

贵州红枫湖近 10 年来(2009—2018 年)水质变化及影响因素*

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

(1: 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)

(2: 中国科学院大学, 北京 100049)

(3: 贵阳市两湖一库环境保护监测站, 贵阳 551400)

(4: 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025)

摘要: 为更好地研究贵州红枫湖的水质变化情况, 本文利用贵阳市两湖一库环境保护监测站 2009—2018 年对红枫湖 7 个代表性监测点的营养盐、叶绿素 *a* (Chl. *a*) 浓度和水温、气温、透明度、降雨量等水文气象条件逐月监测数据, 分析红枫湖 10 年间水体营养盐和 Chl. *a* 浓度以及部分水文气象条件的变化趋势。运用综合营养状态指数 (*TLI*) 对红枫湖营养状态进行评价, 采用 Pearson 相关系数法统计分析 10 年内 Chl. *a* 浓度与总磷 (TP)、总氮 (TN) 等水化学组成及水位、气温等水文气象条件的相关性。结果表明, 2009—2018 年红枫湖水体逐月 TN 浓度有较大波动 (0.56~2.80 mg/L), 春、夏季高于秋、冬季; 水体逐月 TP 浓度为 0.016~0.103 mg/L, 夏季略高于冬季; 逐月氨氮 (NH₃-N) 浓度为 0.007~0.71 mg/L, 春季>冬季>秋季>夏季; 水体逐月 Chl. *a* 浓度呈季节性波动 (0.8~38.9 mg/m³), 夏季>春季>秋季>冬季, 年内先上升后下降。TP、NH₃-N、Chl. *a* 浓度整体呈下降趋势, 10 年间水质有很大改善。经计算红枫湖在这 10 年间处于中营养状态至轻度富营养状态, 且营养状态指数呈逐年下降趋势, 夏季 *TLI* 明显高于其他季节。统计分析表明, 红枫湖水体 Chl. *a* 浓度与高锰酸盐指数、NH₃-N、TP 浓度均呈显著正相关, 与氮磷比呈显著负相关, 与水温、pH、降雨量、气温、日照时数呈显著正相关, 与透明度、气压呈显著负相关, 与水位、湿度、风速无显著相关关系。表明这 10 年来红枫湖水体 Chl. *a* 浓度不仅受营养盐浓度控制, 很大程度上还受控于气象和水文条件。

关键词: 红枫湖; 水质; 综合营养状态指数 (*TLI*); 营养盐; 气象水文条件

Water quality change and influencing factors in Lake Hongfeng (Guizhou Province), 2009–2018*

ZENG Huaxian^{1,2}, WANG Jingfu^{1**}, LI Yulin^{3**}, CHEN Jing'an¹, JIN Zuxue^{1,4}, HE Kangkang^{1,4} & YANG Xiaohong^{1,4}

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

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

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

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

Abstract: In order to better study the variation of water quality in Lake Hongfeng, the changing trend of nutrient and chlorophyll-*a* concentration was analyzed, and the water nutritional status was evaluated by water trophic level index (*TLI*) method based on monthly sampling monitoring data of 7 representative monitoring sites of Lake Hongfeng from 2009 to 2018 by environmental protection monitoring station of two lakes and one reservoir in Guiyang Province. Besides, the correlation between *TLI* and water chemical composition (total phosphorus, total nitrogen, etc.) and hydrometeorological conditions (water level, temperature, etc.) was sta-

* 2019-07-14 收稿; 2019-11-07 收修改稿。

中国科学院野外站联盟项目 (KFJKFJ-SW-YW0YW036)、贵阳市科技项目 (筑科合同[2019]2-9) 和国家自然科学基金委员会-贵州省人民政府喀斯特科学中心项目 (U1612441) 联合资助。

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

tistically analyzed by Pearson. The results showed that the monthly concentration of total nitrogen in the water body fluctuated significantly (ranging from 0.56 mg/L to 2.80 mg/L), and the concentration in spring and summer was higher than that in autumn and winter. The monthly concentration of total phosphorus (from 0.016 mg/L to 0.103 mg/L) in summer was slightly higher than that in winter, and monthly ammonia nitrogen (from 0.007 mg/L to 0.710 mg/L) was spring > winter > autumn > summer. The monthly concentration of chlorophyll-*a* fluctuated seasonally from 0.8 mg/m³ to 38.9 mg/m³, summer > spring > autumn > winter, and the inter-annual trend was first increased and then decreased. The concentration of total phosphorus, ammonia nitrogen and chlorophyll-*a* decreased on the whole, which suggests the water quality is improving greatly during the past ten years. Lake Hongfeng was in the state of medium nutrition to the mild eutrophication state in the past ten years, and the *TLI* showed a trend of decline year by year. *TLI* in summer was significantly higher than that in other seasons. Statistical analysis showed that the chlorophyll-*a* concentration in Lake Hongfeng was significantly positively correlated with ammonia nitrogen, total phosphorus and potassium permanganate index, while negatively correlated with the nitrogen-phosphorus ratio. The chlorophyll-*a* concentration was also significantly positively correlated with water temperature, pH, rainfall, air temperature, and sunshine, and negatively correlated with transparency and air pressure, it was not significant correlation with water level, humidity, and wind speed. The results suggest that chlorophyll-*a* concentration in the reservoir ecosystem is not only controlled by nutrient concentration, but also controlled by meteorological and hydrological conditions.

Keywords: Lake Hongfeng; water quality; trophic level index (*TLI*); nutrient; hydrometeorological conditions

湖泊富营养化是指在自然因素和人类活动的影响下,大量营养盐输入湖泊水体,使湖泊逐步由生产力水平较低的贫营养状态转向生产力水平较高的富营养状态的一种现象^[1].影响湖泊水质的自然环境包括水文及水动力、流域特征、水生生物、气候变化等^[2],人类活动主要有入口状况、经济发展水平、土地利用结构、生态和水利工程及水资源开发利用状况等^[3].人类活动产生的污染物往往不经处理向自然环境排放,这可能是造成水质恶化的一个因素^[4].人类活动影响下的水体富营养化、有机污染等是云贵高原湖泊污染的主要驱动因子,其受污染程度与沿岸人民的生产生活强度密切相关^[5].湖泊富营养化导致水库老化速率增加、造成下层水体缺氧、改变水体颜色等,通过污染源管理等措施,可减轻湖泊的污染负荷,减少养分输入^[6].

红枫湖水库具有供水、发电、养殖、防洪、旅游及调节自然生态环境等多种功能,在贵州省国民经济和社会发展中发挥着重要作用^[7].分析红枫湖长时间尺度的水质变化情况及影响因素,对流域污染控制、生态环境保护具有重要意义^[8].1990s 以来,红枫湖水体富营养化逐渐加剧.1999 年实施以削减氮、磷入湖排放量为目的的综合治理一期工程后,红枫湖水体富营养化得到有效控制^[9].富营养化导致水体中浮游植物迅速增殖,而水体叶绿素 *a* (Chl. *a*) 浓度是表征浮游植物生物量和指示湖泊富营养化程度的一个重要指标,在富营养化湖泊中,Chl. *a* 浓度直接与浮游植物生物量相对应^[10].本文利用贵阳市两湖一库环境保护监测站 2009—2018 年监测的红枫湖逐月水质数据,分析红枫湖 10 年来水质变化特征,结合两湖一库环境保护监测站提供的水文气象数据,研究水体 Chl. *a* 浓度和营养盐、水文气象条件的关系,以期对红枫湖的水环境治理和水资源开发利用提供数据支撑.

