

# 城市湖泊水体修复过程的富营养化评价——以武汉南湖为例

张航<sup>1</sup>, 沈来银<sup>1</sup>, 苗滕<sup>1</sup>, 张艺<sup>1</sup>, 周念来<sup>1</sup>, 周驰<sup>1</sup>, 郑丽萍<sup>2</sup>

(1.湖北省水利水电科学研究院 湖北省水利水电科技情报中心, 武汉 430070;

2.武汉华大吉诺因生物科技有限公司, 武汉 430072)

**摘要:**人类活动对城市湖泊生态系统影响强烈,从 2020 年 4 月至 11 月对武汉南湖开展了水质监测,通过数据比较,阐述了南湖生态修复期间水质的时空变化与发展趋势,并对南湖富营养化水平进行了综合评价。结果表明,南湖富营养化状况总体呈好转趋势,湖区水体恢复了一定的自净能力,部分水质指标得到改善,但总氮(TN)和总磷(TP)质量浓度超标严重,最大值分别为 9.85 mg/L 和 1.49 mg/L,叶绿素 *a* (Chl.*a*) 质量浓度居高不下,平均质量浓度为 51.85  $\mu\text{g/L}$ ,蓝藻水华状况仍然十分严重。在时间尺度上,南湖水体的综合营养状态指数(TLI)虽然呈下降趋势,但总体仍为中度富营养化状态;在空间尺度上,南湖各湖湾表现出明显的区域异质性,具体水质状况为大南湖优于华农湾,小南湖最差。小南湖外源污染比较严重,是南湖今后治理的重点,应加强对污染排口的处理,拓展水生植物种植区域,开展蓝藻水华应急处置。

**关键词:**武汉南湖;富营养化;时空变化;治理建议

**中图分类号:**X821

**文献标志码:**A

气候变化以及人类活动对水生态系统产生了巨大影响,由此导致的水体富营养化状况严峻<sup>[1]</sup>。通过水生态修复等一系列保护措施,可以改善水体富营养化状况,减缓水生态系统的退化速率,使已经退化或损坏的水生态系统逐渐恢复,并保持其长久稳定<sup>[2-3]</sup>。南湖是武汉市仅次于东湖和汤逊湖的第三大城中湖,北临东湖,南临野芷湖、汤逊湖。南湖属于汤逊湖水系,水面面积约为 7.67 km<sup>2</sup>,水体容量约为 2 052 万 m<sup>3</sup><sup>[4-5]</sup>,周边居民区、高校密集,总人口约 59.4 万。随着城市的不断发展,人们的经济活动对南湖水域产生了严重影响,导致水质不断恶化,水生态系统失去调节能力,水质常年综合评价为劣 V 类<sup>[6-9]</sup>。为解决南湖突出的水环境问题,对南湖进行了水质提升综合整治工程,按照“尊重自然、生态优先”的原则,实施水生态修复工程。主要包括排污口生态改造、沿岸水生植物种植以及健康水生态系统管理。通过这些工程的开展,南湖富营养化程度是否能得到改善,通过生态修复期间连续的水质监测,综合分析湖区氮、磷等指标的时空变化特征与富营养化状态,探讨南湖水生态修复效果,为城市湖泊水生态治理和水质提升提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

研究区域共设置 13 个采样位点(图 1)。其中小南湖位点为 NH01~NH03、华农湾位点为 NH04 和 NH05,大南湖位点为 NH06~NH13,分布于敞水区和湖心,其中 NH01 位点位于南湖水生态修复示范区。武汉南湖属于浅水型湖泊,平均深度为 2.0 m,各位点均采集表层 0.5 m 处水样,装入聚酯玻璃瓶,密封避光保存。监测时间从 2020 年 4 月至 11 月,每月监测 1 次。

收稿日期:2021-11-10;修回日期:2021-12-13.

基金项目:国家自然科学基金(21906048);湖北省水利重点科技项目(2021-218-006-001).

