

# Research Progress on the Disposal Technology of Heavy Metal Sediment

Junshan Weng

Chongqing Engineering Limited Liability Company, China Coal Technology & Engineering Group, Chongqing  
Email: wengjs@163.com

Received: May 8<sup>th</sup>, 2018; accepted: May 29<sup>th</sup>, 2018; published: Jun. 5<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

There are many rivers and lakes in our country, additionally sediment pollution is serious, and these pollution problems in the environment have aroused the concern of scholars from various countries. With the goal of ecological civilization construction and the continuous improvement of relevant laws and regulations in our country, the harmless treatment of heavy metal sediment contaminated of rivers and lakes is an inevitable choice in the future. In order to investigate the research progress on the disposal technology of heavy metal sediment, based on an overview of the pollution hazards of heavy metal sediment at home and abroad, focused on the systematic review of the disposal technology in heavy metal sediment. Mainly including, physical repair technology (physical adsorption method, electric repair method), technology (curing and stabilization method, washing method), bioremediation technology (phytore mediation, microbial remediation). Finally, the advantages and disadvantages of various methods for treating heavy metal sediment are summarized, which can provide references for the research on disposal technology of heavy metal sediments later.

## Keywords

Sediment, Heavy Metal, Pollution, Disposal Technology

---

# 重金属底泥处置技术研究进展

翁君山

中煤科工集团重庆设计研究院有限公司, 重庆  
Email: wengjs@163.com

收稿日期: 2018年5月8日; 录用日期: 2018年5月29日; 发布日期: 2018年6月5日

## 摘要

我国河湖众多，底泥污染状况严重，环境中的底泥污染问题引起了各国学者的关注。随着我国生态文明建设目标的提出和相关法律法规的不断完善，将河湖重金属污染底泥进行无害化处理是今后必然的选择。为了解重金属底泥处置技术研究进展，在概述国内外重金属底泥污染危害的基础上，重点对重金属底泥处置技术进行了系统综述。主要包括：物理修复技术(物理吸附法、电动修复法)，化学修复技术(固化/稳定化法，淋洗法)，生物修复技术(植物修复法、微生物修复法)。最后总结了处理重金属底泥各种方法的利弊，为之后重金属底泥处置技术研究提供借鉴。

## 关键词

底泥，重金属，污染，处置技术

Copyright © 2018 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

我国大多数河流、湖泊的底泥都不同程度受到了重金属的污染，其重金属污染日趋复杂化，由单一向多种重金属复合型污染转变，研究所涉及重金属元素主要包括 Hg、As、Ni、Cu、Zn、Cr、Cd、Pb 等 [1] [2]。许多欧美国家的湖泊、河流、港口等底泥也都受到了严重污染，如美国的五大湖地区、荷兰的阿姆斯特丹港口、德国的汉堡港等 [3] [4]。美国环保局(USEPA)针对五大湖流域水体底泥中普遍存在的重金属(Hg、As、Cd、Pb 等)和难降解有机物(PAHs, PCBs, Dioxin 等)开展了受污染底泥评估和综合整治项目 [5]，其他国家如荷兰、日本、瑞典、德国以及中国等都为受污染底泥整治做了大量研究工作 [6]，显然河道底泥重金属污染已成为全世界关注的环境问题。目前对河道底泥的处理方法有传统处理技术(浓缩、消化、自然干化、机械脱水、消毒等)、卫生填埋处置技术、海洋投弃、堆肥处理技术、热干化与焚烧处理技术等，这些处理技术仅是把底泥异位堆存，并未减量化与资源化，其在一定程度上占用大量土地或其他空间，并存在环境污染隐患。

## 2. 重金属底泥的危害

重金属是指包括铜(Cu)、铅(Pb)、铬(Cr)、镉(Cd)、锌(Zn)、汞(Hg)、镍(Ni)等在内的约 45 种相对密度大于  $5 \text{ g/cm}^3$  的金属元素 [7]，它们以各种形态广泛存在于土壤、水体、大气等环境中，并通过不同物理和化学行为逐渐发生迁移和累计 [8]。低浓度的重金属在环境中往往通过食物链的富集作用最终易大量蓄积于人体中，当重金属离子进入生物体被吸收时，既可以离子形式存在，又可与生物体内的蛋白质、氨基酸或脂肪酸等结合成有机酸盐和螯合物，还可以与磷酸根和碳酸根形成反应，生成无机盐 [9]，初期不易察觉一旦出现故障则对人的健康产生极大影响。其中铬、铅、镉、汞以及类金属砷污染危害最严重。

