

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.06.021

深圳市宝安区小湖塘库水体生态治理工程分析

吕丰锦, 贾娟华, 李威, 盛晟, 唐颖栋, 陈奋飞
(中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

摘要: 从污染负荷水平、社会服务需求两个维度对深圳市宝安区存在黑臭问题的35个小湖塘库进行综合分类,针对不同类型和治理目标,将清淤、底质改良、生态强化净化、水生植物群落构建、生物操纵、挺水植被缓冲带等生态治理措施组合应用,实现了各小湖塘库水质提升,主要水质指标基本达到了地表水Ⅲ类标准,并进一步丰富了小湖塘库水生生物多样性,恢复了水体生态系统平衡,对后续南方地区小湖塘库水体生态治理具有借鉴意义。

关键词: 南方地区; 小湖塘库; 生态治理

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)06-0127-07

Analysis on Ecological Treatment Project of Small Lakes and Ponds in Bao'an District, Shenzhen

LÜ Feng-jin, JIA Juan-hua, LI Wei, SHENG Sheng, TANG Ying-dong,
CHEN Fen-fei

(PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China)

Abstract: This 35 small lakes and ponds with black and odorous problems in Bao'an District, Shenzhen are comprehensively classified from two dimensions of pollution load level and social service demand. The water quality of small lakes and ponds was improved through the combination of ecological measures such as deposit cleaning and improvement, eco-enhanced purification, aquatic plant community construction, biological manipulation, and emergent vegetation buffer zone, according to different types and treatment objectives. The main water quality indicators can basically meet level III standard for surface water. Furthermore, the aquatic biodiversity of small lakes and ponds is enriched, the balance of the water ecosystem is restored, which has reference significance for the subsequent ecological treatment of small lakes and ponds in south China.

Key words: south China; small lakes and ponds; ecological treatment

小湖塘库作为城市小微水体主要的组成水体类型,多为封闭型水体,具有水域面积小、纳污容量小等特征,易发生水体富营养化,进一步恶化后导致水体黑臭。小湖塘库数量众多,分布范围广,且常位于

集中居住区,环境状况广受关注,是群众反映强烈的环境问题之一。近年来,小湖塘库水体整治已经成为改善城市人居环境工作的重要内容,“十三五”时期,浙江、湖北、福建等省份以及北京、深圳等城市均

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07602-002); 广东省重点领域研发计划项目(2019B110205005)

通信作者: 陈奋飞 E-mail: chen_ff@hdec.com

将区域内小湖塘库整治作为主要工作之一。

依托深圳市宝安区小湖塘库生态治理工程,从踏勘调研、取样检测、治理目标制定、综合治理方案、工程实施效果、工程创新实践等方面进行分析,从污染负荷水平和社会服务需求两个维度进行综合分类,实现不同生态治理措施的组合应用^[1],并总结了可持续的生态治理系统方案成果。

1 研究区概况与主要环境问题

1.1 研究区概况

为贯彻落实深圳市委市政府 2019 年底全面消除黑臭水体的决策部署,宝安区按《深圳市全面消除黑臭水体攻坚实施方案(2018—2019 年)》有关要求,围绕“厂、网、源、河”四个中心实施 2019 年全面消除黑臭水体工程。其中燕罗、松岗、新桥、沙井四个街道范围存在黑臭问题的小湖塘库水体共有 35 个。该区域内城市高密度开发,街道社区用地受限,小湖塘库治理要求高、难度大。本项目 35 个存在黑臭问题的小湖塘库水体具体分布如图 1 所示。合计水域总面积为 302 743 m²,其中水面面积 < 5 000 m² 的小湖塘库 24 个,数量占比为 69%。



图 1 小湖塘库总体分布

Fig.1 Overall distribution of small lakes and ponds

1.2 主要环境问题

对小湖塘库水体进行踏勘调研和取样检测,主要检测指标包括:透明度、氧化还原电位(ORP)、溶解氧(DO)、氨氮(NH₃-N)、总磷(TP)和化学需氧量(COD),检测结果如图 2 所示。