作者简介:张航(1989—),男,湖北黄冈人,湖北省水利水电科学研究院工程师,博士,研究方向为环境生物学,E-mail:hungryzhang@163.com.

通信作者:周驰,E-mail:zhouc0222@126.com.

## 1.2 监测与评价

监测的主要指标主要包括:水温(WT),溶解氧(DO),pH,采用便携式水质参数仪(YSI ProPlus,USA)分析,所有基本物理参数均现场测定.水体化学指标有:总氮(TN),总磷(TP),铵态氮( $\text{NH}_4\text{-N}$ ),具体测定方法参照文献[10],叶绿素 $a$ (Chl. $a$ )采用热乙醇提取,分光光度法测定<sup>[11]</sup>.采用综合营养状态指数(TLI)评价湖泊富营养化状况<sup>[12]</sup>.

## 2 结果与讨论

### 2.1 修复期水体指标

水体修复期间南湖水体的 pH 基本上在 8.2~9.0 之间(图 2(a)),属于弱碱性

水体,各采样位点 pH 无显著性差异,除了在 9 月份略微上升外,其余月份水体 pH 值变化范围不显著,平均值保持在 8.49.水温季节性变化差异较大(图 2(b)),从 4 月份开始,水温升高较明显,到 8 月份达峰值 29.7 °C,后续受降水影响,气温持续降低,从 9 月份之后,平均水温低于 20 °C,低于往年平均水温.水体溶解氧较高,维持在 6.5 mg/L 以上(图 2(c)),溶解氧平均质量浓度为 8.21 mg/L,饱和率达 90% 以上,各位点之间季节性差异不显著,表明水体属于富氧水体.

南湖水体总体透明度较低(图 2(d)),监测期间平均透明度为 0.27 m,最低值为 0.15 m,从 2020 年 4 月至 11 月,透明度基本没有变化.变化趋势为冬、春季水体透明度稍微高于夏、秋季,对比效果不明显.这可能与监测期间南湖岸线大范围打桩施工,对湖泊底泥影响较大,加上风力扰动,水体颗粒性悬浮物增多,临时透明度改善措施虽然能够短暂调整水体透明度,但后期还是会受到大湖水质的影响,常年劣 V 类水体会影响湖泊自净能力,南湖水体总体透明度改善效果不明显.

南湖水体 TN 指标波动比较显著(图 2(e)).TN 总体平均质量浓度在 1.64~3.95 mg/L 之间,在 2020 年 5 月和 8 月平均值较低,呈现春、冬两季高,夏、秋两季低的情况.而小南湖区域的 TN 均高于南湖平均值,最高含量出现在 11 月份,TN 质量浓度均超过了 5 mg/L,超标现象非常严重,但总体与南湖平均值变化趋势保持一致.TN 持续波动,表明南湖水体的水质正在发生剧烈的变化,考虑到水生态修复项目的施工对水体造成的影响,在南湖水生态修复工程未完工情况下,TN 波动这种情况可能还会持续.

TP 变化见图 2(f),TP 平均质量浓度为 0.30 mg/L,为地表水劣 V 类水质.4 至 5 月份,总磷质量浓度最低,为 0.19 mg/L,到 2020 年 8 月,TP 质量浓度逐渐上升,8 月 TP 平均值达到 0.81 mg/L,之后呈下降趋势,呈现中间高两边低的趋势.参考武汉周边地区天气数据,武汉地区在 8 月末有大量降雨,地表径流随雨水冲刷入湖,加上风浪对底泥的搅动,导致短时间内大量磷释放到水体中,TP 超标非常严重.南湖周边排口分布众多(图 1),有 13 个排口未完全实行雨污分流,部分未截留的污水仍然会进入主湖区,导致主湖区内 TP 质量浓度居高不下.8 月份,大湖区 TP 平均数值异常增高,NH11 位点 TP 质量浓度达到 1.49 mg/L.在其他月份,小南湖 TP 值均高于同期的华农湾和大南湖,小南湖的 TP 超标严重影响了全湖的治理效果.

