

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.24.017

# 以深圳麒麟山天鹅湖为例的南方城市湖塘整治

邵宇航<sup>1</sup>, 唐颖栋<sup>1</sup>, 吕丰锦<sup>1</sup>, 王俊然<sup>1</sup>, 雷晓霞<sup>2</sup>, 陶明<sup>2</sup>, 张墨林<sup>1</sup>

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310014; 2. 中电建生态环境集团有限公司, 广东 深圳 518000)

**摘要:** 以深圳市麒麟山天鹅湖水系整治为例,介绍了整治相关工程及强化管控措施。工程措施主要包括双水源保障、水动力条件改善、生态湿地构建、水生植物改造以及水生态系统修复等。管理措施主要包括季节性差异运行以及水生态系统常态化运行方法。整治后天鹅湖水质和感官改善明显,其中叶绿素 a 的含量下降 90% 以上,透明度由最小 20 cm 左右提升至 100 cm 以上,可为后续类似工程提供借鉴。

**关键词:** 湖塘整治; 水环境整治; 生态修复; 富营养化

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)24-0093-07

## Taking Swan Lake of Qilin Mountain in Shenzhen as an Example for Improvement of Lakes and Ponds in Southern Cities

SHAO Yu-hang<sup>1</sup>, TANG Ying-dong<sup>1</sup>, LÜ Feng-jin<sup>1</sup>, WANG Jun-ran<sup>1</sup>, LEI Xiao-xia<sup>2</sup>,  
TAO Ming<sup>2</sup>, ZHANG Mo-lin<sup>1</sup>

(1. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 310014, China; 2. PowerChina Eco-Environmental Group Co. Ltd., Shenzhen 518000, China)

**Abstract:** Taking the improvement of the Swan Lake water system in Qilin Mountain, Shenzhen as an example, the engineering measures as well as the management and control measures are introduced. The engineering measures mainly include double water sources supplementation, hydrodynamic condition improvements, ecological wetlands construction, aquatic plants transformation, and aquatic ecosystem restoration. The management measures mainly include seasonal differential operation and normal operation of water ecosystem. After remediation, the water quality and sensory condition of Swan Lake have been significantly improved. The content of chlorophyll a has dropped by over 90%, and the transparency has increased from a minimum of about 20 cm to over 100 cm, which could provide a reference for subsequent related similar projects.

**Key words:** lake and pond improvement; water environment improvement; ecological restoration; eutrophication

我国近年来开展了大量的黑臭水体整治工作, 河流、湖库如何进一步增强水质保障能力,恢复生态系统功能也是目前城市水环境整治中遇到的主要问题。经整治后的

基金项目: 国家重点研发计划重点专项资助项目(SQ2018YFE020049)  
通信作者: 唐颖栋 E-mail: tang\_yd@hdec.com

题之一。以深圳市麒麟山天鹅湖水系整治为例,介绍典型南方城市湖塘水系治理的一种改造思路,可为后续相关工程提供借鉴。

1 项目概况

麒麟山天鹅湖位于深圳市南山区麒麟山麓,自然环境优越。天鹅湖水系总水面面积约 13 hm<sup>2</sup>,汇水面积约 36.6 hm<sup>2</sup>,总蓄水库容约 25.4 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。水系由天鹅湖和 7 座小湖组成。其中 1#~3#湖自西向东水位逐级降低,各湖通过溢流堰跌水至下游湖泊;主湖天鹅湖下游由溢流堰控制水位,湖水超出水位时溢流至下游河道;4#~6#湖自北向南水位逐级降低,超出库容的湖水通过下游溢流口溢流至天鹅湖东部;7#湖相对独立,湖水超出容量时通过溢流箱涵溢流至下一级河道。麒麟山天鹅湖水系平面图见图 1。各湖属性信息见表 1。