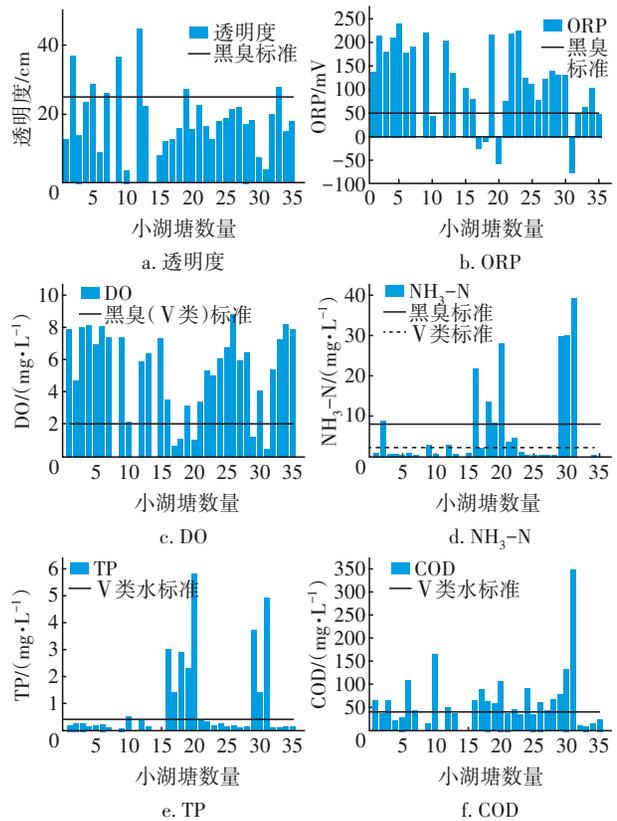


图 2 治理前小湖塘库水质检测结果

Fig.2 Water quality monitoring results of small lakes and ponds before treatment

从水体指标与黑臭水体判别标准对比可以发现,小湖塘库水体黑臭问题主要为透明度不达标,感官效果较差。个别水塘存在 NH₃-N、ORP、DO 不达标情况,结合现场踏勘调研掌握的情况,发现大部分小湖塘库周边截污纳管工程已相对完善,小湖塘库外源污染输入相对较低。

结合小湖塘库水质检测数据、实际感官透明度,根据小湖塘库水生态环境综合状况可划分为以下三类:一般型、藻类暴发型和严重黑臭型。

① 一般型。典型特征水质相对较好,污染物指标较低,主要存在水体透明度低(<25 cm)、水生动植物单一等问题。此类小湖塘库主要为公园内大面积湖体或郊区小湖塘库,周边用地多为绿地林地,面源污染较轻,水质相对较好。

② 藻类暴发型。典型特征是水体颜色呈蓝绿色,白天溶解氧高,水体 COD 较高。此类小湖塘库主要位于城中村,周边用地多为居住建设用地,面源污染严重,水域面积小,水体流动性差,水体自净能力受限。

③ 严重黑臭型。典型特征是水体感官极差,各项指标超标严重,水体发黑发臭,除罗非鱼外,基本无其他水生生物存活。此类小湖塘库主要存在污水偷排漏排现象,水体底泥淤积严重,周边多为管理水平较差的城中村,外源污染严重。

1.3 黑臭成因分析

小湖塘库水体规模小、封闭、流动性较差,生态系统组成结构相对单一,水体自身环境容量和自净能力有限,受外源输入的污染物影响较大,因此,容易出现透明度下降、藻类暴发等水体恶化现象,如果不及时进行人工干预,易进一步恶化造成水体黑臭,引起生态系统严重破坏。黑臭成因主要包括以下几个方面:

① 外源污染(点源污染)。部分小湖塘库周边污水管网存在建设和管养不完善、错接漏接、管道渗漏、化粪池渗漏等问题,造成水体污染负荷加重。某些紧邻湖塘的民房、饭店甚至将污水直接排入水体。

② 外源污染(面源污染)。大部分小湖塘库位于社区居住区范围内,降雨后,地面径流将大量的有机物、油脂、悬浮固体等污染物带入池塘,是最主要的外源污染,COD污染负荷为 $1.0\sim 3.0\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ ^[2]。

③ 内源污染。小湖塘库因长期遭受污染,污染物通过沉降或随颗粒吸附作用进入水体底泥中,形成重度污染底质。受到水体扰动影响,底泥营养物质重新释放进入水体,加速水质恶化^[3]。

④ 设计缺陷。部分小湖塘库所在的社区已经实施零星的景观提升工程,但未形成系统提升方案,且采用了护岸硬化、池底硬化等不当措施,阻隔了小湖塘库与周围环境原有的物质和能量等交换,破坏了生物生境,导致水生生物种类稀少,生态系统彻底破坏,丧失水体自净能力。