南湖的  $\text{NH}_4\text{-N}$  变化情况见图 2(g),监测期间内, $\text{NH}_4\text{-N}$  平均质量浓度为 1.04 mg/L,达到地表水 IV 类水质标准.4 月份最低,为 0.56 mg/L,4 至 7 月份,南湖的  $\text{NH}_4\text{-N}$  呈缓慢增长趋势,8 月份之后缓慢上升速度较明显,到 10 月份  $\text{NH}_4\text{-N}$  质量浓度最高,达到 1.81 mg/L,11 月份略微下降.除了小南湖的变化趋势与总体保持一致外,大南湖和华农湾的  $\text{NH}_4\text{-N}$  变化趋势不显著,而且小南湖的 TN 远高于同期其他区域,达到 6.0 mg/L(10 月份)和 8.7 mg/L(11 月份),分别超标 5.0 倍和 7.7 倍,而南湖其他湖区  $\text{NH}_4\text{-N}$  数据基本没有超标.

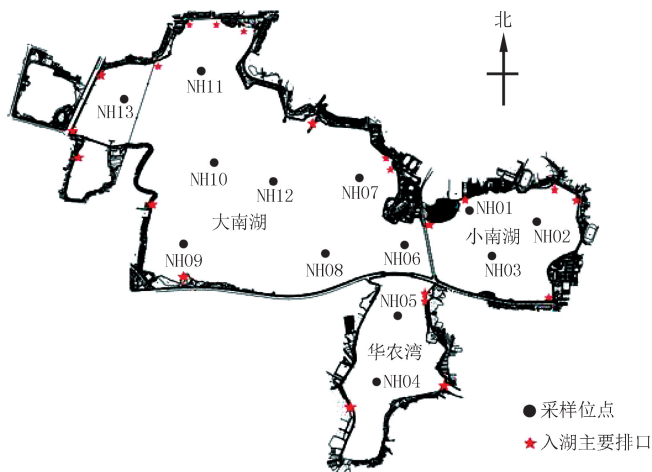


图1 采样位点示意图

Fig.1 Sampling sites

南湖水体的平均 Chl.a 质量浓度为  $51.85 \mu\text{g/L}$ (图 2(h)),从 2020 年 4 月至 6 月呈下降趋势,到 7 月份,Chl.a 平均质量浓度为  $87.43 \mu\text{g/L}$ ,而后逐渐降低,最低值在 11 月份,为  $24.12 \mu\text{g/L}$ .三大湖湾区中小南湖的 Chl.a 质量浓度均高于同期其他几个湖湾,最高值出现在 7 月份,为  $251.60 \mu\text{g/L}$ ,华农湾 7 月份平均质量浓度也达到了  $91.80 \mu\text{g/L}$ ,远高于同期大湖区 Chl.a,现场采样发现小南湖和华农湾内蓝藻聚集现象十分明显,是蓝藻水华爆发的主要区域.

