

朱吉颖, 刘军武, 方迎春, 等. 河湖沉积物中重金属镉污染治理技术及应用[J]. 净水技术, 2024, 43(5): 45-52.

ZHU J Y, LIU J W, FANG Y C, et al. Technology research and application in heavy metal Cd pollution control in rivers and lakes sediments[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(5): 45-52.

河湖沉积物中重金属镉污染治理技术及应用

朱吉颖^{1,2}, 刘军武^{3,4}, 方迎春^{3,4,*}, 吴振斌¹, 张义^{1,2,*}

(1. 中国科学院水生生物研究所淡水生态和生物技术国家重点实验室, 湖北武汉 430072; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 湖南凯迪工程科技有限公司, 湖南岳阳 414000; 4. 湖南省重污染工业废水处理与资源化工程技术研究中心, 湖南长沙 410004)

摘要 随着现代工农业的迅猛发展, 矿山开采、冶炼及农业生产等活动逐渐增加, 向环境排放的重金属 Cd 含量也逐年增多。湖泊沉积物作为“储蓄库”, 其 Cd 污染问题也日益严重。河湖底泥中富集的 Cd 在水环境条件发生改变时, 易重新释放入水体, 被水生生物体吸收利用, 并通过食物链对人体健康产生危害。目前, 我国河流湖泊底泥中呈现出不同程度的 Cd 污染, 且在部分底泥中 Cd 已成为污染最严重的重金属, 对重金属 Cd 污染底泥的处理与处置已刻不容缓。因此, 文中综述了我国湖泊沉积物中重金属 Cd 污染现状及潜在生态风险, 依次介绍了 Cd 污染底泥原位修复治理技术研发进展及不同修复方法的机理与应用, 并对湖泊重金属 Cd 污染底泥治理技术前景进行了展望, 拟为湖泊重金属 Cd 污染底泥修复提供技术参考: (1) 研究如何系统地统计分析 Cd 污染底泥现状及潜在生态风险, 规定不同底泥环境中 Cd 的规范值十分必要; (2) 碳基吸附剂的再生及可分离性等问题有待解决; (3) 开展植物修复 Cd 污染底泥的中试试验及规模应用有利于底泥修复技术的研究; (4) 选择合适有效的微生物和水生植物相结合对沉积物 Cd 进行控制和修复, 可能是未来治理湖泊底泥 Cd 污染的重要研究方向。

关键词 沉积物 重金属镉 污染现状 潜在生态风险 治理技术 植物修复

中图分类号: X52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2024)05-0045-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.05.005

Technology Research and Application in Heavy Metal Cd Pollution Control in Rivers and Lakes Sediments

ZHU Jiying^{1,2}, LIU Junwu^{3,4}, FANG Yingchun^{3,4,*}, WU Zhenbin¹, ZHANG Yi^{1,2,*}

(1. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Hunan Kaidi Engineering Technology Co., Ltd., Yueyang 414000, China;

4. Engineering and Technology Research Center of Heavy Pollution Industrial Wastewater Treatment and Recycling of Hunan Province, Changsha 410004, China)

Abstract With the rapid development of modern industry and agriculture, activities such as mining, smelting and agricultural production have gradually increased, and the heavy metal cadmium (Cd) discharged into the environment has also increased. As a "deposit bank", the problem of cadmium pollution in lake sediments has become increasingly serious. Cd enriched in the sediment of rivers and lakes is easy to be re-released into water body as the environment conditions changed, and can be absorbed and utilized by aquatic organisms, causing harm to human health through the food chain. At present, rivers and lakes present different degrees of Cd

[收稿日期] 2023-05-21

[基金项目] 矿山场地污染修复湖南省工程研究中心开放基金重点项目(KS-2021KDJA01)

[作者简介] 朱吉颖(1999—), 女, 硕士, 研究方向为内源污染控制与修复、新型环保复合材料研制及应用等, E-mail: 2214561569@qq.com。

[通信作者] 方迎春, E-mail: 1502404770@qq.com;

张义, E-mail: zhangyi@ihb.ac.cn。

pollution in the sediment, and Cd has become one of the most serious heavy metal in sediment, so it is urgent to treat and dispose the sediment with Cd pollution. Therefore, this study summarizes the status of Cd pollution and potential ecological risks in rivers and lakes sediments, so as to describes the development, mechanism and application of in-situ remediation technology for Cd polluted sediment. The technology prospects of Cd polluted sediment is predicted, intending to provide technical reference for the remediation of Cd polluted sediment: (1) It is necessary to study how to systematically analyze the status quo and potential ecological risks of Cd polluted sediment, and to specify the standard value of Cd in different environments; (2) The regeneration and separability of carbon-based adsorbents need to be solved; (3) Pilot experiments and large-scale application are conducive to the study of phytoremediation technology for Cd polluted sediment; (4) The combination of microorganisms and aquatic plants may be an important research direction for remedying Cd polluted sediment in the future.