⑤ 藻类易暴发。现有研究表明,消除蓝藻暴发的富营养化标准为 $\text{TN}\leq 0.5\text{ mg/L}$ 、 $\text{TP}\leq 0.02\text{ mg/L}$,有些专家则提出消除蓝藻暴发的富营养化标准需达到 $\text{TN}\leq 0.2\text{ mg/L}$ 、 $\text{TP}\leq 0.01\text{ mg/L}$ ^[4],小湖塘库本底水质指标大多超过该限值,流动性差,适宜藻类的生长繁殖。在藻类发生季节性死亡时,植物残体累积形成有机物富集污染。

2 综合治理方案

2.1 治理目标

小湖塘库水体生态治理工程基本目标为实现

全面消除黑臭。同时,小湖塘库作为与社区居民生产和生活关系最为密切的水体,对其生态治理工作提出了更高的要求 and 目标:重点提升水体透明度,削减控制小湖塘库面源污染,促进水体自净能力恢复,丰富小湖塘库生物多样性。

2.2 总体技术路线

随着宝安区水环境治理相关工程的逐步完善实施,小湖塘库水质恶化趋势将得到有效抑制。以小湖塘库周边片区点源污染治理完善为前提,遵循城市河道治理客观规律,按照“根源在岸上,核心在管网”的总体思路,综合采取“控源截污、清淤疏浚、垃圾清理、生态修复、过程管控、强化管养”的整治策略,分类整治,精准施策,开展小湖塘库水体生态治理工程。具体技术路线见图3。

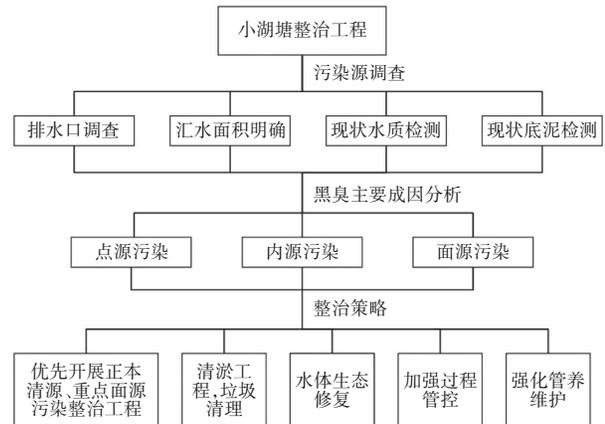


图3 小湖塘库治理技术路线

Fig.3 Technical route for treatment of small lakes and ponds

2.3 小湖塘库综合分类

本项目小湖塘库数量多、分布广,为了提高治理方案的针对性和治理实施的时效性,将小湖塘库进行分类整治、精准施策。根据小湖塘库现状问题和治理需求调研分析,主要从污染负荷水平、社会服务需求两个维度将小湖塘库进行矩阵分类,针对位于不同矩阵位置的小湖塘库分别采取对应的推荐措施。

① 污染负荷水平维度

小湖塘库周边区域的点源污染已规划由其他子项工程进行治理完善。因此,小湖塘库水体主要外源污染为初期雨水,其污染程度主要由汇水范围内用地性质决定。综合参考深圳市不同土地利用类型的初期雨水污染物浓度^[5],确定小湖塘库汇水

范围内不同用地分类对应的初期雨水污染物浓度如表 1 所示。

表 1 不同土地利用类型初期雨水污染浓度

Tab.1 Concentrations of initial rainwater pollution for different land use types $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

用地分类	COD	氨氮	TP	SS
老城区	249	3.56	1.51	470
居民区	85			162
绿地、道路	45			67

小湖塘库污染负荷预测分类见图 4。

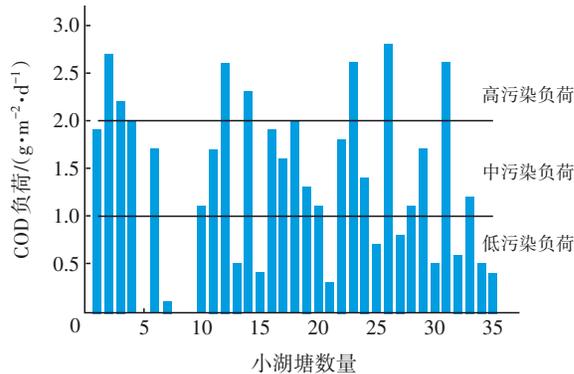


图 4 小湖塘库污染负荷预测分类

Fig.4 Classification of pollution load for small lakes and ponds

根据水塘面积、汇水范围内不同用地类型面积、汇水面积内产生径流量、初期雨水污染物汇集总量,计算单位水塘面积 COD 负荷,依据 COD 负荷将水塘分为高污染负荷水塘、中污染负荷水塘和低

