



文章栏目：生态修复工程

DOI 10.12030/j.cjee.202111129 中图分类号 X703 文献标识码 A

王子健, 胡婧, 张晨, 等. 景观湖泊黑臭水体生态修复措施和效果——以武汉市金湖生态修复工程为例[J]. 环境工程学报, 2022, 16(5): 1702-1712. [WANG Zijian, HU Jing, ZHANG Chen, et al. Ecological restoration measures and effects of black and odorous water bodies in landscape lakes——Taking Jinhu ecological restoration project in Wuhan city as an example[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(5): 1702-1712.]

景观湖泊黑臭水体生态修复措施和效果——以武汉市金湖生态修复工程为例

王子健[✉], 胡婧, 张晨, 阚红明, 刘洋, 黄冰冰

中国市政工程东北设计研究总院有限公司, 长春 136000

摘要 为修复受到污染呈黑臭状态的金湖水体, 建设金银湖国家湿地公园, 在分析金湖水质、底质概况及黑臭水体成因的基础上, 采取点源污染、面源污染、内源污染同步控制和边治理边修复的方法, 在不进行大规模清淤、不扰动水体情况下建设湖滨缓冲带, 对湖泊底质进行修复。结果表明: 湖泊水质得到了明显改善, 各项水质指标均低于《城市黑臭水体整治工作指南》中的轻度黑臭标准限值, 修复后水质达到了地表水Ⅲ类标准; 在中央环保督察组巡视反馈重点整治湖泊水质变化报告中被评为“好转”等级, 实现了黑臭水体治理以及生态修复的目标。该治理修复案例可为城市内陆景观湖泊生态修复提供参考。

关键词 武汉市金湖; 黑臭水体; 成因分析; 生态修复工程; 修复措施和效果

武汉市河网众多, 素有“九省通衢”之称^[1]。金湖位于武汉市西郊、东西湖区中部, 地理位置重要, 是典型的门户区^[2]。经济的快速发展和城市化进程的加快使得城市基础设施建设与管理滞后于城市扩张, 伴随而生的城市污水处理能力不足、雨污管道合流、垃圾堆放不当和截污治污设施落后导致污水排入环境水体使其受到污染, 出现黑臭现象^[3]。近年, 武汉市计划着重建设东西湖区, 使其成为国家级生态示范区。首要任务就是治理黑臭水体, 而金湖生态修复是东西湖区内景观湖泊黑臭水体生态修复治理的典型代表之一。

近年来, 金湖周边小区雨污分流改造工程的推进对遏制水质持续恶化有一定的效果, 点源污染也得到了一定程度的控制, 但市政道路、公建单位的雨污分流改造工程尚未开展。据统计, 武汉市共有 47 个劣 V 类湖泊, 金湖亦位列其中^[4]。2019 年, 武汉市人民政府要求切实推进全市清源、清管、清流行动(简称“三清”行动)。“三清”行动方案要求 2021 年底之前, 全市河、湖、流域实现全面截污, 基本消除黑臭水体。目前, 对黑臭水体的治理修复一般集中在对水体本身的净化方面^[5], 其工程措施一般集中在清淤^[6]、截留等点源面源控制方面^[7]。近年来, 涉及黑臭治理与全方位生态修复的案例有所增多^[8-9], 已逐渐形成系统的水体黑臭治理与长效生态修复治理思路, 但仍需使用具体案例来验证其效果, 并丰富其治理体系。本工程在分析金湖概况及污染原因的基础上, 结合已有治理思路, 针对东西湖区金银湖中的金湖水体, 采取湖泊形态控制、点源污染控制、面源污染控制、内源污染控制及沉水植物群落建设等一系列的工程措施, 通过长效的水生态

收稿日期: 2021-11-23; 录用日期: 2022-02-17

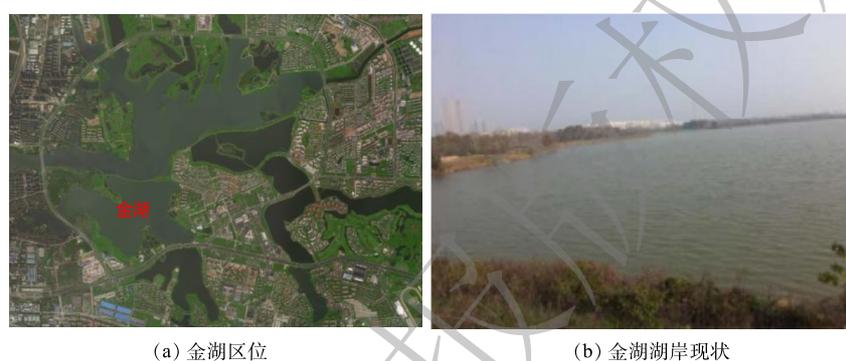
第一作者: 王子健(1995—), 男, 硕士, 工程师, 1205375513@qq.com; ✉通信作者

系统运行管理维护，有效提升湖泊水质，改善湖泊水域生态环境和景观效果。本研究以武汉市金湖黑臭水体为案例，着重分析水体黑臭原因与生态修复治理思路，系统阐述了金湖黑臭水体治理修复技术及措施，以期为其他黑臭水体治理工程提供参考。

1 金湖概况

1.1 金湖形态及水质概况

金湖是金银湖水域系统的子湖之一，金湖大部分已按规划蓝线形成了湖泊水域状态。实测水面高程 18.69 m。平均水深 1.5 m。岸线总体上较为规整，硬质垂直驳岸、软质驳岸各半。湖泊周边大部分为建成区，以住宅小区、湿地公园为主。现场踏勘时湖岸景观效果较好，已建成环湖绿道，金湖区位及其现状见图 1。