1 材料和方法

1.1 研究区域概况和采样方法

红枫湖是贵州省最大的高原人工湖泊之一,位于贵州省清镇市(26°26′~26°35′N, 106°19′~106°28′E),湖区主要由北湖和南湖组成,上至羊昌河,下到偏山寨^[11],地处贵州中部乌江主要支流猫跳河的上游,流域面积 1596 km²,总库容 6.01 亿 m³,平均水深 10.15 m^[12].红枫湖设计正常高水位 1240.00 m,死水位 1227.50 m,枯水期(12—2 月)1228 m,涨水期(3—5 月)1237 m,丰水期(6—8 月)1233 m,平水期(9—11 月)1230 m.红枫湖流域属于亚热带季风湿润气候带,年均气温 14.4℃(4.1~22.7℃),年均降水量 1174.7~1386.1 mm,供水量占贵阳市主城区用水量的 70%^[8].

贵阳市两湖一库环境保护监测站在红枫湖布设 7 个采样点(图 1),分别为来水河流汇合处三岔河(SCH)、后午(HW)、西郊水厂(XJSC)、南湖与北湖交界处花鱼洞(HYD)、大坝(DB)、腰洞(YD)、北湖主要河流入口偏山寨(PSZ).2009—2018 年对上述采样点进行逐月水质监测,监测指标包括总氮(TN)、总磷

(TP)、氨氮(NH₃-N)、氟化物、Chl.*a*浓度、溶解氧(DO)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、粪大肠菌群、水温、pH、透明度(SD)共11项,均由贵阳市两湖一库环境保护监测站测定.水文气象数据也由贵阳市两湖一库环境保护监测站提供,包括2009—2018年红枫湖逐日水位数据,2010—2015年红枫湖逐日气象数据,包括日照时数、云量、气压、气温、降雨量、风速、风向、湿度、蒸发量共9项.

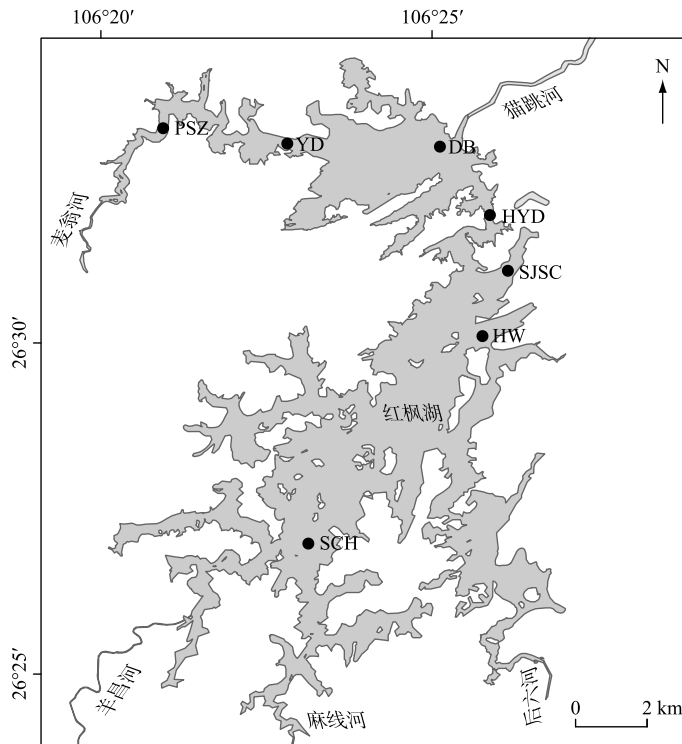


图1 红枫湖监测点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in Lake Hongfeng

1.2 富营养化指数评价方法

目前我国湖泊富营养化评价指标已形成共识,选择反映水库藻类数量的Chl.*a*浓度作为主导评价参数,与Chl.*a*浓度有显著相关关系的TN、TP、COD_{Mn}、SD等作为富营养化评价基本因子^[13].富营养化评价方法多样,主要有营养状态指数法、修正的营养状态指数、综合营养状态指数(TLI)、营养度指数法和评分法^[1].本研究采用综合营养状态指数法进行水质评价,该方法应用广泛,评价结果准确性较高^[14].

综合营养状态指数的计算公式为^[1]:

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

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

$$TLI(TP) = 10 \times [9.436 + 1.624 \ln(TP)] \quad (3)$$

$$TLI(TN) = 10 \times [5.453 + 1.694 \ln(TN)] \quad (4)$$

$$TLI(COD_{Mn}) = 10 \times [0.109 + 2.661 \ln(COD_{Mn})] \quad (5)$$

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

$$TLI(Chl.a) = 10 \times [2.5 + 1.086 \ln(Chl.a)] \quad (7)$$

式中, $TLI(\Sigma)$ 代表综合营养状态指数, W_j 代表第 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, r_{ij} 为第 j 种参数与 Chl.*a* 的相关关系(表 1), m 代表参评参数个数;公式(3)~(7)为各项目营养状态指数的计算公式,其中 SD 的单位 m ,Chl.*a* 的单位是 mg/m^3 ,其余单位均为 mg/L . 为了说明湖泊富营养状态情况,采用 0~100 的一系列连续数字对湖泊营养状态进行分级(表 2).

表 1 湖泊水体 Chl.*a* 浓度与其他参数之间的相关关系^[15]Tab.1 The correlation between Chl.*a* concentration and other parameters of lakes

参数	Chl. <i>a</i>	TP	TN	COD _{Mn}	SD
r_{ij}	1	0.84	0.82	0.83	-0.83
r_{ij}^2	1	0.7056	0.6274	0.6889	0.6889

表 2 湖泊营养状态分级^[13]

Tab.2 Classification for nutrition of lakes

项目	评价等级	项目	评价等级
$0 < TLI(\Sigma) \leq 30$	贫营养	$60 < TLI(\Sigma) \leq 70$	中度富营养
$30 < TLI(\Sigma) \leq 50$	中营养	$70 < TLI(\Sigma) \leq 100$	重度富营养
$50 < TLI(\Sigma) \leq 60$	轻度富营养		

1.3 数据处理与统计方法

水质指标采用 Excel 2010 软件计算出的每月 7 个采样点监测数据的数学平均值,水文气象因子采用 Excel 2010 软件计算出的每月监测数据的数学平均值,相关性分析采用 SPSS 24 软件的 Pearson 相关系数法完成,图像采用 OriginPro 2017 软件绘制.

