

红枫湖营养水平及其历史演化趋势

郭雯¹ 赵俞廷² 黎宇洋¹ 郭建阳^{3*}

(¹西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; ²西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; ³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)

摘要 红枫湖是贵阳市重要的饮用水源地, 但水体富营养化对水质一直是很大的隐患。准确了解红枫湖营养水平对保障当地居民的饮用水安全具有重要的意义。基于 2004—2018 年的监测数据, 采用综合营养状态指数法, 借助统计学的方法, 对红枫湖营养水平及其历史演化趋势进行了评估。结果表明: 过去 15 年红枫湖营养水平总体上在中营养与轻度富营养之间波动; 虽然 2009 年以来红枫湖的营养状况有所缓解, 但 2018 年水体轻度富营养化的概率又明显回升。“全国一策”富营养化评估方法难以准确评估红枫湖水体营养水平, 表明改进富营养化评估方法的必要性; 红枫湖富营养化的风险很可能是多个因素协同作用的结果(如营养物质及其循环条件、水动力学条件和能量的因素等), 目前应多关注水体水动力学条件的变化和营养物质的内循环, 建立相关的预测预警技术, 为红枫湖水质安全提供有力保障。

关键词 营养水平; 综合营养状态指数; 亚深水湖泊; 影响因素

Trophic level and its historical evolution in Lake Hongfeng, Southwest China. GUO Wen¹, ZHAO Yu-ting², LI Yu-yang¹, GUO Jian-yang^{3*} (¹College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ²College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ³State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China).

Abstract: Lake Hongfeng is an important drinking-water source for Guiyang City, where eutrophication is a potential risk to water quality. It is of great importance to understand the trophic level in the lake to ensure the drinking-water safety. Combined with statistical analysis, we analyzed the trophic level and its evolution in the lake using the comprehensive trophic level index, based on the water quality monitoring data between 2004 and 2018. The results showed that the trophic level of the lake was largely between mesotrophication and slight eutrophication during the fifteen years. Although the trophic level has been alleviated since 2009, the probability of slight eutrophication was significantly increased in 2018. It is difficult to evaluate the trophic level accurately based on the national unified method, indicating the necessity for improving the method of trophic level assessment. The risk of eutrophication would be a result of multiple factors, including nutrients and their cycling conditions, hydrodynamic and energy conditions. More attention should be paid to the changes in water hydrodynamic conditions and the internal circulation of nutrients. Developing prediction and early warning technologies is of importance to ensure the safety of water quality in Lake Hongfeng.

Key words: eutrophication; comprehensive trophic level index; sub-deep lake; influencing factor.

国家自然科学基金项目(41877406 和 91647205) 和自然科学基金-贵州省喀斯特科学研究中心联合项目(U1612441) 资助。

收稿日期: 2020-03-13 接受日期: 2020-06-16

* 通讯作者 E-mail: guojianyang@vip.gyig.ac.cn

富营养化是一个全球性的水环境问题。几十年来人们对此进行了大量研究,但富营养化问题仍是一个很大的挑战,尤其是对于兼具饮用水功能的湖泊。2002年中国环保总局出台了地表水环境质量标准(GB 3838—2002),以规范我国地表水水质的管理。然而,我国地表水环境问题仍时有发生,严重影响当地居民的饮用水安全。2018年的生态环境公报显示:我国重点监测的重要湖库中,Ⅲ类以下水质仍占三分之一;在监测营养状态的湖库中,轻度富营养以上的水体仍有29%(<http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk>)。

红枫湖(106°19'E—106°28'E,26°26'N—26°35'N)位于贵阳市西郊,是1960年在乌江流域开发的人工深水型水库。红枫湖流域面积1596 km²,水面面积57.2 km²,总库容约6×10⁸ m³(王雨春等,2002)。红枫湖早期以发电、调洪和供水为主,兼具农业灌溉、养殖和旅游等功能。随着社会经济的发展,其功能定位发生了很大转变。2010年通过的《贵州省红枫湖百花湖水资源环境保护条例》对两湖功能进行了重新定义,目前红枫湖的功能以供水和生态为主。根据《贵安新区总体规划》(2013—2030年),流域内贵安新区在2020—2030年人口将急剧增加,届时红枫湖饮用水的功能地位将进一步强化,饮用水安全问题也将进一步凸显。

