

## 黑臭水体底泥重金属污染评价及治理方法

王毅<sup>1\*</sup>, 徐家琦<sup>2</sup>, 金灿<sup>3</sup>, 黄俊伟<sup>4</sup>, 代知广<sup>4</sup>

<sup>1</sup>三川德青科技有限公司 湖北武汉

<sup>2</sup>中煤科工集团武汉设计研究院有限公司 湖北武汉

<sup>3</sup>武汉智汇元环保科技有限公司 湖北武汉

<sup>4</sup>武汉格桑花环境科技有限公司 湖北武汉

**【摘要】**总结了黑臭水体底泥重金属污染的评价方法, 包括潜在生态风险指数法、地积累指数法、内梅罗污染指数法、污染负荷指数法、富集因子法等; 归纳了黑臭水体底泥重金属污染的治理方法, 包括异位治理法和原位治理法; 最后对黑臭水体底泥重金属的污染评价和治理方法进行了展望。

**【关键词】**黑臭水体; 底泥; 重金属; 污染评价; 治理

### The methods of the assessment and treatment of heavy metal pollution in sediment of black and odorous water body

Yi Wang<sup>1\*</sup>, Jiaqi Xu<sup>2</sup>, Can Jin<sup>3</sup>, Junwei Huang<sup>4</sup>, Zhiguang Dai<sup>4</sup>

<sup>1</sup>SafeCleen Technologies Co., Ltd., Wuhan, China

<sup>2</sup>Wuhan Design & Research Institute Co., Ltd of CCTEG, Wuhan, China

<sup>3</sup>Wuhan Zhihuiyuan Environmental Protection Technology Co., Ltd., Wuhan, China

<sup>4</sup>Wuhan Gesanghua Environmental Technology Co., Ltd., Wuhan, China

**【Abstract】** The assessment methods of heavy metal pollution in sediment of black and odorous water body were summarized, including the potential ecological risk index, the geoaccumulation index, the nemerow pollution index, the pollution load index and the enrichment factor method. The treatment methods of heavy metal pollution in the sediment of black and odorous water body were summarized, including heterotopia treatment and in Situ treatment. Finally, the pollution assessment and treatment methods of heavy metals in the sediment of black and odorous water body were prospected.

**【Keywords】** Black and odorous water body; Sediment; Heavy metals; Pollution assessment; Treatment

随着近年来我国工业的迅猛发展和城镇化的加剧, 人们的生活质量不断提升, 但工农业废水、生活污水等生产生活污水日益增大的排放量已经超越水体的自净能力, 导致水体出现黑臭恶化现象。黑臭水体中的氮、磷营养盐和有机物等受到了广泛关注, 与此同时, 黑臭水体普遍还受到重金属污染<sup>[1]</sup>, 而重金属又因其隐蔽性、长期性、不可逆性及伴生性等<sup>[2]</sup>问题逐渐引起人们的重视。底泥是黑臭水体中污染物的源与汇, 进入水体的重金属等污染物最终会沉积并积累至底泥中, 在某些环境条件下又会释放造成水体的二次污染。为深入了解重金属的污

染情况, 总结了黑臭水体底泥重金属污染评价方法, 归纳了黑臭水体底泥重金属污染治理方法, 以期在黑臭水体底泥重金属污染的综合防治提供科学依据。

#### 1 底泥重金属污染评价方法

##### 1.1 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法是由瑞典的 Hakanson 在 20 世纪 80 年代初提出的一种评价底泥重金属潜在生态危害的方法, 该法既可以对底泥中某单种重金属的污染程度及潜在生态风险进行定量计算, 也可以对底泥中多种重金属的综合污染程度与综合潜在

生态风险实现量化, 其计算方法如下:

$$C_f^i = \frac{C_{si}}{C_{0i}} \quad (\text{公式 1-1})$$

$$E_r^i = T_f^i \times C_f^i \quad (\text{公式 1-2})$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i \quad (\text{公式 1-3})$$

