

# 河流沉积物重金属污染生态风险评估方法

刘志奇

湖北迅捷检测有限公司 湖北 仙桃 433000

**【摘要】**：河流沉积物是重金属的“汇”与“源”，其重金属赋存状态直接关联水生态系统稳定与人类健康。随着工业扩张、农业面源污染加剧，沉积物重金属累积引发的生态毒性问题日益凸显，成为流域环境治理的核心痛点。传统污染评价侧重含量分析，难以精准表征生物有效性与潜在风险。基于此，本文梳理当前主流生态风险评估方法，对比各技术路径的适用性与局限性，旨在为流域重金属污染精准管控、生态修复方案制定提供理论支撑与实践参考。

**【关键词】**：河流沉积物；重金属污染；生态风险；评价方法

DOI:10.12417/2811-0722.26.02.075

## 引言

对河流沉积物中重金属潜在生态风险的评价，是建立沉积物质量控制基准、环境管理信息系统和专家鉴定系统的关键要素，也是水环境环境规划、预测、管理和污染防治的主要参考依据。到目前为止，生态风险评估还没有一种公认的可广泛接受的模型或方法。因此，在实际应用中应结合评价目的、评价区域沉积物和重金属的特性，选择适当的评价方法。

## 1 河流沉积物重金属污染生态风险分析

### 1.1 生物毒害风险

沉积物中生物可利用态重金属易被底栖生物摄食吸收，通过生物富集作用在体内累积，引发细胞损伤、繁殖障碍甚至死亡，破坏底栖生物群落结构稳定性。这种毒害效应可沿食物链逐级放大，影响鱼类、鸟类等更高营养级生物，导致流域生物多样性下降。同时，通过食物链传导还对生态系统食物链完整性构成了严重威胁。

### 1.2 水体二次污染风险

沉积物作为重金属“汇”，在水文水环境条件变化时易转化为“源”。当河道pH值下降、溶解氧降低或水流扰动增强时，沉积物中吸附态、结合态重金属会重新释放到上覆水体，导致水体重金属浓度反弹，加剧水质恶化。这种二次污染具有隐蔽性与滞后性，可能使已治理的河道水质再次超标，增加流域水环境管控难度，对依赖河流供水的区域构成间接水质安全隐患。

### 1.3 土壤-植被系统迁移风险

在河流泛滥、引水灌溉等场景下，受污染沉积物易扩散至河岸周边土壤，导致土壤重金属含量超标。重金属可通过土壤-植物系统迁移，被农作物吸收累积，不仅抑制作物生长、降低产量与品质，还会通过农产品摄入途径威胁人类健康。此外，污染土壤中的重金属还可能渗入地下水，进一步扩大污染范围，形成“沉积物-土壤-地下水”的跨介质污染链条。

## 1.4 人类健康潜在风险

人类可通过多种途径暴露于沉积物重金属中，引发潜在健康风险。直接暴露包括河岸农业生产、娱乐活动中的皮肤接触，或儿童误食沉积物等；间接暴露则主要通过食用受污染的水产品、农产品，或饮用受二次污染的水源。重金属在人体内难以代谢，长期累积可损伤肾脏、肝脏、神经系统等，诱发慢性疾病，甚至增加癌症发病风险，对流域周边居民健康构成持续性威胁。

