

DOI: 10.20103/j.stxb.202408252012

陈辉煌, 金磊, 卢亦帆, 王江滨, 薛媛媛, 罗安琪, 王靖斌, 张宏腾, Nwabuisi Simon Onyekachi, 杨军. 闽三角典型水库藻类水华和 pH 对降雨气象条件的响应. 生态学报, 2025, 45(12): - .

Chen H H, Jin L, Lu Y F, Wang J B, Xue Y Y, Luo A Q, Wang J B, Zhang H T, Nwabuisi Simon Onyekachi, Yang J. Responses of algal bloom and pH to rainfall meteorological conditions in a typical reservoir of golden triangle of southern Fujian Province. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(12): - .

闽三角典型水库藻类水华和 pH 对降雨气象条件的响应

陈辉煌^{1,2}, 金磊^{1,3}, 卢亦帆^{1,2}, 王江滨⁴, 薛媛媛^{1,2}, 罗安琪^{1,2}, 王靖斌⁴, 张宏腾¹,
Nwabuisi Simon Onyekachi^{1,2}, 杨军^{1,*}

1 中国科学院城市环境研究所, 福建省流域生态重点实验室, 水生态健康研究组, 厦门 361021

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 河北大学, 生命科学学院, 保定 071002

4 泉州市山美水库水资源调配中心, 泉州 362028

摘要: 全球变暖背景下, 台风和暴雨等极端天气事件频发, 进而严重影响亚热带水库生态过程。本文以福建省泉州市供水水库(山美水库)为例, 基于连续 5 年(2019 年至 2023 年)的监测数据, 探讨了山美水库藻类水华和 pH 偏高对不同降雨气象条件的响应特征和机制。结果表明, 山美水库藻类水华通常发生在 4 月至 8 月, 主要丰度优势类群为丝状蓝藻; 库区表层水 pH 每年超过 9 的天数最高为 139 d, 主要发生在 4 月至 8 月。真光层热分层强度(每米温差 ≥ 0.20 °C)、7 日内无降雨天数(无降雨天数 < 4 d)和总氮(< 1.80 mg/L)是导致蓝藻成为丰度优势类群的显著因素。真光层热分层强度(每米温差 ≥ 0.15 °C)、7 日内无降雨(无降雨天数 ≥ 7 d)和总磷(≥ 0.034 mg/L)是导致 pH 大于 9 的关键因素。研究结果揭示了降雨气象条件、蓝藻与 pH 的内在关系, 明确了水库蓝藻优势形成和 pH 超标时的气象和环境因子阈值, 可为未来气候变化背景下闽三角城市供水水库水质安全保障与生态管理提供基础数据和科学依据。

关键词: 蓝藻水华; 亚热带水库; pH; 热分层; 真光层

Responses of algal bloom and pH to rainfall meteorological conditions in a typical reservoir of golden triangle of southern Fujian Province

CHEN Huihuang^{1,2}, JIN Lei^{1,3}, LU Yifan^{1,2}, WANG Jiangbin⁴, XUE Yuanyuan¹, LUO Anqi^{1,2}, WANG jingbin⁴,
ZHANG Hongteng¹, NWABUISI Simon Onyekachi^{1,2}, YANG Jun^{1,*}

1 Aquatic EcoHealth Group, Fujian Key Laboratory of Watershed Ecology, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 College of Life Sciences, Hebei University, Baoding 071002, China

4 Water Resources Allocation Center of the Shanmei Reservoir in Quanzhou, Quanzhou 362028, China

Abstract: Under the backdrop of global warming, extreme weather events such as typhoons and storms are increasingly complicating the ecological processes in subtropical reservoirs. Based on five years of continuous monitoring data from 2019 to 2023 at Shanmei Reservoir in Fujian, we explored the response characteristics and mechanisms of algal blooms and high

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF1301302, 2023YFC3304300); 福建省对外合作项目(202210039); 厦门市自然科学基金面上项目(3502Z202473082)

收稿日期: 2024-08-25; 网络出版日期: 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jyang@iue.ac.cn

pH events to different rainfall-related meteorological conditions. The results show that algal blooms typically occurred from April to August, with filamentous cyanobacteria being the dominant species in terms of abundance. The maximum number of days per year with pH exceeding 9 reached 139, primarily occurring from April to August. The thermal stratification intensity in the euphotic layer (temperature difference per meter $\geq 0.20\text{ }^{\circ}\text{C}$), the number of non-rainy days within 7 days (fewer than 4 rainy days within 7 days), and total nitrogen (less than 1.80 mg/L) significantly contributed to the dominance of cyanobacterial abundance. Significant factors, including the thermal stratification intensity in the euphotic layer (temperature difference per meter $\geq 0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$), the number of non-rain days within 7 days (more than 7 non-rain days) and total phosphorus ($\geq 0.034\text{ mg/L}$) were key to pH increase (higher than 9). These results reveal the intrinsic relationships between meteorological conditions, cyanobacteria, and pH, and identify the meteorological and environmental threshold values when cyanobacterial dominance occurs and pH exceeds 9, thereby providing scientific basis for developing water quality management and protection strategies for urban drinking-water reservoirs in the golden triangle of southern Fujian Province under future climate change scenarios.

Key Words: cyanobacterial bloom; subtropical reservoir; pH; thermal stratification; euphotic layer

供水安全是国家安全的一部分,有“水体癌症”之称的蓝藻水华是威胁供水安全的重要因素之一。我国东南地区的城市供水很大程度上依赖水库,其中闽三角地区(厦门、漳州和泉州)的城市供水水库具有水库密度较高,但人均蓄水量较少的特点^[1]。山美水库是闽三角地区典型城市供水水库,它不仅是泉州市数百万居民的主要饮用水来源,也是向金门供水工程的水源地。然而,当前山美水库供水安全面临藻类水华和 pH 偏高挑战,这些水生态环境问题与气候变化密切相关。研究表明,气候变化和人为干扰下,我国长江中下游地区湖库蓝藻水华面积和频率显著增加^[2]。

降雨事件,尤其是暴雨,通过改变水柱的热分层状态和营养盐的分布,可显著影响湖库浮游植物的生物量和群落结构^[3]。研究发现,在亚热带大型贫营养水库中,暴雨事件会诱发藻类水华^[4]。当前全球极端气候事件的频发,其中降雨的频率、强度和持续时间有所增加,这些变化不仅会影响水体生态系统结构和功能稳定性,还将引起严重的藻类水华事件,进一步加剧供水安全风险^[3-4]。湖库的蓝藻水华与营养盐、温度、微量元素、浮游动物牧食、水文条件和气象条件等因素密切相关^[5-7]。目前,湖库蓝藻水华相关研究包括营养盐^[8-9]、富营养状态^[10]、藻类资源利用效率^[11]、水温^[12-13]、光照强度^[14]、水文条件^[15-16]、人类活动干扰^[17]和水柱热分层状态^[18-19]等。然而,关于亚热带地区降雨等气象条件对深水水库的影响报道相对较少^[4,20],需要进一步研究降雨事件对深水(分层)水库蓝藻水华的影响过程与机制。

