

2015—2019 年武汉市湖泊水质时空变化^{*}

代晓颖¹, 徐 栋^{1,2**}, 武俊梅^{2,4}, 丰 俊¹, 邹书成³, 尹 珩¹

(1: 武汉市环境保护科学研究院, 武汉 430015)

(2: 中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072)

(3: 武汉市环境监测中心, 武汉 430015)

(4: 中国地质大学(武汉)湖北省水环境污染系统控制和治理工程技术研究中心, 武汉 430074)

摘 要: 为探究“十三五”期间武汉市湖泊水质变化特征及规律, 分析当前武汉市湖泊水环境的主要问题及成因, 为武汉市水生态环境保护“十四五”规划提供科学支撑, 以武汉市 166 个湖泊为研究对象, 根据武汉市环境监测中心 2015—2019 年对各个湖泊的监测数据, 采用水质综合污染指数、富营养化状态评价、动态度分析方法, 对武汉市湖泊水环境进行综合评价。结果表明: 1) 2015—2019 年武汉市湖泊水质总体好转, 2019 年全市湖泊综合污染指数较 2015 年下降 7.74%, 多数湖泊营养状态呈现稳中向好趋势, 但湖泊水质较难实现持续改善。2) 武汉市湖泊主要超标污染物总磷、氨氮、化学需氧量和高锰酸盐指数平均质量浓度在 2015—2019 年间均呈下降趋势, 但 2019 年有 47% 湖泊总磷浓度劣于 IV 类评价标准, 磷元素是制约湖泊水质的主要因素。3) 2015—2019 年武汉市中心城区湖泊综合污染指数下降, 湖泊富营养化状态好转, 但青山北湖、南湖等湖泊综合污染指数较高, 排口排污、底泥内源污染是影响中心城区湖泊水质的主要因素。新城区湖泊水质改善仍面临一定压力, 东西湖水系重度富营养化湖泊数量增多, 后湖水系湖泊综合污染指数上升, 农业面源、工业生产对新城区湖泊水质影响较大, 湖泊破碎化导致的自净能力降低也是影响湖泊水质的重要因素。

关键词: 武汉市; 湖泊; 富营养化; 综合污染指数; 动态度

Spatiotemporal variations of water quality of lakes in Wuhan from 2015 to 2019^{*}

Dai Xiaoying¹, Xu Dong^{1,2**}, Wu Junmei^{2,4}, Feng Jun¹, Zou Shucheng³ & Yin Heng¹

(1: *Wuhan Institute of Environmental Protection Science, Wuhan 430015, P.R.China*)

(2: *State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, P.R.China*)

(3: *Wuhan Environmental Monitoring Center, Wuhan 430015, P.R.China*)

(4: *Hubei Provincial Engineering Research Center of Systematic Water Pollution Control, China University of Geosciences, Wuhan 430074, P.R.China*)

Abstract: To explore the variation trend of water quality of lakes in Wuhan during the 13th Five-Year Plan period, analyze the main problems and causes of the water environment of lakes in Wuhan, and provide scientific support for the 14th Five-Year Plan of water environment protection in Wuhan, 166 lakes were selected as the research objects. Based on the monitoring data of each lake from 2015 to 2019 derived from the Wuhan Environmental Monitoring Center, the comprehensive pollution index, eutrophication analysis, dynamic degree analysis and other methods were used to evaluate the water environment of lakes in Wuhan. The results showed that: 1) The water quality of lakes in Wuhan was generally improved. The comprehensive pollution index of lakes decreased by 7.74% compared with that in 2015, and the eutrophication status of most lakes showed a trend of improvement. However, it was difficult to achieve continuous improvement of the water quality of those lakes. 2) The average concentrations of total phosphorus (TP), ammonia nitrogen, COD_{Cr} and COD_{Mn} showed a downward trend from 2015 to 2019, but the average concentrations of TP of 47% of the lakes were inferior to the class IV evaluation standard. The phosphorus was the main factor restricting the

^{*} 2020-09-27 收稿; 2021-01-16 收修改稿。

长江生态环境保护修复联合研究一期项目(2019-LHYJ-01-0208-21)资助。

^{**} 通信作者; E-mail: xudong@ihb.ac.cn.

water quality of the lakes. 3) From 2015 to 2019, the comprehensive pollution index of lakes in the central districts of Wuhan decreased, and the eutrophication status was improved. Nevertheless, the comprehensive pollution index of Qingshanbei Lake and South Lake was relatively high, and the main factors affecting the water quality of lakes in the central districts were the discharge from the outlet and internal pollution of sediment. The improvement of water quality of lakes in the suburban area was still under stress, which resulted from agricultural non-point source pollution and industrial production. More lakes entered a serious eutrophication status in the Dongxihu Lake system, and the comprehensive pollution index of lakes in the Houhu Lake system increased. The decrease of self-purification ability caused by lake fragmentation was also an important factor affecting water quality.

Keywords: Wuhan; lake; eutrophication; comprehensive pollution index; dynamic degree

武汉市拥有 166 个面积大于 0.05 km^2 的湖泊,素有“百湖之市”的美称,湖泊水域蓝线控制面积为 867.07 km^2 . 湖泊是武汉市最具特色的自然资源,不仅具有休闲娱乐、科研教育的社会价值,更具有调蓄洪涝、供应水源、气候调节等生态功能. 然而近几十年来随着城市化进程的不断推进,大量营养盐等污染物排入湖泊水体,导致湖泊水质下降、蓝藻暴发,湖泊富营养化问题突出^[1-3],湖泊的生态功能受到威胁. 根据《2005 年武汉市环境状况公报》,2005 年武汉市 V 类及劣 V 类湖泊占比达 61.2%^[4],中心城区湖泊水环境问题突出. 随着生态环境保护理念的加强,2006—2009 年间“清水入湖”工程、生态式水质净化工程等相继实施,此后湖泊水质恶化趋势得到一定遏制^[5]. 在武汉市生态环境保护“十三五”规划实施期间,通过出台“一湖一策”等系列政策文件,推进黑臭水体工程整治、城镇污水处理设施建设等项目的实施^[6-7],开展了系统的水污染防治工作,水生态环境保护取得进一步成效,但部分区域水环境污染问题仍然存在.

