

城市湖泊富营养化及氮磷平衡研究

——以湖北省黄石市青山湖1[#]湖区为例

施玉齐¹, 吴晓东^{1,2}, 葛绪广^{1,2}, 周梦蝶¹, 吴超¹, 秦愿¹, 谭亚¹

(1. 湖北师范大学 城市与环境学院, 湖北 黄石 435002; 2. 黄石市土壤污染防治重点实验室, 湖北 黄石 435002)

摘要: [目的] 监测分析湖北省黄石市青山湖上游区域水质状况, 为其生态修复提供依据。[方法] 以青山湖1[#]子湖区为例, 采用综合营养状态指数法对其富营养化水平进行评价, 依据物质平衡原理估算出青山湖上游区域氮磷收支状况。[结果] ①青山湖上游区域水体总氮、总磷年均浓度为2.45, 0.200 mg/L; ②青山湖上游区域水体达到中度富营养化水平; ③上游来水是氮磷入湖主要来源; ④氮入湖总量6 115.40 kg/a, 出湖总量1 939.51 kg/a; ⑤磷入湖总量411.14 kg/a, 出湖量总量198.21 kg/a; ⑥总磷、总氮截留率分别为68.28%, 51.79%。[结论] 为防止青山湖上游区域富营养化程度加重, 建议对上游来水采用生态浮床的措施, 在净化水质, 达到外源清水入湖的同时还能改善景观。在排口附近湖水区域, 可采取高效原位强化净化处理措施。

关键词: 湖泊生态; 青山湖上游区域; 富营养化评价; 氮磷平衡; 氮磷负荷量

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)03-0208-08

中图分类号: X832

文献参数: 施玉齐, 吴晓东, 葛绪广, 等. 城市湖泊富营养化及氮磷平衡研究[J]. 水土保持通报, 2020, 40(3): 208-215. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.03.030; Shi Yuqi, Wu Xiaodong, Ge Xuguang, et al. A study on eutrophication and balance of nitrogen and phosphorus in urban lakes [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(3): 208-215.

A Study on Eutrophication and Balance of Nitrogen and Phosphorus in Urban Lakes

—Taking No. 1 Area of Qingshan Lake in Huangshi City, Hubei Province as a Case

Shi Yuqi¹, Wu Xiaodong^{1,2}, Ge Xuguang^{1,2}, Zhou Mengdie¹, Wu Chao¹, Qin Yuan¹, Tan Ya¹

(1. College of Urban and Environmental Sciences, Hubei Normal University, Huangshi, Hubei 435002, China; 2. Huangshi Key Laboratory of Soil Pollution and Control, Huangshi, Hubei 435002, China)

Abstract: [Objective] The water quality in the upper area of Qingshan Lake in Huangshi City, Hubei Province was monitored and analyzed to provide a basis for its ecological restoration. [Methods] Taking No. 1 area of Qingshan Lake as a case study, using a comprehensive trophic status index, the state of eutrophication in upper area of Qingshan Lake was evaluated, and the nitrogen and phosphorus balance was estimated according to the material balance principle. [Results] ① The concentration of total nitrogen and total phosphorus reached 2.45 and 0.200 mg/L, respectively. ② The water quality of Qingshan Lake reached a level of moderate eutrophication. ③ The input of P and N mainly came from the upper stream. ④ The total input amount of N was 6 115.40 kg per year, and the total output amount of N was 1 939.51 kg per year. ⑤ The total input amount of P was 411.14 kg per year, and the total output amount of P was 198.21 kg per year. ⑥ The rates of retained N and P were 68.28% and 51.79%, respectively. [Conclusion] According to the results, to prevent the eutrophication of Qingshan Lake, an ecological floating bed for the upstream water should be adopted, which will simultaneously purify the water and improve the landscape. In the lake water area near the discharge outlet, high-efficiency in situ enhanced purification measures could be adopted.

Keywords: lake ecology; the upper area Qingshan Lake; eutrophication assessment; balance of nitrogen and phosphorus; load of nitrogen and phosphorus

收稿日期: 2020-02-07

修回日期: 2020-03-31

资助项目: 湖北省教育厅项目“水位对沉水植物生长和光合荧光特性的影响”(Q20182502), “湖泊沉积物中重金属对矿产资源开发的响应及其迁移转化研究: 以大冶湖为例”(D20152503); 湖北师范大学湖泊流域重金属污染机理与生态修复创新团队项目和湖北省大学生创新创业训练计划项目(S201910513301, S201910513002)

第一作者: 施玉齐(1997—), 女(汉族), 湖北省枣阳市人, 硕士研究生, 研究方向为环境工程。Email: 1191847623@qq.com。

通讯作者: 吴晓东(1985—), 男(汉族), 福建省三明市人, 博士, 讲师, 主要从事湖泊污染控制与生态修复研究。Email: wuxd03@163.com。