式中各指标含义如下:  $C_f^i$ ——黑臭水体底泥中重金属  $i$  的污染系数;  $C_{si}$ ——底泥中第  $i$  种重金属的实测总含量;  $C_{0i}$ ——底泥中重金属  $i$  的评价参比值, 可选取当地土壤重金属元素背景值作为评价参比值;  $E_r^i$ ——底泥中某重金属  $i$  的潜在生态风险参数;  $T_f^i$ ——第  $i$  种重金属的毒性响应因子 (表 1), 表示各重金属的毒性水平与环境敏感程度;  $RI$ ——底泥中多种重金属的潜在生态风险指数。根据  $C_f^i$ 、 $E_r^i$ 、 $RI$  值可对黑臭水体底泥重金属的污染状况和潜在生态风险进行分级 (表 2)。该法综合考量了底泥中重金属的总含量、毒性、生态环境效应及区域背景值的影响, 但忽视了底泥中多种重金属复合污染时相互间的加权、协同或拮抗作用<sup>[3]</sup>。

表 1 底泥重金属的毒性响应系数( $T_f^i$ )

重金属	Hg	Cd	As	Pb	Cu	Zn	Cr	Ni	Mn
$T_f^i$	40	30	10	5	5	1	2	5	1

表 2  $E_r^i$ 、 $RI$  与污染程度的关系

$C_f^i$	污染程度	$E_r^i$	潜在生态风险	$RI$	潜在生态风险
<1	低	<40	低	<150	低
1~3	中等	40~80	中	150~300	中
3~6	重	80~160	较高	300~600	较高
≥6	严重	160~320	高	600~1200	很高
		≥320	很高	≥1200	极高

### 1.2 地积累指数法

地积累指数法是由德国的 Muller 在 20 世纪 60 年代末提出的一种通过定量指标描述底泥中单个重金属元素污染程度的方法, 其计算表达式如下:

$$I_{geoi} = \log_2 (C_n/kB_n) \quad (\text{公式 1-4})$$

式中各指标含义如下:  $I_{geoi}$ ——黑臭水体底泥中重金属  $i$  的地累积指数;  $C_n$ ——底泥中该重金属  $i$  的实测

总含量;  $B_n$ ——底泥中该重金属  $i$  的地球化学背景值, 可选取当地土壤重金属元素背景值;  $k$ ——综合考虑自然成岩作用、人类活动可能导致重金属背景值变动的系数, 实际评价过程通常取 1.5。根据  $I_{geoi}$  值可将黑臭水体重金属的污染等级分为 0~6 级 (表 3)。该法可在资料不足的情况下对黑臭水体底泥重金属的污染状况实现有效评价, 同时还综合考虑了自然成岩作用、人类活动可能造成的底泥重金属背景值变动情况, 但对多种重金属的综合污染水平无法评估, 对不同重金属间毒性效应的差异也未进行考虑, 且  $k$  值的选取难以保证科学和准确。

表 3 底泥重金属污染等级与  $I_{geoi}$  的关系

污染程度	无	轻度	偏中度	中度	偏重	重	严重
$I_{geoi}$	≤0	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	>5
级别	0	1	2	3	4	5	6

### 1.3 内梅罗污染指数法

内梅罗污染指数法是国内外评估底泥重金属综合污染程度较常用的方法, 其计算方法如下:

$$P_i = \frac{C_{si}}{C_{0i}} \quad (\text{公式 1-5})$$

$$P = \sqrt{\frac{(P_{i,avr}^2 + P_{i,max}^2)}{2}} \quad (\text{公式 1-6})$$

式中各指标含义如下:  $P_i$ ——黑臭水体底泥中重金属  $i$  的单项污染系数;  $C_{si}$ ——底泥中第  $i$  种重金属的实测总含量;  $C_{0i}$ ——底泥中重金属  $i$  的评价参比值, 可选取当地土壤重金属元素背景值作为评价参比值;  $P_{i,avr}$ —— $P_i$  的平均值;  $P_{i,max}$ —— $P_i$  的最大值;  $P$ ——内梅罗污染指数。根据  $P$  可将黑臭水体底泥重金属的污染程度分为 4 级 (表 4)。该法兼顾了单项污染指数的最高值和平均值, 突出了污染程度最大的重金属对综合污染情况的贡献, 可避免平均作用削减该重金属的权值, 但未考虑到不同重金属间的毒性差异及污染权重。