Keywords sediment heavy metal cadmium (Cd) pollution status potential ecological risk control technology phytoremediation

重金属污染物具有高毒性、持久性、难降解性等特征,可在空气、土壤、水和沉积物中迁移和转化^[1],自 20 世纪 80 年代以来,在我国湖泊的水体、沉积物和水生生物等各种介质中都陆续发现了高浓度重金属^[2]。重金属污染物通过大气沉降、废水排放、土壤侵蚀、雨水淋滤、冲刷等途径进入河流湖泊^[3],绝大部分最终转移至沉积物中积累^[4]。底泥成为水生态系统中重金属的主要储存库和最终归属地^[1]。同时,在水流、人为扰动或水环境条件如氧化还原电位、pH 发生改变时,湖泊沉积物中的重金属就会通过氧化还原、溶解、解吸等作用被释放到上覆水中^[5-6],并通过食物链逐渐富集,对水生生物及人类的健康产生危害^[7]。其中,镉(Cd)作为常见重金属之一,毒性较大且危害持久^[8],不能被生物降解^[9],国际癌症研究机构将 Cd 列为 I 类致癌物^[10]。随着现代工农业的迅猛发展,矿山开采、冶炼及农业生产等活动逐渐增加,向环境排放的 Cd 含量逐年增加^[11],Cd 污染问题日益严重。

针对这一问题,目前国内外针对湖泊底泥重金属 Cd 污染研发出了多种修复技术,主要包括异位修复技术和原位修复技术。异位修复技术即将被污染的沉积物从河床底泥中移除,并通过一系列物理、化学、生物的方法处理被污染的底泥,该技术可能导致原湖泊沉积物结构退化且成本较高,不适于大面积污染地区处理^[12]。而原位修复技术则是通过提高 Cd 在沉积物上的吸附、沉淀、络合等能力,降低 Cd 在环境中的潜在迁移率,该技术修复成本相对较低,处理效果优良且适用范围广泛^[13]。因此,本文综述了湖泊沉积物中重金属 Cd 污染现状及生态风险评价,介绍了 Cd 污染

底泥原位修复治理技术研发进展及不同修复方法的机理和应用,旨在为湖泊重金属 Cd 污染底泥修复提供理论参考。

1 底泥中 Cd 污染现状

近年来,底泥重金属 Cd 污染现状不容乐观,国内外学者利用多种评价方法对河流底泥 Cd 污染进行了大量的研究工作。调查发现,我国河流湖泊底泥中呈现不同程度的 Cd 污染(表 1),且在部分河流湖泊底泥中 Cd 已成为污染最为严重的重金属。

Qin 等^[14]通过分析 2009 年—2019 年我国 21 个省、自治区、直辖市的 87 个湖泊底泥重金属污染数据发现,88.2%的湖泊底泥中存在 Cd 污染。周童^[15]通过内梅罗综合污染指数分析得出巢湖 2019 年—2021 年年底底泥中部分监测点 Cd 含量超出《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)^[16]限值,处于较高水平,且 Cd 的单因子污染指数大于同时监测的其他 4 种重金属(Hg、Cr、As、Pb)。杨帆等^[17]开展了对湖南省湘江、资江、沅江、澧水和洞庭湖的底泥重金属污染评价,发现湖南省水域底泥中污染程度最大的重金属为 Cd,77.78%采样点的 Cd 污染指数>1[Cd 质量分数超出标准值(0.6 mg/kg)^[16]],Cd 在澧水、沅江、资江、湘江、洞庭湖的污染等级分布分别为低污染、清洁、低污染、中污染、中污染。可欣等^[18]的研究则表明,辽河保护区 12 个采样点的表层沉积物中 Cd 污染最为严重,平均质量分数达到 1.21 mg/kg,超过阈值效应含量水平(1.04 mg/kg^[19]),存在潜在的生态危害风险,需要引起一定的重视。因此,对重金属 Cd 污染底泥的处理与处置已刻不容缓。

表 1 河流底泥中 Cd 污染现状及生态风险分析
Tab. 1 Cadmium Pollution Status and Analysis of Ecological Risk in River Sediments

采样区域	初始质量分数/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	样本月份	风险等级	风险评估方法	参考文献
巢湖	1.09	2019 年 4 月	中污染	单因子污染指数	[15]
	0.70	2020 年 5 月	轻污染		
	0.57	2021 年 6 月	轻微污染		
湘江	2.34	2019 年 11 月	中污染	单因子污染指数	[17]
洞庭湖	5.37	2019 年 11 月	中污染	单因子污染指数	[17]
	4.70	-	极高生态风险	Hakanson 潜在生态风险指数法	[20]
渤海湾	0.23	2013 年 8 月	中等生态风险	Hakanson 潜在生态风险指数法	[21]
黄河中游	0.09	-	低生态风险	Hakanson 潜在生态风险指数法	[22]
南飞河	3.8	2021 年 4 月	-	-	[23]