(a) 金湖区位

(b) 金湖湖岸现状

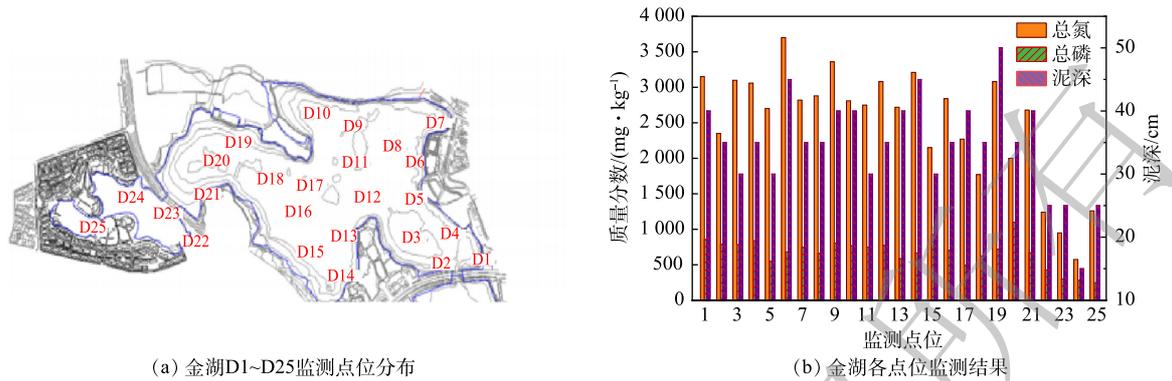
图 1 金湖区位及湖岸现状

Fig. 1 Jinhu location and current situation of lake bank

据统计^[10]，2016年，金湖水水质处于中度富营养状态，主要超标因子为总磷，水质为劣V类；2017年，水质依旧处于中度富营养状态，主要超标因子为总磷与COD，水质为劣V类；2018年，水质仍然处于中度富营养状态，主要超标因子为总磷与COD，水质为劣V类；2019年，水质转变为重度富营养状态，富营养化现象加剧，主要超标因子为总磷和COD，水质稳定在劣V类。近年来，金湖汇水范围内的小区已大力开展内部雨污分流改造工程，污水收集效果进一步提升，使进入湖泊的氮源、磷源逐年减少。但湖泊富营养化趋势并没有从根本上改变，甚至在逐年加剧，这意味着湖泊内源污染在逐年增大，从而使水体富营养化加剧^[11]。同时，该湖泊水体生态系统平衡严重失调^[4]，若不加以控制，甚至会导致水质下降以及水华暴发。另外，参考国外湖泊治理修复经验^[12]，在无人工干预的情况下，从外源截污到水体富营养化减轻需要 10 a 左右的时间^[13]，因此，需要结合生态修复措施治理金湖水体，才能加快这一进程^[14]。

1.2 金湖底质分析

金湖为海口工业园片区、金银湖南街片区等建成区的主要雨水接纳水体，共有混流排口 5 个。随着雨污管道混接错接现象较多，大量混流污水逐年增多并排入湖中，大部分有机质沉积在湖底，并且底泥中的污染物因湖底的扰动有时也会重新进入水相^[15]。2020年，对金湖水体的底泥进行了柱状钻芯采样检测，设置了 25 个底泥监测点位 (D1~D25)，具体见图 2 (a)。利用天平、滴定管、紫外分光光度计、原子荧光光度计、一体式原子吸收分光光度计等仪器对底泥样品含水率、总氮、总磷、有机质、重金属、挥发酚、矿物油进行监测^[16]。利用柱状底泥分层采样器分层采集底泥样品，每个柱状样品分为：污染层、过渡层和本底层 3 层^[17]。污染层有臭味，颜色呈黑-灰黑色，形状呈稀浆、流塑状，过渡层呈黑-灰色、软塑、密实，本底层底泥呈黄、灰黄色，质地密实。金湖各点位监测数据如图 2(b) 所示。



(a) 金湖D1~D25监测点位分布

(b) 金湖各点位监测结果

图2 金湖D1~D25监测点位分布及监测结果

Fig. 2 Distribution of Jinhu D1~D25 monitoring points and monitoring results

在底泥分析中,多采用美国EPA制定的底泥分类标准^[18],故本工程亦采用该标准分析底泥。在底泥中, $\text{TN}<1\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,属轻度污染区; TN 为 $1\,000\sim 2\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,属中度污染区; $\text{TN}>2\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,属重度污染区。 $\text{TP}<420\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,属轻度污染区; TP 为 $20\sim 650\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,属中度污染区; $\text{TP}>650\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,属重度污染区。本次监测的金湖底泥中总氮质量分数为 $575\sim 3\,700\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,空间分布差异较大。依据美国EPA制定的底泥分类标准^[18],总氮质量分数超过 $2\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,属重度污染。如图2(b)所示,金湖底泥中总磷质量分数为 $245\sim 1\,100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,空间分布差异较大,总磷质量分数超过 $650\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,属重度污染。由图2(b)可以看出,总氮、总磷和有机质(泥深)趋势一致,说明底泥中总氮、总磷指标底泥中有机质富集有关。