2014 年武汉市被列为第二批全国水生态文明城市建设试点市,湖泊水环境是武汉市水生态文明建设的重要部分. 科学分析“十三五”期间武汉市湖泊水质变化特征,是“十四五”期间进一步改善湖泊水环境的前提,也将为 2035 年美丽中国目标的实现打下基础. 目前应用较多的湖泊水质评价方法有单因子评价法、综合污染指数法、模糊综合评价法、主成分分析法等^[8-11]. 现有针对湖泊水环境的研究多以单个湖泊为研究对象,综合评价判断湖泊水质变化^[12-14];或从具体水质指标的角度对湖泊水环境质量时空变化进行分析^[15-17],较少有对大范围内的多个湖泊水质进行时空变化研究. 本文以武汉市 166 个湖泊为研究对象,分析 2015—2019 年间水质变化趋势,重点分析其空间变化特征,定性与定量相结合来识别武汉市湖泊目前存在的主要问题,探讨武汉市水环境污染的影响因素,为评估“十三五”以来武汉市湖泊水质总体变化,进一步有针对性地制定及实施湖泊水环境改善策略提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

武汉市($29^{\circ}58' \sim 31^{\circ}22' \text{N}$, $113^{\circ}41' \sim 115^{\circ}05' \text{E}$)是国家中心城市,湖北省省会城市,长江经济带沿线重要节点城市,全市总面积 8569.15 km^2 . 2019 年末全市常住人口 1121.20 万人,全市实现地区生产总值(GDP) 16223.21 亿元. 武汉地处江汉平原东部,属于亚热带季风性湿润气候,全市地势平坦,中间低平,南北低山丘陵隆起. 长江及其最大支流汉江在武汉交汇,市内河港沟渠交织,湖泊库塘星罗棋布,全市水域面积 2117.6 km^2 ,约占总面积的四分之一. 全市列入保护目录的湖泊共 166 个,长江南岸主要有东湖、汤逊湖等,长江北岸主要有涨渡湖、后官湖等^①.

1.2 采样方法

水质数据来源于武汉市环境监测中心在 2015—2019 年对 166 个湖泊的监测数据,根据湖泊面积大小等因素,每个湖泊设置 1~11 个采样点不等(图 1). 对南湖、汤逊湖、东湖等 89 个湖泊进行逐月采样,取月均监测数值代表年湖泊水质状况,对崇仁湖、巨龙湖、西赛湖等 77 个湖泊每年丰水期(6—9 月)监测 1 次. 监测指标包括 24 项地表水常规指标,本文选取溶解氧(DO)、pH、化学需氧量(COD_{Cr})、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、生化需氧量(BOD)、总磷(TP)、总氮(TN)和氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$) 8 项指标作为湖泊水质分析评价的主要指标.

① 武汉市自然资源及社会经济数据来源于《武汉年鉴(2020)》及《2019 年武汉市国民经济和社会发展统计公报》.

1.3 数据处理与评价方法

1.3.1 湖泊水质类别评价 湖泊水质类别现状依据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中相应类别标准,进行单因子评价. 湖泊水体富营养化状况按照湖泊营养状态指数及分级标准^[18]计算与评价.

1.3.2 综合污染指数分析 采用综合污染指数法对湖泊水质进行综合评价,计算公式如下^[19-20]:

$$P_i = \frac{C_i}{L_i} \quad (1)$$

$$P = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n P_i \quad (2)$$

式中, P_i 为水质因子 i 的污染指数; C_i 为水质因子 i 的实测浓度,mg/L; L_i 为《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中水质因子 i 的Ⅲ类标准值,mg/L; n 为水质因子个数; P 为综合污染指数.

由于湖泊中 DO 浓度越高,表明水质越好^[21],故 DO 污染指数计算公式为:

$$P_i = 0, C_i \geq 8 \quad (3)$$

$$P_i = 1 - \frac{C_i - L_i}{L_i}, 4 \leq C_i < 8 \quad (4)$$

$$P_i = 1 + (L_i - C_i), C_i < 4 \quad (5)$$

湖泊酸碱度计算公式为:

$$P_i = \frac{7 - C_i}{7 - L_x}, C_i \leq 7 \quad (6)$$

$$P_i = \frac{C_i - 7}{L_s - 7}, C_i > 7 \quad (7)$$

式中, L_x 为 pH 下限值, L_s 为 pH 上限值.

1.3.3 动态度分析 依据湖泊不同时期的综合污染指数,采用动态度分析方法^[22]对湖泊水质研究期内变化程度进行分析. 计算公式为:

$$S = \frac{P_m - P_n}{P_n} \times 100 \quad (8)$$

式中, S 为研究期内湖泊综合污染指数动态度, P_m 为研究最终年份 m 湖泊综合污染指数, P_n 为研究初始年份 n 湖泊综合污染指数. 当 $m-n=1$ 时, S 代表年动态度.

2 结果与分析

2.1 2015—2019 年武汉市湖泊水质的时间变化特征

武汉市 166 个湖泊中,150 个湖泊在区界以内,16 个湖泊属于跨区湖泊,为易于进一步分析,将跨区湖泊划入其所占面积最大的区内. 2019 年武汉市Ⅲ类及以上湖泊相较 2015 年增加 57.14%,劣 V 类湖泊减少约 18.92%. 2015 年全市湖泊综合污染指数均值为 0.9684,2019 年为 0.8935,与 2015 年相比下降 7.74%,湖泊水环境质量总体出现一定程度的好转.

