先种植沉水植物,利用其吸收营养盐、抑制藻类生长;在岸边区域配置挺水植物,拦截地表径流污染物。植物配置还需注重季节性搭配,选择常绿与落叶植物组合,保证全年生态功能的稳定发挥。定期对植物进行收割管理,防止植物残体腐烂导致二次污染,收割的植物可资源化利用,制作堆肥或生物质能源。结合生态浮岛技术,将植物种植在漂浮载体上,扩大植物修复的应用范围,提高水体净化效率。

## （三）运用微生物调控技术

运用微生物调控技术,优化微生物群落结构,强化水体污染物的分解转化能力。对水体微生物群落进行分析,利用高通量测序技术了解微生物种群组成与功能基因分布,明确优势菌群与污染物降解能力的关联。针对氨氮污染水体,可添加硝化-反硝化复合菌剂,补充具有高效脱氮能力的微生物菌株。对于有机污染严重的水体,投加降解难降解有机物的白腐真菌、芽孢杆菌等。在微生物投加过程中,需合理控制投加量与频次,并配合溶解氧、温度、pH等环境条件的调节,为微生物生长代谢创造适宜环境,通过投放微生物促生剂,提供微生物生长所需的微量元素与营养物质,激活土著微生物活性<sup>[6]</sup>。构建人工湿地、生物膜反应器等载体,为微生物提供附着生长空间,延长微生物停留时间,提高污染物降解效率。定期监测微生物群落结构与水质变化,根据实际情况调整调控策略,确保微生物修复效果的持续性。

# 三、水环境保护工程中生态修复治理技术优化策略

## （一）基底改良技术精准调控

通过高分辨率地球物理探测与原位监测,获取基底污染物分布、孔隙结构等多源数据,构建三维地质模型,精准识别污染热点区域与脆弱带。在此基础上,根据污染物类型与迁移规律,制定差异化改良方案:针对重金属污染,采用纳米铁锰复合材料进行靶向固定,通过材料表面的活性位点与重金属离子发生螯合反应<sup>[7]</sup>。对于有机污染底泥,引入微波热脱附-原位覆盖联合技术,先通过微波加热降低污染物浓度,再覆盖防渗材料阻断二次释放。在实施过程中,利用传感器实时监测基底温度、氧化还原电位等参数,动态调整改良剂用量与处理时长。修复完成后,通过微生物群落结构变化、污染物形态转化等指标评估改良效果,为后续工程积累数据支撑。

## （二）植物群落配置科学设计

突破传统“单一净化功能导向”思维,构建多功能协同的生态系统。设计前期需开展植物-水体互作机制研究,通过盆栽试验与中试系统,量化不同植物对氮磷吸收、根系泌氧能力及化感作用强度,建立植物功能数据库。在群落构建时,遵循生态位互补原则,将具有强净化能力的先锋物种与景观价值高的伴生植物搭配,形成“净化-景观”复合型群落<sup>[8]</sup>。结合水文节律模拟,

优化植物种植高程，确保丰水期植物根系稳固、枯水期群落结构完整。引入基因编辑技术改良植物耐污性，通过调控植物转运蛋白基因表达，增强其对重金属的富集能力。定期对植物群落进行健康评估，采用无人机多光谱遥感技术监测植物生理状态，及时调整群落结构，维持系统长期稳定。

（三）微生物菌剂靶向投加

基于宏基因组学解析水体微生物群落结构与代谢潜力，识别功能缺失或活性不足的关键菌群。针对不同污染类型，开发定制化菌剂。可以针对抗生素污染水体，筛选具有耐药基因降解能力的菌株进行复配；针对黑臭水体，制备包含硝化菌、聚磷菌与光合细菌的协同菌剂。在投加过程中，采用微胶囊包埋技术保护菌株活性，通过控制胶囊壁材厚度与孔隙率，实现菌剂的缓慢释放<sup>[9]</sup>。利用水质传感器实时监测溶解氧、pH等参数，建立菌剂投加量与环境因子的响应模型，实现动态精准投加。为避免外源菌剂对土著微生物造成生态冲击，可预先开展生态安全性评估，选择与本土菌群兼容性高的菌株，并设置生态缓冲区监测群落演替。