2 金湖黑臭水体成因

金湖作为金银湖区重要的子湖,周边规划有大量工业企业与居住小区,其水质的恶化直接影响周边居民生活。为了分析造成黑臭的原因,通过实地调查研究,发现金湖水环境污染因素主要包括金湖的形态割裂、点源污染、面源污染、内源污染、水生态系统紊乱5个方面。

1) 湖泊形态割裂——局部岸线破损、水域隔断。金湖岸线虽然总体上较为规整,但存在局部垂直驳岸遭受侵蚀破坏的情况。由图3可以看出,部分临湖挡土墙开裂、垮塌,导致金湖部分水域割裂。若不对其进行修复,则存在进一步扩大破损范围的可能。



(a) 金湖现状岸线浅滩

(b) 金湖现状退养鱼塘

图3 金湖湖泊形态问题现状

Fig. 3 Status quo of the morphological problems of Jinhu Lake

金湖北部规划蓝线范围内原有鱼塘、藕塘、人工养殖塘已于2019年1月全部完成退养工作。根据实地测量,退养的鱼塘、藕塘仍保留原有的形态,堤埂尚未拆除,且堤顶已建成了环湖路,退养的鱼塘、藕塘无法与现状金湖水域连通,塘内呈沼泽地、湿地的形态,缺少生态调节,在干

旱季节形成黑臭。在降雨量大、湖水位上涨时，又与湖水连通，从而污染水体。

2) 点源污染——污水、初期雨水混排入湖。金湖共有 29 个排口，其中雨水排口 27 个，混流排口 2 个。雨水排口目前尚无生态截流、净化措施，初期雨水污染物直排湖泊。混流排口均位于长源假日港湾小区内，该小区目前尚未完成雨污分流改造，但已纳入《金银湖小区雨污分流改造二期工程》，此工程目前在建中。

3) 面源污染——部分建成区缺少湖滨缓冲带。《武汉市东西湖区湖泊保护总体规划》将金湖的功能定位为城市型湖泊，金湖地处人口活动密集区域，周边地块基本属建成区，现状用地主要为湿地公园、住宅用地，周边交通条件发达。虽然之前已对部分临湖地块实施了绿化景观建设，但有缺漏。目前，金湖部分岸线黄土裸露，周边建成区的污染物随地表径流排入湖中，亟需改善提升。

4) 内源污染——底泥中含有大量污染物。外源污染物入湖和湖泊内水生动植物残体长期在湖内集聚形成的内源污染是湖泊水质、水生态系统恶化的主要原因。湖泊水体中漂浮物、悬浮物、岸边垃圾、落叶、未清理水生植物等沉积腐烂形成黑臭底泥，导致大量污染物沉积在湖泊底部，污染底泥。已有研究^[19]表明，水体水质与底泥中的污染物浓度成正比。由于底泥与湖泊水体之间存在着一种吸收与释放的动态平衡，因此，底泥中污染物对湖泊水体的污染也不容忽视。

5) 水生态系统紊乱——物种单一、生态结构简单。为发展经济，金湖曾进行过人工水产养殖。因此，该湖泊存在一定的有机污染。根据现场调查，现阶段虽已完成退养工作，但目前现状鱼类群落组成基本具有明显的人工放养痕迹且密度较高，渔获物大多是人工繁殖放养的 4 大家鱼。这严重影响水体中浮游生物群落的发展，同时严重扰动底泥，引起沉积物-水界面耦合剧烈，这是导致湖泊冬季水体仍黄浊的主要原因^[20]。现场浮游生物调查发现：轮虫为金湖浮游动物优势种群，现场调查所有样品中均未检出大型枝角类；调查中均未发现螺蛳、河蚌等大型底栖动物，优势种群均为水丝蚓，并有一定数量的摇蚊幼虫，表现出典型的富营养化水体底栖动物群落特征^[21]。同时，定性镜检结果显示，金湖浮游植物丰度较高，优势种类为绿藻门，其次为蓝藻门。湖泊中水体透明度均较差，沉水植被严重退化，调查期间未发现沉水植被分布。

由于湖泊生物结构简单，基本不存在沉水植物和浮水植物，湖泊水生态系统未能形成具有良性循环的食物网，湖泊水体缺失自净能力，湖底中的沉积物、底泥不断向水体中释放氮、磷，使水体水质长期得不到有效改善。水体中氮、磷含量高，容易导致浅水区形成蓝藻水华，蓝藻水华反过来又会促进内源磷的大量释放，导致 N/P 比下降^[22]。水生态系统恶化、水体缺失自净能力、内源污染得不到有效控制，是金湖水水质不达标的重要原因之一。

3 生态修复工程方案及措施

3.1 生态修复工程方案

湖泊水质的提升需要多方面、多维度的工程措施及执法管理措施并用，仅靠某个单一工程难以在短时间内实现规划水质目标。本项目一方面贯彻《武汉市河湖长令(第3号)》的相关指导精神，并据此确定本项目的水质控制目标。综上所述，本工程的建设目标：2020年，消除金湖劣V类水体，使其水质达到V类标准；2030年，达到规划地表水环境质量标准(GB 3838-2002)IV类的水质目标。结合金湖现状，金湖治理方向从湖泊形态控制、点源污染、面源污染、内源污染及沉水植物群落构建5方面出发，制定金湖治理修复方案(图4)，结合湖泊实际情况，分别采取具有针对性的工程措施。1) 湖泊形态控制：对湖泊局部破损的岸线进行修复，打通蓝线内被堤埂阻隔的水域通道，恢复水域联通。2) 点源污染控制：针对污水混排进入湖泊的情况，建设生态浮岛，生态排口对排口末端进行截污。3) 面源污染控制：建设生态排口，修建湖滨缓冲带，减少污染物