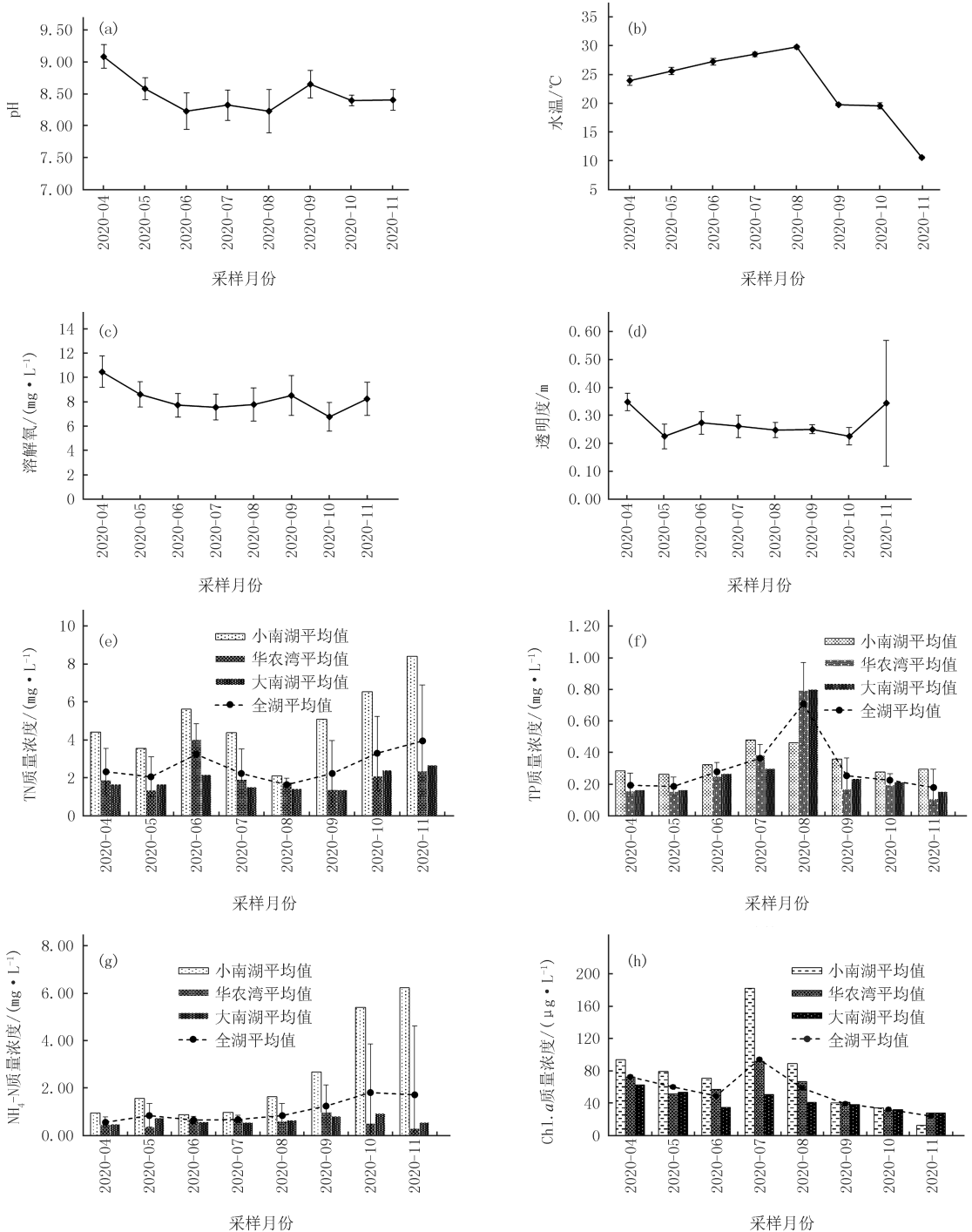


图2 水质数据

Fig.2 Water quality data

## 2.2 湖泊水质的空间变化

根据湖泊理化因子的结果,选取 2020 年 8 月湖泊水质作为研究湖泊水质空间分布的典型代表(图 3).

