

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.14.025

九江市琵琶湖底泥环境特征与生态清淤工程

向莹¹, 张鸿涛², 高宏洲¹, 王全军³, 李娟⁴, 黄守斌¹, 王小红¹,
袁婧¹

(1. 北京国环清华环境工程设计研究院有限公司, 北京 100084; 2. 清华大学 环境学院, 北京 100084; 3. 安徽佳明环保科技股份有限公司, 安徽 合肥 230000; 4. 廊坊市生态环境局 三河分局, 河北 廊坊 065200)

摘要: 针对九江市琵琶湖由于周边工厂企业和居民生活排污造成的底泥污染问题,提出了生态清淤、消除黑臭水体、景观绿化美化的综合解决方案,即检测剖析底泥污染特征→科学决策清淤深度和范围→优化清淤方式和设备→营造景观、处置底泥→综合评价工程效果。琵琶湖清淤底泥通过减量化与稳定化处理后,浸出毒性满足《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》(GB 5085.3—2007)要求;淤泥脱水的余水经过处理后满足《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)的二级标准,减轻了施工排水对湖水水质的影响;生态清淤工程施工后湖水水质显著提升。

关键词: 黑臭水体治理; 底泥污染; 生态清淤

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)14-0142-09

Sediment Environmental Characteristics and Ecological Dredging Project of Pipa Lake in Jiujiang

XIANG Ying¹, ZHANG Hong-tao², GAO Hong-zhou¹, WANG Quan-jun³, LI Juan⁴,
HUANG Shou-bin¹, WANG Xiao-hong¹, YUAN Jing¹

(1. Beijing Guohuan Tsinghua Environment Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Beijing 100084, China; 2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Anhui Jiaming Environmental Protection Technology Co. Ltd., Hefei 230000, China; 4. Sanhe Branch, Langfang Ecological Environment Bureau, Langfang 065200, China)

Abstract: In view of the sediment pollution caused by sewage from surrounding factories, enterprises and residents in Pipa Lake, Jiujiang, this study puts forward a comprehensive solution of ecological dredging, black and odorous water elimination, and landscaping. Based on detection and analysis of the sediment pollution characteristics, the depth and scope of dredging is determined scientifically. Then the dredging methods and equipment are optimized to create landscape and dispose sediment. Finally the project effect is comprehensively evaluated. The extraction toxicity of the dredged bottom sludge after reduction and stabilization, meets the requirements of the *Identification Standards for Hazardous Wastes—Identification for Extraction Toxicity* (GB 5085.3-2007). The remaining water after sludge dewatering meets the second level criteria in *Integrated Wastewater Discharge Standard* (GB

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07105003)

通信作者: 张鸿涛 E-mail: zhanght@tsinghua.edu.cn

8978 – 1996). The project alleviates the impact of construction drainage on the lake water quality. After the construction of ecological dredging project, the lake water quality has been significantly improved.

Key words: black and odorous water treatment; sediment pollution; ecological dredging

黑臭水体治理的核心环节是“控源截污、内源治理”,消除并控制内源污染是河湖水质提升和生态修复的重要举措。因此,生态清淤工程作为水环境治理的关键工程不断受到重视,它是在传统疏浚技术的基础上,集成了精确掌控清淤深度、减少底泥扰动、上岸淤泥减量化、强化余水(污泥脱水排水)处理等技术措施,从而使清淤工程具有二次污染小、施工精度高等优点^[1]。以江西省九江市琵琶湖生态清淤工程为案例,深入剖析了底泥环境特征、清淤深度和清淤方式,总结了底泥减量化、稳定化处理和处置工艺,并对清淤工程实施效果进行分析,可为类似河湖环境综合治理工程提供参考。

1 琵琶湖概况

琵琶湖既是景观湖泊,又是城区防洪排涝的调蓄湖泊,其地理位置见图 1。晴天琵琶湖几乎不流动,雨季湖水自南向北流动,通过排涝泵与长江连通。琵琶湖规划水面面积 0.39 km²,平均水深约 2.5 m,常水位为 15.62 m,有效调蓄库容 78.9 × 10⁴ m³。湖区岸线较为平缓,环湖周边常住人口约 2 000 人,流动人口约 5 500 人。由于长期以来受周边工厂、企业等单位排污以及居民生活污染的影响,湖区底泥淤积严重,水体自净能力丧失,属于典型的黑臭水体。

2017 年 5 月—11 月琵琶湖水质监测数据见表 1。对比《城市黑臭水体整治工作指南》与《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)(见表 2)可知,湖

区水质较为恶劣,水体氨氮含量超过黑臭水体重度标准,COD、总氮含量远超过地表水环境 V 类标准。为了消除黑臭、提升琵琶湖水环境质量,九江市于 2017 年启动了琵琶湖黑臭水体治理工程。

