



我国水库沉积物污染控制与修复技术探讨

王毅^{1*}, Phanmaha Alek², 王璐³

- 1. 三川德青科技有限公司
- 2. 36 Manor International Sport Hotel
- 3. 广州机施建设集团有限公司
- *. 通讯作者

摘要: 我国的水库存在普遍的淤积现象, 这些淤积的沉积物作为多种污染物的储存库可能形成难以忽视的内源污染。为解决水库沉积物的内源污染问题, 总结了水库沉积物的原位修复技术和异位修复技术, 重点对比分析了异位修复技术的清淤疏浚技术、无害化处理及资源化处理技术, 并对水库沉积物污染控制与修复治理的未来发展方向进行了展望, 以期为我国水库沉积物的污染防治及行业发展提供科学依据和理论支持。

关键词: 水库, 沉积物, 原位修复, 异位修复, 清淤疏浚, 无害化, 资源化

引言

我国已建成超过 9.8 万座水库, 这些水库经过多年运行普遍存在淤积现象(董索等, 2019)。水库淤积的沉积物可作为氮、磷、有机污染物及重金属等多种污染物的储存库(范成新, 2019), 进入水库水体的这些污染物经过一系列迁移转化后最终会蓄积在沉积物中, 同时在一定的环境条件下其又会成为内源污染源而重新向水库水体释放污染物, 如我国污染湖库沉积物的氮磷内源静态负荷通常在总负荷量中的比例高达 10%~50%(范成新等, 2021)。面对如此高负荷的内源污染, 即使采取有效控源截污水库水质也会持续恶化, 甚至发生水华, 并影响其供水和灌溉。为有效控制这些内源污染, 对我国水库沉积物的原位修复和异位修复技术进行总结归纳, 并展望了其未来的发展方向, 以期为我国水库沉积物的污染控制和修复治理提供科学依据和理论支持。

1 水库沉积物原位修复

水库沉积物原位修复系指在不移动污染沉积物的情况下直接对其就地处理, 以实现阻隔氮磷、去除有机物、钝化重金属及脱氮固磷等目的, 主要可采取的方法包括物理修复法、化学修复法及生物修复法等。

1.1 物理修复法

物理修复法主要是采用隔离的方法, 即通过向受污染的沉积物上投放一层或多层黏土、河砂、改性矿石、生物质活性炭(周岩梅等, 2019)、灰渣等覆盖物, 控制或阻止其中的污染物向水体释放, 覆盖工程中一般需需投放约 50cm 厚的覆盖层(含 15cm 左右厚度的生物扰动层)。高增文(2008)通过田庄水库表层沉积物的覆盖实验发现传统覆盖材料(砂)主要通过扩散边界效应抑制沉积物释放污染物(氨氮), 而活性覆盖材料(沸石)则通过扩

2790-3788/© Shuangqing Academic Publishing House Limited All rights reserved.
Article history: Received Feb. 23, 2022 Accepted Feb. 28, 2022 Available online Mar. 1, 2022
To cite this paper: 王毅, Phanmaha Alek, 王璐 (2022). 我国水库沉积物污染控制与修复技术探讨. 自然环境与资源. 2022, Vol1, Issue2, Pages 1-6.
Doi: <https://doi.org/10.55375/ner.2022.1.1>
[基金项目]湖北省水利重点科研项目(编号: HBSLKY202122)

散边界效应和吸附截留的双重作用机制共同抑制沉积物释放污染物，同时同种覆盖材料污染物的穿透时间随着覆盖厚度增加而增长、稳态释放通量则随着覆盖厚度增加而减小，沸石的覆盖效果相比更优于砂，且由沸石(15cm厚)与砂(15cm厚)组成的复合覆盖层效果显著优于砂(50cm厚)覆盖层的覆盖效果。陈蕾(2011)通过对产芝水库的覆盖实验发现，热改性凹凸棒土覆盖和砂土覆盖均可抑制沉积物氮磷的释放，且前者的效果优于后者，热改性凹凸棒土覆盖层对氨氮、硝态氮及总磷的抑制效果较好，而对总氮的抑制效果相对较差，且热改性凹凸棒土覆盖层的厚度越厚、粒径越小、温度越低则对氮磷的抑制效果越好。物理覆盖修复法适用于外源污染得到控制且污染物毒性及迁移率不高的水库，该法需要的覆盖材料用量较大，且难以保证均匀性，并会降低水库库容、危害底栖生物等，同时因污染物并未去除而仍存在扩散风险。

