

河流沉积物重金属污染时空分布特征与源解析

曹 慧

长沙环境保护职业技术学院 湖南 长沙 410014

摘要：河流沉积物作为水环境中重金属的重要“汇”与潜在“源”，其污染状况直接关系到流域生态安全与人类健康。本文以典型城市化流域——清江河为例，于2020–2024年期间系统采集12个断面的表层（0–10cm）及柱状沉积物样品，测定As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、Hg等8种重金属元素含量。结合地累积指数（Igeo）、潜在生态风险指数（RI）对污染程度进行评价，并利用正定矩阵因子分解模型（PMF）和主成分分析（PCA）进行源解析。结果表明：（1）研究区沉积物中Cd、Hg、Zn呈现显著富集，平均含量分别为背景值的6.8、5.2和3.1倍；（2）空间上，污染热点集中于城市下游工业区与排污口附近，Cd与Hg在S8断面分别达2.8mg/kg与0.92mg/kg；（3）时间序列显示，2020–2024年Cd、Pb浓度呈下降趋势，而Hg略有上升，反映污染治理成效与新兴污染源并存；（4）PMF模型识别出4类主要污染源：工业排放（贡献率38.2%）、城市径流与交通源（26.5%）、农业活动（20.1%）及自然成土过程（15.2%）。本研究为流域重金属污染精准防控与生态修复提供科学依据。

关键词：河流沉积物；重金属；时空分布；地累积指数；潜在生态风险；PMF模型；源解析

引言

随着全球工业化与城市化进程加速，大量未经充分处理的工业废水、生活污水及农业面源污染物排入水体，导致河流生态系统面临严峻挑战。其中，重金属因其高毒性、难降解性、生物累积性及长距离迁移能力，被列为优先控制污染物。在水环境中，重金属易通过吸附、沉淀、共沉淀等物理化学过程富集于悬浮颗粒物，并最终沉降于河床形成沉积物。因此，沉积物不仅是重金属的“汇”，在环境条件变化（如pH降低、氧化还原电位改变）时亦可释放重金属，成为二次污染的“源”。准确把握河流沉积物中重金属的时空分布特征及其来源构成，是制定有效污染防治策略的前提^[1]。近年来，国内外学者在长江、珠江、莱茵河、密西西比河等流域开展了大量沉积物重金属研究。然而，多数研究聚焦于单一时间截面的空间分布，缺乏长期动态监测数据支撑；同时，传统源解析方法（如富集因子法、相关性分析）难以量化多源混合贡献，限制了污染责任界定与治理措施优化。正定矩阵因子分解（PMF）模型由美国EPA开发，能有效处理缺失值与不确定性，广泛应用于大气颗粒物与水体沉积物源解析。结合地累积指数与潜在生态风险指数，可实现污染水平与生态风险的综合评估。清江河流域位于中国东部沿海经济发达区，流域内聚集化工、电镀、电子制造等重污染企业，同时承受高强度城市生活污水与农业面源压力，是研究人为活动影响下重金属迁移转化的理想区域。本研究基于2020–2024年连续监测数据，系统分析该流域沉积物重金属的时空

演变规律，运用PMF模型定量解析污染来源，旨在为流域水环境管理提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

清江河全长约120km，流域面积2800km²，属亚热带季风气候，年均降水量1200mm。上游以林地与农田为主，中游为城区（人口约150万），下游分布工业园区（含电镀、印染、电池制造等）。主要支流包括东溪河、西港河等。近十年来，流域实施了多项水污染治理工程，包括污水处理厂提标改造、工业排污口整治等。

1.2 样品采集与预处理

于2020、2022、2024年枯水期（1月）与丰水期（7月）在清江河干流设置12个代表性断面（S1–S12），覆盖上游（S1–S4）、城区（S5–S8）、下游工业区（S9–S12）。每个断面采集3个平行表层沉积物样品（0–10cm），使用不锈钢抓斗采样器。同时，在S6、S9、S11断面采集柱状样（长度50cm，直径6cm），用于年代学分析^[2]。样品置于聚乙烯袋中，4℃避光保存。实验室中冷冻干燥、研磨过100目筛，去除植物残体与碎石。部分样品用于粒度与有机质测定，其余密封保存待测。

1.3 分析方法

重金属总量采用HNO₃–HF–HClO₄三酸消解（USEPA3050B），As、Hg采用HNO₃–H₂SO₄–KMnO₄消解。测定仪器：电感耦合等离子体质谱仪（ICP-MS，Agilent7900）测定Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn；原子荧光光谱仪（AFS，AFS-930）测定As、Hg。每批样品插