近年来,中国湖泊流域人口增加,经济发展迅速,使湖泊周边污染不断加重,大量营养盐入湖,湖泊富营养化程度提高,严重威胁湖泊生态安全^[1]。其中,长江中下游地区是中国湖泊最为集中的区域之一,该区域湖泊富营养化问题尤为突出,而城区湖泊入湖污染物的含量远比位于农村湖泊高^[2-3]。湖泊富营养化是指在自然因素和人为因素相互作用下,大量营养盐进入湖泊使得湖泊转变成生产力较高的营养状态,导致湖泊中藻类大量繁殖,产生异味,湖泊深处溶解氧降低和鱼类大量死亡等现象^[4]。从人类生产生活层面来说,湖泊还肩负着水产养殖、旅游、娱乐等经济价值和文化价值。因此,研究湖泊富营养化问题无论是从社会还是环境角度出发都具有重要意义。治理湖泊富营养化的首要任务是对湖泊目前所处的营养状态进行评价以及研究导致湖泊富营养化的物质。

富营养化评价属于水环境质量评价的一方面。具体来说,在水体富营养化发展过程中,根据湖泊产生的富营养化现象,归纳总结出影响其现象发生的代表性指标,再针对具体某一阶段的富营养化状况,对代表性指标定性定量分析描述,以确定该阶段的富营养化水平^[5-6]。但湖泊富营养化种类和富营养化进程的时间不同,可能导致最适评价方法的选择不同^[7]。目前国际上湖泊富营养化评价方法类型多样,尚未达到统一的评价标准或模型^[8]。富营养化评价最初的方法是采用影响水体富营养化的单一指标进行评价,又称单因子指数法^[9]。后来,随着研究者对湖泊综合性富营养化评价要求的提出,多种因子组合评价的方法逐渐涌现。例如以一种指标为基准,计算其它指标权重的卡尔森指数法和修正后的综合营养状态指数法、以数理统计为基础的模糊综合评价法、灰色关联法、以人工神经网络为理论基础的评价方法、主成分分析法、遥感技术法和评分法等^[10]。近年来,结合实地监测和遥感监测的两种方式,对湖泊进行富营养化综合评价,已成为国内外学者的研究热点^[11]。如殷守敬提出一种将地面观测数据的空间插值和遥感反演有机结合的评价方法,获得巢湖富营养化的空间分布状态^[12]。Kallio K等^[13]利用 ATSA 数据对芬兰两个湖泊的叶绿素 a 浓度进行遥感反演,得到了叶绿素 a 浓度在连续两天时间内的空间位置变化。目前湖泊富营养化评价的方法主要有营养状态指数法(TSD)、综合营养状态指数(TLI)、单因子评价法、主成分分析法等^[8,14]。

造成湖泊富营养化的物质有 20 多种,其中氮和磷是最重要的影响因素^[15]。20 世纪 60 年代,经济合作与发展组织对美国北部和加拿大南部的部分湖泊

的富营养化过程进行全面调查研究后,将氮磷输入和富集作为湖泊富营养化发生的主要原因^[16]。近几十年,定性定量的研究氮磷循环过程平衡关系成为重要研究课题^[17]。湖泊中氮磷物质主要是在水体、底泥和生物体中迁移和转化的,包括源过程、去除过程以及湖泊截留过程。湖泊水体中的氮磷通过以上 3 种循环过程,维持湖泊水体健康。但大量氮、磷的输入和累积会改变湖泊内营养盐的通量平衡,增加富营养化的风险^[18]。湖泊氮磷源过程主要包括:外源负荷输入、底泥释放、生物固氮、大气干湿沉降。湖泊中氮磷去除有以下方式:随出湖河流流出,反硝化作用,人工输出和水气界面交换等。氮磷的主要滞留途径有:沉淀、生物作用。反硝化作用去除是湖泊总氮去除的最主要的方式,湖泊中磷的去除方式主要依靠人工输出。在湖泊氮磷循环过程中,各循环过程并非独立存在,如藻类生长存在,受到氮磷共同限制作用以及湖体磷浓度的改变对氮去除的影响等^[19]。研究湖泊生态系统氮磷循环的各个过程,对于湖泊修复治理极其重要。

湖北省黄石市属于老工矿城市,近年来工矿城市的各种环境问题备受关注。青山湖位于黄石市黄石港区,属于典型的城市湖泊,长江中游一级湖泊,对黄石市蓄洪防洪、小区域生态调节有着不可替代的作用。青山湖在不同时期水质变化较大,黄石政府先后多次对青山湖进行了治理,环境有所改善,但并没有达到非常理想的效果^[20-21]。因此,本研究选取位于湖北省黄石市城区的青山湖 1[#]湖区,基于基础指标数据,研究其富营养化等级和氮磷入湖出湖负荷,以期为其生态修复提供依据,并具有重要的理论和实践意义。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