地表水的 pH 是指水体中氢离子(H^+)的浓度,代表水体的酸碱程度。pH 也是衡量水质的重要指标之一,对水生生物的生存和健康有直接影响,我国地表水环境质量 pH 标准限值范围是 6—9。水体 pH 过低会促进沉积物释放重金属,导致水体重金属含量过高^[21];pH 过高会影响鱼类等生物的生长,导致水生态失衡^[22]。在湖库中,影响水体 pH 变化的主要因素是水体中游离的 CO_2 和碳酸盐平衡体系: $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3 \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{HCO}_3^- \rightleftharpoons 2\text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}$ 。这个化学过程显示了水体溶解的 CO_2 与水分子反应生成碳酸(H_2CO_3)。部分碳酸分解产生氢离子(H^+)和碳酸氢根(HCO_3^-)。 HCO_3^- 可以进一步分解形成 H^+ 和碳酸根(CO_3^{2-})。因此,水体 pH 受 CO_2 、 H_2CO_3 、 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 之间浓度比例的影响。在光照充足情况下,水体中藻类通过光合作用方式吸收溶解的二氧化碳,导致水体的碳酸盐平衡发生变化,特别是藻类光合作用强烈时由于 CO_2 大量消耗致使水体 pH 升高。在夜间光照不足的情况下,藻类通过呼吸作用方式释放二氧化碳,可以降低水体 pH^[23]。在亚热带水库,由于藻类光合作用增强导致的表层水 pH 偏高是夏季普遍存在的问题。

本研究以闽三角典型城市供水水库(山美水库)为对象,基于连续 5 年的监测数据,利用决策树分析、随机森林分析、线性混合模型和结构方程模型等方法,研究水库在不同降雨气象条件下的藻类水华和 pH 偏高

的变化特征,揭示水库表层水体藻类和 pH 对降雨气象条件的响应过程和机制,进而为未来气候变化背景下亚热带城市供水水库的水质保护和生态管理提供基础数据和科学依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域及采样站位

山美水库位于泉州市晋江东溪中游,汇水面积 1023 km^2 ,水库总库容 $6.55 \times 10^8 \text{ m}^3$;水库正常蓄水位 96.48 m ,相应库容 $4.72 \times 10^8 \text{ m}^3$,水面面积 23.75 km^2 ,水库出水口的水位高程(死水位)为 57.48 m ,相应库容为 $1.9 \times 10^7 \text{ m}^3$ ^[24—25]。2019 至 2023 年,在山美水库设立 4 个站位进行藻类和水体理化监测(图 1),本研究共采集 88 份浮游植物(藻类)样品。正常蓄水位时,国控点、山美工区、金圭和码泗的水深分别为 49.8 、 48.3 、 29.8 和 34.8 m 。本研究采样期间,山美水库真光层变化范围为 2.4 — 10.8 m ,平均值为 5.1 m ,混合层变化范围为 0.5 — 35.0 m ,平均值为 8.7 m ,混合层/真光层比值变化范围为 0.1 — 7.4 ,平均值为 1.6 。其中,4—8 月份真光层变化范围为 2.4 — 8.6 m ,平均值为 4.5 m ;混合层变化范围为 0.5 — 11.5 m ,平均值为 3.6 m ;混合层/真光层比值变化范围为 0.1 — 1.8 ,平均值为 0.8 。

2010 至 2020 年期间,研究区年平均气温为 19.8 — $21.4 \text{ }^\circ\text{C}$,平均值为 $20.8 \text{ }^\circ\text{C}$;年日照时数为 1914 — 2382 h ,平均值为 2101 h ;年降水量为 490 — 1656 mm ,平均值为 1029 mm 。研究区干、湿季分明;3—9 月为湿季,降水量占全年的 54% — 92% ,平均值为 78% ;10—2 月为干季,降水量仅占全年的 8% — 46% ,平均值为 22% (气象数据来源于中国气象数据服务中心(<http://data.cma.cn>)崇武气象站的数据(ID 为 59133;北纬 $24^\circ 54' \text{N}$,东经 $118^\circ 55' \text{E}$))。降水量年际间变化大,枯水年的年降水量不及丰水年的一半。

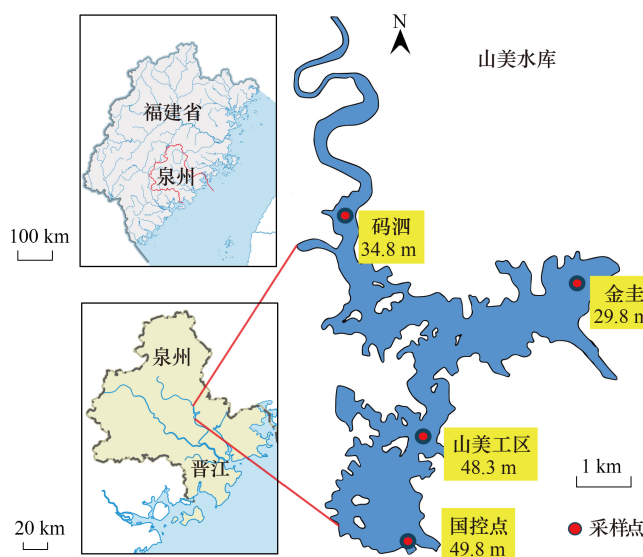


图 1 山美水库地理位置及采样站位分布图

Fig.1 Map of sampling locations in Shanmei Reservoir

图中显示的数字为 4 个采样站位水深

1.2 藻类样品采集与分析

为了监测水库表层水体的藻细胞密度(丰度)、生物量、优势种及群落组成,2019—2021 年使用 5 L 有机玻璃采水器在表层水体(水深 0.5 m)采集浮游植物样品,2022—2023 年在真光层(0.5 m 、 1.5 倍透明度值和 2.7 倍透明度值)水体各采集 2.5 L 水体混合;用 2.5 L 采样瓶收集水样作为浮游植物样品,现场用鲁哥氏液进行固定^[26]。浮游植物样品在实验室静置 48 h 后从 2.5 L 浓缩到 30 mL ,使用倒置显微镜进行鉴定与计数。浮游植物生物量通过细胞体积估算^[26]。分析每份样品藻类丰度优势度和藻类生物量优势度,以藻类丰度优势

度 $\geq 2\%$ 定为该样品优势种。分析蓝藻丰度占比,计算每份样品中蓝藻丰度与藻类总丰度比值;分析蓝藻生物量占比,计算每份样品中蓝藻生物量与藻类总生物量比值。

1.3 理化样品采集与分析

利用多参数水质分析仪(Hydrolab DS5, Hach Company, USA)现场测定水质,测定水体剖面每 0.5 m 间隔的水温($^{\circ}\text{C}$)、pH、溶解氧(mg/L)、浊度(NTU)、电导率($\mu\text{S/cm}$)、盐度、氧化还原电位(mV)。透明度(cm)用 30 cm 直径的塞氏盘进行测定。现场用有机玻璃采水器采集 1 L 表层水体或真光层混合水体,水样立刻带回实验室测定总碳(mg/L)、总有机碳(mg/L)、总氮(mg/L)和总磷(mg/L)。收集滤膜(GF/F, 25 mm 直径, 0.7 mm 孔径)过滤后水样,使用标准方法测定氨氮、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮、磷酸盐^[17]。其中,总碳和总有机碳使用总有机碳分析仪(TOC-VCPH, Total Organic Carbon Analyzer, Shimadzu Corporation, Japan)测定。使用分光光度计测定总氮(碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法)、氨氮(纳氏试剂分光光度法)、硝酸盐氮(紫外分光光度法)、亚硝酸盐氮(分光光度法)、总磷和磷酸盐(钼酸铵分光光度法)^[26–27]。