1.2 化学修复法

化学修复法主要是通过投加化学药剂，使之与沉积物中的污染物发生氧化还原、络合、螯合、沉淀等反应，从而实现分解有机污染物、钝化重金属、脱氮固磷等目的。高锰酸钾及双氧水等因其强氧化性能有效降解沉积物中的有机污染物；过氧化钙本身具有强氧化性，还能作为释氧剂改善水体沉积物的厌氧环境而增强好氧微生物的活性，可有效控制沉积物中有机污染物的削减(董祎波等，2020)。一些水泥基固化材料(如水泥、石灰、石膏及钙镁盐等)可固化/稳定化沉积物中的重金属，过氧化钙及硫化物等可与沉积物中的一些重金属发生沉淀反应，而投加 EDTA 则可与一些重金属发生螯合反应并生成稳定螯合物。李津(2017)对新华水库的化学修复研究发现，投加 86g/cm² 的硝酸钙或 14g/cm² 的氢氧化钙在 30d 均可使上覆水氨氮削减至不黑臭(<8mg/L)的水平，且二者对沉积物游离态氨氮的削减率分别高达 79%和 68%。投加硝酸钙还会使得沉积物中的反硝化菌发生反硝化，并进一步使沉积物中的亚铁离子转化成三价铁离子而与磷酸盐紧密结合，从而抑制沉积物磷的释放，亢增军(2013)实验发现投放硝酸钙可以显著抑制沉积物磷的释放，但存在一定的时效性，且时效性随着投放量增加而增长。此外，采用扬水曝气强氧化技术也可抑制沉积物铁、锰、磷等的释放，柴蓓蓓(2012)采用扬水曝气并添加 PAC(20mg/mL)+PAM(0.2mg/mL)的方法后对汤峪水库沉积物铁和磷的平均抑制率分别达到 58.6%和 63.2%。化学修复法见效较快，但存在一定的二次污染风险，适用于突发性污染、小范围修复及应急处理。

1.3 生物修复法

生物修复法主要包括植物修复法和微生物修复法，前者主要是利用植物对污染物的吸收、过滤、挥发、钝化等作用实现对其的积累、转移、转化及矿化等；后者则主要利用微生物的氧化还原及水解等作用分解有机物，或利用微生物的吸附及氧化还原等作用改变重金属的价态及存在形态等，从而使得重金属的毒性降低或消除，微生物法可采用微生物菌剂投放或曝气增氧恢复好氧微生物活力(马壮等，2021)等方式。孙宇(2006)通过围隔实验发现种植水生植物(芦苇、香蒲、菖蒲、菱角、睡莲、金鱼藻、黑藻、马来眼子菜等)可有效控制沉积物中总氮及总磷的含量。袁杰(2010)对西安汤峪水库的研究发现，以陶粒为生物挂膜载体的硝化菌与反硝化菌复配组合对沉积物中氨氮的去除率高达 100%；谢民争等(2019)通过对丹江口水库沉积物的氮素模拟实验则发现，在沉积物-上覆水界面中投放高效好氧反硝化微生物(*Pseudomonas stutzeri*, 168mg/kg 沉积物)的第 65 天对沉积物硝氮及总氮的去除率分别为 79.96%、75.87%。采用曝气增氧可提高好氧微生物活性而抑制沉积物氮、磷、铁、锰及有机物等的释放，但对污染重和难生物降解的污染物效果不理想。黄磊(2020)通过东牙溪水库的原位围隔模拟实验发现，微纳米曝气使得沉积物中的固氮菌、聚磷菌等功能菌群变形菌门含量升高了 26.4%，而总碳、总氮、总磷含量相对非曝气区分别平均降低了 17.1%、10.7%及 15.4%。生物修复法的环境影响较小、费用相对较低，但治理周期较长、见效较慢。