（四）水力条件动态优化

提升水体自净能力为核心，构建时空可变的水流调控模式。通过数值模拟技术，建立水动力-水质耦合模型，分析流速、水深、流态等不同水力参数对污染物扩散与生物栖息地的影响。在工程实施中，采用智能化闸门、生态堰坝等设施，根据季节与水质变化动态调节水位与流速。夏季藻类高发期，通过增加水流

扰动抑制藻类附着；冬季低温期，适当降低流速减少水体能量损耗<sup>[10]</sup>。结合生态河道修复，重塑蜿蜒曲折的河道形态，形成浅滩-深潭交替的微地形，延长水流停留时间的同时促进底质与水体间的物质交换。引入磁流体动力学技术，通过施加外部磁场改变水流流态，增强水体紊动强度，提高溶解氧传递效率与污染物混合均匀度。实时监测水流速度分布与水质变化，反馈调整水力调控策略，实现生态修复效果的最大化。

四、结束语

通过上述分析可知：水环境保护工程生态修复治理技术的高效应用，需建立“分类施策-精准实施-动态优化”的完整技术链条。物理、化学、生物修复技术的协同应用，能够发挥不同技术在污染物去除、生态功能恢复中的优势互补作用。基底修复的精准诊断、植物群落的科学配置、微生物的靶向调控，是保障修复效果的关键环节。优化策略中的闭环管理、多功能生态系统构建及水力条件动态调控，则进一步提升了修复工程的可持续性 与适应性。研究证实，通过数字化监测与智能调控技术的引入，可大幅提升修复效率，降低二次污染风险。在此过程中需注意，不同水体环境的异质性要求技术方案具备高度定制化特征，避免“一刀切”的治理模式，推动生态修复从被动治理向主动预防转变，实现生态效益与环境效益双赢目标。

参考文献

[1] 张晨, 王娟, 刘莹, 等. 基于山水林田湖草系统治理观的生态保护与修复: 以河南省黄河故道—豫北平原为例 [J]. 环境工程, 2023, 41(6): 54-61.

[2] 王丽娜, 李爽, 邓唯楚, 等. 基于生态系统评价生态保护修复工程体系构建研究——以西辽河上游流域为例 [J]. 环境科学与管理, 2023, 48(11): 153-158.

[3] 郭玉佳, 刘世梁, 董玉红, 等. 基于景观格局和生态系统服务的生态廊道修复成效评估指标体系 [J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2023, 31(10): 1525-1538.

[4] 王金南, 孙宏亮, 赵越, 等. 持续打好长江保护修复攻坚战, 谱写生态优先绿色发展新篇章 [J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(2): 329-335.

[5] 谢红忠, 万艳雷, 周秋红, 等. 干旱地区高盐纳污坑塘水生态修复——以阿拉尔氧化塘为例 [J]. 南水北调与水利科技 (中英文), 2022, 20(3): 516-524.

[6] 郑天驹, 许盛凯, 田广宇, 等. 黑臭水体生态协同修复技术研究及应用——以亳州市陵西湖疏浚工程为例 [J]. 环境科学与管理, 2022, 47(11): 104-108, 131.

[7] 李咏红. 基于协同发展的北方湿地公园生态修复技术研究——以琉璃河湿地公园为例 [J]. 水生生物学报, 2022, 46(10): 1535-1545.

[8] 张瑞杰, 张红娟, 元凯军, 等. 陕北黄土高原生态治理现状及发展趋势探究——以延安市为例 [J]. 环境生态学, 2024, 6(5): 93-100, 107.

[9] 张昊泽, 黄会斐, 高凯拓, 等. 流域水资源和生态环境综合治理启示——千岛湖及新安江流域案例 [J]. 净水技术, 2024, 43(3): 61-67, 91.

[10] 傅伯杰, 刘焱序, 赵文武. “一带一路”生态环境保护和可持续发展科技合作重点领域 [J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(9): 1273-1281.

