

武汉武湖底泥评价与清淤治理探索

李晶晶*, 乔梁, 吴迪民

湖北省水利水电规划勘测设计院有限公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年9月12日; 录用日期: 2025年10月16日; 发布日期: 2025年10月27日

摘要

湖泊底泥是湖泊内源污染的主要贡献者, 有效评价湖泊底泥的污染状况将为底泥淤积面积和淤积量估算等提供重要数据支撑。文章选取具有典型代表性的浅水湖泊——武汉市武湖, 测定了武湖底泥中的底泥层厚度和不同分层底泥的总氮、总磷、总有机质、天然含水率和pH值, 并测定了表层和分层重金属Cr、Ni、Cu、Zn、Pb、Cd、As、Hg含量, 并对代表不同营养状态的底泥柱进行了不同清淤深度的释放速率测定, 揭示了武湖底泥空间分布特征, 并对武湖底泥状况进行了评价。文章最后确定武湖合适的清淤范围、清淤深度和清淤量等清淤治理方案, 为浅水湖泊清淤治理提供参考和借鉴。

关键词

武湖, 湖泊, 底泥, 内源污染, 生态清淤

Evaluation and Dredging Treatment Exploration of Sediment in Wuhu Lake, Wuhan

Jingjing Li*, Liang Qiao, Dimin Wu

Hubei Institute of Water Resources Survey and Design Co., Ltd., Wuhan Hubei

Received: September 12, 2025; accepted: October 16, 2025; published: October 27, 2025

Abstract

The lake sediments are the main contributors to the internal pollution of lakes. Effective evaluation of the pollution status of lake sediments will provide important data support for the estimation of sediment area and deposition volume. This article selects the typical shallow lake, Wuhu Lake in Wuhan City, to determine the thickness of the sediment layer and the total nitrogen, total phosphorus, total organic matter, natural moisture content, and pH value of different stratified sediments. The

*第一作者。

文章引用: 李晶晶, 乔梁, 吴迪民. 武汉武湖底泥评价与清淤治理探索[J]. 土壤科学, 2025, 13(4): 163-172.
DOI: 10.12677/hjss.2025.134020

contents of heavy metals such as Cr, Ni, Cu, Zn, Pb, Cd, As, and Hg in the surface layer were measured, and the release rates of sediment columns representing different nutritional states were measured at different dredging depths to reveal the spatial distribution characteristics of pollutants in Wuhan Lake. The article also evaluates the sediment status of Wuhan Lake and determines the appropriate dredging range, dredging depth, and dredging quantity for ecological dredging work. Provide reference and guidance for dredging and management of shallow lakes.

Keywords

Wuhu Lake, Lake, Sediment, Internal Pollution, Ecological Dredging

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

城市湖泊影响整个城市的生态环境,而且对社会的发展有着不可或缺的作用[1]。底泥作为水体生态系统的重要组成部分,在维持水体生态循环和物质交换中发挥着重要作用[2][3]。底泥污染成为全球性的环境问题[4]-[8]。底泥中的污染物可直接或间接地对底栖生物、浮游生物产生毒害,并富集在水生生物体内,再经食物链的传递对整个水生态系统以及人类健康构成潜在威胁[9]。武汉市武湖作为典型平原湖泊,它位于武汉市长江新区核心地带,是长江新城的“城市水库、生态绿心”。近年来,随着武湖周边区域经济的快速发展,武湖现状面临着生态环境退化、生物多样性下降的威胁。

目前,针对湖泊水体、底泥及其生态系统已有大量研究,取得了众多的成果。杨水化、姜庆虎和万玲等[10]-[12]对武汉市典型湖泊进行了水质分析;何军、吴来燕和唐阵武等[13]-[15]研究了武湖表层底泥中的氮、磷、有机质和重金属的平面分布特征、影响因素、富集污染程度和风险评价;张淑倩等[16]采用生态系统健康综合指数法对武湖等湖北五大湖泊的生态系统健康进行了评价。

本文通过对武湖湖滨带不同分区底泥的分析,揭示武湖底泥的空间分布特征,旨在系统全面掌握武湖湖滨带底泥污染现状,为改善武湖湖泊水环境质量,提升湖泊水环境承载力提供理论指导和技术支撑。