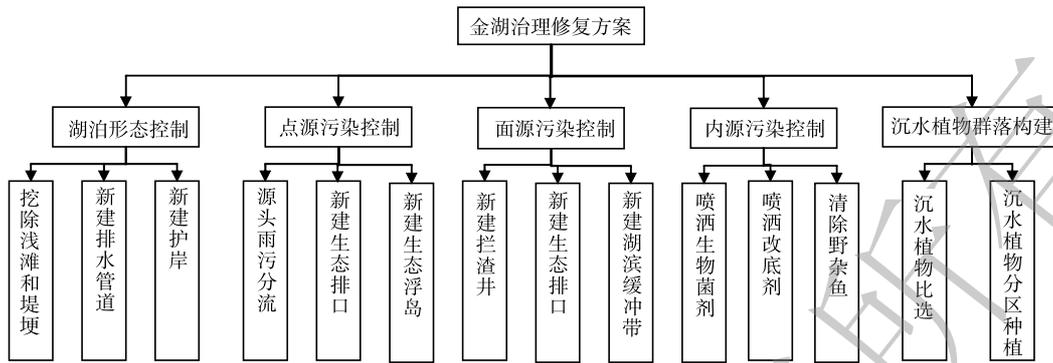


图4 金湖生态修复工程方案系统图

Fig. 4 System diagram of the ecological restoration plan for Jinhu Lake

入湖。4) 内源污染控制：结合现状湖泊的淤积程度、水生态系统特点，采用与水生态修复结合进行的底泥原位生态修复技术对湖泊底质进行改善，削减、控制湖泊底泥中的污染物，改善水生生物的生存环境。5) 沉水植物群落构建：构建水生植物群落，对生态系统通过长效运行维护的方式进行优化调整，打造具有良性循环湖泊水生态食物链，恢复湖泊水体的自净能力。

3.2 生态修复措施

1) 湖泊形态控制。金湖规划范围内存在少量已经退养的藕塘、鱼塘，但该部分水塘的堤埂未进行拆除，水体未与主湖域连通，形成浅滩，在常水位或水位低时会造成底泥裸露及局部死水。对于该部分水塘及浅滩，优先考虑对现状堤埂进行拆除，恢复湖泊生态。为了尽量避免破坏现状景观效果，减少对已形成的环湖步道的的影响，不再对其进行拆除。建设方案采用新建排水管道的方式，打通已退养的藕塘、鱼塘与金湖主湖区的通道，恢复湖泊水域，提升湖泊自净能力(图5)。



图5 挖除浅滩以及新建排水管位置

Fig. 5 Excavation of shallows and new location of drainage pipes

针对金湖现状垂直驳岸存在局部损坏的情况，本项目考虑对其进行修复。如图6所示：拆除图6(a)中间部分现状破损长度 $L=666\text{ m}$ 的混凝土挡土墙驳岸，并在原位新建生态护岸；采用生态护坡袋以及阶梯生态护岸2种形式，使用金湖历年水位涨幅数据确定高程(按高度 $H=1.5\text{ m}$ 考虑)和建设长度 $L=666\text{ m}$ 。

2) 点源污染控制。在现有工程雨污分流改造的基础上，本项目采取在岸下建设生态排口、生态浮岛的措施。有研究表明，利用植物同化作用、根系微生物与酶类的降解作用以及浮岛及排口

