

生态清淤技术在湖库治理中的应用综述

刘钦波 沈小林

江苏省水利建设工程有限公司 江苏 扬州 225000

摘要：湖库底泥内源淤积是制约水体水质稳定、生态基底完好的核心问题，相较于传统扰动式清淤，生态清淤兼顾疏浚施工与生境保护，现已成为湖库内源治理主流工艺。本文梳理物理、物化、生物、复合四类主流生态清淤工艺原理，梳理勘测施工、尾水防控、底泥处置、资源化利用全流程配套技术，结合浅水湖泊、深水供水水库、重金属污染湖库三类实景工程，对比不同工况工艺选型及施工参数，剖析当前机具、工艺、行业标准现存短板，提出智能机具研发、一体化施工、分级标准构建、流域协同管控优化路径，以期为国内差异化湖库生态清淤施工提供工程参考。

关键词：生态清淤技术；湖库治理；全流程处置技术；应用；展望

引言：国内平原湖泊、山地水库长期受外源径流汇入、内源底泥沉积叠加影响，底泥营养盐、重金属蓄积问题逐年凸显，内源污染物释放极易打破湖库水体稳态，加大河湖运维治理难度。传统粗放清淤扰动性强、易破坏水下底栖生境，底泥处置二次污染风险较高，难以适配现阶段水源地、生态型湖库管控要求。现阶段生态清淤工艺种类繁杂，工况适配标准不统一，工程选型缺乏参照依据。基于此，本文依托现有竣工工程资料，系统梳理生态清淤工艺、配套技术、工程应用实况，厘清各类工艺适用边界，助力湖库规范化内源治理施工。

1 湖库治理主流生态清淤技术类型及工艺原理

结合国内湖库水深、底泥污染类型、水体水文边界条件，现阶段湖库应用生态清淤以低扰动、分层疏浚、原位控污为核心准则，区别于传统大开挖、强扰动机械清淤，主流技术分为四大类别，各类工艺原理、施工介质、作业方式差异化明显，具体如下：（1）物理低扰动生态清淤技术。该技术依托密闭式疏浚机具完成底泥剥离输送，全程隔绝水体大范围紊动，无药剂外源投加。核心机具包含密闭吸盘清淤设备、小型水下绞吸清淤装置、履带式水下清淤机器人，工艺核心为依托负压吸附、浅层切削模式，仅剥离表层污染浮泥、厌氧污染底泥，保留下层原生无污染底泥及底栖基质，疏浚泥浆通过密闭管道输送外运，适配浅水景观湖、饮用水源水库精细化分层清淤作业。（2）物化协同改性生态清淤技术。属于预处理耦合疏浚复合型工艺，施工前置阶段定向投加环境友好型钝化、絮凝药剂，药剂仅作用于表层污染底泥孔隙水，固化磷、重金属等内源结合态污染物，降低底泥扰动释放系数，后续搭配轻型清淤设备完成固化底泥清运。工艺重点为药剂靶向反应，不改变底

层底泥理化结构，多用于重金属、总磷复合型重度污染湖库治理。（3）生物原位生态清淤技术。无机械疏浚开挖工序，依托外源功能菌剂、土著底栖改性菌群，分解底泥有机质、还原还原性污染组分，同时改良底泥氧化还原电位，压实表层松散污染淤泥，实现底泥自固结减容。该技术无底泥外运工序，作业零水体扰动，仅适配轻度有机质淤积、富营养化小型静水河库。（4）复合耦合生态清淤技术。整合物理疏浚+生物钝化双工艺，先以密闭设备定量清淤高污染底泥，再对残留薄层污染底泥原位生物改性，兼顾清淤效率与生境保护性，是现阶段大中型复合型污染湖库主流适配工艺^[1]。

2 生态清淤全流程配套处置技术

2.1 湖库差异化清淤深度勘测与精准施工管控技术

该技术为清淤前置配套工艺，依托原位检测设备划定分层疏浚边界，杜绝超挖、欠挖施工问题，工艺实操内容如下：（1）原位分层勘测技术，采用水下剖面探测仪、底泥柱状取样器，分层测定浮泥层、污染底泥层、原生洁净底泥层厚度，同步检测底泥 TP、TN、重金属含量，划定分区清淤深度阈值；（2）施工定位管控技术，搭载北斗水上定位系统，联动水下清淤设备电控模块，限定机具切削下探深度，设置限位启停程序；（3）现场分区管控，依据湖库水文分区，划分深水区、滨岸浅水区、水源保护区施工单元，差异化调整机具作业转速、行进速率，适配库区边界施工要求。

2.2 清淤尾水净化与库区二次污染防治技术

生态清淤泥浆分离产生上清尾水，悬浮物及溶解态污染物浓度偏高，严禁直排库区，配套分级净化防控工艺如下：（1）库区原位围挡控污，施工水域布设双层透

水防渗浮帘,阻隔扰动泥浆横向扩散,隔离施工区与原生洁净水体;(2)场站分级沉淀处理,采用三级模块化沉淀池,依托天然黏土、改性沸石填料完成尾水固相杂质截留,无需外加复合型絮凝药剂;(3)末端达标过滤工艺,沉淀池出水流经石英砂活性炭过滤装置,管控出水悬浮物、溶解磷指标,达标后回流湖库水体,全程不改变库区原有水体理化基底。