根据 2015—2019 年湖泊水质综合污染指数年动态度与总体动态度的特征,将武汉市湖泊水质变化趋势分为 4 种类型(表 1). 2015—2019 年南湖等 3 个湖泊综合污染指数年动态度均为负值,表明湖泊水质在此期间持续好转. 2015—2019 年外沙湖等湖泊综合污染指数总体动态度为负,年动态度有正有负,表明湖泊水质总体呈好转趋势,但水质不能实现稳定改善,期间出现波动. 2015—2019 年汤逊湖等湖泊综合污染指数总

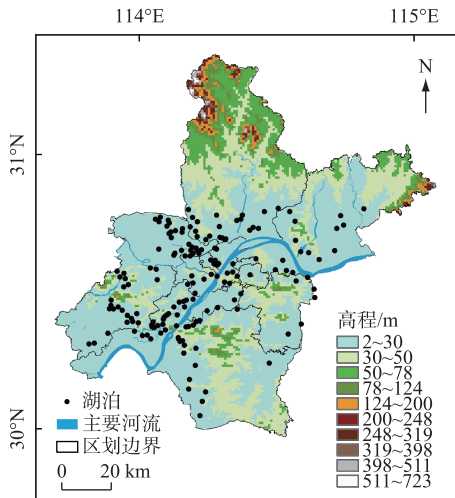


图 1 武汉市地形及湖泊分布
Fig.1 Landform and lakes in Wuhan

体动态度为正,年动态度有正有负,表明水质总体呈波动变差的趋势. 2015—2019 年汉阳墨水湖水质综合污染指数年动态度均为正值,水质持续变差. 总体来说,2015—2019 年水质总体呈现好转的湖泊多于水质总体变差的湖泊,且水质持续变差的湖泊极少,“十三五”期间湖泊水环境治理取得一定成效. 但水质稳定好转的湖泊较少,实现湖泊水质持续向好较为困难.

表 1 2015—2019 年武汉市湖泊水质变化趋势*

Tab.1 The variation trend of water quality of lakes in Wuhan from 2015 to 2019

水质变化趋势	水质变化特点	湖泊个数	代表湖泊
持续向好	综合污染指数年动态度均为负值	3	南湖、曲背湖、坛子湖
波动向好	综合污染指数总体动态度为负,年动态度有正有负	87	外沙湖、水果湖、涨渡湖等
波动变差	综合污染指数总体动态度为正,年动态度有正有负	70	汤逊湖、青山北湖、后官湖等
持续变差	综合污染指数年动态度均为正值	1	汉阳墨水湖

* 2015 年西湖和道士湖未进行监测,2019 年张毕湖、西赛湖、李家大湖未进行监测,因此未进行横向分析.

如表 2 所示,相较于 2015 年,2019 年共有 38 个湖泊营养状态好转,93 个湖泊营养状态保持稳定,30 个湖泊营养状态恶化,5 个湖泊因实施治理工程无法比较. 2015 年重度富营养湖泊中有 6 个到 2019 年转为轻度富营养湖泊,有 5 个转为中度富营养湖泊,2015 年重度富营养湖泊营养状态均得到有效改善. 2015 年轻度富营养湖泊中近 80% 营养状态稳中逐步好转,中度富营养湖泊中超过 90% 营养状态稳中逐步好转. 与 2015 年相比,2019 年中营养及轻度富营养湖泊数量增多,占比超过 60%. 从湖泊营养状态来看,“十三五”期间武汉市湖泊总体呈向好趋势,但仍有青山北湖、金湖、后湖等部分湖泊富营养化状态恶化. 湖泊富营养化主要源于氮磷营养物、耗氧有机物等污染物的输入.

表 2 2015—2019 年武汉市湖泊营养状态转移矩阵*

Tab.2 Transfer matrix of eutrophication status of lakes in Wuhan from 2015 to 2019

		2019 年			
		中营养	轻度富营养	中度富营养	重度富营养
2015 年	中营养	8	6	3	0
	轻度富营养	7	51	14	2
	中度富营养	4	16	34	5
	重度富营养	0	6	5	0

* 数据为湖泊数量.

2015—2019 年武汉市湖泊总磷平均质量浓度主要呈现下降趋势(图 2a),但 2019 年仍有 47% 的湖泊总磷浓度劣于Ⅳ类评价标准,湖泊总磷平均质量浓度(0.14 mg/L)不能达到Ⅳ类评价标准,北太子湖、墨水湖等 25 个湖泊总磷浓度不能达到Ⅴ类评价标准,仅内沙湖总磷满足Ⅱ类评价标准.

2015—2019 年武汉市湖泊氨氮平均质量浓度变化趋势与总磷相似(图 2b). 2019 年平均质量浓度在 5 年中最低,2019 年只有约 14% 的湖泊不能达到Ⅲ类评价标准. 2015—2019 年武汉市湖泊化学需氧量平均质量浓度略有波动(图 2c),2019 年明显下降,2019 年化学需氧量不能达到Ⅳ类评价标准的湖泊占比为 22%. 2015—2019 年武汉市湖泊高锰酸盐指数平均质量浓度波动幅度较为明显(图 2d),2015—2017 年平均质量浓度逐年下降,2018 明显上升,2019 年小幅下降. 2015—2019 年武汉市湖泊主要污染物浓度总体均呈下降趋势,磷元素始终是制约湖泊水质的主要因子,耗氧有机污染物、氮元素次之. 磷元素的控制是进一步改善武汉市湖泊水环境的关键.