1.4 藻类水华程度判断标准

藻类水华程度依据《水华遥感与地面监测评价技术规范(试行)》(HJ1098—2020)藻细胞密度评价的水华程度分级标准进行评估,见表 1。

表 1 基于藻细胞密度评价的水华程度分级标准

Table 1 Classification criteria for algal bloom levels based on algae cell density

水华程度级别 Algal bloom level	藻细胞密度 Algal cell density/(个/L)	水华特征 Algal bloom characteristics	水华程度级别 Algal bloom level	藻细胞密度 Algal cell density/(个/L)	水华特征 Algal bloom characteristics
I	0 — 2.0×10^6	无水华	IV	5.0×10^7 — 1.0×10^8	中度水华
II	2.0×10^6 — 1.0×10^7	无明显水华	V	$\geq 1.0 \times 10^8$	重度水华
III	1.0×10^7 — 5.0×10^7	轻度水华			

1.5 水体 pH 判断标准

依据我国《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)规定,水体 pH 的标准限值应在 6 至 9 之间,超出此范围时,表明水生态平衡和水安全已受到影响。因此,本研究中以 pH 超过 9 为判断阈值。

1.6 统计方法

本研究所有的分析计算均使用 R 软件(R software version 4.3.3)实现(R Core Team, 2024)^[28]。通过 R 软件的“randomForest”包进行随机森林分析^[29],分析 pH 和蓝藻占比的关键驱动因子。通过“rpart”包进行决策树分析^[30],解释关键环境因子对 pH 和蓝藻占比的影响。通过“lme4”包进行线性混合模型分析^[31],明确关键环境因子对 pH 和蓝藻占比的影响。通过“lavaan”包进行结构方程模型(structural equation modeling, SEM)分析^[32],评估了降雨条件、理化因子、浮游植物对表层 pH 和蓝藻占比的综合影响,为了保证数据在同一个量级,SEM 分析前对所有因子进行标准化处理^[33]。所有图在“ggplot2”包中可视化。

2 结果与分析

2.1 水库藻类与 pH

2019 年 6 月至 2023 年 9 月,山美水库表层水体藻细胞密度变化显著,变化范围为 5.81×10^4 — 8.00×10^7 个/L(图 2)。其中,2019 年 6 月部分断面达到了轻度水华水平,主要丰度优势种为微囊藻(*Microcystis* sp.),随后的 7 月至 8 月,仍为轻度水华,但主要丰度优势种为假鱼腥藻(*Pseudanabaena* sp.)和尖头藻(*Raphidiopsis* sp.)。2020 年 4 月至 8 月,仅少数断面达到轻度水华;2021 年,仅 7 月份的国控点断面为轻度水华;2022 年,仅 8 月份的国控点断面为轻度水华,主要丰度优势种为尖头藻(*Raphidiopsis* sp.);2023 年 4 月和 6 月为轻度水华,7 月为中度水华,主要丰度优势种均为假鱼腥藻(*Pseudanabaena* sp.)。

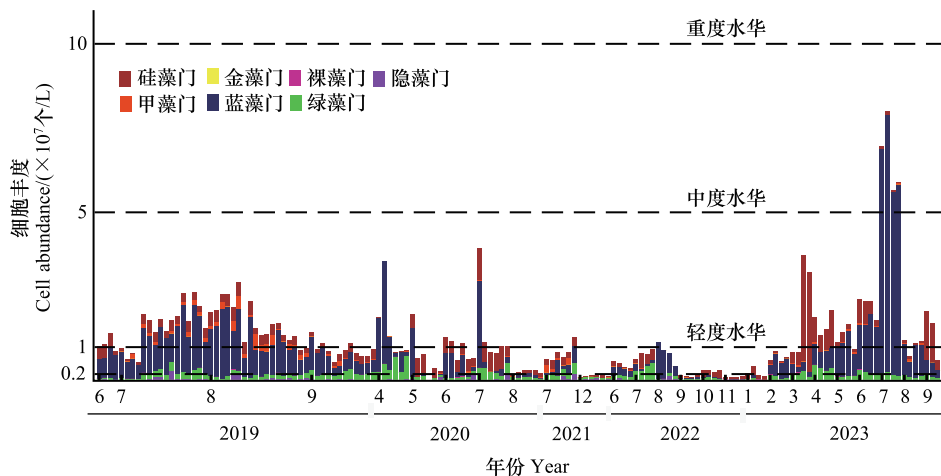


图 2 2019 至 2023 年山美水库藻类水华风险与藻类丰度占比趋势图

Fig.2 Trends of algal bloom risk and algae relative abundance in Shanmei Reservoir from 2019 to 2023

表 2 山美水库国控点每月 pH>9 天数

Table 2 Days of each month with pH>9 in Shanmei Reservoir

年份 Year	1 月 Jan	2 月 Feb	3 月 Mar	4 月 Apr	5 月 May	6 月 Jun	7 月 Jul	8 月 Aug	9 月 Sep	10 月 Oct	11 月 Nov	12 月 Dec	合计 Total
2019	0	0	0	14	27	30	30	25	13	0	0	0	139
2020	0	0	1	16	28	30	31	3	0	0	0	0	109
2021	0	0	0	5	8	13	15	0	0	0	0	0	41
2022	0	0	0	0	0	0	17	28	1	0	0	0	46
2023	0	0	10	22	31	25	21	8	16	3	0	0	136
平均 Mean	0	0	2	11	19	20	23	13	6	1	0	0	94

2019 年至 2023 年期间,山美水库每年 pH 日均值超标天数分别为 139、109、41、46 和 136 d(表 2)。其中,2019 年和 2023 年的 pH 超标情况最严重,尤其是在 5 月至 8 月和 4 月至 7 月期间,每个月 pH 大于 9 的天数均超过 20 d。

结果显示,pH 与藻类生物量存在正相关关系,其中在蓝藻生物量优势度 <0.2 时,pH 与藻类生物量显著正相关($n=74$, $r=0.722$, $P=0.000$),在蓝藻生物量优势度 ≥ 0.2 时,藻类生物量与 pH 相关关系不显著($n=14$, $r=0.013$, $P=0.096$)(图 3);在真光层温差 <0.2 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 时,pH 与藻类生物量显著正相关($n=40$, $r=0.724$, $P=0.000$),真光层温差 ≥ 0.2 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 时,pH 与藻类生物量显著正相关($n=48$, $r=0.335$, $P=0.020$)。在蓝藻生物量优势度 <0.2 时,pH 与降雨量相关关系不显著($P=0.492$);在蓝藻生物量优势度 ≥ 0.2 时,pH 与降雨量显著负相关($n=14$, $r=-0.661$, $P=0.010$)。蓝藻生物量占比与降雨量相关关系不显著($P>0.05$);pH 与 7 日内无降雨天数相关关系不显著($P>0.05$);在真光层温差 <0.2 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 时,蓝藻生物量占比与 7 日内无降雨天数相关关系不显著($P=0.888$),真光层温差 ≥ 0.2 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 时,蓝藻生物量占比与 7 日内无降雨天数显著负相关($n=48$, $r=-0.341$, $P=0.018$)。