2. 材料与方法

2.1. 样品采集

武湖水系位于武汉市北部,南滨长江,西连淝水河,东临倒水,跨新洲和黄陂两区,总承雨面积 566.6 km² (其中新洲区 129.0 km², 黄陂区 437.6 km²)。入湖支流主要包括天宝寨河、百步桥河、许家桥河、吴家寺河及骆家河。主要出湖港渠包括争光河与长河。

为摸清武湖底泥污染状况,研究者在武湖共布置 38 个采样点(图 1),对武湖底泥进行全面检测。本次检测对采样表层/分层底泥中全氮、全磷、重金属(Hg、Cd、As、Cu、Pb、Ni、Cr、Zn)、底泥层厚度、天然含水率、pH 均做了采样、检测及分析。

(1) 采样工具:柱状采泥器

(2) 样品采集

按照业主提交的采样位点 GPS 坐标,确定采样点坐标后用柱状采泥器采集底泥,根据底泥层厚度,按照 25 cm 一层进行分层。现场记录底泥厚度、分层情况,并对底泥分层情况进行拍照,将样品装于清洁的聚乙烯密封袋内保存。

(3) 样品保存

采样时需详细记录采样时间, 采样点的位置(GPS 坐标), 样品的类型及编号等。将密封好的底泥样品整齐地摆放在保温箱内, 防止样品在运输过程中发生变化, 造成样品失效。

(4) 分析测定方法

底泥层厚度测量: 由于武湖底泥相对较硬, 采用配备四冲程汽油打桩机的柱状采泥器进行底泥柱状样品采集, 将取出的底泥柱状样品进行现场观察, 将沙性黄色土层以上的青灰色粘性土层界定为底泥层, 现场用卷尺测量底泥层厚度。

pH 值: 采用电极法进行测定(Soli-pH, ZD-18 Tester)。

含水率: 采用烘干法分析测定。

总有机质: 采用灼烧法测定。

总氮和总磷: 底泥中的总氮采用碱性过硫酸钾联合消解紫外分光光度法进行测定, 总磷按照 SMT 磷分级法测定。

底泥氮磷释放: 采用《杭州西湖北里湖底泥氮磷内源静态释放的季节变化及通量估算》中提及的方法进行底泥氮磷释放通量的估算。

底泥氮磷污染程度评价: 采用《湖泊入湖排口及底泥清淤调查技术指南》中的单项污染指数评价法对底泥总氮、总磷的污染程度进行评价。

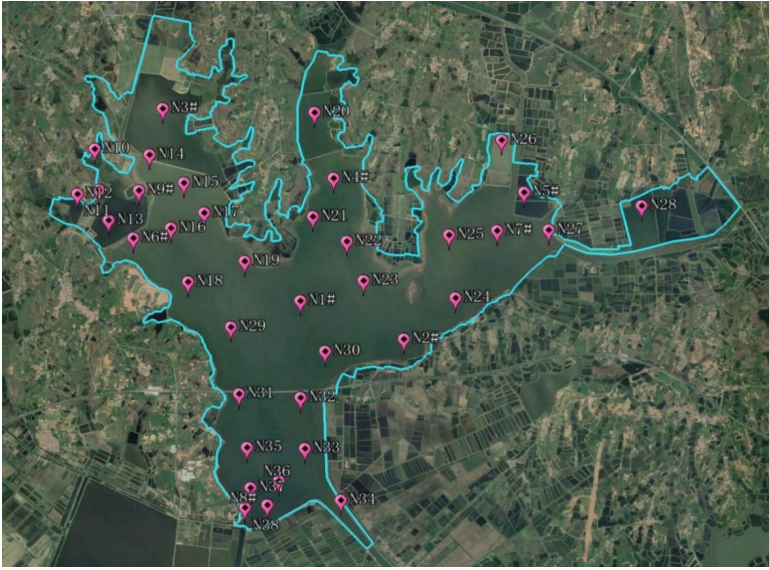


Figure 1. Schematic diagram of sampling points distribution of Wuhu sediment
图 1. 武湖底泥采样点位分布示意图

2.2. 样品处理与分析

研究者用柱状采泥器采集底泥, 根据底泥层厚度, 按照 25 cm 一层进行分层。现场记录底泥厚度、分层情况, 并对底泥分层情况进行拍照, 将样品装于清洁的聚乙烯密封袋内保存。将密封好的底泥样品整齐地摆放在保温箱内, 防止样品在运输过程中发生变化, 造成样品失效。

