

贵阳市百花湖近 10 年(2009—2018 年)的水质时空变化*

贺康康^{1,2}, 王敬富^{2,3**}, 李玉麟^{4**}, 杨小红^{1,2}, 曾华献^{2,3}, 陈敬安^{2,3}

(1: 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025)

(2: 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081)

(3: 中国科学院大学, 北京 100049)

(4: 贵阳市两湖一库环境保护监测站, 贵阳 551400)

摘要: 百花湖是贵阳市重要的城市饮用水源地, 并且近年来经常发生水质异常现象. 本文利用 2009—2018 年百花湖长时间序列的监测数据, 采用综合营养状态指数法和 Pearson 相关性分析, 研究了百花湖 10 年间的水质变化特征和影响因素. 结果表明: 1) 库区叶绿素 *a* (Chl.*a*)、总磷 (TP)、总氮 (TN)、高锰酸盐指数 (COD_{Mn}) 和透明度 (SD) 的浓度范围分别是 3.43~39.72 mg/m³、0.034~0.115 mg/L、1.200~2.759 mg/L、1.41~5.51 mg/L 和 0.75~2.07 m, 且高氮磷比(12~63) 表明百花湖是磷限制型. 2) 在空间上, TP、TN、氨氮、COD_{Mn} 和 Chl.*a* 浓度沿水体流向逐渐降低, SD 呈相反变化趋势. 3) 10 年来, 百花湖水水质由 IV 类转变为 III 类, 综合营养状态由轻度富营养化状态转变为中营养状态, 水质整体向好. 4) 入库支流是影响百花湖库区水质的主要因素, 长期以来, 东门桥河、南门河水水质 TP 和 TN 等超标严重, 给库区水质稳定达标带来威胁. 5) 百花湖 Chl.*a* 浓度与气温、水位、风速和 TP 等指标显著相关, 是受水文、气象及营养盐因素的综合控制. 未来在百花湖水环境保护治理过程中, 应加大对东门桥河、南门河等重点支流的污染治理, 加强对水动力学、气候变化等水文气象因素影响库区水质(藻类水华)的机制研究.

关键词: 百花湖; 水质; 综合营养状态指数 (TLI); 营养盐; 水文气象条件

Spatiotemporal variations of water quality in Lake Baihua, Guiyang City in the past decade (2009–2018) *

He Kangkang^{1,2}, Wang Jingfu^{2,3**}, Li Yulin^{4**}, Yang Xiaohong^{1,2}, Zeng Huaxian^{2,3} & Chen Jing'an^{2,3}

(1: College of Resource and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, P.R.China)

(2: State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, P.R.China)

(3: University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China)

(4: Environmental Protection Monitoring Station of Two Lakes and One Reservoir in Guiyang, Guiyang 551400, P.R.China)

Abstract: Lake Baihua is an important source of urban drinking water in Guiyang City, and water quality anomalies often occur for many years. The long-term water quality monitoring data (from 2009 to 2018), together with the comprehensive trophic level index (TLI) method and Pearson correlation analysis, are used to study the water quality change characteristics and influencing factors of Lake Baihua over the past ten years. The results show that: 1) The concentrations of chlorophyll-*a* (Chl.*a*), total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), permanganate (COD_{Mn}) and transparency (SD) ranged from 3.43 to 39.72 mg/m³, from 0.034 to 0.115 mg/L, from 1.200 to 2.759 mg/L, from 1.41 to 5.51 mg/L and from 0.75 to 2.07 m, respectively. The high N/P ratio (12–63) indicates that Lake Baihua is a phosphorus limited type. 2) In space, the concentrations of TP, TN, ammonia nitrogen, COD_{Mn} and Chl.*a* decreased gradually along the flow direction of the water body, and SD showed the opposite trend. 3) The water quality of Lake Baihua has gradually improved from class IV to class III from 2009 to 2018, and TLI has changed from light-eu-

* 2020-03-18 收稿; 2020-05-13 收修改稿.

中国科学院野外站联盟项目 (KFJKFJ-SW-YW0YW036)、贵州省科技支撑计划 (黔科合支撑 S[2020]2243 号) 和贵阳市科技项目 (筑科合同 [2019]2-9) 联合资助.

** 通信作者; E-mail: wangjingfu@vip.skleg.cn; E-mail: 36170589@qq.com.

trophic state to mesotrophic state. 4) The inflow tributaries are the main factors affecting the water quality in the reservoir area. The water TP and TN in Dongmenqiao and Nanmen Rivers were seriously over standard, which threatens the stability of water quality in the reservoir area. 5) The concentration of Chl. *a* was significantly related to temperature, water level, wind speed, and total phosphorus, which is considered to be controlled by the combination of hydrological, meteorological and nutrient factors. In the future, the pollution control of Dongmenqiao, Nanmen Rivers needs to be strengthened. Meanwhile, the mechanism of water quality (algal bloom) influenced by hydrodynamics, climate change and other hydrometeorological factors also needs to be further studied.

Keywords: Lake Baihua; water quality; trophic level index (TLI); nutrient; hydrometeorological condition

长久以来,饮用水源地的水质安全防控是我国生态环境保护关注的重点^[1-4]。由于经济发展和人口增长,我国城市面积不断扩大,严重威胁着地处城市边缘的水源地水库的环境质量,造成诸多水库出现严重的水质安全事件^[5-7]。当前,水体富营养化是水源地水库面临的主要环境问题,通常采用综合营养状态指数(trophic level index, TLI)进行评价^[8-11]。

百花湖是中国西南地区贵州省贵阳市重要的饮用水源地,年供水量超过 2800 万 m³^[12]。自 1990s 起,百花湖水体发生了较为严重的富营养化问题,水环境间歇性恶化,水质安全备受关注^[13-18]。此间,众多相关研究不断出现,在沉积物、污染源、水体理化条件和生态群落(如浮游动植物)等多方面调查和讨论百花湖水质变化的情况、影响因素和治理建议^[11, 17-19]。目前,普遍认为百花湖水质异常有两大主要原因^[15, 19-20],即污染物的持续输入(包括工农业和生活污水等外源和沉积物营养盐释放的内源)和特定的水文气象条件(如温跃层)。20 世纪末至 21 世纪初的 10 年间,贵州省和贵阳市针对“两湖”(红枫湖和百花湖)的污染问题采取了一系列措施,使得百花湖的外源污染得到有效地控制^[21]。但是,此后百花湖水环境并未得到大幅改善,部分研究认为这与沉积物的营养盐释放和水体分层有很大关系^[20, 22-23]。除对常规理化因子的分析外^[24-26],更多的研究转而关注浮游生物^[27-30],夏品华等连续多年研究了百花湖浮游植物的群落结构、空间分布、季节变化、污染指示种和影响因素,从多方面分析百花湖水环境变化与浮游生物演替的关系。并且,多种方法被用于评价百花湖水水质^[18, 26, 31-32],包括卡尔森营养状态指数(TSI)、后生浮游动物生物多样性指数、贝叶斯方法和综合营养状态指数法(TLI)等。虽然评价方法不一,但综合反映百花湖水水质整体向好。

然而,近年来在花桥等库区经常性地发生藻类水华(蓝藻或硅藻)和水色异常现象。与此同时,为助推《贵阳市城市总体规划(2011—2020 年)》(2017 年修订),百花湖水库周边正在建设百花生态新城,规划范围约 305 km²,预计人口逾 90 万,给百花湖水源地环境保护和用水安全带来严峻挑战^[12]。本研究通过收集近 10 年(2009—2018 年)百花湖长序列水质监测数据,以水文年的平水期(1—4 月)、丰水期(5—8 月)和枯水期(9—12 月)^[19]为分段,并结合前人研究,分析百花湖库区和主要支流水质的年际变化特征,指明库区水质变化的关键控制因素,为百花湖水环境保护治理提供科学基础。

