

城市微污染内湖整治技术研究

——以深圳市燕栖湖水系为例

肖才林¹, 许毅²

(1. 中国市政工程西南设计研究总院有限公司, 四川 成都 610000; 2. 深圳市清和设计咨询有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 深圳市燕栖湖水系是典型的城市内湖, 在微污染状态下, 燕栖湖水系主要存在有机污染物超标、水体感官效果差、水动力不足和水生态不完善的问题。为了提升周边居民的幸福感和获得感, 通过控源截污、底泥清淤、水面拦渣、强化循环、生态重建的系统工程措施, 对其进行了水环境综合整治。整治后, 湖泊水环境质量由微污染状态稳定提升至《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中Ⅳ类水标准, BOD₅和氨氮质量浓度分别稳定在6 mg/L和0.32 mg/L以内。

关键词: 湖泊; 综合整治; 微污染水体; 内湖; 城市水系

中图分类号: X524

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)01-0158-04

Study on Improvement Technology of Urban Micro-polluted Internal Lake in Shenzhen

XIAO Cailin¹, XU Yi²

(1. Southwest Design and Research Institute of China Municipal Engineering Co., LTD., Chengdu 610000, China; 2. Shenzhen Qinghe Design Consulting Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: The water system of Yanqi Lake in Shenzhen is a typical urban internal lake. In slightly polluted state, there are the problems of excessive organic pollutants, poor sensory effect of water body, insufficient hydrodynamic force and imperfect water ecology in the water system of Yanqi Lake. In order to promote the well-being of the surrounding residents, the systematical engineering measures of controlling source, intercepting sewage, dredging sediment, containing water surface dregs, strengthening circulation and rebuilding ecology are taken to comprehensively improve the water environment of the lake. After improved, the quality of lake water environment has been steadily improved from the micro-pollution state to the Class IV water standard in the *Surface Water Environmental Quality Standard* (GB 3838—2002). And the mass concentration of BOD₅ and ammonia nitrogen is stable within 6 mg/L and 0.32 mg/L, respectively.

Keywords: lake; comprehensive improvement; slightly polluted water body; internal lake; urban water system

0 引言

湖泊是全球水资源的重要组成部分, 城市内湖是城市水体不可分割的核心单元之一, 其水环境质量与居民幸福感密不可分。“十二五”以来, 我国各个城市在《水污染防治行动计划》指导下开展了大量的城市水体整治工作, 并且取得了显著成效, 城市水环境质量得到大幅提升。本文以深圳市燕栖湖水系为研究对象, 踏勘现场并且进行水质检测, 通过分析微污染^[1]城市内湖存在的主要问题, 提出了水环境整治

方案并且验证了方案的有效性, 可为后续相关工程提供借鉴及参考。

1 工程概况

燕栖湖水系位于深圳市南山区, 水域面积达到97 858 m², 集水面积达到4.48 km², 总蓄水库容28.8 × 10⁴ m³。水系由燕栖湖和天鹅湖2个湖泊组成, 分别位于波托菲诺纯水岸和天鹅湖花园小区内, 属于小区的景观湖, 是典型的城市内湖。燕栖湖水系兼具蓄洪功能, 来水依赖于降雨, 排水通过燕栖湖西侧白石洲排洪渠与下游大沙河联通, 最终排入深圳湾海域。天鹅湖水位高17.00 m, 燕栖湖水位高16.35 m, 二者通过箱涵联通; 天鹅湖湖水溢流进入联通箱涵

收稿日期: 2024-03-13

作者简介: 肖才林(1990—), 男, 硕士, 工程师, 从事水环境整治、市政给排水设计工作。

后流入燕栖湖,同时燕栖湖东侧设置有抽排能力达 1 900 m³/h 的回流泵,可将湖水抽送至天鹅湖西侧,从而形成燕栖湖水系的内循环。燕栖湖水系总平面图见图 1。



图 1 燕栖湖水系总平面图

燕栖湖水系作为景观湖,对于水质要求较高,水系水质执行《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中 V 类水标准。但是由于湖泊属于城市内湖,水体受城市居民活动影响大,湖泊长期处于微污染状态,整体感官较差,水体透明度差、油污污染等现象较明显。因此要对微污染状态的燕栖湖水系进行治理,以实现水体的长治久清。

