

# 排水系统沉积物中重金属的释放规律及其生态风险评价

熊平

乐安县鸿顺市政工程有限公司 江西抚州 344300

**摘要:** 聚焦排水系统沉积物, 系统分析重金属的赋存形态、释放规律及生态风险评价方法。在赋存形态方面, 明确重金属总量受污染源与沉积环境影响的空间分布差异, 解析不同化学形态的形成条件及稳定性与生物有效性的内在关联; 在释放规律层面, 阐述水动力条件、环境pH值及盐度变化通过改变沉积物理化性质影响重金属释放的具体机制; 在生态风险评价部分, 探讨基于重金属总量、形态及释放效应的多维度风险评估路径, 明确不同评价方式的适用场景与实践意义。研究结果可为排水系统重金属污染管控、水生生态保护及环境管理决策提供理论支撑。

**关键词:** 排水系统沉积物; 重金属; 赋存形态; 释放规律

## 引言

排水系统是城市水循环的重要组成部分, 承担着生活污水、工业废水及雨水的收集与输送功能, 其运行状态直接关联城市水环境质量。在长期运行过程中, 废水中的重金属会通过物理沉降、化学吸附及生物富集等作用逐步积累于沉积物中, 使沉积物成为重金属的“储存库”。当环境条件发生变化时, 沉积物中的重金属可能重新释放进入上覆水, 打破水体原有平衡, 对水生生物的生理功能造成危害, 甚至通过食物链的传递与放大效应影响人体健康。目前, 关于排水系统沉积物重金属的研究已逐步开展, 但对其赋存形态的精细特征、释放过程的驱动机制及生态风险的综合评估仍需完善, 相关研究可为排水系统污染治理方案制定及生态安全保障提供科学依据。

## 一、排水系统沉积物中重金属的赋存形态

### 1. 沉积物中重金属的总量与空间分布特征

排水系统沉积物中重金属总量受污染源输入强度、输送路径长短及沉积环境稳定性影响, 呈现明显的空间差异。工业区周边排水系统因长期接纳含重金属的工业废水(如电子制造业的铅、电镀行业的铬、冶金行业的镉), 沉积物中重金属总量普遍较高, 这类区域的沉积物重金属累积量通常是其他功能区的2-5倍。生活区排水系统沉积物重金属主要来源于生活消费品(如含锌涂料、含铜管道)及市政污水, 总量相对较低, 但仍存在局部富集现象, 如靠近垃圾中转站、汽车维修站的排水节点, 沉积物中锌、铜、镍等重金属含量会因污染物集中输入

出现异常升高。郊区排水系统受人类活动干扰较小, 沉积物重金属总量最低, 且空间分布相对均匀, 主要来源于自然沉降与少量农业面源输入。此外, 排水系统的流向与水力停留时间也会影响重金属空间分布, 在水流缓慢、沉积作用强的管网段(如检查井、沉淀池), 沉积物重金属总量通常高于水流湍急的直管段, 且易出现垂直方向的分层富集, 深层沉积物因累积时间长, 重金属含量常高于表层。

### 2. 重金属在沉积物中的化学形态分析

重金属在沉积物中以多种化学形态存在, 不同形态的形成与沉积物的理化性质(如粒径、有机质含量、矿物组成)密切相关。可交换态重金属主要通过静电引力吸附于沉积物颗粒表面, 受外界环境变化影响最为显著, 尤其在沉积物颗粒粒径较小、比表面积大的区域, 可交换态重金属占比更高, 易随水体条件波动发生迁移; 碳酸盐结合态重金属通过与沉积物中的碳酸钙、碳酸镁等矿物形成共沉淀结合, 其稳定性受pH值严格调控, 在酸性条件下易发生解离, 且在碳酸盐含量高的沉积物中, 这类形态重金属占比显著提升。铁锰氧化物结合态重金属依托铁锰氧化物(如氢氧化铁、二氧化锰)的吸附与络合作用存在, 这类形态的重金属在氧化还原电位变化时稳定性会受到影响, 当环境处于还原状态时, 铁锰氧化物易被还原溶解, 导致结合的重金属释放; 有机结合态重金属与沉积物中的腐殖质、蛋白质等有机质通过络合、螯合作用结合, 稳定性较强, 仅在有机质被微生物降解或氧化分解时才会缓慢释放, 有机质含量高的沉积物中该形态占比更高。残渣态重金属是重金属与沉积物