## 3. 重金属污染底泥的治理方法

目前国内外应用较多的河流底泥治理方法按照处理机制的不同可分为两大类：异位修复技术和原位修复技术 [10] [11] [12]。其中，原位修复是沉积物不进行疏浚处理，通过物理、化学、生物等方法固定或

处理达到减少污染物危害的修复技术,主要有上覆水充氧技术、覆盖技术、底泥氧化技术等[13];异位修复是沉积物疏浚(通过对沉积物进行疏挖以达到去除表层污染沉积物、减少污染物总量的一种技术措施)后再通过物理、化学、生物等方法消除污染危害的方法,是目前世界上最主流的沉积物修复方法,即先疏浚再进行固化/稳定化、淋洗、电动修复、氧化修复等技术处理[14]。不论是异位修复技术还是原位修复技术,其目的均为降低底泥中污染物的浓度,将污染物转化成无害物质,或将底泥从污染水体中移除或隔离,从而达到河道污染底泥治理,净化河流生态环境的目标。

### 3.1. 物理修复技术

#### 1) 物理吸附法

吸附法是利用具有特殊结构和性质的物质来吸附除去重金属的一种方法。沸石矿物是一种良好的吸附性物质,具有硅氧格架,在晶体内部形成很多孔径均匀的孔道和内表面很大的空穴,所以,对重金属有很强的吸附性能。Kosobucki 等[15]研究了天然沸石对污泥重金属的吸附效果,实验结果表明,添加 2% 粒径为 0.7 mm~1.0 mm 的斜发沸石,震荡 5 h,吸附效果最好。有的研究者发现,一些具有独特细胞壁结构和成分的微生物也具有吸附能力。

#### 2) 电动修复法

电动修复技术是通过在污染介质上施加直流电压,形成电场梯度,以驱动带电污染物向反向电极;移动、富集。再经过进一步的溶液收集处理,以达到减污、清洁的目的。介质类型与性质、pH 值、电压和电流是电动修复的影响因素。20 世纪 80 年代,电动修复技术开始应用于环境领域。污泥电动修复作为一种新兴的修复技术被认为是最具有前景的污泥重金属修复技术之一。Wang 等[16]研究了 pH 值对电动技术修复污泥重金属的影响。实验结果表明,对污泥进行预酸化可以明显提高污泥重金属的移动性;J Gao [17]用阴极循环系统与多层阴离子交换树脂结合,电动除去污泥中的金属镉,结果发现,采用 3 层阴离子交换树脂和阴极循环系统改进的电动修复能够更稳定并且更有效地阻止镉离子重新进入污泥中,可大大提高镉的去除效率,特别是长时间的电动处理,镉的去除效率可增加 60%。

### 3.2. 化学修复技术

#### 1) 固化/稳定化法

纵观国内外重金属底泥处置技术,从经济可行性的角度出发,通过固化/稳定化(S/S)技术将污泥作为填埋处置的预处理手段或转化为可再生利用的岩土工程材料,是符合我国目前污泥处置现状的有效途径之一。S/S 技术起源于 20 世纪 50 年代对放射性废物的处理,随着时代的发展,S/S 技术慢慢趋于成熟,也被广泛的用于污泥的处置方面[18]。S/S 技术,顾名思义是将底泥固定化和稳定化,主要目的是通过在底泥中加入特定的化学物质固化并稳定底泥中的重金属和其他有机污染物,减少重金属和其他污染物在环境中的释放和析出。国内外学者围绕污泥 S/S 技术已经开展了较多的研究,且该技术在我国污泥处理中也得到了一些应用,但同发达国家相比还有一定差距[19] [20]。王川等[21]采用二硫代氨基甲酸盐(DTCR)为添加剂协同水泥固化/稳定化重金属污染底泥,试验结果表明,固化/稳定化的最优配比为水泥掺入量为 50%(干底泥),DTCR 掺入量为 2%(干底泥)。其固化体 7 d 抗压强度为 1.03 MPa,颗粒固化体中重金属 Cu、Zn、Pb、Cd 的浸出浓度分别为 0.105 mg/L、4.65 mg/L、0.232 mg/L、0.123 mg/L,能够达到安全填埋要求。