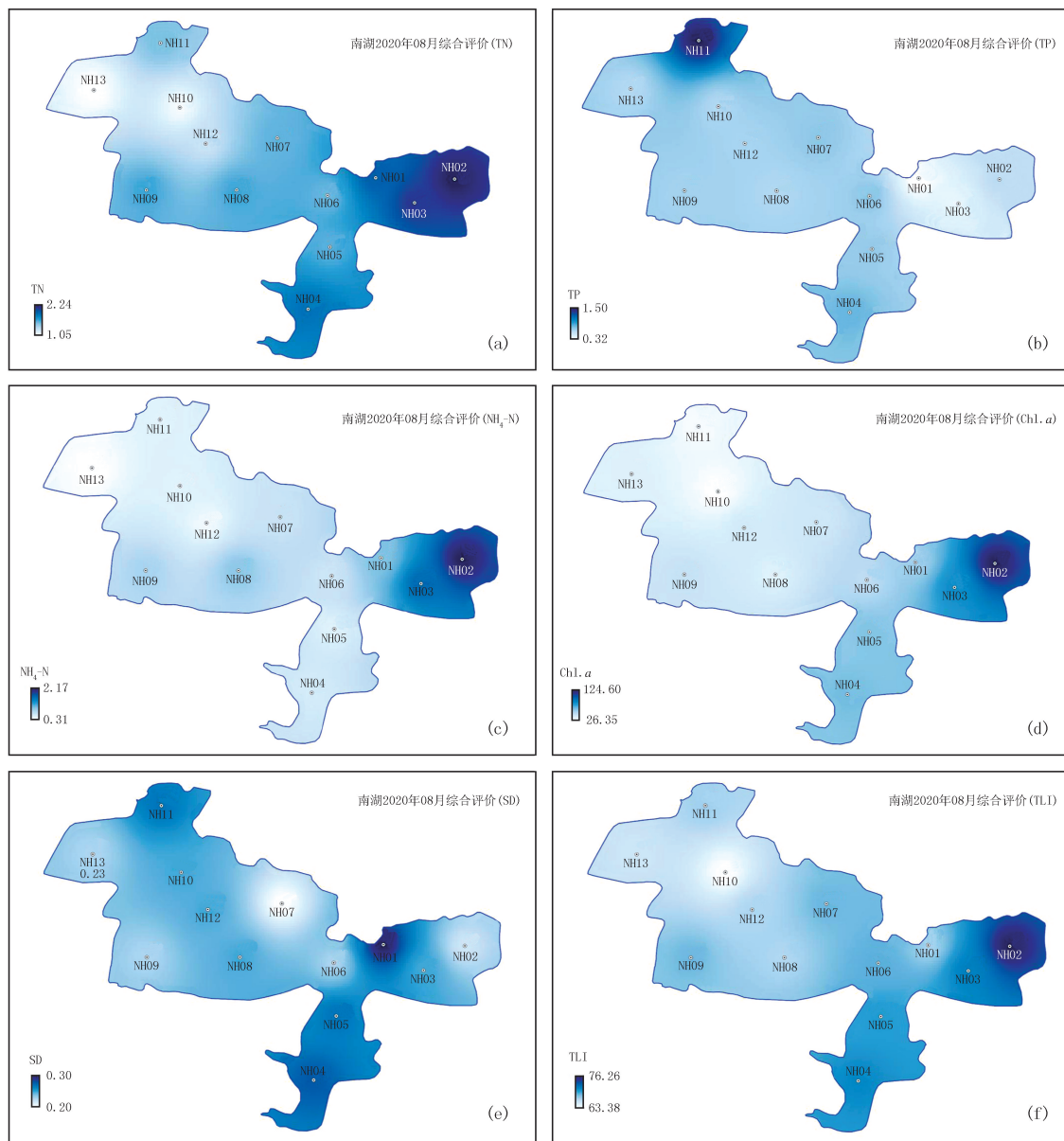


图3 南湖水质的时空变化

Fig.3 Temporal and spatial changes of water quality in South Lake

2020年8月,小南湖区域TN平均质量浓度为2.11 mg/L,TP平均质量浓度为0.46 mg/L,均未达到地表水V类水质标准( $C_{TP} \leq 0.2 \text{ mg/L}$ ,  $C_{TN} \leq 2.0 \text{ mg/L}$ ), $\text{NH}_4\text{-N}$ 平均质量浓度为1.63 mg/L,Chl.a最高质量浓度达到124.60  $\mu\text{g/L}$ ,透明度仅为0.25 m.华农湾片区中,TP超标15倍,达到0.79 mg/L,为劣V类水质标准,TN为1.78 mg/L, $\text{NH}_4\text{-N}$ 为0.58 mg/L,均未达到V类水质标准,Chl.a为66.70  $\mu\text{g/L}$ ,透明度为0.27 m.大南湖情况与华农湾情况相似,除了TP超标严重以外,其他指标均在V类水质指标以内.

