

城镇水系统研究与应用

周智伟, 贡丹丹, 宋春雨, 等. 长江中游典型城市湖泊污染负荷及控制对策:以武汉市万家湖为例[J]. 净水技术, 2025, 44(9): 132-140.

ZHOU Z W, GONG D D, SONG C Y, et al. Pollution loads and control countermeasures of typical urban lakes in middle reach of the Yangtze River: Case of Wanjiahu Lake in Wuhan City [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(9): 132-140.

长江中游典型城市湖泊污染负荷及控制对策:以武汉市万家湖为例

周智伟¹, 贡丹丹^{2,3}, 宋春雨⁴, 李航^{2,3}, 谢小龙⁵, 郭伟杰^{2,3,*}

(1. 澜湄水资源合作中心, 北京 100038; 2. 长江科学院流域水环境研究所, 湖北武汉 430010; 3. 长江科学院流域水资源与生态环境科学湖北省重点实验室, 湖北武汉 430010; 4. 云南省水利水电科学研究院, 云南昆明 650228; 5. 武汉市市政工程设计研究院有限责任公司, 湖北武汉 430023)

摘要 【目的】我国部分城市湖泊仍存在水环境质量差、生物多样性低、自我净化与恢复能力弱等问题,亟需开展水环境综合整治和水生态修复,而准确解析污染源特征及水环境容量等是有效开展湖泊保护治理的前提。【方法】文章以武汉市典型城市湖泊万家湖为例,基于现场调查和计算分析,解析了万家湖污染源种类、负荷及水环境容量,明确了主要污染物目标削减量,提出了控制对策。【结果】万家湖 COD、TN、TP 的总污染负荷分别为 2 484.1、326.2、37.4 t/a,水环境容量分别为 1 027.3、34.4、2.2 t/a,主要污染物目标削减量分别为 1 456.8、291.8、35.2 t/a;点源 COD、TN、TP 的污染负荷分别为 1 780.6、275.1、34.3 t/a,面源 COD、TN、TP 的污染负荷分别为 657.4、45.3、2.7 t/a,内源 COD、TN、TP 的污染释放量分别为 46.1、5.8、0.4 t/a。【结论】根据万家湖污染源特征及污染物目标削减量,建议通过生态疏浚、截污纳管、湖滨带构建、水生植物群落构建和长效维护管控等措施削减入湖污染负荷,提高水体自净能力,逐步提高水生态系统的健康程度。

关键词 万家湖 污染源 污染负荷 水环境容量 对策措施

中图分类号: X52 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)09-0132-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.09.017

Pollution Loads and Control Countermeasures of Typical Urban Lakes in Middle Reach of the Yangtze River: Case of Wanjiahu Lake in Wuhan City

ZHOU Zhiwei¹, GONG Dandan^{2,3}, SONG Chunyu⁴, LI Hang^{2,3}, XIE Xiaolong⁵, GUO Weijie^{2,3,*}

(1. Lancang Mekong Water Resources Cooperation Center, Beijing 100038, China;

2. Basin Water Environmental Research Department, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China;

3. Hubei Provincial Key Laboratory of River Basin Water Resources and Eco-Environmental Sciences, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China;

4. Yunnan Water Science Research Institute, Kunming 650228, China;

5. Wuhan Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430023, China)

Abstract [Objective] Some urban lakes at home still face many problems, such as poor water environment quality, low biodiversity, and weak self-purification and restoration capabilities. It is urgent to carry out comprehensive water environment improvement and water ecological restoration for these lakes. Accurately analyzing the characteristics of pollution source and water

[收稿日期] 2023-11-04

[基金项目] 2023 年度湖北省住房和城乡建设科学技术计划项目(2023057);浙江省自然科学基金联合基金重点项目(LHZ22E090001)

[作者简介] 周智伟(1979—),男,研究方向为水文水资源及水生态环境保护,E-mail:zhouzhiwei@lmwater.org.cn。

[通信作者] 郭伟杰(1986—),男,正高级工程师,研究方向为水污染治理与水生态修复,Email:gwj@mail.crsri.cn。

environment capacity is essential for effectively carrying out lake protection and governance. [Methods] Taking the Wanjiahu Lake, a typical polluted urban lake in Wuhan City as an example, based on field investigations and statistic analysis, the types, loads of pollution sources and water environmental capacity of this lake were analyzed. The target reduction amount of main pollutants were identified and control measures were proposed. [Results] The total pollution loads of COD, TN and TP in the lake were 2 484.1, 326.2 t/a and 37.4 t/a, respectively. The water environmental capacities of COD, TN and TP in this lake were 1 027.3, 34.4 t/a and 2.2 t/a, respectively. The main reduction targets of COD, TN and TP were 1 456.8, 291.8 and 35.2 t/a, respectively. The point source pollution loads of COD, TN and TP were 1 780.6, 275.1 t/a and 34.3 t/a, respectively, while non-point source pollution loads of those were 657.4, 45.3 t/a and 2.7 t/a, respectively. The internal contamination loads of COD, TN and TP were 46.1, 5.8 t/a and 0.4 t/a, respectively. [Conclusion] Based on the load and target reduction of different pollutants for the lake, it is recommended to reduce the lake pollution load through ecological dredging, sewage interception and management, lakeside zone construction, aquatic plant community construction and long-term maintenance to improve the self purification capacity of water bodies and restore the health of water ecosystems.