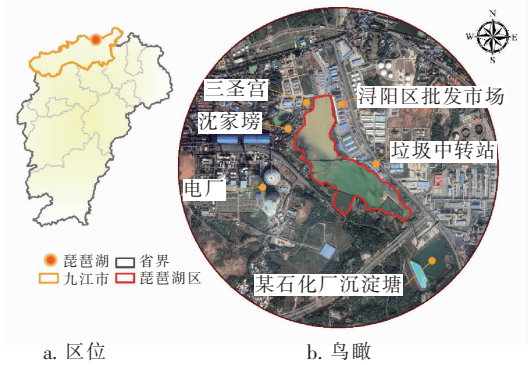


图 1 琵琶湖位置

Fig. 1 Location of Pipa Lake

表 1 琵琶湖 2017 年 5 月—11 月水质监测数据

Tab. 1 Water quality monitoring data of Pipa Lake from May to November, 2017

时间	COD/ (mg · L ⁻¹)	总氮/ (mg · L ⁻¹)	透明度/cm	溶解氧/ (mg · L ⁻¹)	氨氮/ (mg · L ⁻¹)	氧化还原电位/ mV
5 月	30	7.12	20.5	6.0	18.5	75
6 月	40	15.1	21.4	6.0	17.7	76
7 月	13	2.77	22.0	5.1	17.3	64
8 月	49	37	22.8	5.6	26.9	74
9 月	44	37.8	23.4	6.3	28.0	82
10 月	42	66	21.0	6.0	42.0	79
11 月	32	64.5	18.5	6.3	38.8	83

表 2 城市黑臭水体污染程度分级标准及地表水环境质量标准

Tab. 2 Urban black and odorous water pollution grading standards and surface water environmental quality standards

相关标准		溶解氧/ (mg · L ⁻¹)	COD/ (mg · L ⁻¹)	氨氮/ (mg · L ⁻¹)	总磷/ (mg · L ⁻¹)	总氮/ (mg · L ⁻¹)	透明度/ cm	氧化还原 电位/mV
黑臭水体 分级标准	轻度	0.2 ~ 2.0		8.0 ~ 15			10 ~ 25	- 200 ~ 50
	重度	< 0.2		> 15			< 10	< - 200
地表水环境 V 类标准			40	2.0	0.4	2.0	25	

2 琵琶湖底泥特征与污染状况

对琵琶湖开展了底泥调查工作,在研究区域均匀布设 26 个取样点,采集不同深度的底泥柱状样进行物理特性、化学含量分析,垂直取样深度为 40 ~

140 cm。底泥物理化学分析参考《土壤理化分析》中相关研究结果,主要开展物理和化学特性方面的调查与监测。

研究区采样点分布及排污口位置见图 2。



图 2 研究区采样点分布及排污口位置

Fig. 2 Distribution of sampling points and location of sewage outlet in the study area

2.1 底泥物理特性

① 底泥土层结构及分层特征

琵琶湖底泥主要源于以下 3 个方面^[2]: a. 环湖 7 个排污口(见图 2)排入的污水中携带的颗粒物; b. 研究区域径流污染带入湖内的各种无机及有机颗粒物(汇水区域见图 3),集水面积约 11.3 km²; c. 湖体内水生生物的死亡残体和排泄物。对湖区取点进行勘探调查(见图 4),结果显示,琵琶湖 90% 以上面积的地层结构自上而下为淤泥质土-粉质黏土-强风化泥质粉砂岩-中风化泥质粉砂岩。表层淤泥质土厚 0.2~8.4 m,湿密度为 1.7~2.0 g/cm³,密度小,质量轻,灰黑色,流塑态,含腐殖质,味臭;第 2 层粉质黏土厚 0.5~9.9 m,湿密度 1.8~2.1 g/cm³,质量较轻,黄色,可塑状,中等韧性,石英含量约 5%,最大粒径约 30 mm;第 3 层强风化泥质粉砂岩厚 0.6~4.1 m,湿密度 2.02~2.24 g/cm³,密实度高,紫红色,属极软岩;第 4 层中风化泥质粉砂岩厚度>0.8 m,湿密度 2.2~2.3 g/cm³,致密稳定,棕红色,属软岩。

表 3 底泥组成检测结果

Tab. 3 Detection results of composition of sediment

底泥粒径/mm	不同编号样品所占比例/%									
	1#	5#	8#	10#	12#	15#	18#	20#	23#	25#
粗砂粒(0.2~2.0)	1.91	3.24	0.81	0.62	2.10	2.89	1.85	0.87	1.56	1.75
细砂粒(0.02~0.2)	93.64	91.83	94.79	94.81	93.45	92.96	94.35	94.81	94.21	94.30
粉砂粒(0.002~0.02)	4.45	4.93	3.95	4.57	4.45	4.15	3.80	4.32	4.23	3.95
黏粒(<0.002)	0	0	0.45	0	0	0	0	0	0	0
砂粒级(细砂粒和粗砂粒之和)	95.55	95.07	95.60	95.43	95.55	95.85	96.20	95.68	95.77	96.05