# 锅炉能效测试技术优化与尾气污染物监测方案研究

常丹

广东省湛江市质量技术监督标准与编码所, 广东 湛江 524000

DOI: 10.61369/EAE.2024020010

**摘要：** 随着能源消耗的增加和环境污染问题的日益严重，提高锅炉的能效和减少尾气污染物排放已成为当前工业发展的关键问题。本文首先分析了锅炉能效测试的现状和存在的问题，然后提出了能效测试技术的优化方案。接着，针对尾气污染物的监测，研究了多种监测技术，并提出了相应的监测方案。最后，通过案例分析验证了优化方案和监测方案的有效性。

**关键词：** 锅炉；能效测试；优化；尾气污染物；监测方案

## Research on Optimization of Boiler Energy Efficiency Testing Technology and Monitoring Scheme for Exhaust Gas Pollutants

Chang Dan

Zhanjiang Quality and Technical Supervision Standards and Coding Institute, Zhanjiang, Guangdong 524000

**Abstract：** With the increase in energy consumption and the growing severity of environmental pollution, enhancing the energy efficiency of boilers and reducing the emissions of pollutants in flue gas have become key issues in current industrial development. This paper first analyzes the current situation and existing problems of boiler energy efficiency testing, and then proposes an optimization plan for energy efficiency testing technology. Subsequently, for the monitoring of flue gas pollutants, various monitoring technologies are studied, and corresponding monitoring plans are proposed. Finally, the effectiveness of the optimization plan and monitoring plan is verified through case analysis.

**Keywords：** boiler; energy efficiency testing; optimization; flue gas pollutants; monitoring plan

### 引言

在工业生产过程中，锅炉扮演着至关重要的角色，它是一种关键的热能设备，其能效水平的高低直接关系到能源的利用效率以及企业的经济效益。随着工业的不断发展和对环境保护意识的增强，人们越来越意识到锅炉尾气排放的污染物对环境造成的严重污染问题。因此，提高锅炉的能效水平以及有效控制尾气中污染物的排放，已经成为当前工业发展中一个迫切需要解决的问题。这不仅有助于提升能源的使用效率，减少资源浪费，而且对于保护环境、减少污染、实现可持续发展具有重要的意义。

### 一、锅炉能效测试现状与问题分析

#### （一）能效测试现状

当前，锅炉能效测试作为评估锅炉运行效率和能源利用水平的重要手段，已广泛应用于工业生产和供暖领域，成为推动节能减排政策落实和技术进步的重要技术支撑。测试主要依据国家或行业标准进行，这些标准详细规定了测试的流程、方法和指标体系，为测试工作提供了统一的规范和指导。测试内容通常包括热效率、排烟温度、排烟损失等关键指标，这些指标能够反映锅炉的燃烧效率和热损失情况，是评估锅炉能效的重要依据<sup>[1]</sup>。测试方法主要采用直接测量法和间接测量法。直接测量法通过直接测量锅炉的输入热量和输出热量来计算热效率，这种方法直观且易于理解，但需要精确测量燃料的消耗量和锅炉的输出功率。间接

测量法则是通过测量各项热损失来推算热效率，例如排烟损失、气体不完全燃烧损失、固体不完全燃烧损失等，这种方法不需要测量锅炉的输出功率，但需要对各项热损失进行准确的测量和计算。这两种方法各有优劣，在实际应用中需要根据具体情况选择合适的测试方法，例如锅炉的类型、容量、燃料种类等因素都会影响测试方法的选择。

#### （二）存在的问题

尽管锅炉能效测试在标准和方法上已较为成熟，但在实际操作中仍存在一些亟待解决的问题，这些问题制约了锅炉能效测试的广泛应用和准确评估，亟需通过技术进步和方法创新来加以改进。现有的能效测试方法普遍存在测试周期长、成本高、操作复杂、数据处理繁琐等问题。测试周期长意味着企业需要投入更多的时间进行测试，这可能会影响正常的生产运营，尤其是对于连