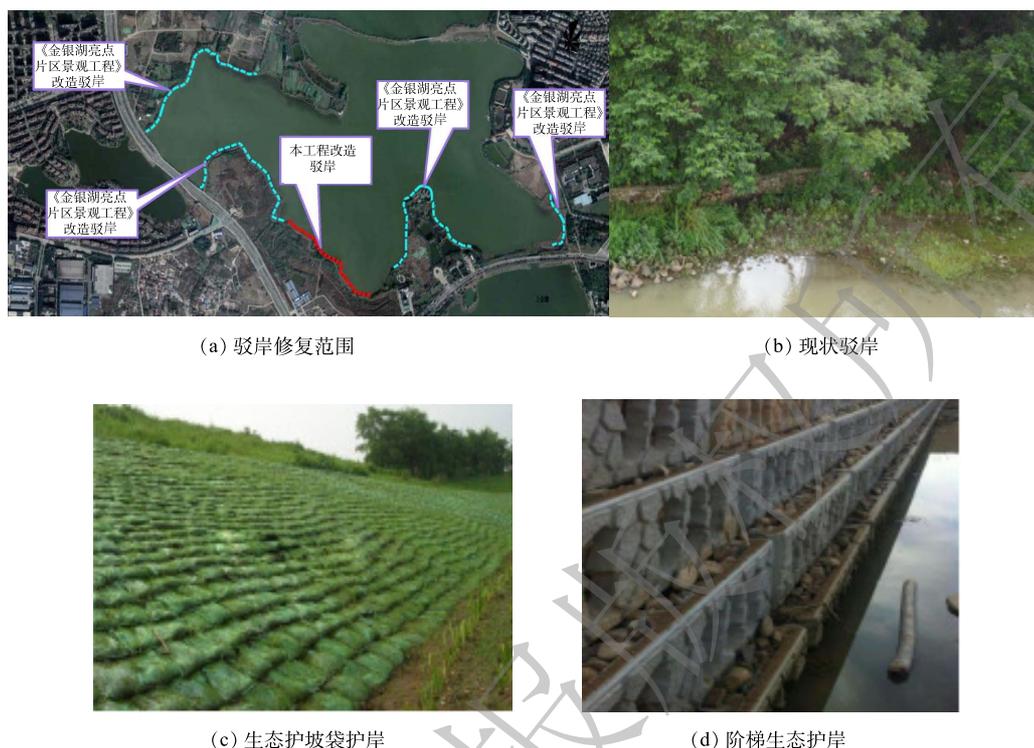


图 6 金湖驳岸局部修复

Fig. 6 Partial restoration of Jinhu reef

结构与其表面的物理化学过程，对进水的总磷去除率可达 73.8%，对总氮和 COD 的去除率可达 97.1% 以上^[23]。本工程对 8 个管径 $d \geq 500$ mm 的现状混流排口进行了遮挡和美化。在雨污分流改造工程实施以后，将 2 处混流排口转化为雨水排口，同时加快推进雨污分流改造工程的实施，以实现点源污染控制的目标。

3) 面源污染控制。根据现状管线调查，金湖共有 27 个雨水排口。10 个雨水排口为金银湖湿地公园相关海绵城市建设工程的溢流雨水排口，管径 $d = 300 \sim 1\,500$ mm。该类型排口上游主要为生态植草沟、生态湿地等设施，有研究表明，这些设施对总氮、总磷等的去除率均在 30% 以上^[24]，可有效对面源污染物进行截流；另外，17 个雨水排口管径 $d = 300 \sim 1\,800$ mm，主要为周边建成区雨水管网的末端排口，初期雨水夹带的污染物是面源污染的主要来源^[25]。本工程面源污染控制排口改造内容主要针对上述 17 个雨水排口及 2 处混流排口。对于其中 8 个管径 $d \geq 500$ mm 的排口，在岸上新建雨水拦渣井，对雨水中漂浮物、沉淀大颗粒物质进行拦截，可将雨水中的落叶、垃圾、泥沙等杂物进行拦截，减少初期雨水对湖泊水质的冲击；同时，在岸下建设生态排口、生态浮岛，对排口进行遮挡和美化，以提升湖岸景观效果，配合湖滨缓冲带的建设可以更好的控制面源污染。从而实现面源污染控制的目标。

缓冲带是湖泊最高水位之上的沿湖陆面地区，不仅可以形成对湖泊的缓冲隔离，避免外界干扰对湖泊环境的直接冲击，形成控制面源污染的一道生态屏障，而且具有促进生态环境改善功能^[26]。缓冲带的建设，能够全面恢复缓冲带内的植被，提高生物多样性和湖泊水体的生态服务性。另外，还具有生态补偿功能，开阔的空间景观资源、极高的美学观赏价值。因此，湖泊缓冲带的建设对湖泊的生态保护与修复具有重要意义。

本工程湖滨缓冲带断面见图 7，湖滨缓冲带的建设位置见图 8。依据湖滨种植范围以及植物浸

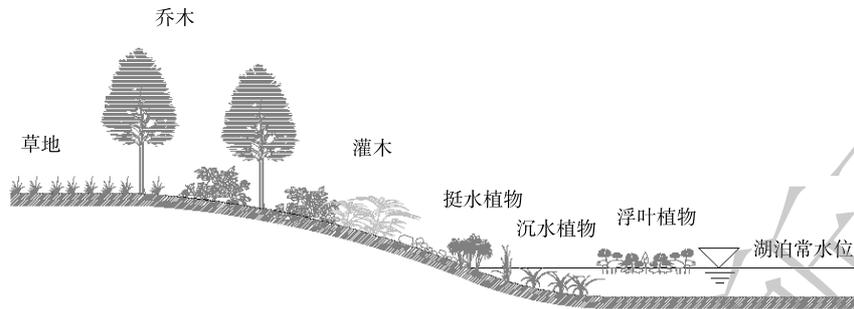


图7 湖滨带、缓冲带断面示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the cross-section of the lakeside zone and the buffer zone

水深度, 划定乔木、草本、灌木及挺水植物种植层次, 选用亲水性、耐水性较好的植被, 合理搭配, 考虑滨湖观景透景效果, 疏密搭配种植, 以自然式平面种植形式^[27]对植被缓冲带进行设计。在具体实施过程中, 利用乌柏和池杉形成植被骨架, 地被层则选用常绿鸢尾及矮生美人蕉合理搭配种植, 地势较高区域可局部小面积搭配较耐水湿的红叶石楠及金丝桃等植物品种, 其余区域均用马尼拉草皮满铺, 保证场地绿化覆盖, 不露黄土。

