

典型浅水湖泊内源污染现状及综合治理路径

朱毅平, 赵春, 蒋超, 祁欢

宜兴市公用投资管理有限公司, 江苏 宜兴 214200

DOI:10.61369/EAE.2026020024

摘 要 : 浅水湖泊作为流域水资源调蓄与生态保育的核心载体, 普遍面临内源污染引发的富营养化、蓝藻水华频发等生态问题。本文以太湖西岸宜兴近岸区域为案例, 系统分析典型浅水湖泊内源污染的核心特征, 包括底泥营养盐累积、藻积层堆积、污染释放风险及处置环境隐患等问题。构建“精准清淤—底泥固化—余水净化—生态保护”的综合治理路径, 详细阐述各环节的关键技术参数与工程设计要点, 并总结精准化设计、系统化治理、多部门协同的核心经验。以期为我国同类浅水湖泊内源污染治理提供技术参考与实践范式, 助力浅水湖泊生态系统可持续修复。

关 键 词 : 浅水湖泊; 内源污染; 底泥治理; 生态清淤; 综合治理; 蓝藻防控; 余水处理

Current Situation and Comprehensive Management Path of Endogenous Pollution in Typical Shallow Lakes

Zhu Yiping, Zhao Chun, Jiang Chao, Qi Huan

Yixing Public Investment Management Co., Ltd., Yixing, Jiangsu 214200

Abstract : Shallow lakes, as the core carriers of water resource storage and ecological conservation in river basins, generally face ecological problems such as eutrophication caused by endogenous pollution and frequent occurrence of cyanobacterial blooms. This paper takes the nearshore area of Yixing on the west bank of Taihu Lake as a case study, systematically analyzing the core characteristics of endogenous pollution in typical shallow lakes, including nutrient salt accumulation in the bottom sediment, accumulation of algal layers, pollution release risks, and environmental safety hazards. A comprehensive management path of "precise dredging – bottom sediment solidification – residual water purification – ecological protection" is constructed. The key technical parameters and engineering design points of each link are elaborated in detail, and the core experience of precise design, systematic governance, and multi-department collaboration is summarized. It is expected to provide technical references and practical models for the treatment of endogenous pollution in similar shallow lakes in China, and help restore the sustainable ecosystem of shallow lakes.

Keywords : shallow lakes; endogenous pollution; bottom sediment management; ecological dredging; comprehensive management; blue-green algae control; residual water treatment

引言

浅水湖泊作为流域生态系统的核心组成部分, 兼具水资源调蓄、生物多样性保育、航运旅游等多重功能, 是维系区域生态安全与经济社会可持续发展的重要载体^[1]。然而, 受城市化扩张、工农业发展及人类活动干预影响, 我国多数典型浅水湖泊面临内源污染加剧的严峻挑战——底泥中总氮、总磷等营养盐长期累积, 在风浪扰动、水温变化等触发条件下持续向上覆水体释放, 成为湖泊富营养化、蓝藻水华频发及湖泛风险加剧的关键诱因, 严重威胁饮用水安全与生态系统完整性^[2]。太湖作为我国第三大淡水湖, 是典型的浅水碟型湖泊, 其西岸宜兴近岸区域因入湖河道密集、水流平缓, 成为底泥淤积与污染富集的高发区^[3]。本文以太湖西岸宜兴近岸区域内源污染治理工程为实践案例, 系统解析典型浅水湖泊内源污染的核心特征, 构建“精准清淤—底泥固化—余水净化—生态保护”的综合治理路径, 提炼工程设计中的关键参数与优化逻辑, 旨在为破解同类浅水湖泊内源污染治理难题提供兼具科学性与可操作性的实践参考, 助力流域水环境综合治理水平的整体提升。

作者简介:

朱毅平 (1982-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 给排水;

赵春 (1998-), 男, 硕士 工程师, 研究方向: 防震减灾及防护工程;