#### 2) 淋洗法

淋洗可以是异位修复也可以是原位修复。淋洗是将水、油或其它将底泥中重金属的溶出、溶解迁移到所添加溶液中,然后通过添加 CaO、NaOH、NaHCO<sub>3</sub> 等或硫化物如 NaS、H<sub>2</sub>S、FeS 等使其沉淀而被

去除[22] [23]。该技术修复效果的好坏关键在于高效淋洗剂的筛选和研制,目前应用较为广泛的底泥淋洗剂主要有酸、碱、表面活性剂、植物油和 EDTA 络合剂等[24]。淋洗早在美国、日本和德国等发达国家得到应用,并能有效改善水体的黑臭现象[25],但在发展中国家的推广由于其耗费高、耗大而受到较大的限制。王伟亚等[26]采用 EDTA 对重金属底泥进行淋洗处理,结果表明,采用 0.1 mol/L 的 EDTA 在液固比 10:1 的条件下,淋洗效果最好,淋洗 30 min 就能去除掉 70%~80%的 Cu 和 Cd。

### 3.3. 生物修复技术

#### 1) 植物修复技术

利用植物修复重金属污染的理念是在 1983 年由美国科学家 Chaney 等首次提出,即利用对重金属有富集、稳定作用的特定植物来清除重金属污染[27]。根据作用过程机理和修复功能的不同,常可分为植物挥发、植物稳定、根际过滤和植物提取。植物稳定是指利用根际活动降低重金属可移动性或利用植物使重金属向低毒形态转变,减少向环境的扩散,植物稳定适用于富含有机质的沉积物或粘性土壤的修复;植物提取是通过连续种植超积累植物将重金属累积,收割植物进行集中处理,植物提取是目前最有发展前途的一种植物修复技术,其成本低、绿色无污染,关键在于寻找合适的超富集植物;植物挥发是利用植物根系的分泌物促进一些重金属转化为挥发态释放到空气中去,其重金属去除能力强,但仅局限于对挥发性重金属的修复;根际过滤即通过耐性植物根系的吸收、沉淀、积累将重金属保存在根部,其中根系的表面积越大过滤效果越好[28] [29] [30]。植物治理重金属污染的技术与物理、化学等常规的治理技术相比较,其优点是效果好、成本低,且在治理的基础上不会破坏修复基质的结构;因此,在重金属污染的治理中具有巨大的应用潜力[31] [32]。Sivaci A 等[33]采用沉水植物狐尾藻,对 Cu、Zn 等重金属污染的底泥进行原位修复,发现狐尾藻能有效去除上述重金属离子,去除率分别达到 74%和 81%。实验结果证明,狐尾藻可作为 Cu、Zn 污染底泥的原位修复植物。

#### 2) 微生物修复技术

微生物处理重金属的方法最开始是应用于提取矿石或贫矿中的重金属,目前已逐渐应用到环境污染治理领域,例如土壤重金属脱除、河湖底泥生物修复以及工业废弃垃圾中重金属的脱除和回收等。微生物治理重金属污染底泥机理主要有两种,一种是利用自然界中某些微生物的作用或微生物代谢产物的间接作用,产生氧化、还原、吸附或溶解作用,使污泥中的氧化还原电位(Eh)升高、pH 值降低而使其中的重金属发生溶解,将固相中的重金属分离浸出;另一种是特定微生物与底泥中的重金属发生反应,使底泥中沉淀而达到钝化的目的[34] [35]。早在 20 世纪 90 年代初,Couillard D 等人已经成功地利用生物淋滤技术从污泥中去除或者回收重金属[36]。方迪等[37]采用常规细菌分离方法,从河流底泥中筛选到 1 株细菌 FD97,通过序批式摇瓶培养考察了不同温度下(22℃~40℃)该菌株对污染底泥中 Zn、Cu 和 Cr 的去除效果。结果表明,菌株 FD97 为嗜酸硫杆菌属(*Acidithiobacillus* sp.),在 22℃~40℃条件下,以 *Acidithiobacillus* sp.FD97 为主要菌株的生物沥浸作用可有效去除污染底泥中 Zn、Cu 和 Cr。沥浸处理 16d, Zn、Cu 和 Cr 的去除率可分别达 70%、90%和 25%。Seidel 等[38]发现基于嗜酸硫杆菌(*Acidithiobacillus* sp.)生物氧化产酸原理的生物沥浸技术(bioleaching, 也称生物淋滤或生物沥滤)对污染底泥中 Cu、Zn 和 Cd 等重金属的去除率可达 80%以上,且底泥处理后养分损失不大。