富营养化曾导致红枫湖经历过数次严重的水质恶化事件。2003年以来,当地管理部门对红枫湖水质进行了系统监测,这为我们了解红枫湖营养水平及15年来的历史演化提供了大量的基础数据。目前常用的水体营养水平的评估方法是综合营养状态指数法。最早提出的综合营养状态指数法是以水体透明度为基准的卡尔森指数法(Carlson,1977),随后Aizaki等(1981)在此基础上提出以叶绿素a(Chl-a)为基准的方法。金相灿等(1992)结合我国具体情况,在Chl-a为基准的方法上进行了修正和完善。鉴于藻类对营养物质的响应还存在区域差异,Huo等(2013)在我国推荐的综合营养状态指数法基础上,对不同参数的权重系数又进行了进一步细化,逐步形成了我国现有湖泊营养状态分级的方法。除以上经验方法外,还有基于现代数理理论的湖泊营养状态评价方法(如模糊数学评价法和BP神经网络算法等),对此蔡庆华(1997)已经做过系统的评价。

本文选取综合营养状态指数法,结合统计学的

方法和营养状态评价方法的研究进展,对红枫湖的监测数据进行系统整理和分析,以期对红枫湖的营养状态有一个准确的了解,为红枫湖的饮用水安全和水资源管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据收集

数据来自贵州省环境监测总站和贵阳市两湖一库环境保护监测站(2004—2018年的水质常规监测数据)。我们主要选取与水体营养状态有关的参数进行分析,包括Chl-a、总磷(TP)、总氮(TN)、化学需氧量(COD_{Mn})和透明度(SD)等。全湖水水质监测点共7个,包括大坝、腰洞、花渔洞、后午、偏山寨、西郊水厂和三岔河(图1),采样频次为每月1次。

1.2 数据处理

由于水质参数的时空差异较大,因此计算出的综合营养状态指数也有较大的时空差异,但这些数据基本满足Sigmoidal函数的分布特征。本文采用Sigmoidal函数对数据进行整理,从统计学角度对红枫湖的营养状况进行评估。数据处理步骤如下:(1)将数据按累积概率进行排列;(2)将累积概率用Sigmoidal函数进行拟合;(3)从拟合函数中提取信息,对红枫湖营养水平进行评估。

1.3 评价方法

本研究选取金相灿等(1992)推荐的综合营养状态指数法,结合Huo等(2013)对云贵高原湖泊相关的率定值对红枫湖营养状态进行评价(表1),其计算式如下:



图1 红枫湖监测点

Fig.1 Monitoring sites in Lake Hongfeng

表 1 计算水体综合营养状态指数相关的权重指数和系数
Table 1 Weight coefficients and correlation coefficients in the calculation of TLI

指数 Coefficient	Chl-a	TP	TN	SD	COD _{Mn}
W_j	0.266	0.188	0.179	0.183	0.183
W_j^*	0.507	0.064	0.130	0.108	0.191
a	10.860	16.240	16.940	-19.400	26.610
b	25.000	94.360	54.430	51.180	1.090
a^*	10.842	13.932	15.901	-15.940	21.031
b^*	24.899	104.185	59.462	63.226	28.748

注: * : 数据来源于 Huo 等(2013)对云贵高原湖区的率定值。
Note: * : Data come from the calibrated value for the lake area of Yun-nan-Guizhou Plateau (Huo *et al.*, 2013).

$$TLI(\sum) = \sum_{j=1}^m W_j \times TLI(j)$$

式中: $TLI(\sum)$ 为综合营养状态指数; m 为评价参数的个数; $TLI(j)$ 为第 j 种参数的营养状态指数; W_j 为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重。其中 $TLI(i)$ 和 W_j 的计算式如下:

$$TLI(i) = a \ln(i) + b$$

$$W_j = \frac{R_{ij}^2}{\sum_{j=1}^m R_{ij}^2}$$

式中: i 为参评的参数; a, b 为每个参评参数的相关系数; R_{ij} 为第 j 种参数与基准参数 Chl-a 的相关系数; Chl-a 单位为 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$, SD 单位为 m ; 其他指标单位均为 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

湖泊(水库)营养状态分级标准见张蕊等(2013)(表2)。

2 结果与分析

2.1 红枫湖营养水平的现状

从图2A可以看出,根据金相灿等(1992)的率

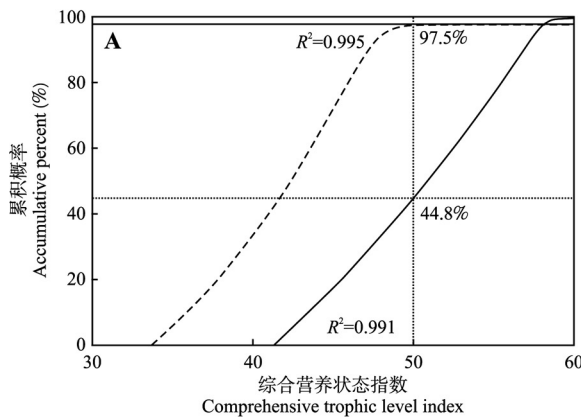


图 2 红枫湖营养水平的现状(2018年)

Fig.2 Current trophic level of Lake Hongfeng (2018)