续生产的工业企业来说，长时间的测试可能会导致生产中断和产量损失。成本高则限制了测试的普及率，尤其是对于小型企业来说，可能难以承担高昂的测试费用，这导致许多小型锅炉的能效状况得不到有效的评估和改进<sup>[2]</sup>。操作复杂和数据处理繁琐不仅增加了测试人员的负担，还容易导致人为误差，例如数据记录错误、计算失误等。此外，测试结果的准确性受测试人员技术水平和测试设备精度的影响较大。测试人员的技术水平参差不齐可能导致测试结果的偏差，例如对测试标准的理解不透彻、操作不规范等。测试设备精度不足会影响结果可靠性，如传感器误差、仪表校准不准确。这些问题限制了锅炉能效测试的广泛应用和准确评估，需要通过技术进步和方法创新来改进，比如开发更先进的测试设备、更智能的测试软件和更简洁的测试流程，以提高测试的效率、准确性和经济性<sup>[3]</sup>。

## 二、锅炉能效测试技术优化方案

### （一）优化目标

锅炉能效测试技术的优化旨在全面提升测试过程的质量与效率，以更好地服务于锅炉运行状态的评估和节能技术的应用。具体而言，优化目标集中在五个关键方面：一是缩短测试周期，减少对企业日常运营的影响，使其更易于接受和实施能效测试；二是降低测试成本，通过技术手段降低测试过程中的各项费用，提高测试的经济性，使更多企业，尤其是中小型企业，能够负担得起测试费用；三是简化操作流程，通过引入自动化和智能化技术，降低对测试人员技术水平的过高要求，减少人为操作带来的不确定性；四是提高数据处理效率，利用先进的软件系统实现数据的快速采集、处理和分析，避免繁琐的人工计算和数据处理过程；五是提升测试结果的准确性和可靠性，确保测试数据能够真实反映锅炉的运行状态和能效水平，为锅炉的运行优化和节能改造提供坚实可靠的数据支撑<sup>[4]</sup>。

### （二）优化措施

为了实现锅炉能效测试的优化目标，需要采取一系列综合性的措施，从硬件设备到软件系统，再到人员培训，进行全方位的优化升级，构建一个高效、精准、便捷的测试体系。在硬件方面，应积极采用先进的测试设备，例如高精度的温度传感器、压力传感器等，这些设备能够提供更精确的测量数据，从而提高测试数据的准确性。高精度的传感器可以更灵敏地捕捉到锅炉运行过程中的微小变化，为后续的数据分析提供更可靠的基础。在软件方面，应大力开发智能化测试软件，该软件应具备测试数据的自动采集、处理和分析功能，通过预设的算法和模型，自动计算锅炉的热效率、排烟损失等关键指标，并生成测试报告，大大提高测试效率，减少人工操作的繁琐和出错概率。智能化测试软件的应用，可以实现测试过程的自动化和智能化，降低对人工经验的依赖，提高测试结果的客观性和可比性。同时，还需要对现有的测试流程进行优化，通过深入分析现有的测试流程，识别并去除冗余的测试步骤，优化测试顺序，可以显著缩短测试所需的时间。流程优化提升测试效率和降低成本，使测试更经济高效<sup>[5]</sup>。

加强测试人员培训，提高对测试标准、设备和流程的理解，规范操作，减少人为误差。培训应包括理论、操作技能和案例分析，确保测试人员熟练准确完成任务。这样能提升测试人员专业素养和技能，确保测试工作质量和效率。这些优化措施能全面提升锅炉能效测试技术水平，支持企业节能减排和可持续发展。

## 三、尾气污染物监测方案研究

### （一）监测技术分析

尾气污染物监测是控制和减少污染物排放、保护大气环境的重要手段。当前，尾气污染物监测技术呈现出多元化发展的态势，主要包括红外光谱法、紫外光谱法、电化学法等，每种技术都有其独特的原理、特点和应用场景。红外光谱法利用不同气体分子对红外光的特定波长有吸收的特性，通过测量吸收光谱来定性定量分析气体成分，具有高灵敏度和选择性，适用于多种气体的同时检测<sup>[6]</sup>。紫外光谱法则是基于气体分子对紫外光的吸收原理，对一些具有紫外吸收特性的气体，如二氧化硫、氮氧化物等，有较好的检测效果。电化学法通过测量气体在电解质溶液中发生电化学反应产生的电流信号来定量分析气体浓度，具有结构简单、响应速度快等优点，常用于便携式监测设备。除了上述几种主流技术外，还有如质谱法、色谱法等，它们在不同工况和精度要求下也发挥着重要作用。因此，在实际应用中，需要根据具体的监测对象和要求，选择合适的监测技术，以达到最佳的监测效果。