2 问题剖析

2.1 有机污染物超标

2021 年 6 月取样分析了湖泊现状水质情况,具体水质分析取样点见图 2。整体而言,湖泊水质处于微污染状态,可生化降解的有机污染物(BOD₅)超出标准数值(见表 1)。

湖泊的有机污染物主要由外源性和内源性污染物组成。通过现场摸排调研,燕栖湖水系现状有 3 个进水口,旱季均存在连续水流,检测流水水质时发现,其中的氨氮质量浓度达 9.2~16.9 mg/L。判断是进水混入了生活污水,这是湖泊有机污染物超标的



图 2 水质分析取样点

外源性污染源之一,亦是水体粪大肠杆菌超标的原因。另外,湖泊周边种植大量植被,落叶在水中腐烂同样是湖泊有机物超标的外源性污染源。水体内源性污染物主要来源于湖泊底泥,燕栖湖和天鹅湖均有厚约 10 cm 的泥质型底泥,有明显异味,底泥释放其吸附蓄积的污染物也是水体有机污染物超标的原因之一。

2.2 水体感官效果差

虽然燕栖湖水系无明显异味,但是水体肉眼可见地呈现浑浊状态,透明度低,水体有明显的悬浮物和油污等污染(见图 3)。



(a) 悬浮物 (b) 油污

图 3 湖泊有明显污染物

除了周边植被的落叶增加水体悬浮物外,水体感官差的主要诱因是城市面源污染。湖泊集水范围内一些在建工程未做好水土保持工作也是造成湖泊水体悬浮物增加的原因之一,而湖泊油污的主要来源是周边沥青路面的冲洗、洗车场和车辆维修厂的

表 1 现状湖泊水质分析

项目	燕栖湖 2#	燕栖湖 5#	燕栖湖 1#	天鹅湖 4#	天鹅湖 3#	地表 V 类水标准
pH 值	8.87	8.52	8.56	8.46	8.43	6~9
氨氮/(mg·L ⁻¹)	0.236	0.42	0.253	0.688	0.69	≤2.0
总磷/(mg·L ⁻¹)	0.07	0.06	0.09	0.08	0.08	≤0.2
总氮/(mg·L ⁻¹)	0.48	0.5	0.47	0.73	0.72	≤2.0
粪大肠菌群/(MPN·L ⁻¹)	1.1×10 ³	1.6×10 ⁴	5.4×10 ³	9.2×10 ³	3.5×10 ⁴	≤4×10 ⁴
5 d 生化需氧量/(mg·L ⁻¹)	12	12	11.2	11	14.1	≤10
溶解氧/(mg·L ⁻¹)	9.8	7.5	9	7.1	7.8	≥2
化学需氧量/(mg·L ⁻¹)	25	20	19	17	34	≤40

面源污染。

2.3 水动力不足

如图3所示,进入湖泊的油污积聚在进水口附近,较难通过湖泊排水口排出;另外注意到,不同区域的湖泊水体呈现不同色泽,说明水体混合不均匀,污染物的扩散迁移受到限制。湖泊不同采样点的污染物浓度具有较大差异(见表1),进一步说明湖泊污染物的扩散迁移受到限制。

水体流动小是污染物扩散迁移受限的主要原因,本质是水体的水动力不足。燕栖湖水体抽排湖水至天鹅湖,只有单一布水点,而天鹅湖呈狭长状,较小扬程的吸水泵难以推进天鹅湖中湖水流动;天鹅湖排水进入燕栖湖,同样仅有一个连通口,且2个湖泊高差仅0.65 m,势能转化成的动能无法将湖水从燕栖湖东侧以适中的速度推行至西侧排水口。湖水流动性差、水动力不足是致使水体水质难以改善的主要原因之一。

2.4 生态系统不完善

生物调查显示,燕栖湖水系除了周边零星的观赏性睡莲外,基本无其他植物,而湖泊捕食动物以食草性野杂鱼类为主。

燕栖湖水系现有的生态系统生物链简单而功能不完善。食草性鱼类牧食水草不利于植物生长,水生植物的缺失又进一步使水生态系统难以维系水质自净化过程,这是水体难以长治久清的主要原因。另外,野杂鱼类过多对水体扰动较大,是水体浊度较高、透明度差的原因之一^[2]。