## 2 当前河流沉积物重金属污染主流生态风险评估方法

### 2.1 地累积指数法：基于浓度的污染程度直观表征

地累积指数法（Index of Geo-accumulation, I）由德国科学家 Müller 于 1969 年提出，是最早用于沉积物重金属污染评价的方法之一，其核心思路是通过对比沉积物中重金属的实测浓度与背景值，量化人为活动对重金属富集的贡献程度，从而直观判断污染级别。该方法的核心公式为： $I = \log[C/(k \times B)]$ ，其中 C 为沉积物中第 n 种重金属的实测浓度（mg/kg），B 为该重金属的地球化学背景值（mg/kg），k 为修正系数（通常取 1.5），用于校正自然成岩作用等非人为因素对重金属浓度的影响。地累积指数法将污染程度划分为 7 个等级，从  $I \leq 0$ （无污染）到  $I > 5$ （极强污染），等级划分清晰，计算过程简便，能够快速实现对单一重金属污染程度的定性性与半定量评价，因此被广泛应用于河流沉积物重金属污染的初步筛查。例如，在对某城市内河沉积物的研究中，通过地累积指数法计算得出 Cd 的 I 值为 3.2，属于强污染级别，而 Cr 的 I 值为 -0.8，属于无污染级别，明确了该河流沉积物中重金属污染的核心元素。但地球化学背景值的选取存在地域差异，不同区域的背景值差异可能导致评价结果偏差，且未考虑重金属的生物有效性。同时，该方法仅关注单一重金属的浓度富集，无法反映多种重金属的联合污染效应，也不能直接表征重金属对生态系统的潜在危害程度，因此适用于污染现状的初步诊断，难以作为生态风险管控的直接依据。

## 2.2 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法 (Potential Ecological Risk Index, RI) 由瑞典科学家 Hakanson 于 1980 年提出, 该方法在考虑重金属浓度的基础上, 引入毒性系数与污染系数, 可综合评价多种重金属联合生态风险, 弥补了地累积指数法仅关注浓度的不足。核心公式分三层: 一是单种重金属污染系数  $C=C/C$  ( $C$  为实测浓度,  $C$  为背景值); 二是单种风险系数  $E=T \times C$  ( $T$  为毒性响应系数,  $Hg=40$ 、 $Cd=30$  等); 三是综合风险指数  $RI=\sum E$ 。风险等级按  $E$  和  $RI$  划分, 低至高风险梯度明确。该方法结合浓度与毒性, 能反映协同效应, 应用广泛。具体案例数据见表 1:

表 1 潜在生态风险指数法案例表

重金属	实测浓度 (mg/kg)	污染系数 C	风险系数 E	风险等级
Cd	4.8	7.6	228	很强风险
Pb	65	2.3	11.5	低风险
综合 RI	-	-	342	强风险

案例中 Cd 为主要风险源,  $RI=342$  判定为强风险, 为污染管控提供靶点。但该方法  $T$  固定, 未考虑介质差异与生物可利用性, 对底栖生物危害表征有局限。

## 2.3 沉积物质量基准法

沉积物质量基准 (Sediment Quality Guidelines, SQGs) 是指沉积物中重金属对底栖生物产生特定有害效应 (如急性毒性、慢性毒性、生长抑制等) 的浓度阈值, 核心思路是通过对比重金属实测浓度与基准值, 判断沉积物对底栖生物的潜在危害程度, 实现从“浓度富集”到“生物效应”的关联评价。国际上主流基准体系包括美国 EPA 的阈值效应浓度 (TEL)、可能效应浓度 (PEL) 及加拿大的最低效应水平 (LEL)、严重效应水平 (SEL)。评价逻辑为:  $C < TEL/LEL$  时低风险,  $TEL/LEL \leq C < PEL/SEL$  时中等风险,  $C \geq PEL/SEL$  时高风险。为精准量化风险, 还可通过效应区间低浓度 (ERL)、效应区间中浓度 (ERM) 计算风险概率:  $P=[C-ERL]/[ERM-ERL]$  ( $ERL \leq C \leq ERM$ ),  $C < ERL$  时  $P=0$ ,  $C > ERM$  时  $P=1$ 。该方法直接关联浓度与生物效应, 评价结果具明确生态意义, 典型应用案例数据见表 2:

表 2 沉积物质量基准法典型应用案例表

重金属	实测浓度 (mg/kg)	EPA 基准值 (mg/kg)	加拿大基准值 (mg/kg)	风险等级 (EPA 体系)	风险概率 (ERL-ERM 体系)
Zn	185	TEL=123, PEL=271	LEL=124, SEL=270	中等风险	0.32 (ERL=120, ERM=270)
Cu	42	TEL=31.6, PEL=149	LEL=35, SEL=197	中等风险	0.18 (ERL=34, ERM=209)
Pb	58	TEL=35.8,	LEL=30,	中等	0.25