2 水库沉积物异位修复

水库沉积物异位修复是指外移受污染的沉积物，并对其进行异地处理处置或利用，但与土壤异位修复不同的是经处理后的沉积物不再放回原处。目前水库沉积物异位修复中外移沉积物主要采取清淤疏浚的方式。

2.1 清淤疏浚

清淤疏浚主要分为干法作业和带水作业，前者需要排空水库后进行干挖，后者可采用抓斗、虹吸、绞吸、IMS全液压驱动、射流泵、气力泵等方式(表1)直接完成水下清淤。清淤疏浚的施工机械需要按照不同的修复目的、水文地质条件、水库地形地貌、工程规模、工期要求、施工精度及环保等要求合理选取。此外，以污染控制和修复为目的的清淤疏浚宜采用环保疏浚的方式。一般常规疏浚主要是为了增加水体库容、疏通航道，而环保疏浚主要是为清除存在于沉积物中的污染物，二者因目的不同而有较大区别，后者的主要技术特点有：疏挖泥层厚度较薄(<1m)、施工精度要求高(5~10cm)、施工过程二次污染控制严格(需采用防漏抓斗、环保绞刀、增加防护罩、将管线及运泥船密封良好等防止疏浚过程产生二次污染)。

表1 水库清淤常用方式比较

清淤方式	工作原理	作业污染	输料方式	施工效率	作业水深	优缺点	适用条件
干挖	在水库排空后，利用挖机干挖	小	汽车	较高	浅水或无水	需要排空水库	小型水库及有条件排空的水库
抓斗式	利用抓斗的自身重力插入泥层，通过抓斗的闭合与提升挖除底泥	大	汽车或驳船	低	较浅(<30m)	土质适应性强；但底泥易于泄露，水体扰动较大，生产效率低，环保疏浚时可采用全封闭防漏抓斗成本低，设备易于拆卸和运输；	适于浅水区作业及对水质无要求的水库，一般不适用于不范围采用较大坝高的水库进行小规模清淤，且局限于大坝前一定范围(3km)
虹吸式	通过水库上下游的水位差产生虹吸作用排出坝前淤积物	小	管道	中	大	但清淤范围受限，同时有机碎屑等易于堵塞管道	
绞吸式	在绞刀的旋转、扇形横摆和纵向前移作用下，对底泥完成切削和搅动并形成泥浆，然后通过泵机负压抽吸泥浆	中	管道	中	较浅(<30m)	土质适应性较好，通过管道输送泄露少，施工精度高(垂向可达5~10cm)；但对水体扰动较大，环保疏浚需增加安全防护罩，并可采用圆盘式、铲吸式、螺旋式等环保绞刀	对水质要求不高的水库，水深较浅或适中
IMS全液压驱动挖泥	采用独特的液压驱动潜水泵，施工工艺与环保绞吸基本相同	小	管道	较低	较浅	设备先进，体积小，便于移动，适用性较强，可实现挖泥、余水处理及淤积物固结的一体化处理，但生产率较低	对水质有一定要求的水库，适用于小型工程
射流泵	通过高压水射流搅拌破碎水下淤积物，再利用伯努利效应在吸头内产生的负压抽取水与淤积物的混合物	小	管道	中	大	设备构造简单而易于加工，安装维修方便，安全可靠，但效率较低	适用于软土性质且对水质有一定要求的水库
气力泵	通过外部与缸体内部的静压差使泥浆进入缸体	很小	管道或驳船	中	大(最深高达200m)	防扩散、无污染，疏浚深度较大；但疏浚精度一般，浅水及厚泥区效率低，对较多杂质的区域适应性较差	对水质要求较高的水库

