

城市河道沉积物污染评价与修复技术探讨

潘永亮 叶伟聪 黄鲲鹏 王金裕 林泽欣
珠江水利委员会珠江水利科学研究院 广东广州 510610

DOI: 10.12238/ems.v7i10.15745

[摘 要] 城市河道沉积物污染严重威胁水生生态安全与城市环境健康,亟需科学评价与有效修复。本文旨在系统探讨城市河道沉积物污染特征、评价方法及修复技术路径。研究聚焦典型污染物类型与来源,结合化学评价、生态风险评价及生物有效性评估方法,全面诊断污染程度。分析物理疏浚与覆盖、化学氧化还原与稳定化、生物微生物与植物修复等技术的原理、适用性与局限性,提出技术筛选策略。结合典型案例实践,验证修复技术的可行性与效果。结果表明,城市沉积物污染具有复合性特征,需基于污染特性与场地条件选择针对性修复技术,多技术协同应用是未来发展方向,长期监测与生态恢复效果评估对可持续治理至关重要。

[关键词] 城市河道; 沉积物污染; 污染评价; 修复技术; 生态风险

引言

城市河道作为城市生态系统的重要载体,其沉积物长期承载着来自工业废水排放、生活污水直排、地表径流冲刷及大气沉降输入的大量污染物。重金属如铅、镉、汞、砷,持久性有机污染物如多环芳烃、多氯联苯,以及过量营养盐氮、磷等在沉积物中不断富集,形成隐蔽而持久的污染源。这些

污染物不仅直接毒害底栖生物,破坏水生生态系统结构与功能,导致生物多样性下降。还可能在物理、化学或生物扰动作用下重新释放进入上覆水体,造成水质的二次污染,威胁饮用水安全与人体健康。城市化进程加剧了这一问题,不透水下垫面扩张增加了污染径流量,河道硬化阻断了自然净化过程,使得污染物在城市河道沉积物中更易累积且难以迁移降解。

表 1 城市河道沉积物常见污染物类型、来源及风险特征

污染物类型	典型代表物质	主要来源	常见浓度范围	赋存形态	潜在风险
重金属	铅 (Pb)	蓄电池制造、冶金废水、含铅汽油残留	80-400mg/kg	碳酸盐结合态 (20%-40%)、铁锰氧化物结合态	神经毒性、儿童智力损伤
	镉 (Cd)	电镀废水、颜料生产、磷肥施用	5-50mg/kg	可交换态 (15%-30%)、碳酸盐结合态	肾损伤、骨痛病、致癌
	铬 (Cr)	皮革鞣制、金属加工、染料工业	50-300mg/kg	铁锰氧化物结合态 (30%-50%)、残渣态	六价铬强致癌、致畸
	汞 (Hg)	氯碱工业、医疗器械、燃煤飞灰	0.5-10mg/kg	有机物结合态、硫化物结合态	神经毒性、水俣病
持久性有机物	多环芳烃 (PAHs)	化石燃料燃烧、焦化厂排放、沥青挥发	10-100mg/kg	吸附于有机质颗粒	强致癌性 (苯并[a]芘)
	多氯联苯 (PCBs)	电力设备绝缘油、工业热载体	0.1-5mg/kg	与有机质共价结合	内分泌干扰、免疫抑制
营养盐	总氮 (TN)	生活污水、农业径流、大气沉降	500-3000mg/kg	有机氮、铵盐吸附态	富营养化、藻华暴发
	总磷 (TP)	洗涤剂排放、畜禽养殖废水	200-1500mg/kg	铁铝结合态、钙磷矿物	水体缺氧、生物窒息

1. 城市河道沉积物污染特征与来源

1.1 典型污染物类型与赋存形态

城市河道沉积物富集的关键污染物主要包括重金属、持久性有机污染物及营养盐三大类，重金属污染以铅、镉、铬、汞、砷为代表，其浓度常超出背景值数倍至数十倍，如工业区邻近河道沉积物镉含量可达 5-50 mg/kg，铅含量达 80-400 mg/kg。这些重金属通过吸附于黏土矿物、铁锰氧化物或有机质表面进入沉积物，其赋存形态显著影响环境风险，可交换态重金属易受水体 pH 值或盐度变化影响而解吸，直接威胁水生生物。碳酸盐结合态在酸性条件下易溶解释放。铁锰氧化物结合态在沉积物厌氧环境下随氧化物还原溶解而释放高毒性三价砷或六价铬。有机物结合态在氧化条件下可能降解释放，城市河道沉积物常见污染物类型、来源及风险特征如表 1 所示。