(1) 底泥层厚度测量: 由于武湖底泥相对较硬, 采用配备四冲程汽油打桩机的柱状采泥器进行底泥柱状样品采集, 将取出的底泥柱状样品进行现场观察, 对沙性黄色土层以上的青灰色粘性土层进行分层检测, 现场用卷尺测量底泥层厚度。

- (2) pH 值：采用电极法进行测定(Soli-pH, ZD-18 Tester)。
- (3) 含水率：采用烘干法分析测定。
- (4) 总有机质：采用灼烧法测定。
- (5) 总氮和总磷：底泥中的总氮采用碱性过硫酸钾联合消解紫外分光光度法进行测定，总磷按照 SMT 磷分级法测定。
- (6) 底泥氮磷释放：采用刘静静等人(2012)发表在《生态学报》上的论文“杭州西湖北里湖底泥氮磷内源静态释放的季节变化及通量估算”中提及的方法进行底泥氮磷释放通量的估算。
- (7) 底泥氮磷污染程度评价：采用《湖泊入湖排口及底泥清淤调查技术指南》中的单项污染指数评价法对底泥总氮、总磷的污染程度进行评价。

2.3. 评价方法

根据《湖泊入湖排口及底泥清淤调查技术指南》，本文采用湖泊总体评价方法，通过对湖泊流域范围内的背景调查分析以及湖泊水体、底泥和水生生物的采样监测，综合评价湖泊水体和底泥的污染状况，为清淤必要性以及底泥淤积面积和淤积量估算等提供数据支撑。湖泊总体评价主要包括底泥评价、水质评价、生物评价三个方面，本文重点分析底泥评价。

2.3.1. 单项污染指数评价法

对单项指标进行逐项分析评价，通过指数计算，选取各因子中最大类别为样本的总体评价结果的评价方法，适用于无重金属污染的底泥中氮、磷的评价。计算公式如下：

$$S_j = C_j / C_s \quad (1)$$

- S_j ——单项评价指数或标准指数；
- C_s ——评价因子 j 背景值，宜以河湖未受人类行为干扰(污染)和破坏时河湖底泥中实测值的平均值为背景值；
- C_j ——评价因子 j 实测值；
- 若该地区之前有背景实测值，则按表 1 判定，若该地区之前无背景实测值，则按表 2 判定。

Table 1. Grading of nitrogen and phosphorus pollution in sediment (with background values)

表 1. 底泥氮磷污染程度分级(有背景值)

等级划分	S_{TN}	S_{TP}	等级
1	$S_{TN} < 1$	$S_{TP} < 0.5$	清洁
2	$1.0 \leq S_{TN} \leq 1.5$	$0.5 \leq S_{TP} \leq 1.0$	轻度污染
3	$1.5 < S_{TN} \leq 2$	$1.0 < S_{TP} \leq 1.5$	中度污染
4	$S_{TN} > 2$	$S_{TP} > 1.5$	重度污染

Table 2. Grading of nitrogen and phosphorus pollution in sediment (without background values)

表 2. 底泥氮磷污染程度分级(无背景值)

等级划分	含量(mg/kg)		等级
1	$TN < 1000$	$TP < 420$	轻度污染
2	$1000 \leq TN \leq 2000$	$420 \leq TP \leq 640$	中度污染
3	$TN > 2000$	$TP > 640$	重度污染

2.3.2. 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法(RI)适用于存在重金属污染的底泥的评价。该方法不仅考虑土壤重金属含量，而且综合考虑了多元素协同作用、毒性水平、污染浓度以及环境对重金属污染敏感性等因素。重金属潜在风险按照表 3~5 判定。潜在生态风险指数法的表达式如下：

$$C_f^i = \frac{C_s^i}{C_n^i} \tag{2}$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i \tag{3}$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times C_f^i \tag{4}$$

- C_f^i ——底泥中重金属 i 的质量分数，mg/kg；
- C_s^i ——底泥中重金属 i 的实测值；
- C_n^i ——底泥重金属 i 的地球化学背景值，mg/kg；
- E_r^i ——单一重金属潜在生态风险指数；
- T_r^i ——重金属毒性响应系数；
- RI——为 n 种重金属潜在生态风险指数之和。

Table 3. Soil environmental background values
表 3. 土壤环境背景值

重金属元素	Cd	Hg	As	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
背景值(mg/kg)	0.20	0.13	15	35	90	35	40	100

