

4 土壤重金属污染的环境风险评估

4.1 环境风险评估的基本概念与框架

土壤重金属污染环境风险评估是基于科学方法分析重金属对生态系统和人体健康潜在危害的过程,其核心框架需兼顾系统性与工业场地特异性。风险评估的基本流程可概括为风险识别、暴露分析、毒性评估与风险表征四个核心环节,风险识别明确评估对象、保护目标及潜在危害途径,暴露分析量化重金属的迁移转化与人体/生态受体的接触程度,毒性评估确定重金属的危害阈值,风险表征整合前序结果判定风险等级。模型选择需结合工业场地的污染特征,优先考虑是否涵盖多暴露途径、复合重金属污染效应及场地土地利用规划,常用模型包括基于暴露场景的确定性模型与考虑参数不确定性的概率模型,以确保评估结果的针对性与可靠性^[4]。

4.2 重金属污染风险评估的关键指标

重金属污染风险评估的关键指标需围绕“危害程度”与“影响因素”展开,共同支撑评估结果的科学性。土壤中重金属的浓度与空间分布是风险评估的基础指标,浓度直接反映污染强度,而工业场地特有的污染异质性决定了空间分布数据需精准表征核心污染区与扩散范围,为暴露场景设定提供依据。重金属的生物可利用性是连接污染浓度与实际危害的关键,仅部分能被生物吸收利用的重金属形态会产生实质风险,其大小受重金属化学形态、土壤-生物系统相互作用影响,是评估中不可忽视的核心参数。土壤酸碱度、质地、有机质含量等理化性质则通过影响重金属的迁移转化能力间接调控风险水平,例如酸性土壤易促进重金属释放,砂质土壤比黏质土壤更利于重金属渗透,需在评估中重点考量。

4.3 风险评估方法

当前主流的重金属污染风险评估方法各有侧重,可根据评估目标与数据条件灵活选用。美国环保局(EPA)风险评估方法以分步骤量化为核心,通过建立标准化的暴露模型与毒性数据库,精准计算单一或复合重金属的致癌风险与非致癌风险,适用于需精细化评估人体健康风险的场景。土壤污染综合风险指数法通过整合重金属浓度、毒性响应系数等参数,构建综合评价指数,实现对场地污染风险的整体等级划分,操作简便且适用于区域性、多元素复合污染的快速评估。食物链模型与人体健康风险评估则聚焦于“土壤-植物-动物-人体”的暴露链条,量化通过食物摄入途径累积的重金属危害,尤其适用于工业场地周边存在农业用地或居民区

的场景,能更贴合实际暴露情境反映风险水平^[5]。

4.4 风险评估结果的解释与评估

风险评估结果是否被正确解释并应用于环境管理过程之间关系的可靠纽带取决于功能定位下的差异性措施。通常根据风险商、综合指数等量化结果以及国家标准、保护目标等因素将风险等级分为低、中、高3个等级,低风险对应可能危害极小或可以忽略,只需采取必要的管控措施降低暴露水平;中风险为可能造成危害,应采取控制措施减少暴露;高风险为不能满足基本使用条件,需要采取措施使地基保持良好的稳定状态且应达到环境质量标准后方能开发利用。相应的环境管理与治理措施要精准化:对于低风险地块来说,开展持续性环境监测即可,重点监测土地利用方式的变化造成的风险;对于中风险地块来说,开展针对场地污染土壤的改良、植被修复等工作,降低场地土壤重金属污染物的生物可利用性;对于高风险地块来说,则需要采用化学淋洗、固化稳定化等工程手段,使其重金属污染物的含量达标。同时,措施制定需兼顾场地未来规划,若涉及工业再利用需强化污染源管控,若转为居住或农业用地则需提高修复标准,实现风险管控与土地资源合理利用的平衡。

5 结语

综上所述,本文系统构建了工业场地土壤重金属检测与环境风险评估的技术体系,明确了科学采样、方法选型、精度控制在检测环节的核心作用,厘清了风险评估的关键指标与方法适配逻辑。该体系兼具系统性与实用性,可为工业场地重金属污染精准防控、科学治理提供重要支撑,助力解决污染管控与土地再利用的核心问题。

参考文献

- [1] 王傲凡,刘文婧,王晓丽,等.土壤重金属快速检测进展:电化学与光谱分析[J/OL].农业资源与环境学报,1-14[2025-11-07].
- [2] 游永梅,莫葵芬.微波消解-原子吸收光谱法检测土壤重金属研究[J].低碳世界,2025,15(10):44-46.
- [3] 蒋霖松,黄玉娟,李柱,等.X射线荧光光谱设备对土壤中重金属检测的适用性分析[J/OL].生态与农村环境学报,1-18[2025-11-07].
- [4] 李唐虎,甘婷婷,赵南京,等.基于WPS-GMM的土壤XRF光谱重叠峰解析方法研究[J].光谱学与光谱分析,2025,45(10):2737-2746.
- [5] 袁佳旭.基于智能机械的土壤重金属污染快速检测技术实验研究[J].数字农业与智能农机,2025,(09):26-29.