现有研究^[24]表明,底泥中重金属的环境行为和生态毒理效应除了与其总含量有关,还与重金属的化学形态相关。因此,在评价河湖沉积物重金属生态风险时考虑 Cd 的不同赋存形态十分必要^[25]。重金属的可交换态 F1 和碳酸盐结合态 F2 在周围水环境发生变化时更容易重新溶解到水中,为不稳定态,更易被生物所利用,造成生态威胁。风险评价代码(risk assessment code, RAC)通过研究重金属有效态(F1 态和 F2 态)来评估其生态风险,当重金属有效态占比超过 30% 时即为高风险级别。张大文等^[4]从 Cd 赋存形态的角度对鄱阳湖枯水期表层沉积物进行了研究,得出鄱阳湖底泥 Cd 污染生态风险较大,绝大部分监测点 Cd 的有效态位于 30% ~ 50%,属于高风险等级。许友泽等^[26]对湘江 29 个典型重金属污染断面底泥样品采用 Tessier 连续提取法进行处理,试验得到各采样点 Cd 有效态的百分比为 25.04% ~ 66.63%,其中,达极高、高等和中等生态风险级别的断面分别占 17.24%、65.52% 和 17.24%。Cd 污染对水环境和生物的影响不容忽视。

2 处理 Cd 污染底泥的物理技术

物理修复主要以底泥覆盖技术为主,其是通过水力喷射、机械设备表层倾倒^[27]、移动驳船撒布^[28]等方式将覆盖材料投加到水体中,使底泥与上覆水间形成掩蔽层,从而有效防止 Cd 再次释放入上覆水中,降低环境生态污染风险。20 世纪 90 年代至 21 世纪初,原位覆盖材料多采用砂砾、天然土等^[29]厚层天然材料,但这类材料使用后存在河床升高、河

流流速减小、河流需水量降低等问题。而后盛行的化学覆盖材料也存在修复时效短、二次污染风险大等缺点,因此近年来如何研发环境毒性低、修复时效长、去除范围广的新型覆盖材料成为一大研究热点,并且逐渐由单一物理作用转变为复合物理、化学、生物作用的原位覆盖技术,对 Cd 污染底泥进行迅速、高效处理。

3 处理 Cd 污染底泥的化学技术

重金属污染底泥稳定化技术能够通过加入一种或多种稳定化修复材料,使沉积物中重金属发生物理化学反应,改变重金属在底泥中的赋存形态,从而降低重金属的溶解性和迁移性,降低重金属污染危害^[11]。稳定化技术具有综合处理效率高、修复成本低及操作简单等优势,逐渐在底泥重金属修复中呈现出较大潜力。重金属 Cd 污染底泥稳定化修复剂主要包括黏土矿物、化学药剂、碳基吸附剂等,修复效果和稳定化机理因使用修复药剂的性质、结构而不同。

3.1 黏土矿物

黏土矿物因具有储量丰富、价格低廉^[30]、比表面积大、化学机械稳定性良好、环境兼容性强等优点,近年来受到国内外学者的重视。不同黏土矿物对底泥中 Cd 处理效果如表 2 所示。黏土矿物表面的无机阳离子能够与 Cd^{2+} 发生离子交换反应,形成稳定的配合物,从而减轻其对环境的污染风险^[31]。此外,通过热改性、酸改性、有机改性和纳米零价铁改性^[32]等方法能够增加黏土矿物的比表面积和阳离子交换容量以及其吸附容量,优化污染修复效果。

表 2 不同黏土矿物对底泥中 Cd 的处理效果
Tab. 2 Effect of Different Clay Minerals on Cd Removal in Sediments

黏土矿物	改性方法	初始质量分数/(mg·kg ⁻¹)	处理效果	参考文献
颗粒沸石	NaCl	4.7	底泥中 Cd 含量降低 86.4%	[20]
沸石	—	728.124	浸出浓度下降 66.3%	[33]
硅藻土	—		浸出浓度下降 26.0%	
凹凸棒土	ZnCl ₂ 改性生物炭	6.02	酸溶性 Cd 减少 8%~11%	[34]
凹凸棒土	—	18.7	酸溶性 Cd 减少 56.2%	[35]
海泡石	—		酸溶性 Cd 减少 34.2%	
膨润土	壳聚糖	161.28	稳定化率可达 83.7%	[36]
膨润土	铜	—	碳酸盐结合态 Cd 显著降低	[37]

3.2 化学药剂

常用化学药剂包括生石灰、熟石灰、石灰石、氢氧化镁等^[38],通过添加此类药剂使污染底泥 pH 能够维持在 Cd 最小溶解范围内,使大部分 Cd 以稳定的沉淀形式存在。这一修复过程能够在短时间内产生较好的稳定化效果,但随着时间的推移,底泥 pH 的逐渐降低,往往伴随着重金属的再次沥出,Cd 固定效果不佳,因此不适宜长期污染控制。