### （二）监测方案设计

设计一套完善的尾气污染物监测方案，需要综合考虑多方面因素，确保监测系统的可靠性、准确性和稳定性，从而为锅炉的环保运行和监管提供坚实的数据支撑。首先，要根据锅炉的燃料类型和尾气成分，选择合适的监测技术。不同的燃料燃烧产生的尾气成分有所差异，例如燃煤锅炉的尾气中通常含有较多的颗粒物、二氧化硫（SO<sub>2</sub>）和氮氧化物（NO<sub>x</sub>），而燃气锅炉的尾气中则可能以氮氧化物（NO<sub>x</sub>）和一氧化碳（CO）为主<sup>[7]</sup>。因此，需要根据具体情况选择最适合的监测技术，以保证监测结果的准确性和可靠性。

接下来，要设计监测系统的硬件架构，包括采样系统、分析系统和数据处理系统。采样系统负责从锅炉尾气中采集具有代表性的气体样本，其设计需要考虑采样点的位置、采样方式、采样流量等因素。采样点应设置在尾气流场稳定、能够代表整体尾气成分的区域，采样方式应能够保证采集到连续且具有代表性的气体样本，采样流量则需要根据分析系统的要求进行精确控制<sup>[8]</sup>。分析系统则是监测系统的核心，负责对采集的气体样本进行分析，得出污染物的浓度。分析系统的选择应基于待测污染物的种类和浓度范围，确保其具有足够的灵敏度和精度<sup>[9]</sup>。数据处理系统则负责对分析系统得出的数据进行存储、处理和传输，以使用户进行远程监控和分析。数据处理系统应具备数据存储、数据备份、数据安全等功能，并能够将数据以直观的图表或报表形式呈现给用户。

此外，开发监测软件以实时采集、处理和分析数据。软件需有用户友好的界面，便于参数设置、数据查询和报表生成。软件应实时显示数据，进行基本分析，如计算统计参数，生成图表，帮助用户了解锅炉运行和污染排放情况。制定并执行监测系统的维护和校准方案，确保数据准确性。定期维护和校准可发现故障，保证系统稳定运行，确保数据准确可靠。维护和校准方案应详细，由专业人员执行。这些措施确保尾气监测方案全面有效，为锅炉环保运行和监管提供数据支持<sup>[10]</sup>。

## 四、案例分析

为了验证上述锅炉能效测试技术优化方案和尾气污染物监测方案的有效性，本文选取了某大型钢铁企业的在用锅炉作为具体的研究对象，进行深入的案例分析和实证研究。该钢铁企业拥有多台大型燃煤锅炉，用于生产过程中的蒸汽供应和电力生成。这些锅炉长期处于高负荷运行状态，其能效水平和尾气排放情况对企业节能减排目标的实现具有重要影响。因此，对该企业的锅炉进行能效测试和尾气污染物监测优化，具有重要的现实意义和示范效应。

在案例研究中，我们首先对目标锅炉的运行现状进行了详细的调查和评估，包括锅炉的型号、燃料类型、运行参数、历史能效数据和尾气排放数据等。基于这些信息，我们制定了针对性的能效测试技术优化方案和尾气污染物监测方案。在能效测试方面，我们采用了高精度的温度传感器和压力传感器，替换了原有的老旧设备，提高了测试数据的准确性。同时，引入了智能化测试软件，实现了测试数据的自动采集、处理和分析，大大提高了测试效率。此外，还对测试流程进行了优化，减少了不必要的测试环节，缩短了测试周期。在尾气污染物监测方面，根据锅炉的燃料类型和尾气成分，我们选择了合适的监测技术，并设计了包含采样系统、分析系统和数据处理系统的完整硬件架构。开发的监测软件能够实时采集、处理和分析监测数据，并生成直观的报表和图表，方便用户进行远程监控和分析。同时，制定了完善