2 结果与讨论

2.1 2009—2018 年红枫湖水质变化趋势

2009—2018 年红枫湖逐月水质变化如图 2 所示. 红枫湖水体逐月 TN 浓度波动较大 ($0.56 \sim 2.80$ mg/L),最低值出现在 2011 年 9 月,最高值出现在 2010 年 7 月. 1—12 月红枫湖逐月水体 TN 浓度均值分别为 1.44、1.40、1.47、1.49、1.26、1.45、1.93、1.59、1.18、1.36、1.34 和 1.21 mg/L ,春夏季高于秋冬季,其中又以夏季浓度最高. 夏季红枫湖处于丰水期,降雨量增多使地表径流增大,导致地表化肥大量流失,造成 TN 浓度的增高^[16]. 夏季高温导致沉积物中的氮矿化速率加快,在风浪的扰动下水体中 TN 浓度升高,冬季水温较低,水体中悬浮颗粒物溶解度下降有利于其沉积,进而水体中 TN 浓度降低^[17]. 水体 TN 浓度最高值一般出现在春夏季,其中 2010、2012、2014—2018 年出现在 7 月,其余年份出现在 3、4 月. 水体 TN 浓度最低值一般出现在秋冬季,其中 2010、2012、2015、2017 年最低值出现在 5、6 月,在 7 月均回升到最高值,其余 6 年出现在秋冬季. 十年间红枫湖水体 TN 浓度年均值呈现双峰值 ($1.13 \sim 1.78$ mg/L),2010 年达到峰值后快速下降,2011—2014 年连续缓慢上升至第 2 个峰值 (1.63 mg/L) 后呈下降趋势,2018 年小幅上升到 1.28 mg/L ,较 2010 年的峰值下降了 28%.

红枫湖水体逐月 TP 浓度波动较大 ($0.016 \sim 0.103$ mg/L),最低值出现在 2014 年 2 月,最高值出现在 2009 年 11 月. 1—12 月红枫湖水体 TP 浓度均值分别为 0.035、0.029、0.028、0.033、0.037、0.040、0.042、0.030、0.030、0.031、0.035 和 0.036 mg/L ,夏季浓度略高于冬季. 温度影响微生物活性和藻类的降解,进而影响磷的释放,通常高温下沉积物磷释放量比低温时高^[18],夏季沉积物向上覆水释放磷速率也高于冬季,可能由于在夏季湖水底层的还原环境下沉积物表层的早期成岩作用生成磷酸盐进入孔隙水而促进了沉积物向上覆水体释放磷^[19]. 红枫湖沉积物中磷负荷较高,在短时间内就能累积以活性磷形式存在的磷,随着环境因子的改变,极有可能出现底泥二次污染^[20]. 2010 年 2 月开始,TP 浓度大幅下降,2011 年 5 月、2013 年 4—7 月有小幅上升,其余时间 TP 浓度均处于较低水平,总体呈下降趋势. 就年均值而言,2009 年 TP 浓度达到峰值 0.078 mg/L (IV 类水质),2013 年小幅上升达到 0.040 mg/L (III 类水质),2014—2018 年有小幅波动 ($0.020 \sim$

0.026 mg/L), 较 2009 年的峰值下降 67%.

$\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度的变化趋势与 TP 浓度相似, 逐月浓度波动较大 (0.007~0.710 mg/L), 最低值出现在 2018 年 11、12 月, 最高值出现在 2009 年 10 月. 1—12 月红枫湖逐月水体 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度均值分别为 0.101、0.100、0.134、0.152、0.095、0.095、0.065、0.075、0.084、0.140、0.066 和 0.070 mg/L, 春季>冬季>秋季>夏季. 相关研究表明红枫湖水体 $\text{NH}_3\text{-N}$ 分布呈现出夏季>冬季>秋季的规律, 主要由于降水量和径流量对氮浓度影响较大^[21], 与本文研究存在差异, 可能存在其他因素对红枫湖水体 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度起作用, 需要进一步研究. 就年均值而言 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度整体呈下降趋势, 2009 年达到峰值 0.25 mg/L (II 类水质) 后快速下降, 2013 年小幅上升到 0.12 mg/L (I 类水质), 2014—2018 年在较低水平波动 (0.024~0.090 mg/L).

红枫湖水体逐月 Chl. *a* 浓度波动较大 (0.8~38.9 mg/m³), 最低值出现在 2010 年 4 月, 最高值出现在 2011 年 6 月. 1—12 月水体 Chl. *a* 浓度均值分别为 4.96、6.03、5.24、9.94、13.16、18.25、18.31、11.23、12.20、7.94、6.33 和 6.00 mg/m³, 夏季>春季>秋季>冬季. 十年间 Chl. *a* 浓度最高值均在 6、7 月出现, 年内先上升后下降. 春季浮游植物处于快速生长期, 营养盐的大量消耗明显抑制其生长, 此时 Chl. *a* 浓度相对较低. 夏季浮游植物生长稳定, 营养盐限制得到缓解, 浮游植物生物量上升较快, 导致水体中 Chl. *a* 浓度显著升高. 秋季浮游植物处于衰退期, Chl. *a* 浓度逐渐降低^[22], 冬季浮游植物处于休眠期, 导致 Chl. *a* 浓度最低^[23]. 就年均值而言, 整体呈下降趋势, 2011 年达到峰值 18.1 mg/m³, 2011—2014 年急剧下降至 6.4 mg/m³, 2017 年降到 10 年内最低值 4.4 mg/m³, 较 2011 年的峰值下降了 76%, 2018 年上升到 8.9 mg/m³.

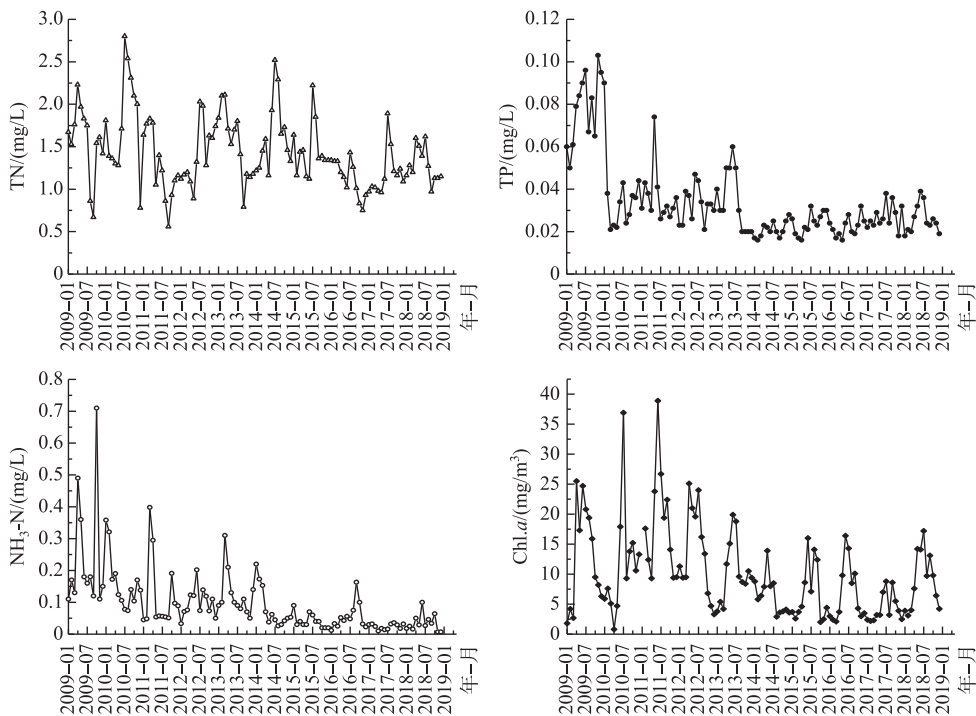


图 2 2009—2018 年红枫湖主要水质指标变化趋势

Fig.2 The variations of the water quality indexes of Lake Hongfeng from 2009 to 2018