		PEL=128	SEL=110	风险	(ERL=46.7, ERM=218)
--	--	---------	---------	----	---------------------

案例中三种重金属均处于中等风险水平, 风险概率直观量化了危害发生可能性。但该方法存在缺陷: 不同基准体系阈值差异大, 基准值多基于单一物种实验室试验, 难反映自然河流复杂群落与环境条件的影响, 且无法评价联合毒性及未建立基准的重金属, 限制了复杂污染场景的应用。

## 2.4 风险评估编码法

风险评估编码法 (Risk Assessment Code, RAC) 由 Perin 等提出, 该方法的核心创新在于关注重金属的化学形态而非总浓度, 通过分析重金属不同形态的含量占比, 评价其生物可利用性, 进而表征潜在生态风险。重金属在沉积物中主要以可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机质结合态和残渣态五种形态存在, 其中可交换态和碳酸盐结合态为生物有效态 (易被生物吸收利用, 毒性较强), 铁锰氧化物结合态和有机质结合态为潜在生物有效态 (在环境条件变化时可转化为有效态), 残渣态为非生物有效态 (稳定性强, 毒性极低)。RAC 的计算公式为:  $RAC=(\text{生物有效态含量}/\text{重金属总含量}) \times 100\%$ , 并根据 RAC 值划分风险等级:  $RAC < 1\%$  为无风险,  $1\% \leq RAC < 10\%$  为低风险,  $10\% \leq RAC < 30\%$  为中等风险,  $30\% \leq RAC < 50\%$  为高风险,  $RAC \geq 50\%$  为极高风险。该方法突破了传统方法仅关注总浓度的局限, 明确了“形态决定毒性”的核心逻辑, 能够更精准地反映重金属对生态系统的实际危害。例如, 在对某矿区周边河流沉积物的评价中, Cd 的总浓度为 5.2 mg/kg, 地累积指数法判定为强污染, 但通过形态分析发现其生物有效态占比仅为 8% ( $RAC=8\%$ ), 判定为低风险; 而 Pb 的总浓度为 45mg/kg, 地累积指数法判定为中等污染, 但生物有效态占比达到 35% ( $RAC=35\%$ ), 判定为高风险, 纠正了仅基于总浓度评价带来的偏差。但该方法也存在不足: 一方面, 重金属形态分析的实验操作复杂、耗时较长, 且不同提取方法 (如 BCR 三步法、Tessier 连续提取法) 的提取效率存在差异, 可能导致 RAC 值计算偏差; 另一方面, 该方法仅考虑了化学形态的生物可利用性, 未结合实际的生物毒性试验结果, 无法完全反映重金属在生物体内的累积和转化过程, 且对于多种重金属的联合形态效应缺乏有效的评价手段, 不能在大规模污染调查中应用。

## 2.5 生物有效性评价法

生物有效性评价法是通过测定重金属在生物体内的累积量或生物对重金属的毒性响应, 直接表征沉积物重金属污染生态风险的方法, 其核心优势在于能跨越“浓度-形态-生物效应”的间接关联, 直接反映重金属对生态系统的实际危害。该方法主要分为生物累积试验与生物毒性试验, 核心评价指标包括生物富集系数 (BCF)、生物累积系数 (BAF)、半数致死浓度 (LC50)、半数效应浓度 (EC50) 等。其中生物富集系数计

算公式为： $BCF=C/C$ （ $C$ 为生物体内累积浓度， $C$ 为沉积物实测浓度）， $BCF$ 值越高风险越高； $EC50$ 值越低，重金属毒性越强。该方法依托直接生物试验数据，结果可靠性与生态相关性强，典型应用案例见表3：

表3 生物有效性评价法典型应用案例表

重金属	测试生物	沉积物实测浓度 (mg/kg)	生物体内累积浓度 (mg/kg)	BCF值	EC50 (mg/kg)	风险表征
Cu	河蚬	32	8960	280	1.2	高富集、中高毒性
Zn	河蚬	120	10200	85	5.8	低富集、低毒性
Cd	摇蚊幼虫	4.8	-	-	0.8	极高毒性