2.2 底泥化学特性

将 26 个泥样分上、中、下 3 层分别检测,结果取

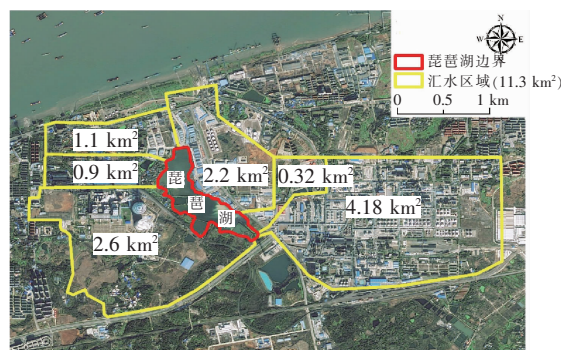


图 3 琵琶湖汇水区域

Fig. 3 Catchment area of Pipa Lake



图 4 琵琶湖现场勘探调查

Fig. 4 Field survey of Pipa Lake

② 底泥组成特征

对 26 个泥样随机取 10 个样品进行颗粒分析试验,检测方法依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999),结果见表 3。湖区底泥颗粒粒径大多介于 0.02~0.2 mm,比例>90%;介于 0.002~0.02 mm 的颗粒约占 4%;介于 0.2~2.0 mm 的颗粒很少,约占 1.7%;粒径<0.002 mm 的颗粒几乎没有。

平均值,检测指标包括含水率和有机质、全氮、全磷等 3 项营养盐指标,铬、铜、锌、镉、铅、汞、砷等 7 项

重金属指标(干污泥),其中,汞是部分挥发性重金属^[3],结合表 3,研究区底泥组成多为细砂粒和粉砂粒,掺杂少量黏粒物质,一般情况下,土壤矿物粒径越小,与汞结合越稳定而不易解吸或挥发,因此,相较由粗砂粒组成的土壤或底泥,琵琶湖底泥中的汞不易挥发。琵琶湖底泥含水率和营养盐含量见表 4,一般性描述统计见表 5。

表 4 琵琶湖底泥含水率和营养盐含量
Tab.4 Water content and nutrient content in the sediment of Pipa Lake

泥样	含水率/%	有机质/%	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)
1#	85.40	13.80	5.21	4.00
2#	86.83	13.67	5.56	4.45
3#	86.13	15.47	4.23	2.25
4#	85.17	14.50	6.22	2.26
5#	80.27	14.00	4.04	2.78
6#	88.27	12.97	4.40	2.25
7#	82.47	14.37	3.80	3.55
8#	80.93	15.70	4.29	3.28
9#	85.53	15.50	5.63	1.94
10#	83.37	14.50	5.43	7.73
11#	75.63	7.74	2.21	2.35
12#	82.67	12.33	4.77	1.27
13#	81.33	10.83	3.77	2.32

续表 4 (Continued)

泥样	含水率/%	有机质/%	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)
14#	86.07	15.70	5.88	4.36
15#	86.40	14.07	5.11	3.02
16#	73.17	15.20	4.56	2.44
17#	80.67	17.37	5.41	2.36
18#	87.47	13.43	8.43	4.50
19#	87.87	14.20	6.62	2.93
20#	80.43	22.80	13.78	1.47
21#	87.83	19.67	11.74	1.73
22#	85.37	16.40	10.10	2.37
23#	89.37	14.63	8.22	1.15
24#	81.40	11.53	5.12	1.72
25#	84.43	15.63	7.51	1.50
26#	86.60	15.03	5.72	2.19

表 5 底泥含水率和营养盐含量一般性描述统计
Tab.5 General descriptive statistics of water content and nutrient content in sediment

项目	全距	最小值	最大值	均值	标准差
含水率/%	16.20	73.17	89.37	83.89	3.46
有机质/%	15.06	7.74	22.80	14.66	2.13
全氮/(g·kg ⁻¹)	11.57	2.21	13.78	6.07	1.07
全磷/(g·kg ⁻¹)	6.58	1.15	7.73	2.78	1.70

由表 5 可知,琵琶湖底泥有机污染严重。琵琶湖底泥重金属含量见表 6,一般性描述统计见表 7。

表 6 琵琶湖底泥重金属含量
Tab.6 Heavy metal content in the sediment of Pipa Lake

泥样	铬	铜	锌	镉	铅	汞	砷
1#	535.67	83.63	726.33	2.16	56.40	2.51	44.77
2#	614.33	79.90	867.00	1.93	46.60	2.77	41.57
3#	630.67	89.83	547.00	2.32	55.63	4.37	54.40
4#	603.67	73.10	828.00	1.83	42.90	3.25	40.70
5#	584.33	76.67	581.00	1.72	49.93	2.68	40.73
6#	641.33	70.23	630.00	1.64	44.57	5.90	39.47
7#	409.67	83.40	392.67	1.80	57.03	2.40	45.60
8#	409.67	83.33	441.67	1.61	52.10	1.77	41.23
9#	672.67	91.77	637.00	2.05	55.67	3.23	58.17
10#	456.33	70.33	835.33	1.75	55.90	1.41	34.43
11#	289.00	50.47	209.00	0.83	34.97	1.15	42.27
12#	421.33	74.17	387.67	1.39	47.63	1.52	51.00
13#	451.00	64.30	436.33	1.34	40.90	2.59	46.27
14#	390.00	112.00	432.67	1.80	68.37	1.62	53.07
15#	279.67	93.13	301.67	1.32	57.97	1.43	49.07
16#	165.67	61.97	855.67	1.14	62.50	1.12	20.30
17#	136.00	65.93	663.00	1.70	64.53	2.94	23.10
18#	322.33	104.37	593.67	0.99	72.70	4.08	25.97