1 研究区概况

百花湖(26°35′~26°41′N, 106°27′~106°32′E)位于贵阳市西北郊,距市区 22 km。喀斯特地貌发育,水文地质条件复杂^[33]。百花湖处于乌江水系一级支流猫跳河,是红枫湖的下游水库,兼有调洪、发电、供水和旅游等功能(图 1)。百花湖流域面积 1895 km²,蓄水面积 14.5 km²,总库容 1.82×10⁸ m³,平均水深 13.0 m,坝高 48.7 m,水体滞留时间为 0.102 年,水位海拔 1188~1195 m^[27]。百花湖的主要水源是红枫湖下泄水(猫跳河)以及长冲河、东门桥河、麦西河和南门河等^[24],其水位的变化除河流的自然输入外,还与上游红枫湖发电情况以及百花湖发电情况等人工调蓄有关。

2 材料与方法

2.1 水质监测点与数据来源

水质监测点如图 1 所示,包括 5 个库区点位和多个支流的断面。其中,库区监测点位包括花桥、岩脚寨、麦西河口、贵铝泵房和坝,支流断面包括东门桥河、老顺河、麦西河、南门河(板坡场沟)、长冲河、盐津河、干河和滥泥沟等。主要的水质监测指标包括 pH、水温、溶解氧(DO)、总磷(TP)、总氮(TN)、氨氮(NH₃-N)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、透明度(SD)和叶绿素 *a* (Chl. *a*) 等。监测时段为 2009—2018 年,频率为月度监测。

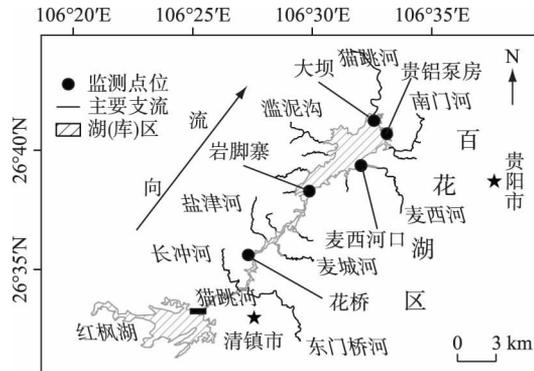


图 1 百花湖水水质监测点位

Fig.1 Location of water quality monitoring sites in Lake Baihua

上述监测数据由贵阳市两湖一库环境保护监测站提供。

水文气象数据包括水位、气温、气压、湿度、降雨量、蒸发量、日照时数、云层覆盖率、风速和风向等，时间分辨率为小时级，监测时段为 2010—2015 年，数据由贵州省气象局清镇站提供。表 1 汇总了百花湖监测点的相关信息。

表 1 百花湖监测点信息

Tab.1 Information of monitoring sites in Lake Baihua

	监测垂线(断面)	所属地区	经纬度	规定类别
库区	花桥	贵阳市	26°35'17.6"N, 106°27'43.8"E	III
	岩脚寨	贵阳市	26°38'7.5"N, 106°29'44.0"E	III
	麦西河口	贵阳市	26°39'19.0"N, 106°31'55.7"E	III
	贵铝泵房	贵阳市	26°40'25.5"N, 106°32'57.3"E	II
	百花大坝	贵阳市	26°41'16.5"N, 106°32'29.0"E	III
支流	麦西河 李家冲	观山湖区	26°39'2.3"N, 106°33'5.8"E	III
	南门河 板坡场	观山湖区	26°40'5.7"N, 106°33'16.7"E	III
	东门桥河 梯青塔	清镇市	26°33'57.7"N, 106°27'24.8"E	III
	栗木河 王官桥	清镇市	26°35'35.6"N, 106°28'48.1"E	III
	猫跳河 姬昌桥	清镇市	26°33'27.5"N, 106°25'32.1"E	III
	长冲河 团坡	清镇市	26°33'32.9"N, 106°26'32.7"E	III
	盐津河 吴家桥	观山湖区	26°36'32.8"N, 106°27'32.6"E	III
	滥泥沟 橡皮桥	观山湖区	26°40'21.8"N, 106°30'23.0"E	III
	干河 干河桥	观山湖区	26°39'10.4"N, 106°33'23.2"E	III
	气象站	/	清镇市	26°34'27.6"N, 106°28'27.4"E

2.2 分析方法

依据《湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规定》(中国环境监测总站, 总站生字[2001]090号), 综合营养状态指数法被广泛应用于评价中国湖泊(水库)的富营养化状况^[10-11, 34-35]。综合营养状态指数(TLI(Σ))是以 Chl.a 为基准参数, 并辅以相关的 TP、TN、SD 和 COD_{Mn} 的综合评价指标^[36]。其计算公式为:

$$TLI(\Sigma) = \sum_{j=1}^m W_j \cdot TLI(j) \tag{1}$$

式中, W_j 为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重; $TLI(j)$ 代表第 j 种参数的营养状态指数。

以 Chl.a 作为基准参数, 则第 j 种参数的归一化的相关权重计算公式为:

$$W_j = \frac{r_{ij}^2}{\sum_{j=1}^m r_{ij}^2} \quad (2)$$

式中, r_{ij} 表示第 j 种参数与基准参数 Chl.*a* 的相关系数(表 2) .

表 2 中国湖泊(水库) 的 Chl.*a* 与其他参数的关系值

Tab.2 The relationship between Chl.*a* and other parameters of lakes (reservoirs) in China

参数	Chl. <i>a</i>	TP	TN	SD	COD _{Mn}
r_{ij}	1	0.84	0.82	-0.83	0.83
r_{ij}^2	1	0.7056	0.6724	0.6889	0.6889

各营养状态指数($TLI(j)$) 计算公式(3) ~ (7) 为:

$$TLI(Chl. a) = 10 \times [2.5 + 1.086 \times \ln (Chl. a)] \quad (3)$$

$$TLI(TP) = 10 \times [9.436 + 1.642 \times \ln (TP)] \quad (4)$$

$$TLI(TN) = 10 \times [5.453 + 1.694 \times \ln (TN)] \quad (5)$$

$$TLI(SD) = 10 \times [5.118 - 1.94 \times \ln (SD)] \quad (6)$$

$$TLI(COD_{Mn}) = 10 \times [0.109 + 2.661 \times \ln (COD_{Mn})] \quad (7)$$

表 3 显示了根据综合营养状态指数((0~100]) 划分的湖泊(水库) 营养状态. 在同一营养状态下, 数值越高, 其营养程度越重.

表 3 湖泊(水库) 营养状态分级

Tab.3 Classification of nutritional status in lakes (reservoirs)

$TLI(\Sigma)$	(0, 30)	[30~50]	(50~100]		
			(50~60]	(60~70]	(70~100]
营养等级	贫营养	中营养	富营养		
			轻度富营养	中度富营养	重度富营养

本文数据的描述性统计分析使用 Microsoft Office Excel 2016(MS) , 地图获取和绘制使用 Google Earth Pro(Google Inc.) 和 ArcGIS 10.2(ESRI) , 图表绘制使用 Origin 2018(OriginLab) 和 Microsoft Office Word 2016 (MS) , 数据相关性分析使用 IBM SPSS Statistics 25(IBM) 以及其他辅助工具.