3 工程目标

根据《白石洲排洪渠治理工程建设项目环境影响报告表》,燕栖湖水系环境功能目标为:水质主要指标(生化需氧量、5 d生化需氧量、氨氮、总磷、总氮)稳定达到国家《地表水环境质量标准》中Ⅴ类水标准,并且水体透明度不小于1.5 m(暴雨期除外)。

4 整治方案

4.1 控源截污工程

以湖泊3个进水口为基点,排查与进水口联通的排水管网共计31.6 km,溯源进入湖泊的污水,发现污水主要来源于上游的深云村等城中村。城中村由于巷道狭窄,雨污分流整治难以推进,同时考虑洗车场等面源污染整治难度大,因此在排水末端靠近湖泊进水口位置设置智能截流井,以杜绝污水和旱季

面源污染进入湖泊。

又因为湖泊地势低,截流污水难以依靠自重排入市政污水管网,建设的截流井配套设计MBR膜生物一体化反应器来处理截流污水。鉴于湖泊进水含有油污、颗粒物等MBR工艺较难处理的污染物,采用“格栅+沉砂池+隔油池+调节池+水解酸化池+MBR池”的工艺流程来高效处理截流污水。MBR膜生物一体化反应器采用中空纤维膜组件,水力停留时间10 h,膜通量 $20 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,对污水处理效果好,出水稳定优于《地表水环境质量标准》中Ⅳ类水标准。

4.2 底泥清淤工程

燕栖湖水系淤积深度约为10 cm,均为泥质型底泥。为了防止淤泥持续性释放污染物,同时为了增加湖泊洪涝时的调蓄容积,采用绞吸船清理湖泊底部淤泥,清淤面积总计 $97\,858 \text{ m}^2$,淤泥总量约 $9\,300 \text{ m}^3$ 。底泥沥水后运送至前海湾底泥处理厂进行无害化处理,泥饼满足深圳市《河湖污泥处理厂产出物处置技术规范》(SZDB/Z 236—2017)中余土污染物控制指标Ⅲ级标准和限值后,运往邻市余泥渣土受纳场填埋^[3],防止引起二次污染。

4.3 水面拦渣工程

打捞湖泊漂浮物,清理水体中少量杂草,同时捕捞转移湖泊野杂鱼类,防止现有杂草、杂鱼成为生态链中的优势种群。杂草等清理干净后,在距湖岸线约10 m处,沿湖岸线设置生态隔离网,拦截上游进水口带来的漂浮垃圾、野杂鱼等,同时拦截小区居民活动带入水体中的垃圾,隔离周边植被落叶,防止漂浮物等进入湖泊中心而难以打捞。生态隔离网结构示意图见图4。其中的聚乙烯网网孔尺寸为 $250 \mu\text{m}$,固定在嵌入湖底的 $\phi 50$ 钢管上,底部则用石笼压实,上端连接浮子式围油栏,用以隔绝水面油污,防止其扩散进入湖泊中心。

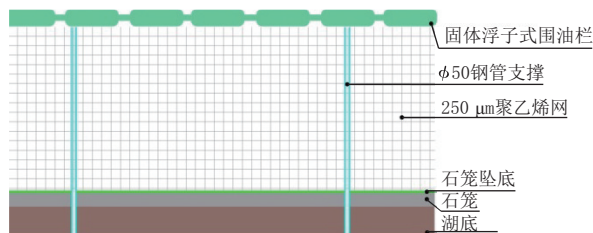


图4 生态隔离网结构示意图

4.4 水循环强化工程

燕栖湖和天鹅湖均属于狭长湖泊,宽度为30~150 m,长度分别为650 m和270 m。湖泊存在较多的

水体不流动区域,容易引起水体恶化。良好的水动力可以增强水中污染物的扩散和净化,是水体保持持久自净能力的主要原因。

为了保障湖泊具有良好的水动力条件,分别于燕栖湖和天鹅湖安装 2 台和 1 台太阳能曝气机,电机功率 80 W,太阳能光电板总功率 540 W,水体扩散半径 150 m。如图 5 所示,湖泊底部水体在曝气机作用下被抽吸至水体上层,曝气机在释放抽吸的底层水体时带动上层周边水体循环,形成良好的感应流和回转流,从而可使上层水体在一定尺度内实现平面空间的循环;湖泊底层水体被曝气机抽吸至上层时,上层水体在自重作用下沉降至湖泊底部,从而促进湖泊水体垂直空间的循环;在曝气机周而复始的作用下,湖泊水体的分层现象被打破,水体在较大空间实现了大尺度循环流动,而污染物随着水流扩散迁移,在良好的水生态系统作用下得到了有效处理。