表 2 湖泊(水库)营养状态分级标准
Table 2 Classification standard of trophic level in lake (reservoir)

营养状态分级 Trophic level	叶绿素 Chl-a ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	营养状态评分值 Score of trophic level	水质定性评价 Qualitative evaluation of water quality
贫营养 Oligotrophication	<1.6	$TLI(\sum) < 30$	优
中营养 Mesotrophication	1.6~10	$30 \leq TLI(\sum) \leq 50$	良
轻度富营养 Light eutrophication	10~26	$50 < TLI(\sum) \leq 60$	轻度污染
中度富营养 Moderate eutrophication	26~64	$60 < TLI(\sum) \leq 70$	中度污染

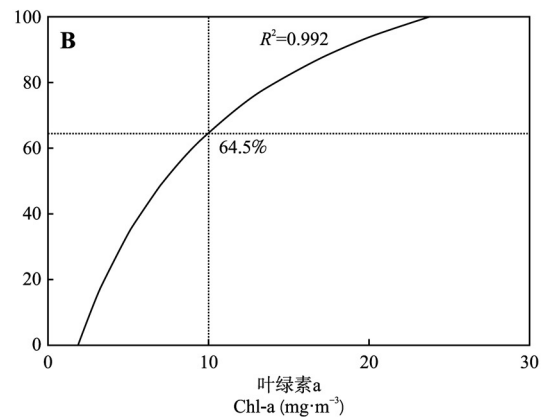
注: 引自张蕊等(2013)。

定值进行计算(图2A,黑色虚线),红枫湖 $TLI(\sum)$ 指数主要在 30~50 波动,中间值为 42.3,低于 50 的概率为 97.5%。据此判断,红枫湖基本上处于中营养水平。若根据 Huo 等(2013)的率定值进行计算,红枫湖 $TLI(\sum)$ 指数主要在 40~60 波动(图2A,黑色实线),中间值为 50.3,低于 50 的概率只有 44.8%。据此判断,红枫湖总体上介于中营养与轻度富营养水平之间。二者之间存在较大的差异。

作为水体富营养化风险指数的 Chl-a 含量,其中间值为 $7.3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,低于 $10.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的概率为 64.5%(图2B)。根据国际通用的水体营养状态评价标准(Huo *et al.*, 2013),红枫湖营养水平主要在中营养与轻度富营养的之间。这说明根据 Huo 等(2013)率定值的计算结果对红枫湖水体营养水平的判断相对准确。

2.2 红枫湖营养水平的历史演化趋势

从图3可以看出,15年来红枫湖综合营养指数的变化大致经历了3个阶段(图3A):一是持续上升



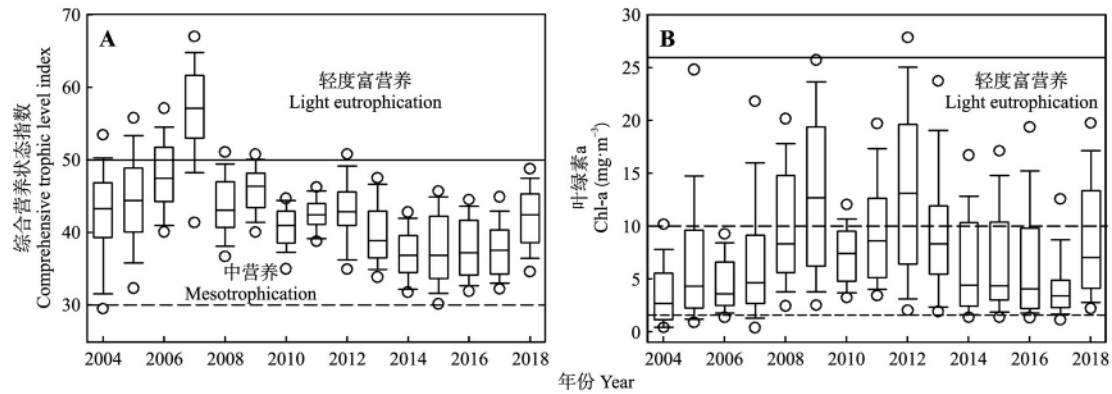


图3 红枫湖历年来 TLI 和 Chl-a 的变化趋势(2004—2018 年)

