DOI: 10.15928/j.1674 - 3075,202004300118

城市富营养化湖泊综合治理——以武汉北太子湖为例

汪尚朋1,2,郭艳敏1,3,万 骥1,周超群4,欧雅菲1

(1.武汉中科水生环境工程股份有限公司,湖北 武汉 430074; 2.武汉蔚蓝净安环保工程有限公司,湖北 武汉 430074; 3.生态环境部长江流域生态环境监督管理局生态环境监测与科学研究中心,湖北 武汉 430010; 4. 武汉市环境保护科学研究院,湖北 武汉 430024)

摘要:应用"污染源控制+水生态修复+水质提升"综合技术治理北太子湖,为城市富营养化湖泊的治理提供技术体系和示范。北太子湖规划蓝线水面面积 $52.6~\mathrm{km}^2$,湖岸线长 $5\mathrm{km}$,平均水深 $1.8~\mathrm{m}$,工程前水质整体为劣 V类,治理目标是湖水水质达到地表水 IV 类。2018 年 $3~\mathrm{J}-2019$ 年 $2~\mathrm{J}$,通过实施污水管网改造、初期雨水调蓄池修建、生态植草沟构建、污染底泥疏浚、湖体水生态系统构建、旁路人工湿地水体提标等工程措施,COD、TN、TP 的去除率分别为 58.14%、83.18%、90.91%; 2019 年 $6~\mathrm{8}$ 月水体 COD、TN、TP 连续 $3~\mathrm{f}$ 个月达到地表水 IV 类标准。建议在水生态修复工程完工后,投加一些生态环保型的水质净化剂,提升水体透明度,促进沉水植物快速生长繁殖以发挥净化水质的功能。

关键词:城市湖泊;富营养化;综合治理;北太子湖

中图分类号:X524,X171.4 文献标志码:A 文章编号:1674-3075(2021)04-0091-06

我国大多数湖泊已出现不同程度的富营养化问题,尤其是城市景观湖泊,随着富营养化进程加速,湖泊生态系统结构和功能发生退化,如藻类恶性增长、沉水植物消亡、水生生物多样性丧失、水质恶化等,严重影响湖泊景观与人居环境质量,降低城市生态旅游形象(王志强等,2017)。近年来,各地政府对城市湖泊进行水污染治理,如杭州西湖、南京玄武湖、深圳荔枝湖等,通过截污控制城市污水进入湖泊、引水改善水质、底泥清淤以及采用不同生态修复方法等措施治理湖水,形成了湖泊水体富营养化防控理论和技术体系(毛献忠等,2008;成水平等,2013),但对水体富营养化防控理论的应用和技术集成严重不足。

北太子湖位于湖北省武汉市武汉经济开发区(汉南区),是武汉市重点保护湖泊。湖泊集水面积3.72 km²,规划蓝线水面面积52.6 hm²,湖岸线长5 km,平均水深1.8 m。据武汉市环境监测中心2012-2017年的水质监测结果,北太子湖水质整体为劣V类,主要超标因子为TN和TP,是典型的城

市富营养化湖泊。根据《武汉市水功能区划》,北太子湖执行《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)中的IV类水质标准。因此,迫切需要开展以改善水质为目的的北太子湖水环境综合治理。

在前期开展的北太子湖水环境容量研究(胡胜华等,2018)基础上,本文依据《湖泊生态环境保护系列技术指南》,通过污水管网改造、修建初期雨水调蓄池、构建生态植草沟、疏浚污染底泥、构建湖体水生态系统、辅以旁路人工湿地水体提标等关键技术的集成,实施北太子湖水环境综合治理,并形成"污染源控制+水生态修复+水质提升"城市富营养化湖泊综合治理技术体系,为城市湖泊富营养化治理提供参考和工程应用示范。