3 结果

3.1 库区和支流主要水质指标的时空变化

图 2 显示了百花湖主要水质指标在 2009—2018 年的年际年化. 10 年间, 库区和支流的 TP 浓度变化范围分别是 0.034~0.115 和 0.034~0.231 mg/L, 年内高值多集中在枯水期. 图 2A 显示, 库区 TP 浓度变化总体稳定; 支流 TP 浓度变化幅度较大(最大极差达 0.120 mg/L) , 2010 年突然增加后大幅下降, 2012—2016 年不断上升, 然后快速下降. 除 2009 和 2011 年外, 其他时段的库区 TP 浓度小于支流. 库区和支流的 TN 浓度变化范围分别是 1.200~2.759 和 1.111~3.918 mg/L, 多年高值以丰水期为主. 图 2B 显示, 库区 TN 浓度较为稳定且整体在降低, 变化幅度小于支流; 支流 TN 总体波浪式上升, 而且支流 TN 浓度大于库区(2009 年除外) .

2009—2018 年, 库区和支流的 NH₃-N 浓度变化范围分别是 0.05~0.63 和 0.15~1.32 mg/L, 年内枯水期> 丰水期> 平水期. 10 年间, 库区 NH₃-N 浓度明显降低, 降幅达 69.2%~81.0%; 支流 NH₃-N 浓度在 2009—2011 年波动很大, 2011 年后稳定下降(图 2C) . 2011 年后两者的变化趋势基本相同, 库区 NH₃-N 浓度小于支流(2010 年除外) . 库区和支流的 COD_{Mn} 浓度变化范围分别是 1.41~5.51 和 1.20~2.92 mg/L, 多在丰水期出现高值. 10 年间, 库区 COD_{Mn} 总体下降, 但 2016—2018 年略有升高. 支流 COD_{Mn} 变化幅度很大, 在 2010 年出现突增(4.14 mg/L) , 随后大幅下降. 在 2016 年又出现小幅升高后逐渐下降. 在趋势上, 2011 年后的支流与库

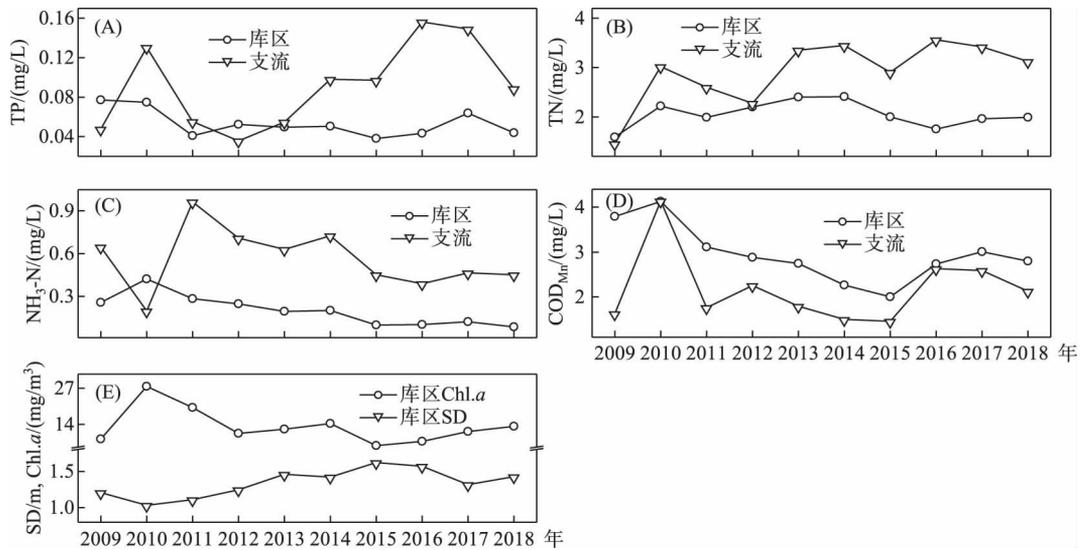


图 2 2009—2018 年百花湖水质指标的年际变化

Fig.2 Annual changes of water quality parameters of Lake Baihua from 2009 to 2018

区 COD_{Mn} 年际变化趋势基本相同(图 2D), 并且支流 COD_{Mn} 浓度小于库区。

2009—2018 年, 库区 $\text{Chl.}a$ 浓度变化范围是 $3.43 \sim 39.72 \text{ mg/m}^3$, 年内丰水期 (16.87 mg/m^3) > 枯水期 (13.30 mg/m^3) > 平水期 (9.79 mg/m^3)。图 2E 显示, 10 年间库区 $\text{Chl.}a$ 浓度在 2010 年前上升, 之后波动下降。2010 和 2011 年出现高浓度 ($>20.00 \text{ mg/m}^3$), 其他时段在较低浓度范围 ($6.47 \sim 14.39 \text{ mg/m}^3$)。库区 SD 的变化范围是 $0.75 \sim 2.07 \text{ m}$, 2015 年前不断提高但在之后小幅下降, 年内变化趋势表现为枯水期 (1.55 m) > 平水期 (1.34 m) > 丰水期 (1.14 m), 与 $\text{Chl.}a$ 呈相反的变化趋势(图 2E)。

图 3 显示了 10 年间库区 5 个监测点的水质空间变化。各点位在水文年内, TP 、 TN 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Mn} 和 $\text{Chl.}a$ (图 3A~E) 呈现出明显的从上游至下游浓度降低的变化规律。但也存在特殊情况, 2010 年贵铝泵房和大坝的 TP 浓度较麦西河口略高(图 3A), 2009—2012 年和 2014 年库区最下游大坝处的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度较麦西河口略高(图 3C)。 COD_{Mn} 至 2015 年处于下降时段, 但 2016 年起全库区普遍升高。 $\text{Chl.}a$ 浓度在 2011 年突然升高后又转入下降, 2015 年后基本恢复至 2009 年水平。总体上, TP 、 TN 、 COD_{Mn} 和 $\text{Chl.}a$ 在花桥处的浓度远高于其他点位, 这提高了库区评价指标的平均浓度和营养状态。SD 呈现出从上游到下游越来越高的变化趋势(图 3F), 这是花桥处水深浅、水体紊流强和 $\text{Chl.}a$ 浓度高等综合因素导致的。除花桥外, 2009—2011 年下游 4 个点位的 SD 差别不大, 但 2012—2013 年大坝处 SD 明显低于上游的 3 个点位。2014—2018 年, 库区 SD 沿流向越来越高, 但花桥处在 2016 年后出现下降。

3.2 库区水体综合营养状态指数的时空变化

图 4 显示了 2009—2018 年百花湖库区营养状态指数的时空变化。库区综合营养状态指数 ($TLI(\Sigma)$) 的 10 年平均值是 45.48 ($36.25 \sim 55.10$) (图 4A), 年内丰水期 (47.75) > 枯水期 (45.34) > 平水期 (44.80), 极大值出现在丰水期的频率为 70%。10 年间, 库区 $TLI(\Sigma)$ 最高值 (52.41) 出现在 2010 年并指示轻度富营养, 其他时段是中营养状态, 库区营养状态总体呈波动下降趋势。2015 年是库区水质最优的时期, 但仍在中营养状态。曾华献等^[35] 研究发现, 红枫湖(2009—2018 年) 总体处于中营养状态, 且水质逐渐改善。百花湖与红枫湖的水质变化趋势相似, 作为百花湖的上游水库, 红枫湖水水质变化直接影响着百花湖。

由图 4B 可知, 10 年间库区营养状态指数以花桥最高, 总体向下游降低。但在 2012 和 2013 年, 库区大坝处的营养状态指数偏高。只有花桥区域达到了轻度富营养化, 其他点位均是中营养状态, 这表明花桥是影响百花湖库区水质的重点区域。2010 年库区 5 个点位的营养状态指数都在高位, 导致 2010 年是轻度富营养。虽然 2013—2018 年花桥仍是营养状态指数最高的区域, 但其他点位营养状态指数都有降低, 这是库区未再