图 1 麒麟山天鹅湖水系总平面图

Fig. 1 General plane of Swan Lake water system in Qilin Mountain

表 1 麒麟山天鹅湖水系信息

Tab. 1 Information of Swan Lake water system in Qilin Mountain

项目	汇水面积/ hm <sup>2</sup>	水体面积/ hm <sup>2</sup>	设计水位/m	水深/ m	库容/ 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>
1#湖	1.9	0.2	36.6	0.7~0.8	0.2
2#湖	2.2	0.6	36.2	1.5~1.8	1.0
3#湖	2.1	0.5	35.4	1.5~1.8	0.9
天鹅湖	16.9	8.7	33.1	1.0~3.0	17.4
护城河	2.1	0.6	33.9	1.0~3.0	1.2
4#湖	1.3	0.3	39.8	0.4	0.3
5#湖	0.9	0.2	38.8	1.0	0.2
6#湖	1.7	1.1	38.4	2.0	2.1
7#湖	7.5	0.7	34.2	3.0	2.1
小计	36.6	12.9		0.4~3.0	25.4

麒麟山天鹅湖水系在本工程实施前已经过相关工程的改造,基本无污水直排和溢流污染等问题,但整体感官较差,水质波动较大,由于周边地处疗养和重要会议接待中心,对景观环境要求较高,因此从多视角下问题诊断到针对性综合改造提升,对天鹅湖水系改造方案进行介绍。

2 多视角下的问题剖析

2.1 封闭效应

麒麟山天鹅湖水系为雨源型湖塘,除自然降雨外无生态基流补充,水系周边有长岭陂水库和西丽水库两大水库(见图 2),长岭陂水库与西丽水库通过长西引水渠相连;东江引水渠作为东江引水的运输通道,为西丽水库提供清洁源水。麒麟山天鹅湖水系地理位置优越,周边的水系类型较为多样,但其孤立于周边水系之外,水源补充形式单一,水生态环境薄弱,区域水资源存在一定程度分配不均的情况。

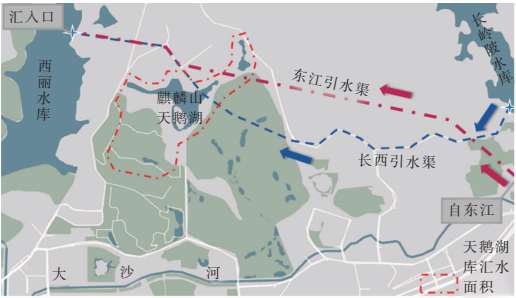


图 2 麒麟山天鹅湖周边水系分布

Fig. 2 Distribution of water system around Swan Lake in Qilin Mountain

2.2 季节性差异明显

除水源补充形式单一外,该水系还存在季节性差异明显的问题。深圳属于热带海洋性季风气候,根据相关资料统计显示,其多年平均年降雨量约 1 900 mm,其中 3 月—9 月的降雨量常年占比为 80% 以上。

对各湖泊水量变化情况进行测算,损失水量主要考虑蒸发量、下渗量、内循环损耗量、绿化浇灌消耗量等;补充水量考虑雨水径流汇入量。各月需水量计算结果见表 2。

表 2 10 月—次年 3 月各湖泊维持水位需水量

Tab. 2 Water demand for maintaining water level of each lake from October to next March m<sup>3</sup>

项 目	1#湖	2#湖	3#湖	4#~6#湖	天鹅湖	7#湖
月需额外补水量	2 672	6 903	6 013	17 481	96 871	7 794
日需额外补水量	89	230	200	583	3 229	260

由于 4 月—9 月降雨较为充沛,雨水补充可满足湖泊水位维持在设计值,但 10 月—次年 3 月需要外部水源作补充。为了维持设计水位,总的需水规模平均为 4 500 m<sup>3</sup>/d。

2.3 水体富营养化

对麒麟山天鹅湖分两次进行了水质检测。第一次采样时间为 4 月上旬,采样当天及前两天均为晴

天,8 个采样点的数据见表 3。第一次水质检测检测结果显示,麒麟山天鹅湖所检测各项指标基本优于地表水Ⅲ类标准,但整体透明度水平偏低。根据相关文献<sup>[1]</sup>,浊度、SS、叶绿素 a 等是影响水体透明度的直接因素,其中叶绿素 a 是主要影响因素,检测结果显示湖体 SS 指标较好,因此可基本排除 SS 对水体透明度的影响。