1 区域概况及治理目标

1.1 区域环境

本研究湖泊区域排水现状以雨污分流为主,但存在污水管线与雨水管线错接、乱接和漏接的现象。治理前,沿岸共有5处雨污混合排放口、1处污水排口和13处雨水排口(图1),湖岸杂草丛生并分布大量的各种建筑和生活垃圾,水生植物种类稀少,鱼类等水生生物无法生存。

1.2 污染状况

根据项目前期可研阶段调查,2018年北太子湖的人湖污染负荷现状如表1(胡胜华等,2018)。对

收稿日期:2020-04-30 **修回日期:**2021-06-04

作者简介:汪尚朋,1978年出生,男,高级工程师,主要从事污染水体防治等工作。E-mail:793520328@qq.com

通信作者:郭艳敏,1990年生,女,硕士,主要从事水污染控制与生态修复设计咨询工作。E-mail:643720579@qq.com。

42卷第 4 期 水 生 态 学 杂 志

入湖 COD 贡献最大的是面源污染,占 63.06%;对 TN 贡献最大的是点源污染,占 50.01%;对 TP 贡献最大的是点源污染,占 38.77%。



图 1 排口分布示意

Fig.1 Waste and storm water outlets to Beitaizi Lake

1.3 治理目标

治理后的北太子湖水质达到《地表水环境质量标准》(GB3838 - 2002)中的 IV 类标准,即 COD \leqslant 30 mg/L, $TN \leqslant 1.5$ mg/L 和 $TP \leqslant 0.1$ mg/L。

根据水质目标、一定的水文水动力学条件、污染排放空间布局等,COD环境容量选用"混合反应器"模型计算;TN、TP环境容量选用狄龙模型(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,2011)计算。北太子湖的水环境容量及污染物目标消减量计算结果见表 2。

表 1 北太子湖污染负荷状况

Tab.1 Pollution loads to Beitaizi Lake prior to the water quality improvement project

公分 . 女 . 源	COD/	TN/	TP/
污染来源	t • a ⁻¹	t • a ⁻¹	t • a-1
点源污染	55.39	19.28	1.26
面源污染	191.75	11.67	1.04
内源污染	56.94	7.59	0.95
合计	304.08	38.55	3.25

表 2 北太子湖水环境容量及污染物目标削减量 Tab 2 Water environment capacity and pollutant

Tab.2 Water environment capacity and pollutant reduction targets for Beitaizi Lake

	指标	COD	TN	TP
_	水质目标/mg・L ⁻¹	30.00	1.50	0.10
	污染负荷/t•a ⁻¹	304.08	38.55	3.25
	水环境容量/t • a ⁻¹	219.92	13.01	1.09
	污染物目标削减量/t•a ⁻¹	84.16	25.54	2.16

1.4 技术路线

依据"湖泊生态环境保护系列技术指南"(环办 [2014]111号),并结合北太子湖富营养化特征,制 定的北太子湖水污染控制与水环境治理的技术路线 见图 2。

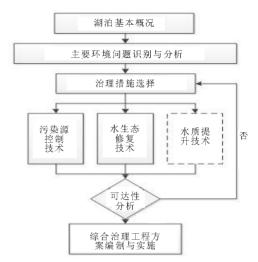


图 2 北太子湖综合治理技术路线

Fig.2 Flow chart for the comprehensive treatment project on Beitaizi Lake

2 工程措施

依据系统性和针对性的设计原则,首先针对不同的污染源提出相应的控制措施,抑制湖水水质的恶化;然后,实施以构建健康水生态系统为核心的水生态修复工程,提高生物多样性,完善食物网结构,提升水体自净能力;最后,采取旁路人工湿地水质提升措施,对湖水中的 TP 进一步削减去除,以保障工程方案的目标可达性。

2.1 污染源控制工程

将污水直排口的污水管道改接入城市污水排水系统,并在排口末端实施原位强化净化措施进行污染治理;雨污混流排口实施雨污分流改造,对于改造难度较大的雨污混流排口在排口末端设置调蓄池截流旱季污水及初期雨水,调蓄面积按22.42 hm²、调蓄量按8 mm降雨量设计,可储存2200 m³水量。采用湿式型生态植草沟来控制面源污染,构建生态植草沟2000 m²(1000 m×2 m)。对排口附近淤积比较严重的底泥进行疏挖,以有效削减湖泊内源污染,清淤深度0.5~0.8 m,清淤面积21000 m²,清淤量12600 m³。