1.2 主要污染来源解析

城市河道沉积物污染是多重人为源长期输入的累积结果，工业点源排放构成重金属与有毒有机物的核心来源，电镀厂废水携带高浓度六价铬与氰化物，冶金企业排放含铅、镉、砷的酸性废水，化工厂泄漏的有机溶剂及中间体直接注入河道并沉降。城市生活污水通过管网溢流或雨污混排输入大量污染负荷，厨余有机物促进沉积物耗氧发酵，洗涤剂中的磷酸盐贡献率达 30%-50%，排泄物携带的病原微生物在沉积物中潜伏繁殖^[1]。

1.3 城市环境对污染累积的影响

城市化进程通过改变自然水文循环与河道形态，显著加剧沉积物污染累积效应。不透水地面比例增至 70%-90% 导致地表径流系数提高 3-5 倍，雨水快速汇集冲刷城市地表污染物，排水管网系统将原本分散的面源污染集中输送至河道，形成“污染汇流加速器”。河道硬化工程破坏天然滨岸带植被的过滤与吸附功能，削弱沉积物对营养盐的截留能力，同时减少水体复氧，促进沉积物厌氧环境形成，加速重金属硫化物沉淀及有机质厌氧分解产甲烷。城市热岛效应提升水温 2-5℃，增强污染物溶解扩散速率与微生物代谢活性，促使沉

积物中结合态污染物向溶解态转化^[2]。

2. 城市河道沉积物污染评价方法

2.1 化学评价法

化学评价法通过量化污染物浓度与背景值或标准值的偏离程度，快速识别沉积物污染热点。单因子污染指数法计算单一污染物超标倍数，操作简便但忽略多污染物协同效应。内梅罗综合污染指数法整合最大污染因子与平均污染水平，突出高毒性物质的贡献，其数学表达为，

$$P_N = \sqrt{\frac{\left(\max \frac{C_i}{S_i}\right)^2 + \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{S_i}\right)^2}{2}}$$

其中 C_i 为污染物 i 的实测浓度， S_i 为其评价标准， n 为污染物种类数。该指数值 $P_N > 3$ 表明重度污染，但易受极值影响而高估风险。

2.2 生态风险评价法

生态风险评价法将污染物毒性纳入评估体系，量化其对生态系统的潜在危害。潜在生态风险指数法（RI）通过毒性响应系数加权污染物浓度，计算综合风险值，

$$RI = \sum_{i=1}^m E_r^i = \sum_{i=1}^m T_r^i \cdot \frac{C_i}{C_n^i}$$

其中 E_r^i 为单一污染物风险系数， T_r^i 为其毒性响应系数， C_i 为实测浓度， C_n^i 为参比值。风险等级划分为， $RI < 150$ （低风险）、150-300（中风险）、300-600（高风险）、 > 600 （极高风险）。该方法量化了不同污染物的毒性差异，例如镉的 T_r 高达 30，即使浓度较低也可能引发高风险。但未考虑污染物形态与生物可利用性，且 T_r 取值存在争议。

2.3 生物有效性评价

生物有效性评价揭示污染物总量中可被生物吸收利用的活性部分，是风险评估的核心深化。化学连续提取法将重金属形态划分为酸可提取态、可还原态、可氧化态及残渣态，其中酸可提取态镉占比超 30% 时底栖生物死亡率显著上升^[3]。生物测试法直接测定污染物对生物的效应，底栖生物群落指数通过敏感物种与耐受物种丰度比评估生态完整性。生物积累试验利用双壳类或鱼类暴露于沉积物，测定组织内污染物