南湖水质的时空变化可以清晰地反映南湖各个湖区水质的基本情况,呈现出明显的空间异质性,三大片区中,大南湖水质明显优于小南湖和华农湾,其中TN(图3(a))、 $\text{NH}_4\text{-N}$ (图3(c))、Chl.a(图3(d))3个指标的分布规律由高到低为小南湖、华农湾、大南湖,透明度(图3(e))分布规律由高到低为华农湾、小南湖、大南湖.TP(图2(b))在大南湖的安康路附近出现明显的异常,且已经向大南湖湖区扩散,说明附近排口溢流的污水已经严重影响了局部水质.

### 2.3 南湖富营养化评价

根据武汉市生态环境局发布的数据以及第三方监测数据结果显示:2018年南湖水质整体为劣V类,

TN、TP 含量严重超标,北岸较南岸水质差,夏季较冬季水质差。

根据 2018 年 12 月份对南湖水生态环境调查的结果,南湖 TN 平均质量浓度为 5.10 mg/L,TP 平均质量浓度为 0.21 mg/L,属于严重的高氮高磷环境,评价结果为地表水劣 V 类.对南湖进行水体富营养化评价,南湖的 TLI 在 71.3~79.4 之间,平均值为 75.0,呈重度富营养化状态。

2018 年 12 月至 2019 年 7 月数据显示,南湖水体仍然呈富营养化状态,TN 平均质量浓度为 4.60 mg/L,TP 平均质量浓度为 0.18 mg/L,透明度为 0.35 m,Chl.a 平均质量浓度为 53.71  $\mu\text{g/L}$ ,远高于蓝藻水华爆发的可能临界质量浓度 10  $\mu\text{g/L}$ <sup>[13]</sup>,富营养化程度与地区污染水平呈现一定的相关性,南湖整体富营养化现象仍然严重。

根据以上监测数据,对南湖水体 2020 年的富营养化水平进行评价,结果如图 4.根据综合营养状态指数 (TLI)分级标准,南湖湖区从 2020 年 4 月至 11 月期间,TLI 指数为 61.69~71.35,总体处于中度富营养化状态.4 月至 6 月,TLI 指数变化不明显,而后逐渐升高,7 月和 8 月分别为 71.35 和 69.64,为重度富营养化状态,而后逐渐降低,到了 11 月份达到最低值(图 4)。

从图 3(f)可以看出,南湖湖区 TLI 指数也呈现明显的区域异质性.小南湖和华农湾区域的 TLI 指数明显高于大南湖湖区.2020 年 8 月小南湖区 3 个监测位点的 TLI 指数分别为 67.29、76.26 和 71.82,平均值为 71.79,处于重度富营养化状态.华农湾区域的 TLI 指数也超过 70.00,湖区的 TLI 指数变化范围为 65.95~69.43,处于中度富营养化状态.从历年 TLI 指数来看,2008 年是 75.00,2019 年是 68.26,2020 年为 65.86,TLI 指数逐年下降.图 4 从 4 月至 11 月,总体呈现下降趋势,表明南湖生态修复治理措施取得初步成效,湖区水体自净能力得到初步恢复,后期有望通过控源截污、生态修复等措施将水体 TLI 指数降低到 60 以下,改变湖区的营养状态分级。

