

福建省山美水库浮游植物丰度现状及其未来变化趋势预测

张珊珊¹, 陈心萍¹, 崔瑾¹, 汪佳锋¹, 李峥², 钟燕平^{1*}

(1. 泉州师范学院资源与环境科学学院, 福建 泉州 362000; 2. 厦门大学管理学院, 福建 厦门 361005)

摘要: [目的] 基于福建省山美水库国家地表水考核断面水质自动监测站近 3 年连续监测数据, 探究泉州这一重要饮用水源的水生态现状, 并预测在未来全球变暖和人为影响下的浮游植物丰度变化趋势。[方法] 通过收集 2020—2023 年山美水库国家地表水考核断面水质自动监测站连续监测数据, 对水温、pH、高锰酸盐指数、总磷和总氮质量浓度等指标进行分析, 探究各环境因子的季节变化及其对浮游植物丰度的影响; 进而基于广义加性混合模型预测在未来全球变暖和人为调控作用下山美水库浮游植物丰度的变化趋势。[结果] 山美水库各环境因子呈较明显的季节变化, 春、夏两季 pH 超标, 氮污染严重, 浮游植物丰度介于 $7.3 \times 10^4 \sim 2.9 \times 10^7 \text{ L}^{-1}$ (以细胞数目计) 之间。基于随机森林和广义加性混合模型的分析表明水温、pH、高锰酸盐指数和营养盐质量浓度是影响浮游植物丰度变化的主要因子; 未来随着水温上升及人为调控影响下总氮质量浓度、高锰酸盐指数和 pH 下降, 浮游植物丰度呈明显下降趋势, 而水温上升会减缓浮游植物丰度的下降趋势。[结论] 综上所述表明山美水库水生态现状有待进一步改善, 人为调控可明显控制山美水库浮游植物的大量繁殖, 有助于更好地保护和管理山美水库水资源安全。

关键词: 浮游植物丰度; 水温; pH; 广义加性混合模型; 山美水库

中图分类号: X835

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2025)03-0484-08

Current status and future trend prediction of phytoplankton abundance of Shanmei Reservoir in Fujian Province

ZHANG Shanshan¹, CHEN Xinping¹, CUI Jin¹, WANG Jiafeng¹,

LI Zheng², ZHONG Yanping^{1*}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Quanzhou Normal University, Quanzhou 362000, China;

2. School of Management, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: [Objective] Phytoplankton play an important role in indicating water quality and are usually used to reflect water pollution and eutrophication. Shanmei Reservoir, situated in Quanzhou, Fujian Province, serves as a vital source of drinking water, and its water quality is linked to the health of residents in Quanzhou and Jinmen, as well as the socio-economic development of the region. Previous studies on Shanmei Reservoir have focused on the spatial and temporal distribution of pollutants. However, the seasonal variations in phytoplankton and their driving factors remain inadequately understood. In addition, the ongoing global climate change significantly influences primary productivity, phytoplankton biomass, and community succession in lakes and reservoirs. Nonetheless, the trends in phytoplankton abundance in Shanmei Reservoir, particularly under the combined effects of global warming and anthropogenic influences, are not yet well defined. Building upon continuous monitoring data from Shanmei Reservoir over the past three years, its aquatic ecological status was investigated and future trends of phytoplankton abundance under the stress of human activities and global warming were forecasted. This work aimed to provide scientific insights for ensuring drinking water safety and promoting the

收稿日期: 2024-03-20 录用日期: 2024-05-13

基金项目: 国家自然科学基金(42206100); 福建省自然科学基金(2022J05225, 2022J05226, 2022J05228); 福建省社会科学基金(FJ2021C083)

* 通信作者: ypzhang@qztc.edu.cn

引文格式: 张珊珊, 陈心萍, 崔瑾, 等. 福建省山美水库浮游植物丰度现状及其未来变化趋势预测[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2025, 64(3): 484-491.

Citation: ZHANG S S, CHEN X P, CUI J, et al. Current status and future trend prediction of phytoplankton abundance of Shanmei Reservoir in Fujian Province[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2025, 64(3): 484-491. (in Chinese)