表 4 内梅罗污染指数与底泥重金属污染程度分级标准

污染等级	无污染	轻度污染	中度污染	重度污染
$P$	<1	1~2.5	2.5~7	≥7

### 1.4 污染负荷指数法

污染负荷指数法是 Tomlinson 等提出的一种全

面评价底泥中多种重金属污染水平的方法, 其计算公式如下:

$$F_i = C_{si} / C_{0i} \quad (\text{公式 1-7})$$

$$I_{PL} = \sqrt[m]{F_1 \times F_2 \times \dots \times F_i \times \dots \times F_m} \quad (\text{公式 1-8})$$

$$I_{PLzone} = \sqrt[n]{I_{PL1} \times I_{PL2} \times \dots \times I_{PLj} \times \dots \times I_{PLn}} \quad (\text{公式 1-9})$$

式中各指标含义如下:  $F_i$ ——黑臭水体底泥重金属  $i$  的最高污染系数;  $C_{si}$ ——底泥中第  $i$  种重金属的实测总含量;  $C_{0i}$ ——底泥中重金属  $i$  的评价参比值, 通常选用全球页岩平均值;  $I_{PL}$ ——某一站位多种重金属的综合污染负荷指数;  $m$ ——参评重金属的总种类数;  $I_{PLzone}$ ——某黑臭水体区域多种重金属的综合污染负荷指数;  $n$ ——参评区域的采样站位总数。按照  $I_{PLzone}$  可将黑臭水体重金属污染状况分为 0~3 级 (表 5)。该法可以直观方便地表达黑臭水体区域底泥中多种重金属的时空变化趋势, 避免了直接加和造成的评价结果歪曲, 但未对不同重金属污染源存在的背景差异进行考虑。

表 5 污染负荷指数与污染程度之间的关系

$I_{PLzone}$	<1	1~2	2~3	≥3
污染等级	0	1	2	3
污染程度	无污染	中等污染	强污染	极强污染

### 1.5 富集因子法

富集因子法是由大气颗粒物痕量金属来源分析发展而来, 在评估人为污染造成的底泥重金属污染情况方面比较准确有效, 其计算公式如下:

$$EF = \frac{C_{si} / C_{ref}}{B_{si} / B_{ref}} \quad (\text{公式 1-10})$$

式中各指标含义如下:  $EF$ ——黑臭水体底泥中重金属  $i$  的富集因子;  $C_{si}$ ——底泥中第  $i$  种重金属的实测总含量;  $C_{ref}$ ——底泥参比元素 (可选取 Fe、Al、Li、Sc、Zr、TOC 等) 的实测含量;  $B_{si}$ ——未受污染底泥的重金属  $i$  总含量;  $B_{ref}$ ——未受污染底泥的参比元素总含量。按照  $EF$  可将底泥重金属污染程度分成 5 级 (表 6)。该法通过引入参比元素消除了底泥粒度与矿物组成对重金属总含量变化的影响, 结合年代学分析底泥中重金属的来源及富集过程, 但参比元素比率的不稳定性及背景值的不确定性限制了该法在区域规模的应用。