2.2 无害化处理

对受污染的水库沉积物进行疏挖外移后，仍需妥善地对其进行无害化处理，此过程通常包含淤积物的无害化处理和余水的无害化处理。

2.2.1 淤积物无害化处理

清淤疏浚的淤积物多以泥浆形态存在，含水率在 90% 以上，采用自然干化不仅效率低、利用性能差，还可能导致二次污染，因此需要进行无害化处理。根据不同的工程项目要求、工期时限、占地情况、环保要求等可采用板框压滤、离心脱水、土工管袋、化学固化、带式脱水等方式对泥浆进行脱水处理(表 2)。

表 2 不同脱水工艺技术对比

工艺技术	药剂添加情况	最终含水率/状态	处理周期	占地情况	无害化/资源化	优点	缺点
板框压滤法	生石灰、石膏、粉煤灰等	30%~60%，可~硬塑	即时	较大	钝化、固封，可用作土材料，烧制砖、水泥及陶粒等	淤积物减容明显，泥饼不需要养护	需要经常清洗或更换滤布，间断运行，生产效率较低，占地较大
离心脱水法	絮凝剂(PAM)、PAC 等	45%~60%，流~软塑	即时	小	钝化、固封，绿化、建筑填土及建筑用砂等	淤积物含砂可分离利用，卫生无气味，自动化程度高	运行费用较高，设备易磨损，适用于少量淤污泥处理
土工管袋法	絮凝剂(PAM)	50%~60%，流塑	1~2个月	较大	钝化、固封，绿化、复垦	相对环保，处理量大，特别适用于含砂量较大的淤积物	占地面积较大，对细颗粒较多的淤积物脱水时间长、效果一般
化学固化法	粉煤灰、生石灰、水泥、催化剂等	55%左右，软~可塑	>1个月	较大	钝化、固封，低标准工程土	固化效果较好	需要养护，效率较低，且占地面积较大，不环保
带式脱水法	絮凝剂(PAM)	65%~80%，流~软塑	即时	小	钝化、固封，可用作土材料，烧制砖、水泥及陶粒等	能耗低，可连续运行，稳定性强	需要不断清洗滤带，存在污水处理内循环负担，处理率偏低，二次处理成本较高

2.2.2 余水无害化处理

目前对清淤疏浚余水仍尚未建立统一的排放标准，而对余水的无害化处理则多以物理法及化学法为主，且重点关注悬浮颗粒物的去除。刘小强&秦俊(2018)对福建山美水库余水依次采用絮凝、沉淀和重金属处理后，余水可满足《污水综合排放》(GB8978-1996)一级标准排放。刘建飞&任红侠(2021)对通济桥水库泥浆沉淀、板框压滤后集中收集的余水依次经絮凝剂、尾水沉淀池处理后，可满足《农田灌溉水质标准》(GB5084-92)和《污水综合排放》(GB8978-1996)一级标准(即总磷 $\leq 0.1\text{mg/L}$ 、氨氮 $\leq 15\text{mg/L}$ 、悬浮物 $\leq 70\text{mg/L}$ 、pH6~8.5、COD $\leq 100\text{mg/L}$)。苏海龙等(2022)通过对某水库的工程现场验证发现，泥浆沉淀池上清液与板框压滤尾水混合后的余水依次经絮凝、斜管沉淀及脱氮分子筛等处理可实现总磷 $\leq 0.2\text{mg/L}$ 、氨氮 $\leq 1.0\text{mg/L}$ 、悬浮物 $\leq 30\text{mg/L}$ 、pH6~9。朱伟等(2022)对沙河水库的研究发现，疏浚余水通过一级絮凝即可去除大部分污染物，而经过混凝沉淀、生物曝气、表流湿地(种植芦苇和荷花)等工艺后各污染物的去除率分别达到：总磷 69%~96%、总氮 21%~72%、悬浮物 73%~99%、COD32%~48%；且余水处理后优于《污水综合排放》(GB8978-1996)一级标准及《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002)一级 A 标准，总磷、COD 等指标可满足《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)IV 类标准。