2.2 蓝藻丰度占比与 pH 对环境的响应

蓝藻丰度占比的决策树分析和随机森林分析(图 4)结果显示:真光层温差、7 日内无降雨天数、真光层水温和总氮是蓝藻丰度占比为优势的主要驱动因素。在真光层温差 ≥ 0.20 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 时,蓝藻丰度占比平均值大于 0.20($n=49$);在真光层温差 ≥ 0.038 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 时,无降雨天数 ≥ 5 d,蓝藻丰度占比平均值为 0.36($n=12$)。

水体 pH 的决策树分析和随机森林分析(图 4)结果显示,真光层温差、藻类生物量、7 日内无降雨天数、降雨量和总磷是山美水库 pH 的主要驱动因素。在真光层温差 ≥ 0.15 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 时,且 7 日内无降雨天数 ≥ 7 d,pH

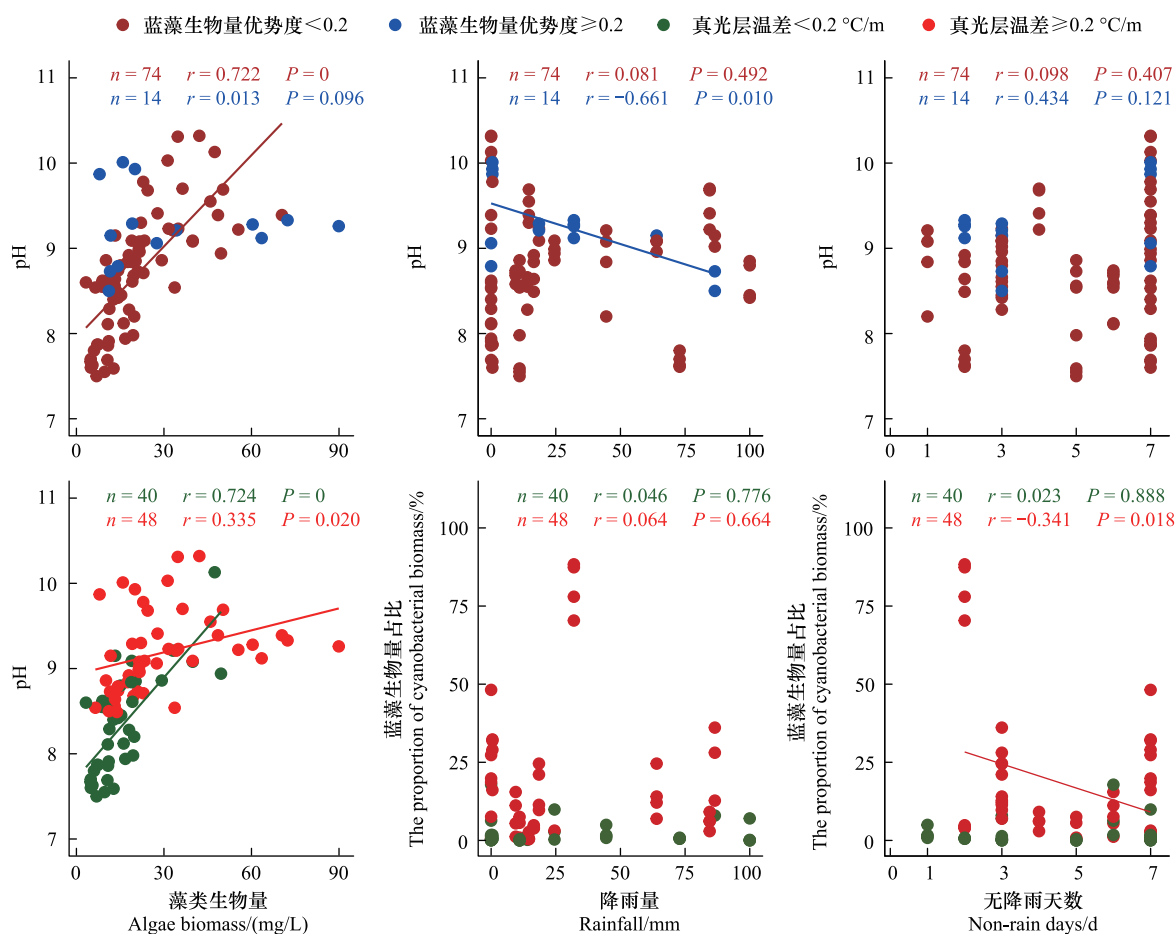


图3 山美水库藻类生物量、pH和降雨气象条件之间的关系

Fig.3 The relationships among rainfall meteorological conditions, pH and algae biomass in Shanmei Reservoir

图中为7日内降雨量和无降雨天数 The rainfall and the number of non-rain days within 7 days

平均值大于9.2($n=20$);7日内有降雨情况下,在降雨量 ≥ 18 mm时,pH平均值为8.9—9.3($n=20$)。

2.3 环境对藻类生物量占比与pH的影响途径

广义线性混合模型的结果显示(图5),真光层水温、7日内无降雨天数和氮磷比均对蓝藻生物量占比有不同程度的影响,藻类生物量、总磷、降雨量、真光层温差和7日内无降雨天数均对pH有显著的影响。

结构方程模型显示(图5),藻类生物量、真光层温差、7日内无降雨天数和降雨量均显著正向影响水体pH;真光层水温显著正向影响蓝藻生物量占比,但7日内无降雨天数显著负向影响蓝藻生物量占比;蓝藻生物量占比和真光层水温均显著正向影响藻类生物量。

3 讨论

3.1 热分层对水库藻类和pH的影响方式

通常,水库水体较深,垂直剖面温差0.20 °C/m是判断水柱水体热分层的依据^[34],一方面热分层强度影响光在水中的穿透深度,使光集中在表层区域,促进表层水浮游植物的光合作用,增加生物量;另一方面高浓度营养物质可能被限制在底层水体,浮游植物难以获取这些营养,从而限制其生长^[19]。研究发现蓝藻可以动态调整其自身碳水化合物的含量,从而调节由气囊提供的浮力^[14],调控其在不同水层分布。夏季高温热浪有利于蓝藻在表层水体繁殖,高温会加剧水体垂直剖面的热分层,减少剖面水柱水体的垂直混合,使蓝藻能够更好地获得光照并遮蔽无伪空泡的浮游植物^[18]。山美水库真光层温差大于0.20 °C/m是影响蓝藻丰度占比的