## 2 底泥重金属污染治理方法

黑臭水体底泥重金属污染可采用的治理方法主要包括异位治理法和原位治理法。

### 2.1 异位治理法

异位治理以清淤疏浚为主, 即通过人工或机械的方法外移受到重金属污染的底泥, 避免其向水体释放而形成二次污染。清淤疏浚是去除黑臭水体底泥重金属最简便快捷的治理方式, 其可采用干水作业或带水作业, 干水作业需要将水体抽干, 在规模较大时成本很高, 应用有限; 带水作业则可能扰动表层底泥中的重金属、氮、磷等污染物, 并通过扩散对周边水体造成二次污染。此外, 清淤疏浚后还可能破坏水体的生态系统, 使水体的底栖生物及水生植物等的种类、数量、丰富度降低<sup>[4]</sup>。因此, 异位治理宜采用环保疏浚, 一方面通过改造疏浚设施减小疏浚过程中的二次污染, 如抓斗清淤时采用全封闭防漏抓斗、绞吸船清淤时采用环保铰刀 (如圆盘式、铲吸式、螺旋式) 等; 另一方面, 清淤时仅清除表层 20~40cm 的浮泥及淤泥层, 保留老土层以免破坏其生态系统<sup>[5]</sup>。

表 6 富集因子与污染程度的关系

污染等级	EF 范围	<2	2~5	5~20	20~40	≥40
污染程度		无污染	中等污染	较强污染	强污染	极强污染

### 2.2 原位治理法

原位治理系指在保留原有污染底泥的情况下, 通过采取措施阻隔或削弱底泥中重金属等污染物向水体释放。原位治理可采用的方法包括底泥覆盖法、化学法、植物法等。

#### (1) 底泥覆盖法

底泥覆盖法系指通过覆盖一层或多层黏土、改性矿石、木炭等材料, 将水体与底泥层隔开, 从而减缓或阻止重金属向水体释放。该法适用于水体流速较缓、外源污染得到控制及特征污染重金属的毒性和迁移率不高。底泥覆盖法可采用表层撒布或倾倒的方式完成, 施工方便, 但所需覆盖的材料用量大, 覆盖后水体的库容会进一步减小, 同时其重金属等污染物并未清楚, 仍存在释放风险。

#### (2) 化学法

化学法是指向黑臭水体投加化学药剂, 使之与重金属发生氧化还原、沉淀、螯合、络合等反应,

从而降低底泥中的重金属含量或将重金属转化为低毒及无毒形态。采用石灰、水泥、石膏、钙镁盐等水泥基固化材料可实现对底泥中重金属的固化/稳定化<sup>[6]</sup>。向黑臭水体投加过氧化钙(CaO<sub>2</sub>)既可以因其强氧化性改变底泥中重金属的形态, 又因其强碱性可与重金属产生沉淀反应。向黑臭水体投加硫化物也可沉淀去除重金属, 避免其向水体释放, 但存在释放硫化氢(H<sub>2</sub>S)的风险。通过向黑臭水体投加乙二胺四乙酸二钠(EDTA)等螯合物可使其与底泥中的重金属发生螯合反应而形成稳定的螯合物。化学法见效快但成本高, 同时往往存在一定的风险, 一方面, 所投加的化学药剂本身就可能增大水体毒性; 另一方面, 化学药剂的添加还易造成污染物的异常释放, 并危害水体生物及水体生态系统。因此, 可将化学法作为底泥重金属的一种应急治理方法。

### (3) 植物法

植物法主要是利用植物对底泥中重金属的根滤、吸收、固化稳定、挥发等作用实现对重金属的贮存、转移或转化。通过高富集植物吸收底泥中的重金属, 收割后即可实现对重金属的永久去除。毛竹等一些植物不仅对重金属的富集潜力大、吸收和耐受重金属的能力强, 而且生长速率快、生物产量高, 是修复黑臭水地底泥重金属污染的理想植物。不同生长型的植物对重金属的吸收和富集能力不同, 通常认为各类植物对重金属的吸收和富集能力由弱至强依次为: 挺水植物<浮叶植物<沉水植物<sup>[7]</sup>。植物法成本较低且生态环境效益显著, 但其处理周期较长, 同时单一植物通常仅表现出对单种重金属的富集能力较强, 因此其进一步的应用也受到局限。