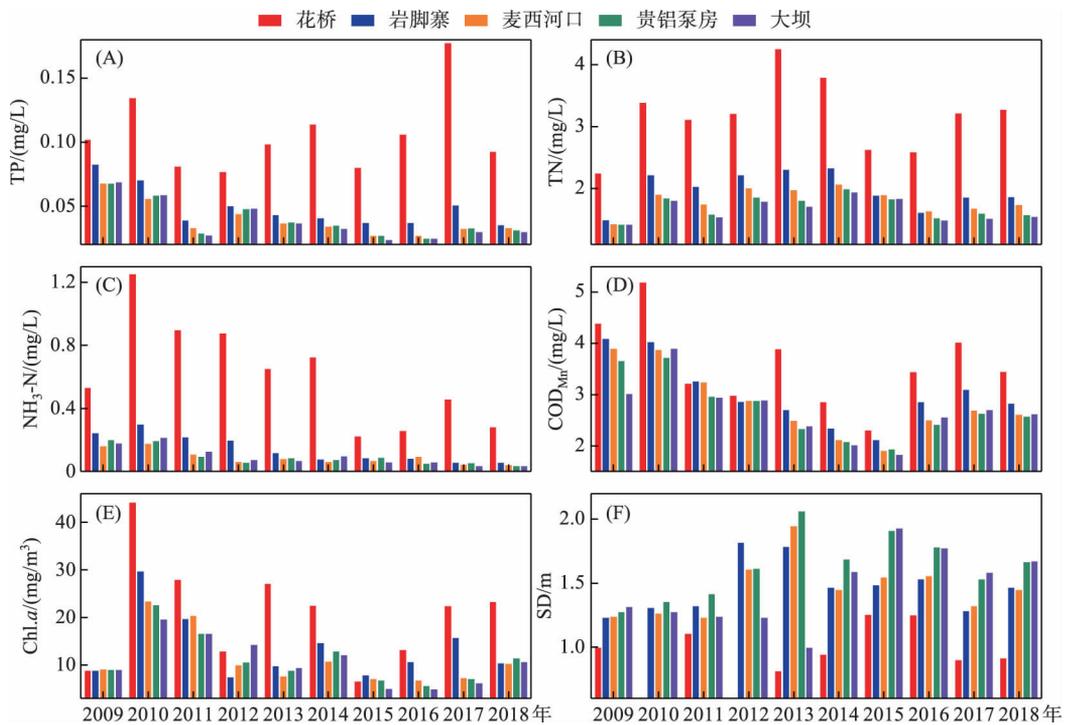


图 3 2009—2018 年百花湖水质指标的空间变化

Fig.3 Spatial changes of water quality parameters of Lake Baihua from 2009 to 2018

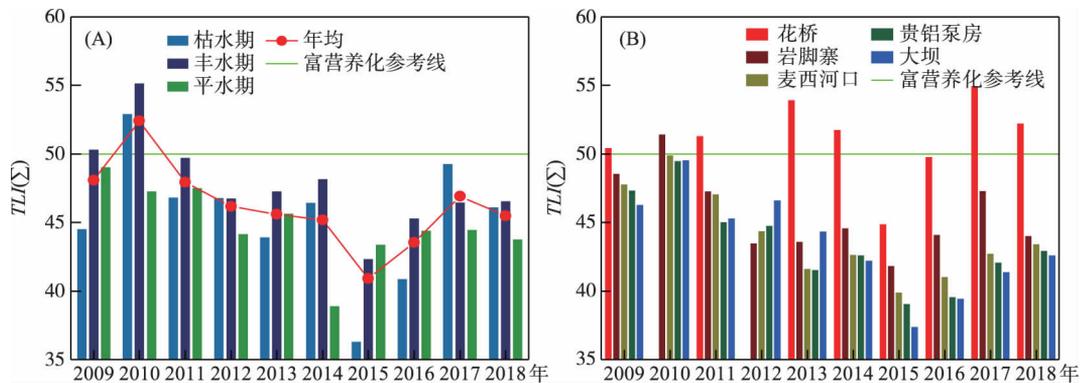


图 4 2009—2018 年百花湖综合营养状态指数的时空变化

Fig.4 The spatiotemporal changes of trophic level index of Lake Baihua from 2009 to 2018

度发生轻度富营养化的原因.

4 讨论

4.1 近 10 年来百花湖水库的水质控制效果

10 年来, 百花湖总体水质维持在地表水环境质量标准(GB 3838—2002) II~IV 类之间, 且以 III 类为主(表 4). 对比 1997—2002 年, 百花湖整体水质都劣于 V 类^[24], 表明近 10 年来百花湖整体水质明显改善. 百花湖库区 TP、TN 和 NH₃-N 浓度控制效果总体向好, Chl.a 浓度波动变化, COD_{Mn} 下降后出现反弹. 《地表水环

境质量评价方法(试行)》(环保部办公厅环办[2011]22号)中规定,在地表水水质评价中,TN作为参考指标单独评价(河流总氮除外)。除去TN指标,以地表Ⅲ类水质为统一标准计,库区各点位Ⅲ类及以上类别的水质达标情况:大坝(80%)>贵铝泵房(80%)>麦西河口(80%)>岩脚寨(80%)>花桥(0),即水质沿上游至下游明显越来越好。表4显示,TN浓度在2009—2014年处于V~劣V类别,2015—2018年处于V类。虽然TN的实达类别由劣V转变为V,这是一种向好的趋势,但仍远高于规定的Ⅲ类。结合图2,影响水质的主要指标是TP和TN;联系图3和图4B,库区水质受花桥区域的影响最大。

表4 2009—2018年百花湖水质变化

Tab.4 The water quality changes of Lake Baihua from 2009 to 2018

		规定类别	实达类别									
			2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年
点位	大坝	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ
	贵铝泵房	Ⅱ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ
	麦西河口	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
	岩脚寨	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
	花桥	Ⅲ	V	V	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	V	Ⅳ	V	V	Ⅳ
指标	pH	Ⅲ	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
	DO	Ⅲ	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
	TP	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅲ
	TN	Ⅲ	V	劣V	V	劣V	劣V	劣V	V	V	V	V
	NH ₃ -N	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	I	I	I	I
	COD _{Mn}	Ⅲ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	I	I	Ⅱ	Ⅱ
	整体	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅲ

4.2 入湖河流对水质变化的影响

入湖河流的水质影响着库区水质,是库区重要的外源污染源,分析支流的水质变化对研究库区水质有重要意义。本文选取百花湖5个重要的支流(东门桥河、南门河、麦西河、栗木河和长冲河),依据《地表水环境质量评价方法(试行)》(环保部办公厅环办[2011]22号),计算河流水质类别比例,将水质定性评价分级为优、良好、轻度污染、中度污染和重度污染,分析2013—2018年各年枯水期、丰水期和平水期的水质评价与河流水质的关系。

表5显示,各支流水质整体定性评价由高到低依次是:长冲河>栗木河>麦西河>南门河>东门桥河。东门桥河处于上游,流经清镇职教城等地,水质整体处于V~劣V类。东门桥河的支流朱家河建有污水处理厂,职教城的生活污水经处理后排入河流,但按照《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级B类标准排放的出水,污染物浓度仍明显高于地表水Ⅲ类标准,严重威胁着百花湖的水质^[37]。南门河处于下游,流经百花新城,人口活动性强使生活污水排放量大^[38],水质整体处于Ⅲ~V类,进而影响入湖口附近的贵铝泵房取水口。2018年栗木河整体评价虽然为Ⅲ类,但近年达标的情况并不乐观,水质有下降趋势。据监测站调查,与上游生活污染加剧有关,这对库区水质也有影响。猫跳河在2011—2016年从中度污染转变为轻度污染^[38]。另外,与有机污染相关的NH₃-N是水体中的耗氧污染物,COD_{Mn}用来衡量水体中有机物的含量。根据贵阳市环境状况公报(2015年和2016年),2014—2015年贵阳市的NH₃-N和COD_{Mn}排放量分别下降了17.1%和18.3%;2017年以来,清镇市对麦西河和南门河开展了水质达标专项行动。NH₃-N和COD_{Mn}总体降低,反映了在21世纪初百花湖外源污染(工农业排放)控制的效果^[32,39]。但COD_{Mn}在2016—2018年又出现小幅升高,可能与近年来百花湖周边的大力开发(商业区和居住区的生活污水排放)有关,此情况应在城市建设中注意^[32]。结合图2,支流TP和TN浓度总体呈上升趋势,而且支流年均总体大于库区年均(包括NH₃-N)。并且,支流水质在枯水期对降低河流水质的影响最大,平水期和丰水期次之,但影响程度差别较小,说明入湖支流全年对百花湖的水质有重要影响。