青山湖位于湖北省黄石市黄石港区,东经 115°02'41"—115°04'06",北纬 30°13'46"—30°14'29",黄石第二大的自然内湖,长江一级湖泊,对黄石市蓄洪防洪、小区域生态调节有着不可替代的作用。青山湖由 4 个子湖构成,从西向东编号为 1[#], 2[#], 3[#], 4[#]湖。20 世纪 70 年代以前,水体较清,水质较好。后来随着黄石市的工业建设推进与城市化的不断发展,青山湖周边污染物进入水体,使青山湖受到严重污染。20 世纪 90 年代末,黄石市政府针对青山湖污染现状,实施了一系列措施,如建设污水处理厂,农场整治,修复湖泊两岸的生态环境以及景观等^[20]。近年来,又对青山湖 1[#]湖区实施了底泥清淤工程,但污染物去除效

果并不显著^[21]。至今,水质较差,湖水仍较浑浊。

本文主要研究青山湖 1[#] 湖区,位于整个青山湖的上游,湖区西面为湖滨大道,东面为居民点,北面为公园路,南面为校园林业用地。由于长期接纳周边各类污染物的排放,水质污染严重,其水环境状况将直接影响到其他湖区的水质及水环境健康。因而,在进行青山湖污染整治及生态修复过程中,应优先考虑 1[#] 湖区的修复,以保证上游清水对下游几个湖区的持续补给。

1.2 采样点布设

根据青山湖 1[#] 湖区水域状况及研究内容,在湖中设置了 9 个采样点(见图 1)。监测时间从 2018 年 1 月开始至 2018 年 12 月,逐月对青山湖 1[#] 湖区 9 个采样点进行常规水质指标定性定量采集。

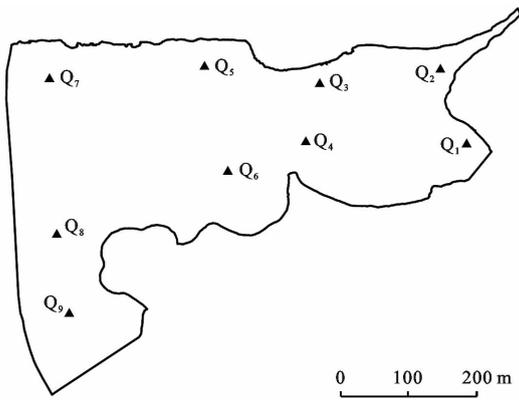


图 1 青山湖 1[#] 湖区采样点分布

1.3 样品采集与指标的测定

采样点水质监测方法参考《水和废水监测方法》(第四版)^[22]。水质监测指标为总磷(TP),总氮(TN),叶绿素 a(Chl. a),高锰酸盐指数(COD_{Mn}),透明度(SD)这 5 项基本指标。

1.4 数据处理及方法

1.4.1 水质评价方法 按原国家环保总局、国家质量监督检验检疫总局发布 GB3838-2002 地表水特定项目评价标准,判断 2018 年青山湖 1[#] 湖区水质状况。

1.4.2 富营养化评价方法 在监测指标数据的基础上,采用综合营养状态指数法对青山湖 1[#] 湖区富营养化状态进行评价,方法如下。

(1) 确定各水质参数的营养状态指数。

$$TLI(\text{Chl. a}) = 10 \times (2.5 + 1.086 \times \ln \text{Chl. a}) \quad (1)$$

$$TLI(\text{TP}) = 10 \times (9.436 + 1.624 \times \ln \text{TP}) \quad (2)$$

$$TLI(\text{TN}) = 10 \times (5.453 + 1.694 \times \ln \text{TN}) \quad (3)$$

$$TLI(\text{SD}) = 10 \times (5.118 - 1.94 \times \ln \text{SD}) \quad (4)$$

$$TLI(\text{COD}_{\text{Mn}}) = 10 \times (0.109 + 2.661 \times \ln \text{COD}_{\text{Mn}}) \quad (5)$$

(2) 相关加权综合营养状态指数。

$$TLI(\Sigma) = \sum_{j=1}^n \omega_j \times TLI(j) \quad (6)$$

式中: ω_j 为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重; $TLI(\Sigma)$ 为综合营养状态指数; $TLI(j)$ 为第 j 种参数营养状态指数。

(3) 富营养等级划分。根据 Carlson 理论,判断出相应的富营养化等级^[23]。

1.4.3 氮磷平衡估算方法 氮磷平衡估算以物质平衡原理为依据进行的,氮磷在湖泊中的转化过程为:输入-输出=贮存或损失,氮磷截留量为入湖量与出湖量的差值,已知截留量可进一步计算出氮、磷的截留率^[24]。