詹苏等^[24]对 2003—2009 年红枫湖水体的富营养化特征进行分析, 结果表明这 7 年间水体 TP 浓度为 0.005~3.91 mg/L, TN 浓度为 0.71~5.99 mg/L, 与本文数据相比, 2009—2018 年红枫湖的 TP、TN 浓度明显降低. 2003 年以来红枫湖水体 TP 浓度超标主要分两个阶段, 第 1 阶段为羊昌河断面上游的天峰化工厂磷石膏尾矿库覆膜工程结束前, 尾矿库露天堆放的 400 万吨磷石膏经雨水冲刷随地表径流进入羊昌河, 羊昌河是红枫湖的最大支流, 污染物经焦家桥至观音桥进入红枫湖南湖. 第 2 阶段是 2009 年 10 月该工程结束后, 红

枫湖水体 TP 浓度逐步下降. 红枫湖水体 TN 浓度变化也与工业污染源有关,红枫湖最大的氮污染源贵州化肥厂(时称为贵州美丰化工厂)排放的污水汇入位于偏山寨与腰洞两条监测垂线之间的北湖. 2007 年上半年建成工业污水处理设施后,氮排放大幅削减,2013 年左右该厂停产, TN 浓度呈波动趋势. 总体而言,红枫湖水质有明显改善,与近年来当地政府和环保部门对红枫湖加强监管有关.

2.2 水文气象因子变化

为更好研究红枫湖水质和水文气象因子之间的关系,对水位、水温、气温、降雨量等主要水文气象条件进行分析. 2009—2018 年贵阳市两湖一库环境保护监测站监测的红枫湖逐月水位变化表明,监测期间最低水位出现在 2013 年 5 月,为 1232.37 m,最高水位出现在 2015 年 11 月,为 1239.88 m,最高水位和最低水位之差为 7.51 m(图 3). 最高水位有 6 年出现在 7、8 月(6—8 月处于丰水期),最低水位有 6 年出现在 5 月. 十年间水位年均值分别为 1236.28、1235.93、1235.67、1236.41、1233.96、1236.06、1238.22、1236.39、1235.85 和 1236.51 m,2014 年之前水位缓慢下降,此后明显增高,2015 年水位明显高于前几年,2017、2018 年水位小幅下降. 年内的水位差在一定程度上可以反映年内湖体的换水情况^[25],十年间的年内水位差值分别为 3.25、4.79、2.09、3.54、2.61、6.63、4.49、3.76、4.56 和 2.12 m.

贵阳市两湖一库环境保护监测站监测的红枫湖水库水温和气温变化趋势相似(图 4). 2009—2018 年最高水温出现在 2017 年 8 月,为 27.8℃,最低水温出现在 2012 年 2 月,为 5.93℃. 1—12 月逐月气温均值为 9.34、8.59、11.74、15.54、19.30、21.82、24.73、26.28、25.07、20.67、17.74 和 13.97℃,1—8 月水温逐渐升高,9—12 月水温逐渐降低. 多数藻类生长的最适温度范围为 25~35℃,较高的水温有利于蓝藻成为优势种从而引起水华暴发^[26],红枫湖在 8、9 月最适宜藻类生长. 十年内水温年均值分别为 18.28、18.03、17.33、17.41、17.43、17.80、17.78、18.21、18.46 和 18.27℃,年内温差最大的是 2011 年(6~27.1℃),最小的是 2015 年(8.6~24.5℃). 2010—2015 年红枫湖最高气温出现在 2011 年 8 月,为 23.7℃,最低气温出现在 2011 年 1 月,为 -0.8℃. 六年间气温年均值分别为 14.86、14.25、14.04、15.43、15.01 和 15.25℃,年内气温波动最大的是 2011 年(-0.8~23.7℃),最小的是 2015 年(6~22.1℃);这和上述水温波动极值年份一致,水温随气温升高而升高,两者关系密切.

2010—2015 年年累计降雨量波动较大,2011 年年累计降雨量出现最低值(768.7 mm),2014 年年累计降雨量出现最高值(1632.4 mm)(图 5). 就月降雨量而言,2014 年 7 月累计降雨量超过 400 mm,2010

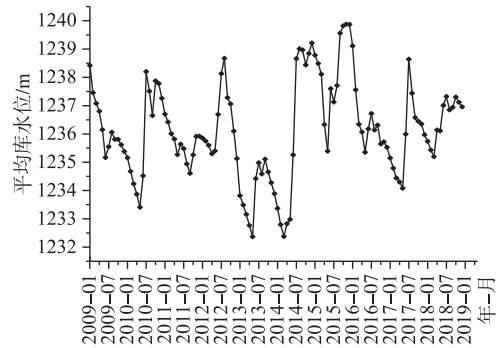


图 3 2009—2018 年红枫湖平均库水位变化趋势

Fig.3 The variations of the mean reservoir water level of Lake Hongfeng from 2009 to 2018

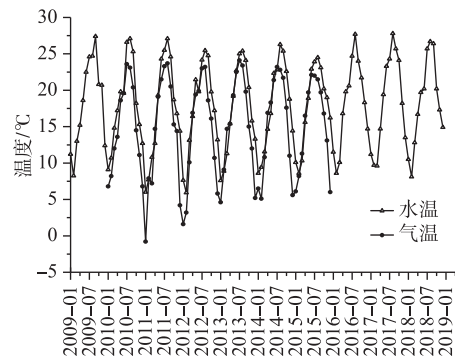


图 4 2009—2018 年红枫湖水温和气温变化趋势

Fig.4 The variations of the water temperature and air temperature of Lake Hongfeng from 2009 to 2018

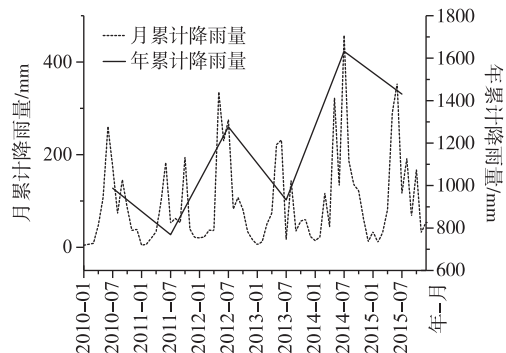


图 5 2010—2015 年红枫湖累计降雨量变化趋势

Fig.5 The variations of the accumulated rainfall of Lake Hongfeng from 2010 to 2015

年6月,2012年6月、7月,2013年6月,2015年5、6月月累计降雨量均超过200 mm. 六年间春季降雨量均值为325.7 mm,夏季降雨量均值为537.9 mm,秋季降雨量均值为252.7 mm,冬季降雨量均值为56.9 mm,春夏季降水多而秋冬季降水少.