污染源控制工程污染负荷理论削减量见表 3。

2.2 水生态修复工程

2.2.1 健康水生态系统构建 水深 0.5~2 m 区域种植苦草(Vallisneria natans)、轮叶黑藻(Hydrilla verticillata)以及狐尾藻(Myriophyllum verticillatum)等沉水植物(金树权等,2017)27 hm²,湖

中及湖边可观范围内种植睡莲(Nymphaea tetragona)等浮叶植物(赵丽君等,2019)1.57 hm²,水陆交错带种植菖蒲(Acorus calamus)、水葱(Scirpusvalidus)、再力花(Thalia dealbata)等挺水植物(张倩妮等,2019)0.25 hm²。水生植物恢复后,分区域分阶段投放滤食性、肉食性、杂食性和草食性鱼类

1.2 万 kg和本土的底栖动物螺、蚌 4.7 万 kg。

2.2.2 立体生态浮岛和曝气增氧 在雨水排口附近布设立体生态浮岛(下挂人工水草)0.3 hm²,并围绕立体生态浮岛设置6套浮水喷泉式曝气机(张玲玲等,2020),以增强对人湖污染物的分解净化。

水生态修复工程污染负荷理论削减量见表 4。

表 3 污染源控制工程污染负荷理论削减量

Tab.3 Pollution load reduction targets for the source control phase of the project

污染源	工程内容 -	削减量/t • a ⁻¹		-1	- 备 注	
行朱你	COD TN TP		笛 住			
点源污染	管网改造	55.39	19.28	1.26	点源污染负荷削减率 100%。	
	油茶沖	3.70	0.23	0.02	调蓄池汇水收集率 6.03%,对降雨量的削减率 32%	
面源污染	调蓄池 泛污染		0.23	0.02	(中国工程建设协会,2015)	
	生态植草沟	19.18	1.17	0.10	生态植草沟覆盖率 20%,对面源污染的削减率 50%(巴诺,2020)	
内源污染	底泥疏挖	1.14	0.15	0.02	底泥疏挖比率 4.0%, 疏挖后污染物削减率 50%(龚春生, 2007)	
合	计	79.41	20.83	1.40		

表 4 水生态修复工程污染负荷理论削减量

Tab.4 Pollution load reduction targets for the ecological restoration phase of the project

工程措施	工程量/hm² —	净化能力/g·m ⁻² a ⁻¹				削减量/t • a ⁻¹		
		COD	TN	TP	COD	TN	TP	
种植沉水植物	27	360	60	2.5	97.20	16.20	0.68	
种植浮叶植物	1.57	100	20	1.2	1.57	0.31	0.02	
种植挺水植物	0.25	100	20	1	0.25	0.05	0	
立体生态浮床+曝气	0.30	1500	315	10	4.50	0.95	0.03	
合 计	29.12	2060	415	14.2	103.52	17.51	0.73	

2.3 水质提升工程

旁路人工湿地采用水平潜流人工湿地系统,设计处理规模为 3 500 m³/d,有效面积约 7 502 m²,表面水力负荷 0.43 m³/(m²·d),水力停留时间1.2 d,湿地 植 物 以 芦苇(Phragmites australis)、香蒲(Typha orientalis)、西伯利亚鸢尾(Iris sibirica)为主。水质提升工程污染负荷理论削减量见表 5。

表 5 水质提升工程污染负荷理论削减量

Tab.5 Pollutant reduction targets for the comprehensive water quality improvement project