*备注：重金属背景值采用《土壤环境质量标准》(GB15618-1995)一级标准。

Table 4. Response coefficients of heavy metal toxicity
表 4. 重金属毒性响应系数

重金属元素	Cd	Hg	As	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
毒性响应系数	30	40	10	5	2	5	5	1

Table 5. Single and comprehensive potential ecological risk assessment index and grading standards
表 5. 单项及综合潜在生态风险评价指数与分级标准

单一污染物 污染系数		单一污染物 潜在生态风险系数		潜在生态风险指数 RI	
阈值区间	程度分级	阈值区间	程度分级	阈值区间	程度分级
$C_f^i < 1$	低污染	$E_r^i < 40$	低风险	$RI < 150$	低风险
$1 \leq C_f^i < 3$	中等污染	$40 \leq E_r^i < 80$	中风险	$150 \leq RI < 300$	中风险
$3 \leq C_f^i < 6$	较高污染	$80 \leq E_r^i < 160$	较高风险	$300 \leq RI < 600$	高风险
$C_f^i \geq 6$	很高污染	$160 \leq E_r^i < 320$	高污染	$60 \leq RI < 1200$	很高风险
		$E_r^i \geq 320$	很高污染	$RI \geq 1200$	极高风险

3. 结果与评价

3.1. 淤泥层厚度

武湖主湖平均淤积深度为 32.8 cm, 湖泊整体北部淤积较严重, 主要是长河出口处淤积最严重、淤泥层厚度最大达到 75 cm。武湖的吴家寺河入湖口和百步桥河入湖口受城市建成区的影响排污量较大造成淤积较为严重。围垸内由于养殖条件相似, 围垸淤积较为平均, 平均淤积深度为 25 cm。

3.2. 含水率

武湖底泥中含水率在 21.1%~61.33%, 含水率随底泥深度增加而下降, 淤泥层含水率在 41.57%~58.15%。圩垸内较主湖含水率略高, 长咀垸处含水率最高。主湖含水率较高区域集中在百步桥河入湖口。

3.3. 总有机碳

武湖底泥中总有机碳含量在 3.91%~15.08%, 总有机碳随底泥深度增加而下降, 淤泥层总有机碳含量在 7.02%~15.08%。总有机碳较高区域集中在武湖北部, 主要分布于吴家寺河入湖口、百步桥河入湖口、长咀垸、人造垸、袁家岔垸、西湖垸、姚林埠垸和中垸。

3.4. 营养盐污染程度

武湖底泥中 TN 含量在 1200~3900 mg/kg, 整体污染严重区域集中在主湖东北部, 围垸内较主湖 TN 含量高, 仓埠街吴家寺河入湖口、黄陂区甘棠工业园百步桥河入湖口及长河出口处 TN 最高。根据《湖泊入湖排口及底泥清淤调查技术指南》中的底泥氮污染程度分级中主湖内底泥第一层、第二层、第三层 TN 平均值分别为 2642 mg/kg、2071 mg/kg、1884 mg/kg, 围垸内第一层、第二层、第三层 TN 平均值分别为 2224 mg/kg、1951.9 mg/kg、1602.22 mg/kg。从第一层到第二层的变化幅度来看, 吴家寺河入湖口、百步桥河入湖口 TN 含量下降最为显著。第二层到第三层各点位 TN 变化幅度不大。

武湖底泥 TP 含量在 460~1260 mg/kg, 整体西部污染较东部严重, 其中主湖出口、长咀垸及袁家岔垸污染最为严重。根据《湖泊入湖排口及底泥清淤调查技术指南》中的底泥磷污染程度分级, 按照武湖主湖和围垸内, 其中主湖底泥内第一层、第二层、第三层平均值分别为 905 mg/kg、751 mg/kg、662 mg/kg; 围垸内第一层、第二层、第三层 TN 平均值分别为 968 mg/kg、794 mg/kg、725 mg/kg。从第一层到第二层的变化幅度来看, 争光河出口 TP 含量下降最为显著。第二层到第三层各点位 TP 变化幅度不大。

3.5. 重金属污染情况

根据《中华人民共和国国家标准 GB15618-2018 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》规定的底泥重金属标准限值, 武湖内底泥重金属含量均未超过标准限值。