表 5 2013—2018 年百花湖支流水质的定性评价

Tab.5 The qualitative evaluation of water quality in the tributaries of Lake Baihua from 2013 to 2018

支流名称	年均	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
东门桥河	枯水期	重度污染	重度污染	重度污染	重度污染	重度污染	中度污染
	丰水期	重度污染	重度污染	重度污染	重度污染	重度污染	重度污染
	平水期	重度污染	重度污染	重度污染	重度污染	重度污染	重度污染
	整体水质	劣 V	劣 V	劣 V	劣 V	劣 V	V
南门河	枯水期	中度污染	轻度污染	轻度污染	轻度污染	重度污染	轻度污染
	丰水期	中度污染	轻度污染	轻度污染	轻度污染	中度污染	轻度污染
	平水期	轻度污染	中度污染	轻度污染	重度污染	轻度污染	中度污染
	整体水质	III	III	IV	IV	V	IV
麦西河	枯水期	良好	优	优	良好	轻度污染	优
	丰水期	中度污染	良好	中度污染	优	轻度污染	优
	平水期	优	良好	优	中度污染	良好	优
	整体水质	IV	II	II	III	III	II
栗木河	枯水期	优	良好	优	优	优	轻度污染
	丰水期	优	优	良好	优	优	轻度污染
	平水期	良好	优	良好	优	优	轻度污染
	整体水质	II	II	II	I	II	III
长冲河	枯水期	优	优	优	优	优	优
	丰水期	优	优	优	优	优	轻度污染
	平水期	优	优	优	优	优	轻度污染
	整体水质	I	I	II	I	II	III

4.3 水文、气象条件和水质指标对水质变化的影响

研究发现,藻类生长受多种因素的综合影响,包括生化指标^[40-42](pH、营养盐和浮游动物等)、水文气象条件(温度、透明度、风速、水位、流速、降雨量、径流量和热分层等)^[41, 43-45]和地质地形^[46]等。资料显示,在全球变暖的情况下,气温升高会提高淡水湖泊中的浮游植物的生长速率^[47]。2003—2017 年太湖的春季气温、风速和氮磷比等因子可明显提前浮游植物的开始爆发时间^[48],千岛湖浮游植物群落长期变化(2002—2017 年)与气象水文条件(温度、风速、水位、氮磷比和入库流量等)的关系十分密切^[43],三峡库区建坝后的库形和缓水流也是造成 2004—2005 年发生水华的因素^[46]。在不同的地质地貌、纬度和气候区的湖泊,影响藻类生长的条件不尽相同,更应结合相关知识并因地制宜地查证和筛选影响水库藻类生长的因素。

选取 2010—2015 年月度序列的水文、气象和水质数据,分析其与 Chl.a 浓度和 TLI(Σ)的 Pearson 相关性。结果显示,在百花湖,气温、水温、风速和水位等水文气象因子以及 TP、氮磷比、NH₃-N 和 COD_{Mn}等水质指标与 Chl.a 或湖泊营养化状态有显著相关关系(表 6)。

表 6 显示,百花湖 TLI(Σ)和 Chl.a 浓度与 pH、气温和水温呈正相关,与风速和水位呈负相关。百花湖水温和气温呈明显同步变化,尤其花桥区域,在平水期向丰水期转变时,气温和水温大幅回升。并且,百花湖年际和年内的水位变化幅度很小(2.05 和 0.75 m),说明上游的红枫湖大坝和下游的百花湖大坝起到了很好地水量调节的作用。筑坝改变了原季节性的库区水下泻情况,导致水体流速减小^[49],加之风速较低^[50-51](10 年均值为 1.88 m/s)、温度升高和 pH 偏碱性^[52](7.7~8.5),易形成有利于藻类生长的水文气象条件。花桥区域属局部流速小且水浅的库湾,可能导致不同程度富营养化。

Chl.a 或湖泊营养化状态与 TP、NH₃-N 和 COD_{Mn}等水质指标呈显著正相关,与氮磷比呈显著负相关。Chl.a 浓度反映了浮游植物(藻类)的种类和数量^[53-54],尤其在百花湖的丰水期,Chl.a 浓度升高也可提高水体有机污染物浓度。氮、磷是水体的重要生源要素,氮磷化学计量比(TN:TP)影响湖泊(水库)浮游植物的生长,当氮磷比大于 16 时,通常可认为磷素是限制因子^[55-56],但很多学者认为^[3, 57-58],这一比值根据不同水体并不具有唯一性,该比值受多因素影响会浮动。百花湖库区和支流的氮磷比均值高达 41(12~63)和 39(20~

表 6 2010—2015 年百花湖月度水文、气象和水质参数与 Chl.a 浓度和 TLI(Σ) 的 Pearson 相关性
Tab.6 The Pearson correlation of monthly hydrological, meteorological and water quality parameters with Chl.a concentration and TLI(Σ) in Lake Baihua from 2010 to 2015

	气温	风速	水位	pH	水温	SD	TP	氮磷比	NH ₃ -N	COD _{Mn}	Chl.a
风速	0.248*	1									
水位	-0.184	0.165	1								
pH	0.348**	0.083	-0.174	1							
水温	0.881**	0.138	-0.094	0.213	1						
SD	-0.398**	0.167	0.350**	-0.184	-0.460**	1					
TP	-0.219	-0.184	-0.217	0.035	-0.278*	-0.229	1				
氮磷比	0.097	0.106	0.305**	0.099	0.068	0.296*	-0.652**	1			
NH ₃ -N	-0.267*	-0.242*	-0.219	0.166	-0.362**	-0.244*	0.675**	-0.248*	1		
COD _{Mn}	0.339**	-0.266*	-0.304**	0.381**	0.322**	-0.473**	0.215	-0.202	0.258*	1	
Chl.a	0.292*	-0.109	-0.479**	0.381**	0.191	-0.583**	0.390**	-0.321**	0.409**	0.650**	1
TLI(Σ)	0.315**	-0.266*	-0.482**	0.407**	0.237*	-0.723**	0.502**	-0.445**	0.527**	0.771**	0.855**

* 表示在 0.05 级别(双尾)相关性显著; ** 表示在 0.01 级别(双尾)相关性显著.

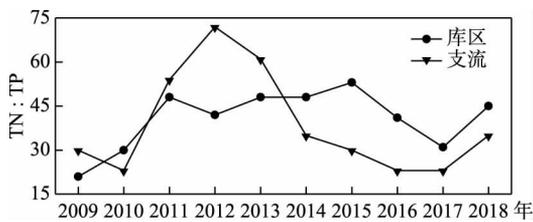


图 5 2009—2018 年百花湖氮磷比的变化

Fig.5 The changes of TN:TP ratio in Lake Baihua during 2009–2018

117) 库区和支流的年内氮磷比都表现为丰水期>枯水期=平水期,反映百花湖水质是磷限制型.对比图 2A 和图 2B,2014—2018 年支流 TP 大幅升高,但此时段的库区 TP、TN 和支流 TN 变化较小,因此从 2014 年开始支流氮磷比大幅下降并小于库区(图 5).虽然支流氮磷比有所降低,但仍不可轻视其对库区氮磷营养盐的影响. Chl.a 浓度与湖泊综合营养状态指数具有强正相关性,反映 Chl.a 浓度升高可显著提高百花湖水体富营养化状态.