## 4. 总结

随着日益频繁的人类活动,河道底泥污染问题在世界各国都难以避免,其成为了人类需要面对的首要环境问题。在处理污染底泥时,物理修复方法总体显得高效快捷积极,化学修复方法较为成熟,生物修复方法价格低廉,对环境本身影响较小,相关部门需要因地制宜的综合采用合适的方法处理底泥污染



问题, 控制内源因素对水质的污染。

## 基金项目

国家自然科学基金(51204084, 51374118); 云南省应用基础研究计划重点项目(2016FA054, 2016FA055); 共伴生有色金属资源加压湿法冶金技术国家重点实验室开发课题(yy2016001, yy2016012)资助。

## 参考文献

- [1] 段志斌, 蔡雄飞, 王济, 安吉平. 我国高原型湖泊沉积物重金属污染评价研究[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(S1): 293-298.
- [2] 钟萍, 李丽, 李静媚, 等. 河流污染底泥的生态修复[J]. 生态科学, 2007, 26(2): 36-40.
- [3] Biota, G. and Winkels, H.J. (1998) Modeling Sediment Accumulation and Dispersion of Contaminant in Lake IJsselmeer (The Netherlands). *Water Science and Technology*, **37**, 17-24. <https://doi.org/10.2166/wst.1998.0730>
- [4] 曲久辉. 中国水体复合污染与控制[J]. 科学对社会的影响, 2000(1): 36-40.
- [5] Allan, R.J. and Ball, A.J. 水和沉积物中有毒污染物评估[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1993.
- [6] Peter, B.R. (1998) Large Scale Treatment of Contaminated Sediments in the Netherlands. *Water Science and Technology*, **27**, 291-298.
- [7] 陈程, 陈明. 环境重金属污染的危害与修复[J]. 环境保护, 2010(3): 55-57.
- [8] 郭轶琼, 宋丽. 重金属废水污染及其治理技术进展[J]. 广州化工, 2010, 38(4): 18-20.
- [9] 韩玲玲, 曹惠昌, 代淑娟, 等. 重金属污染现状及治理技术研究进展[J]. 有色矿冶, 2011, 27(3): 94-97.
- [10] 刘鹏. 湖泊沉积物中重金属污染分析及固化剂研究[D]: [硕士学位论文]. 湘潭: 湘潭大学, 2016.
- [11] 黄勤超. 利用睡莲、荷花对黑臭河道底泥中 PAHs 和重金属的修复研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2013.
- [12] 董文艺, 罗雅, 刘彤宙, 商丹丹. 河道污染底泥处理技术探讨——在龙岗河干流综合治理工程中应用[J]. 水利水电技术, 2012, 43(8): 5-8.
- [13] 汪家权, 陈晨, 郑志侠. 沉积物中重金属植物修复技术研究进展[J]. 现代农业科技, 2013(2): 224-226.
- [14] 曹金清, 王峥, 王朝旭, 李英, 侯培强. 污染水体底泥治理技术研究进展[J]. 环境科学与管理, 2007(7): 106-109.
- [15] Kosobucki, P., Kruk, M. and Buszewski, B. (2008) Immobilization of Selected Heavy Metals in Sewage Sludge by Natural Zeolites. *Bioresour Technol*, **99**, 5972-5976. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.10.023>
- [16] Wang, J.-Y., Zhang, D.-S., Stabnikova, O., et al. (2005) Evaluation of Electrokinetic Removal of Heavy Metals from Sewage Sludge. *Journal of Hazardous Materials B*, **124**, 139-146. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.04.036>
- [17] Gao, J., Luo, Q., Zhang, C., Li, B. and Meng, L. (2013) Enhanced Electrokinetic Removal of Cadmium from Sludge Using a Coupled Catholyte Circulation System with Multilayer of Anion Exchange Resin. *Chemical Engineering Journal*, **234**, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.08.019>
- [18] 王鹏, 唐朝生, 孙凯强, 陈志国, 徐士康, 施斌. 污泥处理的固化/稳定化技术研究进展[J]. 工程地质学报, 2016, 24(4): 649-660.
- [19] Suman Raj, D.S., Aparna, C., Rekha, P., et al. (2005) Stabilization and Solidification Technologies for the Remediation of Contaminated Soils and Sediments—An Overview. *Land Contamination & Reclamation*, **13**, 23-48. <https://doi.org/10.2462/09670513.645>
- [20] Mulligan, C.N., Yong, R.N. and Gibbs, B.F. (2001) Remediation Technologies for Metal-Contaminated Soils and Groundwater: An Evaluation. *Engineering Geology*, **60**, 193-207. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(00\)00101-0](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00101-0)
- [21] 王川, 杨朝晖, 曾光明, 汪理科, 徐海音, 谢华明. DTCR 协同水泥固化/稳定化重金属污染底泥的研究[J]. 中国环境科学, 2012, 32(11): 2060-2066.
- [22] 赵明, 刘宏, 王文江, 田涛, 彭啸, 吴燕. 疏浚底泥重金属污染现状及其治理技术[J]. 盐业与化工, 2016, 45(8): 1-7.
- [23] Brooks, C.S. (1991) *Metal Recovery from Industrial Waste*. Lewis Publishers, Chelsea, 1-5.
- [24] 莫争, 王春霞, 陈琴, 王子健. 重金属 Cu, Pb, Zn, Cr, Cd 在土壤中的形态分布和转化[J]. 农业环境保护, 2002(1):