案例清晰表明Cu富集能力与Cd毒性突出，为精准治理提供靶点。但该方法受生物种类、环境条件等影响大，试验成本高、周期长，难以适用于大规模污染调查，单一生物结果也无法反映群落整体风险。

### 3 河流沉积物重金属污染生态风险评价方法的应用策略

#### 3.1 优化评价体系，适配流域特征

评价体系的适配性直接决定风险评估的科学性，需结合流域的自然地理条件、水文特征及污染源，针对性优化评价指标与权重。在选择评价方法时，应避免单一方法的局限性，采用层次分析法结合模糊综合评价等复合模型，整合重金属含量、生物有效性、生态毒性等多维度指标。过程中，需根据流域是否为饮用水源地、农业灌溉区等功能定位，调整指标优先级，例如对饮用水源地周边流域，重点强化人体健康相关风险指标的权重，通过指标体系的动态优化，确保评价结果与流域生态保护需求精准匹配。

#### 3.2 科学设计采样布点，保障样本代表性

采样布点的合理性是获取可靠数据的前提，需遵循“全域覆盖、重点突出”的原则，结合河流形态、水流动力及污染汇

入点分布设计采样方案。相关部门需先通过前期调研明确流域内工业排污口、城镇污水处理厂出水口等关键污染区域，在这些区域加密采样点密度，并兼顾河流上中下游的空间差异性，设置背景对照点与污染核心点，确保样本能够全面反映流域沉积物重金属污染的空间分布特征。另外，还需考虑采样深度，分层采集表层与深层沉积物样本，为分析污染累积过程提供数据支撑。

#### 3.3 强化数据精准分析，提升评价可靠性

数据处理与分析的精准度是风险评价的核心保障，需建立全流程质量控制体系，从样品预处理、检测分析到数据校正全环节严格把控。实施过程中，采用标准化的样品前处理方法降低干扰因素，选用高精度检测仪器确保重金属含量检测结果的准确性，同时通过平行样测定、空白实验等方式验证数据可靠性。在数据解读阶段，结合统计学方法剔除异常数据，运用空间插值、相关性分析等技术挖掘数据背后的污染规律，明确重金属污染的主要来源与扩散路径，为风险等级划分提供坚实的数据支撑，避免因数据偏差导致评价结果失真。

#### 3.4 推动成果转化应用，衔接污染管控实践

评价成果的有效转化是生态风险评价的最终目的，需建立评价结果与污染管控措施的联动机制，提升评价的实践价值。相关部门要将风险评价结果分类分级呈现，针对高风险区域制定专项管控方案，明确污染治理的重点区域、关键污染物及整改时限。同时，为流域生态修复提供科学依据，根据评价结果筛选适合的修复技术与植物品种，针对性开展沉积物重金属修复工程。另外，还需将评价成果纳入流域环境管理体系，为环境监管、规划编制等工作提供数据参考，形成“评价-管控-修复-监管”的闭环管理模式，切实发挥生态风险评价在流域生态环境保护中的支撑作用。

总而言之，河流沉积物重金属污染生态风险评价是串联污染溯源、危害评估与治理修复的关键纽带。因此，未来研究还需强化多介质耦合模型与原位监测技术的融合，以更贴合实际的评价范式，守护水生态系统的健康稳定，助力流域生态环境的可持续发展。

### 参考文献：

[1] 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.  
 [2] 周芬琦.安徽庐江钟山尾矿区河流沉积物重金属污染及生态风险评价[D].安徽大学,2020.  
 [3] 葛姘姘.苏州市吴江区农村河流水、沉积物和水生生物中重金属污染情况与生态健康风险评价[J].世界最新医学信息文摘,2019,19(46):293-296.  
 [4] 马牧源,于一雷,郭嘉,等.襄阳入江中小河流表层沉积物重金属污染特征及其潜在的生态风险评价[J].环境科学学报,2019,39(09):3144-3153.  
 [5] 李政,余璨,黄香,等.河流沉积物重金属研究方法进展[J].绿色科技,2018,(02):62-64+66.