2.2 2015—2019 年武汉市湖泊水质的空间变化特征

武汉市湖泊众多且分布较广,将分别采用以行政区划为依据和以流域水系结构划分为依据的湖泊水质空间分析. 以行政区划为依据的湖泊水质空间分析,可以反映各行政区整体发展对于湖泊水质的影响,并为相关职能部门有针对性地进行区域水质管理与规划提供依据. 以流域水系结构划分为依据的湖泊水质空间

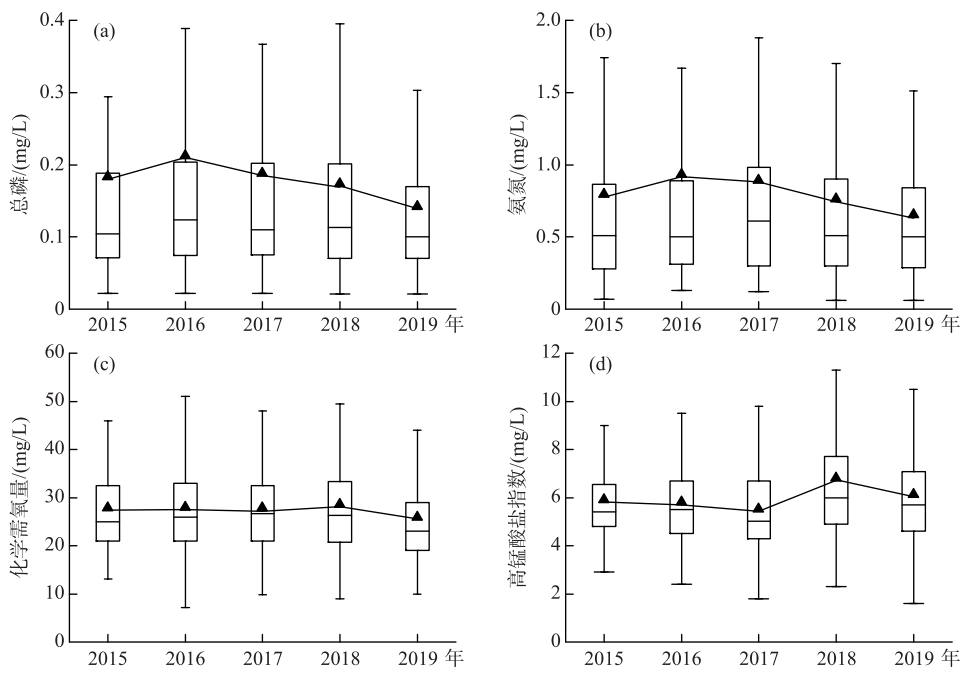


图 2 2015—2019 年武汉市湖泊水质指标变化趋势

Fig.2 Variations of the water quality indexes of lakes in Wuhan from 2015 to 2019

分析,可以反映流域河湖连通关系对水质的影响,并为进一步的水环境治理工程提供科学参考。

2.2.1 以行政区划为依据的湖泊水质空间分析 结合相关资料,将江岸区、江汉区、硚口区、汉阳区、武昌区、洪山区、青山区(化工区)、东湖生态旅游风景区视为中心城区,黄陂区、新洲区、蔡甸区、东西湖区、江夏区、东湖新技术开发区、武汉经济技术开发区(汉南区)视为新城区。武汉市约 80% 湖泊位于新城区内,中心城区湖泊数量较少且集中,因此在探讨湖泊水质空间变化特征时将武汉市中心城区作为整体进行分析。

根据各区湖泊水质综合污染指数变化幅度,将综合污染指数动态度分为 4 个等级(表 3)。如图 3 所示,

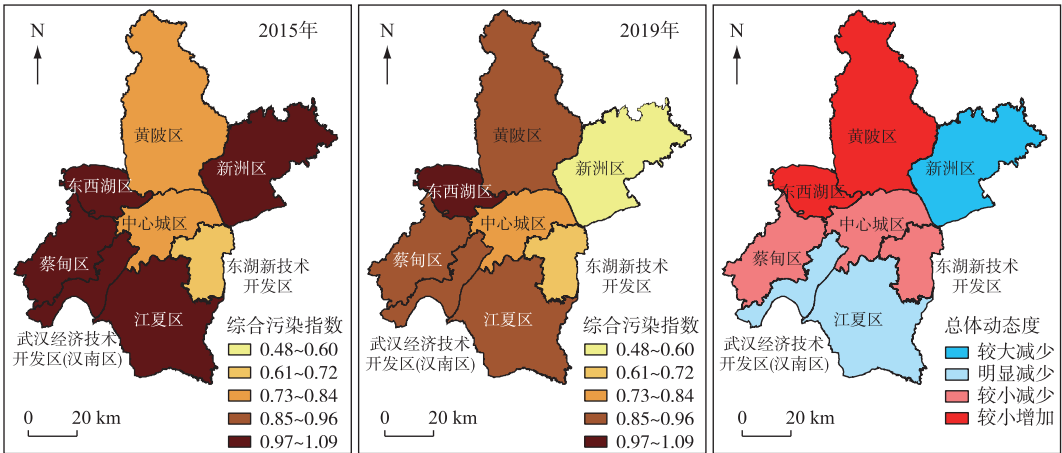


图 3 2015 和 2019 年各区湖泊综合污染指数及总体动态度

Fig.3 Comprehensive pollution index of lakes in different districts in 2015 and 2019 and dynamic degree of comprehensive pollution index of lakes in different districts

表 3 湖泊综合污染指数动态度分级
Tab.3 Classification of dynamic degree of comprehensive pollution index of lakes

动态度变化趋势	动态度变化范围/%
较大减少	$-50 \leq S < -20$
明显减少	$-20 \leq S < -10$
较小减少	$-10 \leq S < 0$
较小增加	$0 \leq S < 10$

2015 年新洲区、蔡甸区、东西湖区、武汉经济技术开发区(汉南区)及江夏区湖泊水质综合污染指数均较高. 2015—2019 年黄陂区与东西湖区湖泊综合污染指数总体动态度升高,水质小幅下降;中心城区、蔡甸区与东湖新技术开发区湖泊综合污染指数总体动态度小幅下降,水质小幅提升;江夏区与武汉经济技术开发区(汉南区)动态度明显下降;新洲区湖泊综合污染指数总体动态度大幅降低. 2019 年湖泊水质总体综合污染指数最高的是东西湖区.