2 结果与分析

2.1 水质评价

2018 年青山湖 1[#] 湖区全湖平均透明度 0.33 m,总氮浓度 2.45 mg/L,总磷浓度 0.200 mg/L,高锰酸钾指数 8.23 mg/L,叶绿素 a 浓度 45.40 $\mu\text{g}/\text{L}$ 。总磷为劣 V 类,总氮为劣 V 类,高锰酸钾指数达 IV 类。2018 年青山湖 1[#] 湖区各采样点水质年均透明度范围为 0.31~0.35 m(见图 2),从图 2 中可看出 Q_7 采样点(青山湖 1[#] 湖区西北部湖区)附近透明度较高为(0.35 \pm 0.18 m), Q_5 采样点附近透明度最低为(0.31 \pm 0.17 m);总氮浓度范围为 2.18~2.97 mg/L(见图 3),从图 3 中可看出 Q_8 采样点附近总氮浓度最高为(2.97 \pm 1.48 mg/L), Q_8 采样点接近入湖口,出现浓度最高的原因可能受到入湖河流水质的影响,而上游副湖全湖平均总氮浓度 3.04 mg/L,均高于 1[#] 湖区各采样点总氮浓度。 Q_1 采样点位于湖区的南面,与校园林业用地接壤,污染相对较少,总氮浓度最低(2.18 \pm 1.20 mg/L);总磷浓度范围为 0.191~0.228 mg/L(见图 4),从图 4 中可看出 Q_2 采样点附近总磷浓度最高为(0.228 \pm 0.125 mg/L)。由 Q_2 采样点所在的地理位置分析,可能与东北角处居民点排出的生活污水有关。同样 Q_9 采样点附近与校园林业用地接壤,污染相对较少,总磷浓度最低为(0.191 \pm 0.101 mg/L);高锰酸盐指数为 7.72~8.83 mg/L(见图 5),从图 5 中可看出 Q_3 采样点附近高锰酸盐指数最高为 8.83 mg/L, Q_6 采样点附近高锰酸盐指数最低为 7.72 mg/L;叶绿素 a 浓度范围为 41.82~51.88 $\mu\text{g}/\text{L}$ (见图 6),从图 6 中可看出 Q_4 采样点附近叶绿素 a 最高为 41.82 $\mu\text{g}/\text{L}$, Q_8 采样点附近叶绿素 a 浓度最低为 51.88 $\mu\text{g}/\text{L}$ 。

青山湖 1[#] 湖区水体 TP, TN 浓度季节差异显著(见图 7)。TP 浓度在春季、夏季、秋季和冬季分别为

2.3 氮磷平衡估算

2.3.1 氮磷输入 根据文献分析可知,湖泊氮磷来源主要有以下几方面:上游来水,湖面降水,沿湖生活污水排放,水产养殖等农业生活用水和地下水带入等。经实地勘测调查走访发现,青山湖 1[#]湖区湖区西面为湖滨大道,东面为居民点,北面为公园路,南面为校园用地。从湖区周边土地利用类型分析可知,青山湖 1[#]湖区周边无工农业水产养殖等大型生产活动,地下水水量较少,因此该部分在计算青山湖 1[#]湖区氮磷输入时可忽略不计。由于老城区的历史遗留问题,未完成雨污分流,且西侧的污水处理厂处理能力有限,高峰期时,周边仍有少量生活污水来不及处理通过排污口直接入湖,成为青山湖 1[#]湖区氮磷来源之一。上游来水和湖面降水中携带的氮磷营养物质也可直接影响湖泊氮磷含量。故总结出进入青山湖 1[#]湖区的氮磷来源有:上游来水、湖面降水、雨污排口污水输入。下面将详细估算各部分氮磷输入负荷量。

(1) 湖面降水。2018 年湖面降雨输入的总磷总氮含量分别为 17.18,179.64 kg(见表 2)。已知青山湖 1[#]湖区的湖面面积为 $1.74 \times 10^5 \text{ m}^2$,查阅资料得知黄石市年均降水量为 1 441 mm,降水中总氮、总磷浓度多次试验测得的均值分为 0.72,0.069 mg/L,由此估算出降水中携带的总磷总氮含量^[25]。

(2) 上游来水。上游来水中输入总氮 3 751.88 kg/a,总磷 318.96 kg/a(见表 2)。青山湖 1[#]湖区入湖口处年均总氮、总磷浓度分别为 2.28,0.194 mg/L。实地调查发现,1,2,3,11,12 月在入湖口处未见明显水流变化,故计算入湖水量时只需估算 4—10 月入湖水量,其他月份可忽略不计。监测求得平均水流速度 0.007 5 m/s,入湖口横截面积 12.08 m²,由此估算出上游来水中携带氮磷总量。

表 2 2018 年青山湖 1[#]湖区湖面降雨、上游来水氮磷输入状况

来源	水量/ 10 ³ m ³	总氮浓度/ (mg · L ⁻¹)	总磷浓度/ (mg · L ⁻¹)	总氮量/ (kg · a ⁻¹)	总磷量/ (kg · a ⁻¹)
入湖口处	1 644.12	2.28	0.194	3 751.88	318.96
湖面降水	250.73	0.72	0.069	179.52	17.18

(3) 排口输入。实地调查得知青山湖 1[#]湖区雨污合流排口有 3 个,分别为 2[#]排口,3[#]排口,4[#]排口(见图 8),各雨污合流排口共计输入总氮含量 72.8 kg,总磷输入 2.5 kg(见表 3)。降雨期间,3 个雨污合流排口入湖污染物显著增加,雨水和生活污水通过 3 个排口直接入湖,成为青山湖氮磷输入的途径之一,雨水排口入湖水量较少,可忽略不计。