另有研究表明^[15,20,25],百花湖在丰水期(4—9 月)出现明显的水体分层,影响水体交换、水温、溶解

氧和氧化还原条件等.百花湖水体 pH 偏碱性,并且丰水期的表层水温度升高和湖底缺氧加剧,可导致沉积物磷素的释放量明显增多^[59-60].但水体分层阻隔了上下水体的交换,进而限制营养盐向表层水体转移而在下层水体积累.随着枯水期(10 月)分层消失,大量营养盐(尤其磷素)快速地输送向表层,再结合气温突降等因素,极易造成水质恶化^[20].这也是枯水期和平水期的氮磷比较丰水期低的原因之一.

5 结论

1) 2009—2018 年,百花湖库区的水质指标呈现不同的时空变化特征. TP、NH₃-N 和 SD 的高值多出现在枯水期, TN、COD_{Mn} 和 Chl.a 的高值多以丰水期为主. TP、TN、NH₃-N、COD_{Mn} 和 Chl.a 浓度呈现出明显的沿流向浓度越低的变化规律,但 SD 呈相反的变化趋势.

2) 近 10 年来,百花湖库区水质整体以地表Ⅲ类水为主, TLI(Σ) 整体处于中营养状态,总体上水质稳定向好.

3) 支流东门桥河和南门河的污染物输入显著影响着库区水质,导致花桥等区域水质超标严重、藻类水华频发.重点支流污染的治理是未来百花湖水污染防治工作的重点,还应重点关注 TP 和 TN 的变化.

4) 百花湖水质的变化不仅与营养盐浓度有关,还与水位、气温、风速等水文气象条件密切相关.气候变化、水动力学等水文气象因素对库区水质(特别是藻类水华)的影响需要高度重视.

6 参考文献

[1] Zhang Y. Assessment and investigation of water security on centralized drinking water sources in towns of Chongqing [Dis-

- sertation]. Chongqing: Southwest University, 2009. [张韵. 重庆市城镇饮用水水源地水安全调查与评价[学位论文]. 重庆: 西南大学, 2009.]
- [2] Wang WD. The research of assessment and forecast methods in drinking water source[Dissertation]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2014. [王文冬. 饮用水水源安全评价与水质预测方法研究[学位论文]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2014.]
- [3] Li H, Wang LJ, Liu Y. Technical framework for water quality safety assessment and early-warning in reservoir basin. *Journal of Hydroecology*, 2018, **39**(6): 1-7. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2018.06.001. [李虹, 王丽婧, 刘永. 水库型流域水质安全评估与预警技术框架. 水生态学杂志, 2018, **39**(6): 1-7.]
- [4] Qin YW, Zhao YM, Ma YQ *et al.* Prevention and control of nitrogen, phosphorus pollution in the Three Gorges reservoir: Ecological compensation, pollution control, quality assessment. *Research of Environmental Sciences*, 2018, **31**(1): 1-8. [秦延文, 赵艳民, 马迎群等. 三峡水库氮磷污染防治政策建议: 生态补偿·污染控制·质量考核. 环境科学研究, 2018, **31**(1): 1-8.]
- [5] Shen JL, Li SP, Zhou YC *et al.* Analysis of water pollution incidents reported by Chinese Media in 2014. *China Public Security: Academy Edition*, 2015, (3): 5-9. [沈继龙, 李树平, 周艳春等. 2014 年我国媒体报道水污染事件分析. 中国公共安全: 学术版, 2015, (3): 5-9.]
- [6] Wang HY. Study on water environment problem analysis and drinking water safety protection measures of urban centralized drinking water source in Tongliao city[Dissertation]. Changchun: Jilin University, 2018. [王昊颖. 通辽城市集中式饮用水源地水环境问题分析及饮水安全保障措施研究[学位论文]. 长春: 吉林大学, 2018.]
- [7] Wang QQ, Wu H, Wang LC *et al.* Study on the impact of sudden pollution on water resources: A case study of Nanjing section of Yangtze River. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, **35**(12): 1557-1563. [王青青, 吴昊, 王腊春等. 突发污染事故对水源地的影响研究: 以长江南京段为例. 生态与农村环境学报, 2019, **35**(12): 1557-1563.]
- [8] Liu J, Xu L, Zhang QJ *et al.* Investigation of temporal and spatial distribution of eutrophication in Sichuan Province. *Environmental Monitoring in China*, 2012, **28**(5): 6-8. [刘佳, 徐亮, 张秋劲等. 四川省水体富营养状况时空分布调查. 中国环境监测, 2012, **28**(5): 6-8.]
- [9] Huo SL, Ma CZ, Xi BD *et al.* Establishing eutrophication assessment standards for four lake regions, China. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **25**(10): 2014-2022. DOI: 10.1016/S1001-0742(12)60250-2.
- [10] Chen XF, Chuai XM, Yang LY. Status quo, historical evolution and causes of eutrophication in lakes in typical lake regions of China. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, **30**(4): 438-443. [陈小锋, 揣小明, 杨柳燕. 中国典型湖区湖泊富营养化现状、历史演变趋势及成因分析. 生态与农村环境学报, 2014, **30**(4): 438-443.]
- [11] Zhao M, Jiao SL, Liang H. Eutrophication of lakes in karst plateau based on the comprehensive trophic state index method. *Journal of China Hydrology*, 2020, **40**(3): 9-15. [赵梦, 焦树林, 梁虹. 基于综合营养状态指数的喀斯特高原湖泊富营养化研究. 水文, 2020, **40**(3): 9-15.]
- [12] Fan FD. Impact of Baihua Lake function adjustment on water supply in Guiyang and Gui'an New District. *Inner Mongolia Water Resources*, 2017, (3): 38-39. [范富东. 百花湖功能调整对贵阳及贵安新区供水的影响. 内蒙古水利, 2017, (3): 38-39.]
- [13] Pang L, Pang ZQ. Investigation of water pollution incidents in Hongfeng Lake and Baihua Lake. *Environmental Protection and Technology*, 2007, **13**(3): 44-48. [庞磊, 庞增铨. 红枫湖、百花湖水体污染事件调查. 环保科技, 2007, **13**(3): 44-48.]
- [14] Wang J, Qin Z, Deng XY. A review on water environmental research of the two reservoirs, Guiyang, China. *Journal of Guizhou University: Natural Science Edition*, 2008, **25**(6): 640-644. [王俭, 秦中, 邓潇雅. 贵阳市“两湖”水环境研究进展. 贵州大学学报: 自然科学版, 2008, **25**(6): 640-644.]
- [15] Wang YC, Zhu J, Ma M *et al.* Thermal stratification and paroxysmal deterioration of water quality in a canyon-reservoir, southwestern China. *J Lake Sci*, 2005, **17**(1): 54-60. DOI: 10.18307/2005.0109. [王雨春, 朱俊, 马梅等. 西南峡谷型水库的季节性分层与水质的突发性恶化. 湖泊科学, 2005, **17**(1): 54-60.]
- [16] Zhou YB, Lin Y, Teng MD *et al.* Investigation of point pollution resources at Hongfeng and Baihua lakes. *Journal of Guizhou Normal University: Natural Sciences*, 2009, **27**(4): 34-36. [周贻兵, 林野, 滕明德等. 红枫湖、百花湖重要点源排污现状调查. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2009, **27**(4): 34-36.]
- [17] Wang JF, Chen JA, Zeng Y *et al.* Spatial distribution of TP, TN and C_{org} in the sediment of Baihua Lake. *Environmental*