Fig.3 Trends of TLI and Chl-a in Lake Hongfeng from 2004 to 2018

阶段(2004—2007年);二是波动式下降阶段(2008—2013年);三是相对稳定阶段(2014—2017年)。除2007年外,红枫湖 TLI(Σ)指数基本落在中营养的水平范围内。而 Chl-a 数据显示(图3B),2013年之前基本呈上升的趋势(2010—2011年有所回落),随后逐渐下降,相当时期内水体处于轻度富营养的水平。与 TLI(Σ)指数的变化相比,在红枫湖 TLI(Σ)指数持续上升的阶段(2004—2007年),Chl-a 含量并没有随之明显增加;在 TLI(Σ)指数波动式下降阶段(2008—2013年),Chl-a 含量反而大致呈增加的趋势。这说明据全国统一的率定值得到的 TLI(Σ)指数并不能准确反映水体营养水平或富营养化风险水平的变化。值得注意的是,红枫湖 TLI(Σ)指数和 Chl-a 含量 2018 年又发生了明显反弹。

为更准确地了解红枫湖的营养水平或富营养化

风险,本研究用 Huo 等(2013)的率定值对红枫湖 TLI(Σ)指数重新进行了计算,并对其概率分布特征进行了分析。从图4可以看出,红枫湖 TLI(Σ)指数的曲线主要介于中营养与轻度富营养之间,但曲线重心有明显的差异。2004—2008年红枫湖 TLI(Σ)曲线重心逐渐右移(图4A),水体由中营养逐渐向轻度富营养过渡,轻度营养化的概率由 37% 急剧上升至 74%;2009—2013年 TLI(Σ)曲线重心又逐渐左移(图4B),水体由轻度富营养又逐渐向中营养过渡,轻度营养化的概率由 84% 逐渐下降至 53%;2014—2017年水体营养水平相对较低,轻度营养化概率为 21%~35%,但 2018 年 TLI(Σ)曲线重心又明显右移,水体轻度营养化概率又上升至 55%(图4C)。

从历年来红枫湖水体 Chl-a 含量与相应 TLI

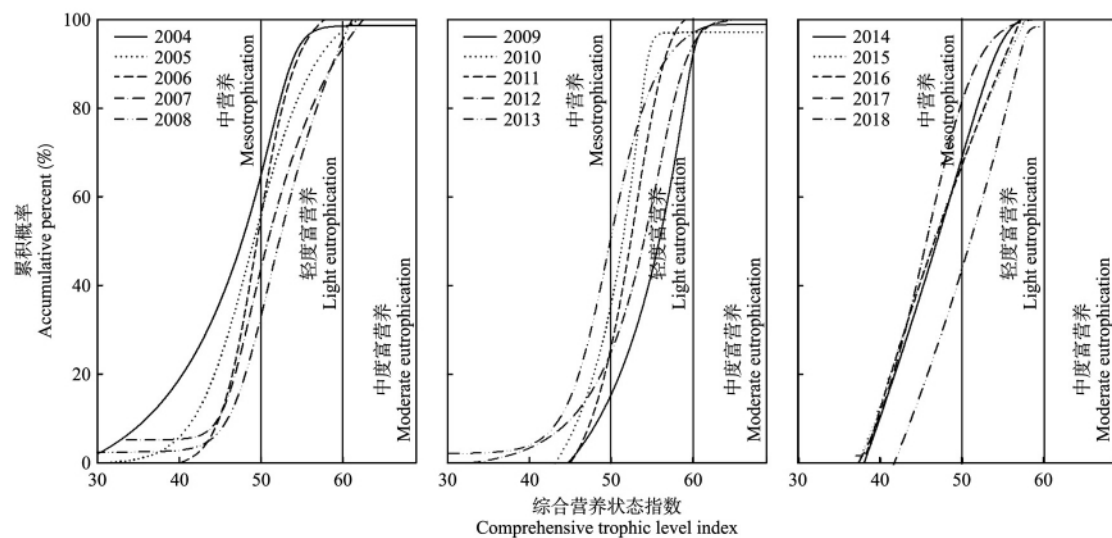


图4 红枫湖历年来 TLI 的变化趋势(2004—2018 年)

Fig.4 Trends of TLI in Lake Hongfeng from 2004 to 2018

(Σ) 指数(均取中间值)的比较可以发现(图 5) 据全国统一率定值计算的 TLI(Σ) 指数很难准确反映水体 Chl-a 含量的变化,但按湖区率定值计算的 TLI(Σ) 指数基本能反映水体 Chl-a 含量的变化。这说明按湖区率定值计算的 TLI(Σ) 指数更能准确反映水体营养水平或富营养化风险的变化。

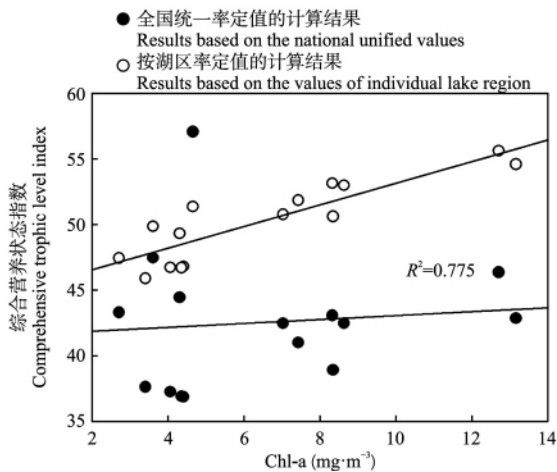


图 5 红枫湖 TLI 指数与水体 Chl-a 含量之间的关系(2004—2018 年)