2018 年一场大约持续 12 h 的中到大雨历时内,

实测出各排口平均流速、排污口横截面积、总氮总磷浓度均值。由此估算出该场雨历时内,2[#]排口输入的总氮、总磷量大概为 13,0.4 kg;3[#]排口输入的总氮、总磷量大概为 22.3,0.7 kg;4[#]排口输入的总氮、总磷量大概为 37.5,1.4 kg,求和得到 3 个排口输入氮磷分别为 72.8,2.5 kg。从黄石气象局公布的气象资料查阅得知,2018 年类似雨量的降雨大约有 30 场,进一步估算出 2018 年青山湖由雨污排口输入的总氮、总磷含量分别为 2 184,75 kg。

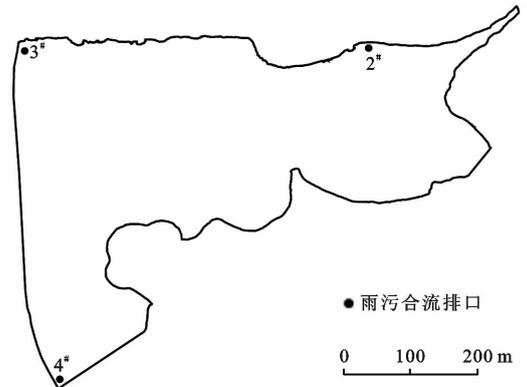


图 8 青山湖 1[#]湖区雨污合流排口分布

表 3 青山湖 1[#]湖区雨污合流排口氮磷输入状况

雨污合流排口	总氮/ (mg · L ⁻¹)	总磷/ (mg · L ⁻¹)	流量/ (m ³ · h ⁻¹)	总氮量/ kg	总磷量/ kg
2 [#]	11.88	0.361	93	13	0.4
3 [#]	20.88	0.663	89	22.3	0.7
4 [#]	20.17	0.751	155	37.5	1.4
总计	—	—	—	72.8	2.5

青山湖 1[#]湖区 2018 年入湖总氮负荷 6 115.40 kg,总磷负荷 411.14 kg,共计 6 526.54 kg(见表 4);其中上游来水中携带的总氮、总磷含量分别为 3 751.88,318.96 kg;雨污合流排口输入总氮、总磷含量分别为 2 184,75 kg;湖面降雨输入总氮、总磷含量分别为 179.53,17.18 kg;上游来水输入的总氮负荷占总量的 61.35%,总磷负荷占输入总量的 77.58%,氮磷负荷总量占比 62.37%。

表 4 青山湖 1[#]湖区氮磷输入负荷

负荷计算	湖面降雨	上游来水	雨污合流排口	总计
总氮负荷/(kg · a ⁻¹)	179.52	3 751.88	2 184.00	6 115.40
比例/%	29.36	61.35	35.71	100.00
总磷负荷/(kg · a ⁻¹)	17.18	318.96	75.00	411.14
比例/%	4.18	77.58	18.24	100.00
氮磷负荷总量/(kg · a ⁻¹)	196.70	4 070.84	2 259.00	6 526.54
比例/%	3.01	62.37	34.61	100.00

2.3.2 氮磷输出 青山湖 1# 湖区通过出湖河流输出总氮、总磷输出量为 1 939.51, 198.21 kg/a。由于青山湖 1# 湖区目前主要功能为城市蓄洪景观湖泊,不具有灌溉等农用生产功能,由此青山湖 1# 湖区出湖水是带走湖泊氮磷的主要方式,其他方式出湖的氮磷负荷较小,可忽略不计。类比上游来水的计算方法,实测出出湖口总氮年均浓度为 2.44 mg/L,总磷年均浓度 0.82 mg/L,平均流速 0.016 7 m/s 和入湖口横截面积 2.345 m²,由此估算氮磷输出量。

2.3.3 氮、磷的平衡计算 氮、磷截留量分别为 4 175.89, 212.93 kg/a,进一步计算出截留率为 68.28%, 51.79%(见表 5)。

表 5 青山湖 1# 湖区氮、磷截留量

污染物	入湖量/ (kg·a ⁻¹)	出湖量/ (kg·a ⁻¹)	截留量/ (kg·a ⁻¹)	截留率/ %
总氮	6 115.40	1 939.51	4 175.89	68.28
总磷	411.14	198.21	212.93	51.79

3 讨论

3.1 主要污染负荷来源

上游来水是城市湖泊的主要污染负荷来源。例如南京的玄武湖是典型的城市富营养化湖泊,入湖沟渠收纳的锁金村地区和紫金地区的雨水和生活污水成为其污染负荷的主要来源,同时也是加重湖泊富营养化的主要渠道^[26]。北京的昆明湖,由于上游官厅水库—永定河山峡段—永引—昆玉河输水沿线水质基本没有得到稀释自净,水质仍为较差,因此成为昆明湖出现明显富营养化的主要原因^[27]。云南省抚仙湖水质与 103 条入湖河流的水质和营养状态密切相关,得出影响抚仙湖入湖河流的主要污染因子是总磷和总氮,进而影响抚仙湖营养水平^[28]。