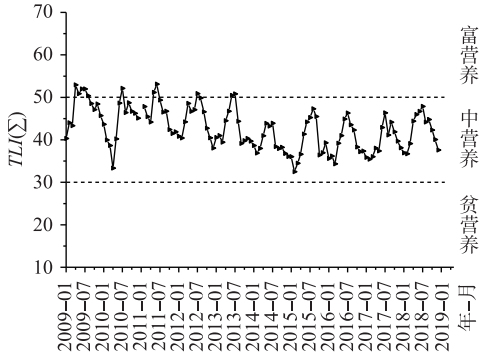


图6 2009—2018年红枫湖营养状态评价

Fig.6 Trophic state assessment of Lake Hongfeng from 2009 to 2018

2.3 红枫湖营养状态评价

2009—2018年红枫湖水体大多处于中营养状态,少数(11个月)处于轻度富营养状态,且综合营养状态指数整体呈波动式下降,2009年4月为最高值(52.94),2015年2月为最低值(32.49)(图6). 十年间TLI逐月均值分别为38.71、39.09、39.30、42.26、44.52、47.32、48.48、45.20、44.44、41.59、40.76和39.88,年内TLI先上升后下降,夏季TLI明显高于其他季节. 降雨带入大量营养盐的同时还会冲刷地面产生地表径流,其中含有的大量营养物质随之输入湖中^[27],红枫湖夏季降雨量最大,大量外源营养盐随之输入湖中,导致营养状态水平最高. 2003—2009年,红枫湖的营养状态处于中营养型至轻度富营养型之间^[24],2009—2018年间红枫湖富营养化程度有所改善. 这可能与2007年以后贵州某些化工公司关停、上游多家

企业生活污水处理设施运行等有关^[28],排入红枫湖的废水大幅减少,水体的氮、磷浓度也下降.

2.4 红枫湖叶绿素a与营养盐的相关性

将红枫湖2009—2018年逐月Chl.a浓度与主要营养盐指标进行相关性分析,结果表明Chl.a浓度与COD_{Mn}、NH₃-N、TP浓度呈显著正相关,与TN/TP呈显著负相关,与TN浓度无显著相关关系(表3),和邓河霞^[29]、朱广伟等^[25]的研究结果一致. 大量研究表明湖泊中氮、磷等营养盐对藻类生长均具有限制作用^[30-32]. Chl.a浓度与COD_{Mn}呈显著正相关,说明浮游植物是影响COD_{Mn}变化的主要原因. Chl.a浓度与TP浓度的相关性,不能表明藻类生物量受到TP浓度的影响,也不能表明水体磷浓度与藻类生长无关^[25]. TN/TP常用来判断氮或磷是否为限制性因素,大于16:1,磷被认为是限制性因素;反之,氮通常被认为是限制性因素^[33]. 红枫湖水体10年内逐月TN/TP几乎大于16:1(5个月除外),可以认为红枫湖为磷限制型湖泊. 水体和沉积物中的氮磷比均对藻类生长起很大作用^[31]. Chl.a浓度与TN的相关关系比较复杂,前人研究认为呈正、负相关的结论都存在^[25,29]. 红枫湖水体Chl.a浓度与TN浓度无显著相关关系,可能由于红枫湖为磷限制型湖泊,TN浓度的变化对其影响较小.

表3 2009—2018年红枫湖水体Chl.a浓度与营养盐指标的相关矩阵

Tab.3 Correlation matrix among Chl.a and nutrient in Lake Hongfeng from 2009 to 2018

	COD _{Mn}	NH ₃ -N	TN/TP	TP	TN
NH ₃ -N	0.207 *				
TN/TP	-0.266 **	-0.266 **			
TP	0.391 **	0.476 **	-0.672 **		
TN	0.263 **	0.249 *	0.418 **	0.227 *	
Chl.a	0.629 **	0.192 *	-0.340 **	0.379 **	0.144

** 在0.01级别(双尾),相关性显著; * 在0.05级别(双尾),相关性显著.

2.5 水文气象条件对叶绿素a的影响

将红枫湖水体2009—2018年逐月Chl.a浓度与水位、水温等水文条件进行相关性分析,结果表明,Chl.a浓度与水温、pH呈显著正相关,与SD呈显著负相关;与水位无显著相关关系(表4).

陈宇炜等^[34]对梅梁湾研究发现,氮、磷与藻类Chl.a浓度无显著相关关系,而水温与藻类Chl.a浓度呈较显著相关,说明氮、磷浓度的变化对梅梁湾藻类的生长没有直接的影响,水文条件可能是更重要的影响因

子. SD 是评价水库水质最直观的指标,浮游植物生物量或 Chl.*a* 浓度是影响水库水体 SD 的主要因素^[35]. 红枫湖水体 Chl.*a* 浓度与 SD 呈显著负相关,说明 Chl.*a* 浓度对 SD 的影响明显,SD 随着 Chl.*a* 浓度的增加而降低. 水温通过控制浮游植物光合作用与呼吸速率影响 Chl.*a* 浓度,温度变化也会引起其他因子的变化,这些因子对浮游植物的生长起到一定作用^[29]. 红枫湖水体 Chl.*a* 浓度与水温呈显著正相关,可能是因为适宜的温度有利于浮游植物的生长,合适范围内温度越高浮游植物生长越快. 红枫湖水体 Chl.*a* 浓度与 pH 呈显著正相关,研究表明在浮游植物大量繁殖的水体中,光合作用较强,消耗水体中大量 CO₂,因此蓝藻水华发生伴随 CO₂ 浓度降低和 pH 的上升^[36-37]. 朱广伟等^[25]发现太湖水体 Chl.*a* 浓度与年均水位呈显著正相关,这与本研究有所差异,可能因为红枫湖属于亚高原深水湖泊,平均水深约 10.7 m,与太湖等存在较大差异,影响其水质的因素还需深入研究.

将红枫湖水库 2010—2015 年水体逐月 Chl.*a* 浓度与风速、气温、降雨量等气象条件进行相关性分析,结果表明 Chl.*a* 浓度与降雨量、气温、日照时数呈显著正相关,与气压呈显著负相关;与湿度、风速无显著相关关系(表 5).