Keywords Wanjiahu Lake pollution source pollution load water environment capacity countermeasure

武汉地处长江中游城市群核心和江汉平原水网中心,江河纵横,湖泊密布。作为推动长江经济带发展的重要城市和长江中游城市群的核心,武汉在长江全流域生态安全格局、经济社会发展、长江文明传承创新中发挥着重要枢纽作用。随着经济社会发展和城市功能提升,城市扩张和人类活动等导致长江中下游部分城市湖泊入湖污染负荷超过水体水环境容量^[1],出现水环境质量差、水体富营养化、水生态系统受损等问题,开展湖泊水环境综合整治迫在眉睫。目前关于湖库污染源特征的研究相对较多^[2-5],但是针对长江中下游典型受污染城市湖泊的污染源及水环境容量解析的研究相对较少或者不够系统^[6-8]。万家湖位于武汉市经济技术开发区的核心区域,作为长江中下游典型的受污染城市湖泊,污染来源多样、污染负荷计算复杂,而解析湖泊污染源特征及环境容量等基础信息是有针对性选择工程措施,准确核算工程量,进而有效开展水生态环境综合整治的前提。基于文献资料收集、现场调查、室内检测及计算分析等方法,本文以武汉市万家湖为例,解析了其污染来源、污染负荷和贡献率、水环境容量、目标污染物削减量等,以期开展水生态环境综合整治以及效果跟踪评估提供支撑。

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

万家湖位于武汉市经济技术开发区东部,属沌口街办管辖(图1),沌阳大道横穿湖面。水面面积为1 579.5亩(1亩=666.67 m²),最低水位为16.62 m,最高水位为19.92 m,平均水位为18.42 m,最大水深为3.3 m,平均水深为1.80 m。集水区面积为

632 hm²(1 hm²=10 000 m²),其中农村面积约为63.18 hm²,城市面积为568.82 hm²。万家湖主要功能是防洪排涝及调蓄,兼顾生态景观和游憩休闲,水功能区水质目标为Ⅳ类。

1.2 研究方法

基于已有数据资料和相关标准规范,选择2017年的旱季和2018年的雨季开展万家湖点源、面源和内源污染的现场调查和计算分析,水质和底质现状调查仅在旱季开展1次,其他污染源根据实际情况开展。

1.2.1 水质现状及污染源调查

(1) 湖泊水质

湖泊水体样品按照湖心、湖周、排口附近等预先设置好的7个采样点(图1),使用5 L有机玻璃采水器现场采集水下约0.5 m处的表层水样,按照不同检测参数分别装入相应的样品瓶中,放入便携式冷藏箱带回实验室检测。根据水质检测结果,结合水体的水质目标,参照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002),采用单因子指数评价法,对万家湖水水质现状、水质类别、超标倍数等进行评价。

(2) 点源污染

根据已有资料和入湖排污口物探信息等,开展入湖排污口现场调查,对于有污水排放的排口开展连续48 h流量监测和水样采集检测,每4 h监测1次,共计调查12次。根据排水情况灵活采用《水污染物排放总量监测技术规范》(HJ/T 92—2002)中所推荐的流速仪法和容器法测定流量;采集水样当天送回实验室按照相关参数监测规范及时分析测定。检测参数包括总磷(TP)、总氮(TN)和化学需