### (4) 其他方法

重金属的原位修复还有一些其他方法, 但多处于实验阶段, 大规模应用的案例较少, 如微生物法和电动修复法等。微生物法即通过微生物的直接或间接作用实现对底泥中重金属的转移或转化, 该法的运行成本低、应用潜力大, 但易受环境因素影响, 目前多停留在实验室阶段。电动修法法系指根据重金属的带电性能, 在底泥两侧施加低压直流电场, 通过电场使重金属等污染物迁移并富集至两侧电极, 最终对电极处的重金属等污染物进行收集处理, 从而实现对底泥重金属的去除, 该法无需添加任何化学药剂、无二次污染, 同时处理周期短、效果好,

但能耗较高, 且对黑臭水体底泥的适应性还需进一步验证, 目前尚缺乏大规模的应用案例。

## 3 结论与展望

在黑臭水体底泥重金属的污染评价方面, 仅靠某一种评价方法不仅存在一定缺陷, 而且无法准确、有效地评价黑臭水体的重金属污染情况, 因此建议结合实际根据各评价方法的优劣势联合多种方法对黑臭水体的重金属污染情况进行综合评估, 同时在今后的评估中应进一步考虑重金属的形态及活性等因素, 并应加强对水体重金属的检测与评估, 综合水体与底泥应更能反映黑臭水体的重金属污染情况。在黑臭水体底泥重金属污染治理方面也存在类似的问题, 单一治理方法可能无法解决黑臭水体底泥中多种重金属的复合污染问题, 因此结合各方法的优势探索一种成本低、治理效果好、治理效率高的联合修复方法应作为未来的重点研究和发展方向。与此同时, 应继续加强对黑臭水体底泥重金属污染治理新方法的研究和开发应用, 考虑将治理后的底泥资源化方面的研究, 变废为宝。此外, 治理仅为对重金属污染现状的一种处理手段, 根治黑臭水体的重金属污染问题, 还需控源截污, 严控工农业废水、生活污水等人为重金属污染源的随意乱排。

## 参考文献

- [1] 王莉君, 吴思麟. 南京黑臭河道底泥污染特征及评价[J]. 科学技术与工程, 2018(3): 117-122.
- [2] 曲武, 刘绪. 长春市内河黑臭水体淤泥中重金属污染分布规律探讨[J]. 吉林水利, 2018(12): 4-8.
- [3] 陈明, 蔡青云, 徐慧, 等. 水体沉积物重金属污染风险评价研究进展[J]. 生态环境学报, 2015, 24(6): 1069-1074.
- [4] 孙健, 曾磊, 贺珊珊, 等. 国内城市黑臭水体污染源治理技术研究进展[J]. 净水技术, 2020, 39(2): 77-80+97.
- [5] 薄录吉, 王德建, 颜晓, 等. 底泥环保资源化利用及其风险评价[J]. 土壤通报, 2013, 44(4): 1017-1024.
- [6] 邓灿, 韦德权. 污染水体底泥中重金属的处理技术研究进展[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(1): 24-27.
- [7] SARWAR N, IMRAN M, SHAHEEN M R, et al. Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: Modifications and future perspectives[J]. Chemosphere, 2017, 171: 710-721.

**收稿日期:** 2021 年 12 月 6 日

**出刊日期:** 2022 年 1 月 7 日

**引用本文:** 王毅, 徐家琦, 金灿, 黄俊伟, 代知广, 黑臭水体底泥重金属污染评价及治理方法[J]. 资源与环境科学进展, 2022, 1(1):5-9

DOI: 10.12208/j.aes. 20220002

**检索信息:** 中国知网 (CNKI Scholar)、万方数据 (WANFANG DATA)、Google Scholar 等数据库收录期刊

**版权声明:** ©2022 作者与开放获取期刊研究中心 (OAJRC) 所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



**OPEN ACCESS**