表 5 2010—2015 年红枫湖水体 Chl.*a* 浓度与气象条件的相关矩阵Tab.5 Correlation matrix among Chl.*a* concentration and meteorological index in Lake Hongfeng from 2010 to 2015

	湿度	风速	降雨量	气温	气压	日照时数
风速	-0.149					
降雨量	0.169	0.021				
气温	-0.162	0.195	0.613 **			
气压	0.096	0.073	-0.494 **	-0.691 **		
日照时数	-0.162	0.113	0.411 **	0.821 **	-0.525 **	
Chl. <i>a</i>	0.053	-0.117	0.327 **	0.468 **	-0.593 **	0.374 **

** 在 0.01 级别(双尾),相关性显著.

已有众多学者对浮游植物生长与水文气象因子之间的关系进行研究. 郭朝轩等^[38]研究表明日照时间过长、气温升高、流入水量减少等可能是引发钱塘江水华的关键因素,内陆富营养化水域的营养盐浓度和水文状况都可能受到极端天气的干扰. 施坤等^[37]研究表明气温、风速和 TN/TP 是影响浮游植物物候的重要因素,共同主导着太湖浮游植物的物候过程. 余茂蕾等^[39]研究表明风场对表层水体蓝藻水华的空间分布具有决定性,能够引起蓝藻水华较高的空间异质性,蓝藻水华物质的空间变化对水体颗粒态 N、P、有机质等水质指标产生较大影响.

风速改变湖库垂向扰动速度和物质通量,降雨影响湖库水位和入湖物质负荷,进而影响湖库的生物化学过程^[40]. 2010—2015 年红枫湖逐月风速均值均 < 3 m/s,研究表明风速 < 3 m/s 有利于蓝藻的集聚从而形成水华,引起 Chl.*a* 浓度的升高^[41],此时蓝藻主要在湖面至 0.3 m 深的湖水中聚集^[42]. 红枫湖水体 Chl.*a* 浓度与风速无显著相关关系,可能是由于红枫湖湖体较深,风浪等扰动不易引起表层沉积物的再悬浮^[43],对 Chl.*a* 浓度影响很小. 大量的外源污染物随着降雨进入湖泊水体,对 Chl.*a* 浓度具有显著影响. 极端降雨对浮游植物生物量造成损失,恢复速率取决于限制生长的因素,春夏季恢复快,秋冬季恢复慢^[44]. 浮游植物的生长受到温度的强烈控制,与水温 and 气温呈显著相关,温度是影响浮游植物生物量最重要的因素^[35]. 日照与水温关系密切,一般来说日照时数越长水温越高则越容易引发水华. 日照时数是影响浮游植物光合作用的关键因素之一,充足的日照是水华形成的必要条件^[45]. 鲁韦坤等^[46]研究发现滇池水华发生频率与日照时数

表 4 2009—2018 年红枫湖水体 Chl.*a* 浓度与水文条件的相关矩阵Tab.4 Correlation matrix among Chl.*a* concentration and hydrological index in Lake Hongfeng from 2009 to 2018

	水位	SD	WT	pH
SD	-0.082			
WT	0.233 *	-0.605 **		
pH	0.002	-0.213 *	0.180	
Chl. <i>a</i>	-0.063	-0.563 **	0.443 **	0.354 **

** 在 0.01 级别(双尾),相关性显著. * 在 0.05 级别(双尾),相关性显著.

呈显著负相关,与本文结论相反,可能由于滇池紫外辐射强度高,前期日照时数多,蓝藻已积累了足够生物量,在阴天只要其他气象条件合适也会发生水华.有关大气压力对湖泊水华的直接影响目前缺少研究,湿度对湖泊水华的影响也需开展后续研究^[42].

通过以上分析,红枫湖水体 Chl. *a* 浓度除了与营养盐浓度呈显著相关性,也与部分气象水文因子呈显著相关性,Chl. *a* 浓度的波动很大程度上受水文气象因子的影响.这表明:单纯削减 N、P 营养物质的输入并不能完全解决藻类水华问题,亟需对人工湖型水源地的水华发生机制及其关键控制因素开展深入研究.

3 结论

本研究通过对 2009—2018 年红枫湖的逐月监测数据进行分析,得到如下结论:

1) 2009—2018 年红枫湖水体逐月 TN 浓度呈波动趋势 (0.56~2.80 mg/L),春夏季高于秋冬季;逐月 TP 浓度波动较大 (0.016~0.103 mg/L),夏季浓度略高于冬季;逐月 NH₃-N 浓度波动较大 (0.007~0.710 mg/L),春季>冬季>秋季>夏季;逐月 Chl. *a* 浓度波动较大 (0.8~38.9 mg/m³),夏季>春季>秋季>冬季.红枫湖夏季处于丰水期,降雨量增多使地表径流增大,大量外源营养盐随之输入湖泊导致营养盐浓度增高;高温条件下营养盐的释放量增多,浮游植物生物量也增加.整体而言 TP、NH₃-N、Chl. *a* 浓度呈下降趋势,10 年间水质有很大改善.

2) 2009—2018 年红枫湖水体大多处于中营养状态,少数(11 个月)处于轻度富营养状态,且综合营养状态指数呈波动式下降,年内 TLI 先上升后下降,夏季降雨量最大,大量外源营养盐随之输入湖中,导致营养状态水平最高,夏季 TLI 明显高于其他季节.

3) 红枫湖水体 Chl. *a* 浓度与 COD_{Mn}、NH₃-N、TP 呈显著正相关,与 TN/TP 呈显著负相关,红枫湖为磷限制型湖泊,TN 浓度、TN/TP 均对藻类生长起很大作用.红枫湖水体 Chl. *a* 浓度与水温、pH、降雨量、气温、日照时数呈显著正相关,与 SD、气压呈显著负相关,与水位、湿度、风速无显著相关关系.红枫湖水体 SD 随着 Chl. *a* 浓度增加而降低;适宜范围内温度越高浮游植物生长越快;浮游植物大量繁殖导致 pH 上升;红枫湖湖体较深,风浪扰动对水体 Chl. *a* 浓度影响很小;外源污染物随降雨进入湖泊,对水体 Chl. *a* 浓度有显著影响;充足的日照是水华形成的必要条件;有关气压和湿度对湖泊水华的影响需开展进一步研究.上述研究表明红枫湖水体 Chl. *a* 浓度受营养盐和水文气象条件的双重控制.

4 参考文献

- [1] Wang MC, Liu XQ, Zhang JH. Evaluation 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.]
- [2] Du ZB, Yang WJ, Xiang LX *et al.* Advances in influencing factors on lake water quality. *Environmental Pollution and Prevention*, 2017, **39**(3): 343. [杜泽兵,阳文静,向丽雄等.湖泊水质影响因素研究综述.环境污染与防治,2017,39(3):343.]
- [3] Wang HB, Tian RY. Advances in influencing factors on surface water quality. *Green Technology*, 2016, (10): 186-190. [王海波,田荣燕.地表水水质影响因素研究进展.绿色科技,2016,(10):186-190.]
- [4] Bougarne L, Abbou MB, Haji ME *et al.* Consequences of surface water eutrophication; remedy and environmental interest. *Materials Today: Proceedings*, 2019, **13**: 654-662. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.04.025.
- [5] Yu Y, Zhang M, Qian SQ *et al.* Current status and development of water quality of lakes in Yunnan-Guizhou Plateau. *J Lake Sci*, 2010, **22**(6): 820-828. DOI: 10.18307/2010.0603. [于洋,张民,钱善勤等.云贵高原湖泊水质现状及演变.湖泊科学,2010,22(6):820-828.]
- [6] Moridi A. Dealing with reservoir eutrophication in a trans-boundary river. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2019, **16**(7): 2951-2960. DOI: 10.1007/s13762-018-1775-y.
- [7] Xu DZ. Prevention and control measures of Hongfeng lake eutrophication. *Guizhou Environmental Protection Science and Technology*, 2004, **10**: 24-27. [许德芝.红枫湖水体富营养化防治措施对策探讨.贵州环保科技,2004,10:24-27.]