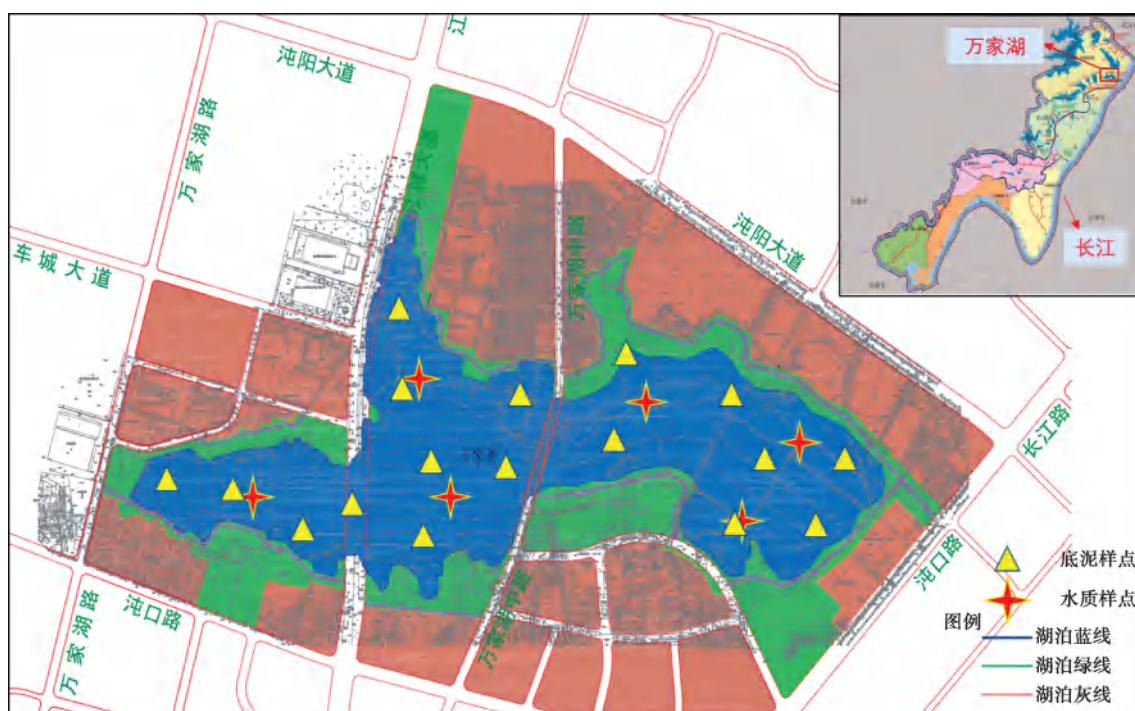


图1 武汉市万家湖位置及采样点布设

Fig. 1 Location and Layout of Sampling Points of Wanjiahu Lake in Wuhan City

氧量(COD)等。

(3) 面源污染

面源污染一般包括农业面源、畜禽养殖、水产养殖、农村生活、城镇面源等。根据有关资料和实地调查,万家湖集水区内城镇化程度较高且已建有较完善生活污水收集管网,无农村生活污染源;集水区内无规模化养殖小区(场)和水产养殖,无畜禽养殖污染和水产养殖污染。基于遥感分析、现场调查以及已有文献资料^[9-13],重点对农业面源和城镇面源污染进行系统调查和分析计算。以武汉经开区(汉南区)数字高程模型(DEM)、城市管网、城市道路数据为基础,利用 ArcGIS、Google Earth 等开展空间分析,辨识集水区范围。利用 ArcGIS 软件,对武汉经开区(汉南区)范围内各幅 DEM 数据进行拼接和投影变换生成武汉经开区(汉南区)GRID 地形地图[图 2(a)]。针对地形图进行填洼、分析流向、计算累积流处理,提取河道水系;根据湖泊的出流位置,分割出湖泊出水口以上的集水范围;根据管线走向、道路分布、城市布局等对湖泊集水区边界进行调整,得到万家湖集水区及土地利用类型[图 2(b)~图 2(c)]。

①农业面源:农业面源基础数据来源于武汉市

和武汉经开区(汉南区)统计年鉴、全国第二次土地利用调查数据以及农业部门的相关资料。根据相关数据资料获取流域内农业种植业基本概况,包括主要作物种类、播种面积及产量、肥料施用等信息。选择农田面积较大、作物种类较多的典型乡镇开展现场调查和农田径流样品采集分析。

②城镇面源:城镇面源污染呈现类型多样、量较大、分布随机等特点。本次调查以城镇街道地表冲刷为主,选取典型降雨区域,现场对降雨污染的全过程进行监测,包括降雨历时、降雨量、污染物浓度等。

(4) 内源污染

在万家湖湖心、湖周以及排口附近的代表性水域共设置 17 个底泥采样点,通过柱状采泥器采集柱状样品带至实验室,选取表层沉积物开展污染物静态释放试验。参考区域内类似湖泊相关研究成果^[7,14],根据静态释放试验结果进行修正后得出万家湖底泥 TN、TP、COD 等污染物的释放速率。底泥 TN、TP 以过渡层(中层)和正常层(下层)中 TN、TP 的均值作为基准值,各实测值除以基准值得到污染指数(INP),依照 $INP \leq 1.0$ 为清洁(安全), $1.0 < INP \leq 1.25$ 为轻度污染, $1.25 < INP \leq 2.0$ 为中度污