4. 武湖清淤治理实践

武湖主湖内底泥表层重金属污染风险程度低; 营养盐为重度污染, 其中 TP 超标严重, 营养盐含量从表层至底层呈递减趋势; 武湖围垸内底泥表层重金属污染风险程度低; 营养盐为重度污染, 其中 TP 超标严重, 营养盐含量从表层至底层呈递减趋势。圩垸的淤泥层厚度和营养盐污染程度均较主湖严重。底泥含水率在 21.10%~61.33%之间, 平均值为 35.84%; pH 值在 4.6~6.9 之间, 平均值为 5.7。

4.1. 清淤总体评价

根据武湖内各检测点底泥检测数据, 依据《指南》中相关评价方法, 对各监测点底泥进行评价。清淤控制值及相应检测结果如表 6 所示。

Table 6. Dredging control values and corresponding test results
表 6. 清淤控制值及相应检测结果

序号	指标		清淤控制值	主湖	是否满足清淤条件	圩垸	是否满足清淤条件
1	重金属	潜在生态风险指数 RI	≥300	111.93 (低风险)	不满足	99.58 (低风险)	不满足
2	营养盐	氮磷含量	TN > 2000 mg/kg 或 TP > 640 mg/kg	第一层：TN (2642)、TP (905)	满足	第一层：TN (2224)、TP (968)	满足
				第二层：TN (2071)、TP (751)		第二层：TN (1951.90)、TP (794)	
				第三层：TN (1884)、TP (662)		第三层：TN (1602.22)、TP (725)	
				三层均重度污染		三层均重度污染	
				浮游植物：1.06 (中污染)			

4.2. 清淤范围分析

4.2.1. 主湖清淤范围

主湖底泥营养盐含量、大型底栖动物两项指标符合全湖清淤的条件。但是考虑到武湖主湖现状水质为Ⅲ类，达到水质目标，整体水质较好，不存在重金属风险；且主湖的水面面积为 30.6 km²，底泥的内源污染尚没有影响到湖泊水质，全湖清淤工程量及投资过大；底泥清淤会造成水体扰动，有水质下降、生态系统破坏等未知风险，故设计不考虑主湖全湖清淤。

由于武湖入湖及出湖港渠长年未得到有效整治，上游水土流失防治不足，各支流出入湖口等处均存在一定程度淤积，不仅严重影响主湖调蓄能力，阻碍行洪排涝通道，且湖泊有沼泽化的趋势，不利于维持湖泊形态。同时兼顾武湖黄颡鱼国家级水产种质资源保护区核心区内禁止工程建设活动要求，故确定主湖从提高调蓄能力，畅通涝水出路角度，仅对吴家寺河入湖口和长河出口附近进行清淤。

4.2.2. 圩垸清淤范围

武湖围垸由于历史长期围网养殖，评价结果显示围垸内三层底泥均为重度污染，水质类别为劣Ⅴ类，底栖动物(HBI)为严重污染，营养状态指数(TLI)为中度富营养，围垸几乎无水生植物分布，种子库为 0，难以自行进行生态修复。武湖大部分北部围垸均位于武湖黄颡鱼种质资源保护区范围内。综合考虑排涝和水环境改善需求，本次确定武湖清淤范围为武湖区域长咀垸、中垸、西湖垸、姚林埠垸、甘棠渔场等北部圩垸、吴家寺河入湖口、长河出湖口共 5.05 km²。其中长咀垸等北部围垸共 4.59 km²、吴家寺河入口 0.25 km²、长河出口 0.21 km²。

4.3. 清淤深度分析

4.3.1. 主湖清淤深度

吴家寺河入湖口附近淤泥层厚度为 25 cm，长河出口附近淤泥层厚度为 0~75 cm。根据武湖底泥淤泥层厚度，结合确定的主湖清淤范围，估算大湖入湖口清淤 42.42 万 m³，平均清淤深度为 30 cm。武湖清淤范围如图 2 所示。