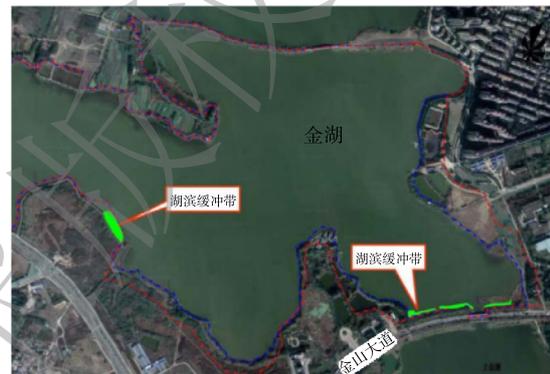


图8 金湖湖滨缓冲带建设位置

Fig. 8 Construction location of Jinhu Lakeside buffer zone

4) 内源污染控制。金湖的淤泥厚度较小, 底泥深度平均深度约 40 cm, 底部淤泥量为 594 048 m³。湖泊内源污染控制最快捷有效的方法就是清淤, 但清淤存在工期长、费用高和二次污染问题^[28]。从经济成本角度出发, 采用清淤疏浚的手段在工程投资方面性价比较低; 从技术角度出发, 水生态系统修复是本工程中的一项主要内容, 而在湖底淤泥厚度较小的前提下进行清淤疏浚、清除底部土著微生物及污染物, 对于恢复水体生态系统非常不利。同时, 不科学的清淤也会严重破坏底栖动物群落和有益菌群。除严重淤积、重金属污染或存在难降解污染物等特殊情况下, 一般不提倡大规模的清淤^[29]。通常采用底泥覆盖、营养盐钝化或微生物分解等方法进行湖泊底质的改善, 从而削减或抑制沉积物的内源释放。湖泊底质改善的目的主要是底泥的减量化、无害化。湖底淤泥经生态修复后, 会变成水体生态系统的重要组成部分, 成为沉水植物的营养物质来源、土著微生物的载体、底栖动物的栖息地。故本工程结合金湖的实际情况, 采用与水生态修复结合进行的底泥原位生态修复技术, 以控制内源污染。不进行大规模的清淤, 仅对湖泊蓝线内现状已退养的藕塘、鱼塘进行清淤就可以实现内源污染控制。本项目采取了底泥原位生态修复与水生态修复工程结合的方式进行内源污染控制, 主要施工步骤为: 生态围隔、生物网膜→清除野杂鱼→喷洒改底剂(硫酸氢钾复合盐)→喷洒微生物菌剂→喷洒絮凝剂(视回补水的透明度分多次喷洒)→喷洒锁磷剂→喷洒微生物菌剂→种植水生植物→投加底栖动物、鱼类→生态调控与维护(喷洒微生物菌剂、种群结构调整、收割水生植物等)。沉积物调查结果表明, 金湖沉积物现状尚好, 可满足沉水植被恢复的需要, 适宜开展水生植被恢复。本工程采用喷洒高效改底剂、复合微生物菌剂、喷洒锁磷剂等工序改善湖泊底质条件, 为种植沉水植物群落营造条件。本方案拟对金湖全域分别喷洒高效改底剂(硫酸氢钾复合盐)和微生物菌剂, 目的是原位分解表层沉积物中的有机物, 从根本上解决了高温季节底泥有机质分解可能造成

的内源污染释放问题，并为沉水植物生长提供生长条件。实践证明，微生物菌剂的使用是生态修复初期沉水植物群落快速恢复的有效手段。其主要成分与功能见表1。

5) 沉水植物群落构建。沉水植物是预防和治理水体富营养化工作的重要内容之一^[18]，其改善河湖水生态系统的作用机制可分为自身净化作用、生态改善作用、生物载体作用3个层面。

本工程主湖区内种植的沉水植物选用武汉地区本土品种。被考察沉水植物品种的净化能力及品种对周边环境的适应能力如表2所示。由表2可以看出，穗状狐尾藻株高较高，不适用于金湖水深较浅(平均水深1.5~2.0 m)的情况；微齿眼子菜、金鱼藻冬季休眠枯萎，不能满足本工程对沉水植物“四季兼顾”的要求，且金鱼藻不耐光，强光条件下可导致其死亡，而微齿眼子菜净水能力相对较差，因此不予考虑；苦草和轮叶黑藻在净水能力、对金银湖环境的适应性上均满足要求。考虑到苦草景观效果较好，本工程拟在湖的近岸区域种植苦草，在湖的深水区内种植轮叶黑藻。具体种植步骤：湖底高程17.30 m以上的区域种植苦草，种植面积754 823 m²；湖底高程17.30~17.10 m的区域种植轮叶黑藻，种植面积151 685 m²；根据湖泊地形条件，适当搭配少量微齿眼子菜、马来眼子菜。

表2 沉水植物性能指标比选

Table 2 Comparison and selection of performance indexes of submerged plants

植物	种植水深/m	适宜水温/℃	株高/cm	适光性	冬季生长情况	TN去除率/%	TP去除率/%
苦草	0.5~2	10~30	20~180	喜强光	冬季生长慢	72.0±3.2	58.5±2.7
轮叶黑藻	1~3	15~30	40~80	喜强光，对弱光有较好适应性	冬季生长慢	83.1±4.5	70.8±3.5
金鱼藻	0.5~3	10~30	40~150	喜弱光，强光可导致死亡	枯萎，次年萌发	79.3±4.0	67.7±3.2
穗状狐尾藻	0.2~1	10~20	100~250	喜强光	冬季生长慢	68.9±2.7	52.3±2.8
微齿眼子菜	0.5~0.15	10~20	10~30	喜强光	冬季枯萎，次年通过根状茎生长	63.8±3.1	49.2±3.1

现场实践表明，70%的覆盖度可迅速实现沉水植被竞争优势的形成，是实现水体生态环境快速改善并长期维持的有效技术措施。根据相关研究^[30]，沉水植被覆盖度超过30%时，才有显著的环境学效应，水质才能得到初步改善，但水质还不能稳定达标；水生植被覆盖度达到70%时，才有显著的生态学效应，湖泊生态系统可维持长期健康稳定。同时，参考武汉地区相关湖泊水生态修复的成功案例^[31]，为实现湖泊的持续健康稳定达标，确定本工程按约70%水域面积规模种植沉水植物，在有效改善湖泊水质的同时，为多种生物提供生存环境，待后期生态系统稳定后，沉水植物自然蔓延生长。