Migration of heavy metal pollution in bottom sediment of fishpond aquaculture in Pearl River Delta

Jiefen Li

Guangzhou Tanyuan Environmental Protection Technology Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, 511434, China

Abstract

As a major freshwater aquaculture hub in China, the Pearl River Delta region has experienced long-term pollution from farming activities and surrounding sources, leading to heavy metal accumulation in sediment. The migration and diffusion of these metals not only threaten aquatic ecosystems but may also impact human health through food chain contamination. This study investigates the pollution characteristics and migration patterns of four typical heavy metals in sediment from representative fish ponds in the Pearl River Delta. Through data collection, site selection, field sampling, laboratory analysis, and data modeling, we identified the primary sources of heavy metals as aquaculture inputs, agricultural non-point sources, and industrial wastewater. The research reveals migration pathways within the “sediment-superficial water-aquatic organisms” system, while examining the effects of pH levels, redox potential, and organic matter content on metal migration. These findings aim to provide scientific evidence for heavy metal pollution control, aquaculture environment remediation, and aquatic product safety assurance in the region.

Keywords

Pearl River Delta; fish pond aquaculture; sediment; heavy metal pollution; migration pattern

珠三角鱼塘养殖底泥重金属污染迁移规律研究

李洁芬

广州坦源环保科技有限公司, 中国·广东广州 511434

摘要

珠三角作为中国重要的淡水养殖基地, 长期养殖活动与周边污染源输入导致底泥重金属累积, 其迁移扩散不仅威胁水生生态系统, 还可能通过食物链影响人体健康。本研究以珠三角典型鱼塘为对象, 通过资料收集、布点方案确定、野外采样、实验室分析与数据模拟, 探究底泥中四种典型重金属的污染特征与迁移规律: 明确重金属主要来源于养殖投入品、农业面源与工业废水; 揭示其在“底泥-上覆水-水生生物”系统中的迁移路径, 及同时研究pH值、氧化还原电位、有机质含量对迁移的影响, 旨在为珠三角鱼塘底泥重金属污染防控、养殖环境修复及水产品安全保障提供科学依据。

关键词

珠三角; 鱼塘养殖; 底泥; 重金属污染; 迁移规律

1 引言

珠三角地处珠江流域下游, 河网密布、水土资源丰富, 是中国淡水渔业核心产区, 鱼塘养殖面积超 10200 万公顷, 年产量占广东全省淡水养殖总产量的 60% 以上, 对保障区域“菜篮子”供应具有重要意义。然而, 随着珠三角城市化、工业化快速推进, 以及鱼塘养殖集约化程度不断提升, 重金属污染问题日益凸显: 一方面, 养殖过程中大量使用的复合配合饲料、配合饲料、渔药, 长期累积导致底泥重金属含量超标; 另一方面, 周边农田农业种植过程化肥农药的不合理使用及流失、工业废水渗漏、生活污水排放等, 通过地表径流与地下渗透进入迁移至鱼塘, 进一步加剧底泥重金属污

染。当前针对珠三角鱼塘重金属的研究多集中于污染现状调查, 对迁移规律的系统探究较少, 尤其缺乏“底泥-水-生物”全链条迁移机制的分析。因此, 开展珠三角鱼塘养殖底泥重金属污染迁移规律研究, 明确其来源、路径与影响因素, 对改善摆脱养殖环境困境、推动珠三角渔业绿色可持续发展及保障人体健康具有迫切的现实意义与科学价值。

2 研究区域与研究方法

2.1 研究区域选择

本次研究选取区域养殖历史均超 20 年, 养殖品种以四大家鱼为主, 年均养殖密度 3-5 尾/m², 地点选取珠三角佛山南海、中山坦洲、江门新会三个典型鱼塘养殖区作为研究对象, 区域三个区域代表了珠三角不同养殖模式与污染背景, 详见下表 1:

【作者简介】李洁芬 (1989-), 女, 中国广东江门人, 本科, 助理工程师, 从事土壤污染状况调查研究。

表1 研究区域代表性统计表

序号	区域	不同养殖模式与污染背景
1	佛山南海鱼塘	集约化养殖, 周边工业企业密集, 存在工业废水潜在输入风险
2	中山坦洲鱼塘	集约化养殖, 紧邻农田, 受农业面源影响较大
3	江门新会鱼塘	以传统散户养殖为主, 养殖投入品使用较为分散, 饲料、渔药等具有一定的不确定性



图1 鱼塘养殖底泥重金属污染

2.2 研究方法

样品采集: 每个地方区域分别选取3个面积10-15亩、水深1.5-2m的鱼塘, 共9个鱼塘采样区, 确保样本具有代表性。

于2024年春、夏、秋、冬分四次采样, 每次采集鱼塘底泥、上覆水与养殖生物样品。底泥采用柱状采样器采集表层0-20cm底泥, 于每个鱼塘四个角落及中部共设5个采样点, 混合后取1kg样品装入聚乙烯密封袋; 上覆水采集距底泥10cm处水体, 用0.45 μm滤膜过滤后装入聚乙烯瓶; 养殖生物选取鱼塘优势种草鱼, 每个鱼塘采集3-5尾, 取肌肉组织备用。实验室分析: 底泥样品经冷冻干燥、研磨过100目筛后, 采用微波消解法消解, 上覆水与生物肌肉样品采用硝酸消解, 通过电感耦合等离子体质谱仪测定Cd、Pb、Cu、Zn含量; 采用BCR三步提取法分析底泥重金属形态; 同时测定底泥pH值、氧化还原电位、有机质含量等环境因子。

数据处理: 采用SPSS26.0软件进行数据统计分析, 通过相关性分析探究环境因子与重金属迁移的关联; 采用Origin2023绘制重金属含量分布与形态占比图; 结合Fick扩散定律模拟重金属在底泥-上覆水界面的扩散通量, 量化迁移强度^[1]。

3 珠三角鱼塘底泥重金属污染特征

3.1 重金属含量与空间分布

珠三角鱼塘底泥中四种重金属含量存在明显的空间差异, 其空间差异性鱼塘所处环境因素密不可分, 详细的检出结果及影响原因分析见下表2。

表2 底泥重金属检出含量及影响原因分析

序号	区域	底泥检出结果	影响原因
1	佛山南海鱼塘	Cd:1.12mg/kg Pb:72.3mg/kg	周边工业企业生产废水的跑冒漏滴污染
2	中山坦洲鱼塘	Cu:65.8mg/kg Zn:221.5mg/kg	农田化肥、农药流失
3	江门新会鱼塘	Cd:0.58mg/kg Pb:48.2mg/kg Cu:42.1mg/kg Zn:175.3mg/kg	不同养殖投入品(饲料、渔药等)中的微量元素添加剂累积

3.2 重金属季节含量特征

从季节变化看, 底泥重金属含量夏季高于其他季节: 夏季高温导致养殖生物摄食旺盛, 饲料投喂量增加, 残饵与粪便中重金属进入底泥; 同时夏季降雨量大, 地表水与地下水的水力交换频繁, 同时地表径流携带周边污染物输入, 加剧底泥重金属累积, 如佛山南海夏季底泥Cd检出量较春季高25%, 中山坦洲Cu检出量较冬季高30%^[2]。

3.3 重金属形态分布特征

底泥中重金属形态直接决定其迁移活性与生物毒性, 珠三角鱼塘底泥重金属以残渣态为主, 但生物可利用态占比存在差异: Cd的生物可利用态为35%-45%, 占比相对最高, 因其化学性质活泼, 易与底泥中有机质、淤泥质黏土矿物结合, 且在酸性条件下易释放; Pb的生物可利用态占比15%-20%, 主要以reducible态存在, 氧化还原电位降低时易转化为可迁移态; Cu、Zn的生物可利用态占比分别为20%-28%、22%-30%, 部分与有机质结合形成oxidizable态, 在厌氧环境下可能分解释放。



图2 底泥中重金属形态

不同区域形态分布差异明显: 佛山南海底泥Cd的可交换态占比达20%, 高于中山坦洲与江门新会, 因该区域底泥pH值较低, 促进Cd从残渣态向可交换态转化; 中山坦洲底泥Cu的oxidizable态占比达18%, 因周边农田输入的有机质丰富, 与Cu形成稳定络合物。