2015—2019 年中心城区重度富营养湖泊营养状态均得到改善,中营养湖泊数量增多(图 4). 武汉经济技术开发区(汉南区)、江夏区已无重度富营养状态湖泊,东湖新技术开发区中度富营养湖泊水质均好转,黄陂区湖泊整体营养状态好转. 但东西湖区重度富营养湖泊增多,蔡甸区仍有少量重度富营养湖泊.

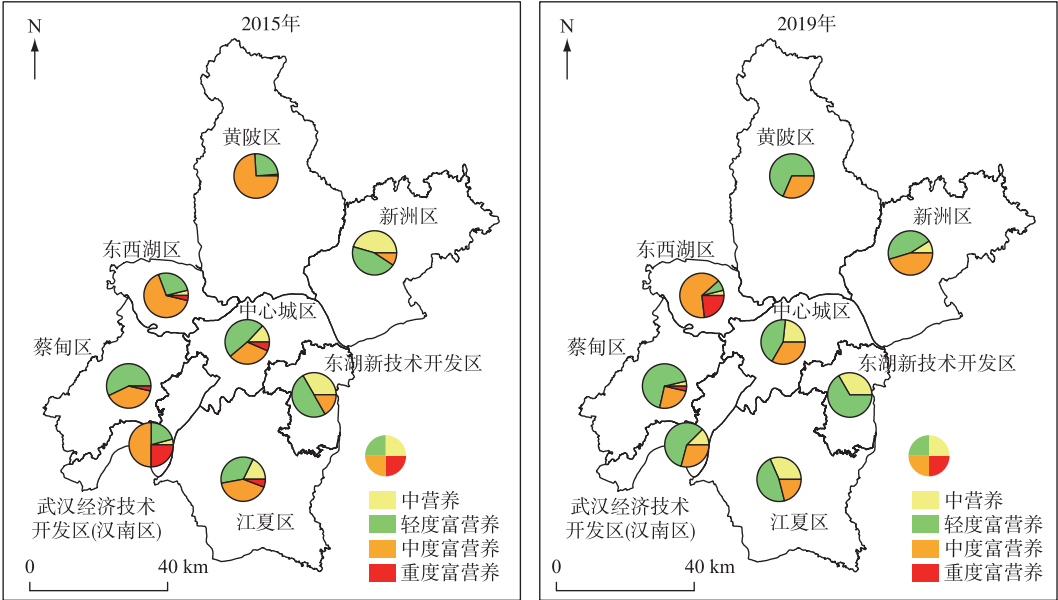


图 4 各区湖泊不同营养状态占比变化

Fig.4 The proportion change of different eutrophication status of lakes in different districts

2.2.2 以流域水系结构为依据的湖泊水质空间分析 受地形条件、江河分割和人工堤坝等因素的影响,武汉市湖泊分布形成以若干大湖为中心的水系流域结构,主要分为东湖—沙湖水系、汤逊湖水系、北湖水系、后湖水系、墨水湖—龙阳湖—南(北)太子湖水系、东西湖水系、西湖水系、鲁湖—斧头湖—梁子湖水系、武湖水系、涨渡湖水系和泛区水系^[5].

2015—2019 年,后湖水系及武湖水系中度富营养化湖泊增多,东西湖水系重度富营养化湖泊增多,泛区水系整体营养状态显著好转,其他水系营养状态均稳中向好. 2015—2019 年,北湖水系、墨水湖—龙阳湖—南(北)太子湖水系、东西湖水系及后湖水系综合污染指数上升(表 4),其他水系综合污染指数均降低. 2019 年墨水湖—龙阳湖—南(北)太子湖水系及东西湖水系综合污染指数总体较高,武湖水系次之.

北湖水系内青山北湖,墨水湖—龙阳湖—南(北)太子湖水系内龙阳湖、墨水湖,汤逊湖水系内黄家湖、南湖虽然位于中心城区,但综合污染指数较高. 武湖水系和后湖水系中后湖、黄陂汤湖等多个位于新城区的湖泊水质较差.

表 4 各水系概况及综合污染指数变化

Tab.4 The introduction of lake systems and the dynamic changes of comprehensive pollution index

水系名称	位置	主要湖泊	湖泊 总面积/ km ²	2015 年 综合污 染指数	2019 年 综合污 染指数	综合污染 指数动态 度/%
东湖—沙湖水系	武昌区	东湖、沙湖、杨春湖等	36.72	0.91	0.74	-19
汤逊湖水系	江夏区、洪山区	汤逊湖、黄家湖、南湖等	78.53	1.06	0.89	-16
北湖水系	青山区、东湖高新技术开发区	严东湖、严西湖、青山北湖等	26.68	0.79	0.88	12
后湖水系	黄陂区、江汉区、江岸区	后湖、盘龙湖等	32.8	0.73	0.75	2
墨水湖—龙阳湖— 南(北)太子湖水系	蔡甸区、汉阳区、武汉经济技术 开发区(汉南区)	龙阳湖、墨水湖、南太子湖等	19.93	1.13	1.22	8
东西湖水系	东西湖区、硚口区	东大湖、金湖、银湖等	15.43	1.01	1.04	3
西湖水系	蔡甸区	后官湖、蔡甸西湖等	73.71	0.99	0.90	-9
鲁湖—斧头湖— 梁子湖水系	江夏区、东湖新技术开发区	鲁湖、斧头湖、梁子湖等	409.39	1.01	0.85	-16
武湖水系	黄陂区、新洲区	武湖、柴泊湖等	39.17	1.05	0.93	-11
涨渡湖水系	新洲区	涨渡湖、安仁湖等	56.89	0.87	0.69	-20
泛区水系	武汉经济技术开发区(汉南区)	桂子湖、中山湖、坛子湖等	16.64	1.05	0.78	-26