蒋超 (1996-), 男, 硕士 助理工程师, 研究方向: 水利工程;

祁欢 (1996-), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向: 环保工程。

一、典型浅水湖泊内源污染核心特征——以太湖西岸宜兴区域为例

(一) 区域概况

太湖西岸宜兴区域地处江苏省西南端、沪宁杭三角中心，东濒太湖，南邻浙江省长兴县，西北与常州市接壤，地理位置特殊且生态敏感性高。该区域管辖的太湖水域中，西沿岸区面积179.5km²，竺山湖16.9km²，湖心区46.7km²，境内河流密布，社渚港、官渚港、大浦港等5条主要入湖河道呈放射状汇入太湖，2022年湖西区入湖水量占全湖入湖总量的69.4%，是太湖水资源的主要补给区之一。

区域地形南高北低，西南部为低山丘陵，东北部为太湖滨区与平原圩区，独特的地形地貌导致入湖泥沙与污染物易在近岸带沉积。气候属于北亚热带湿润季风气候，四季分明，降水充沛，年平均气温16.6℃，年降水量1593.6mm，主导风向为东南风，夏季高温高湿的气候条件与季风驱动，易导致蓝藻在近岸带聚集堆积，形成高有机含量的藻积层。

该区域是太湖流域重要的生态屏障，涵盖太湖（宜兴市）省级重要湿地，是野生动物栖息地与重要生态廊道，同时也是沿湖城市饮用水水源地的重要保护区域，生态功能定位突出，内源污染治理的生态意义与社会价值重大。

(二) 内源污染现状与突出问题

1. 底泥污染累积特征

太湖西岸宜兴近岸区域底泥淤积问题显著，平均淤积厚度达0.42m，其中新庄街道茭渚港－洪巷港、丁蜀镇庙渚港－新港段为淤积核心区域。底泥垂向呈现清晰分层结构，自上而下依次为浮泥层（2-4cm）、流泥层（5-10cm）、淤泥层（平均20cm）

及淤泥质土层，浮泥与流泥共同构成的藻积层是污染最集中的区域。

表层0-10cm底泥营养盐富集严重，总磷（TP）平均含量407.5mg/kg、总氮（TN）平均1234.4mg/kg、有机质（OM）平均2.08%，均超过中度污染标准，且呈现“近岸高、湖心低”的分布特征，庙渚港、双桥港等区域为污染热点。营养盐垂向分布呈表层富集规律，总磷超标层最深可达50cm，总氮超标则主要集中在表层20cm以内，反映出近20年该区域底泥污染累积呈持续加剧态势。

2. 污染释放风险与生态影响

太湖作为典型浅水湖泊，风浪扰动频繁导致底泥易悬浮，底泥间隙水总磷均值0.645mg/L、总氮均值6.082mg/L。据测算，太湖底泥年均释放总磷约800t，占年入湖总磷负荷的40%，是造成湖体总磷高位波动、蓝藻频发的关键原因。2024年监测数据显示，区域蓝藻平均密度达4229万个/L，符渚港－欧渚港等区域多次出现水体异常，湖泛发生风险突出。

持续的污染释放已造成明显生态退化：底栖动物群落以寡毛类、摇蚊幼虫等污染指示种为主，腹足类、瓣鳃类等敏感物种稀缺；西沿岸水生植物覆盖度不足1%，生态系统自我净化能力大幅弱化，形成“污染－生态退化－污染加剧”的恶性循环。

3. 底泥处置环境风险

底泥有毒有害物质检测结果显示，除镉含量超标外，汞、砷、铅、铬、铜、镍、锌等其他重金属含量均满足《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准（GB15618-2018）》中的筛选值要求如表1所示。底泥浅表层镉平均含量0.7mg/kg，超过筛选值（0.3mg/kg）但未达到管控值（3mg/kg），若直接用于农用地存在环境风险。