本文通过对青山湖 1# 湖区氮磷平衡的研究及污染负荷总量的分析结果得出相同结论,即上游副湖是青山湖 1# 湖区最大氮磷污染物负荷来源。副湖是青山湖 1# 湖区最主要的入湖水源。上游副湖全湖平均 TN 浓度为 3.04 mg/L, TP 浓度为 0.361 mg/L, TP 为劣 V 类, TN 为劣 V 类,水质较差。副湖周边仍有少量的农业生产废水和餐饮行业生活污水进入,进而影响下游青山湖 1# 湖区水质。2018 年青山湖 1# 湖区氮磷入湖总氮负荷 6 115.4 kg,总磷负荷 411.14 kg。上游来水中携带的总氮、总磷含量占青山湖 1# 湖区总氮总磷输入总量比例最高,分别为 61.35%, 77.58%。青山湖 1# 湖区湖区西面为湖滨大道,东面为居民点,北面为公园路,南面为校园用地。从数据和

湖区周边土地利用类型分析出青山湖 1# 湖区氮磷输入的主要来源为上游来水,由于受到周边农业生产和人类活动的影响,上游副湖水水质营养物质含量较高,成为青山湖 1# 湖区最大氮磷污染物负荷来源。雨污合流排口输入的氮磷含量占比次之,分别为 35.71%, 18.24%,成为第二大主要污染源。

青山湖 1# 湖区所在的黄石港区是老城区,由于历史原因,未完成雨污分流,且西侧的污水处理厂处理能力有限,高峰期时,周边仍有少量生活污水来不及处理通过排污口直接入湖,间接地加重了青山湖 1# 湖区的富营养化程度。这种合流制管道溢流污染已成为部分城市水体水质改善的主要制约因素之一,如巢湖市环城河内中心城区合流制排水系统中,雨天污水中 COD_{Mn}, TP, SS(悬浮物)以及 TN 一般是旱流污水的几倍之多,有时甚至是旱流污水的几十倍,加重了环城河水质的富营养化程度^[29]。镇江市老城区古运河水系,晴天和雨天雨污合流排口水质不同,并发现雨污合流排口污染控制工程可行性,有效降低了排入古运河的降雨径流的各项污染物指标,从而保护了古运河的水环境^[30]。青山湖 1# 湖区本身面积也比较小,加上城市建设对其水系的干扰,使得青山湖 1# 湖区与外界的交换能力和流动性较差。青山湖 1# 湖区属于城市湖泊,而城市湖泊具有较低的耐污染负荷能力,当外来营养盐和其他污染物大量输入和不合理开发利用时,会使得城市湖泊的很难恢复到之前状态^[31]。因此氮磷输入是造成湖泊富营养化的主要原因,特别是以青山湖为代表的城市湖泊,上游来水中携带的氮磷成为城市湖泊的主要污染负荷来源。通过减少上游来水中的总氮、总磷浓度,对降低青山湖 1# 湖区营养水平十分必要。

3.2 污染物质截留原因

氮磷平衡研究结果显示,总氮的截留率达到 68.8%,总磷的截留率达到 51.76%。这种现象的原因可能有两种:①通过上游来水、湖面降水、雨污合流排口入湖的氮、磷以溶解态的形式存在湖水中。虽然氮、磷在湖泊生态系统中有多种存在方式,但能被浮游植物利用的只有硝酸盐氮、氨氮、亚硝酸盐氮 3 种无机氮营养盐和溶解态的正磷酸盐^[32]。水生生物吸收利用溶解态的氮磷来促进自身的生长发育,降低水中溶解态的氮磷含量,使得少量氮磷截留。②大部分氮磷会以颗粒物吸附态的形式留存于湖底,被底泥截留下来,成为底泥一部分。国内外众多学者对湖泊底泥中氮、磷的释放规律以及底质中氮、磷的存在形态作了深入的研究,影响其释放的因素主要为温度、溶解氧、扰动状况、pH 值等。当温度升高,扰动增大,pH 值

升高时,湖泊中氮磷的释放通量增大^[31,33]。在环境适宜的条件下,底泥中被吸附的氮磷可能又被重新释放到水体中,再次污染湖泊水质,加重湖泊的富营养化程度。

青山湖 1[#] 湖区氮、磷的截留率较高,其原因可能与氮、磷的去除方式不多有关。氮磷元素所共有的去除过程有:①随出湖河流流出;②生物转化利用再由人工捕捞携带出湖;③通过鱼类运输、鸟类运输和浅层地下水运输流出湖泊水体。湖体中氮元素还能通过反硝化或厌氧氨氧化作用生成 N₂ 或 N₂O,以气体的形式离开湖泊生态系统。在众多氮的去除方式中,通过反硝化作用去除是湖泊总氮去除的最主要的方式,湖泊中磷的去除方式主要依靠人工输出^[19]。青山湖作为城市景观湖泊,无水产养殖等农业活动,所以人工输出较难,而鱼类运输、鸟类运输和浅层地下水运输 3 种方式氮磷出湖量较少,故大部分氮磷被水生植物或底泥截留下来。