表 3 第一次水质检测数据

Tab. 3 Data of the first water quality test

样品编号	溶解氧/ (mg · L <sup>-1</sup> )	氨氮/ (mg · L <sup>-1</sup> )	总氮/ (mg · L <sup>-1</sup> )	COD/ (mg · L <sup>-1</sup> )	总磷/ (mg · L <sup>-1</sup> )	SS/ (mg · L <sup>-1</sup> )	透明度/ cm
1	6.92	0.35	0.77	10.50	0.01	11	41.2
2	7.17	0.30	0.61	10.53	0.01	17	38.7
3	7.48	0.26	0.93	10.51	0.03	16	35.5
4	7.91	0.40	0.76	13.54	0.01	17	29.3
5	7.08	0.29	0.92	10.50	0.01	20	27.8
6	6.46	0.29	0.98	11.52	0.01	23	23.2
7	6.72	0.24	0.80	9.03	0.01	24	23.1
8	6.95	0.35	0.87	9.02	0.01	20	24.4

第二次采样时间为 6 月上旬,增加了叶绿素 a 的指标检测。第二次采样当天有阵雨,且前两天均有降雨,4 个采样点的数据见表 4。根据检测结果,氨氮、总氮、总磷及 COD 均呈不同程度的上升,分析原因主要是深圳逐渐进入夏季,降雨逐渐增多、气温

升高,大量降雨冲刷地表,使得雨水携带一定污染物入湖,部分水质指标劣于地表Ⅳ类,湖水中叶绿素 a 浓度极高,分析原因主要是湖水长期滞留,气温回升,使得藻类等浮游植物大量繁殖,影响了湖泊水体的透明度。

表 4 第二次水质检测数据

Tab. 4 Data of the second water quality test

样品编号	溶解氧/ (mg · L <sup>-1</sup> )	氨氮/ (mg · L <sup>-1</sup> )	总氮/ (mg · L <sup>-1</sup> )	COD/ (mg · L <sup>-1</sup> )	总磷/ (mg · L <sup>-1</sup> )	透明度/ cm	叶绿素 a/ (mg · L <sup>-1</sup> )
1	4.20	0.21	1.17	30	0.06	25.8	7.74
2	5.70	0.18	1.11	20	0.04	29.8	4.45
3	5.95	0.25	0.94	31	0.06	31.6	5.61
4	4.70	0.08	2.01	13	0.06	41.2	3.29

分析两次水质检测结果,麒麟山天鹅湖水系水质存在波动,水质大部分时间介于地表水Ⅲ~Ⅳ类之间,初步判断水体透明度较低是湖水中藻类等浮游植物较多引起的。

2.4 水动力条件不足

水动力条件的改善,可加快局部污染物扩散以及水资源循环更新速度,在一定程度上提升湖泊的自净能力,提高湖泊水环境质量,还对水生植物、浮游植物、底栖动物等生物群的生长和繁殖造成一定影响<sup>[2]</sup>。改造前天鹅湖内已建好一座内循环泵站,最大内循环规模为 2.6 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d。内循环泵站自天鹅湖东侧取水,通过管道将水提升到 1#湖北侧,

为湖泊提供水循环动力。根据现场调研情况,目前内循环泵站主要在水质发生恶化时使用。

通过应用 MIKE 21 水动力模块模拟结合现场实测,对现状内循环系统进行了评估,具体见图 3。根据模拟演算结果,通过启动内循环泵站可以在一定程度上提高天鹅湖北侧区域水体流速,但天鹅湖整体仍然存在局部死水区域,例如 1#湖泊西南角、护城河段以及天鹅湖南侧区域,流速低于 0.01 m/s 的区域超过 70%,这些区域在非降雨时段几乎处于静止状态。

除此之外,天鹅湖水系还有诸如水生陆生植物品种单一、水生动物缺失、生态系统脆弱等问题。为



了增强天鹅湖水系的水质保障能力,提升水体自净能力,恢复水生态系统,从问题诊断的结果出发,提出了相关系统改造措施。

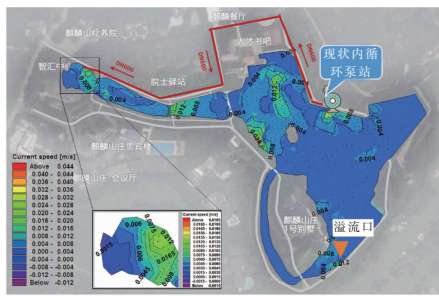


图3 天鹅湖水动力现状

Fig. 3 Hydrodynamic status of Swan Lake

### 3 整治方案

#### 3.1 区域联动

通常使用疏导、沟通、引排、调度等工程和非工程措施改善河、湖、塘之间的水力联系,从而解决局部水资源不足、水生态环境脆弱等问题<sup>[3]</sup>。天鹅湖水系周边有较好的生态基底,为了充分利用区域的水资源,为天鹅湖提供除降雨外的备用水源,按照大区域联动、小区域调节两步骤,对天鹅湖水系从补充形式到分配方式进行了优化。