2.3 污染底泥减量化、无害化脱水处置工艺

外运含水底泥含水率普遍达 85%~92%,体量大、转运成本高,场内配套无害化脱水工艺如下:(1)泥浆预处理调质,针对重金属、富营养化污染底泥,投加无机钝化固化粉剂,仅结合底泥孔隙污染物,不破坏底泥固相结构;(2)机械梯度脱水工艺,依次采用浓缩池重力预脱水、板框压滤机深度脱水,将底泥含水率降至 55%以下,实现淤泥体积缩减 40%~50%;(3)分类无害化处置,高重金属底泥密闭固化封存,常规营养盐底泥仅脱水稳定处理,分类分区堆放,规避交叉污染。

2.4 资源化底泥土地利用、生态回填利用路径

脱水稳定底泥满足水土利用管控标准后,实行分区资源化处置,贴合国土及水利施工规范:(1)滨岸带生态回填利用,筛选低污染脱水底泥,压实改性后用于湖库消落带、滨水岸坡地形回填,重塑水下缓坡基底,适配库区原位地貌修复施工;(2)园林绿化土资源化利用,经第三方岩土检测达标后,腐熟调配底泥有机质配比,用作城郊林地、公园绿化种植基质;(3)路基填料资源化利用,深度固化底泥拌和砂石骨料,达标后用作园区水利便道临时路基填料,仅限非承重土建施工使用^[2]。

3 生态清淤技术典型湖库场景工程应用

3.1 浅水富营养型湖泊生态清淤工程应用

此类湖泊水深 1.0-4.0m,水体流速小于 0.15m/s,底泥以藻类残体、腐殖质沉积为主,表层浮泥流动性强,底泥淤积厚度 0.2-1.2m,湖滨带水生植被连片分布,施工核心要求为低扰动、不破坏原生底栖基质,现场应用要点如下:(1)施工设备选型,全域选用浮式密闭吸盘清淤机,淘汰开放式绞吸清淤设备,设备刀头加装柔性防护护套,避免切割下层无污染原状底泥;(2)现场分区作业,划分敞水区、植被缓冲区、近岸管控区,植被缓冲区清淤行进速度控制 0.6-1.0m/min,敞水区行进速度 1.0-1.5m/min,统一清淤深度 20-40cm;(3)水域隔离布设,施工区外围布设双层防渗浮帘,浮帘底部配重沉入底泥 5-10cm,阻断风浪带动浮泥扩散;(4)配套作业模

式,清淤泥浆就近上岸,通过叠螺机预脱水后,转运至湖滨堆场堆放,无需远距离外运。以太湖西岸城郊浅水湖泊治理项目为例,全域采用该工艺,施工水体悬浮物增量可控,未破坏原有沉水植物群落。

3.2 深水供水型水库生态清淤工程应用

区域集中式供水水库水深多为 7-25m,水体存在明显温跃层分层结构,库区依法划分一级、二级取水核心保护区,施工执行零外源药剂投放、严控水体扰动硬性约束,仅针对入库河口、库湾缓流淤积带开展局部清淤作业,库区中心取水水域全面禁止施工,工程实操要点如下:(1)施工时段选择,固定枯水期 12 月至次年 2 月施工,低温环境下底泥微生物呼吸速率下降,底泥氮磷释放活性降低,同时库区水位相对平稳,便于水下定位作业布设,规避供水水质季节性波动风险;(2)施工机具配置,采用水下无线遥控清淤机器人,搭载高精度水下定位模块,定点切削固结淤积底泥,配备耐压型全密闭输泥管道,泥水全程密闭输送,不与库区上层清水掺混扰动;(3)施工边界管控,取水口周边设置 60m 永久禁控区并布设动态监测点位,库湾清淤深度上限 50cm,仅清理历年河道汇入泥沙及表层氧化态污染底泥;(4)尾水处置标准,清淤尾水经沉淀池+沸石过滤池两级处理,出水 SS、总磷指标满足地表水对应管控限值后方可回流库区,全程不添加絮凝药剂,保障集中式原水供水安全性^[3]。

3.3 重金属复合型污染湖库定向生态清淤实践

临近工矿厂区、农田退水汇集型湖库,底泥富集铅、镉、铜重金属污染物,污染物固结于表层 0.4-0.9m 底泥胶体中,普通清淤易造成重金属溶出扩散,项目采用钝化预处理+分层疏浚耦合工艺,实操流程如下:(1)原位钝化预处理,施工前 4-5 天,水面均匀投加改性沸石、羟基磷灰石钝化材料,掺量为表层污染底泥干重的 2.5%-3.2%,仅结合孔隙水重金属离子,不改变下层底泥物理结构;(2)分层定向疏浚,上层 0.3-0.7m 高污染底泥全断面开挖清运,下层过渡底泥原位留存封存,不进行开挖作业;(3)转运闭环管控,污染淤泥采用密闭罐车转运,送至合规危废处置场站固化填埋,禁止就地回填、园林绿化利用;(4)全过程监测,施工点位布设水质在线监测装置,定时检测水体重金属浓度,超标即刻停工围挡处置。