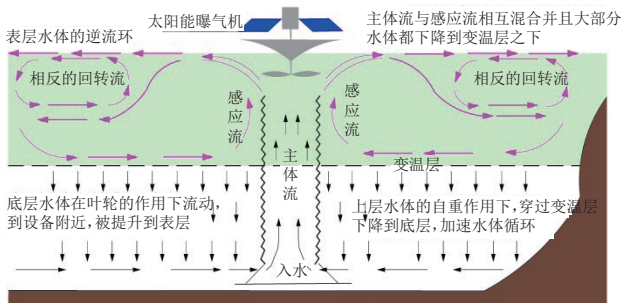


图 5 水循环原理图

4.5 水生态重建工程

采用四季常绿矮型苦草作为优势种建设水下森林,另外以小茨藻、篦齿眼子菜和黑藻作为伴生种丰富植被的多样性,四者占比分别为 80%、20%、5%和 5%;沉水植被种植密度为 75~80 株/m²。投放梨形环棱螺、铜锈环棱螺和乌鳢构建完整的生物链,三者投放密度分别为 3、5、10 g/m²。

四季常绿矮型苦草等沉水植被在水环境治理中被大量应用,工程案例证明构建良好的沉水植被系统是保障水体长治久清的关键^[4-5]。沉水植被在水环境综合整治中发挥着重要作用,主要是因为光合作用把大量的溶解氧带入水体,使水体中的氧化还原电位升高,促进环棱螺等底栖生物的滋生,而一定数量的环棱螺会反过来抑制沉水植物的过量生长,平衡沉水植被的生产力,同时环棱螺不仅可有效絮凝悬浮物^[2],还可抑制藻类生长^[6],提高水体透明度。最后有序地放入乌鳢,不仅可抑制环棱螺的过量生长,防止环棱螺影响沉水植物的健康^[2],同时可以捕食通过生态隔离网进入湖泊中心的野杂鱼,优化水体水生生物的多样性,形成良性循环的水生生态自净系统,全面恢复水生生态系统。

5 工程成效

工程完工后经过 6 个月运营,对燕栖湖水系水质进行检测,采样点如图 2 所示;水质分析结果如表 2 所示。

表 2 整治后水质检测结果

检测项目	燕栖湖 2#	燕栖湖 5#	燕栖湖 1#	天鹅湖 4#	天鹅湖 3#	地表Ⅳ类水标准
氨氮/(mg·L ⁻¹)	0.13	0.22	0.15	0.32	0.28	≤1.5
总磷/(mg·L ⁻¹)	0.02	0.01	0.01	0.03	0.02	≤0.1
总氮/(mg·L ⁻¹)	0.37	0.31	0.37	0.49	0.44	≤2
粪大肠菌群/(MPN·L ⁻¹)	0.9×10 ³	0.8×10 ³	0.9×10 ³	2.4×10 ³	1.9×10 ³	≤2×10 ⁴
5 d 生化需氧量/(mg·L ⁻¹)	6	4	6	5	6	≤6
溶解氧/(mg·L ⁻¹)	9.8	10.2	9.1	8.7	8.3	≥3
化学需氧量/(mg·L ⁻¹)	14	12	12	11	15	≤30
透明度/cm	171	182	166	159	164	

由表 2 可见,整治后燕栖湖水系各取样点位水质指标均满足《地表水环境质量标准》的Ⅳ类水标准,透明度大于 150 cm,达到工程目标,整体水质相比较整治前有明显提升。

6 结 语

(1)燕栖湖水系由燕栖湖和天鹅湖组成,属于典

型的城市内湖。通过水质取样分析,BOD₅大于 10 mg/L,属于微污染水体;除了有机污染物超标,水系同样存在水体感官效果差、水动力不足和水生态不完善的问题。

(2)对于微污染状态的燕栖湖水系,采用控源截污、底泥清淤、水面拦渣、强化循环以及生态重建等技术,湖泊水质明显好转。工程实施完工 6 个月后,

(下转第 166 页)