表1 底泥有毒有害物质含量统计情况（单位：mg/kg）

特征值	铬（Cr）	镍（Ni）	铜（Cu）	锌（Zn）	砷（As）	镉（Cd）	铅（Pb）	汞（Hg）
最大值	114.0	78.0	32.0	106.0	15.90	6.26	61.0	0.192
最小值	47.0	25.0	11.0	40.0	5.07	0.1	28.0	0.07
平均值	81.0	52.0	22.0	73.0	10.49	0.7	45.0	0.13
筛选值	200	100	100	250	30	0.3	120	2.4
管控值	1000	—	—	—	120	3	700	4

基于上述污染特征，底泥处置需避开农用地，优先选择矿坑修复、园林绿化、路基材料等途径，同时通过科学的固化处理降低镉污染扩散风险，确保整个处置过程的环境安全。

二、典型浅水湖泊内源污染关键治理技术与工程设计

(一) 精准生态清淤技术

清淤范围的科学界定是精准治理的前提^[4]。基于底泥污染监测数据与规划要求，工程清淤范围优化调整为太湖西沿岸沙塘港～新庄及丁蜀近岸水域，清淤面积2.79km²，剔除庙渚港～乌溪港水域，避免近岸带先清淤导致外侧底泥快速回淤，提高治理成效。

设备选型遵循环保、高效、适配的原则，选用200m³/h-350

m³/h环保绞吸式挖泥船，配备第三代环保绞刀头与防护罩壳，绞刀头呈长锥体结构，四周设12个纵向与横向刀片，外部加设防护罩壳，可有效减少底泥扰动与扩散，施工时水体扰动范围不超过50m。挖泥船配备污染监测系统、水下彩色电视摄像机与卫星定位仪，平面控制精度≤±5m，垂直精度≤-5cm，满足薄层精准清淤要求，避免漏疏与超挖。

清淤施工采用分区、分条开挖的方式，按照“由深水区向浅水区”的作业顺序，适应清淤区平均水深1.1m的水文条件。排泥管线由浮管+潜管+岸管组成，总长根据清淤分区与固化场位置确定，丁蜀清淤分区综合排距13.0km，新庄与周铁清淤分区综合排距5.2km与1-3km。管线穿太湖防汛道路及蓝藻打捞设施区域时，采用覆土及铺设钢板保护，避免破坏现有设施；穿航道区域优化路线设计，新庄清淤区底泥通过管道输送至周铁固化场，避

免排泥管线穿航道造成施工干扰。

（二）底泥固化处理技术

底泥固化工艺的选择综合考虑处理效率、占地需求、工程成本等因素，对比自然沉淀固化法、板框压滤法、带式压滤法、离

心脱水法等多种工艺，如表2所示。最终选用土工管袋固化法。该工艺具有固化周期短、减量化明显（开挖方与压榨后松散方之比约1:0.5~0.6）、固化土含水率低（50%~65%）、占地小等优势，适配工程场地限制与8个月工期要求。

表2 不同底泥固化工艺对比表

固化工艺	处理后含水率	固化周期	减量化程度	占地面积	运行费用（元 /m³）	环保性
自然沉淀固化法	70%（流-塑状）	3-5年	最小	最大	5	一般
板框压滤法	30%-50%（可-硬塑）	即时	最大	最小	60-70	好
带式压滤法	45%-55%（软-可塑）	即时	较大	较小	60-70	好
离心脱水法	45%-55%（软-可塑）	即时	较大	较小	80-90	好
土工管袋固化法	45%-55%（软-可塑）	1-2月	较大	较大	40-50	好