污染负荷水塘三种类型,结合天然水体对 COD 的自净能力水平相关研究结论^[6],综合确定 COD 污染负荷 $<1 \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 属于低污染负荷;COD 污染负荷为 $1\sim 2 \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 属于中污染负荷;COD 污染负荷 $>2 \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 属于高污染负荷。

② 社会服务需求维度

以小湖塘库为代表的小微水体在社区居民生活中能够提供公众休闲娱乐、文化体验、科普教育等服务功能。本项目从小湖塘库所处位置、周边社区分布等社会服务需求维度,将小湖塘分为基本要求型、综合功能型和重点打造型。

a. 基本要求型。主要为自然水塘,地处郊野区域,社会服务需求相对较弱,主要定位为恢复小湖塘库生态功能,保护生物多样性,实现水质稳定达到地表水 V 类水标准。

b. 综合功能型。一般位于郊野与社区交界区域,除发挥生态服务功能外,同时要求满足居民节假日休闲体验的城市服务功能,实现水体透明度不低于 80 cm,水质稳定达到地表水 IV 类水标准。

c. 重点打造型。主要为社区范围内的风水塘、景观塘,人流量密集,生态景观和卫生环境要求较高。结合社区文化和诉求意见,进行重点打造,实现水体清澈见底和稳定达到地表水 III 类水标准。

根据以上分类,不同类型小湖塘库对应工程措施如表 2 所示。

表 2 不同类型小湖塘库的综合分类工程措施

Tab.2 Comprehensive classification and engineering measures for different types of small lakes and ponds

类 型	低污染负荷	中污染负荷	高污染负荷
基本要求型	水生植物恢复、生物操纵	水生植物恢复、生物操纵、挺水植被带	水生植物恢复、生物操纵、强化净化措施
综合功能型	水生植物恢复、生物操纵、挺水植被带	水生植物恢复、生物操纵、强化净化措施	水生植物恢复、生物操纵、挺水植被带、强化净化措施
重点打造型	水生植物恢复、生物操纵、景观提升	水生植物恢复、生物操纵、挺水植被带、强化净化措施、景观提升	水生植物恢复、生物操纵、挺水植被带、喷泉曝气、强化净化措施、景观提升

注: 对底泥淤积厚度超过 500 mm 的小湖塘库均实施生态清淤工程,在清淤基础上进行底质改良。

2.4 主要措施设计

① 清淤疏浚及底质改良

结合底泥污染特征分析成果,对污染底质进行生态清淤及底质改良。生态清淤综合考虑水体底栖生物生境需求,根据底质不同深度污染物分布,清运 300~500 mm 深度的底质淤泥;采用天然矿石、石灰、缓释氧剂(3:1:1)等对底质环境进行改良,改善底栖微生物生长环境。

② 水生植物群落构建

水生植物群落的恢复对湖塘生态系统的构建极其重要,主要包括沉水植物、挺水植物和浮叶植物。沉水植物主要应用于水深 $<2 \text{ m}$ 的小湖塘库,沉水植物是使水体从浮游植物为优势的浊水态转换为以大型植物为优势的清水型的关键。一个稳定的群丛应有 1~2 个优势种、3~4 个伴生种和若干个偶见种。挺水植物主要选择鸢尾、美人蕉、芦苇、

旱伞草、花叶芦竹、再力花、梭鱼草等适应性强、水质净化效果好的本土植物品种,通过不同植物种类搭配提高对不同污染物的综合净化去除能力^[7]。浮叶植物主要配置睡莲,分散点缀,丰富小湖塘库水体景观。

③ 生物操纵

生物操纵是利用食物链摄取原理,通过改变水体生物群落结构,增强种间相互作用,从而减少浮游植物生物量,恢复生态平衡。主要通过放养滤食性鱼类、螺类、贝类、虾类等,构建健康良好的生态系统^[8]。