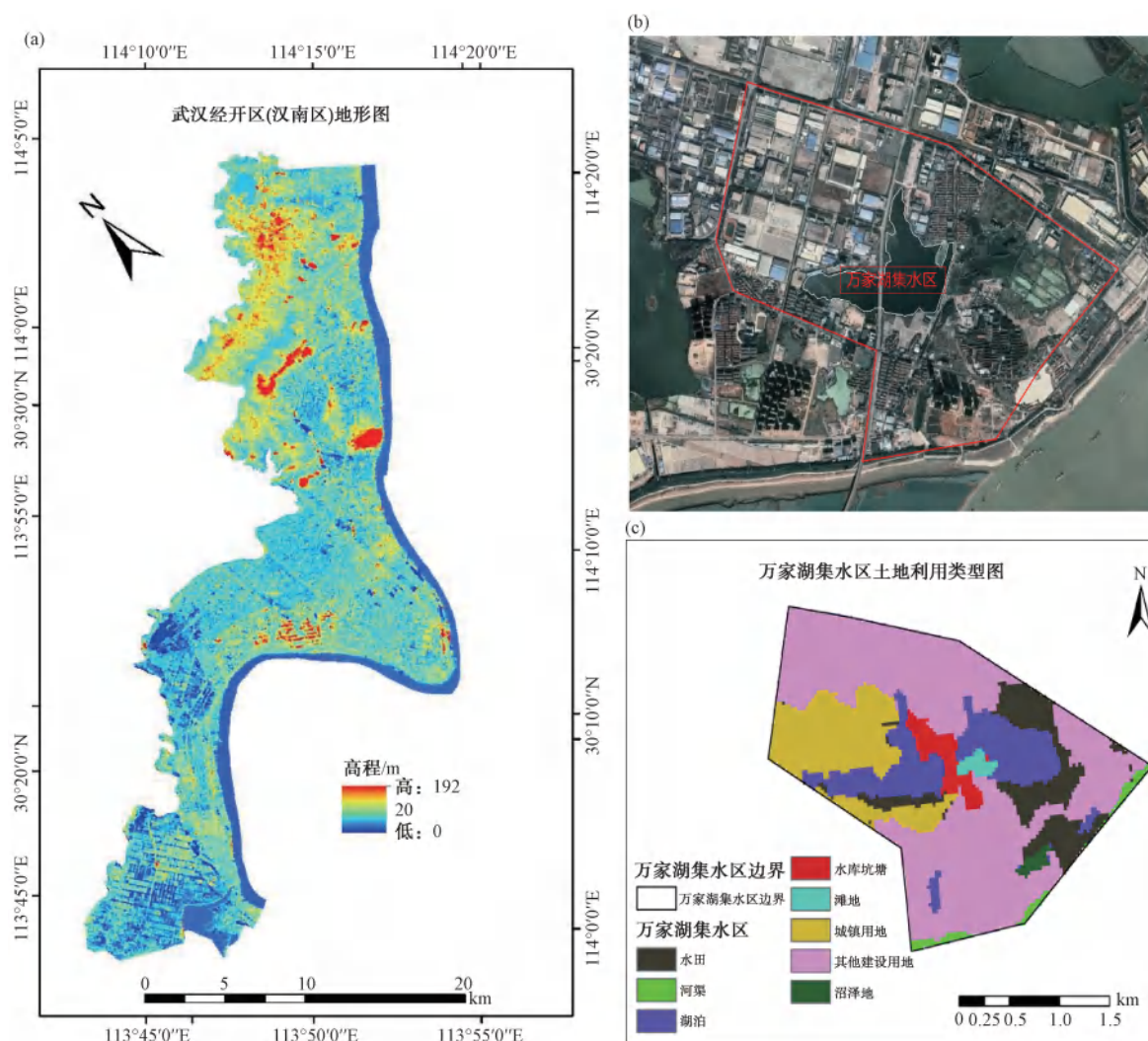


图2 (a) 武汉市经开区(汉南区)GRID地形图;(b) 万家湖集水区;(c) 土地利用类型图
Fig. 2 (a) GRID Topographic Map; (b) Wanjiahu Lake Catchment Area; (c) Land-Use Type Map of Jingkai District (Hannan District) in Wuhan

染,2.0<INP 为重度污染,进行万家湖底泥氮、磷污染等级划分,并按照单因子评价法得到综合污染评价结果。

1.2.2 水环境容量计算

(1) COD 水质模型

湖泊作为封闭型水体,水质模型一般以“混合反应器”为假设而建立。根据湖泊物质平衡方程,小型湖泊采用 COD 水质模型,为保持湖水在任何时间有机污染物浓度不超过湖水的水质标准,湖泊水域环境容量计算如式(1)。

$$W = C_s(KVQ_{\text{出}}) \quad (1)$$

其中:W——水域纳污量,kg/a;
Q_出——年出湖水量,m³/a;

C_s——规划目标质量浓度,mg/L;

K——降解速率,d⁻¹;

V——湖泊容积,m³。

万家湖为城市小型湖泊,参考《全国地表水水环境容量核定技术复核要点》^[15]中关于水质降解系数参考值,水质为 V 类或劣 V 类的湖泊,COD 降解系数为 0.01~0.03 d⁻¹,本研究中万家湖 COD 降解系数取 0.025 d⁻¹。

(2) TN、TP 水质模型

常见的湖泊营养盐负荷模型有沃伦德尔、狄龙及合田健模型,其中狄龙模型主要适用于富营养化湖(库),合田健模型适用于水流交换能力弱的湖库湾等。根据监测结果,万家湖富营养化程度较高,因此

本研究采用狄龙模型计算 TN、TP 环境容量,如式(2)。

$$P = \frac{L_p(1 - R_p)}{\beta h_p} \quad (2)$$

其中: P ——湖中氮、磷的平均质量浓度, g/L;

L_p ——氮、磷单位面积负荷, g/(m²·a);

h_p ——湖泊平均水深, m;

R_p ——氮、磷在湖(库)中的滞留系数;

β ——水力冲刷系数。

R_p 计算如式(3)。

$$R_p = 1 - \frac{W_{\text{出}}}{W_{\text{入}}} \quad (3)$$

其中: $W_{\text{出}}$ ——年出湖的氮、磷量(指通过各种途径带出湖体的量,包括水草打捞、捕鱼、下泄等带出的量), t/a;

$W_{\text{入}}$ ——年入湖的氮、磷量, t/a。

β 计算如式(4)。

$$\beta = Q_a/V \quad (4)$$

其中: Q_a ——湖泊年出流量, m³/a。

氮、磷纳污能力计算如式(5)~式(6)。

$$M_N = L_s A \quad (5)$$

$$L_s = \frac{P_s h_p Q_a}{(1 - R_p) V} \quad (6)$$

其中: M_N ——氮、磷的水域纳污能力, t/a;

L_s ——湖泊单位面积氮、磷的纳污能力, mg/(m²·a);

A ——湖泊水面面积, m²;

P_s ——湖泊中氮、磷年控制目标, mg/L。

根据上述公式和有关数据,计算出万家湖水质模型中各参数值如表 1 所示。

表 1 万家湖水质模型参数估值

Tab. 1 Parameters Estimation of Water Quality Model for Wanjiahu Lake

参数	参数含义	估值
$Q_{\text{入}}$	年入湖水量/(m ³ ·a ⁻¹)	1 861.09 万
$Q_{\text{出}}$	年出湖水量/(m ³ ·a ⁻¹)	1 694.67 万
V	湖泊容积/m ³	189.54 万
K_e	COD 综合衰减系数/(d ⁻¹)	0.025