3.3 治理建议

(1) 由于上游来水是青山湖 1[#] 湖区氮磷的主要来源,直接恢复沉水植物净化水质难度较大,尤其在深水区。建议采用生态浮床,在净化水质,达到外源清水入湖的同时,还能改善湖面景观。

(2) 建议对单纯的污水直排口和污水溢流口,进行封堵截污,以减少入湖污染源;针对雨水排口,可在排口附近湖水区域采取高效原位强化净化处理措施,可采用生物生态净化坝,以控制初期雨水对湖体的污染;对合流排口溢流口进行改造,减少入湖水量,并在排口附近水域采取原位强化处理措施以控制合流污水对湖体的污染。

(3) 由于青山湖 1[#] 湖区周边存在大量硬质护岸及石质基底,不仅不利于水生植物生长,而且也不利于对流域内面源污染的拦截。建议回填少量客土或疏挖底泥软化湖滨带,种植水生植物,促进水陆交错区物质循环,增加水体自净能力,提高水环境容量。后期滨水带的植物群落形成还能成为鸟类觅食地,可为其提供很好的栖息地。

4 结论与展望

黄石市青山湖 1[#] 湖区 2018 年全湖平均总磷为劣 V 类,总氮为劣 V 类,高锰酸钾指数为 IV 类,总体已达到中度富营养化水平。上游副湖输入总氮、总磷含量占青山湖 1[#] 湖区输入总量的 61.35%,77.58%,成为青山湖 1[#] 湖区氮磷的主要来源,雨污合流排口输入次之,进而加重了青山湖 1[#] 湖区的富营养化。从全湖整体来看,总磷年均浓度最高点出现在湖区东北

角居民点附近,可能与居民点排出的生活污水有关。受上游副湖的水质的影响,入湖口附近总氮年均浓度最高,而湖区总磷总氮年均浓度最低点均与污染相对较少的校园林业用地接壤。2018 年全年总氮入湖总量为 6 115.40 kg,总磷入湖总量为 411.14 kg,总氮出湖总量为 1 939.51 kg,总磷为 198.21 kg,截留率分别为 68.28%,51.79%。通过上游来水、湖面降水、雨污合流排口入湖的氮、磷以溶解态的形式存在湖水中或大部分氮磷会以颗粒物吸附态的形式留存于湖底,被底泥截留下来,成为底泥一部分。作为城市景观湖泊,在氮磷平衡机制中,氮磷输出的主要途径为出湖河流输出和氮素反硝化作用,去除方式相对较少,进一步导致大部分氮磷被水生植物或底泥截留下来。为防止青山湖 1[#] 湖区富营养化程度加重,逐步实现水质改善和生态系统恢复,建议对上游来水采用生态浮床,在净化水质,达到外源清水入湖的同时还能改善景观。建议加强入湖管网雨污分流,在短期内无法改造的情况下,可在排口附近湖水区域,采取高效原位强化净化处理措施。

本文采用的基础指标数据,还存在一定人为误差。在以后的研究中可将传统观测数据与遥感等前沿手段结合,使得评价结果更具有准确性、省时性和时空同步性等特点。本文对青山湖 1[#] 湖区氮磷平衡的研究,从主要的输入来源、输出途径进行估算,准确性还需提高。在进一步的相关研究中,应深入探讨氮磷平衡过程。

【参 考 文 献】

- [1] 李娜,黎佳茜,李国文,等. 中国典型湖泊富营养化现状与区域性差异分析[J]. 水生生物学报,2018,42(4):854-864.
- [2] 罗建波,王科朴,李应仁,等. 长江中下游三个湖泊型保护区富营养化状况评价[J]. 湖北农业科学,2019,58(16):28-31,48.
- [3] 朱广伟,许海,朱梦圆,等. 三十年来长江中下游湖泊富营养化状况变迁及其影响因素[J]. 湖泊科学,2019,31(6):1510-1524.
- [4] 吴锋,战金艳,邓祥征,等. 中国湖泊富营养化影响因素研究:基于中国 22 个湖泊实证分析[J]. 生态环境学报,2012,21(1):94-100.
- [5] Yao Jiping, Wang Guoqiang, Xue Baolin, et al. Assessment of lake eutrophication using a novel multidimensional similarity cloud model [J]. Journal of Environmental Management, 2019,248:109-259.
- [6] 蔡庆华. 湖泊富营养化综合评价方法[J]. 湖泊科学,1997,9(1):89-94.
- [7] 金相灿,屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 2 版. 北