目前南湖周边已经开展了雨水收集系统管网和排口雨污分流改造工作,但是污水管网泄露,排口溢流导致进入南湖的污水仍然不少,前期沉积的底泥污染导致氮磷物质的再释放也影响了湖区水质的净化,水动力条件不足致使南湖的污染难以有效地转移和疏散.经过连续 8 月的监测,发现南湖水质改善效果不明显,目前仍是地表水 V 类水质.短期的数据难以说明生态修复工程实施后对南湖水质的实质影响,因此后期需要继续加强对南湖水质的监测,特别是对已开展水生态修复的区域。

### 3 治理建议

加强对南湖周边排口的升级改造,避免排口溢流污染,及时对污染排口进行监测与查处,对难以处理的排口进行生态化改造,拦截入湖污染物;摸清南湖水生植物恢复的边界条件,在整个南湖周边逐渐恢复沉水植物;对蓝藻水华进行预防和削减,防止示范区内蓝藻水华大量爆发,创造良好的恢复条件;有条件地开展东湖-南湖-野芷湖-汤逊湖等“四湖水系连通工程”,改善水动力条件,使区域水体活起来,带动部分污染物出湖,削减污染存量。

### 参 考 文 献

- [1] ALLAN R J. Introduction what is aquatic ecosystem restoration? [J]. Water Quality Research Journal, 1997, 32(2): 229-234.
- [2] 谷少委,刘杰云,范习超,等.广利灌区总干渠水质及氮磷污染初步评价[J].灌溉排水学报,2021,40(2):93-100.  
GU S W, LIU J Y, FAN X C, et al. A preliminary analysis of water quality and nitrogen and phosphorus pollution in the main canal of Guangli irrigation district [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(2): 93-100.
- [3] 朱秀红,夏丹,杨阳,等.4 种水生植物对污染水体净化效果的研究[J].河南农业大学学报,2013,47(1):87-91.  
ZHU X H, XIA D, YANG Y, et al. Study on the purifying effect of four kinds of hydrophyte upon polluted water. [J]. Journal of Henan