9-12.

- [25] Qin, B., Yang, L., Chen, F., *et al.* (2006) Mechanism and Control of Lake Eutrophication. *Chinese Science Bulletin*, **51**, 2401-2412. <https://doi.org/10.1007/s11434-006-2096-y>
- [26] 王伟亚, 陈维芳, 张敬会, 黄思思, 李玉祥. 河道底泥中重金属的 EDTA 淋洗研究[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(1): 123-127.
- [27] Chaney, R.L. (1983) Plant Uptake of Inorganic Waste Constituents. In: Parr, J.F., Marsh, P.B. and Kia, J.M., Eds., *Land Treatment of Hazardous Wastes*, Noyers Data Corporation, Park Ridge, 50-76.
- [28] 陈兴兰, 杨成波. 土壤重金属污染、生态效应及植物修复技术[J]. 农业环境与发展, 2010, 27(3): 59.
- [29] Dushenkov, S., Vasudev, D., Kapulnik, Y., *et al.* (1997) Removal of Uranium from Water Using Terrestrial Plants. *Environmental Science & Technology*, **31**, 3468-3474. <https://doi.org/10.1021/es970220l>
- [30] 邢艳帅, 乔冬梅, 朱桂芬, 齐学斌. 土壤重金属污染及植物修复技术研究进展[J]. 中国农学通报, 2014, 30(17): 208-214.
- [31] 乔云蕾, 李铭红, 谢佩君, 晏丽蓉, 朱剑飞. 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.
- [32] 唐宇力, 钱萍, 张海珍, 周虹. 8 种观赏水湿生植物对重金属 Cd 和 Pb 的吸收固定能力[J]. 环境工程学报, 2017, 11(9): 5313-5319.
- [33] Sivaci, A., Elmas, E., Gumus, F., *et al.* (2008) Removal of Cadmium by *Myriophyllum heterophyllum* Michx. and *Potamogeton crispus* L. and Its Effect on Pigments and Total Phenolic Compounds. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, **54**, 612-618. <https://doi.org/10.1007/s00244-007-9070-9>
- [34] 张静霞, 韩涛, 朱建裕. 生物淋滤技术修复重金属污染河流底泥研究进展[J]. 环境工程, 2015, 33(5): 157-159+165.
- [35] Brinza, L., Dring, M.J. and Gavrilescu, M. (2007) Marine Micro and Macro Algal Species as Biosorbents for Heavy Metals. *Environmental Engineering and Management Journal*, **6**, 237-251.
- [36] Couillard, D. and Mercier, G. (1990) Bacterial Leaching of Heavy Metals from Sewage Sludge: Bioreactors Comparison. *Environmental Pollution*, **66**, 237-252. [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(90\)90004-V](https://doi.org/10.1016/0269-7491(90)90004-V)
- [37] 方迪, 赵亮, 单红仙, 王方, 赵阳国, 杨薇薇. 1 株嗜酸硫杆菌的分离鉴定及其对污染底泥中重金属的去除效果[J]. 环境科学, 2009, 30(11): 3358-3363.
- [38] Seidel, H., Ondruschka, J., Morgenstern, P., *et al.* (1998) Bioleaching of Heavy Metals from Contaminated Aquatic Sediments Using Indigenous Sulfur Oxidizing Bacteria: A Feasibility Study. *Water Science & Technology*, **37**, 387-394. <https://doi.org/10.2166/wst.1998.0776>

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2164-5485, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [aep@hanspub.org](mailto:aep@hanspub.org)