Fig.5 Relationship between TLI and Chl-a in Lake Hongfeng from 2004 to 2018

3 讨论

3.1 红枫湖营养水平的评估

据以上分析,2004 年以来红枫湖营养水平大体上介于中营养和轻度富营养之间。然而,依据不同率定值计算红枫湖 TLI(Σ) 指数之间存在显著的差异。以 2018 年数据为例(图 2A):按全国统一率定值的计算结果比按湖区率定值的计算结果明显偏小,两组数据的差距足以让对水体营养状态的判断从一个水平跃迁到另一个水平。结合水体 Chl-a 含量来判断,按全国统一率定值的计算结果明显低估了红枫湖水体营养水平。这说明全国统一的富营养化评估方法对特定水体的评估可能产生很大偏差,很难满足准确评估特定水体营养水平的要求。

实际上,TLI(Σ) 指数评估结果的可靠性很大程度上取决于待评估水体的 Chl-a 与物化参数(TN、TP、SD 和 COD_{Mn}) 的响应关系是否仍然满足 TLI(Σ) 指数所采用的相关关系式(邹伟等 2020)。不同背景下基于理化参数和基于 Chl-a 的 TLI 可能产生严重背离(朱广伟等 2019; 邹伟等 2020)。要准确评估特定水体的营养水平,TLI 计算过程中的相

关系数和权重系数都需要重构。这也是 Huo 等(2013)按不同湖区对 TLI 计算系数进行重新率定的主要原因。最近,邹伟等(2020)详细研究了长江中下游不同类型水体基于水质理化指标和基于生物参数的 TLI 指数,指出了“全国一策”富营养化评估方法的局限性。而“全国一策”富营养化评估方法对红枫湖营养水平的明显低估,进一步表明改进水体富营养化评估方法的必要性。

3.2 红枫湖富营养状态的影响因素

经过多年的努力,红枫湖 TN 和 TP 的含量已系统性下降(图 6A 和 6B),但水体 Chl-a 含量却没有随之显著降低(图 3B)。按经典的富营养化理论,营养物质(如 TP、TN 等)是控制水体富营养化风险的主要因素(Xu *et al.*, 2010)。尤其是磷,往往被认为是内陆水体富营养化控制的关键因素(Edmondson *et al.*, 1956; Schindler *et al.*, 2006; Carpenter, 2008)。但红枫湖水体富营养化的状态指数(如 TP、TN 等)与风险指数(Chl-a)之间的相关性并不显著(图 6C 和 6D)。同样的现象在其他水体中也有不同程度的体现,如呼伦湖(梁丽娥等 2016)、洞庭湖(熊剑等 2016)和洱海(陈小华等 2018)等。这表明目前红枫湖富营养化风险不但取决于 TN 和 TP 的变化,还可能与其他非物质因素(如能量和水动力学的因素等)有关。

从全球尺度来看,全球变暖在蓝藻水华从低纬度向高纬度的蔓延起了很重要的作用(Paerl *et al.*, 2008, 2009, 2012)。因此,红枫湖 Chl-a 含量变化可能与水体温度变化有关。但对相关数据的分析发现,水温与 Chl-a 之间的关系在红枫湖相对复杂(以 2011—2012 年数据为例):(1)红枫湖 2011—2012 年水温没有明显的变化,但相应的 Chl-a 含量却有较大的差异;(2)2011 年红枫湖水温与 Chl-a 含量呈现出较好的同步性,但 2012 年水温与 Chl-a 含量明显不同步。因此,在微观尺度上,水温对水体富营养化的影响很可能被其他因素掩蔽了。

此外,红枫湖特定的水动力学条件也可能是影响水体富营养化的重要因素(Rangel *et al.*, 2012)。红枫湖是乌江流域的一个梯级水库,大坝拦截对河流原有的水文、物质转化、输送通量以及生态环境产生了深远的影响(刘丛强等 2009)。大坝拦截效应首先体现在水动力学的改变(如水体变深、水动力条件减弱、水体滞留时间延长和水团混合方式改变等),而水动力学的改变不但会导致营养物质的截