2.3 资源化利用

经无害化处理后产生的泥饼直接填埋不但将长期占用大量宝贵而稀缺的土地资源，还可能引起土壤、地表水及地下水等的二次污染及滑坡等工程灾害，而焚烧则会面临设备一次投资及运营成本较高的问题，因此资源化利用是解决泥饼消纳问题的必然选择。目前，我国水库沉积物主要的资源化利用方向主要包括建筑材料、填方材料、堆肥发酵及土地利用等，其中建筑材料又包括陶粒、砖及水泥等产品，不同的资源化利用方式如表 3 所示。

表 3 泥饼的资源化利用方向

资源化产品	利用方式	优点	缺点
陶粒	免烧陶粒 经破碎、搅拌、造粒及养护制得	无需烧胀，节约能耗，节约土地资源	无法保证原料稳定供应，工业化困难
	烧结陶粒 加入添加剂、辅料，经脱碳、烧胀制得	陶粒的堆积密度低，保温、降噪、吸附等性能好，实现了对重金属的固化	无法保证原料稳定供应，工业化困难
砖	免烧砖 添加固化剂、骨料、水泥及水等，经搅拌、成型及自然养护；或先制免烧陶粒，再以免烧陶粒制免烧砖	无需焙烧，节约能耗，节约土地资源	运费较高，运输过程存在二次污染风险
	烧结砖 掺入粘结剂、骨料等，经陈化、成型、焙烧及冷却制得	充分利用底泥中有机质的热值，高温焙烧可降解有机物、杀灭病原体 and 固定重金属	砖坯产生孔隙、裂缝及表面不平整等，砖体抗压强度可能降低，运费较高，运输过程存在二次污染风险
水泥	部分替代黏土，与石灰石、铁粉、石英砂等按照配比磨细混匀后制生料，经高温煅烧制得水泥熟料	充分利用底泥中有机质的热值，高温煅烧可降解有机物、杀灭病原体 and 固定重金属	需重点关注泥饼中氯盐的含量
填方材料	固化或焚烧处理后，作为路基、筑堤、桥梁、低洼地区与填方工程等的填方材料	具有一定的工程实践性和较广泛的工程应用前景	需要预处理，且存在二次污染风险
堆肥发酵	在高温高湿条件下，利用微生物对沉积物中的有机物、动植物残骸等进行发酵和分解，形成有机肥料	对沉积物的理化性质和含水率要求较低，节约减量化成本，可大幅缩短综合处置时间，同时充分利用了沉积物中的营养元素	需投入秸秆、粪便、菇渣、稻壳等辅料维持 C/N 在 25~30: 1、综合含水率 55% 左右，前期探索工艺参数工作量较大，污染物可能产生潜在危害
土地利用	土壤化改良后作表土，与秸秆、藻体等混合制土壤基质，增加有机质用于园林绿化，建造岛屿种植物建设湿地，用于矿区复垦等	能耗低，且充分利用了淤积物中的腐殖质及氮、磷、钾等营养元素和微量元素	可能导致二次污染，对土壤、相邻水体、生物及生态均存在风险

3 问题与展望

近 20 年来我国沉积物环境研究发展较快，整体已进军国际研究第一方阵，在水库沉积物污染控制与修复方面也取得了比较丰硕的成果，但也仍存在一定的问題。在水库沉积物的原位修复方面，我国开展的理论性研究较多，而应用型研究则相对较少，且多缺乏规模性研究和案例，治理效果也存在稳定性不足等问題，因此难以被决策部门重视。在水库沉积物的异位修复方面，疏挖淤积物的最终出路是最大问題，其关键在于如何简便、快捷地实现脱水干化并因泥施策、因地制宜地实现多途径及规模化的综合利用，另外欠挖、回淤及浚后是否达到治理效果等也是其不可忽视的问題。此外，我国对水库沉积物的环境研究多集中在氮、磷污染方面，对重金属、持久性有机污染物及一些新兴污染物(如 PFCs、微塑料等)还需特别关注。新技术的引进和消化运用仍是未来的重点努力方向之一，如微生物电化学技术；同时，多种技术的联用也是未来的发展方