3 讨论

近年通过实施截污工程、植物生态修复等系列工程措施,中心城区湖泊水质提升总体取得了一定的成效^[23-24],但中心城区北湖水系、墨水湖—龙阳湖—南(北)太子湖水系、汤逊湖水系仍有待改善. 城市地表径流、排口排污及底泥内源污染物释放是中心城区湖泊水环境较为突出的污染源. 根据武汉市统计年鉴,到2017 年底约有 61% 的常住人口居住在武汉市中心城区,但污水处理设施尚不完善,雨污分流管网有待进一步健全,一方面生活生产污水通过排口排入湖泊,另一方面城市地表径流携带多种污染物输入湖泊水体^[25]. 汤逊湖水系内黄家湖等湖泊水质不达标,南湖水质近年持续改善,但综合污染指数仍在较高水平. 汤逊湖水系虽总体湖泊面积大,但排污问题突出. 城市地表径流对黄家湖的氮磷营养物质贡献率均较高^[26],南湖周边污水直排,雨季溢流问题突出^[27]. 水系内的港渠、河流也存在污水排放的问题,进而对水系内湖泊水质产生影响. 北湖水系内青山北湖位于武汉重要的化工区,工业污水漏排偷排现象有待改善.

外源污染物的输入致使湖泊底泥中逐渐积累较多的有机物、氮磷营养物等污染物,底泥与上覆水持续存在着物质交换,当底泥被搅动时,底泥中的污染物将大量向水体中释放,造成水质恶化^[28],江苏太湖的水质就受到其底泥的影响^[29]. 位于汉阳区的墨水湖、龙阳湖周边有化工区、生活区,早期因工业废水、生活污水排放积累了较多的污染物,墨水湖—龙阳湖—南(北)太子湖水系整体水质基础较差,底泥内源污染影响较大.

东西湖区东西湖水系、黄陂区武湖水系、后湖水系水环境问题较为突出,农业生产、生活带来的面源污染、工业污水排放是影响湖泊水环境的主要因素. 武汉市农用地主要集中在新城区,农业生产活动多在新城区进行,新城区的农业面源污染风险较高^[30-31]. 黄陂区后湖、武湖、李家大湖等多个湖泊周边均存在农业种植、水产养殖、畜禽养殖,化肥、农药、养殖废水等污染物在降水和灌溉过程中,通过地表径流、农田排水等方式流入水体,使得湖泊中氮磷及有机物浓度升高. 江苏洪泽湖富营养化也与周边地区农业生产中使用化肥、农药关系密切^[32]. 东西湖区作为武汉市重要的农副产品生产加工基地,水环境受到加工产生的副产品、废弃物以及水产养殖、种植业的直接影响. 2016 年东西湖区龙王沟全湖种植莲藕,化肥的施用导致湖泊中氮、磷浓度显著升高. 禁养区出现水产养殖等农业活动也是导致水质较难实现持续改善的原因.

1970s 以来,武汉市湖泊面积经历了大幅萎缩的过程,建筑用地的填占导致武汉市湖泊呈现破碎度高、连通性低的特征,南太子湖、金湖等湖泊斑块数明显增多^[33]. 水域面积减少、斑块数量增多,将导致湖泊的流动性变差、自净能力降低^[34]. 东西湖水系、后湖水系内湖泊面积多数小于 1 km²,且水质较差,墨水湖—龙

阳湖—南(北)太子湖水系内湖泊破碎度高,污染物输入后,自身净化能力低。

“十三五”期间武汉市湖泊水质治理总体取得了一定成效,但保持水质持续向好的趋势较难,“十四五”期间对总磷的控制仍然是提升水质的关键。中心城区青山北湖、南湖等湖泊综合污染指数较高,需进一步加强排口治理、开展底泥疏浚等工程措施,东西湖区、黄陂区等新城区整体水质仍有待提升,需强化农业面源污染控制、工业污染防治及生态修复。

4 结论

1) 2019年全市湖泊综合污染指数均值为0.8935,与2015年相比下降7.74%,2015—2019年多数湖泊营养状态稳中好转。2015—2019年湖泊水质总体呈向好趋势,但湖泊水质多出现波动,较难实现持续改善。

2) 武汉市湖泊主要超标污染物为总磷、氨氮、化学需氧量和高锰酸盐指数,4种污染物平均质量浓度在2015—2019年间整体呈下降趋势,磷元素始终是制约湖泊水质的主要因子,磷的控制是进一步改善湖泊水环境的关键。

3) 2015—2019年间武汉市中心城区湖泊综合污染指数下降,重度富营养状态湖泊消失,水质总体好转,“十三五”期间水环境治理取得一定成效。但中心城区内青山北湖、墨水湖、龙阳湖等湖泊综合污染指数较高,东西湖区、黄陂区等新城区水质相对较差。

4) 中心城区与新城区的发展定位、城市化程度等不尽相同,导致影响其辖区内水环境质量的主导因素不同,排口等污染源对中心城区湖泊水质影响较大,工业污染、农业面源污染对新城区湖泊水质影响较大。湖泊的破碎化导致湖泊自净能力降低,对于湖泊水质也有一定影响。同时,水系内连通港渠的水质治理也需加以重视,水环境质量提升需综合考虑水系内各个湖泊及连通河流、港渠情况,采取系统性治理措施。

致谢:论文研究成果为《武汉市水生态环境保护“十四五”规划》编制提供支撑,在此感谢合作单位武汉市环境监测中心提供的监测数据,感谢长江生态环境保护修复联合研究武汉驻点团队对论文的指导及支持。