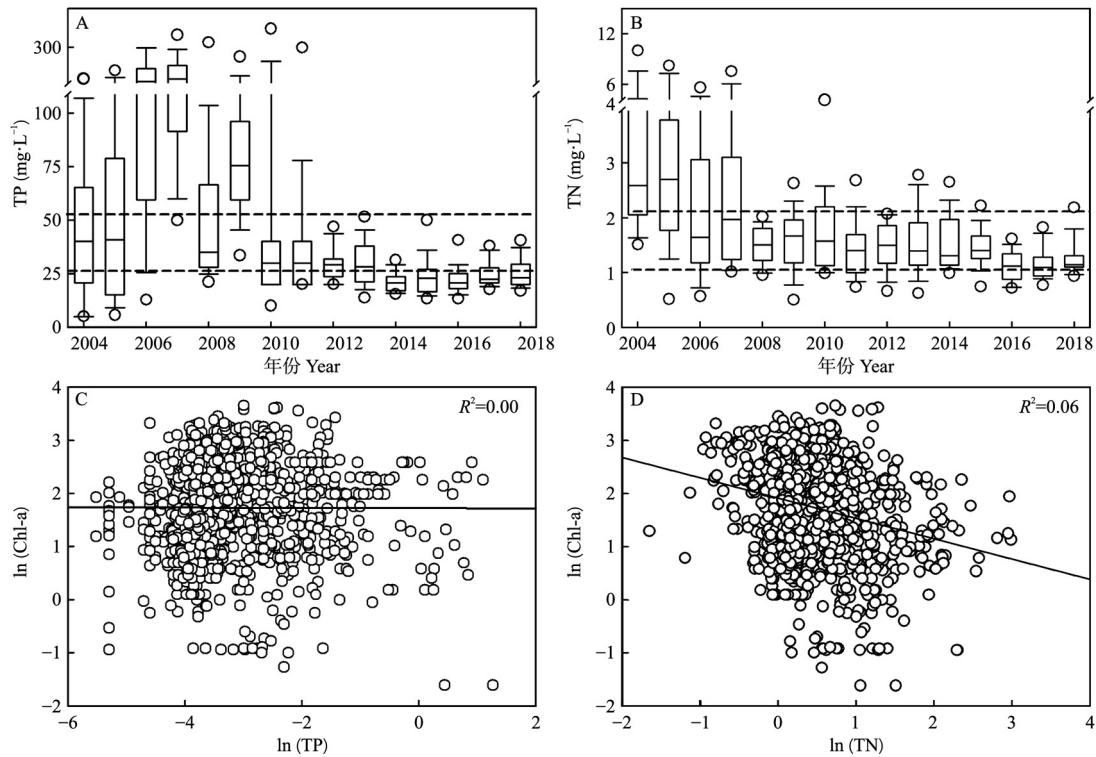


图6 红枫湖 Chl-a 与 TN/TP 之间的相关关系(2004—2018年)
Fig.6 Relationship between Chl-a and TN/TP in Lake Hongfeng within 2004–2018

留和物质循环方式的改变 (Hamilton *et al.*, 1997), 还会导致原有生物群落的适应性变化 (Saito *et al.*, 2001)。红枫湖建库已近 60 年, 底泥中已蓄积了大量的营养物质 (陈椽等, 2008)。作为一个典型的亚深水湖库, 红枫湖季节性分层的水动力学特征 (王敬富等, 2012a), 会显著影响湖泊内源物质的赋存形态 (王敬富等, 2012b) 和加速营养物质的内循环 (王敬富等, 2017)。夏季分层期, 底层水体缺氧加速了底泥中磷的释放, 为来年藻类的生长提供大量营养

物质 (王敬富等, 2012b, 2007)。据估算, 红枫湖内源磷释放对水体磷的贡献高达 25.7%~46.0% (王敬富等, 2018)。极端情况下, 如果水体去分层伴随着气温的持续回升, 很可能诱导水质恶化事件的发生。

总之, 水体富营养化是一个非常复杂的过程, 影响因素也复杂多变。营养盐是水体富营养化的物质基础, 能量是水体富营养化的重要驱动力。在不同水动力学和物质循环条件下, 水体富营养化对营养盐的敏感度也不一样, 导致引起水体富营养化的营养盐的阈值可能有较大差异。这些要素与水生物群落自身的适应性变化交织在一起, 使水体富营养化机制变得更为复杂。红枫湖富营养化风险很可能是多个因素协同作用的结果, 这些作用相互耦合在一起, 使我们对红枫湖富营养化仍停留在定性的认知层面, 对突发性水质恶化事件缺乏有效的预测预警。当前, 红枫湖富营养化风险对水动力学和营养物质循环速率的响应可能更为敏感, 富营养化风险的管控应关注水体水动力学条件的变化和营养物质的内循环, 加强预测预警技术的建立, 尤其是在水体去分层的敏感期。