指标	COD	TN	TP
进水/mg • L-1	30	1.5	0.1
出水/mg • L-1	20	1.0	0.05
去除率/%	33.3	33.3	50.0
处理规模/m³ • d-1	3500	3500	3500
去除量/g•m ⁻³	10	0.5	0.05
削减量/t • a⁻¹	12.78	0.64	0.06

2.4 可达性分析

通过污染源控制工程、水生态修复工程和水质提升工程,该湖泊理论上能实现水质达到IV类标准。 具体见表 6。

2.5 工程实施及验收

本工程的工期为 2018 年 3 月 - 2019 年 2 月。 验收标准是:施工完成后,湖泊水体 COD、TN、TP 连续3个月达到地表水 IV 类标准。

表 6 治理目标可达性分析

Tab.6 Feasibility analysis of treatment objectives

	指标	COD TN	TP
治理前	污染负荷总量/t•a	a ⁻¹ 304.08 38.55	3.25
行理則	水环境容量/t·a-	219.92 13.01	1.09
工程目标	污染物目标削减量/t	• a ⁻¹ 84.16 25.54	2.16
	1		
污染源控制工程	污染物削减量/t•a	a ⁻¹ 79.41 20.83	1.40
77条你红削工在	目标可达性	\times \times	\times
	1		
污染源控制工程	污染物削减量/t•a	a ⁻¹ 182.93 38.34	2.13
+水生态修复工程	目标可达性	\checkmark \checkmark	\times
	+		
污染源控制工程	污染物削减量/t•a	a ⁻¹ 195.71 38.98	2.19
+水生态修复工程	目标可达性 目标可达性	/ /	/
+水质提升工程	日かり込性	~ ~	~
	·	· ·	

3 工程运行效果分析

3.1 监测样点及指标

对北太子湖施工前(2018年2月)、施工期(2018年3月-2019年2月)和验收期(2019年3-8月)3个阶段的总氮(TN)、总磷(TP)、化学需氧量(COD)进行了监测。湖中设置监测点5个(图3),指标的监测和分析方法参考相关文献(国家环境保

94

护总局,2002)进行,所得的试验数据采用 Excel 2007 处理。

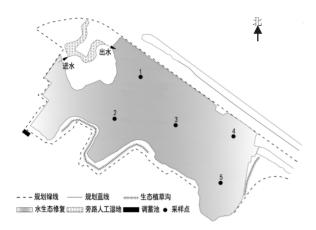


图 3 北太子湖采样点

Fig.3 Sampling sites in Beitaizi Lake

监测结果与分析 3.2

施工前后水体 TN、TP、COD 的变化见图 4。

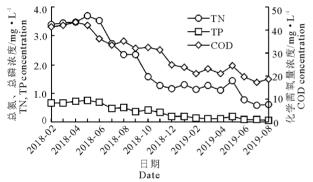


图 4 北太子湖水质变化

Temporal variation of water quality in Beitaizi Lake 施工前水质 2018 年 2 月, TN、TP、COD的 3.2.1 浓度分别为 3.39、0.66、41.35 mg/L。

3.2.2 施工期水质 (1)污染源控制工程 2018 年 3 -5月,污染源控制工程和水生态修复工程实施完 成,水体水质没有明显改善。可能是污染源控制工 程只是截留去除了部分污染源,仍有外源污染入湖; 水生植物恢复生长的过程比较缓慢,水质改善作用 没有体现。(2)水牛态修复工程 2018 年 6-10 月, 水生态修复工程逐步稳定运行。该阶段 TN、TP、 COD 浓度均呈明显下降趋势,最低分别降至 1.57、 0.36、32.03 mg/L,相比 2018 年 2 月分别下降了 53.69%、45.45%、22.54%。(3)水质提升工程 2018 年11月-2019年2月,人工湿地投入运行,水生态 修复工程受气温影响水质净化作用较弱。该阶段水 体 TN、TP、COD 浓度呈继续下降趋势,最低分别降 至 1.12、0.15、21.19 mg/L,相比人工湿地运行前最 低值分别下降了 28.66%、58.33%、33.84%。