本次工程清淤总土方75万 m³，采用土工管袋为主的固化方式进行固化处理，土工管袋的工艺流程如下：

①环保绞吸船清淤，清淤船湿式清淤，通过输送管道，输送到岸边淤泥脱水干化场地。②拦污栅+污泥均质池，使用拦污栅有效去除大颗粒杂质、渔网，污泥均质池对淤泥流量和浓度进行调节，保证后续匀衡处理。③淤泥在线处理，通过泥浆泵加压至在线处理装置（安装在集装箱内），采用高效处理剂、稳定剂，动态混合，实现泥水分离。④淤泥脱水，经过在线处理的淤泥，通过软管送入土工管袋内。絮凝的淤泥在袋内与水分离，固体留在袋中，水透过袋壁流出。

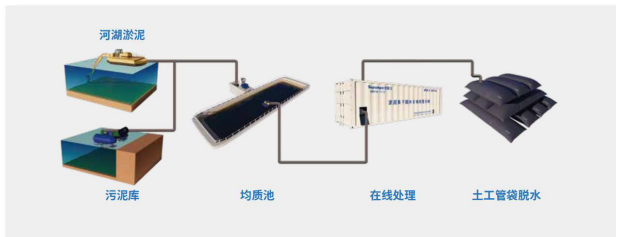


图1 土工管袋工艺流程

结合现场条件及节省成本，本工程共设置5个固化场，每个固化场共设置若干固化区，固化区设置两层土工管袋，根据场地条件，一层管袋固结后高度为2.0m，先期场地平整至5.0m高程，淤泥吹填固结后泥面高程约为9.0m。

排泥固化区外围四周设置排水沟，排水沟底宽 1.2m，深 0.7m，视现场实际情况排水沟开挖坡比按 1:2~1:4，排水沟坡面及沟底设置一层复合土工膜，上部及沟底设置袋装土压重。



图2 固化场布置典型平面图

固化区设置纵横道路，满足施工过程中场内交通通行，横向道路间道路宽度均为 5m，采用碎石垫层路面，碎石垫层厚

20cm，下部填筑60cm厚灰土基层。

为收集固化后的余水，拟在排泥固化场南侧设置余水沉淀池。余水沉淀池底高程 0.5m，沉淀池内部设置分隔围堰，形成2级余水沉淀池，固化区排水沟余水汇入余水沉淀池，经处理达标后再通过泵抽排入附近水系。

（三）余水达标处理技术

余水排放是避免二次污染的关键环节，工程明确严格的余水排放控制指标：悬浮物（SS）执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》（GB 18918-2002）二级标准：（<30mg/L）；总磷（TP）<0.2mg/L、化学需氧量（COD）<20mg/L、氨氮（NH₃-N）<1.0mg/L，执行《地表水环境质量标准》Ⅲ类标准；总氮（TN）<6.0mg/L，在《太湖地区城镇污水处理厂及重点工业行业主要水污染物排放限值》基础上适当提高，确保余水排放不对受纳水体造成污染。

余水处理采用“物理沉淀+化学絮凝+微生物+曝气”的综合工艺，余水处理工艺流程如图3所示^[5]。

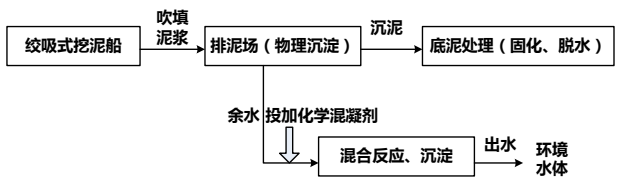


图3 疏浚余水物理化学组合工艺流程图

具体流程如下，疏浚泥浆经除杂池去除大颗粒杂质后，进入浓缩池进行物理沉淀，去除易于沉降的悬浮物；浓缩后的泥浆经加药搅拌池投加絮凝剂（PAM）与固化剂，形成絮体结构；进入均质池后通过曝气搅拌防止淤积，确保进料均匀；经土工管袋脱水后，产生的尾水与浓缩池表层清液共同进入余水沉淀池，经微生物降解与曝气处理后，达标排放至附近河道。