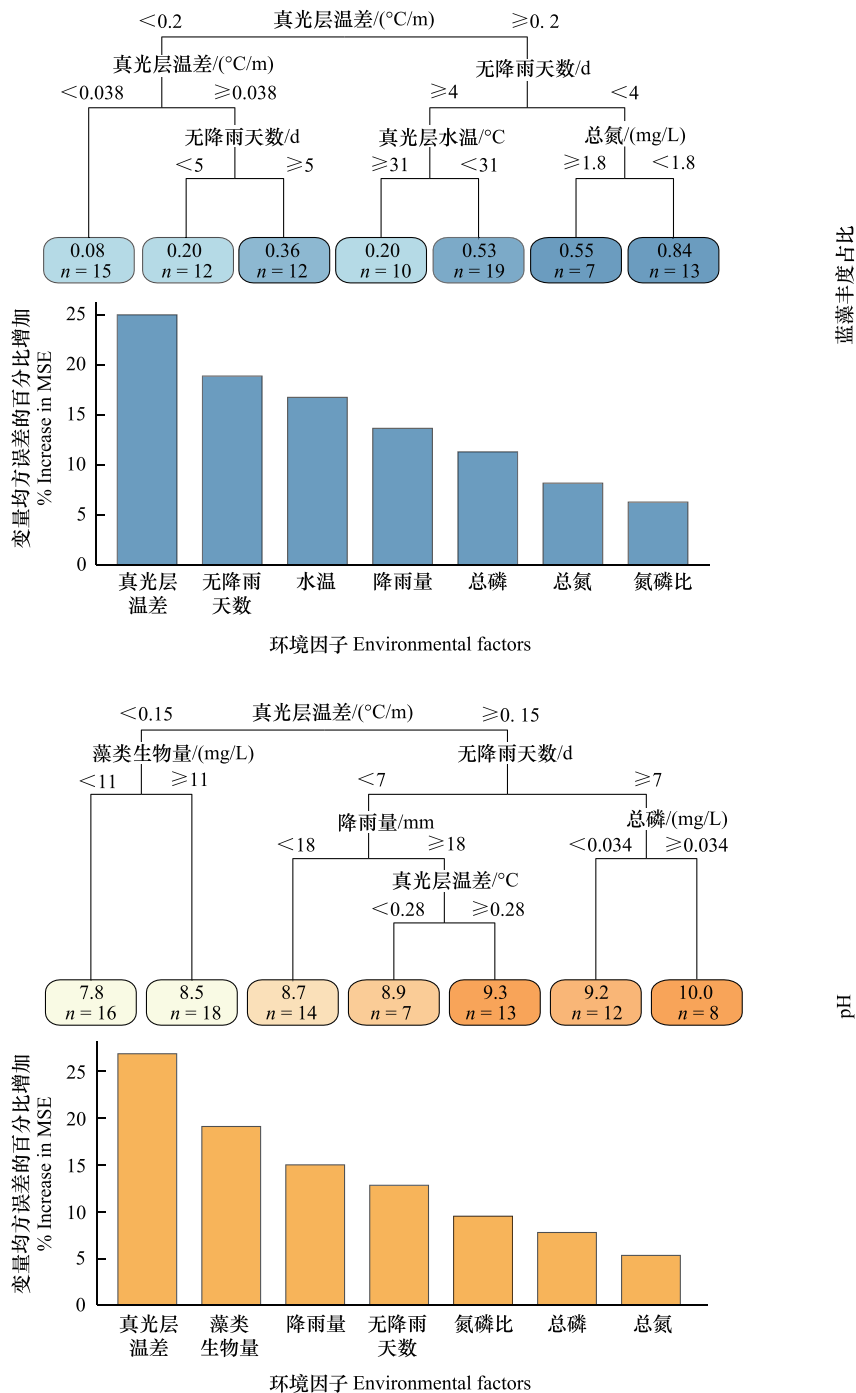


图 4 山美水库蓝藻丰度占比和 pH 的决策树分析与随机森林分析

Fig.4 Decision tree analysis and random forest analysis of cyanobacterial relative abundance and pH in Shanmei Reservoir

关键因子,有可能在热分层情况下,蓝藻上浮聚集到表层水体,导致蓝藻丰度占比增加。研究表明三峡水库水体层化结构(混合层/真光层比值)是决定藻类水华生消的关键水动力参数,混合层/真光层>2.8 是防控三峡水库支流库湾水华的水动力参数阈值^[16]。本研究发现,山美水库垂直剖面热分层出现在真光层内时,意味着垂直剖面混合层水深小于真光层水深。由于蓝藻具有伪空泡,可以调节自身在剖面水体中上下浮动,使得蓝藻能够在水体表层得到光照,同时调节自身的浮动在温跃层和湖下层吸收利用水库沉积物内源释放到底层水体的营养物质,从而在资源获取方面获得竞争优势。因此,山美水库真光层温差在 0.20 °C/m 以上时,蓝藻丰

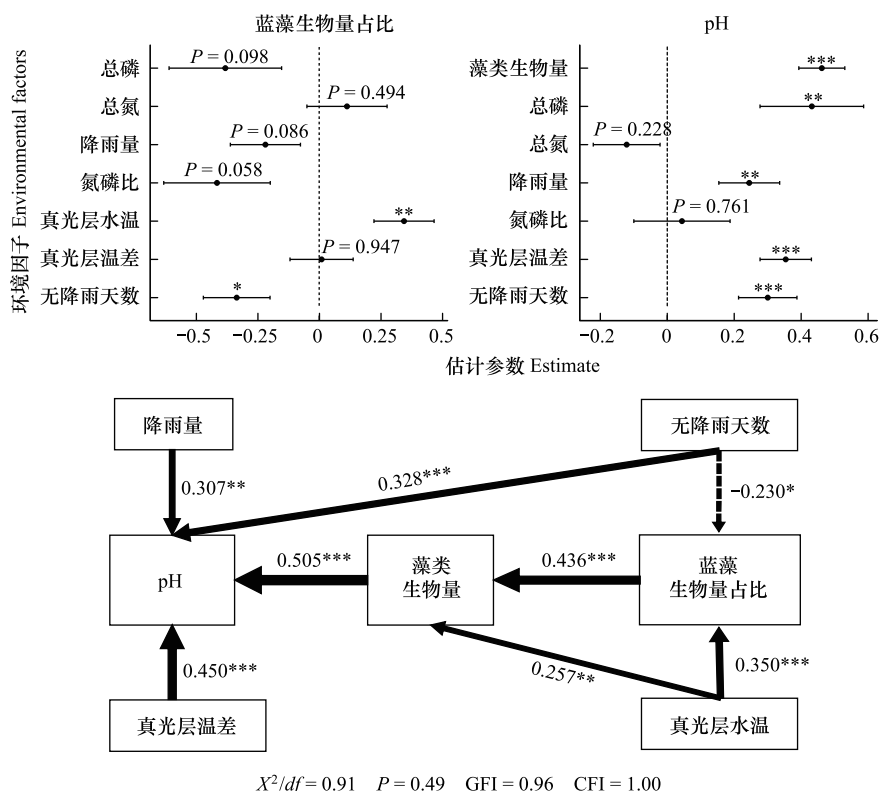


图5 广义线性混合模型和结构方程模型显示影响山美水库蓝藻生物量占比和 pH 的显著因子

Fig.5 The generalized linear mixed model and structural equation model showing the significant variables for cyanobacterial relative biomass and pH in Shanmei Reservoir

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$

度的占比随着真光层温差越大而升高。

与蓝藻丰度占比结果相似,真光层温差是显著影响 pH 变化的首要因素。温差越大,意味着混合层深度越小,不仅光可以更加集中在真光层上层,使得真光层藻类生物量增加,藻类光合作用增强、消耗水体二氧化碳,导致 pH 升高。由于水体存在热分层,表层水体和底层之间的混合受到限制,导致底层水体氧气含量减少,底层有机质在氧气不足的条件下分解会产生更多的二氧化碳,降低水体 pH。因此,底层水体的 pH 相对表层水体较低^[35]。本研究发现山美水库真光层温差对 pH 的显著影响的结构方程路径系数为 0.450,仅次于藻类生物量的 0.505。当 7 日内有降雨且降雨量 ≥ 18 mm 时($n=20$),真光层温差可进一步显著影响 pH,真光层温差越大,pH 越高,说明真光层温差是显著影响 pH 的关键因素。因此,改善水库水文水动力,降低水库真光层温差,不仅有利于蓝藻水华防控,而且有助于维持 pH 稳定。