3.3 碳基吸附剂

碳基吸附剂是指一类以碳为主要成分的非金属固体吸附剂,可为粉末状或块状,主要包括生物碳基吸附剂、碳纳米管基吸附剂、氧化石墨烯基吸附剂,具有比表面积大、孔结构丰富、吸附量大等优点,是一种具有高效修复性能的重金属吸附剂^[39]。其对重金属的吸附主要包括物理吸附、静电相互作用、离子交换、表面络合、沉淀/共沉淀等。同时,为了更好地满足修复要求,目前研究人员已经进行了大量的工作,开发了各种碳质材料,研发了如氧化、磁化、负载官能团等改性方法增强 Cd 去除效果。

生物炭(biochar,BC)是由生物质在低氧条件下通过热解制备得到的碳质材料^[40],被广泛应用到重金属 Cd 污染湖泊沉积物的修复中。孟梅等^[41]将水稻秸秆生物炭运用于沉积物重金属 Cd 钝化中,结果表明,添加生物炭显著增大了水体 pH,降低了上覆水和间隙水中的溶解态 Cd 浓度。为了提升修复性能,Liu 等^[42]采用微波活化法改性生物炭,对湘江 Cd²⁺质量分数为 14.70 mg/kg 的底泥进行原位修复后,上覆水和孔隙水中的 Cd²⁺质量分数分别下降了 71%和 49%,Cd²⁺的生物利用度和生态风险显著降低。李皖瑶等^[43]采用制备的生物炭负载纳米零价

铁(nZVI/BC)复合材料处理 Cd 污染底泥,经 56 d 修复后 nZVI/BC 处理组中 Cd 的残渣态质量分数增加了 29.73%,浸出质量浓度由 4.65 μg/L 降至 0.38 μg/L,材料的添加有效降低了 Cd 的移动性和环境风险。但在研究过程中,科研人员也发现生物碳基吸附剂存在一系列问题:吸附剂呈粉末态较难回收、保留在生物炭中的重金属在自然条件下难以解析,有可能成为危险废物等,研究如何回收处理生物炭具有重要意义。

碳纳米管和氧化石墨烯作为新型稳定化修复剂具有良好的发展前景。碳纳米管是一种表面富含氧官能团的一维量子材料,依据壁层差异可分为单壁碳纳米管和多壁碳纳米管。一般来讲,其吸附重金属的能力随着壁层数的增加而加强^[44]。Sun 等^[45]采用碳纳米管吸附湖泊底泥沉积物中的重金属 Cd²⁺,反应经过 100 min 后达到平衡,且对 Cd²⁺的吸附量为 9 mg/kg。此外,多壁碳纳米管能够降低沉积物中 Cd²⁺的毒性,增加酸性细菌、放线菌、硝化螺旋菌和厚壁菌的丰度,促进植物生长^[46]。氧化石墨烯主要来源于价格低廉的天然鳞片石墨,拥有层间分布含氧官能团的层状准二维平面结构,具有化学稳定性强、吸附位点多等优点^[47]。目前,鲜有研究将氧化石墨烯应用到重金属 Cd 污染沉积物当中,但已有研究^[48]证明氧化石墨烯能够有效降低 Cu²⁺向上覆水释放的风险,将 Cu²⁺由不稳定的可提取态转化为较稳定的残渣态。这为未来开展相关试验证明氧化石墨烯对重金属 Cd 污染沉积物的修复效果奠定了强有力的基础。

4 处理 Cd 污染底泥的生物技术

4.1 植物修复技术

植物修复技术具有运行成本低、对生态环境友

好、二次污染小等优点,能够在缓解或消除底泥中重金属 Cd 污染的同时,净化水质、美化河道景观,因此植物修复技术成为 Cd 污染底泥修复治理、环境科学与工程领域的前沿研究热点课题。

作为水生环境的重要组成部分,沉水植物具有修复效果好、单位成本低、生物量大等优点,是水环境中重要的污染净化体,且其根、茎、叶均可富集较高含量的重金属^[49],富集能力强于浮叶植物和挺水植物^[50]。陶理等^[51]通过研究发现,典型沉水植物黑藻、伊乐藻和菹草均表现出一定的底泥 Cd 污染富集能力,三者主要依靠植物根滤的机制来富集 Cd,且生物沉积物浓缩因子(BSAF)为菹草>黑藻>伊乐藻。乔云蕾等^[50]则研究了另外两种常见沉水植物苦草和金鱼藻对 Cd 污染底泥的修复效果,结果表明,两种沉水植物均有较高的 Cd 富集能力,且苦草的富集量为金鱼藻的 3.02 倍,对底泥中重金属 Cd(初始量为 35.82 mg/kg)的去除率高达 87.07%,可考虑作为生态修复的先锋物种。现今大多数研究为室内模拟试验,植物对重金属 Cd 的吸附差异与植物自身所处的环境有关,修复效果与实际应用可能存在差异,开展实地工程修复更利于植物修复技术的研究。