余水沉淀池采用多级设计，通过延长水力停留时间保障处理效果。设置排泥场出水口水质监测点，实时监控余水排放浓度，若出现指标超标，采取应急处理措施：总磷超标采用离子交换法或吸附法处理，总氮超标添加总氮去除剂，悬浮物超标增加絮凝剂投加量，确保余水达标排放。

（四）生态保护与修复配套

工程注重施工全过程的生态保护，制定针对性的水土保持措施，防治责任范围27.04hm²，其中弃土区18.58hm²，施工临时

设施区8.46hm²。采取土地整治8.46hm²、撒草籽8.46hm²、防尘网苫盖8.46hm²等措施，布设12个水土保持监测点（弃土区10个、施工临时设施区2个），控制土壤流失量 $\leq 500\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ，减少施工对土壤与植被的破坏。

生境保护措施贯穿工程全过程：清淤前排查并保护蓝藻围隔设施，施工后及时恢复；固化场选址避开生态敏感区，将原莲花荡南固化场调整为溪西河西固化场，规避尾水排放对乌溪港水质监测点的不利影响；施工过程中避免破坏底栖生物栖息地，控制施工船舶航行范围，减少对水生生物的干扰。

建立完善的环境监测体系，布设16个水质监测点、7个底泥污染监测点、7个底泥回淤监测点、2个扰动监测中心点及6个固化底泥监测点，覆盖施工前、施工中、施工后全流程。监测指标包括水质（TP、TN、COD、NH₃-N、SS等）、底泥营养盐含量、底泥回淤厚度等，根据监测结果动态调整施工工艺，确保治理效果与生态安全。

三、结论与展望

本文以太湖西岸宜兴近岸区域为实践案例，剖析了典型浅水

湖泊内源污染特征与综合治理路径，核心结论如下。典型浅水湖泊内源污染呈现“底泥营养盐富集、间隙水释放风险高、生态系统退化显著”的共性特征，太湖西岸宜兴区域表层底泥总磷、总氮含量均超中度污染标准，底泥年均释放总磷占入湖负荷的40%，是蓝藻水华与湖泛频发的关键诱因；构建的闭环治理路径，通过环保绞吸式挖泥船精准作业、土工管袋固化减量化、多工艺协同余水净化等技术组合，可实现污染去除与生态安全的协同，工程设计中基于加密监测的精准化布局、多方案比选的工艺优化等经验，为同类工程提供了技术参考。

未来，典型浅水湖泊内源污染治理需向“技术创新、长效运维、资源化利用”方向深化。技术层面应研发低成本精准监测设备与绿色固化剂，提升治理的环保性与效率；管理层面需建立常态化监测与智慧预警平台，强化多部门协同与资金保障，确保治理成效可持续；应用层面应拓展底泥资源化路径，推动固化土在路基材料、矿坑修复等领域的应用，并结合不同湖泊的水文特征与污染现状，实现治理方案的因地制宜优化，让“精准化、系统化、生态化”的治理模式在同类湖泊广泛推广，最终助力浅水湖泊生态系统全面恢复与流域水环境质量持续提升。

参考文献

- [1] 孙媛媛, 刘伦华. 浅水湖泊内源污染治理探索与实践 [J]. 水利规划与设计, 2023(7): 40-43.
- [2] 林文武, 张良静, 刘录三, 等. 浅水湖泊蓝藻水华发生机制与生态修复策略 [J/OL]. 中国环境科学, 1-16. 2016.
- [3] 顾晓慧, 倪守高, 曹耀初, 等. 钝化-疏浚协同抑制太湖底泥总磷释放研究 [J]. 江西科学, 2026, 44(01): 1-9.
- [4] 孙媛媛, 刘伦华. 浅水湖泊内源污染治理探索与实践 [J]. 水利规划与设计, 2023, (07): 40-43.
- [5] 吕鑑, 霍守亮, 荆一风, 等. 环保疏浚底泥堆场污染物扩散防治研究 [J]. 北京工业大学学报, 2006, (03): 229-234.