富集量。

3. 城市河道沉积物污染修复技术

3.1 物理修复技术

物理修复通过工程手段分离污染物与沉积物基质,疏浚技术采用绞吸式或抓斗式挖泥船移除污染底泥,适用于重度污染区域,单次作业可清除90%以上表层污染物,但成本高达200–500元/ m^3 ,产生含水率80%的泥浆需脱水固化处理,且破坏底栖生境需3–5年恢复。覆盖/钝化技术通过铺设清洁材料或注入钝化剂形成物理屏障或化学屏障,隔离污染物向上覆水迁移,适用于中轻度污染河道,成本约50–150元/ m^2 ,对生态系统扰动小,但长期水力冲刷可能导致覆盖层破损,钝化剂对有机污染物效果有限。

3.2 化学修复技术

化学修复依赖试剂与污染物的反应实现去毒化,氧化还原技术中,过硫酸盐氧化剂可降解PAHs,连二亚硫酸钠还原剂将Cr(VI)转化为低毒Cr(III),药剂成本约100–300元/吨沉积物,但过量氧化剂可能杀伤水生生物,还原产物Cr(OH)₃沉淀需长期监测稳定性^[4]。稳定化/固化技术添加水泥或磷酸盐固定重金属,固化体抗压强度>1MPa,浸出毒性降低90%以上,适用于航道疏浚泥快速处置,但增容比达1.2–1.5倍,固化体填埋占用土地资源。

3.3 生物修复技术

生物修复利用生物代谢实现污染物转化或移除,微生物修复通过投加复合菌剂或生物刺激,有机物降解率可达60%/年,成本仅20–80元/ m^3 ,但低温或高浊度环境抑制菌群活性。植物修复在滨岸带种植富集植物,年提取量镉1–5mg/kg,景观效益显著,但需定期收割并安全处置含污染物的植物体。

3.4 修复技术筛选与比较

技术选择需综合污染特征、水文条件与修复目标。重金属污染优先考虑钝化覆盖或稳定化,避免疏浚引发二次释放。疏水性有机物适用氧化降解或微生物修复。浅水缓流区可部署植物修复,深水急流区宜用覆盖或化学注入。修复目标为快速清除时疏浚最有效,生态恢复优先生物修复,风险控制

则选覆盖或固化。成本约束下,生物修复单价低于物理法50%–80%,但周期延长3–5倍^[5]。典型案例显示,多技术联用可兼顾短期效果与长期稳定,修复后沉积物生态风险指数需降至150以下方达标。

4. 结语

城市河道沉积物污染评价与修复研究为城市水环境治理提供了系统性解决方案,通过解析重金属、有机物及营养盐的污染特征与来源,明确工业排放、生活污水与地表径流等关键输入途径。结合化学指数法、生态风险指数法与生物有效性评价,建立多维度污染诊断体系,精准识别高风险污染物形态。针对性地提出物理疏浚与覆盖、化学氧化还原与稳定化、生物微生物与植物修复等技术路径,阐明其适用场景与工程约束。研究成果强调基于污染特性与场地条件选择修复技术的重要性,如钝化覆盖控制中轻度重金属迁移、微生物降解有机污染物、植物修复协同景观优化等实践策略,为降低沉积物内源污染负荷、阻断污染物生态传递链提供科学依据。

【参考文献】

- [1]李淑婷,耿楠,周书桓,等.钱塘江流域下游城市河道沉积物重金属污染评价[J].现代农业科技,2024,(05):126–130+146.
- [2]王哲,王丽玲,王雅娟,等.受污染城市河道沉积物磷吸附特征及其影响因素[J].环境工程学报,2023,17(07):2412–2423.
- [3]宋丹丹,王秀莉,尚玉俊,等.郑州市河道沉积物中微塑料的污染特征[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2022,52(03):99–105.
- [4]武帆,张峰,刘晓璐,等.河道综合治理后城市水体沉积物中微塑料污染特征研究——以汾河太原城区段为例[J].环境污染与防治,2022,44(01):61–66.
- [5]涂烨楠,仲玉芳,范华,等.杭州典型城市河道污染特征及差异性分析评价[J].环境科学与技术,2016,39(S1):360–365+375.