目前植物修复已成功应用于 Cd 污染沉积物的恢复,但生长缓慢和较低的 Cd 积累能力在很大程度上限制了植物修复的进一步应用。目前,科研人员对如何提高植物修复效率进行了大量的研究,并取得了显著进展。Gong 等^[46]利用环境功能材料和植物协同处理 Cd 污染底泥,研究结果发现,一定浓度下纳米级零价铁、多壁碳纳米管和茶废衍生生物炭均能显著促进苎麻幼苗的生长和 Cd 富集量,其中 500 mg/kg 生物炭为最佳处理组,使得苎麻幼苗的 Cd 富集量提升了 32%,环境功能材料主要通过材料载体作用、增加植物养分吸收和减轻氧化损伤,促进植物生长和 Cd 积累。此外,根际促生菌(PGPR)也能够显著改善植物修复过程。已有大量研究表明,PGPR 能够通过溶解金属矿物、酸化根际环境、增大根系对重金属吸收面积、增强根际分泌物的释放等机制,有效增强植物对重金属的修复性能。但目前大多数研究基于土壤介质,有关微生物和植物联合修复湖泊底泥中 Cd 污染的研究内容较少,水体环境有别于土壤环境,沉积物-水界面易受多种因素影响,Cd 污染修复难度更大。植物修复虽然

具有众多优点,但该治理技术存在修复过程耗时长、修复植物种类筛选困难等问题,选择合适有效的微生物和水生植物相结合对沉积物 Cd 进行控制和修复,可能是未来治理湖泊底泥 Cd 污染的重要研究方向。此外,种植修复植物的后续处理也十分重要,植物吸收富集底泥中 Cd 后进行收割集中处理,目前常见的处理方法包括堆肥法、填埋法、热解法等,均具有各自的优势和不足,为实现修复植物的资源化利用,避免二次污染,针对修复植物的特点和重金属迁移规律,还需要对处理方法开展进一步的研究。

4.2 微生物修复技术

湖泊底泥微生物修复技术通常是将筛选和驯化后得到的能够高效降解底泥 Cd 的特定微生物菌种进行规模化培养,并投加到受污染底泥中,从而有效改善底泥 Cd 污染,该技术具有吸附效率高、成本低、处理效果优良等特点。菌株分泌于体外的胞外聚合物(如多糖、蛋白质等)带有羟基、羧基等负电性官能团,能够与 Cd^{2+} 进行结合达到固定 Cd^{2+} 的目的,此外 Cd^{2+} 也可以利用微生物代谢提供的能量,通过离子通道、络合后渗透、载体运输等方式进行胞内积累。胞内、胞外的吸附与固定是微生物作用于 Cd^{2+} 的主要途径^[52]。谭险夷等^[53]将丝状菌和氧化亚铁硫杆菌混合,对 Cd 污染底泥进行生物淋滤,4 d 后 Cd 的去除率达到最大值 92.5%(初始量为 95 mg/kg)。汪元南^[54]选取常见的烟曲霉和黑曲霉在实验室小环境条件下去除湘江底泥重金属 Cd,结果表明两种真菌在 Cd 污染底泥中生长状况良好,通过对比两种真菌对 Cd 的胞外吸附量和胞内富集量发现,烟曲霉对底泥中 Cd 的去除效果明显优于黑曲霉,且当 Cd 质量分数为 10 mg/kg 时,烟曲霉对 Cd 的去除率可达 31%。但微生物修复对环境条件的要求较为严苛,容易受到外界环境因素的影响,实际修复与实验室结果存在一定差异,微生物修复技术在工程修复应用具有一定难度。因此,如何改良微生物的培养条件、提升微生物环境适应能力或筛选适应范围更广的菌种使其发挥最大活性,将成为未来一大重要研究热点。

5 展望

目前我国河流湖泊 Cd 底泥污染形势严峻,应深入研究更加绿色、高效的 Cd 污染修复技术,综合考虑环境因素对实际应用效能的影响,提出切实可

行的修复方案。今后可以从以下几个方面加以发掘。

(1)保留在碳基吸附剂上的重金属在自然条件下难以解析,有可能成为危险废物。对于增强碳基吸附剂再生及可分离性的研究具有一定的现实和理论意义,有利于这种材料规模化、工业化应用。

(2)植物对重金属 Cd 的吸附差异与植物自身所处的环境有关,不同沉积物间的差异会导致植物对 Cd 的富集能力不同。现今大多数研究为室内小试试验,模拟室外天然水体环境开展,修复效果与实际应用还存在一定的不同,后续开展中试试验及实地应用更利于底泥修复技术的研究。

(3)有关微生物强化植物修复湖泊底泥中 Cd 污染的研究内容较少,目前大多数以土壤为研究对象。水体环境有别于土壤环境,沉积物-水界面易受多种因素影响,Cd 污染修复难度更大,选择合适有效的微生物和水生植物相结合,优化沉积物 Cd 控制和修复效能可能是未来治理湖泊底泥 Cd 污染的重要研究方向。