晶格结构紧密结合形成的形态，稳定性最高，在自然环境条件下难以释放，对生态环境的直接影响最小，通常占沉积物重金属总量的30%–60%<sup>[1]</sup>。

### 3. 不同形态重金属的稳定性与生物有效性

不同形态重金属的稳定性差异直接决定其生物有效性，二者呈显著负相关关系。残渣态重金属因与沉积物晶格结构紧密结合，稳定性最强，几乎不具备生物有效性，无法被水生生物通过摄食或体表吸收利用；有机结合态与铁锰氧化物结合态重金属稳定性次之，在环境条件未发生剧烈变化（如极端pH值、强氧化还原扰动）时，生物有效性较低，仅在特定条件下才会转化为可被生物利用的形态，被水生生物吸收后，会干扰体内酶活性、破坏细胞结构，进而影响生物个体生长与种群数量。碳酸盐结合态重金属稳定性中等，在pH值降低时稳定性明显下降，生物有效性随之升高，可被底栖生物（如螺类、贝类）吸收并在体内累积；可交换态重金属稳定性最差，生物有效性最高，可直接被浮游植物、浮游动物等水生生物摄入，参与生物体的代谢过程，对水生生态系统的结构与功能构成直接威胁。总体而言，重金属的生物有效性随形态稳定性降低而升高，稳定性越低的形态，对水生生物体的潜在危害越大，且这种危害会随生物营养级的升高逐步放大。

## 二、排水系统沉积物中重金属的释放规律

### 1. 水动力条件对重金属释放的影响

水动力条件是调控沉积物中重金属释放的关键因素，其通过改变沉积物的扰动程度影响重金属释放过程。当排水系统水流速度较低时，沉积物处于相对稳定的状态，颗粒间结合的重金属难以脱离沉积物，释放量较少；随着水流速度升高，水流对沉积物的冲刷作用增强，部分松散结合的重金属会随沉积物颗粒的悬浮进入水体，导致释放量增加。在水力扰动剧烈的场景下，如暴雨期间排水系统流量骤增，沉积物会被强烈搅动，不仅可交换态重金属大量释放，部分稳定性较强的形态也可能因颗粒破碎发生解离，进一步提高重金属释放量。此外，水力停留时间也会影响重金属释放，停留时间越长，沉积物与水体的接触时间越久，重金属释放越充分，上覆水中重金属浓度也随之升高<sup>[2]</sup>。

### 2. 环境pH值变化对重金属释放的影响

环境pH值通过改变沉积物表面电荷及重金属化学性质影响释放过程。当pH值降低时，水体中氢离子浓度升高，氢离子会与沉积物表面吸附的重金属离子竞争

吸附位点，导致可交换态重金属解吸释放；同时，酸性条件会破坏碳酸盐结合态重金属的结合结构，使碳酸盐矿物溶解，结合的重金属随之释放。随着pH值升高，沉积物表面逐渐带负电，对重金属离子的吸附能力增强，会抑制重金属释放，部分重金属离子还会与氢氧根离子结合形成氢氧化物沉淀，进一步降低释放量。当pH值处于中性至弱碱性范围时，沉积物中重金属释放量最低，此时各形态重金属的稳定性相对较高，释放过程处于平缓状态。

### 3. 盐度变化对重金属释放的影响

盐度变化通过改变水体离子强度影响重金属释放。当排水系统盐度升高时，水体中钠离子、氯离子等浓度增加，这些离子会与沉积物表面的重金属离子竞争吸附位点，削弱沉积物对重金属的吸附能力，促使可交换态重金属释放。高盐条件还会改变沉积物颗粒的双电层结构，降低颗粒表面的吸附电位，进一步促进重金属解吸。在盐度骤升的场景下，如沿海城市排水系统受海水倒灌影响，盐度短时间内大幅升高，沉积物中重金属释放量会出现显著上升；而盐度缓慢变化时，沉积物与水体间的离子交换过程相对平缓，重金属释放量的变化也更为温和。当盐度降低时，水体离子强度下降，沉积物对重金属的吸附能力恢复，重金属释放量会随之减少<sup>[3]</sup>。

## 三、沉积物中重金属释放的生态风险评价

### 1. 基于重金属总量的潜在生态风险评价

基于重金属总量的潜在生态风险评价通过综合考量重金属总量、毒性系数及区域背景值评估风险等级，是生态风险评价中应用最广泛的基础方法。不同重金属的毒性差异显著，汞、镉的毒性系数最高（分别为40、30），即使总量较低也可能构成高风险；砷、铅毒性系数次之（分别为10、5）；锌、铜、铬等重金属毒性系数较低（均为1），仅在总量过高时才会表现出明显风险。在工业区排水系统沉积物中，汞、镉总量常超出区域背景值3–5倍，结合其高毒性系数，潜在生态风险等级可达强风险水平，意味着该区域沉积物重金属释放后，可能对水生生物造成急性毒性影响，导致生物死亡率升高、群落结构破坏。而郊区排水系统沉积物中，各类重金属总量接近背景值，且毒性系数较低的重金属（如锌、铜）占比高，潜在生态风险等级多为低风险，对水生生态的威胁较小。这类评价需结合区域背景值确定污染阈值，同一重金属在不同区域的背景值差异可能导致风险等级判定结果不同，如镉在工业区背景值（通常为

0.5mg/kg) 高于郊区 (通常为0.2mg/kg), 相同总量 (如0.8mg/kg) 下, 郊区的风险等级可能判定为中风险, 而工业区仅为低风险, 因此背景值的合理选取对评价结果准确性至关重要<sup>[4]</sup>。