- Chemistry*, 2012, **31**(5): 599-603. [王敬富, 陈敬安, 曾艳等. 贵州百花湖沉积物磷、氮及有机碳的空间分布特征. 环境化学, 2012, **31**(5): 599-603.]
- [18] Xia PH, Lin T. Spatial and temporal distributions of the metazooplankton community structure and water quality in Baihuahu reservoir. *Journal of Guizhou Normal University: Natural Sciences*, 2018, **36**(1): 45-50, 56. [夏品华, 林陶. 百花湖水水库后生浮游动物群落结构时空分布特征及水质评价. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2018, **36**(1): 45-50, 56.]
- [19] Wang CE. Investigation, analysis and evaluation of Hong Feng lake, Bai Hua lake and Aha reservoir about pollution source present condition in Guizhou province. Guiyang: Guizhou Normal University, 2009. [王长娥. 贵州省红枫湖、百花湖和阿哈水库污染源的现状调查、分析与评价. 贵阳: 贵州师范大学, 2009.]
- [20] Xia PH, Li QH, Lin T *et al.* Limnological characteristics and environmental effects of the Baihua Reservoir in Guizhou Plateau, China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(8): 1660-1669. DOI: 10.13671/j.hjkkxb.2011.08.019. [夏品华, 李秋华, 林陶等. 贵州高原百花湖水水库湖沼学变量特征及环境效应. 环境科学学报, 2011, **31**(8): 1660-1669.]
- [21] Yao JJ, Shen KG, An M. Ecological restoration both in Hongfeng lake and baihua lake. *Guizhou Science*, 2007, **25**(z1): 144-149. [姚俊杰, 沈昆根, 安苗. 红枫湖、百花湖水体的生态修复. 贵州科学, 2007, **25**(z1): 144-149.]
- [22] Lian GQ. Eutrophication investigation of Baihua Lake and study on the phosphorus forms in sediments [Dissertation]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2009. [连国奇. 百花湖富营养化调查及沉积物磷形态研究[学位论文]. 贵阳: 贵州师范大学, 2009.]
- [23] Meng FL, Li QH, Xiao JS *et al.* Study on distribution characteristics and pollution assessment of total nitrogen and total phosphorus in sediments of baihua lake. *Sichuan Environment*, 2018, **37**(5): 100-105. [孟凡丽, 李秋华, 肖劲松等. 百花湖沉积物总氮总磷分布特征及污染评价研究. 四川环境, 2018, **37**(5): 100-105.]
- [24] Liao GH, Zhong X, Pang ZQ. Analysis of water pollution trend and control measures in both Hongfeng Lake and Baihua Lake. *Earth and Environment*, 2004, **32**(3): 49-52. [廖国华, 钟晓, 庞增铨. 红枫湖、百花湖水污染趋势分析及控制对策. 地球与环境, 2004, **32**(3): 49-52.]
- [25] Zhang J, Liu XL, Gao Y *et al.* Water quality simulation and mitigation strategy of seasonal oxygen-deficiency in Baihua Reservoir. *Journal of Shanghai University: Natural Science*, 2013, **19**(5): 441-447. [张靖, 刘小龙, 高洋等. 百花湖水水质模拟及季节性水质恶化控制对策. 上海大学学报: 自然科学版, 2013, **19**(5): 441-447.]
- [26] Zhao M, Jiao SL, Liang H *et al.* Water environment assessment of Baihua lake based on comprehensive trophic state index method. *Yangtze River*, 2019, **50**(9): 48-53, 76. [赵梦, 焦树林, 梁虹等. 基于综合营养状态指数的百花湖水环境评价. 人民长江, 2019, **50**(9): 48-53, 76.]
- [27] Hu XH, Chen C, Li YY *et al.* An evaluation of water pollution and eutrophication in the baihua lake by means of phytoplankton. *Journal of Guizhou Normal University: Natural Science*, 1999, **17**(4): 1-7. [胡晓红, 陈椽, 李银燕等. 以浮游植物评价百花湖水水质污染及富营养化. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 1999, **17**(4): 1-7.]
- [28] Li QH, Chen LL, Xia PH *et al.* Structure of phytoplankton community and its relationship with environmental factors at the estuary of Maixi River in Baihua Reservoir, Guizhou Province. *J Lake Sci*, 2011, **23**(4): 612-618. DOI: 10.18307/2011.0418. [李秋华, 陈丽丽, 夏品华等. 贵州百花湖麦西河河口浮游植物群落结构及与环境因子关系. 湖泊科学, 2011, **23**(4): 612-618.]
- [29] Xia PH, Liu Y, Xue F *et al.* Dynamics and structure of phytoplankton community in the baihua reservoir, Guizhou. *Earth and Environment*, 2012, **40**(2): 179-187. [夏品华, 刘燕, 薛飞等. 贵州百花湖水水库浮游植物群落结构与季节变化. 地球与环境, 2012, **40**(2): 179-187.]
- [30] Huang ZM, Chen C, Liu ZW *et al.* Diel vertical distribution patterns of phytoplankton in Baihua Reservoir, Guizhou Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(19): 5389-5397. [黄志敏, 陈椽, 刘之威等. 贵州百花湖夏季浮游植物昼夜垂直分布特征. 生态学报, 2014, **34**(19): 5389-5397.]
- [31] Gao TJ, Li QH, Chen FF *et al.* Analysis on eutrophication characteristics of Baihuahu reservoir in the Guizhou plateau. *Environmental Protection Science*, 2014, **40**(2): 22-29, 66. [高廷进, 李秋华, 陈峰峰等. 贵州高原水库百花湖富营养化特征分析. 环境保护科学, 2014, **40**(2): 22-29, 66.]
- [32] Yuan ZH, Li QH, He Y *et al.* Variation and evaluation of nutrients in Baihua Reservoir in Guizhou Plateau based on Bayesian method, 2014-2018. *J Lake Sci*, 2019, **31**(6): 1623-1636. DOI: 10.18307/2019.0602. [袁振辉, 李秋华,