2 结果与分析

2.1 水质与底质污染现状

(1) 水质现状

如表 2 所示,参照万家湖水功能区Ⅳ类水质目标,TP、TN、氨氮、COD 均超出Ⅳ类水质标准,超标倍数分别为 8.6、5.53、3.66 倍和 0.23 倍。万家湖水水质总体上评价为劣Ⅴ类。

表 2 万家湖水质监测结果

Tab. 2 Water Quality Monitoring Results of Wanjiahu Lake

采样点	pH 值	DO/ (mg·L ⁻¹)	高锰酸盐指数/ (mg·L ⁻¹)	COD/ (mg·L ⁻¹)	BOD ₅ / (mg·L ⁻¹)	TP/ (mg·L ⁻¹)	TN/ (mg·L ⁻¹)	氨氮/ (mg·L ⁻¹)
1#	9.6	10.20	11.10	35	5.5	1.31	13.3	8.30
2#	9.3	6.50	9.14	47	5.6	1.53	14.4	9.35
3#	9.6	5.50	11.40	53	5.2	2.02	16.2	11.60
4#	8.8	9.82	5.81	35	4.3	0.17	2.4	1.88
5#	8.5	6.80	6.45	28	7.1	0.24	6.3	5.37
6#	8.5	10.40	4.04	24	6.0	0.46	6.2	5.42

(2) 底质现状

如表 3 所示,万家湖不同湖区氮、磷污染程度差别较大,从清洁至重度污染不等,并以中度至重度污染为主,仅个别位点底质为清洁,靠近排污口区域底质污染程度较高。魏明蓉等^[14]对武汉南湖底泥污染物研究表明,间隙水 TN、TP 均呈现排污口附近污染物含量高于其他各样点。

2.2 点源污染解析

调查表明,万家湖点源污染主要来自排污口排

放,入湖雨污混合排口共计 30 个。对排口水质、水量进行连续监测和计算分析表明,万家湖点源污水排放量为 1 955 万 m³/a,其中 COD 负荷为 1 780.6 t/a, TN 负荷为 275.1 t/a, TP 负荷为 34.3 t/a。

2.3 面源污染解析

(1) 农业面源污染

以武汉经济技术开发区 DEM、城市管网、城市道路数据为基础,利用 ArcGIS、AutoCAD、Google Earth 等工具辨识集水区范围^[16]。结合万家湖集水

表 3 万家湖表层底泥监测结果
Tab. 3 Results of Sediment Monitoring in Wanjiahu Lake

采样点位	TN/(mg·kg ⁻¹)	TP/(mg·kg ⁻¹)	TN 污染等级	TP 污染等级
万家湖 1#	3.39×10 ³	2 330	重度污染	重度污染
万家湖 2#	3.98×10 ³	1 220	重度污染	重度污染
万家湖 3#	1.39×10 ³	659	中度污染	中度污染
万家湖 4#	2.71×10 ³	552	重度污染	重度污染
万家湖 5#	2.59×10 ³	317	轻度污染	轻度污染
万家湖 6#	5.53×10 ³	3 330	中度污染	中度污染
万家湖 7#	4.25×10 ³	1 990	轻度污染	轻度污染
万家湖 8#	3.90×10 ³	1 220	中度污染	中度污染
万家湖 9#	2.37×10 ³	1 580	中度污染	中度污染
万家湖 10#	3.25×10 ³	1 010	清洁	清洁
万家湖 11#	2.59×10 ³	690	中度污染	中度污染
万家湖 12#	3.35×10 ³	670	重度污染	重度污染
万家湖 13#	2.53×10 ³	960	中度污染	中度污染
万家湖 14#	2.16×10 ³	2 010	重度污染	重度污染
万家湖 15#	2.43×10 ³	1 130	重度污染	重度污染
万家湖 16#	1.06×10 ³	460	重度污染	重度污染
万家湖 17#	1.65×10 ³	1 010	中度污染	中度污染

区内的土地利用类型,基于已有研究^[17]和现场调查检测数据计算表明,农业面源中 COD、TN、TP 的污染负荷分别为 14.75、2.14、0.151 9 t/a(表 4)。研究表明,农田种植和畜禽养殖是 TN、TP 负荷的主要贡献源^[18]。

表 4 万家湖农业面源污染负荷
Tab. 4 Agricultural Non-Point Source Pollution Load in Wanjiahu Lake

类型	水田	沼泽地
面积/hm ²	61.38	1.80
径流量/m ³	49.40 万	1.65 万
COD 负荷/(t·a ⁻¹)	溶解态 14.57	0.18
TN 负荷/(t·a ⁻¹)	溶解态 2.07	0.007
	颗粒态 0.061	0.002
TP 负荷/(t·a ⁻¹)	溶解态 0.14	0.000 5
	颗粒态 0.011	0.000 4

(2)城市面源污染

万家湖城市面源污染分为雨水管网面源和非管网面源两部分,管网集雨区域面积为 345.52 hm²,集雨范围雨水量为 284.32 万 m³/a。根据现场调查

及参考已有研究成果计算得出,雨水管网面源 COD 负荷为 343.14 t/a, TN 负荷为 25.24 t/a, TP 负荷为 1.30 t/a。非管网城市面源污染负荷计算过程及结果如表 5 所示,集水面积为 204.75 hm²,集雨范围雨水量为 193.13 万 m³/a, COD、TN、TP 污染负荷分别为 286.20、17.904、1.284 4 t/a。综上,万家湖集水区 COD、TN、TP 的面源污染负荷分别约为 644.09、45.28、2.73 t/a(表 6),其中城市径流占比 94.5%~97.8%。