- [8] Yang TQ, Liu HY, Yu YH. Variation trend of water quality and its causing effect of the Hongfeng Lake. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, **23**(Z1): 96-97. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj2014Z1014. [杨通铨, 刘鸿雁, 喻阳华. 红枫湖水质变化趋势及原因分析. 长江流域资源与环境, 2014, **23**(Z1): 96-97.]
- [9] Li Q. Analysis of recent eutrophication status of Hongfeng and Baihua lakes. *Journal of Guizhou University of Technology: Natural Science Edition*, 2001, (5): 98-102. [李旗. 红枫湖、百花湖近年来富营养化状况分析. 贵州工业大学学报: 自然科学版, 2001, (5): 98-102.]
- [10] Zang CJ, Huang SL, Wu M *et al.* Comparison of relationships between pH, dissolved oxygen and chlorophyll a for aquaculture and non-aquaculture waters. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2011, **219**(1234): 157-174. DOI: 10.1007/s11270-010-0695-3.
- [11] Zhang Y, Zhang YQ, Li XY *et al.* Temporal and spatial variation of water quality of Hongfeng lake in Guizhou province. *Journal of Guizhou Normal University: Natural Sciences*, 2018, **36**(5): 24-29. DOI: 10.16614/j.gznuj.zrb.2018.05.004. [张耀, 杨永琼, 李晓燕等. 贵州红枫湖水质时空变化特征研究. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2018, **36**(5): 24-29.]
- [12] Li F, Qin HC, Chu R *et al.* The discussion of water environmental factors and water bloom prevention of Hongfeng Lake. *Guizhou Science*, 2012, **30**(4): 71-73. [李峰, 秦洪超, 储蓉等. 红枫湖水环境因子监测与水华防控措施探讨. 贵州科学, 2012, **30**(4): 71-73.]
- [13] Li LH, Zheng F, He CH *et al.* Evaluation of reservoir eutrophication in Yinzhou district based on comprehensive eutrophication state index method. *China Water & Wastewater*, 2016, **32**(13): 75-78. [李林衡, 郑飞, 何春花等. 综合营养状态指数法评价鄞州区水库富营养化程度. 中国给水排水, 2016, **32**(13): 75-78.]
- [14] Guo CJ, Hong M, Yan B. Eutrophication of Shifosi Reservoir based on comprehensive nutrition state index. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2016, **47**(1): 119-123. [郭成久, 洪梅, 闫滨. 基于综合营养状态指数法的石佛寺水库水质富营养化评价. 沈阳农业大学学报, 2016, **47**(1): 119-123.]
- [15] Jin XC, Tu QY eds. Investigation criteria for lake eutrophication. Beijing: China Environmental Science Press, 1990. [金相旭, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.]
- [16] Song XM, Ji HB, Jiang YB *et al.* Study of nitrogen contamination variations during the high water period in the watershed of Hongfeng Lake, Guizhou Province. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2010, **29**(1): 27-28. [宋晓敏, 季宏兵, 江用彬等. 丰水期红枫湖流域氮污染特征的变化规律研究. 矿物岩石地球化学通报, 2010, **29**(1): 27-28.]
- [17] Wang SH, Wang WW, Jiang X *et al.* Spatial-temporal dynamic changes of nitrogen and phosphorus and difference analysis in water body of Lihu Lake. *China Environmental Science*, 2014, **34**(5): 1268-1276. [王书航, 王雯雯, 姜霞等. 蠡湖水体氮、磷时空变化及差异性分析. 中国环境科学, 2014, **34**(5): 1268-1276.]
- [18] Chen J, Xu H, Zhan X *et al.* Mechanisms and research methods of phosphorus migration and transformation across sediment-water interface. *J Lake Sci*, 2019, **31**(4): 907-918. DOI: 10.18307/2019.0416. [陈洁, 许海, 詹旭等. 湖泊沉积物-水界面磷的迁移转化机制与定量研究方法. 湖泊科学, 2019, **31**(4): 907-918.]
- [19] Shang LH, Li QH, Qiu HB *et al.* Distribution and phosphorus cycle of chlorophyll a in Hongfeng Lake. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(5): 1023-1030. DOI: 10.13292/j.1000-4890.2011.0139. [商立海, 李秋华, 邱华北等. 贵州红枫湖水体叶绿素 a 的分布与磷循环. 生态学杂志, 2011, **30**(5): 1023-1030.]
- [20] Meng FL, Wang LZ, Song HL *et al.* The research of relationship between nutrients and environmental factors in Hongfeng Lake. *Ecological Science*, 2019, **38**(2): 77-85. [孟凡丽, 王立志, 宋红丽等. 红枫湖水体营养盐与环境因子关系研究. 生态科学, 2019, **38**(2): 77-85.]
- [21] Zhang Y, Yu PP, Xiao H *et al.* Seasonal variation characteristics of nitrogen in Hongfeng Lake. *Guizhou Science*, 2019, **37**(1): 83-87. [张耀, 余萍萍, 肖红等. 红枫湖水体中氮的季节变化特征研究. 贵州科学, 2019, **37**(1): 83-87.]
- [22] Mao XF, Wei XY. The Spatial and temporal distribution of chlorophyll a and its influencing factors in an eutrophic lake. *Environmental Monitoring in China*, 2015, **31**(6): 65-70. [毛旭锋, 魏晓燕. 富营养化湖泊叶绿素 a 时空变化特征及其影响因素分析. 中国环境监测, 2015, **31**(6): 65-70.]
- [23] Jin XC, Jiang X, Wang Q *et al.* Seasonal changes of P adsorption/desorption characteristics at the water-sediment interface in Meiliang Bay, Taihu Lake, China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(1): 24-30. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2008.01.014. [金相旭, 姜霞, 王琦等. 太湖梅梁湾沉积物中磷吸附/解吸平衡特征的季节性变化. 环境科学学报, 2008.01.014.]