的监测系统维护和校准方案，确保监测数据的长期准确性和可靠性。

通过在目标锅炉上实施上述优化后的测试技术和监测方案，经过一段时间的运行和数据收集，我们得到了显著的成果。锅炉的热效率提高了3%，这意味着在相同的燃料消耗下，锅炉能够产生更多的有效热量，直接降低了企业的生产成本，提高了能源利用效率。在尾气污染物排放方面，尾气中SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>的排放量分别降低了15%和10%，显著减少了大气污染物的排放，对改善区域环境质量起到了积极作用。这一结果表明，通过采用先进的测试技术和监测方案，可以有效提高锅炉的运行效率，降低污染物排放，实现节能减排的目标。

该案例研究不仅验证了优化方案的有效性，也为其他工业企业提供了可借鉴的经验。通过实施类似的优化措施，可以显著提高锅炉的能效水平，降低污染物排放，为企业创造经济效益，为社会带来环境效益，推动工业领域的绿色发展。

## 五、结论

本研究针对锅炉能效测试技术优化与尾气污染物监测方案进行了系统的研究。通过对锅炉能效测试现状的深入分析和存在问题的揭示，提出了针对性的优化方案，旨在提高测试效率、降低成本、简化操作、提升数据处理能力和测试结果的准确性。同时，针对尾气污染物的监测，研究了多种监测技术，设计了包含硬件架构、软件系统和维护校准方案的完整监测方案。通过在某大型钢铁企业的在用锅炉上进行案例分析和实证研究，验证了所提出的优化方案和监测方案的有效性。结果显示，锅炉的热效率得到了显著提升，尾气中主要污染物的排放量也明显降低，这不仅为企业带来了经济效益，也为环境保护做出了积极贡献。本研究成果为工业锅炉的能效提升和污染物减排提供了有力的技术支撑，具有重要的现实意义和推广价值。未来，随着技术的不断进步和创新，锅炉能效测试和尾气污染物监测方案将进一步完善和优化，为工业绿色发展贡献更多力量。

## 参考文献

- [1] 朱勇吉, 万明松. 锅炉能效测试计算及误差分析——评《锅炉能效测试与远程监控技术》[J]. 应用化工, 2023, 52(12): 10013-10013.
- [2] 张洪润. 一种基于无线技术的简易锅炉能效综合测试方法 [J]. 信息记录材料, 2019, 20(11): 2.
- [3] 黄晔, 汤国乐, 刘欣. 湖南省在用工业锅炉能效统计分析及节能对策 [J]. 工业锅炉, 2020(2): 4.
- [4] 叶向荣. 浅析燃气工业锅炉低氮燃烧技术与排烟热损失的相关性 [J]. 工业锅炉, 2020(5): 2.
- [5] 陈邵有, 刘英博. 燃煤工业锅炉能效提升节能量测量和验证方法研究 [J]. 中国测试, 2020, 46(S01): 158-160.
- [6] 钟德锋. 工业锅炉能效与安全评价及运行优化研究 [D]. 东南大学, 2023.
- [7] 向同琼, 周黎明, 郑邦华, 等. 生物质成型燃料锅炉能效分析与节能减排技术研究 [J]. 中国特种设备安全, 2022(004): 038.
- [8] 周黎明向同琼干兵杨棚. 工业锅炉定型能效测试数据及节能问题分析 [J]. 中国特种设备安全, 2022, 38(10): 80-84.
- [9] 齐国利, 丁春辉, 宋吉民, 等. 工业锅炉能效测试正平衡法和反平衡法浅析 [J]. 中国科技纵横, 2019.
- [10] 薛红香, 程和新, 马兰, 等. 基于典型案例的在役燃气锅炉能效测试研究 [J]. 机电工程技术, 2023, 52(9): 238-240.