##### ① 大区域联动

利用东江引水渠与西丽水库转输通道,长岭陂水库与西丽水库转输通道,在其交汇位置新建提升泵站,将水库水引入天鹅湖水系。水库长期检测结果显示,引水水质优于地表水Ⅲ类水标准。根据旱季需水量分析,为维持水位,最大需水量约为4 500 m<sup>3</sup>/d。除维持水位需水量外,在雨季水质恶化时仍要考虑一定的富余补水量对湖泊水体进行置换,结合相关工程经验,设计置换周期约10 d。综合考虑旱季需水量和水质恶化改善需水量,设计引水泵站最大补水规模为2 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d。总平面图见图4。



图4 外部区域联动方案

Fig. 4 External water system connection plan

##### ② 小区域调节

内部湖泊连通方案见图5。根据天鹅湖水系自身分布的特点,4#~7#湖距主湖位置较远,通过新建引水泵站结合压力转输管道,可将水库原水转输至4#~7#湖,其中4#~6#湖补充的水可溢流回天鹅湖,7#湖补充的水通过溢流通道补充至下游河道。结合旱季需水量与水质恶化换水周期,南北两处湖泊分别设计最大5 000 m<sup>3</sup>/d的补水点。



图5 内部湖泊连通方案

Fig. 5 Internal water system connection plan

#### 3.2 内外协同

城市湖塘中的外源污染,主要指受人类活动影响而污染的水进入湖塘,污染湖塘水质。因此在对湖塘水系提供保障前,要从根本上杜绝超出水环境容量的污染物入湖、入河,在相关水环境整治工程中通常采用沿河、沿湖建设截污管道,杜绝污水入湖入河<sup>[4]</sup>。内源污染主要指湖塘水系内受污染的泥质向水中挥发污染物质,工程中常采用原位或异位的方式对受污染的底泥进行处理,确保其恢复自然状态下的水下泥质。

麒麟山天鹅湖水系在整治前经过一系列改造,已基本形成雨水和污水两套排水系统,不存在污水直排和合流制溢流污染问题。根据对湖塘底泥取样检测结果,底泥未受到重金属等污染物的污染。因此对于外源以及内源整治方面,本次水系治理中未包含相关工程措施,但在其他湖塘水系治理过程中,系统梳理外源和内源污染情况,协同对外源、内源进行整治,仍然是湖塘类水体整治的重要前提。

### 3.3 多维保障

#### ① 外源污染入河保障

排水系统合理的布局 and 选择是水环境整治的先决条件之一<sup>[5]</sup>,尽管麒麟山天鹅湖水系未存在大量外源污染入河的情况,仍需从加强管理的角度增强对污染物入湖的控制,通过系统梳理现状雨水汇水路径及两岸排水口,对发现的污染事件及时溯源追踪,杜绝外源污染。另外,对于局部受雨水冲刷影响较大的区域,通过设置生态截流沟、雨水沉泥槽、雨水吐口湿地等措施,在一定程度上减少降雨时冲刷进入河道的悬浮物。

#### ② 水动力改善及双工况运行保障

为了进一步提高现状内循环系统的使用效率,对天鹅湖东侧和护城河段管道做了补充延伸,并在现状内循环管道经过2#、3#湖的位置新增2处补水口。

通过 MIKE 21 水动力模块对改造后的水动力条件进行模拟,同样运行条件下,1#~3#湖、护城河以及天鹅湖东部区域流态均得到一定程度的改善,局部流速由静止状态上升到0.03 m/s以上,从整个天鹅湖流速分布来看,流速低于0.01 m/s的区域降至52%以内。当启动新建设的引水泵站以后,北侧区域流态得到进一步改善,天鹅湖整体流速低于0.01 m/s的区域降至37%左右。