- 2008, **28**(1): 24-30.]
- [24] Zhan S, Yang DP. Characteristics evaluation of eutrophication about Hongfeng Lake. *Guizhou Agricultural Science*, 2012, **40**(10): 200-203. [詹苏, 杨大鹏. 红枫湖水体的富营养化特征评价. 贵州农业科学, 2012, **40**(10): 200-203.]
- [25] Zhu GW, Qin BQ, Zhang YL *et al.* Variation and driving factors of nutrients and chlorophyll-a concentrations in northern region of Taihu, China, 2005-2017. *J Lake Sci*, 2018, **30**(2): 279-295. DOI: 10.18307/2018.0201. [朱广伟, 秦伯强, 张运林等. 2005-2017年北部太湖水体叶绿素 a 和营养盐变化及影响因素. 湖泊科学, 2018, **30**(2): 279-295.]
- [26] Liu QG, Chen LQ, Chen Y. Correlation between biomass reduction of silver carp and bighead carp and the occurrence of algal blooms in lake Qiandaohu. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2007, (1): 117-124. [刘其根, 陈立侨, 陈勇. 千岛湖水华发生与主要环境因子的相关性分析. 海洋湖沼通报, 2007, (1): 117-124.]
- [27] Yang ML, Hu ZJ, Liu QG *et al.* Evaluation of water quality by two trophic state indices in Lake Qiandaohu during 2007-2011. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2013, **22**(2): 240-245. [杨梅玲, 胡忠军, 刘其根等. 利用综合营养状态指数和修正的营养状态指数评价千岛湖水质变化(2007年-2011年). 上海海洋大学学报, 2013, **22**(2): 240-245.]
- [28] Xiao ZQ, An YL. Analysis of water environment changes of Lake Hongfeng (2002-2009). *Journal of Environmental Science*, 2012, **31**(3): 29-34. [肖致强, 安艳玲. 2002-2009年红枫湖水污染趋势分析. 环境科学导刊, 2012, **31**(3): 29-34.]
- [29] 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.]
- [30] Chen YC, Tang L, Zhang DG *et al.* The spatial and temporal dynamics of chlorophyll a concentrations and its relationship with phosphorus in Lake Dianchi. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, **27**(4): 1555-1560. [陈永川, 汤利, 张德刚等. 滇池叶绿素 a 的时空变化及水体磷对藻类生长的影响. 农业环境科学学报, 2008, **27**(4): 1555-1560.]
- [31] Li KY, Chu ZS, Jin XC *et al.* The algal growth potential of research in Chaohu Lake water. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, **28**(10): 2124-2131. [李坤阳, 储昭升, 金相灿等. 巢湖水体藻类生长潜力研究. 农业环境科学学报, 2009, **28**(10): 2124-2131.]
- [32] Wang CY, Song JY. Effects of nitrogen and phosphorus on chlorophyll a content of *Enteromorpha* sp in Lianyungang coastal waters. *Journal of Nanyang Institute of Technology*, 2018, **10**(6): 90-94. [王春艳, 宋建阳. 氮磷营养盐对连云港海域浒苔叶绿素 a 含量的影响. 南阳理工学院学报, 2018, **10**(6): 90-94.]
- [33] Li RX, Zhu MY, Chen S *et al.* Responses of phytoplankton on phosphate enrichment in mesocosms. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(4): 603-607. [李瑞香, 朱明远, 陈尚等. 围隔生态系内浮游植物对富磷的响应. 生态学报, 2001, **21**(4): 603-607.]
- [34] Chen YW, Qin BQ, Gao XY. Prediction of blue-green algae bloom using stepwise multiple regression between algae & related environmental factors in Meiliang Bay, Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2001, **13**(1): 63-71. DOI: 10.18307/2001.0110. [陈宇炜, 秦伯强, 高锡云. 太湖梅梁湾藻类及相关环境因子逐步回归统计和蓝藻水华的初步预测. 湖泊科学, 2001, **13**(1): 63-71.]
- [35] Zhu GW, Cui Y, Han XX *et al.* Response of phytoplankton to nutrient reduction in Shahe Reservoir, Taihu catchment, China. *Journal of Freshwater Ecology*, 2015, **30**(1): 41-58. DOI: 10.1080/02705060.2014.994190.
- [36] Zhao MX, Han BP. Analysis of factors affecting cyanobacteria bloom in a tropical reservoir (Tangxi Reservoir, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(7): 1554-1561. [赵孟绪, 韩建平. 汤溪水库蓝藻水华发生的影响因子分析. 生态学报, 2005, **25**(7): 1554-1561.]
- [37] 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.
- [38] Guo CX, Zhu GW, Paerl HW *et al.* Extreme weather event may induce *Microcystis* blooms in the Qiantang River, Southeast China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(22): 22273-22284. DOI: 10.1007/s11356-018-2216-7.
- [39] Yu ML, Hong GX, Zhu GW *et al.* Wind field influence on spatial distribution of cyanobacterial blooms and nutrients in

- Meiliang Bay of Lake Taihu, China. *Environment Science*, 2019, (8): 1-14. DOI: 10.13227/j.hjlx.201901184. [余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟等. 风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响. 环境科学, 2019, (8): 1-14.]
- [40] Zhang C, Lai SY, Gao XP *et al.* A review of the potential impacts of climate change on water environment in lakes and reservoirs. *J Lake Sci*, 2016, **28**(4): 691-700. DOI: 10.18307/2016.0401. [张晨, 来世玉, 高学平等. 气候变化对湖库水环境的潜在影响研究进展. 湖泊科学, 2016, **28**(4): 691-700.]
- [41] 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.]
- [42] Wang JH, He LQS, Yang C *et al.* Comparison of algal bloom related meteorological and water quality factors and algal bloom conditions among Lakes Taihu, Chaohu, and Dianchi (1981-2015). *J Lake Sci*, 2018, **30**(4): 897-906. DOI: 10.18307/2018.0403. [王菁晗, 何吕奇姝, 杨成等. 太湖、巢湖、滇池水华与相关气象、水质因子及其响应的比较(1981—2015 年). 湖泊科学, 2018, **30**(4): 897-906.]
- [43] Zheng XL, Zhang JJ, Chen L. Advances in the study of migration and transformation mechanisms of endogenous phosphorus via sediment resuspension. *Advances in Water Science*, 2013, **24**(2): 287-295. [郑西来, 张俊杰, 陈蕾. 再悬浮条件下沉积物内源磷迁移-转化机制研究进展. 水科学进展, 2013, **24**(2): 287-295.]
- [44] Jessica R, Heidrun F, Claire M *et al.* Response of cyanobacteria and phytoplankton abundance to warming, extreme rainfall events and nutrient enrichment. *Global Change Biology*, 2019, **25**(10): 3365-3380. DOI: 10.1111/gcb.14701.
- [45] Fan YX, Jin SJ, Zhou P *et al.* Analysis on the distributions and meteorological conditions of cyanobacteria bloom in Chaohu Lake. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2015, **43**(4): 191-193, 198. [范裕祥, 金社军, 周培等. 巢湖蓝藻水华分布特征和气象条件分析. 安徽农业科学, 2015, **43**(4): 191-193, 198.]
- [46] Lu WK, Yu LX, Ou XK *et al.* Relationship between occurrence frequency of cyanobacteria bloom and meteorological factors in Lake Dianchi. *J Lake Sci*, 2017, **29**(3): 534-545. DOI: 10.18307/2017.0302. [鲁韦坤, 余凌翔, 欧晓昆等. 滇池蓝藻水华发生频率与气象因子的关系. 湖泊科学, 2017, **29**(3): 534-545.]