续表 6 (Continued)

mg · kg⁻¹

泥样	铬	铜	锌	镉	铅	汞	砷
19#	342.67	105.67	390.67	1.09	61.03	1.38	33.87
20#	285.33	111.33	229.67	0.73	75.73	2.37	37.43
21#	475.33	130.33	711.67	1.42	63.87	2.15	49.03
22#	339.67	107.33	646.33	1.32	61.40	1.53	33.33
23#	324.33	93.20	794.00	1.40	60.60	1.34	28.70
24#	233.33	73.93	739.33	1.25	57.03	0.76	21.97
25#	304.33	113.67	1 229.00	2.01	48.47	1.02	23.57
26#	362.33	126.67	1 039.00	1.89	64.63	2.36	27.60

表 7 底泥重金属含量一般性描述统计
Tab.7 General descriptive statistics of heavy metal content in sediment

mg · kg⁻¹

项目	全距	最小值	最大值	均值	标准差
铬	536.67	136.00	672.67	410.79	121.35
铜	79.86	50.47	130.33	88.10	11.01
锌	1 020.00	209.00	1 229.00	620.98	205.59
镉	1.59	0.73	2.32	1.56	0.39
铅	40.76	34.97	75.73	56.12	6.85
汞	5.14	0.76	5.90	2.29	1.35
砷	37.87	20.30	58.17	38.75	6.80

琵琶湖底泥中7种重金属的含量均远高于《江

表 8 土壤重金属含量相关标准

Tab.8 Standards for heavy metal content in soil

mg · kg⁻¹

标准	铬	铜	锌	镉	铅	汞	砷
《江西省土壤环境质量评价标准》(平均背景值)	48	20.8	69	0.1	32.1	0.08	10.4
《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)(三级标准)	300(旱地)	400	500	1.0	500	1.5	40(旱地)
《城镇污水处理厂污泥处置 园林绿化用泥质》(GB/T 23486—2009)	1 000	1 500	4 000	20	1 000	15	75

3 琵琶湖生态清淤方案的确定

3.1 生态清淤规模

① 清淤区域

生态清淤工程是为了清除湖底受污染底泥、控制湖区内源污染,改善水体环境^[5]。根据研究区底泥检测结果,几乎整个湖区均存在严重的有机物污染,因此确定整个研究区均需要开展生态清淤工程,并且对污染相对严重的局部区域进行深度清淤,同时应考虑保护南湖湖底输油管线、跨湖蒸汽管线基础以及自然岸坡基础等区域。

琵琶湖以电厂蒸汽管线为界分为北湖与南湖(见图 5)。研究区 1#和 7#排污口的污水汇集于北湖上部区域,2#、3#和 4#排污口的污水汇集于南湖下部区域;依据对应区域的点位检测结果,位于上述 2 处排口汇集区域的泥样有机质和重金属含量均高

西省土壤环境质量评价标准》平均背景值(见表 8)^[4],表明研究区底泥重金属含量偏高;对照《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)的三级标准,铬、锌、镉、汞、砷含量均超出标准规定值,因此,研究区底泥不适合农林生产。

依据本工程可行性研究报告推荐的底泥处置技术路线,处理后的底泥就地用作景观园林绿化用土,同时,对照《城镇污水处理厂污泥处置 园林绿化用泥质》(GB/T 23486—2009),琵琶湖底泥重金属含量均在标准规定的限值内,满足污泥园林绿化利用要求。

于湖区其他区域,说明这两处区域底泥污染严重,确定为深清淤区域。

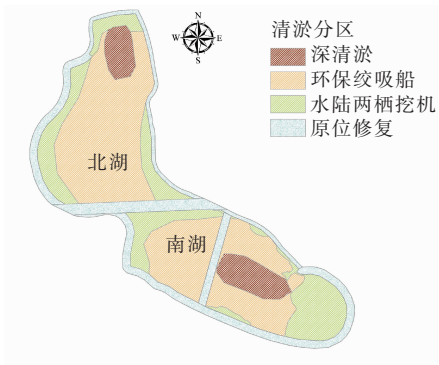


图 5 琵琶湖生态清淤工程平面图

Fig.5 Ecological dredging project plane of Pipa Lake

围绕南湖输油管线和蒸汽管线桥墩基础南北两侧 10 m 区域以及沿湖自然岸坡 10 m 区域内设置安

全保护线,以上 3 处区域采用原位生态修复技术(微生物处理技术)减轻底泥污染,面积约 $8 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。基于此,最终确定研究区异位生态清淤工程总面积约 $24 \times 10^4 \text{ m}^2$,占琵琶湖面积的 75% (按现状水面面积 $32 \times 10^4 \text{ m}^2$ 计)。