两种工况下的天鹅湖流态改善效果如图6所示。

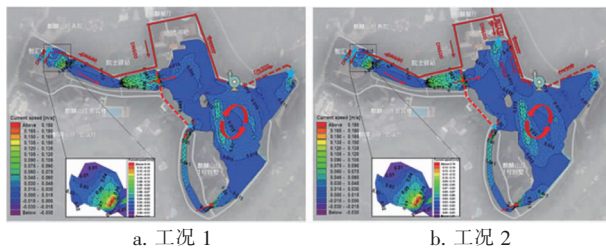


图6 两种工况下的天鹅湖流态改善效果

Fig. 6 Improvement effect of two flow patterns in Swan Lake

考虑减少内循环系统和本次新建的取水泵站日常维护及运行费用,对于天鹅湖水动力改善及生态补水,运行时应区分旱季和雨季两种工况。雨季发生降雨时,雨水对湖泊进行补充,结合需水量分析,不需要启动内循环和新建取水泵站湖泊也具有一定的流动性;雨季非降雨时,通过启用内循环泵站,给天鹅湖提供一定的水动力;旱季时,湖泊水位低于设

计景观水位时,启动新建的引水泵站来补充湖泊水位。

根据水质监测的结果,当水质低于地表Ⅲ类水时,也可启动现状内循环泵站,通过新建的湿地以及湖泊自身的水生态系统,对水质进行净化。

雨季和旱季两种工况运行见图7。

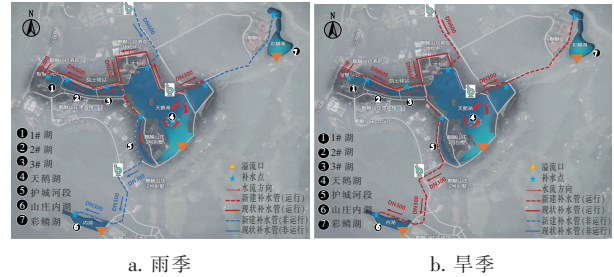


图7 雨季与旱季运行工况

Fig. 7 Operating conditions in the rainy and dry seasons

#### ③ 自净能力强化保障

自净能力强化保障分为人工强化以及水生态系统恢复两类。

##### a. 人工强化

对天鹅湖现状本底条件进行分析可知,目前湖泊整体的自净能力较弱,当降雨冲刷污染物入湖时,水质会发生恶化。本次对水生态系统较为脆弱的1#湖新建一座潜流净化湿地,在1#~3#之间溢流口新建生态渗滤堰滤床湿地,以提高湖泊削减污染物的能力。

潜流湿地选址位于1#湖西南角死水区域,选用配水石笼来均匀配水,水生植物选用净化效果好、根系发达、对周围环境适应力强的旱伞草、梭鱼草等,在保障净化能力的基础上能与周边环境协调一致。根据相关规范,结合深圳地区气温和现状湖泊水质,水力停留时间取0.5 d,设计流量为800 m<sup>3</sup>/d,水力负荷为2.1 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·d),潜流湿地占地380 m<sup>2</sup>。运行时通过在1#湖外侧设置抽排水泵,将溢流口出水位置的水抽排至潜流湿地进水口,提高1#湖泊水质净化能力。

生态渗滤堰滤床湿地布置于1#~2#湖、2#~3#湖、3#~天鹅湖三处湖泊溢流堰出口,在内循环系统启动时,内循环水可分别通过3处生态滤床溢流至下一级湖塘。

考虑现状用地条件以及内循环运行规模,生态渗滤堰滤床湿地(设计流量为540 m<sup>3</sup>/d)设计参数见表5。



表 5 生态渗滤堰滤床湿地设计参数  
Tab. 5 Design parameters of ecological percolation weir  
filter bed wetland

湿地 编号	面积/ m <sup>2</sup>	高度/ m	填料体 积/m <sup>3</sup>	流速/ (m · s <sup>-1</sup> )	停留时 间/h
1	83	1.5	124.5	0.002 5	0.72
2	120	2.0	240	0.010 0	0.28
3	155	2.3	357	0.001 7	0.67