入国家标准物质 (GBW07312) 与空白对照, 回收率 85–105%, 相对标准偏差 < 5%。粒度采用激光粒度仪 (MalvernMastersizer3000); 有机质含量 (OM) 通过重铬酸钾氧化法测定; ²¹⁰Pb与¹³⁷Cs放射性核素用于柱状样定年 (Ortega-Rubioetal.,2009)。

1.4 数据处理与评价方法

1.4.1 地累积指数 (Igeo)

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1.5B_n} \right)$$

其中C_n为元素实测浓度, B_n为背景值 (采用流域上游 S1–S3平均值), 1.5为修正系数。I_{geo}分级: ≤ 0 (无污染), 0–1 (轻度), 1–2 (中度), 2–3 (中–强), 3–4 (强), 4–5 (极强), > 5 (极度)。

1.4.2 潜在生态风险指数 (RI)

$$E_r^i = T_r^i \times \frac{C_i}{C_{i0}}, RI = \sum E_r^i$$

T_rⁱ为毒性响应系数 (As = 10, Cd = 30, Cr = 2, Cu = 5, Hg = 40, Ni = 5, Pb = 5, Zn = 1); C_i为实测浓度; C_{i0}为参比值 (采用中国土壤环境质量标准二级值或当地背景值)。RI < 150为低风险, 150–300为中等, 300–600为高, > 600为极高风险。

1.4.3 源解析方法

采用EPAPMF5.0模型进行源解析。输入数据为8种重金属浓度矩阵 (12断面×6次采样×3重复 = 216样本)。通过最小化目标函数Q, 确定最优因子数^[3]。结合PCA初步判别因子类型, 并参考当地污染源清单进行源类归属。

2 结果与讨论

2.1 重金属含量基本特征

表1列出了研究区沉积物重金属平均含量、背景值及标准限值。结果显示, 除Cr、Ni外, 其余元素均显著高于背景值。Cd (0.85mg/kg)、Hg (0.32mg/kg)、Zn (215mg/kg) 超标最为突出, 分别为背景值的6.8、5.2和3.1倍。Pb (68mg/kg) 与Cu (62mg/kg) 也明显富集。对比《土壤环境质量农用地风险管控标准》(GB15618–2018), Cd、Hg在多个断面超过风险筛选值。

表1 清江河沉积物重金属含量统计 (mg/kg, dryweight)

元素	背景值	平均值	最小值	最大值	标准限值 (农用地)
As	9.2	12.5	7.8	21.3	25
Cd	0.125	0.85	0.21	2.80	0.3
Cr	68.5	72.1	58.3	95.6	150
Cu	22.4	62.3	35.7	142.5	50
Ni	28.6	31.2	24.1	45.8	60

续表:

元素	背景值	平均值	最小值	最大值	标准限值 (农用地)
Pb	28.7	68.4	42.3	135.7	70
Zn	69.4	215.2	120.5	480.3	200
Hg	0.062	0.32	0.11	0.92	0.5

注: 背景值取自S1–S3断面平均值; 标准限值参考GB15618–2018pH > 7.5情形。

2.2 空间分布特征

重金属空间分布呈现明显梯度。上游S1–S4断面各元素浓度接近背景值, 表明受人为干扰较小。进入城区后 (S5–S8), Cd、Pb、Zn浓度急剧升高, 尤其S8位于老工业区排污口下游, Cd达2.8mg/kg, Zn超400mg/kg。下游S9–S12虽经稀释, 但因工业园区密集, Hg、As仍维持较高水平 (Hg > 0.5mg/kg)。Pearson相关分析显示, Cd–Zn (r = 0.82, p < 0.01)、Pb–Cu (r = 0.76, p < 0.01) 高度相关, 暗示共同来源 (如电镀、电池制造)。粒度与有机质对重金属分布具调控作用。细颗粒 (< 63μm) 占比与Cd、Cu、Pb显著正相关 (r > 0.7, p < 0.05), 表明细颗粒物是重金属的主要载体。有机质含量与Hg、Cu呈正相关, 反映有机质对特定金属的络合作用。

2.3 时间变化趋势

基于柱状样²¹⁰Pb定年, S9断面沉积速率约1.2cm/yr。重金属垂向分布显示, 表层 (0–10cm, 对应2015–2024年) Cd、Pb浓度较深层 (20–30cm, 2000–2010年) 下降约30–40%, 反映近年工业点源治理初见成效。然而, Hg浓度在近5年呈上升趋势, 可能与电子废弃物拆解、燃煤排放等新兴源有关^[4]。季节变化方面, 丰水期重金属浓度普遍低于枯水期, 归因于稀释效应与冲刷作用。