参考文献

- [1] WANG M M, ZHU Y, CHENG L R, et al. Review on utilization of biochar for metal-contaminated soil and sediment remediation [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, 63: 156–173. DOI: 10.1016/j.jes.2017.08.004.
- [2] WANG G Q, HU X Q, ZHU Y, et al. Historical accumulation and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of a drinking water lake [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25: 24882–24894. DOI: 10.1007/s11356-018-2539-4.
- [3] CASTILLO M L A, TRUJILLO I S, ALONSO E V, et al. Bioavailability of heavy metals in water and sediments from a typical Mediterranean Bay (Malaga Bay, Region of Andalusia, Southern Spain) [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 76(1/2): 427–434. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2013.08.031.
- [4] 张明文, 罗林广, 张莉, 等. 鄱阳湖表层沉积物中砷及重金属赋存形态及其潜在生态风险 [J]. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(8): 1132–1138.
- ZHANG D W, LUO L G, ZHANG L, et al. Speciation and potential ecological risk assessment of As and heavy metals in surface sediments of Poyang Lake [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(8): 1132–1138.
- [5] 杨洋, 高慧敏, 陶红, 等. 重金属复合污染河道底泥淋洗动力学特征 [J]. *净水技术*, 2023, 42(6): 152–160, 175.
- YANG Y, GAO M H, TAO H, et al. Characteristics of leaching kinetics for river sediments with compound contamination of heavy metals [J]. *Water Purification Technology*, 2023, 42(6): 152–160, 175.
- [6] PENG J F, SONG Y H, YUAN P, et al. The remediation of heavy metals contaminated sediment [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 161 (2/3): 633–640. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.04.061.
- [7] AKCIL A, ERUST C, OZDEMIROGLU S, et al. A review of approaches and techniques used in aquatic contaminated sediments: Metal removal and stabilization by chemical and biotechnological processes [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 86: 24–36. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.08.009.
- [8] JARUP L, AKESSON A. Current status of cadmium as an environmental health problem [J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2009, 238(3): 201–208.
- [9] 杜佳, 刘军龙, 樊海, 等. 蒙脱石及其衍生物吸附水体中二价镉的研究进展 [J]. *净水技术*, 2021, 40(10): 36–42.
- DU J, LIU J L, FAN H, et al. Characteristics of leaching kinetics for river sediments with compound contamination of heavy metals [J]. *Water Purification Technology*, 2021, 40(10): 36–42.
- [10] MEZYNSKA M, BRZOSKA M M. Environmental exposure to cadmium—a risk for health of the general population in industrialized countries and preventive strategies [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(4): 3211–3232.
- [11] BAO J P, WANG L, XIAO M. Changes in speciation and leaching behaviors of heavy metals in dredged sediment solidified/stabilized with various materials [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(9): 8294–8301.
- [12] CLEMENTE R, ALMELA C, BERNAL M P. A remediation strategy based on active phytoremediation followed by natural attenuation in a soil contaminated by pyrite waste [J]. *Environmental Pollution*, 2006, 143(3): 397–406.
- [13] RAICEVIC S, WRIGHT J V, VELJKOVIC V, et al. Theoretical stability assessment of uranyl phosphates and apatites: Selection of amendments for in situ remediation of uranium [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 355 (1/2/3): 13–24. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2005.03.006.
- [14] QIN Y H, TAO Y Q. Pollution status of heavy metals and metalloids in Chinese lakes: Distribution, bioaccumulation and risk assessment [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 248: 114293. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2022.114293.
- [15] 周童. 巢湖底泥中 5 种重金属污染物空间分布特征及评价 [J]. *中国资源综合利用*, 2022, 40(8): 158–160.
- ZHOU T. Spatial distribution characteristics and evaluation of five heavy metal pollutants in the sediment of Chaohu Lake [J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2022, 40(8): 158–160.
- [16] 中华人民共和国生态环境部, 国家市场监督管理总局. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准 (试行): GB