主要投放品种及其生态学特性如表3所示。

表3 水生动物及其生态学特性

Tab.3 Aquatic animals and their ecological characteristics

项目	生态学特性
鲢鱼	属于鲤科、鲢属鱼类。以浮游植物为主食,主要以滤食浮游植物(藻类)为生,兼食浮游动物、腐屑和细菌聚合体等
鳙鱼	属于鲤科、鲢属鱼类。以浮游动物为主食,兼食浮游植物,是典型的浮游生物食性的鱼类
乌鱼	属于鱼纲、鳢科。凶猛肉食性鱼类,可有效控制罗非鱼
锦鲤	属于鲤科。杂食性鱼类,喜群游,易饲养,对水温适应性强
鲫鱼	属于鲤科。主食植物、腐败的植物碎片和丝状藻类
青虾	属于节肢动物门。杂食性动物,主要食料是各种底栖小型无脊椎动物、水生动物的尸体、固着藻类、多种丝状藻类等
环棱螺	属于田螺科。以水生植物嫩茎叶、细菌和有机碎屑等为食

生物操纵的时机为沉水植被生长稳定后,操纵投放采用种类搭配分3~5批进行投放,具体投放位置根据不同水生生物习性进行确定,鱼类、虾类在水体中心投放,螺类、贝类在岸边以人工抛撒方式投放。水生动物总的投放量控制在30~50 g/m³水体。

④ 生态强化净化措施

生态强化净化措施主要包括构建水下生物滤床和滨岸湿地。周边有绿地空间的小湖塘库,结合绿地空间打造滨岸湿地,通过滨岸湿地的过滤净化,削减小湖塘库污染负荷,同时通过水泵提升,实现小湖塘库内循环,提高水体流动性。小湖塘库周边用地紧张则采用构建水下生物滤床措施。采用低功率水泵实现水体与水下生物滤床之间的交换,达到降解污染物及控制藻类的目的。水下生物滤床上部种植水生植物,进一步提升水质、恢复生物多样性。

⑤ 塘内挺水植被缓冲带构建

社区居住区范围内的小湖塘库驳岸大部分已被改造为直立式硬质岸墙,雨水通过管道直排入小湖塘库,无植被缓冲带拦截净化初雨面源污染。通过塘内挺水植被缓冲带构建,一方面实现硬质岸墙生态化处理,另一方面通过植物拦截吸收初期雨水削减面源污染。种植基质以塘内清淤经过消杀处理的底泥为主,一并发挥了挺水植物对底泥污染的削减作用。

⑥ 喷泉曝气

若水体含氧量低则易滋生厌氧细菌进而造成水质恶化。在工程建成后初期,水体自身生态系统尚不健全,通过喷泉曝气增加水体溶解氧,促进水体浮游动物微生物生长,为水体改善奠定基础,同时提升小湖塘库整体景观效果。

⑦ 景观综合提升

重点打造型小湖塘库作为街道社区居民主要的休闲场地,对生态景观要求相对较高。结合街道社区意见,融入当地文化要素,重点实施栏杆修复、周边绿化园建整治、休闲娱乐设施打造、景观小品打造等,为周边群众提供休闲健身场所。

2.5 运维管养要求

小湖塘库水体生态治理工程实施后需要通过全面科学的运维管养,才能逐步恢复构建其生态组成稳定结构。尤其是在运维管养初期,水体抗冲击能力相对较弱,必须通过人工措施降低外界不利影响,促进生态系统的恢复。

① 水体环境卫生管养。定期进行水体水面垃圾清理,做好水体卫生环境保洁工作。运行管养初期(前3个月)保证生态强化处理措施(水下生态滤床、滨岸湿地等)每天运行不少于8 h;水质日常监测按照调试初期(前3个月)每两周进行一次取样检测,稳定运行后每月进行一次取样检测。

② 水体生态系统管养。定期收割清理长势不良、枯萎的挺水植物,并利用其他区域长势较好

的幼苗进行移栽补种;重点关注水体中丝状藻的潜在暴发风险,及时进行人工清捞,并延长生态强化处理措施运行时间;生物操纵分批投放结束后,每年对水体水生动物的种类及种群密度等进行取样调查。