5 参考文献

- [1] Lv J, Wu HJ, Chen MQ. Effects of nitrogen and phosphorus on phytoplankton composition and biomass in 15 subtropical, urban shallow lakes in Wuhan, China. *Limnologia*, 2011, **41**(1): 48-56. DOI: 10.1016/j.limno.2010.03.003.
- [2] Zhang SS, Xu P, Yang ZJ *et al.* Nitrogen isotopic difference of organic matter in urban lakes and its indication to water pollution. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, **28**(2): 396-406. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201902016. [张思思, 徐飘, 杨正健等. 城市湖泊有机质氮同位素差异及其对水污染的指示作用分析. 长江流域资源与环境, 2019, **28**(2): 396-406.]
- [3] Meng CH, Zhao B. Vertical distribution of species of nitrogen and phosphorus in the sediments of Donghu Lake. *Environmental Science*, 2008, **29**(7): 1831-1837. DOI: 10.13227/j.hjlx.2008.07.009. [孟春红, 赵冰. 东湖沉积物中氮磷形态分布的研究. 环境科学, 2008, **29**(7): 1831-1837.]
- [4] Wuhan Ecological Environment Bureau. Bulletin of the 2005 State of the environment in Wuhan City, 2006. [武汉市生态环境局. 2005年武汉市环境状况公报, 2006]
- [5] Wuhan Water Authority ed. Records of lakes in Wuhan. Wuhan: Hubei Fine Arts Press, 2014. [武汉市水务局. 武汉湖泊志. 武汉: 湖北美术出版社, 2014.]
- [6] Su YJ. Influence of unicom project in Dongsha Canal on the water quality of Waishahu Lake and Fruit Lake. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, **37**(S1): 167-169. [苏苑君. 东沙渠段连通工程对外沙湖、水果湖水质的影响. 灌溉排水学报, 2018, **37**(S1): 167-169.]
- [7] Li E, Zeng XY, Wu ZG *et al.* Planning of ecological restoration engineering for three lakes in new district of Wuhan. *China Water & Wastewater*, 2013, **29**(20): 9-13. DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2013.20.003. [李尔, 曾祥英, 吴志高等. 武汉新区“三湖”生态修复工程规划. 中国给水排水, 2013, **29**(20): 9-13.]
- [8] Wang HH, Bai J, Liu SC *et al.* Spatial and temporal variations in the water quality of Baiyangdian Lake in the recent 30 years. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, **39**(5): 1051-1059. [王欢欢, 白洁, 刘世存等. 白洋淀近30年水质时空变化特征. 农业环境科学学报, 2020, **39**(5): 1051-1059.]
- [9] Chang NB, Chen HW, Ning SK. Identification of river water quality using the Fuzzy Synthetic Evaluation approach. *Jour-*

- nal of Environmental Management*, 2001, **63**(3): 293-305. DOI: 10.1006/jema.2001.0483.
- [10] Ocampo-Duque W, Ferré-Huguet N, Domingo JL *et al.* Assessing water quality in rivers with fuzzy inference systems: A case study. *Environment International*, 2006, **32**(6): 733-742. DOI: 10.1016/j.envint.2006.03.009.
- [11] Wang JL, Fu ZS, Qiao HX *et al.* Assessment of eutrophication and water quality in the estuarine area of Lake Wuli, Lake Taihu, China. *Science of the Total Environment*, 2019, **650**: 1392-1402. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.137.
- [12] Wang JH, Yang C, He LQS *et al.* Meteorological factors and water quality changes of Plateau Lake Dianchi in China (1990-2015) and their joint influences on cyanobacterial blooms. *Science of the Total Environment*, 2019, **665**: 406-418. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.010.
- [13] Sun Y, Li ZX, Zhang YR *et al.* Water pollution characteristics and water quality evaluation during the freezing period in Lake Baiyangdian of Xiongan New Area. *J Lake Sci*, 2020, **32**(4): 952-963. DOI: 10.18307/2020.0405. [孙悦, 李再兴, 张艺冉等. 雄安新区-白洋淀冰封期水体污染特征及水质评价. 湖泊科学, 2020, **32**(4): 952-963.]
- [14] Zhang M, Shi XL, Yang Z *et al.* The variation of water quality from 2012 to 2018 in Lake Chaohu and the mitigating strategy on cyanobacterial blooms. *J Lake Sci*, 2020, **32**(1): 11-20. DOI: 10.18307/2020.0102. [张民, 史小丽, 阳振等. 2012—2018年巢湖水质变化趋势分析和蓝藻防控建议. 湖泊科学, 2020, **32**(1): 11-20.]
- [15] Tang XX, Jiang CY, Wang C *et al.* Responses of total phosphorus concentration to total phosphorus loading of inflow rivers in the western part of Chaohu Lake. *Environmental Science & Technology*, 2017, **40**(S1): 176-180. [唐晓先, 蒋晨韵, 王璨等. 巢湖西半湖总磷浓度对入湖总磷负荷的响应. 环境科学与技术, 2017, **40**(S1): 176-180.]
- [16] Kai JL, Wang JB, Huang L *et al.* Seasonal variations of dissolved organic carbon and total nitrogen concentrations in Nam Co and inflowing rivers, Tibet Plateau. *J Lake Sci*, 2019, **31**(4): 1099-1108. DOI: 10.18307/2019.0410. [开金磊, 王君波, 黄磊等. 西藏纳木错及其入湖河流溶解有机碳和总氮浓度的季节变化. 湖泊科学, 2019, **31**(4): 1099-1108.]
- [17] Deng HX, Xia PH, Lin T *et al.* Temporal and spatial distribution of chlorophyll-a concentration and its relationship with environmental factors in Hongfeng Reservoir, Guizhou Plateau, China. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, **30**(8): 1630-1637. [邓河霞, 夏品华, 林陶等. 贵州高原红枫湖水库叶绿素 a 浓度的时空分布及其与环境因子关系. 农业环境科学学报, 2011, **30**(8): 1630-1637.]
- [18] Wang MC, Liu XQ, Zhang JH. Evaluate method and classification standard on lake eutrophication. *Environmental Monitoring in China*, 2002, **18**(5): 47-49. [王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准. 中国环境监测, 2002, **18**(5): 47-49.]
- [19] Wang Y, Liu YB, Zhao HX *et al.* Water quality assessment and characteristics of water pollution of sand lake in Ningxia. *Wetland Science*, 2020, **18**(3): 362-367. [王燕, 刘彦斌, 赵红雪等. 宁夏沙湖水质评价及水污染特征. 湿地科学, 2020, **18**(3): 362-367.]
- [20] Zhu YY, Tian JJ, Li HL *et al.* Water quality assessment and pollution profile identification of Danjiangkou Reservoir, China. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(1): 139-147. [朱媛媛, 田进军, 李红亮等. 丹江口水库水质评价及水污染特征. 农业环境科学学报, 2016, **35**(1): 139-147.]
- [21] Gu DX, Huang YP. Preliminary assessment of water quality pollution of main lakes in China. *Journal of China Hydrology*, 1981, (5): 29-36. [顾丁锡, 黄漪平. 我国主要湖泊水质污染状况的初步评价. 水文, 1981, (5): 29-36.]
- [22] Wang XL, Bao YH. Study on the methods of land use dynamic change research. *Progress in Geography*, 1999, **18**(1): 81-87 [王秀兰, 包玉海. 土地利用动态变化研究方法探讨. 地理科学进展, 1999, **18**(1): 81-87.]
- [23] Sun JY, Xiao Y, Zhang LP *et al.* Study of effect of connection engineering between Liangzi Lake And Tangxun Lake in Wuhan City. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2018, **51**(2): 125-131. DOI: 10.14188/j.1671-8844.2018-02-005. [孙静月, 肖宜, 张利平等. 武汉市梁子湖-汤逊湖水系连通工程效果分析. 武汉大学学报: 工学版, 2018, **51**(2): 125-131.]
- [24] Zhang M, Cao T, Guo LG *et al.* Restoration of constructed hydrophytes community in East Lake of Wuhan and experimental study on water quality improvement. *Environmental Science & Technology*, 2010, **33**(6): 154-159. [张萌, 曹特, 过龙根等. 武汉东湖水生植被重建及水质改善试验研究. 环境科学与技术, 2010, **33**(6): 154-159.]
- [25] Müller A, Österlund H, Marsalek J *et al.* The pollution conveyed by urban runoff: A review of sources. *Science of the Total Environment*, 2020, **709**: 136125. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.136125.
- [26] Li J, Huang J, Wang SM *et al.* Study on water environment problems and countermeasures in Huangjia Lake basin of Wu-