3.4 不同工况下清淤技术选型及施工参数对比

结合国内 40 余项河湖生态清淤竣工工程台账,以水深、污染类型、水体功能为划分依据,整理标准化

选型、施工参数,适配现场施工方案编制,具体分类如下:(1)浅水富营养湖泊:水深 $\leq 4\text{m}$,营养盐单一污染,优选密闭吸盘清淤,设计清淤深度25-40cm,泥浆输送流速1.2-1.6m/s,施工水体瞬时悬浮物限值 $\leq 75\text{mg/L}$,单日有效清淤量200-240 m^3 ;(2)深水供水水库:水深 $\geq 7\text{m}$,泥沙叠加轻度营养盐污染,优选深水机器人清淤,设计清淤深度40-55cm,泥浆流速0.8-1.1m/s,悬浮物限值 $\leq 40\text{mg/L}$,单日有效清淤量100-130 m^3 ;(3)重金属复合型湖库:不限水深,重金属为主复合污染,优选钝化耦合清淤,清淤深度50-80cm,钝化养护时长96h,严禁快速扰动开挖;(4)小型浅淤积塘库:淤积厚度 $< 20\text{cm}$,轻度有机质污染,优选原位生物清淤,无机械开挖,仅投放土著功能菌群,无泥浆外运工序^[4]。

4 生态清淤技术优化方向及湖库长效治理展望

现阶段国内湖库生态清淤多侧重阶段性疏浚施工,工艺适配性、施工标准化、后期运维体系仍存在短板,结合河湖治理行业技术迭代、流域管控要求,结合现有工程痛点,从技术、工艺、标准、管控四个维度,梳理优化方向与行业发展展望,内容如下:(1)轻量化智能低扰动清淤机具迭代优化。摒弃大型水上疏浚设备作业模式,适配小型湖库、近岸浅水区作业工况,优化水下清淤机器人密闭刀头、自适应切削模块,搭载一体化水下探测传感组件,实现底泥层识别、清淤深度自主调控,降低人工操控误差,优化机具涉水适配性,降低深水、植被区施工扰动系数,适配水源地、生态保护区限制性施工场景。(2)清淤与生境修复一体化成套工艺完善。打破单一清淤施工模式,构建分层清淤、底泥钝化、基底改良、乡土植被定植联动工艺,针对清淤后裸露底泥基底,配套原位改性材料,不额外增设施工工序,简化施工流程,规避二次进场施工成本,适配富营养化、重金属污染两类主流湖库一体化施工。(3)全域分级清淤施工标准体系落地构建。结合地域水文、底泥

本底值,划分浅水湖泊、深水水库、工矿污染湖库分级清淤规范,统一清淤深度、药剂掺量、尾水排放、底泥处置行业参数,补齐小众工况清淤施工空白,统一区域施工质控要求,解决现有工艺选型随意、施工参数无统一依据的行业问题。(4)流域联动常态化内源管控模式发展。单一湖区阶段性清淤无法实现长效控污,后续将依托流域水文监测网络,结合入库污染源管控,将生态清淤纳入流域常态化治理体系,由灾后应急清淤转变为预判式定量清淤,构建外源截污、内源控淤协同治理模式,提升湖库基底稳定性。

结束语:本文系统梳理湖库生态清淤主流技术、全流程配套工艺及实景工程应用情况,明确各类清淤技术适配水深、污染类型及施工管控参数,得出物理清淤适配生态保护区、物化耦合清淤适配重金属污染水体、生物清淤适配轻度淤积小型水体的选型结论。目前国内生态清淤存在机具适配性不足、施工标准碎片化、清淤后长效管控缺失等问题。后续需结合地域底泥本底条件,优化低扰动施工设备,完善一体化施工工艺,健全分级施工规范,联动流域外源控污,弱化阶段性清淤依赖性,实现湖库基底长效稳定管控。

参考文献

- [1] 冯显露.生态清淤技术在湖库治理中的应用综述[J].泥沙研究,2025,50(5):73-80.
- [2] 黄明康.湖库底泥清淤技术及应用场景分析[J].环境保护与循环经济,2026,46(4):46-50.
- [3] 刘凯,田娜娜,彭婷婷,梁建奎,李瑞雯,娄保锋,唐剑锋.水生态系统调控研究进展与应用:以湖库型水体为例[J].环境科学研究,2026,39(5):1205-1215.
- [4] 梁洪涛.生态清淤技术在河湖污染治理中的应用分析[J].中文科技期刊数据库(文摘版)自然科学,2026(4):195-198.