2.6 典型设计示例

小湖塘库4属于重污染负荷和综合功能型,位于社区小广场内,面积1 720 m²,平均水深1.5 m,汇水面积6 300 m²,主要包括老城区和广场绿地。治理前由于水体封闭、周边排污口漏排等原因,导致水体藻类暴发严重,黑臭问题突出,周边群众投诉多。设计治理目标为解决小湖塘库黑臭问题,进一步改善水体生态景观效果。

在完成“控源截污、内源治理、垃圾清运”等措施基础上,主要采用“水生植物恢复、生物操纵、喷泉曝气、挺水植被带构建、水下生物滤床”五种措施组合进行生态治理提升。

① 水下生物滤床。通过水下生物滤床保障水质稳定提升,缓解藻类暴发现象。水下滤床面积为260 m²,占水域总面积的16%,滤床填料组合为陶粒和火山岩,粒径为10~30 mm,水体内循环周期为8~12 h。

② 水生植被恢复。构建水下森林,配置矮生苦草为优势种(占比60%~80%),眼子菜科的篦齿眼子菜、尖叶眼子菜及马来眼子菜等洁净种作为伴生种(占比10%~20%),刺苦草、小茨藻和金鱼藻作为偶见种(占比5%~10%),种植面积为1 200 m²,种植密度控制在60~100株/m²。

③ 挺水植被带。种植挺水植物、浮叶植物,恢复水生植物群落,挺水植物主要选择再力花、美人蕉、鸢尾、旱伞草等观赏价值较高的湿地植物,兼顾观赏要素。挺水植物种植密度控制在16~25株/m²。

④ 生物操纵。通过生物操纵丰富小湖塘库的生物多样性,形成相对复杂的食物链,恢复生态平衡,分批投放鲢鱼、锦鲤、乌鱼、鲫鱼、青虾、环棱螺,共60 kg,第一批投放以青虾、环棱螺为主,第二批投放以鲢鱼、锦鲤为主,第三批投放以乌鱼、鲫鱼为主。

⑤ 喷泉曝气。设置喷泉曝气提升水体溶解氧,营造景观效果。共设置2台喷泉曝气设备,主要参数:充氧量0.6 kg O₂/h,水花直径4.5/6 m,功率

1.5 kW。

工程实施后,历经3个月调试运行期,水质基本稳定达到地表Ⅲ类水标准,水体透明度达1.5 m,清澈见底,让周边群众享受了“水清岸绿,鱼翔浅底”的自然和谐美景,同时通过科普宣教设施的打造,提升了社区群众生态环境保护意识,促进了美丽社区发展。

3 工程实施效果

该生态治理工程实施后,小湖塘库改善效果显著,总体达到生态修复工程整治目标。其中,基本要求型小湖塘库的水质得到稳定保障,成功实现了恢复健康生态系统功能的目标,工程实施后,水体透明度显著提升,塘周植被丰富,水质稳定在地表水Ⅲ类标准;综合功能型小湖塘库呈现水体清澈见底、鱼翔浅底、花开湖畔、万物生长竞自由的美好画面;重点打造型小湖塘库除实现水清岸绿的美好景象外,同时融入了当地文化要素,设置景观小品,增加儿童游乐设施、健身器材、科普教育设施等,为当地民众提供了便捷美丽的休闲场地,进一步提升了社区群众的生态环境保护意识。

4 工程创新

① 采用系统治理方案,以治理目标和现状问题为导向,通过对小湖塘库水体的调研和检测,掌握了周边污染负荷水平和生态景观服务需求。采用系列生态治理措施进行提升治理,克服了传统单一技术应用范围、适宜性及效果受限的弊端。同时,对建成后的运维管养进行了明确定量要求,保障了小湖塘库水体生态系统稳定构建。

② 采用污染负荷水平和社会服务需求两个维度的综合分类,提高了系列工程措施的组合应用效率,达到了灵活高效和科学合理配置的多种生态治理措施,并形成针对性的生态治理解决方案。基于不同维度的综合分类治理目标,能够进一步保障水体水环境改善效果和提高水体生态景观服务价值,提高工程实施的综合效益水平。

③ 本工程案例治理对象为与群众日常生活关系最密切的小湖塘库,生态治理成果同时需要重点考虑社区居民的休闲体验。结合系列生态治理措施,同步对水体生态景观服务设施、社区历史文化主题展示、生态环境保护宣传进行了完善提升,有效提高了小湖塘库对居民的吸引力和亲和力,全