- han City. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power: Natural Science Edition*, 2019, **40**(2): 57-61. DOI: 10.19760/j.ncwu.zk.2019023. [李娟, 黄婧, 王思梦等. 武汉市黄家湖流域水环境问题及治理对策研究. 华北水利水电大学学报: 自然科学版, 2019, **40**(2): 57-61.]
- [27] Qin L, Zhu JL, Gong HQ *et al.* Analysis of pollution source and calculation of pollution load of the South Lake. *Journal of Hubei University: Natural Science*, 2020, **42**(3): 298-305. [秦柳, 朱江龙, 龚汇泉等. 南湖污染源解析与污染负荷核算. 湖北大学学报: 自然科学版, 2020, **42**(3): 298-305.]
- [28] Zhu QL, Liu L, Li YJ. Analysis on comprehensive treatment of water environment of polluted lakes in cities. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power: Natural Science Edition*, 2019, **40**(5): 41-47. DOI: 10.19760/j.ncwu.zk.2019065. [朱全亮, 刘亮, 李亚俊. 城中受污染湖泊水环境综合治理探讨. 华北水利水电大学学报: 自然科学版, 2019, **40**(5): 41-47.]
- [29] Mao XW, Wu HY, Xu F. Analysis of pollution characteristics of main nutrients in Taihu Lake sediment. *Water Resources Protection*, 2020, **36**(4): 100-104. [毛新伟, 仵荟颖, 徐枫. 太湖底泥主要营养物质污染特征分析. 水资源保护, 2020, **36**(4): 100-104.]
- [30] Xu ZZ. Risk assessment of agricultural non-point source pollution in Wuhan based on ArcGIS [Dissertation]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2017. [徐智章. 基于 ArcGIS 的武汉市农业面源污染风险评价[学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2017.]
- [31] Yang SH, Peng ZH, Jiao HZ *et al.* External pollution source load and contribution of urban eutrophic lakes—Taking Lake Honguanhu of Wuhan as an example. *J Lake Sci*, 2020, **32**(4): 941-951. DOI: 10.18307/2020.0404. [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. 湖泊科学, 2020, **32**(4): 941-951.]
- [32] Wang X, Liu L, He Y *et al.* Temporal-spatial distribution characteristics and factor analysis of eutrophication in Hongze Lake. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2019, **31**(2): 58-61. [王霞, 刘雷, 何跃等. 洪泽湖水体富营养化时空分布特征与影响因素分析. 环境监测管理和技术, 2019, **31**(2): 58-61.]
- [33] Liu D, Wang X, Li CH *et al.* Eco-environmental effects of hydrological connectivity on lakes: A review. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, **28**(7): 1702-1715. [刘丹, 王烜, 李春晖等. 水文连通性对湖泊生态环境影响的研究进展. 长江流域资源与环境, 2019, **28**(7): 1702-1715.]
- [34] Meng D, Zhang Z, Shuai S *et al.* Dynamic change of urban lakes in Wuhan and its impact on flood season drainage. *Geospatial Information*, 2019, **17**(1): 105-110, 12. [孟丹, 张志, 帅爽等. 武汉城市湖泊动态变化与汛期排渍影响分析. 地理空间信息, 2019, **17**(1): 105-110, 12.]