- 15618—2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Soil environmental quality-Risk control standard for soil contamination of agricultural land: GB 15618—2018 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [17] 杨帆, 何丹丹, 袁隆湖, 等. 湖南省水域底泥污染评价及资源化利用分析[J]. 中国给水排水, 2022, 38(13): 97-104.
- YANG F, HE D D, YUAN L H, et al. Assessment of sediment pollution and its resource utilization in the water areas of Hunan Province[J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(13): 97-104.
- [18] 可欣, 包清华, 黄晓妍, 等. 辽河保护区表层沉积物风险污染物清单筛选研究[J]. 中国环境科学, 2017, 37(8): 3107-3113.
- KE X, BAO Q H, HUANG X Y, et al. Screening of risk pollutants in surface sediment of Liaohe River protected areas [J]. China Environmental Science, 2017, 37(8): 3107-3113.
- [19] APITZ S E, BARBANTI A, BERNSTEIN A G, et al. The assessment of sediment screening risk in Venice lagoon and other coastal areas using international sediment quality guidelines[J]. Journal of Soils and Sediments, 2007, 7(5): 326-341.
- [20] WEN J, YI Y, ZENG G. Effects of modified zeolite on the removal and stabilization of heavy metals in contaminated lake sediment using BCR sequential extraction [J]. Journal of Environmental Management, 2016, 178: 63 - 69. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.04.046.
- [21] ZHOU X, MEI P, PENG L, et al. Contents and potential ecological risk assessment of selected heavy metals in the surface sediments of Bohai Bay [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(3): 452-456.
- [22] YAN N, LIU W B, XIE H T, et al. Distribution and assessment of heavy metals in the surface sediment of Yellow River, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2016, 39: 45 - 51. DOI: 10.1016/j.jes.2015.10.017.
- [23] SHAO S G, XUE L Q, LIU C, et al. Assessment of heavy metals in sediment in a heavily polluted urban river in the Chaohu Basin, China [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2016, 34(3): 526-538.
- [24] KOT A, NAMIESNIK J. The role of speciation in analytical chemistry[J]. Trac-Trends in Analytical Chemistry, 2000, 19 (2/3): 69-79. DOI: 10.1016/S0165-9936(99)00195-8.
- [25] SINGH K P, MOHAN D, SINGH V K, et al. Studies on distribution and fractionation of heavy metals in Gomti river sediments-a tributary of the Ganges, India [J]. Journal of Hydrology, 2005, 312 (1/2/3/4): 14-27. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.01.021.
- [26] 许友泽, 刘锦军, 成应向, 等. 湘江底泥重金属污染特征与生态风险评价[J]. 环境化学, 2016, 35(1): 189-198.
- XU Y Z, LIU J J, CHENG Y C, et al. Characteristics and ecological risk assessment of heavy metals contamination in sediments of the Xiangjiang River[J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(1): 189-198.
- [27] MAILMAN M, STEPNUK L, CICEK N, et al. Strategies to lower methyl mercury concentrations in hydroelectric reservoirs and lakes: A review [J]. Science of the Total Environment, 2006, 368(1): 224-235.
- [28] YIN H B, KONG M. Reduction of sediment internal P-loading from eutrophic lakes using thermally modified calcium-rich attapulgite-based thin-layer cap [J]. Journal of Environmental Management, 2015, 151: 178-185. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.01.003.
- [29] HYÖYLAINEN T, KARELS A, OIKARI A. Assessment of bioavailability and effects of chemicals due to remediation actions with caging mussels (*Anodonta anatina*) at a creosote-contaminated lake sediment site[J]. Water Research, 2002, 36 (18): 4497-4504.
- [30] BHATTACHARYYA K G, GUPTA S S. Adsorption of a few heavy metals on natural and modified kaolinite and montmorillonite: A review[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2008, 140(2): 114-131.
- [31] 梁学峰, 徐应明, 王林, 等. 天然黏土联合磷肥对农田土壤镉铅污染原位钝化修复效应研究[J]. 环境科学学报, 2011, 31(5): 1011-1018.
- LIANG X F, XU Y M, WANG L, et al. In-situ immobilization of cadmium and lead in a contaminated agricultural field by adding natural clays combined with phosphate fertilizer [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(5): 1011-1018.
- [32] OTUNOLA B O, OLOLADE O O. A review on the application of clay minerals as heavy metal adsorbents for remediation purposes [J]. Environmental Technology & Innovation, 2020, 18: 14. DOI: 10.1016/j.eti.2020.100692.
- [33] 庞涛, 陶红, 宋迪, 等. 多种固化材料对重金属污染底泥稳定化的研究[J]. 广州化工, 2015, 43(7): 60-63.
- PANG T, TAO H, SONG D, et al. Study on effect of immobilization materials on heavy metal stabilization treatment in sediment [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2015, 43 (7): 60-63.
- [34] WANG X H, GU Y L, TAN X F, et al. Functionalized biochar/clay composites for reducing the bioavailable fraction of arsenic and cadmium in river sediment [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2019, 38(10): 2337-2347.
- [35] YIN H B, ZHU J C. In situ remediation of metal contaminated lake sediment using naturally occurring, calcium-rich clay mineral-based low-cost amendment [J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 285: 112 - 120. DOI: 10.1016/j.cej.2015.09.108.
- [36] 刘丁玮, 王春荣, 赵明川, 等. 壳聚糖改性钠基膨润土稳定剂对重金属污染底泥的处理[J]. 环境工程学报, 2022, 16 (12): 3906-3915.