面发挥了小湖塘库的综合生态服务功能价值。

5 结论及建议

① 小湖塘库水体封闭,自净能力受限,生态系统脆弱。外源污染对水质影响极大,彻底解决其水体黑臭问题,需要完成周边区域截污纳管、雨污分流等水环境治理工程。在此基础上,进一步采用系列生态治理措施才能实现水体健康生态系统的恢复构建,同时促进水体水质的长效保持。本工程案例的小湖塘库治理后水体水质基本稳定在地表水Ⅲ类标准以上,水体感官效果显著提升。

② 小湖塘库污染成因复杂,周边区域用地限制,封闭水体藻类易暴发,在实际治理过程中,应因地制宜,采用适宜的生态治理措施进行合理配置组合,发挥不同技术间的协同互补作用,才能实现改善水质、恢复生态平衡、美化生态景观的可持续目标。

③ 工程实施后,应建立长效管理机制,指导街道社区进行科学合理的管养维护,做好水体日常管养和水体生态系统演变跟踪监测。远期可以结合智慧城市中有关智慧城管建设内容实现区域联动智慧管养,进一步加强管理和监督工作,维持小湖塘库生态治理成效。

参考文献:

- [1] 王海珊,邹平,付先萍,等. 黑臭水体组合生物净化技术研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2020(1): 56-62.
WANG Haishan, ZOU Ping, FU Xianping, *et al.* Research progress on combined biological purification technologies for black and smelly water bodies [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2020 (1):56-62(in Chinese).
- [2] 桂晗亮,张春萍. 城市面源污染研究现状及展望[J]. 环境保护前沿, 2019, 9(6):775-781.
GUI Hanliang, ZHANG Chunping. Current situation and prospect of urban non-point source pollution research [J]. Advances in Environmental Protection, 2019, 9 (6):775-781(in Chinese).
- [3] 敖静. 污染底泥释放控制技术的研究进展[J]. 环境保护科学, 2004(6):29-32,35.

- AO Jing. Reviews on development of release control techniques of contaminated sediment [J]. Environmental Protection Science, 2004(6):29-32,35 (in Chinese).
- [4] 张翀,赵亮,张莹,等. 藻类爆发危害及其控制技术研究进展[J]. 环境保护科学, 2015, 41(3):107-112.
ZHANG Chong, ZHAO Liang, ZHANG Ying, *et al.* Research progress of the hazard and control technology of algae bloom [J]. Environmental Protection Science, 2015, 41 (3):107-112(in Chinese).
- [5] 李明远,魏杰,张武强,等. 深圳市初期雨水特征分析及控制对策研究[J]. 广东化工, 2017, 44(10): 43-46.
LI Mingyuan, WEI Jie, ZHANG Wuqiang, *et al.* First-flush rainfall in Shenzhen City [J]. Guangdong Chemical Industry, 2017, 44(10):43-46(in Chinese).
- [6] 许磊,李华,陈英旭,等. 南太湖地区小型浅水湖泊自净能力季节变化研究[J]. 环境科学, 2010, 31(4): 924-930.
XU Lei, LI Hua, CHEN Yingxu, *et al.* Research on seasonal variation of self-purification ability for small shallow lakes in south Lake Taihu [J]. Environmental Science, 2010, 31(4):924-930(in Chinese).
- [7] 张瑞斌. 不同水生植物对污水处理厂尾水的生态净化效果分析[J]. 环境工程技术学报, 2015, 5(6): 504-508.
ZHANG Ruibin. Ecological purification efficiency of several aquatic plants on tail water of sewage treatment plant [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2015, 5(6):504-508(in Chinese).
- [8] 刘恩生. 生物操纵与非经典生物操纵的应用分析及对策探讨[J]. 湖泊科学, 2010(3):307-314.
LIU Ensheng. Analysis on biomanipulation, non-traditional biomanipulation and discussion of the countermeasures of biomanipulation application in waters [J]. Journal of Lake Sciences, 2010(3):307-314(in Chinese).

作者简介:吕丰锦(1990-),男,山西吕梁人,硕士,中级工程师,主要从事水环境治理技术工作。

E-mail:lv_fj@hdec.com

收稿日期:2021-07-14

修回日期:2021-12-06

(编辑:衣春敏)