3.2 降雨对水库藻类和 pH 的影响方式

山美水库干、湿季分明,降雨量主要集中在 3 月至 9 月。研究表明在干季冷月份,亚热带浅水水库的短期降雨事件(特别是降雨后的 1—4 d)会显著增加蓝藻生物量。然而,在湿季暖月份降雨事件后,由于降水、风速和日照的共同作用,水库水温和水动力学变化,导致蓝藻生物量迅速减少^[20]。Yang 等人(2016)^[36]在太湖发现,4 月至 10 月期间日平均风速超过 4 m/s 和日降雨量超过 20 mm 的条件,会导致蓝藻水华的形成。本研究发现山美水库真光层分层期间($n=49$, 真光层温差 ≥ 0.20 °C/m),降雨模式会显著负向影响蓝藻丰度占比。在 7 日内无降雨天数 < 4 d 情况下($n=20$, 均为 6—8 月),蓝藻丰度占比平均值为 0.55—0.84,表现为总氮越低,蓝藻丰度占比越高(总氮小于 1.8 mg/L 时,蓝藻丰度占比平均值达到了 0.84)。另一种情况为,7 日内无降雨天数 ≥ 4 d($n=29$, 其中 4—9 月有 28 个),蓝藻丰度占比平均值为 0.20—0.53,表现为高温季节(4 月—

9 月)真光层水温越低,蓝藻丰度占比越高。有研究发现,暴雨干扰事件会导致亚热带水库中营养盐的急剧增加,进而引发浮游植物优势种的显著变化,导致浮游植物群落组成发生转变,甚至蓝藻优势的恢复^[18]。本研究还发现蓝藻生物量占比与 7 日内无降雨天数和真光层水温显著相关,山美水库无降雨天数越大,说明水库受到光照条件越充分,当真光层水温越低时,表层与湖下层水体混合相对越大,有可能促进藻类吸收湖下层混合的营养盐,导致蓝藻生物量占比增加。分层稳定期间(6—8 月)的无降雨天数越小,意味着降雨量增加,光照条件减弱,说明山美水库丝状蓝藻偏好高温和低光强环境,同时总氮的限制也会加剧丝状蓝藻水华风险。

藻类通过光合作用吸收利用水体中二氧化碳,导致水体中的碳酸盐平衡发生变化,从而升高水体 pH^[23],光照强度的变化会影响到藻类光合作用的强弱。本研究表明,降雨天数增加会导致水体光照强度减弱,从而有利于利用弱光的蓝藻,尤其是丝状蓝藻,占据优势地位。尽管降雨天(光强较弱)会抑制藻类的光合作用,从而减少水体中 CO₂ 的消耗,且降雨和风速等因素能够补充更多的 CO₂ 至水体中,导致 pH 有所降低。然而,本研究发现,在 7 日内降雨天数增加的情况下,水体 pH 也可能升高甚至大于 9,特别是在降雨量 ≥ 18 mm 且真光层温差 ≥ 0.28 °C/m 的条件下。这种情况下,不仅水体总氮浓度会被稀释,改变了氮磷比值,而且真光层分层越强会越有利于蓝藻丰度的增加,最终显著提高水体 pH。当真光层混合不充分时,如果气象条件为 7 d 内有 4 d 降雨且降雨量 ≥ 18 mm,山美水库发生蓝藻水华及高 pH 的风险较高。

高温季节期间降雨天数减少时(5 月至 8 月),水体光照强度较强。此时较强的光照会加强光合作用,导致水体中 CO₂ 浓度降低,从而引起 pH 升高。7 日内无降雨的情况下,风速通常较小,限制了空气中的 CO₂ 与水体表层的交换,加剧了 pH 的升高。通常,温差越大暗示水体分层越强;然而,降雨天数减少的情况下,真光层的平均水温较高,导致真光层温差较小,这表明真光层水体分层会相对较弱,真光层水体混合加强不利于偏好静水条件的蓝藻生长,会影响蓝藻丰度的占比,最终导致蓝藻的生物量占比相对较低,曲壳藻等硅藻生物量相对较高。

3.3 丝状蓝藻——新型有害藻类水华防控措施

水库中藻类生物量的增加主要受光照、水动力、水温、营养盐和浮游动物等多因素的影响,目前认为水温和营养盐是促进藻类生长的主要条件,藻类在水体的分布范围受光照强度和水文水动力的限制^[15,26]。在福建水库中,拉氏尖头藻等丝状蓝藻在水层中分布跟表层水华种类微囊藻的分布方式不同,拉氏尖头藻通常在水库水体中呈弥散型分布,Jin 等人(2023)^[10]发现,蓝藻的氮利用效率沿营养状态指数梯度在时间和空间上均存在稳态转换现象,蓝藻在亚热带湖库稳态转换的营养状态临界点(TSI_c = 50 左右,中营养状态)显著低于温带湖库(TSI_c = 60—70,富营养状态)。2023 年山美水库蓝藻水华的严重程度与前几年的差别主要是蓝藻丰度占比高,且优势种以丝状蓝藻为主。2023 年 7 月,国控点断面表层水体藻类丰度优势种主要是拉氏尖头藻、项圈藻和假鱼腥藻;2022 年 7 月的丰度优势种主要是双对栅藻、脆杆藻和假鱼腥藻;2021 年 7 月的丰度优势种主要是微小多甲藻、短小曲壳藻和小球藻;2020 年 7 月的丰度优势种主要是铜绿微囊藻、短小曲壳藻和双对栅藻。进一步对比 2020—2023 年 7 月的相关数据发现,国控点断面在 2023 年 7 月的透明度、混合层水深、湖上层与真光层比值、蒸发量、无降雨天数、硝酸盐在 2020—2023 年的 7 月数值之间最低,氨氮和降雨量则最大。因此,本研究认为是 2023 年 7 月的无降雨天数偏多导致国控点透明度较低,使得湖上层与真光层深度的比值最大;同时,降雨量较高不仅稀释了硝酸盐浓度并改变了水体氮磷比,还增加了外源负荷,导致表层水体的氨氮浓度升高。在这些因素的共同作用下,山美水库丝状蓝藻丰度进一步增加,最终使水体达到了中度水华状态。这可能与山美水库丝状蓝藻偏好高温^[37]和低光光强,以及具有昼夜垂向迁移能力^[38]有关。

越来越多的学者认识到水文水动力会影响深水水库的富营养化效应^[15—16,18],一方面水库的水力滞留时间较长有利于蓝藻水华的发生;另一方面水库的水位波动较大,会影响到水体剖面的物理化学性质,进一步影响藻类生存的环境条件。因此,分析气候变化和人类活动背景下山美水库的水动力特性及其对蓝藻水华风险的影响,是研究水库水生态环境和解决藻类水华问题的基础。

4 结论

本研究强调了对水库藻类和垂直剖面理化指标连续监测的重要性,特别是在应对气候变化和人类活动加剧的背景下,通过高频监测、大数据管理和分析,构建水库重要环境参数预测模型,将是蓝藻水华防控和供水安全保障的关键基础。通过对闽三角典型城市供水水库(山美水库)连续 5 年的监测,明确了热分层和降雨气象条件对藻类和 pH 的影响机制和途径。得出以下结论:

(1) 在高温季节(4 月至 8 月),山美水库面临较高的蓝藻水华风险,高 pH 问题尤为突出;水库表层水 pH 与藻类生物量在高温季节显著正相关,尤其在真光层混合期间(真光层温差 $< 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$)关系更加显著。