## 2. 基于重金属形态的生物有效性风险评价

基于重金属形态的生物有效性风险评价聚焦于高生物有效性形态 (可交换态、碳酸盐结合态) 的占比, 更能精准反映重金属对生物的实际危害, 弥补了总量评价忽略形态差异的不足。在某城市生活区排水系统沉积物中, 镉的可交换态与碳酸盐结合态占比达30%, 这两类形态生物有效性高, 意味着沉积物中的镉易被底栖生物 (如河蚌、水蚯蚓) 通过体表吸附或摄食吸收, 长期暴露会导致镉在生物体内累积, 干扰代谢过程, 如抑制钙吸收、破坏骨骼发育, 进而影响生物的生长繁殖, 导致种群数量下降, 因此该区域生物有效性风险等级判定为中风险。而在另一工业区排水系统段, 虽然铅的总量较高 (超出背景值4倍), 但可交换态与碳酸盐结合态占比不足5%, 大部分铅以稳定性强的残渣态 (占比60%以上) 存在, 生物有效性低, 即使释放进入水体, 也难以被水生生物利用, 生物有效性风险等级为低风险。在污染修复决策中, 这类评价结果具有重要指导意义: 若沉积物中高生物有效性形态重金属占比高, 需优先采用原位钝化技术 (如投加磷酸盐、蒙脱石) 降低其生物有效性; 若占比低, 则可侧重控制外源污染物输入, 减少重金属持续累积。

## 3. 重金属释放对水生生态系统的综合风险

重金属释放对水生生态系统的综合风险需统筹考量释放量、生物累积效应及食物链传递影响, 从生态系统整体视角评估危害, 涵盖初级生产者、消费者、分解者等多个营养级。某城市河流排水口沉积物中, 铜的释放量较高 (上覆水浓度达0.1mg/L), 初级生产者 (如绿藻、硅藻) 对铜最敏感, 低浓度铜就会抑制光合作用中的电子传递过程, 导致叶绿素合成减少, 初级生产力下降, 进而影响以藻类为食的浮游动物 (如枝角类) 的食物供应, 导致浮游动物种群数量减少。底栖动物 (如螺类) 摄入含铜沉积物后, 体内铜不断累积, 会影响其运动能力与繁殖成功率, 如导致螺类外壳变薄、幼体存活率降低, 进而导致底栖生物群落结构简化。随着食物链传递, 鱼类等更高营养级生物会通过摄食浮游动物、底栖生物

积累铜, 虽然鱼类对低浓度铜的耐受度高于藻类, 但长期累积会导致铜在肝脏、肾脏等器官富集, 破坏器官功能, 影响生长发育, 且通过人类食用鱼类, 铜还可能进入人体, 构成潜在健康风险, 因此该区域重金属释放的综合风险等级判定为中等风险。不同营养级生物对重金属的响应差异显著, 初级生产者作为食物链基础, 其受影响会引发连锁反应, 导致整个生态系统功能退化, 因此综合风险评价需重点关注初级生产者的受影响程度, 同时兼顾高营养级生物的累积效应<sup>[5]</sup>。

## 结语

排水系统沉积物中重金属的赋存、释放与生态风险存在明确的关联规律。在赋存形态上, 重金属总量呈现空间差异, 化学形态决定其稳定性与生物有效性, 低稳定性形态的生物有效性更高, 对生态系统威胁更大; 在释放规律方面, 水动力条件通过扰动强度调控释放量, pH值影响重金属形态稳定性进而改变释放过程, 盐度通过离子竞争影响重金属解吸; 在生态风险评价中, 总量评价反映整体污染水平, 形态评价精准体现生物危害, 综合评价涵盖生态系统多环节影响。这些规律揭示了排水系统沉积物重金属的环境行为特征, 为实际污染管控提供了方向。在排水系统运行管理中, 可通过优化水力条件、调控水体pH值等方式减少重金属释放, 结合风险评价结果制定针对性措施, 保障水生生态系统安全。

## 参考文献

- [1]Dadzie A A. 镇江市河湖上覆水及沉积物中重金属分布特征及生态风险评价[D]. 江苏大学, 2020.
- [2]刘修英, 黄功学, 高镜清, 等. 贾鲁河郑州段沉积物中重金属污染特征和生态风险评价[J]. 华北水利水电学院学报, 2022 (004): 043.
- [3]马志凯, 张树刚, 王玲, 等. 乐清湾表层沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. 2021.
- [4]江涛, 林伟稳, 曹英杰, 等. 梅江流域清凉山水库沉积物重金属污染, 生态风险评价及来源解析[J]. 环境科学, 2020, 41 (12): 9. DOI: 10.13227/j.hj.kx.202003018.
- [5]温泉, 赵艳民, 曹伟, 等. 潮白河中游沉积物中重金属分布, 来源及生态风险评估[J]. 环境科学研究, 2020, 33 (3): 9. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2019.07.27.