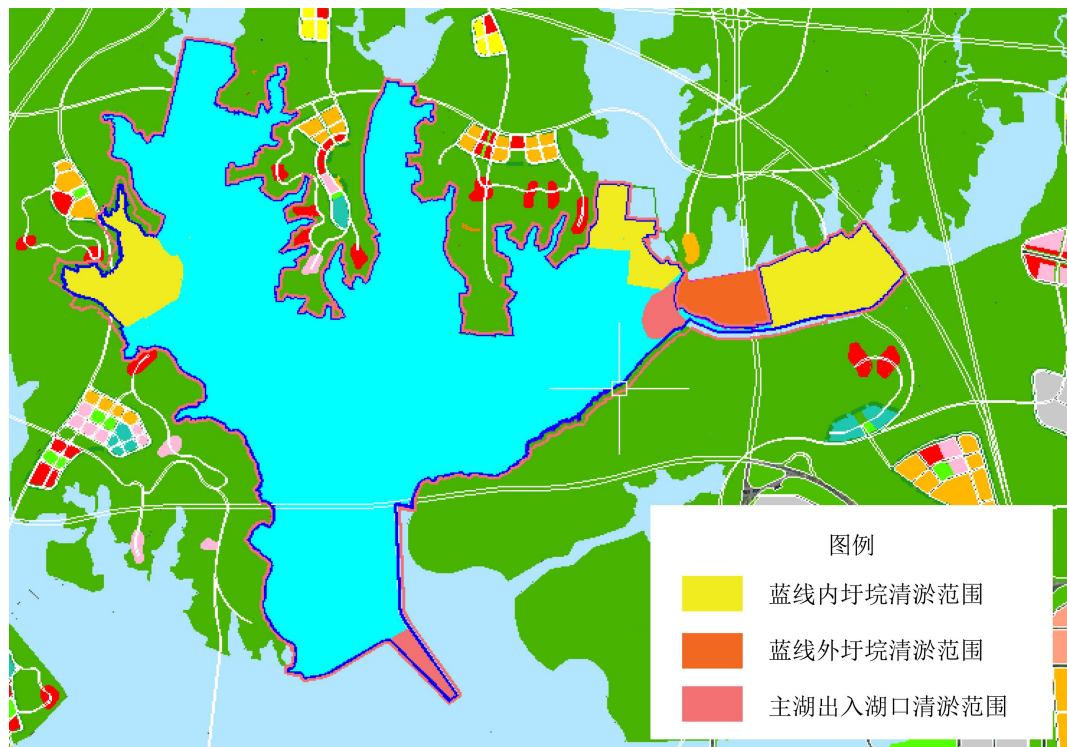


Figure 2. Dredging scope of Wuhu Lake
图 2. 武湖清淤范围图

4.3.2. 圩垸清淤深度

本次分析了圩垸内三层底泥附近的检测点的数据。圩垸内第一层 TN 均值为 2257.1 mg/kg，第二层 TN 均值为 1935.2 mg/kg，第三层 TN 均值为 1552.1 mg/kg；第一层 TP 均值为 953.3 mg/kg，第二层 TP 均值为 778.6 mg/kg，第三层均值为 655 mg/kg。结合单个圩垸检测点位营养盐污染程度逐层趋势分析，由第一层至第二层 TN 和 TP 下降明显，第二层至第三层变化幅度较小。因此圩垸内清淤从第一层底泥至第二层底泥即可极大地削减营养盐的污染。同时分析清淤区域不同清淤深度氮磷释放速率实验成果，第一层、第二层、第三层氨氮释放速率分别为 $10.34 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 、 $6.02 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 、 $0.05 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ，正磷酸盐释放速率分别为 $0.93 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 、 $0.9 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 、 $0.86 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。清淤不同深度后，氨氮及正磷酸盐释放速率呈下降趋势，其中氨氮释放速率显著下降，清除表层后，氨氮释放速率由 $10.34 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 降为 $6.02 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ，降为原始 60%。

因此，综合考虑以上圩垸底泥不同层营养物含量、底泥营养物释放规律以及环保清淤施工精度要求、上覆水水深等多种因素，确定清淤区域内底泥环保清淤平均深度为 30 cm。

4.4. 清淤量

武湖清淤范围主要为湖区长河入湖口区域、吴家寺河入湖口、长咀垸、甘棠渔场、中垸，西湖垸、姚林埠垸，面积共 5.05 km^2 ，清淤平均深度 30 cm，离湖岸较近水深浅的位置可提高清淤深度，离湖岸较远水深较深的位置减少清淤深度或不清，局部位置根据具体情况酌情调整，湖底清淤面保持平顺衔接。为确保湖岸稳定，清淤区域以 1:5 坡度与岸坡平顺连接。