(2) 当蓝藻不是真光层的主要生物量优势种时,藻类生物量与水体 pH 呈显著正相关;但当蓝藻成为生物量优势种之后,表层水 pH 已较高,藻类生物量与 pH 之间的相关性不显著,同时降雨量的增加会显著降低表层水体 pH。

(3) 真光层的热分层强度、7 日内无降雨天数以及降雨量是调控蓝藻丰度占比和水体 pH 的关键因子。这些水文气象因子通过改变光照强度以及垂直剖面水体中营养盐(如氮和磷)的分布,直接或间接地影响蓝藻生物量及水体 pH。

(4) 藻类生物量、真光层温差、7 日内无降雨天数以及降雨量均对表层水体 pH 产生显著的正向影响。而真光层水温与蓝藻生物量占比显著正相关,但 7 日内无降雨天数对蓝藻生物量占比具有显著负向影响。

参考文献(References):

- [1] 朱珍香, 杨军. 福建水库空间分布特征: 沿海密度高水量少、内陆密度低水量多. 湖泊科学, 2018, 30(2): 567-580.
- [2] Zong J M, Wang X X, Zhong Q Y, Xiao X M, Ma J, Zhao B. Increasing outbreak of cyanobacterial blooms in large lakes and reservoirs under pressures from climate change and anthropogenic interferences in the middle-lower Yangtze River basin. Remote Sensing, 2019, 11(15): 1754.
- [3] Stockwell J D, Doubek J P, Adrian R, Anneville O, Carey C C, Carvalho L, De Senerpont Domis L N, Dur G, Frassl M A, Grossart H P, Ibelings B W, Lajeunesse M J, Lewandowska A M, Llamas M E, Matsuzaki S I S, Nodine E R, Nöges P, Patil V P, Pomati F, Rinke K, Rudstam L G, Rusak J A, Salmaso N, Selmann C T, Straile D, Thackeray S J, Thiery W, Urrutia-Cordero P, Venail P, Verburg P, Woolway R I, Zohary T, Andersen M R, Bhattacharya R, Hejzlar J, Janatani N, Kpodonu A T N K, Williamson T J, Wilson H L. Storm impacts on phytoplankton community dynamics in lakes. Global Change Biology, 2020, 26(5): 2756-2784.
- [4] Shi P C, Zhu M Y, You R F, Li H Y, Zou W, Xu H, Xiao M, Zhu G W. Rainstorm events trigger algal blooms in a large oligotrophic reservoir. Journal of Hydrology, 2023, 622: 129711.
- [5] 马健荣, 邓建明, 秦伯强, 龙胜兴. 湖泊蓝藻水华发生机理研究进展. 生态学报, 2013, 33(10): 3020-3030.
- [6] Huisman J, Codd G A, Paerl H W, Ibelings B W, Verspagen J M H, Visser P M. Cyanobacterial blooms. Nature Reviews Microbiology, 2018, 16(8): 471-483.
- [7] 陈辉煌, 王文平, 薛媛媛, 高肖飞, 金磊, 杨军. 食物与桡足类营养级对亚热带分层水库浮游动物群落结构的影响. 湖泊科学, 2022, 34(1): 174-183.
- [8] Jeppesen E, Søndergaard M, Jensen J P, Havens K E, Anneville O, Carvalho L, Coveney M F, Deneke R, Dokulil M T, Foy B, Gerdeaux D, Hampton S E, Hilt S, Kangur K, Köhler J, Lammens E H H R, Lauridsen T L, Manca M, Miracle M R, Moss B, Nöges P, Persson G, Phillips G, Portielje R, Romo S, Schelske C L, Straile D, Tatrai I, Willén E, Windsor M. Lake responses to reduced nutrient loading-an analysis of contemporary long-term data from 35 case studies. Freshwater Biology, 2005, 50(10): 1747-1771.
- [9] Paerl H W, Otten T G. Duelling 'CyanoHABs': unravelling the environmental drivers controlling dominance and succession among diazotrophic and non- N_2 -fixing harmful cyanobacteria. Environmental Microbiology, 2016, 18(2): 316-324.
- [10] Jin L, Chen H H, Matsuzaki S S, Shinohara R, Wilkinson D M, Yang J. Tipping points of nitrogen use efficiency in freshwater phytoplankton along trophic state gradient. Water Research, 2023, 245: 120639.
- [11] Yang Y G, Chen H H, Abdullah A I M, Ndayishimiye J C, Yang J R, Isabwe A, Luo A Q, Yang J. Urbanization reduces resource use efficiency of phytoplankton community by altering the environment and decreasing biodiversity. Journal of Environmental Sciences, 2022, 112: 140-151.
- [12] Beaulieu M, Pick F, Gregory-Eaves I. Nutrients and water temperature are significant predictors of cyanobacterial biomass in a 1147 lakes data set. Limnology and Oceanography, 2013, 58(5): 1736-1746.
- [13] Thomas M K, Litchman E. Effects of temperature and nitrogen availability on the growth of invasive and native cyanobacteria. Hydrobiologia, 2016, 763(1): 357-369.
- [14] Verspagen J M H, Passarge J, Jöhnk K D, Visser P M, Peperzak L, Boers P, Laanbroek H J, Huisman J. Water management strategies against toxic *Microcystis* blooms in the Dutch delta. Ecological Applications, 2006, 16(1): 313-327.
- [15] Yang J, Lv H, Yang J, Liu L M, Yu X Q, Chen H H. Decline in water level boosts cyanobacteria dominance in subtropical reservoirs. Science of the Total Environment, 2016, 557: 445-452.
- [16] Yang Z J, Wei C Y, Liu D F, Lin Q C, Huang Y L, Wang C F, Ji D B, Ma J, Yang H. The influence of hydraulic characteristics on algal bloom in Three Gorges Reservoir, China: a combination of cultural experiments and field monitoring. Water Research, 2022, 211: 118030.