② 清淤深度及工程量的确定

底泥清淤深度的确定是生态清淤工程的重要表征,也是设计方案的重要内容之一。清淤深度不足不能有效去除污染物质,清淤过深又会破坏湖底形态和水生生物环境,同时削弱底泥对外源性污染物输入后的缓冲能力,增加后期生态修复难度^[6]。

琵琶湖底泥清淤深度主要从以下 4 个方面考虑^[7]:

a. 湖区底泥土的分层结构。第 1 层淤泥质土密度小、流塑状,该土层含流泥、淤泥质黏土、淤泥;第 2 层粉质黏土透水性一般,可较好地阻止污染较重的表层淤泥向下层底泥污染迁移扩散,也可阻止下层底泥中的污染物质向上交换,具有过渡阻隔作用,一般情况下,清淤深度应以不将此层挖穿为限。b. 湖区底泥营养盐及重金属含量垂直分布特征。依据沉积相规律,一般湖泊底泥受自然和人类活动影响会含有较丰富的氮、磷和有机物等营养物质,其中受工业污染和人类活动影响较大的表层底泥污染较严重,大多表现为污染物含量随深度增加而下降。研究区 26 个泥样上、中、下 3 层检测结果显示,琵琶湖底泥中营养盐和重金属基本也具有明显的表层含量高、下层含量低的垂直梯度变化特征。底泥表层 0~40 cm 层位和 40~80 cm 层位是营养盐和重金属含量的高值区,80~120 cm 层位营养盐和重金属含量明显下降,呈现过渡层特征,130 cm 以下层位营养盐和重金属含量总体趋于稳定,下降缓慢。c. 湖区底泥营养盐及重金属含量水平分布特征。2 处排污口汇集区域内取样点的营养盐及重金属含量均高于其他区域取样点的检测结果,说明湖区排污口汇集区域底泥污染严重。d. 水下清淤施工的经济性、控制精度等。目前国内外常见生态环保清淤设备在工程应用中垂直控制精度为 8 cm 左右。

据此,确定琵琶湖生态清淤深度为 0.4~0.8 m;依据底泥检测结果及特殊性质,2 处深清淤区域清淤深度为 1.0~1.2 m。根据清淤区域和清淤深度,计算琵琶湖底泥生态清淤规模与工程量,如表 9 所示。

表 9 琵琶湖生态清淤工程量

Tab. 9 Quantity of ecological dredging project of Pipa Lake

治理方式	湖区	面积/ m^2	深度/cm	工程量/ m^3
异位清淤	北湖	119 600	40~110	71 400
	南湖	122 800	50~120	78 100
	全湖合计	242 400	40~120	149 500
原位修复	全湖合计	80 000		

3.2 清淤方式及设备选型

采用适当的清淤方式和选用合适的清淤设备是保证琵琶湖底泥清淤效果的关键因素。目前国内外湖泊底泥清淤方式主要包括干式和湿式两种。前者是将湖泊分段并修筑围堰,利用水泵将围堰范围内的积水排干后再进行清淤施工;后者无需进行围堰排水,在带水环境下采用挖泥机械进行清淤施工。由于琵琶湖是景观湖泊,也是调蓄湖泊,湖水不宜抽干,因此,选用对湖泊功能影响最小的湿式施工法。

目前用于湖泊底泥清淤的机械设备种类较多,结合琵琶湖现状,综合考虑清淤能力、环保效果、船舶吃水深度、技术经济性等因素,推荐选用水陆两栖挖机和环保绞吸船为主的清淤设备。设备选型和基本参数见表 10。清淤施工中要求底泥扰动扩散半径不超过 4 m,清淤水平定位精确控制在 0.4~1.0 m,垂直精度控制在 3~10 cm,以保证精确清淤和清洁生产。

表 10 生态清淤工程机械设备选型

Tab. 10 Ecological dredging construction machinery equipment selection

设备	规格型号	设备功率/ kW	单台处理量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	投用数 量/台
水陆两栖挖机	DH215		50	8
环保绞吸船	QHY500	105	500	4

3.3 清淤底泥处理处置工艺

琵琶湖生态清淤工程量为 $14.95 \times 10^4 \text{ m}^3$,底泥处理处置工艺如图 6 所示。

底泥减量化包括三级筛分、带式压滤脱水、余水处理三个环节。湖区底泥通过环保绞吸船绞吸后进入三级筛分系统,废渣运输至指定场地,与水陆两栖挖机挖运的底泥一起进行稳定化处理后,回填至郊野赏花区,作为景观园林绿化土,实现安全回用;筛分系统的泥浆通过预沉池进行预处理后进入高位浓缩一体机,在药剂作用下上部余水澄清回排,底部淤泥进入带式压滤系统,压滤出的泥饼进行稳定化处理,压滤机的出水进入余水处理一体化设备,通过加