表 5 万家湖非纳管城市面源污染负荷
Tab. 5 Urban Non-Point Source Pollution Load of Un-Connected Wastewater Network in Wanjiahu Lake Area

类型	城镇用地	其他建设用地
面积/hm ²	20.61	184.14
径流量/m ³	19.44 万	173.69 万
COD 负荷/(t·a ⁻¹)	溶解态 25.67	260.53
TN 负荷/(t·a ⁻¹)	溶解态 1.20	16.50
	颗粒态 0.014	0.19
TP 负荷/(t·a ⁻¹)	溶解态 0.12	1.13
	颗粒态 0.002 4	0.032

表6 万家湖面源污染负荷

Tab. 6 Non-Point Source Pollution Load of Wanjiahu Lake

类型	面积/ hm ²	径流量/ m ³	COD 负荷/ (t·a ⁻¹)	TN 负荷/ (t·a ⁻¹)	TP 负荷/ (t·a ⁻¹)
农业面源污染	—	—	14.75	2.14	0.15
管网污染	345.52	284.32 万	343.14	25.24	1.30
非管网污染	204.75	193.13 万	286.20	17.90	1.28

2.4 内源污染解析

参考区域内类似湖泊相关研究成果,根据静态释放试验结果进行修正,得出万家湖表层底泥 TN、TP、COD 污染物的释放速率分别为 15、1、120 mg/(m²·d)。结合湖盆面积,估算得出万家湖底泥 TN、TP、COD 的内源污染负荷分别为 5.77、0.38、46.14 t/a。

2.5 污染组成分析

如表 7 所示,万家湖 COD、TN、TP 的总污染负荷分别为 2 484.1、326.2、37.4 t/a。从污染组成来看,万家湖以点源污染占比较高,COD、TN、TP 的点源污染负荷占比分别达到 71.7%、84.3%、91.7% (图 3),其主要原因为万家湖集水区域城镇化和排水管网覆盖率较高,但雨污分流率和污水处理能力较低,导致大量污染通过管网入湖。杨水化等^[7]关于武汉市后官湖污染源的研究表明,COD 主要来源于点源,入湖贡献为 54%,TP 主要来源于面源,面源中 COD、TN 和氨氮贡献最大的是城市径流污染,入湖贡献率分别为 61%、53%和 37%,与本研究结果基本一致。万家湖面源污染次之,COD、TN 和 TP 的污染占比分别为 26.5%、13.9%和 7.3%,并且主要以城镇面源污染为主。万家湖内源污染占比最低,COD、TN 和 TP 的污染占比分别为 1.9%、1.8%和 1.0%,而程国微等^[19]研究表明,内源是长江流域湖

库氮、磷的主要贡献源,这可能与研究尺度、侧重点及计算分析方法不同有关。王寿兵等^[20]对环淀山湖区域污染源解析发现,工业、农业、生活、城镇工矿和道路交通用地地表径流等污染源每年排放进入水体的污染物总量为 TN 841.99 t、TP 119.68 t、COD 16 776.07 t、氨氮 461.10 t,生活污染源对 TN 和氨氮贡献最大,农业污染源对 TP 贡献最大,城镇工矿和道路交通用地径流对 COD 的贡献最大。同样,湖北省黄石市磁湖主要污染来源为城市面源及城镇生活污染源^[21]。李响等^[22]研究表明,对安徽省太平湖流域污染物入湖量为 COD 3 863.75 t/a,氨氮 410.24 t/a,TP 51.63 t/a,城镇和农村生活污染为太平湖流域的主要污染源,约占流域入湖污染物总量 60%。

表7 万家湖水环境容量及主要污染物削减量

Tab. 7 Water Environment Capacity and Reduction of Main Pollutants in Wanjiahu Lake

污染物种类	COD	TN	TP
总污染物负荷/(t·a ⁻¹)	2 484.1	326.2	37.4
水环境容量/(t·a ⁻¹)	1 027.3	34.4	2.2
目标削减量/(t·a ⁻¹)	1 456.8	291.8	35.2
水质目标/(mg·L ⁻¹)	30.0	1.5	0.1

因此,对于万家湖而言,控制点源污染输入,可明显降低万家湖的污染负荷,有效提升水环境质量。

2.6 水环境容量及污染物削减量

根据上述水质模型和万家湖的水质目标,结合湖泊水质现状,万家湖 COD、TN、TP 的环境容量分别为 1 027.3、34.4、2.2 t/a (表 7)。与万家湖输入污染负荷相比较,TN 和 TP 超出其环境容量。因此,为了维持万家湖的水环境和生态系统服务功能,