- [17] Yang J R, Lv H, Isabwe A, Liu L M, Yu X Q, Chen H H, Yang J. Disturbance-induced phytoplankton regime shifts and recovery of cyanobacteria dominance in two subtropical reservoirs. *Water Research*, 2017, 120: 52-63.
- [18] Jöhnk K D, Huisman J, Sharples J, Sommeijer B, Visser P M, Stroom J M. Summer heatwaves promote blooms of harmful cyanobacteria. *Global Change Biology*, 2008, 14(3): 495-512.
- [19] Donis D, Mantzouki E, McGinnis D, Vachon D, Gallego I, Grossart H, Senerpont Domis L S, Teurlincx S, Seelen L, Lürting M, Verstijnen Y, Maliaka V, Fonvielle J A, Visser P, Verspagen J, Herk M, Antoniou M, Tsiarta N, McCarthy V, Perello V C, Machado-Vieira D, Oliveira A G, Maronić D, Stević F, Pfeiffer T, Vucelić I B, Žutinić P, Udovič M G, Plenković-Moraj A, Bláha L, Geriš R, Fránková M, Christoffersen K, Warming T P, Feldmann T, Laas A, Panksep K, Tuvikene L, Kangro K, Koreivienė J, Karosienė J, Kasperovičienė J, Savadova-Ratkus K, Vitonytė I, Häggqvist K, Salmi P, Arvola L, Rothhaupt K, Avagianos C, Kaloudis T, Gkelis S, Panou M, Triantis T, Zervou S K, Hiskia A, Obertegger U, Boscaini A, Flaim G, Salmasso N, Cerasino L, Haande S, Skjelbred B, Grabowska M, Karpowicz M, Chmura D, Nawrocka L, Kobos J, Mazur-Marzec H, Alcaraz-Pérraga P, Wilk-Woźniak E, Krztoń W, Walusiak E, Gała-Borowska I, Mankiewicz-Boczek J, Toporowska M, Pawlik-Skowrońska B, Niedźwiecki M, Pęczyła W, Napiórkowska-Krzebietke A, Dunalska J, Sieńska J, Szymanski D, Kruk M, Budzyńska A, Goldyn R, Kozak A, Rosińska J, Szelaż-Wasielewska E, Domek P, Jakubowska-Krepska N, Kwasizur K, Messyas B, Pelechata A, Pelechaty M, Kokociński M, Małdrecka-Witkowska B, Kostrzevska-Szlakowska I, Frąk M, Bańkowska-Sobczak A, Wasilewicz M, Ochocka A, Pasztaleniec A, Jasser I, Antão-Geraldes A, Leira M, Vasconcelos V, Morais J, Vale M, Raposeiro P, Gonçalves V, Aleksovski B, Krstić S, Nemova H, Drastichová I, Chomova L, Remec-Rekar Š, Eleršek T, Hansson L, Urrutia-Cordero P, Bravo A, Buck M, Colom-Montero W, Mustonen K, Pierson D, Yang Y, Richardson J, Edwards C, Cromie H, Delgado-Martín J, García D, Cereijo J, Gomá J, Trapote M C, Vegas-Vilarrubia T, Obrador B, García-Murcia A, Real M, Romans E, Noguero-Ribes J, Duque D, Fernández-Morán E, Ubeda B, Gálvez J A, Catalán N, Pérez-Martínez C, Ramos-Rodríguez E, Cillero-Castro C, Moreno-Ostos E, Blanco J M, Rodríguez V, Montes-Pérez J, Palomino R L, Rodríguez-Pérez E, Hernández A, Carballeira R, Camacho A, Picazo A, Rochera C, Santamans A C, Ferriol C, Romo S, Soria J, Özen A, Karan T, Demir N, Beklioğlu M, Filiz N, Levi E, Işkın U, Bezirci G, Tavşanoğlu Ü N, Celik K, Ozhan K, Karakaya N, Koçer M A T, Yilmaz M, Maraşlioğlu F, Fakroğlu Ö, Soylu E, Yağcı M, Çınar Ş, Çapkin K, Yağcı A, Cesur M, Bilgin F, Bulut C, Uysal R, Latife K, Akçaalan R, Albay M, Alp M, Özkan K, Sevindik T O, Tunca H, Önem B, Paerl H, Carey C, Ibelings B. Stratification strength and light climate explain variation in chlorophyll a at the continental scale in a European multilake survey in a heatwave summer. *Limnology and Oceanography*, 2021
- [20] Luo A Q, Chen H H, Gao X F, Carvalho L, Xue Y Y, Jin L, Yang J. Short-term rainfall limits cyanobacterial bloom formation in a shallow eutrophic subtropical urban reservoir in warm season. *Science of the Total Environment*, 2022, 827: 154172.
- [21] Caporale A G, Violante A. Chemical processes affecting the mobility of heavy metals and metalloids in soil environments. *Current Pollution Reports*, 2016, 2(1): 15-27.
- [22] Moss B. Allied attack: climate change and eutrophication. *Inland Waters*, 2011, 1(2): 101-105.
- [23] Shiraishi F, Bissett A, de Beer D, Reimer A, Arp G. Photosynthesis, respiration and exopolymer calcium-binding in biofilm calcification (Westerhöfer and Deinschwanger Creek, Germany). *Geomicrobiology Journal*, 2008, 25(2): 83-94.
- [24] 刘俏, 刘智暘, 王江滨, 廖传松, 李俊锋, 郭超, 王靖斌, 熊满堂, 张堂林, 郭传波, 刘家寿. 福建山美水库浮游动物群落结构时空特征及其影响因子分析. *湖泊科学*, 2022, 34(6): 2039-2054.
- [25] 许重富. 山美水库大坝防渗加固工程效果分析. *大坝与安全*, 2010(2): 64-67.
- [26] Lv H, Yang J, Liu L M, Yu X Q, Yu Z, Chiang P C. Temperature and nutrients are significant drivers of seasonal shift in phytoplankton community from a drinking water reservoir, subtropical China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21(9): 5917-5928.
- [27] Yang J, Yu X Q, Liu L M, Zhang W J, Guo P Y. Algae community and trophic state of subtropical reservoirs in southeast Fujian, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2012, 19(5): 1432-1442.
- [28] Zuo J, Xiao P, Heino J, Tan F J, Soininen J, Chen H H, Yang J. Eutrophication increases the similarity of cyanobacterial community features in lakes and reservoirs. *Water Research*, 2024, 250: 120977.
- [29] Gao X F, Chen H H, Gu B H, Jeppesen E, Xue Y Y, Yang J. Particulate organic matter as causative factor to eutrophication of subtropical deep freshwater: Role of typhoon (tropical cyclone) in the nutrient cycling. *Water Research*, 2021, 188: 116470.
- [30] Ren K X, Xue Y Y, Rønn R, Liu L M, Chen H H, Rensing C, Yang J. Dynamics and determinants of amoeba community, occurrence and abundance in subtropical reservoirs and rivers. *Water Research*, 2018, 146: 177-186.
- [31] Bates D, Mächler M, Bolker B M, Walker S C. Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 2015, 67(1): 1-48.
- [32] Rosseel Y. lavaan: An R package for structural equation modeling. *Journal of Statistical Software*. 2012, 48(2): 1-36.
- [33] Liu L M, Chen H H, Liu M, Yang J R, Xiao P, Wilkinson D M, Yang J. Response of the eukaryotic plankton community to the cyanobacterial biomass cycle over 6 years in two subtropical reservoirs. *The ISME Journal*, 2019, 13(9): 2196-2208.
- [34] Zhang Y L, Wu Z X, Liu M L, He J B, Shi K, Zhou Y Q, Wang M Z, Liu X H. Dissolved oxygen stratification and response to thermal structure and long-term climate change in a large and deep subtropical reservoir (Lake Qiandaohu, China). *Water Research*, 2015, 75: 249-258.
- [35] Mao Y F, He Q, Li H, Su X X, Ai H N. Thermal structure-induced biochemical parameters stratification in a subtropical dam reservoir. *Water Environment Research*, 2018, 90(12): 2036-2048.
- [36] Yang Z, Zhang M, Shi X L, Kong F X, Ma R H, Yu Y. Nutrient reduction magnifies the impact of extreme weather on cyanobacterial bloom formation in large shallow Lake Taihu (China). *Water Research*, 2016, 103: 302-310.
- [37] Gao G B, Bai D, Li T L, Li J, Jia Y L, Li J, Wang Z, Cao X Y, Song L R. Understanding filamentous cyanobacteria and their adaptive niches in Lake Honghu, a shallow eutrophic lake. *Journal of Environmental Sciences*, 2025, 152: 219-234.
- [38] 陈志文, 徐亚楠, 苏命, 侯伟昶, 徐晓庆, 于建伟, 贾泽宇, 杨敏. 某水源水库臭味来源及潜在产臭藻分布特征解析. *环境工程学报*, 2020, 14(11): 3063-3071.