向之一，如清淤疏浚之后再串联原位覆盖、化学钝化或植物修复技术等；另一方面，还需加强上述修复技术的应用型研究，建议将研究逐渐从实验室模拟转向围隔，最终依托于实际工程项目，以此加强其应用价值。

[作者简介]王毅(1993-)，湖北咸宁人，男，硕士，三川德青科技有限公司，主要从事环境污染控制理论与技术研究，邮箱：1005662575@qq.com。Phanmaha Alek(1990-)，老挝万象人，男，硕士，36 Manor International Sport Hotel，主要从事环境污染控制、环境管理研究。王璐(1991-)，河南郑州人，男，硕士，广州机施建设集团有限公司，主要从事环境污染控制、市政技术研究。

参考文献:

- [1] 董索,李建清,陈利强.水库清淤技术概述[J].水利水电快报,2019,40(11):49-52+63.
- [2] 范成新.湖泊沉积物—水界面研究进展与展望[J].湖泊科学,2019,31(05):1191-1218.
- [3] 范成新,刘敏,王圣瑞,等.近 20 年来我国沉积物环境与污染控制研究进展与展望[J].地球科学进展,2021,36(04):346-374.
- [4] 周岩梅,任传华,孟晓东,等.生物质活性炭原位修复有机物污染底泥技术研究与应用[J].环境科学研究,2019,32(01):43-51.
- [5] 高增文. 山区水库氮污染行为与控制技术研究[D].青岛:中国海洋大学,2008.
- [6] 陈蕾. 水库内源氮磷释放的覆盖技术研究[D].青岛:中国海洋大学,2011.
- [7] 董伟波,吴慧芳,张国庆,等.河湖底泥污染物及其原位修复技术的研究进展[J].广东水利水电,2020(12):13-18.
- [8] 李津. 化学法对城市黑臭湖库水体及沉积物修复试验研究[D].重庆:重庆大学,2017.
- [9] 亢增军. 底泥中磷的原位化学控制试验研究[D].西安:西安建筑科技大学,2013.
- [10] 柴蓓蓓. 水源水库沉积物多相界面污染物迁移转化与污染控制研究[D].西安:西安建筑科技大学,2012.
- [11] 马壮,熊元武,罗丹丹.典型曝气增氧技术及其案例分析[J].节能与环保,2021(01):56-58.
- [12] 孙宇. 洋河水库水环境的水生植物修复研究[D].武汉:华中农业大学,2006.
- [13] 袁杰. 水库污染沉积物生物修复[D].西安:西安建筑科技大学,2010.
- [14] 谢民争,陈倩,党晨原,等.水库底泥氮释放及其好氧微生物脱氮研究[J].北京大学学报(自然科学版),2019,55(03):561-570.
- [15] 黄磊. 微纳米曝气组合技术应用于东牙溪水库水质改善研究[D].福州:福建师范大学,2020.
- [16] 刘小强,秦俊.大型深水水库环保疏浚方案设计及工程应用[J].中国港湾建设,2018,38(12):31-36.
- [17] 刘建飞,任红侠.深水条件下生态清淤技术应用研究[J].人民黄河,2021,43(06):86-91.
- [18] 苏海龙,刘祥兵,王毅,等.水利清淤工程底泥及余水处理一体化设计[J].江西建材,2022(02):200-202.
- [19] 朱伟,许小格,侯豪,等.水库环保疏浚及板框脱水工程中余水水质及变化规律[J/OL].湖泊科学:1-12[2022-02-23].