清淤总量 144.56 万 m^3 ，其中圩垸内清淤 130.89 万 m^3 ；大湖入湖口清淤 13.67 万 m^3 。产生泥饼 86.74 万 m^3 ，全部近岸资源化利用。分为近期、中期、远期实施，清淤分期如图 3 和表 7 所示。

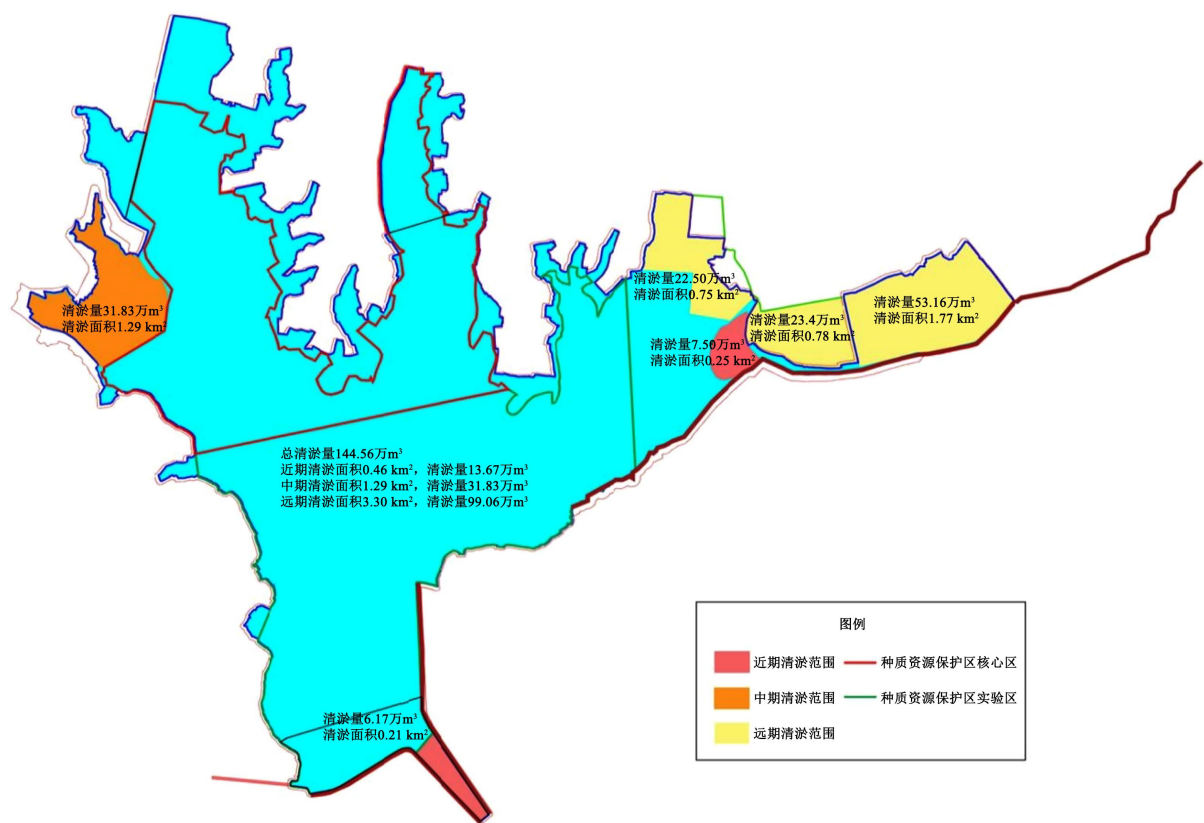


Figure 3. Staged dredging of Wuhu Lake
图 3. 武湖清淤分期图

Table 7. Quantities of dredging works for Wuhu Lake
表 7. 武湖清淤工程量表

分期	工程项目	清淤量		
		面积(km ²)	清淤深度	工程量(万 m ³)
近期	长河入湖口清淤	0.21	0.3	6.17
	吴家寺河入湖口清淤	0.25	0.3	7.50
中期	长咀垸清淤	1.29	0.3	31.83
远期	甘棠渔场清淤	0.78	0.3	23.40
	中垸清淤	1.77	0.3	53.16
	西湖垸、姚林埠垸清淤	0.75	0.3	22.50
合计		5.05		144.56