3.2.3 验收期水质 2019 年 3-8 月, TN、TP、COD 最低分别降至 0.57、0.06、17.31 mg/L,与 2018 年 2 月相比,分别降低了83.18%、90.91%、58.14%。 2019年6-8月,水体 COD、TN、TP 连续3个月达 到地表水 IV 类标准。

结论及建议

本文以武汉北太子湖为研究对象,基于"湖泊生 态环境保护系列技术指南",通过对污水管网改造、 初期雨水调蓄池修建、生态植草沟构建、污染底泥疏 浚、湖体水生态系统构建、旁路人工湿地水体提标等 关键技术进行集成,形成了"污染源控制+水生态修 复十水质提升"的城市富营养化湖泊综合治理技术 体系。经过1年多的生态治理,北太子湖COD、TN 和 TP 稳定达到了 GB 3838 - 2002 地表水 IV 类标 准,实现了水质目标。

本文理论可达性分析中,COD、TN、TP 理论削 减目标分别为 84.16、25.54、2.16 t/a,湖泊治理方案 中各工程措施的理论削减量合计为195.71、38.98、 2.19 t/a, 达标率分别为 233%、153%、101%; 而实 际工程运行中, COD、TN、TP的去除率分别为 58.14%、83.18%、90.91%,说明湖泊治理方案的理 论效果与实际运行效果存在较大差异。原因可能是 对湖泊现状调查不充分,或者对理论目标可达性分 析过程中的计算参数选取不合理,从而导致各工程 措施的设计参数与实际现状存在一定偏差。该项目 前期可研阶段的调查结果(胡胜华等,2018)与本文 的数据(项目设计阶段)有差异,相比可研阶段,原与 周边湖渠直接连通的进水口和出水口因水利调蓄需 要,各修建了1处拦水坝,使得湖泊水文水动力学条 件发生了变化,从而导致了水环境容量的变化。建 议在编制湖泊治理方案前加强对湖泊现状的调查分 析,编制过程中加强对各理论依据的可靠性分析和 对各工程措施的系统性分析,在保障湖泊治理目标 可达的同时避免过度投资。

在工程实施过程中的 2018 年 2 - 5 月, COD、 TN、TP呈现略微上升的趋势。原因可能是污染源 控制工程只是截留去除了部分污染源,仍有外源污 染入湖,特别是随着雨季来临,外源污染入湖现象更 加频繁;水生植物恢复生长的过程比较缓慢,导致水 生态修复工程的水质改善作用没有体现(谭凯婷等, 2019);随着气温的逐渐上升以及沉水植物种植过程 中对底泥的扰动,加速了底泥营养盐的释放,对水体 营养盐浓度的升高有贡献(袁轶君等,2020)。建议

在污染源控制工程完工后,要加强对分流管网的查漏补缺和对调蓄池运行参数的优化调整,以提高对污染物的截留去除能力;在水生态修复工程完工后,投加一些生态环保型的水质净化剂,以快速絮凝沉淀悬浮物,提升水体透明度,为沉水植物提供适宜的光照条件,促进沉水植物快速生长繁殖,发挥水质净化作用。

参考文献

- 巴诺,2020.生态植草沟对降雨径流污染物去除率试验分析 「J」. 水利技术监督,(1):71-76,93.
- 成水平,冯玉琴,吴娟,等,2013.城市河流水环境综合治理技术集成与示范[7]. 给水排水,49(8):16-19.
- 粪春生,2007.城市小型浅水湖泊内源污染及环保清淤深度 研究[D],南京:河海大学.
- 国家环境保护总局,2002.水和废水监测分析方法[M].4 版. 北京:中国环境科学出版社:243-285.
- 胡胜华,王硕,史诗乐,等,2018.武汉北太子湖水环境容量研究[I]. 绿色科技,(20):76-79,83.
- 金树权,周金波,包薇红,等,2017.5 种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较[J]. 环境科学,38(1):156-161.
- 毛献忠,桂安,陶益,等,2008.城市湖泊水环境修复组合工艺效果研究——以深圳市荔枝湖治理工程为例[J].湖泊