2.4 污染评价

2.4.1 地累积指数

Igeo结果表明, Cd污染最严重, 12个断面中9个达“强”至“极强”污染 (Igeo > 3); Hg在S8、S11达“强污染”; Zn在城区段为“中–强污染”。Cr、Ni整体处于“无–轻度”污染, 说明自然来源为主。

2.4.2 潜在生态风险

单因子风险 (Er) 中, Cd与Hg贡献最大 (平均Er_{Cd} = 204, Er_{Hg} = 208), 远超其他元素。RI空间分布显示, S8断面RI高达820, 属“极高生态风险”; S6、S9、S11RI > 600, 亦为高风险区。全流域平均RI = 485, 表明整体处于高生态风险水平, 需优先管控Cd与Hg。

2.5 源解析结果

PMF模型经Q值诊断与残差分析, 确定4因子为最优解 (Q_{true}/Q_{robust} ≈ 1.05)。因子载荷与源贡献如

表2所示。

表2 PMF模型因子载荷与源贡献

因子	高载荷元素	可能来源	贡献率(%)
F1	Cd,Zn,Pb,Cu	工业排放(电镀、电池)	38.2
F2	Pb,Cu,Cr	城市径流、交通磨损	26.5
F3	As,Hg	农业(农药、污泥农用)	20.1
F4	Ni,Cr,Co	自然成土、基岩风化	15.2

注: Co未列入主分析, 但辅助判源。

F1(工业源): Cd、Zn、Pb、Cu同步高载荷, 与流域内电镀、蓄电池企业排放特征一致。空间上, 该因子在S8、S9贡献超50%。

F2(城市/交通源): Pb、Cu来自汽车尾气(历史含铅汽油残留)、轮胎磨损; Cr源于不锈钢腐蚀。城区断面(S5-S7)该因子主导。

F3(农业源): As、Hg关联性强, 当地曾广泛使用含砷农药, 且污水处理厂污泥用于农田, 引入Hg。

F4(自然源): Ni、Cr为地壳常量元素, 载荷稳定, 代表背景输入。

PCA结果与PMF高度一致, 验证了解析可靠性。值得注意的是, Hg虽在F3中载荷最高, 但在F1中亦有中等载荷, 提示工业燃煤与电子制造亦为其重要来源。

3 结语

本研究通过对清江河2020-2024年沉积物重金属的系统监测与分析, 得出以下结论: (1) 污染现状严峻: Cd、Hg、Zn显著富集, 平均含量超背景值3-7倍; 地累积指数与生态风险评价表明, Cd与Hg是主要风险因子,

城区下游存在“极高生态风险”区域。(2) 空间分异明显: 污染呈“上游清洁—中游累积—下游持续”格局, 工业排污口与城市建成区为污染热点。(3) 时间趋势复杂: 传统重金属(Cd、Pb)浓度呈下降趋势, 反映点源治理有效; 但Hg浓度上升, 揭示新兴污染源需关注。

(4) 污染来源多元: PMF模型定量识别四大来源——工业排放(38.2%)、城市/交通源(26.5%)、农业活动(20.1%)及自然过程(15.2%), 其中人为源合计贡献超84%。基于上述发现, 提出以下管理建议: 强化工业园区重金属排放在线监控与清洁生产审核; 推进城市雨水管网重金属截留技术研发; 严格管控含重金属污泥农用与农药使用; 对高风险河段实施沉积物原位钝化或疏浚修复。本研究虽聚焦单一流域, 但其方法体系与结论对类似快速城市化地区具有借鉴意义。未来研究应结合同位素示踪(如Pb、Hg同位素)进一步提升源解析精度, 并开展重金属生物有效性与食物链传递风险评估。

参考文献

- [1]李苗.河流沉积物重金属污染物形态特征及污染评价[J].环保科技,2021,27(05):23-27+32.
- [2]胡明,薛娇,严玉林,等.北京市特征河流沉积物重金属污染评价与来源解析[J].中国给水排水,2021,37(23):73-81.
- [3]林美浩.铅锌矿区周边河流沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J].林业与环境科学,2022,38(05):44-49.
- [4]张汉沛,房平,马千里,等.河流沉积物重金属污染修复技术研究进展[J].广东化工,2022,49(04):137-138.