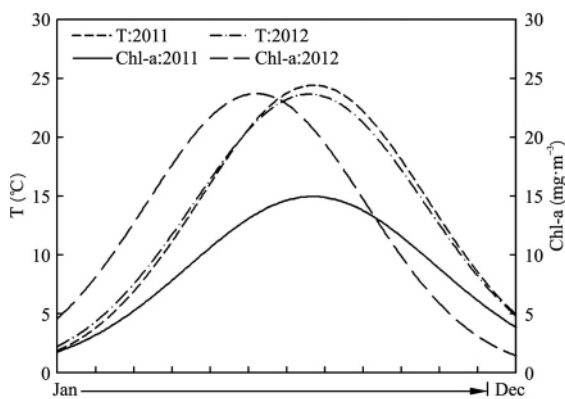


图7 红枫湖水温与 Chl-a 之间的相关关系
Fig.7 Relationship between water temperature and Chl-a in Lake Hongfeng

4 结论

2004 年以来红枫湖富营养水平主要介于中营

养和轻度富营养之间,近年来水体营养水平虽有所降低,但仍有反弹的可能。“全国一策”富营养化评估方法对红枫湖水体营养水平的明显低估,表明改进水体富营养化评估方法的必要性。红枫湖富营养化风险很可能是多个因素协同作用的结果。对于红枫湖富营养化风险的管控,目前应关注水体水动力学条件的变化和营养物质的内循环,建立相关预测预警技术,为保障红枫湖水环境安全提供有力支撑。

参考文献

- 蔡庆华. 1997. 湖泊富营养化综合评价方法. 湖泊科学, 9(1): 89-94. [Cai QH. 1997. On the comprehensive evaluation methods for lake eutrophication. *Journal of Lake Sciences*, 9(1): 89-94.]
- 陈 椽, 张明时, 杨加文, 等. 2008. 红枫湖水底泥的氮磷蓄积量及分布特征. 安徽农业科学, 36(35): 15650-15652. [Chen C, Zhang MS, Yang JW, et al. 2008. Nitrogen and phosphorus deposition and distribution characteristics of sediment in Hongfeng Lake Reservoir. *Journal of Anhui agricultural Sciences*, 36(35): 15650-15652.]
- 陈敬安, 王敬富, 于 佳, 等. 2017. 西南地区水库生态环境特征与研究展望. 地球与环境, 45(2): 115-124. [Chen JA, Wang JF, Yu J, et al. 2017. Eco-environmental characteristics of reservoirs in Southwest China and their research prospects. *Earth and Environment*, 45(2): 115-124.]
- 陈小华, 钱晓雍, 李小平, 等. 2018. 洱海富营养化时间演变特征(1988—2013年)及社会经济驱动分析. 湖泊科学, 30(1): 70-78. [Chen XH, Qian XY, Li XP, et al. 2018. Long-term trend of eutrophication state of Lake Erhai in 1988-2013 and analyses of its socio-economic drivers. *Journal of Lake Sciences*, 30(1): 70-78.]
- 金相灿, 屠清瑛. 1990. 湖泊富营养化调查规范(第二版). 北京: 中国环境科学出版社. [Jin X, Tu Q. 1990. The standard methods in Lake Eutrophication investigation (Second Edition). Beijing: China Environmental Science Press.]
- 梁丽娥, 李畅游, 史小红, 等. 2016. 2006—2015年内蒙古呼伦湖富营养化趋势及分析. 湖泊科学, 28(6): 1265-1273. [Liang LE, Li CY, Shi XH, et al. 2016. Analysis on the eutrophication trends and affecting factors in Lake Hulun, 2006-2015. *Journal of Lake Sciences*, 28(6): 1265-1273.]
- 刘丛强, 汪福顺, 王雨春, 等. 2009. 河流筑坝拦截的水环境响应——来自地球化学的视角. 长江流域资源与环境, 18(4): 384-396. [Liu CQ, Wang FS, Wang YC, et al. 2009. Responses of aquatic environment to river damming: From the geochemical view. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 18(4): 384-396.]
- 王敬富, 陈敬安, 曾 艳, 等. 2012b. 贵州红枫湖沉积物磷赋存形态的空间变化特征. 湖泊科学, 24(5): 789-796. [Wang JF, Chen JA, Zeng Y, et al. 2012b. Spatial distribution characteristics of phosphorus forms in sediment of Lake Hongfeng, Guizhou Province. *Journal of Lake Sciences*, 24(5): 789-796.]
- 王敬富, 陈敬安, 罗 婧, 等. 2018. 红枫湖沉积物内源磷释放通量估算方法的对比研究. 地球与环境, 46(1): 1-6. [Wang JF, Chen JA, Luo J, et al. 2018. Comparative study on quantitative estimations of phosphorus release flux from sediments of Lake Hongfeng, Guizhou Province, China. *Earth and Environment*, 46(1): 1-6.]
- 王敬富, 陈敬安, 杨永琼, 等. 2012a. 红枫湖季节性热分层消亡期水体的理化特征. 环境科学研究, 25(8): 845-851. [Wang JF, Chen JA, Yang YQ, et al. 2012a. Physical and chemical characteristics of water in Lake Hongfeng during the disappearance of seasonal stratification. *Research of Environmental Sciences*, 25(8): 845-851.]
- 王雨春, 万国江, 尹澄清, 等. 2002. 红枫湖、百花湖沉积物全氮、可交换态氮和固定铵的赋存特征. 湖泊科学, 14(4): 301-309. [Wang YC, Wan GJ, Yin CQ, et al. 2002. Distribution of total, exchangeable and fix nitrogen in the sediments of two lakes in Guizhou Province. *Journal of Lake Sciences*, 14(4): 301-309.]
- 熊 剑, 喻方琴, 田 琪, 等. 2016. 近30年来洞庭湖水质营养状况演变特征分析. 湖泊科学, 28(6): 1217-1225. [Xiong J, Yu FQ, Tian Q, et al. 2016. The evolution of water quality and nutrient condition in Lake Dongting in recent 30 years. *Journal of Lake Sciences*, 28(6): 1217-1225.]
- 张 蕊, 高良敏, 席北斗, 等. 2013. 改进的TLI指数法及其在巢湖营养状态评价中的应用. 环境工程学报, 7(6): 2127-2133. [Zhang R, Gao LM, Xi BD, et al. 2013. Improved TLI index method and its application in nutritional states evaluation in Chaohu Lake. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 7(6): 2127-2133.]
- 朱广伟, 许 海, 朱梦圆, 等. 2019. 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. 湖泊科学, 31(6): 1510-1524. [Zhu GW, Xu H, Zhu MY, et al. 2019. Changing characteristics and driving factors of trophic state of lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River in the past 30 years. *Journal of Lake Sciences*, 31(6): 1510-1524.]
- 邹 伟, 朱广伟, 蔡永久, 等. 2020. 综合营养状态指数(TLI)在夏季长江中下游湖库评价中的局限及改进意见. 湖泊科学, 32(1): 36-47. [Zou W, Zhu GW, Cai YJ, et al. 2020. The limitations of comprehensive trophic level index (TLI) in the eutrophication assessment of lakes along the middle and lower reaches of the Yangtze River during summer season and recommendation for its improvement. *Journal of Lake Sciences*, 32(1): 36-47.]
- Aizaki M, Otsuki A, Fukushima T, et al. 1981. Application of modified Carlson's trophic state index to Japanese lakes and its relationships to other parameters related to trophic state. *Research Report from the National Institute for Environmental Studies*, 23: 13-31.