- 科学,(4):456-462.
- 谭凯婷,柳君侠,王志红,等,2019.沉水植物修复富营养化景观水体的研究进展[J]. 水处理技术,45(6):15-18.
- 王志强,崔爱花,缪建群,等,2017.淡水湖泊生态系统退化驱动因子及修复技术研究进展[J].生态学报,37(18):6253-6264.
- 袁轶君,何鹏程,刘娜娜,等,2020.温度与扰动对鄱阳湖沉积物氮释放的影响[J]. 东华理工大学学报(自然科学版),43(5):495-500.
- 赵丽君,陈刚新,张文超,等,2019.2 种漂浮植物对再生水水质净化能力比较[J]. 环境工程,37(6):58-63.
- 张倩妮,陈永华,杨皓然,等,2019.29 种水生植物对农村生活 污水净化能力研究[J].农业资源与环境学报,36(3): 392-402.
- 张玲玲,刘立早,张玉平,等,2020.不同增氧条件下强化生态 浮床净化养殖水体的效果[J].中国给水排水,36(17): 69-74.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,2011.水域纳 污能力计算规程:GBT25173-2010[S]. 北京:荣宝斋出 版社.
- 中国工程建设协会,2015.城镇径流污染控制调蓄池技术规程:CECS 416-2015[S]. 北京:中国计划出版社.

(责任编辑 张俊友)

Comprehensive Treatment of Eutrophic Urban Lakes: A Case Study of Wuhan Beitaizi Lake

WANG Shang-peng, GUO Yan-min, WAN Ji, ZHOU Chao-qun, OU Ya-fei

(Wuhan Zhongke Hydrobiological Environment Engineering Co. Ltd, Wuhan 430074, P.R. China)

Abstract: Beitaizi Lake is located in Wuhan City of Hubei Province, with a water catchment area of 3.72 km², a shoreline of 5 km and the average water depth of 1.8 m. According to water quality monitoring results, the water quality of Beitaizi Lake was generally inferior to class V during 2012 - 2017 and is a typical eutrophication urban lake. To improve water quality, a comprehensive treatment project was conducted in Taizihu Lake from March 2018 to February 2019, with the treatment target of meeting the class IV standard (GB 3838 - 2002) for three consecutive months. The project integrated a series of key technologies, including sewage system renovation, construction of a rainwater storage tank and bioswales, contaminated sediment dredging, construction a bypass artificial wetland. The result was a comprehensive system that incorporated 'pollution source control, aquatic ecosystem restoration and water body improvement' to effectively remediate urban lake eutrophication. The TN, TP and COD were monitored at five monitoring points before (February 2018), during (March 2018 - February 2019) and after (March - August 2019) the project was completed. In February 2018, the concentrations of TN, TP and COD in February 2018 were, respectively, 3.39, 0.66, and 41.35 mg/L. During the period of pollution abatement and ecological restoration (March - May), there was little improvement in water quality. However, as operation of the restoration project stabilized (June - October), the concentrations of TN, TP and COD decreased to 1.57, 0.36 and 32.03 mg/L and, after the artificial wetland was operational (November 2018 - February 2019), the respective concentrations decreased continuously to 1.12, 0.15 and 21.19 mg/L. As expected with ecologically based treatment processes, water purification efficiency was affected by water temperature. From March to August 2019, TN, TP and COD decreased to 0.57, 0.06 and 17.31mg/L (reductions of 83.18%, 90.91% and 58.14%, compared with those in February 2018). From June to August 2019, COD, TN, and TP concentrations met the standard for surface water class IV (GB 3838 - 2002) and the lake treatment goal was achieved. While the project was successful, we recommend the addition of eco-environmental water purifiers to improve water transparency and promote the rapid growth and reproduction of submerged plants.

Key words: urban lake; eutrophication; comprehensive treatment; Beitaizi Lake