药余水澄清回排入湖,设备底端的淤泥再次进入带式压滤机处理。

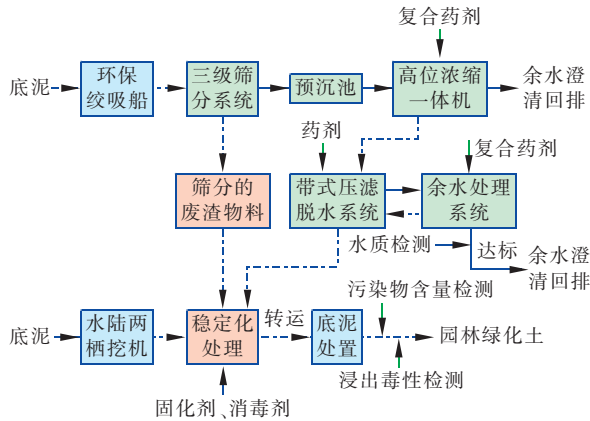


图 6 琵琶湖底泥处理处置工艺流程

Fig. 6 Flow chart of sediment treatment and disposal process of Pipa Lake

底泥稳定化处理的原理是底泥中的重金属物质与药剂发生络合反应,重金属被固结包裹,钝化后污染物释放速率降低,向稳定态转化,包括 3 个方面:①经稳定化处理的淤泥基质 pH 值上升,多数重金属离子可与 OH^- 结合生成不溶于水的盐类;②稳定剂中的黏土物质对重金属离子有较好的离子交换吸附作用;③固化剂与水发生反应后,生成的水化产物对重金属离子有包裹和吸附作用。经上述过程将高价、游离态的重金属离子转化为低价、稳定低毒物质留在底泥中,污染物不易渗出^[8]。对稳定化处理的底泥进行浸出毒性试验(见表 11),结果满足《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》(GB 5085.3—2007)要求,底泥中重金属经固化稳定化后对周围环境的浸出毒性属于安全范畴,可进行安全回用^[9]。

表 11 处理后底泥浸出毒性检测结果

Tab. 11 Test results of leaching toxicity of sediment after treatment $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

危害成分	稳定化底泥检测结果	实验室最小检出限	浸出毒性鉴别标准值
铬	N. D.	2	15
铜(以总铜计)	N. D.	2.5	100
锌(以总锌计)	N. D.	6.4	100
镉(以总镉计)	N. D.	1.2	1
铅(以总铅计)	N. D.	4.2	5
汞(以总汞计)	N. D.	0.05	0.1
砷(以总砷计)	N. D.	1	5

注: N. D. 为未检出。

底泥在回填前,先用土工布铺一层防渗层,防止

重金属污染地下水,回填后再用未污染的土壤覆盖在底泥上(厚约 50 cm),最后种植植被,确保重金属不会引起二次污染。

3.4 清淤余水处理工艺

琵琶湖生态清淤工程的余水指底泥减量化处理过程高位浓缩一体机及余水处理一体机产生的大量工艺废水,余水因含有大量富含于底泥中的污染物质,随意排放极易对琵琶湖造成二次污染,因此,减量化过程中须重视余水的处理和排放水质的控制^[8]。

根据现场实际情况和余水处理要求,采用物理处理结合化学絮凝处理的综合处理方法。在高位浓缩一体机和余水处理一体化设备前端设加药系统,投加高效混凝剂与絮凝剂,余水通过药剂作用,在混合床内进行絮凝反应,沉淀分离;混凝剂可有效降低废水的浊度、色度,使水体澄清^[5]。混凝剂和絮凝剂选择价格低廉、适用性广泛及沉淀性能好的聚丙烯酰胺(PAM)和聚合氯化铝(PAC)^[10]。

经过本工艺处理的余水水质可以满足《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)的二级标准($\text{COD} \leq 150 \text{ mg/L}$, $\text{NH}_3 - \text{N} \leq 25 \text{ mg/L}$, $\text{SS} \leq 200 \text{ mg/L}$),出水接近天然水体情况,对受纳水体生态环境污染危害程度较低。

4 生态清淤工程效果分析

琵琶湖生态清淤工程于 2018 年 4 月开始实施,施工后对湖区连续取样进行水质检测,指标包括透明度、溶解氧、氨氮和氧化还原电位;湖区共设 6 个检测点位,其中 3#、5#、10#样点位于北湖,17#、23#、24#样点位于南湖。对比分析生态清淤工程前、后 6 个检测点位 2017 年 5 月—2020 年 1 月的水质变化情况,如图 7 所示。工程实施前(2018 年 3 月之前),6 个检测点位的湖水透明度为 14.3 ~ 26 cm(均值 21.5 cm),氨氮为 13.9 ~ 58.5 mg/L(均值 29.2 mg/L),溶解氧为 4.5 ~ 8.1 mg/L(均值 5.9 mg/L),氧化还原电位为 54 ~ 120 mV(均值 77 mV)。清淤工程施工后(2018 年 8 月—2019 年 10 月),湖水透明度为 18 ~ 41.3 cm(均值 27.8 cm),溶解氧为 5.8 ~ 10.2 mg/L(均值 7.6 mg/L),氨氮为 2.8 ~ 10.5 mg/L(均值 5.4 mg/L),氧化还原电位为 85 ~ 180 mV(均值 112 mV)。对工程施工前、后进行对比可知:通过生态清淤工程,琵琶湖水水质显著提升。2019 年 10 月完成环湖 7 个排污口及研究区面