潜流湿地及生态渗滤堰滤床湿地设置位置及现场情况见图 8。

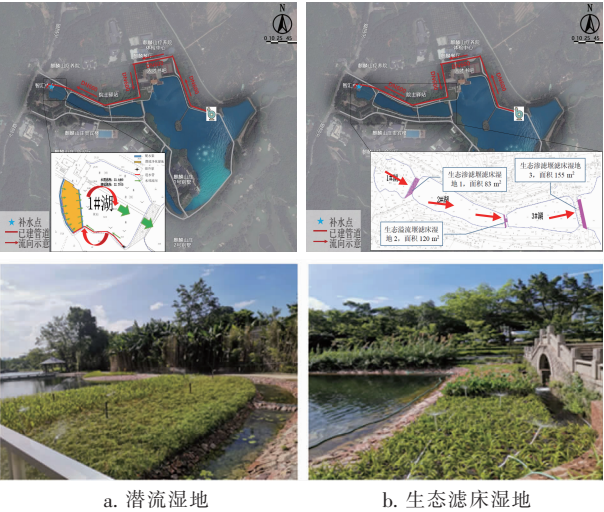


图 8 潜流湿地与生态滤床湿地

Fig. 8 Subsurface wetland and ecological filter bed wetland

b. 水生态系统恢复

沉水植物在湖泊水环境改造中具有很多优势,例如阻止湖体底泥再悬浮,对藻类生长有抑制作用,可从水体和底泥中吸取大量营养盐,降低内源污染;可吸附有机碎屑于植物根部;为有机物矿化分解的微生物群落提供生境等。

沉水植物的选择主要考虑净化效果、季节与空间搭配、优先选用本土品种、便于管理等。本次选择有较高生态负荷、耐受性较高的改良型矮生苦草作为优势种(占比>60%),篦齿眼子菜、尖叶眼子菜

及马来眼子菜等作为伴生种(占比约 30%),同时选择刺苦草、小茨藻和轮藻作为偶见种(占比 5%~10%)。在种植区域上,小茨藻、刺苦草、金鱼藻主要以斑状局部分布于 1#~3#湖的中心区域;篦齿眼子菜、尖叶眼子菜以及马来眼子菜呈点状结合局部现状分布于 1#~3#湖靠近岸边的区域;在岸边和湖泊水位 20 cm 以下水深的过渡区域补种了模块化草皮,以提升整体的协调性。本次种植沉水植物总面积约 11 800 m<sup>2</sup>,模块化草皮约 1 200 m<sup>2</sup>。

沉水植物群落得以恢复后,通过引入水生动物,重新构建生态链,发挥生态功能,实现水体的生态平衡和自我净化功能,抵御外部污染。本次投放一定量的肉食性鱼类(乌鱼),以生态调控水体中的杂食性鱼类和底栖动物。考虑到丝状藻暴发隐患,适当投放了鲢鱼、青虾、环棱螺等控制生态平衡,其中设计乌鱼投放密度约 10 g/m<sup>2</sup>,青虾、环棱螺、鲢鱼、锦鲤均为 5 g/m<sup>2</sup>。

3.4 强化管控

水生态系统构建恢复需要持续有效的运营维护。湿地植物管理需要定期观察植物生长状态,跟踪记录植物生长情况,在部分季节对枯死植物进行定期收割等;还应观察湿地堵塞情况,当发生堵塞时应及时翻床清洗;应注意观察沉水植物系统的水位、水生动物长势,尤其是对私自放生外来物种需要严格控制,出现杂草时应及时清除,对于局部植物长势过密需要进行调整,为沉水植物提供充足生长空间。

针对夏季可能发生水华等现象,应制定应急方案,当夏季出现丝状藻暴发前兆时应定期进行清理;对于出现水华藻类暴发,可适当投加驯化有益菌,接种驯化浮游动物,恢复生态链,快速提高水体透明度,降低叶绿素含量,抑制有害藻类生长。