4 生态修复效果

通过湖泊形态控制、点源污染控制、面源污染控制、内源污染控制、水生态修复等治理修复措施，金湖目前透明度、溶解氧、氧化还原电位、氨氮各项水质指标均低于《城市黑臭水体整治工作指南》^[32]中的轻度黑臭标准限值。对图9所示的监测点位进行了取样检测，结果如表3所示。由表3可以看出，各监测点位的化学需氧量、氨氮、总氮、总磷指标均达到地表水环境质量

标准 (GB 3838-2002) III类水标准。金湖综合整治效果显著,并在中央环保督察组巡视反馈重点整治湖泊水质变化报告中,金湖水质被评为“好转”等级。由图10可以看出,金湖水体透明度显著改善,沉水植物面积扩大明显,初步构成了水下森林体系,初步完成了水生态修复。

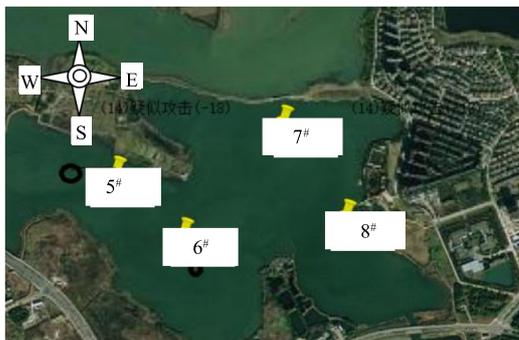
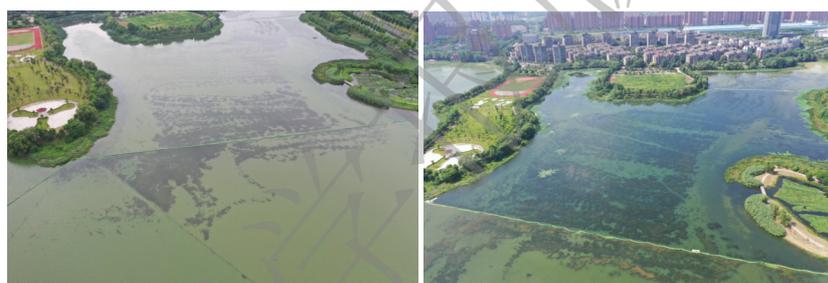


图9 金湖监测点位
Fig. 9 Jinhu detection point

表3 2021年11月金湖监测点水质情况
Table 3 Water quality of Jinhu monitoring points in November 2021

监测点位	化学需氧量/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	氨氮(以N计)/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	总氮/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	总磷/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
5#	14	0.44	0.61	0.05
6#	10	0.353	0.56	0.05
7#	15	0.662	0.88	0.05
8#	13	0.541	0.75	0.04
III类标准 限值	≤ 20	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 0.2



(a) 水体综合整治前金湖东南部水体航拍 (b) 水体综合整治后金湖东南部水体航拍

图10 水体生态综合修复前后对比图

Fig. 10 Comparison of before and after comprehensive eco-restoration of water bodies

5 结论

1) 通过分析金湖形态、水质、底质及其周边环境的特点,得出金湖黑臭水体成因主要包括形态割裂、点源污染、面源污染、内源污染、水生态系统紊乱5个方面。

2) 采取点源、面源、内源同步控制以及边治理边修复的方法,在不进行大规模清淤、不扰动水体情况下可改善金湖水体生态系统。

3) 在采取湖泊形态控制、点源污染、面源污染、内源污染及沉水植物群落构建5种生态修复措施后,金湖水质得到明显改善,达到地表水环境质量标准(GB 3838-2002) III类水标准。在中央环保督察组巡视反馈重点整治湖泊水质变化报告中,金湖水质被评为“好转”等级。