源污染区域的截污工程,2019 年 10 月—2020 年 1 月琵琶湖水质检测 4 项指标基本趋于稳定,说明琵

琶湖水体在控制内源与外源截污的双重作用下,水质改善明显,达到治理目标。

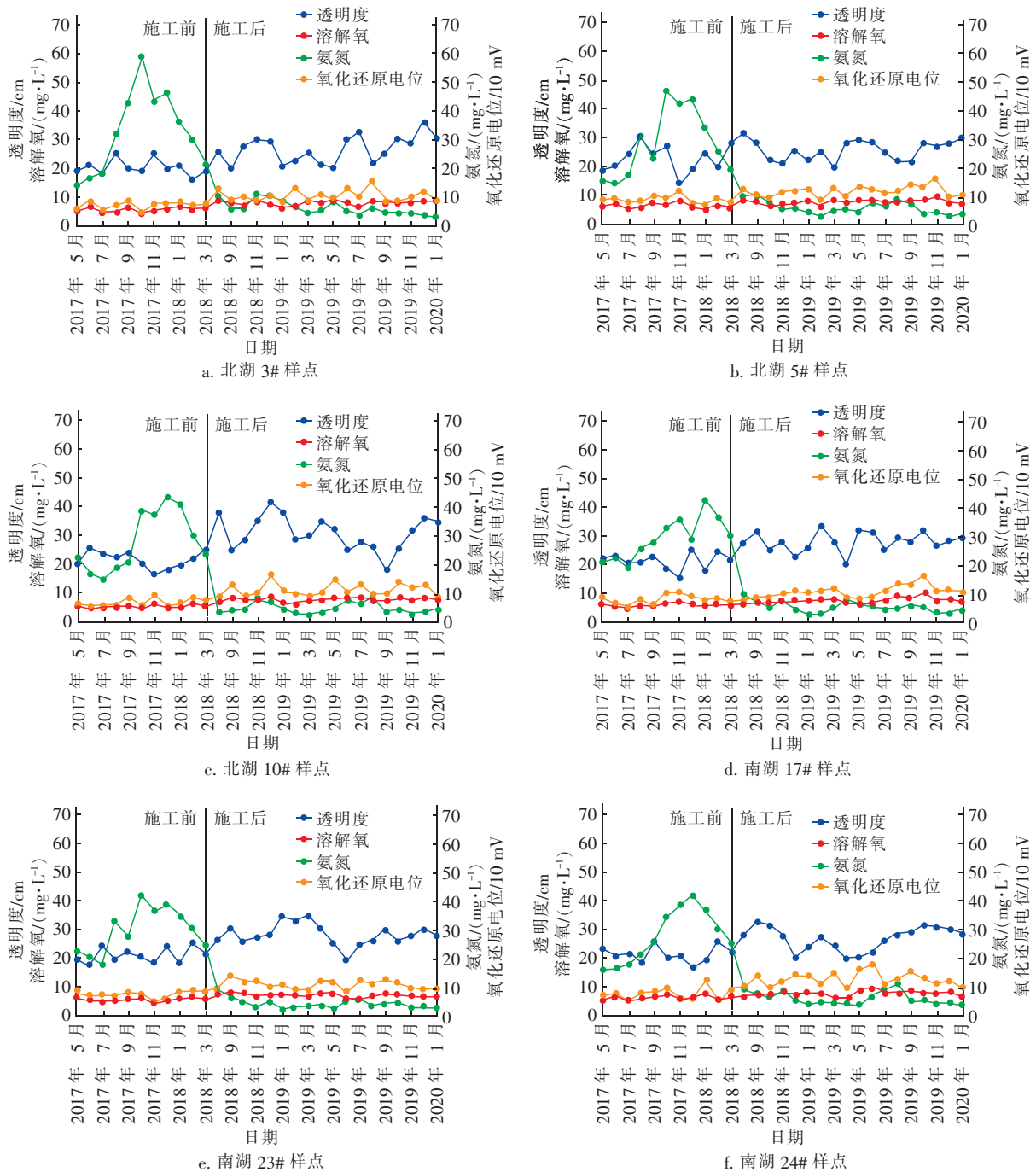


图 7 工程施工前、后样点水质变化

Fig. 7 Water quality changes of sample points before and after construction

5 结语

琵琶湖生态清淤工程以检测剖析底泥污染特征→科学决策清淤深度和范围→优化清淤方式和设备→营造景观、处置底泥→综合评价工程效果为主线。该工程结合现场调研及实际情况,采用原位修

复技术和异位修复技术相结合的处理方式,其中,原位微生物修复区域约 $8 \times 10^4 \text{ m}^2$,异位清淤区域约 $24 \times 10^4 \text{ m}^2$,总清淤工程量约 $14.95 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。清淤底泥通过减量化处理与稳定化处理,浸出毒性满足《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》(GB 5085.