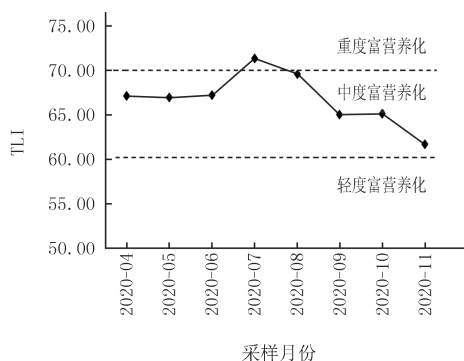


图4 南湖综合营养状态指数  
Fig.4 TLI of South Lake

- Agricultural University, 2013, 47(1): 87-91.
- [4] 王银东,熊邦喜,杨学芬,等.武汉市南湖的环境现状及生态恢复建议[J].水利渔业, 2005, 26(4): 65-66.  
WANG Y D, XIONG B X, YANG X F, et al. Environmental status and ecological restoration suggestions of South Lake in Wuhan city[J]. Journal of Hydroecology, 2005, 26(4): 65-66.
- [5] 邱炳文,周勇,周敏,等.武汉市南湖富营养化现状、趋势及其综合整治对策[J].华中农业大学学报, 2000, 19(4): 350-352.  
QIU B W, ZHOU Y, ZHOU M, et al. The current status and future trend of eutrophication of the South Lake and its comprehensive control countermeasures[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2000, 19(4): 350-352.
- [6] 尹然.城市湖泊富营养化状况评价及应对策略:以武汉南湖为例[J].安徽农业科学, 2020, 48(24): 66-70.  
YIN R. Evaluation of eutrophication of urban lakes and coping strategies: a case study of South Lake of Wuhan city[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2020, 48(24): 66-70.
- [7] 杨明生,熊邦喜,杨学芬,等.武汉南湖沉积物中水生植物残体及其氮磷分布[J].生态学报, 2008, 28(4): 1508-1513.  
YANG M S, XIONG B X, YANG X F, et al. Distribution character of aquatic plant residues and its nitrogen and phosphorus in the sediments in South Lake, Wuhan[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(4): 1508-1513.
- [8] 杨学芬,熊邦喜,杨明生.武汉南湖水体及沉积物不同形态磷的季节变化[J].应用生态学报, 2008, 19(9): 2029-2034.  
YANG X F, XIONG B X, YANG M S. Seasonal dynamics of phosphorus forms in water body and sediments of South Lake, Wuhan[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(9): 2029-2034.
- [9] 李瑞清,刘贤才,姚晓敏,等.武汉市城市湖泊水生态修复及生态补偿机制探讨[J].中国水利, 2013(9): 10-12.  
LI R Q, LIU X C, YAO X M, et al. Studies on ecological restoration of lakes and compensation mechanism in Wuhan City[J]. China Water Resources, 2013(9): 10-12.
- [10] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社, 2002.
- [11] YU G L, JIANG Y G, SONG G F, et al. Variation of Microcystis and microcystins coupling nitrogen and phosphorus nutrients in Lake Erhai, a drinking-water source in Southwest Plateau, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, 21(16): 9887-9898.
- [12] 金相灿,屠清瑛.湖泊富营养化调查规范[M].2版.北京:中国环境科学出版社, 1990.
- [13] 马建荣,邓建明,秦伯强等.湖泊蓝藻水华发生机理研究进展[J].生态学报, 2013, 33(10): 3020-3030.  
MA J R, DENG J M, QIN B Q et al. Progress and prospects on cyanobacteria bloom-forming mechanism in lakes[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(10): 3020-3030.

## Eutrophication evaluation and treatment suggestions for urban lake water ecological restoration——South Lake in Wuhan

Zhang Hang<sup>1</sup>, Shen Laiyin<sup>1</sup>, Miao Teng<sup>1</sup>, Zhang Yi<sup>1</sup>, Zhou Nianlai<sup>1</sup>, Zhou Chi<sup>1</sup>, Zheng Liping<sup>2</sup>

(1. Hubei Water Resources and Hydropower Science and Technology Information Center, Hubei Water Resources Research Institute, Wuhan 430070, China; 2. Wuhan BGI Genoimmune Biotechnology Co., Ltd., Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Human activities have a strong impact on urban lake ecosystem. The water quality of the South Lake in Wuhan was monitored for 8 months (from April 2020 to November 2020). Compared with the data of previous years, the temporal and spatial variations and development trends of water quality during the recent ecological restoration of South Lake were clarified, and the eutrophication levels were comprehensively evaluated. The results showed that some water quality indexes of the South Lake were partly promoted, but the total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) exceeded the standard severely, with the highest concentration of 9.85 mg/L and 1.49 mg/L. The chlorophyll *a* (Chl. *a*) density remained high, and the average concentration reached to 51.85  $\mu\text{g/L}$ , which made the cyanobacteria water bloom becoming a very serious problem. On the temporal scale, the comprehensive nutrient index (TLI) of South Lake was gradually decreasing, but it still remained to a moderate eutrophication state. On the spatial scale, regional heterogeneity was appeared obviously in each bay of South Lake, and the water quality of Danan Lake is better than Huanong Bay, and Xiaonan Lake is the worst. The eutrophication status in South Lake is correlated with regional outlet pollution to a certain extent, and ex-post treatment in South Lake will focus on the exogenous pollution in Xiaonan Lake. In the future, it will play an important role in improving the water quality of South Lake by the integrated measures of strengthening the outlets management and controlling the cyanobacteria water-bloom scale, enlarging hydrophytes demonstration areas.

**Keywords:** South Lake in Wuhan; eutrophication state; temporal and spatial variation; management recommendation

[责任编辑 刘洋 杨浦]