- 何应等. 基于贝叶斯方法的贵州高原百花水库水体营养盐变化及评价(2014—2018 年). *湖泊科学*, 2019, **31**(6): 1623-1636.]
- [33] Wan GJ, Wan EY, Chen JA *et al.* A study on the environmental bio-geochemical process for a deep-water artificial reservoir: As exemplified by lake Hongfeng and lake baihua, Guizhou, China. *Earth and Environment*, 2010, **38**(3): 262-270. [万国江, 万恩源, 陈敬安等. 深水人工湖环境生物地球化学过程研究: 以贵州红枫湖-百花湖为例. *地球与环境*, 2010, **38**(3): 262-270.]
- [34] 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**: 13921402. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.137.
- [35] Zeng HX, Wang JF, Li YL *et al.* Water quality change and influencing factors in Lake Hongfeng (Guizhou Province), 2009-2018. *J Lake Sci*, 2020, **32**(3): 676-687. DOI: 10.18307/2020.0308. [曾华献, 王敬富, 李玉麟等. 贵州红枫湖近 10 年来(2009—2018 年)水质变化及影响因素. *湖泊科学*, 2020, **32**(3): 676-687.]
- [36] 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.]
- [37] Zhang LW. Present situation analysis and improvement countermeasure of water environment quality in Qingzhen City. *Journal of Green Science and Technology*, 2017, (10): 52-54. [张璘玮. 清镇市水环境质量现状分析及改善对策研究. *绿色科技*, 2017, (10): 52-54.]
- [38] Yang M, Meng FL, Wang CC *et al.* Trend analysis of water quality in Baihuahu Lake. *Environmental Protection and Technology*, 2019, **25**(1): 43-46. [杨梅, 孟凡丽, 王程程等. 百花湖流域水质趋势分析. *环保科技*, 2019, **25**(1): 43-46.]
- [39] Dong LL, Wen TC. Analysis and comprehensive evaluation of major pollutants in Baihua Lake, Guiyang City, Guizhou Province. *Beijing Agriculture*, 2015, (15): 245-246. [董玲玲, 文庭池. 贵州省贵阳市百花湖主要污染物分析及综合评价. *北京农业*, 2015, (15): 245-246.]
- [40] Gao Q, Ni JR, Zhao XF *et al.* Community structure characteristics of phytoplankton and their relationship with environmental factors in the typical section of Chin-Sha river. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2019, **55**(3): 571-579. DOI: 10.13209/j.0479-8023.2019.022. [高琦, 倪晋仁, 赵先富等. 金沙江典型河段浮游藻类群落结构及影响因素研究. *北京大学学报: 自然科学版*, 2019, **55**(3): 571-579.]
- [41] Peng NY, Dai GF, Zhang W *et al.* Differences in nutrition condition and algae population in different areas of Poyang Lake. *J Lake Sci*, 2018, **30**(5): 1295-1308. DOI: 10.18307/2018.0512. [彭宇彦, 戴国飞, 张伟等. 鄱阳湖不同湖区营养盐状态及藻类种群对比. *湖泊科学*, 2018, **30**(5): 1295-1308.]
- [42] Yang W, Zheng ZM, Zheng C *et al.* Temporal variations in a phytoplankton community in a subtropical reservoir: An interplay of extrinsic and intrinsic community effects. *Science of the Total Environment*, 2018, **612**: 720-727. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.044.
- [43] Da WY, Zhu GW, Wu ZX *et al.* Long-term variation of phytoplankton community and driving factors in Qiandaohu Reservoir, southeast China. *J Lake Sci*, 2019, **31**(5): 1320-1333. DOI: 10.18307/2019.0522. [宣文怡, 朱广伟, 吴志旭等. 2002—2017 年千岛湖浮游植物群落结构变化及其影响因素. *湖泊科学*, 2019, **31**(5): 1320-1333.]
- [44] Song YJ, Qi J, Liu LH *et al.* Eutrophication status and phytoplankton community structure in Chenghai Lake in summer and winter. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(12): 4106-4113. DOI: 10.13671/j.hjkxb.2019.0308. [宋勇军, 戚菁, 刘立恒等. 程海湖夏冬季浮游植物群落结构与富营养化状况研究. *环境科学学报*, 2019, **39**(12): 4106-4113.]
- [45] Li SN, Chen HY, Peng H *et al.* Temporal and spatial variation patterns of picophytoplankton and their correlations with environmental factors during the wet season in east lake dongting. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2679-2687. DOI: 10.13227/j.hjkx.201912223. [李胜男, 陈豪宇, 彭华等. 丰水期东洞庭湖超微型浮游藻类时空分布特征及其影响因素. *环境科学*, 2020, **41**(6): 2679-2687.]
- [46] Wang HY, Cheng SG, Huang L. Investigation on alga bloom cause of Three Gorges Reservoir. *Yangtze River*, 2007, **38**(2): 16-18, 154. [王海云, 程胜高, 黄磊. 三峡水库“藻类水华”成因条件研究. *人民长江*, 2007, **38**(2): 16-18, 154.]
- [47] Deng JM, Qin BQ. A review on studies of effects of climate change on phytoplankton in freshwater systems. *J Lake Sci*,

- 2015, **27**(1): 1-10. DOI: 10.18307/2015.0101. [邓建明, 秦伯强. 全球变暖对淡水湖泊浮游植物影响研究进展. 湖泊科学, 2015, **27**(1): 1-10.]
- [48] Shi K, Zhang YL, Zhang YB *et al.* Phenology of phytoplankton blooms in a trophic lake observed from long-term MODIS data. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(5): 2324-2331. DOI: 10.1021/acs.est.8b06887.
- [49] Dynesius M, Nilsson C. Fragmentation and flow regulation of river systems in the northern third of the world. *Science*, 1994, **266**(5186): 753-762. DOI: 10.1126/science.266.5186.753.
- [50] Mao YH, Liu SY, Ji L *et al.* Interaction analysis on blue algae growth with water quality and meteorological factors in Taihu lake. *Jilin Water Resources*, 2019, (11): 1-6. [毛彧涵, 刘师源, 纪璐等. 太湖蓝藻生长与水质、气候因素的相互作用分析. 吉林水利, 2019, (11): 1-6.]
- [51] Zhang ZY, Niu Y, Yu H *et al.* Relationship of chlorophyll-a content and environmental factors in lake Taihu based on GAM model. *Research of Environmental Sciences*, 2018, **31**(5): 886-892. [张智渊, 牛远, 余辉等. 基于 GAM 模型的太湖叶绿素 a 含量与环境因子相关性分析. 环境科学研究, 2018, **31**(5): 886-892.]
- [52] Xu H, Liu ZP, Yuan L *et al.* Effect of pH on growth of several freshwater algae. *Environmental Science & Technology*, 2009, **32**(1): 27-30. [许海, 刘兆普, 袁兰等. pH 对几种淡水藻类生长的影响. 环境科学与技术, 2009, **32**(1): 27-30.]
- [53] Wang LQ, Zhang JY, Wang XC *et al.* Mutlianalysis between chlorophyll-a and environmental factors in Dianshan Lake water. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 2008, **17**(1): 58-64. [王丽卿, 张军毅, 王旭晨等. 淀山水体叶绿素 a 与水质因子的多元分析. 上海水产大学学报, 2008, **17**(1): 58-64.]
- [54] Reynolds CS, Descy JP. The production, biomass and structure of phytoplankton in large rivers. *River Systems*, 1996, **10**(1/2/3/4): 161-187. DOI: 10.1127/lr/10/1996/161.
- [55] Redfield AC. The biological control of chemical factors in the environment. *Science Progress*, 1960, **11**: 150-170.
- [56] Schindler DW. Evolution of phosphorus limitation in lakes. *Science*, 1977, **195**(4275): 260-262. DOI: 10.1126/science.195.4275.260.
- [57] Guildford SJ, Hecky RE. Total nitrogen, total phosphorus, and nutrient limitation in lakes and oceans: Is there a common relationship? *Limnology and Oceanography*, 2000, **45**(6): 1213-1223. DOI: 10.4319/lo.2000.45.6.1213.
- [58] Nie ZY, Liang XQ, Xing B *et al.* The current water trophic status in Tiaoxi River of Taihu Lake watershed and corresponding coping strategy based on N/P ratio analysis. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(1): 48-55. [聂泽宇, 梁新强, 邢波等. 基于氮磷比解析太湖苕溪水体营养现状及应对策略. 生态学报, 2012, **32**(1): 48-55.]
- [59] Zhang H, Chen JA, Wang JF *et al.* A simulation study on the release of phosphorus from sediments in Lake Hongfeng, Guizhou Province, China. *Earth and Environment*, 2015, **43**(2): 243-251. [张红, 陈敬安, 王敬富等. 贵州红枫湖底泥磷释放的模拟实验研究. 地球与环境, 2015, **43**(2): 243-251.]
- [60] Chen Q, Chen JA, Wang JF *et al.* *In situ*, high-resolution evidence of phosphorus release from sediments controlled by the reductive dissolution of iron-bound phosphorus in a deep reservoir, southwestern China. *Science of the Total Environment*, 2019, **666**: 39-45. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.194.