参考文献

- [1] 彭皓琳. 武汉城市发展: 反思与展望[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [2] 李志军, 李德旺, 雷明军. 武汉市金银湖动态水网构建思路与方法初探[J]. 人民长江, 2008(23): 3.
- [3] 王旭, 王永刚, 孙长虹, 等. 城市黑臭水体形成机理与评价方法研究进展[J]. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1331-1340.
- [4] 武汉市生态环境局. 2019年武汉市生态环境状况公报[EB/OL]. (2020-06-08) [2021-11-15]. http://hbj.wuhan.gov.cn/fbjd_19/xxgkml/zwgk/hjzc/hjzkgb/202006/t20200608_1369067.html.
- [5] 吴保生, 陈红刚, 马吉明. 美国基西米河生态修复工程的经验[J]. 水利学报, 2005(4): 473-477.
- [6] 管非凡, 张春雷, 包建平, 等. 法国塞纳河流淤积治理模式及其对中国的借鉴[C]//中国水利学会. 中国水利学会2014学术年会论文集(下册), 2014: 949-955.
- [7] 王文君, 黄道明. 国内外河流生态修复研究进展[J]. 水生态学杂志, 2012, 33(4): 142-146.
- [8] 路金霞, 柏杨巍, 傲德姆, 等. 上海市黑臭水体整治思路、措施及典型案例[J]. 环境工程学报, 2019, 13(3): 541-549.
- [9] 吕纯剑, 高红杰, 李晓洁, 等. 沈阳市黑臭水体溶解性有机物组分及其光学特征[J]. 环境工程学报, 2019, 13(3): 559-568.
- [10] 武汉市生态环境局. 东西湖区环境监测简报(水质)[EB/OL]. (2021-11-01)[2021-11-15]. http://hbj.wuhan.gov.cn/fbjd_19/xxgkml/zwgk/hjzc/dbsjjzsyysydjcbg/202111/t20211103_1826270.html.
- [11] 龚春生. 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, 2007.
- [12] 丰茂武, 吴云海. 国内外湖泊富营养化的防治对策与展望[J]. 广州环境科学, 2006, 21(4): 4.
- [13] POULADI P, BADIEZADEH S, POULADI M, et al. Interconnected governance and social barriers impeding the restoration process of Lake Urmia[J]. Journal of Hydrology, 2021, 598(4): 126489.
- [14] 夏祖伟, 杨平, 朱勃, 等. 城市内河生态环境治理规划及措施研究[J]. 人民黄河, 2020, 42(10): 6.
- [15] STONE M, DROPPA I G. Distribution of lead, copper and zinc in size-fractionated river bed sediment in two agricultural catchments of southern Ontario, Canada[J]. Environmental Pollution, 1996, 93(3): 353-362.
- [16] 栾约生, 张为, 石纲, 等. 湖北鄂州城市湖泊底泥重金属空间分布特征(责任编辑: 郑晓梅)与污染评价[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(1): 30-36.
- [17] 李国宏, 叶碧碧, 吴敬东, 等. 底泥原位洗脱过程中氮磷含量与形态变化特征[J]. 环境科学研究, 2020, 33(2): 10.
- [18] U. S. Environmental Protection Agency Sediment Oversight Technical Committee. Sediment classification methods compendium[R]. Environmental Protection Agency, 1992: 65-77.
- [19] 陈明, 刘晓端, 魏连伟, 等. 永定河上游水体与底泥中污染物的分布规律[J]. 岩矿测试, 2001, 20(2): 6.
- [20] 吴红飞, 魏小飞, 关保华, 等. 沉水植物对鱼类扰动引起的沉积物再悬浮的影响[J]. 江苏农业科学, 2015(4): 369-370.
- [21] 龙振宇, 孙世军, 欧洋, 等. 吉林省西部10个浅水湖泊水环境质量和大型底栖动物群落特征[J]. 湿地科学, 2018, 16(5): 642-650.
- [22] 孔繁翔, 高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 589-595.
- [23] 蔡鲁祥, 吴文磊, 高一, 等. 生态浮岛复合技术净化黑臭河道废水的实验研究[J]. 环境污染与防治, 2016, 38(12): 17-21.
- [24] 刘燕, 尹澄清, 车伍. 植草沟在城市面源污染控制系统的应用[J]. 环境工程学报, 2008, 2(3): 334-339.
- [25] 叶阔, 杨国胜, 张万顺, 等. 城市面源污染特性及污染负荷预测模型研究[C]//中国环境科学学会. 环境模拟与污染控制学术研讨会. 北京, 2005: 165-166.
- [26] 程志永. 巢湖湖滨缓冲带生态景观构建与功能修复模式研究[J]. 西安建筑科技大学学报(社会科学版), 2015, 34(2): 58-62.
- [27] 吴小燕. 自然式种植在城市滨水绿带景观设计中的应用[J]. 中国市政工程, 2021(4): 33-35.
- [28] 瞿畏, 龚丽玲, 邓征宇, 等. 2017年南汉坑水渠清淤前后水中沉积物与其上覆水界面氮扩散通量估算[J]. 湿地科学, 2020, 18(4): 468-474.
- [29] 古小治, 王强, 张雷, 等. 物理改良对湖泊沉积物和间隙水特征的影响[J]. 中国环境科学, 2010, 30(2): 256-262.
- [30] 罗希, 马俊超. 关于浅水湖泊沉水植物覆盖度设计依据的探讨[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(3): 6.
- [31] 吴振斌, 邱东茹, 贺锋, 等. 沉水植物重建对富营养水体氮磷营养水平的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(8): 1351-1353.
- [32] 林培. 《城市黑臭水体整治工作指南》解读[J]. 建设科技, 2015(18): 14-15.

Ecological restoration measures and effects of black and odorous water bodies in landscape lakes——Taking Jinhu ecological restoration project in Wuhan city as an example

WANG Zijian*, HU Jing, ZHANG Chen, KAN Hongming, LIU Yang, HUANG Bingbing

Northeast China Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Changchun 136000, China

*Corresponding author, E-mail: 1205375513@qq.com

Abstract In order to restore the polluted Jinhu Lake with black and odorous waterbody, and build the Jinyin Lake National Wetland Park, on the basis of analyzing the water quality, sediment conditions and causes of black and odorous water, the methods of simultaneous control of point source pollution, non-point source pollution, endogenous pollution, and restoration while treatment were used to build a lakeside buffer zone and restore the lake bottom without large-scale dredging and water disturbance. The results showed that the water quality of Jinhu Lake was significantly improved, and all water quality indicators were lower than the mild black and odor standard limit in the “Guidelines for Urban Black and Smelly Water Remediation Work”, and the water quality reached Class III level of surface water quality standard; In the report of the improvement of lake water quality inspected by the central environmental protection inspection team, the water quality of Jinhu Lake was rated as “improved”. The goal of black and odorous water treatment and ecological restoration was achieved. This treatment and restoration case can provide a reference for the ecological restoration of urban inland landscape lakes.

Keywords Jinhu Lake of Wuhan; black and odorous water; factor analysis; ecological restoration project; restoration measures and effects