3—2007)要求,可安全回用,不会引起二次污染。产生的余水经过处理后满足《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)二级标准,属生物安全范围,可排入湖区,实现水资源循环利用。本项目通过生态清淤工程,水质显著提升,达到了预期目标。底泥内源污染实质是外源污染物质长期输入的结果,清淤工程仅作为琵琶湖黑臭水体治理的技术方法之一,要控制内源污染的良好效果并长效持久,必须结合外源污染治理,并配合生态修复技术措施。

参考文献:

- [1] 石稳民,黄文海,罗金学,等. 基于生态修复的河湖环保清淤关键问题研究[J]. 环境科学与技术,2019,42(增刊2):125-131.
SHI Wenmin, HUANG Wenhai, LUO Jinxue, *et al.* Key issues of environmental dredging of river and lake sediments based on ecological restoration [J]. Environmental Science & Technology, 2019, 42 (S2): 125-131 (in Chinese).
- [2] 冉光兴,曹卉,李巍. 东钱湖底泥环境特征与疏浚方案[J]. 水利水电科技进展,2007,27(2):73-76.
RAN Guangxing, CAO Hui, LI Wei. Environmental characteristics and dredging scheme for sediment of Dongqian Lake [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27 (2): 73-76 (in Chinese).
- [3] 曹兴涛,谷广锋,王新新,等. 重金属污染土壤修复的二次污染与防治[J]. 应用化学,2019,48(2):490-493.
CAO Xingtao, GU Guangfeng, WANG Xinxin, *et al.* Secondary pollution prevention and control in heavy metal contaminated soil remediation [J]. Applied Chemical Industry, 2019, 48 (2): 490-493 (in Chinese).
- [4] 徐光炎,何纪力,郭依勤,等. 江西省地区土壤环境质量评价标准[J]. 中国环境监测,1992,8(3):6-8.
XU Guangyan, HE Jili, GUO Yiqin, *et al.* Evaluation criteria of soil environmental quality in Jiangxi Province [J]. Environmental Monitoring in China, 1992, 8 (3): 6-8 (in Chinese).
- [5] 史云鹏,曹卉,汪冬冬. 东钱湖底泥疏浚余水中污染物浓度的相关性研究[J]. 中国农村水利水电,2013(12):30-33.
SHI Yunpeng, CAO Hui, WANG Dongdong. Correlation study of pollutant concentration in dredged sediment of Dongqian Lake [J]. China Rural Water and Hydropower, 2013 (12): 30-33 (in Chinese).
- [6] 钱丹,张金鹏,王宏丽,等. 河道底泥处理技术成效分析[J]. 水利科学与寒区工程,2018,1(7):46-48.
QIAN Dan, ZHANG Jinpeng, WANG Hongli, *et al.* Effect analysis of river sediment treatment technology [J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering, 2018, 1 (7): 46-48 (in Chinese).
- [7] 易庆国,伍淳明,尹贤军,等. 一种城镇污泥处理处置资源化综合利用新技术[J]. 中国给水排水,2014,30(18):71-73.
YI Qingguo, WU Chunming, YIN Xianjun, *et al.* A new technology for sewage sludge treatment, disposal and comprehensive resource utilization [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30 (18): 71-73 (in Chinese).
- [8] 包建平,朱伟,汪顺才,等. 固化对淤泥中重金属的稳定化效果[J]. 河海大学学报(自然科学版),2011,39(1):24-28.
BAO Jianping, ZHU Wei, WANG Shuncai, *et al.* Stabilization effect of heavy metals in solidified sludge [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2011, 39 (1): 24-28 (in Chinese).
- [9] 全恩从. 保定市污泥处理中心项目的工艺选择及思考[J]. 中国给水排水,2018,34(20):21-23.
TONG Encong. Process selection and thought of Baoding sludge treatment center project [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34 (20): 21-23 (in Chinese).
- [10] 王琦,李中华. 环保疏浚底泥堆场余水处理方法及实施装置研究[J]. 水资源与水工程学报,2012,23(2):179-181.
WANG Qi, LI Zhonghua. Study on treatment device and method to residual water at environmental dredging sediment storage area [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2012, 23 (2): 179-181 (in Chinese).

作者简介:向莹(1990-),女,陕西西安人,硕士,工程师,主要从事水环境综合治理研究工作。

E-mail:124331907@qq.com

收稿日期:2020-06-14

修回日期:2020-07-20

(编辑:衣春敏)