5. 结语

湖泊是人类生产和生活的重要资源之一，而湖泊内源污染治理已成为湖泊生态保护与修复的关键和难点。目前，生态清淤是湖泊内源污染治理的有效方式。本文以武汉市武湖为研究对象，采用底泥评价法对武湖湖泊水体和底泥的污染状况进行了测定和评价，对清淤方案进行了拟定、清淤范围和深度进行

了分析,并提出了淤泥处理处置方案,为湖泊内源污染治理提供了技术参考和借鉴。

基金项目

湖北省水利重点科研项目(HBSLKY202205); 国家自然科学基金资助项目(U21A2002)。

参考文献

- [1] 杨智婷, 冯民权. 扰动对湖泊沉积物磷释放的模拟试验研究[J]. 环境科学与技术, 2022, 45(S1): 104-110.
- [2] 刘俊, 朱允华, 胡劲松等. 湘江中游江段沉积物重金属污染特征及生态风险评价[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(2): 135-141.
- [3] Islam, M.S., Hossain, M.B., Matin, A. and Islam Sarker, M.S. (2018) Assessment of Heavy Metal Pollution, Distribution and Source Apportionment in the Sediment from Feni River Estuary, Bangladesh. *Chemosphere*, **202**, 25-32. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.077>
- [4] 李娟英, 石文瑄, 崔昱, 等. 滴水湖水体及底泥中重金属和多环芳烃的污染分析与评价[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(1): 96-101.
- [5] Huang, X., Hu, J., Li, C., Deng, J., Long, J. and Qin, F. (2009) Heavy-Metal Pollution and Potential Ecological Risk Assessment of Sediments from Baihua Lake, Guizhou, P.R. China. *International Journal of Environmental Health Research*, **19**, 405-419. <https://doi.org/10.1080/09603120902795598>
- [6] Soliman, N.F., Nasr, S.M. and Okbah, M.A. (2015) Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Sediments from the Mediterranean Coast, Egypt. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, **13**, Article No. 70. <https://doi.org/10.1186/s40201-015-0223-x>
- [7] Christophoridis, C., Dedepsidis, D. and Fytianos, K. (2009) Occurrence and Distribution of Selected Heavy Metals in the Surface Sediments of Thermaikos Gulf, N. Greece. Assessment Using Pollution Indicators. *Journal of Hazardous Materials*, **168**, 1082-1091. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.02.154>
- [8] Çevik, F., Göksu, M.Z.L., Derici, O.B. and Findik, Ö. (2008) An Assessment of Metal Pollution in Surface Sediments of Seyhan Dam by Using Enrichment Factor, Geoaccumulation Index and Statistical Analyses. *Environmental Monitoring and Assessment*, **152**, 309-317. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0317-3>
- [9] Adams, W.J., Kimerle, R.A. and Barnett, J.W. (1992) Sediment Quality and Aquatic Life Assessment. *Environmental Science & Technology*, **26**, 1864-1875. <https://doi.org/10.1021/es00034a001>
- [10] 杨水化, 彭正洪, 焦洪赞, 等. 城市富营养化湖泊的外源污染负荷与贡献解析——以武汉市后官湖为例[J]. 湖泊科学, 2020, 32(4): 941-951.
- [11] 姜庆虎, 刘艳芳, 黄浦江, 等. 城市湖泊流域面源污染的源-汇效应研究——以武汉市东湖为例[J]. 生态环境学报, 2013, 22(3): 469-474.
- [12] 万玲, 洪军, 谷静丽. 武汉市江汉区湖泊的水质分析[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(12): 424-427.
- [13] 何军, 李福林, 陶良等. 典型内陆湖泊底泥氮、磷和重金属分布特征及生态风险评价——以武汉市武湖为例[J]. 中国地质调查, 2022, 9(2): 110-118.
- [14] 吴来燕, 薛怀军, 何文豪, 等. 武汉市菱角湖底泥中营养元素的分布特征[J]. 中南民族大学学报: 自然科学版, 2015, 34(3): 22-24.
- [15] 唐阵武, 程家丽, 岳勇, 等. 武汉典型湖泊底泥中重金属累积特征及其环境风险[J]. 湖泊科学, 2009, 21(1): 61-68.
- [16] 张淑倩, 孔令阳, 邓绪伟, 等. 江汉湖群典型湖泊生态系统健康评价——以梁子湖、洪湖、长湖、斧头湖、武湖为例[J]. 环境科学学报, 2017, 37(9): 3613-3620.