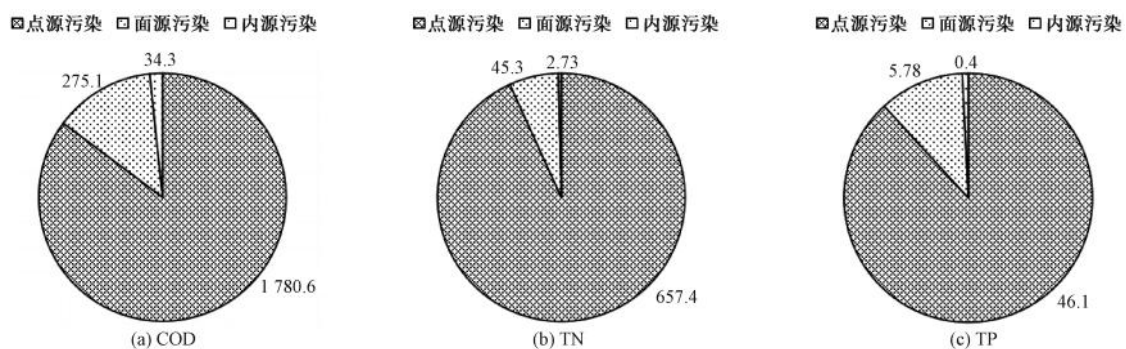


图3 万家湖不同类型污染源组成及污染负荷

Fig. 3 Composition and Pollution Load of Different Types of Pollution Sources in Wanjiahu Lake

需要对主要污染物进行削减。基于上述万家湖的总污染物负荷,进而计算得出万家湖 COD、TN、TP 的目标削减量分别为 1 456.8、291.8、35.2 t/a,其中 TP 和 TN 都面临较大的削减压力。

3 对策措施

根据万家湖点源、面源、内源污染负荷、来源以及污染物目标削减量,制定相应的综合整治技术措施,确定合理的工程量,进而有针对性地削减入湖污染负荷。

(1)对于内源污染,综合考虑底泥污染程度、内源负荷、湖泊水位及湖容控制等,开展底泥生态疏浚和退耕(莲藕种植)还湖,降低内源污染负荷的同时增加库容。

(2)对于点源污染,新建或改造排水管网扩大污水收集范围和处理能力,对于排水量大且排口集中的区域可以考虑新建调蓄池,防止污水直排入湖造成水体污染。

(3)对于入湖面源污染,进行湖泊周边村湾组团生活、生产污水收集并达标处理,对少部分农业种植实施化肥农药减量行动,并根据城市规划逐步取缔农业种植,同时构建湖滨生态过渡带,发挥对面源径流污染的拦截过滤净化作用。

(4)综合考虑现状水网综合整治、区域水环境功能、水安全要求和相关规划,开展与周边湖泊、河流的水系连通与水位控制,提升湖泊水动力。

(5)在入湖污染负荷得到有效控制之后,通过调节湖泊水位、使用环境友好的改良剂,提高水体透明度,创造水生植物恢复的适宜条件;开展沉水植物群落恢复为主的水生态系统构建措施,同步开展智慧湖泊系统建设和长效维护管控,逐步提高水体自净能力,恢复万家湖水生态系统的健康程度和稳定性。

4 结论

(1)万家湖水质总体为劣 V 类,TN、COD、TP 超标严重,入湖面源 COD、TN、TP 的污染负荷分别为 644.09、45.29、2.73 t/a。万家湖 COD、TN、TP 总污染负荷分别为 2 484.1、326.2、37.4 t/a,水环境容量分别为 1 027.3、34.4、2.2 t/a,目标削减量分别为 1 456.8、291.8、35.2 t/a。

(2)建议根据万家湖污染源解析结果及目标削减量等,通过清淤疏浚、截污纳管、污水收集处理、湖

滨缓冲带构建、水生动植物群落恢复和长效维护管养等综合整治措施,逐步削减入湖污染负荷,恢复水体自净能力和重建水生态系统。

参考文献

- [1] 陈进, 刘志明. 近年来长江水功能区水质达标情况分析[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(1): 1-6.
CHEN J, LIU Z M. Standard-reaching rate of water quality in water function regions in Changjiang River Basin in recent years [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2019, 36(1): 1-6.
- [2] 马迎群, 迟明慧, 赵艳民, 等. 嘉兴市南湖水污染特征·成因分析·控制对策[J]. 净水技术, 2020, 39(5): 56-63, 68.
MA Y Q, CHI M H, ZHAO Y M, et al. Water pollution characteristics, cause analysis and control measures of Nanhu Lake in Jiaxing City [J]. Water Purification Technology, 2019, 39(5): 56-63, 68.
- [3] 李思琪, 黄孟斌, 徐志文, 等. 武汉市某湖泊水环境质量评价与污染分析[J]. 净水技术, 2023, 42(s1): 219-226.
LI S Q, HUANG M B, XU Z W, et al. Water environmental quality evaluation and pollution analysis of a lake in Wuhan City [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(s1): 219-226.
- [4] 周文婷, 邵瑞华, 马千里, 等. 高州水库集水区污染源分布特征及污染负荷研究[J]. 水生态学杂志, 2017, 38(3): 23-31.
ZHOU W T, SHAO R H, MA Q L, et al. Pollution load assessment in the catchment area of Gaozhou Reservoir [J]. Journal of Hydroecology, 2017, 38(3): 23-31.
- [5] 黄飞. 三岔湖底泥污染物释放规律研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
HUANG F. Pollutant release of Sancha of lake mud [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [6] 张为, 胡园, 陶晶祥, 等. 洋澜湖沉积物中磷的分布及污染评价[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(9): 35-39.
ZHANG W, HU Y, TAO J X, et al. Distribution and pollution evaluation of phosphorus in sediments of Yanglan Lake [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(9): 35-39.
- [7] 杨水化, 彭正洪, 焦洪赞, 等. 城市富营养化湖泊的外源污染负荷与贡献解析——以武汉市后官湖为例[J]. 湖泊科学, 2020, 32(4): 941-951.
YANG S H, PENG Z H, JIAO H Z, et al. External pollution source load and contribution of urban eutrophic lakes—Taking Lake Honguanhu of Wuhan as an example [J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(4): 941-951.
- [8] 沙茜, 孙燕, 张维昊, 等. 武汉庙湖沉积物中氮释放化学行为的模拟研究[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(2): 50-54.
SHA Q, SUN Y, ZHANG W H, et al. A simulative study on nitrogen release from sediment of Miao Lake in Wuhan [J].