- 京:环境科学出版社,1960:12-13.
- [8] 王军,茅忠华. 湖泊富营养化评价方法研究[J]. 山西建筑,2019,45(21):144-146.
- [9] 刘晓丹,单凤霞,刘珩. 珠江流域五大高原湖泊近10年水质状况及变化趋势分析[J]. 环境科学导刊,2017,36(6):38-42.
- [10] 梁伟林. 湖泊富营养化评价方法研究及其系统设计[D]. 成都:电子科技大学,2017:17-33.
- [11] Chawira M, Dube T, Gumindoga W. Remote sensing based water quality monitoring in Chivero and Manyame lakes of Zimbabwe [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2013,66(8):38-44.
- [12] 殷守敬,吴传庆,王晨,等. 综合遥感与地面观测的巢湖水体富营养化评价[J]. 中国环境监测,2018,34(1):157-164.
- [13] Kallio K, Koponen S, Pulliainen J. Feasibility of airborne imaging spectrometry for lake monitoring: A case study of spatial chlorophyll a distribution in two meso-eutrophic lakes [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003,24(19):3771-3790.
- [14] 王明翠,刘雪芹,张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准[J]. 中国环境监测,2002,18(5):47-49.
- [15] Xu Hai, Paerl H W, Qin Boqiang, et al. Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China [J]. *Limnology and Oceanography*, 2010,55(1):420-432.
- [16] Pineros M A, Magalhaes J V, Alves V M C, et al. The physiology and biophysics of an aluminum tolerance mechanism based on root citrate exudation in maize [J]. *Plant Physiology*, 2002,129(3):1194-1206.
- [17] 刘伟,晏娟. 富营养化湖泊治理研究综述[J]. 安徽农学通报,2014,20(8):121-122.
- [18] Sun Bo, Zhang Linxiu, Yang Linzhang, et al. Agricultural non-point source pollution in China: Causes and mitigation measures [J]. *Ambio*, 2012,41(4):370-379.
- [19] 吴桢,吴思枫,刘永,等. 湖泊氮磷循环的关键过程与定量识别方法[J]. 北京大学学报(自然科学版),2018,54(1):218-228.
- [20] 乐静,袁莉. 关于黄石市青山湖水污染治理的思考[J]. 科技创业月刊,2010,23(3):133-134.
- [21] 王振,马敏,肖文胜. 黄石市青山湖1#湖区清淤施工前后水质动态变化的分析[J]. 湖北理工学院学报,2013,29(6):20-25.
- [22] 魏复盛. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京:中国环境科学出版社,2002:223-671.
- [23] 张辉,杨雄. 综合营养状态指数法在巢湖水体富营养化评价中的应用[J]. 安徽农学通报,2018,24(9):84-87.
- [24] 范麦妮,李杰. 抚仙湖氮磷污染负荷物质平衡计算[J]. 环境科学导刊,2016,35(3):44-47.
- [25] 陈幼姣,刘光辉. 黄石市近60a降水时空分布特征分析[J]. 暴雨灾害,2018,37(6):543-548.
- [26] 冯冰冰,王国祥,杨文斌. 南京玄武湖污染源调查与分析[J]. 安徽农业科学,2007,35(28):8963-8964.
- [27] 李海燕,黄延,吴根. 昆明湖水水质变化分析及污染控制对策[J]. 水资源保护,2007,23(5):18-20.
- [28] 杨淑香. 浅析抚仙湖主要入湖河流污染物特征[J]. 环境科学导刊,2019,38(S1):62-65.
- [29] 赵庆豪. 雨天合流制排水系统水质水量调查与分析[D]. 武汉:武汉理工大学,2013:12-23.
- [30] Huang Yongqiang, Shi Kai, Zhu Yan, et al. Pollution control of outfall of rainwater-sewage confluence in old town [J]. *Journal of Southeast University (English Edition)*, 2014,30(2):230-233.
- [31] 彭俊杰,李传红,黄细花. 城市湖泊富营养化成因和特征[J]. 生态科学,2004,23(4):370-373.
- [32] 张艳艳. 浙沪三湖富营养化特征分析及其影响因子识别研究[D]. 上海:华东师范大学,2016:22-68.
- [33] 苏丽丹,林卫青,杨扬帆,等. 淀山湖底泥氮、磷释放通量的研究[J]. 环境污染与防治,2011,33(5):32-35.

(上接第201页)

- [16] 张静. 陕南土地景观动态与生态风险变化研究[D]. 西安:陕西师范大学,2018.
- [17] 许学工,林辉平,付在毅,等. 黄河三角洲湿地区域生态风险评价[J]. 北京大学学报(自然科学版),2001,37(1):111-120.
- [18] 王玲. 基于土地利用变化的上海市生态风险评价[J]. 农业科学研究,2018,39(1):10-16.
- [19] 林媚珍,葛志鹏,纪少婷,等. 中山市土地利用变化及其生态风险响应[J]. 生态科学,2016,35(5):96-104.
- [20] 于化龙,陈青锋,田超,等. 基于景观结构的土地利用生态空间特征及风险评估:以怀来县为例[J]. 水土保持研究,2016,23(3):155-163.
- [21] 曹玉红,陈晨,张大鹏,等. 皖江城市带土地利用变化的生态风险格局演化研究[J]. 生态学报,2019,39(13):4773-4781.
- [22] 马世五,谢德体,张孝成,等. 三峡库区重庆段土地生态状况时空格局演变特征[J]. 生态学报,2018,38(23):8512-8525.