4 整治后效果

该工程实施完工后经过 2 个月调试,对麒麟山天鹅湖水质进行了检测,结果见表 6。

表 6 整治后水质检测结果

Tab. 6 Water quality test results after renovation

样品 编号	溶解氧/ (mg · L <sup>-1</sup> )	氨氮/ (mg · L <sup>-1</sup> )	总氮/ (mg · L <sup>-1</sup> )	COD/ (mg · L <sup>-1</sup> )	总磷/ (mg · L <sup>-1</sup> )	透明度/ cm	叶绿素 a/ (mg · L <sup>-1</sup> )
1	6.92	0.35	0.77	10.5	0.02	155.0	0.02
2	7.17	0.25	0.61	10.5	0.01	130.0	0.05
3	7.48	0.30	0.93	10.5	0.02	125.5	0.02
4	7.91	0.40	0.76	13.5	0.01	105.0	0.06

4座湖泊各项指标均满足地表水环境质量的Ⅲ类水标准,叶绿素a大幅下降,透明度大幅提高,整体岸上感官效果显著改善。

## 5 相关经验及建议

回顾“十三五”期间水环境治理历程,水污染防治攻坚战在各地均取得显著成果,在黑臭水体消除后,如何进一步改善和保障城市河湖整治效果,在未来一段时间内将会是关注的重点之一。回顾本工程治理过程,提出以下几点经验和建议:

### ① 系统思维看待问题

从水污染治理到水生态环境修复,本质上都是从无序到有序过程的转变。水环境问题是系统性问题,需要用系统性思维看待,因此在对现状湖塘进行问题分析时,应尽可能从多方面、多角度去探讨,宏观微观相结合,静态动态相结合。

### ② 多重手段提供保障

城市湖塘相较于乡村郊野型湖塘有诸多的不确定性,且周边环境也更复杂,尤其在高密度建成区这一特点更加突出。因此在制定湖塘整治方案时,可在尊重自然保护生态的基础上,适当进行人工强化,为水质水生态提供保障。

### ③ 对后续运营阶段的优化

本项目完工后涉及新建泵站和内循环泵站的运营维护,其中旱季时主要依靠新建引水泵站对水位进行维持补充,内循环泵站可根据水质监测情况进一步优化调整运行时间,从而最大限度地降低运营成本,最大程度地发挥水生态系统的自净能力。

## 参考文献:

- [1] 赵轩,许申来,薛祥山,等. 高原再生水湖泊的水体透明度及其影响因素[J]. 南水北调与水利科技,2015,13(6):1084-1088.
- ZHAO Xuan, XU Shenlai, XUE Xiangshan, *et al.* Water transparency and its impact factors in plateau lake recharged by reclaimed water[J]. South-to-North Water

Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(6): 1084-1088 (in Chinese).

- [2] 朱金格,胡维平,刘鑫,等. 湖泊水动力对水生植物分布的影响[J]. 生态学报,2019,39(2):454-459.
- ZHU Jingge, HU Weiping, LIU Xin, *et al.* A review of the studies on the response of aquatic vegetation to hydrodynamic stress in lakes[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(2):454-459 (in Chinese).
- [3] 杨卫,张利平,李宗礼,等. 基于水环境改善的城市湖泊群河湖连通方案研究[J]. 地理学报,2018,73(1):115-128.
- YANG Wei, ZHANG Liping, LI Zongli, *et al.* Interconnected river system network scheme of urban lake group based on water environment improvement[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(1):115-128 (in Chinese).
- [4] 楼少华,唐颖栋,陶明,等. 深圳市茅洲河流域水环境综合治理方法与实践[J]. 中国给水排水,2020,36(10):1-6.
- LOU Shaohua, TANG Yingdong, TAO Ming, *et al.* Methods and practice of comprehensive improvement of Maozhou River water environment in Shenzhen[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(10):1-6 (in Chinese).
- [5] 楼少华,吕权伟,任珂君,等. 从深圳治水历程研究高密度建成区排水系统的选择与改造[J]. 中国给水排水,2018,34(18):18-21.
- LOU Shaohua, LÜ Quanwei, REN Kejun, *et al.* Study on the selection and reconstruction of urban drainage system in high density construction area from the course of water control in Shenzhen [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(18):18-21 (in Chinese).

**作者简介:**邵宇航(1990-),男,黑龙江齐齐哈尔人,硕士,工程师,主要从事水环境整治技术、市政给排水设计工作。

**E-mail:**328734800@qq.com

**收稿日期:**2020-12-28

**修回日期:**2021-01-29

(编辑:衣春敏)