- Environmental Science & Technology, 2013, 36(2): 50-54.
- [9] 赵建伟, 单保庆, 尹澄清. 城市旅游区降雨径流污染特征——以武汉动物园为例[J]. 环境科学学报, 2006, 26(7): 1062-1067.
- ZHAO J W, SHAN B Q, YIN C Q. Characteristics of rainfall and runoff pollution in urban tourism areas: A case study of Wuhan Zoo[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(7): 1062-1067.
- [10] 张立, 许航. 武汉市降雨径流污染特征分析[J]. 市政技术, 2014, 32(5): 90-93.
- ZHANG L, XU H. Analysis of pollution characteristics of rainfall runoff in Wuhan[J]. Journal of Municipal Technology, 2014, 32(5): 90-93.
- [11] 何庆慈, 李立青, 孔玲莉, 等. 武汉市汉阳区的暴雨径流污染特征[J]. 中国给水排水, 2005, 21(2): 101-103.
- HE Q C, LI L Q, KONG L L, et al. Characteristics of storm runoff pollution in Hanyang District of Wuhan City[J]. China Water & Wastewater, 2005, 21(2): 101-103.
- [12] 沈虹, 张万顺, 彭虹. 汉江中下游土壤侵蚀及颗粒态非点源磷负荷研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(5): 1-6.
- SHEN H, ZHANG W S, PENG H. Research on soil erosion and particulate phosphorus load of non-point source pollution in the middle and lower reaches of the Hanjiang River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(5): 1-6.
- [13] 史志华, 蔡崇法, 丁树文, 等. 基于 GIS 的汉江中下游农业面源氮磷负荷研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(4): 473-477.
- SHI Z H, CAI C F, DING S W, et al. Research on nitrogen and phosphorus load of agricultural non-point sources in middle and lower reaches of Hanjiang River based on GIS[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2002, 22(4): 473-477.
- [14] 魏明蓉, 姜应和, 叶舟, 等. 南湖底泥污染物垂直分布及释放潜力初探[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(8): 68-71.
- WEI M R, JIANG Y H, YE Z, et al. Research on vertical distribution and release potential of contaminants in sediment of Nanhu Lake[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(8): 68-71.
- [15] 中国环境规划院. 全国地表水水环境容量核定技术复核要点[R]. 北京: 中国环境规划院, 2004.
- The Chinese Academy for Environmental Planning. Key points of technical review of national surface water environmental capacity verification[R]. Beijing: The Chinese Academy for Environmental Planning, 2004.
- [16] GEZA M, MCCRAY J E. Effects of soil data resolution on SWAT model stream flow and water quality predictions[J]. Journal of Environmental Management, 2008, 88(3): 393-406.
- [17] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(2): 19-24.
- CAI C F, DING S W, SHI Z H, et al. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 14(2): 19-24.
- [18] 王萌, 王敬贤, 刘云, 等. 湖北省三峡库区 1991—2014 年农业非点源氮磷污染负荷分析[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(2): 294-301.
- WANG M, WANG J X, LIU Y, et al. Analysis of nitrogen and phosphorus pollution loads from agricultural non-point sources in the Three Gorges Reservoir of Hubei Province from 1991 to 2014[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(2): 294-301.
- [19] 程国微, 陈岩, 高伟. 2016—2019 年长江流域湖库群氮磷污染源解析[J]. 环境科学学报, 2022, 42(3): 207-217.
- CHENG G W, CHEN Y, GAO W. Source apportionment of nitrogen and phosphorus in the lakes and reservoirs of Yangtze River watershed from 2016 to 2019[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(3): 207-217.
- [20] 王寿兵, 钱晓雍, 赵钢, 等. 环淀山湖区域污染源解析[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(3): 331-336.
- WANG S B, QIAN X Y, ZHAO G, et al. Contribution analysis of pollution sources around the Dianshan Lake[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(3): 331-336.
- [21] 张冬萍, 刘蓬, 刘琳, 等. 黄石市磁湖水水质时空分布及污染源解析[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(2): 560-566.
- ZHANG D P, LIU P, LIU L, et al. Temporal and spatial distribution of water quality and source apportionment in Cihu Lake, Huangshi City[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(2): 560-566.
- [22] 李响, 陆君, 钱敏蕾, 等. 流域污染负荷解析与环境容量研究——以安徽太平湖流域为例[J]. 中国环境科学, 2014, 34(8): 2063-2070.
- LI X, LU J, QIAN M L, et al. Study on pollution loading and water environmental capacity in watershed—A case study of Taiping Lake Basin, Anhui Province, China[J]. China Environmental Science, 2014, 34(8): 2063-2070.