- Carlson RE. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, **22**: 361–369.
- Carpenter SR. 2008. Phosphorus control is critical to mitigating eutrophication. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **105**: 11039–11040.
- Edmondson WT, Anderson GC, Peterson DR. 1956. Artificial eutrophication of Lake Washington. *Limnology and Oceanography*, **1**: 47–53.
- Hamilton TP, Schladow SG. 1997. Prediction of water quality in lakes and reservoirs, Part I. Model description. *Ecological Modelling*, **96**: 91–110.
- Huo SL, Ma CZ, Xi BD, et al. 2013. Establishing eutrophication assessment standards for four lake regions, China. *Journal of Environmental Sciences*, **25**: 2014–2022.
- Paerl HW, Huisman J. 2008. Blooms like it hot. *Science*, **320**: 57–58.
- Paerl HW, Huisman J. 2009. Climate change: A catalyst for global expansion of harmful cyanobacterial blooms. *Environmental Microbiology Reports*, **1**: 27–37.
- Paerl HW, Paul VJ. 2012. Climate change: Links to global expansion of harmful cyanobacteria. *Water Research*, **6**: 1349–1363.
- Rangel LM, Silva LHS, Rosa P, et al. 2012. Phytoplankton biomass is mainly controlled by hydrology and phosphorus concentrations in tropical hydroelectric reservoirs. *Hydrobiologia*, **693**: 13–28.
- Saito L, Johnson BM, Bart HJ, et al. 2001. Assessing ecosystem effects of reservoir operations using food web energy transfer and water quality models. *Ecosystems*, **4**: 105–125.
- Schindler DW, Carpenter SR, Chapra SC, et al. 2006. Reducing phosphorus to curb lake eutrophication is a success. *Environmental Science and Technology*, **50**: 8923–8929.
- Xu H, Paerl HW, Qin B, et al. 2010. Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China. *Limnology and Oceanography*, **55**: 420–432.
-
- 作者简介 郭雯,女,1999年生,从事环境地球化学相关研究。E-mail: 1298157583@qq.com
责任编辑 魏中青
-