- LIU D W, WANG C R, ZHAO M C, et al. Treatment of heavy metal polluted sediment with chitosan modified Na-bentonite stabilizer[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(12): 3906–3915.
- [37] LIN J, FU Z, YAO J W, et al. Behavior of iron and other heavy metals in passivated sediments and the coupling effect on phosphorus[J]. Science of the Total Environment, 2022, 808: 10. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152151.
- [38] 王加华, 张峰, 马烈. 重金属污染土壤稳定化修复药剂研究进展[J]. 中国资源综合利用, 2016, 34(2): 49–52.
- WANG J H, ZHANG F, MA L. Research progress of stabilization binder for heavy metals contaminated soil remediation[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2016, 34(2): 49–52.
- [39] DUAN C Y, MA T Y, WANG J Y, et al. Removal of heavy metals from aqueous solution using carbon-based adsorbents: A review[J]. Journal of Water Process Engineering, 2020, 37: 13. DOI: 10.1016/j.jwpe.2020.101339.
- [40] YU J L, DEEM L M, CROW S E, et al. Comparative metagenomics reveals enhanced nutrient cycling potential after 2 years of biochar amendment in a tropical oxisol[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2019, 85(11): 17. DOI: 10.1128/aem.02957–18.
- [41] 孟梅, 华玉妹, 朱端卫, 等. 生物炭对重金属污染沉积物的修复效果[J]. 环境化学, 2016, 35(12): 2543–2552.
- MENG M, HUA Y M, ZHU D W, et al. Remediation effect of biochar on sediment contaminated by heavy metals[J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(12): 2543–2552.
- [42] LIU S J, LIU Y G, TAN X F, et al. The effect of several activated biochars on Cd immobilization and microbial community composition during in-situ remediation of heavy metal contaminated sediment[J]. Chemosphere, 2018, 208: 655–664. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.06.023.
- [43] 李皖瑶, 曹珊, 朱运龙, 等. 生物炭负载纳米零价铁对湖泊底泥镉污染的修复效果[J]. 环境工程学报, 2022, 16(7): 2188–2197.
- LI W Y, CAO S, ZHU Y L, et al. Remediation effect of cadmium pollution in lake sediment by biochar-supported nanoscale zero-valent iron[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(7): 2188–2197.
- [44] LI J, CHEN C L, ZHANG S W, et al. Critical evaluation of adsorption-desorption hysteresis of heavy metal ions from carbon nanotubes: Influence of wall number and surface functionalization[J]. Chemistry-an Asian Journal, 2014, 9(4): 1144–1151. DOI: 10.1002/asia.201301475.
- [45] SUN W L, JIANG B F, WANG F, et al. Effect of carbon nanotubes on Cd(II) adsorption by sediments[J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 264: 645–653. DOI: 10.1016/j.cej.2014.11.137.
- [46] GONG X M, HUANG D L, LIU Y G, et al. Nanoscale zerovalent iron, carbon nanotubes and biochar facilitated the phytoremediation of cadmium contaminated sediments by changing cadmium fractions, sediments properties and bacterial community structure[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 208: 9. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2020.111510.
- [47] LIN Z, SONG L, HAN B, et al. Study on stable curing of heavy metal Cu in sediments by graphene oxide[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(6): 1201–1207.
- [48] LIN Z P, SONG L, HAN B H, et al. Effect of modified graphene oxide on Cu and phosphorus in eutrophic river sediments[J]. Water Science and Technology, 2020, 82(4): 787–798.
- [49] 王谦, 成水平. 大型水生植物修复重金属污染水体研究进展[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(5): 96–102.
- WANG Q, CHENG S P. Review on phytoremediation of heavy metal polluted water by macrophytes[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 33(5): 96–102.
- [50] 乔云蕾, 李铭红, 谢佩君, 等. 沉水植物对受重金属镉、锌污染的水体底泥的修复效果[J]. 浙江大学学报(理学版), 2016, 43(5): 601–609.
- QIAO Y L, LI M H, XIE P J, et al. A study on the absorption of cadmium and zinc in the water sediments with submerged plants[J]. Journal of Zhejiang University(Science Edition), 2016, 43(5): 601–609.
- [51] 陶理, 王沛芳, 袁秋生, 等. 4种典型沉水植物对去除镉污染底泥的应用效果[J]. 环境科学, 2021, 42(9): 4311–4318.
- TAO L, WANG P F, YUAN Q S, et al. Application effect of four typical submerged macrophytes on removing cadmium from polluted sediment[J]. Environmental Science, 2021, 42(9): 4311–4318.
- [52] 徐文婷, 陈国梁, 屈志慧, 等. 微生物在镉污染土壤修复中的应用及其作用机理[J]. 生物工程学报, 2023, 39(7): 2612–2623.
- XU W T, CHEN G L, QU Z H, et al. Microbial remediation of cadmium-contaminated soils and its mechanisms: A review[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2023, 39(7): 2612–2623.
- [53] 谭险夷, 袁兴中, 曾光明, 等. 丝状菌对生物淋滤去除底泥中重金属的促进作用[J]. 环境工程学报, 2010, 4(12): 2853–2859.
- TAN X Y, YUAN X Z, ZENG G M, et al. Promotion effect of filamentous bacteria on removal of heavy metals during bioleaching from contaminated sediment[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(12): 2853–2859.
- [54] 汪元南. 丝状真菌去除水体/底泥中重金属 Cd 的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- WANG Y N. Study on removal of Cd in water and sediment by filamentous fungi[D]. Changsha: Hunan University, 2017.