sustainable utilization of water resources in Quanzhou, while also serving as a valuable reference for research on similar subtropical drinking water reservoirs. [Methods] The seasonal dynamics of key environmental parameters in Shanmei Reservoir were investigated through the collection and analysis of high-resolution water quality monitoring data from China's National Environmental Monitoring Network, spanning from 2020 to 2023. The parameters analyzed included water temperature, pH, permanganate index (COD_{Mn}), and total phosphorus and total nitrogen mass concentrations. The effects of environment variables on phytoplankton abundance were further analyzed using random forest and generalized additive mixed model. Furthermore, considering the influence of global warming and human activities, predictions regarding the trend of phytoplankton abundance in Shanmei Reservoir were made using generalized additive mixed models. [Results] Environmental factors in Shanmei Reservoir showed significant seasonal changes. Water temperature displayed a typical seasonal pattern, with elevated values observed in summer and lower values in winter. pH showed similar seasonal trends to water temperature, peaking in summer. The seasonal variations in dissolved oxygen (DO) mass concentration, conductivity, and permanganate index (COD_{Mn}) were similar, with elevated values occurring in late spring and early summer. Notably, pH levels exceeded standard thresholds in both spring and summer. While total phosphorus mass concentrations in the reservoir remained relatively low, total nitrogen levels were concerning, consistently exceeding 1.5 mg/L despite exhibiting a gradual decreasing trend since 2020. Conversely, COD_{Mn} demonstrated a marked increasing trajectory over the same three-year period, indicating divergent pollution dynamics among key water quality parameters. Phytoplankton abundance ranged from 7.3×10^4 to $2.9 \times 10^7 \text{ L}^{-1}$ (calculated by cell numbers), exhibiting peak levels during spring and autumn. Notably, there has been a marked upward trend in abundance from 2020 to 2023. Analyses through random forest and generalized additive mixed models showed that water temperature, pH, COD_{Mn} , and nutrient mass concentrations were the main factors influencing phytoplankton abundance. A decrease in total nitrogen mass concentration, COD_{Mn} , and pH levels would lead to decreased phytoplankton abundance in Shanmei Reservoir. However, increasing water temperatures significantly counteract these mitigation effects, diminishing the suppressive impacts of declining total nitrogen mass concentration, COD_{Mn} , and pH on phytoplankton abundance. [Conclusion] The results show that the aquatic ecological status of Shanmei Reservoir requires further improvement. The proliferation of phytoplankton in Shanmei Reservoir can be controlled by regulating total nitrogen mass concentration, COD_{Mn} and pH levels, which would enhance the management and protection of the reservoir's water resources. When subjected to human regulatory measures, phytoplankton abundance in Shanmei Reservoir is expected to decline. Nevertheless, the ongoing process of global warming is projected to impede this downward trend. This interplay of factors not only highlights the complex dynamics within the reservoir's ecosystem but also underscores the critical role of human intervention in preserving the water ecology of the Shanmei Reservoir.

Keywords: phytoplankton abundance; water temperature; pH; generalized additive mixed model; Shanmei Reservoir

水库是在河道、山谷、低洼地及地下透水层修建挡水坝或堤堰、隔水墙,形成蓄集水的人工湖泊,是调蓄洪水的主要工程措施之一,其主要作用是防洪、发电、灌溉、供水、蓄能等,对保障人类的生产和生活具有重大作用。随着社会发展及城市化进程的加快,我国湖库水正遭受着严重的污染,水体富营养化是我国水库面临的重要挑战。朱梦峰^[1]的研究表明昆明市 21 个湖库均存在严重的富营养化。基于 2023 年上半年对我国 208 个重点湖库的水质和营养状态状况监测结果, I ~ III 类水质湖库占比 80.3%, IV ~ V 类水质湖库占比 14.4%, 劣 V 类水质湖库占比 5.3%; 其中 22% 为轻度富营养以上^[2-3]。这进一步表明我国水库受污染较为严重,且主要的污染指标为总磷 (total phosphorus, TP) 浓度、化学需氧量和高锰酸盐指数 (permanganate index, COD_{Mn})^[2-3]。湖库水质与人民用水安全紧密相关,了解湖库水环境有助于更好地保护湖库,促进水资源的科学利用,对湖库周边社会经济

和人民生活水平的可持续发展具有重要意义。

山美水库是福建省水利厅管辖的库容最大的水库,被国家生态环境部列入国家良好湖泊生态环境保护计划。它是一座以供水为主,结合防洪、发电等综合利用的大型水库,2018 年 8 月水库水源直供金门,其水质安全关系到晋江下游地区 600 多万人口以及金门人民的生产生活和农业灌溉用水^[4-5]。近年来,山美水库流域受人类活动影响日趋严重,包括农业施肥、畜禽养殖、农村生活污水排放,导致水体总氮 (total nitrogen, TN) 质量浓度超标严重,2016—2019 年 TN 质量浓度超过 2.0 mg/L, TP 质量浓度为 0.026 ~ 0.037 mg/L, 氮磷比 (物质的量之比) 相对较大 (>60), 水体呈磷限制^[5]。水库沉积物平均 TP 含量为 837 mg/kg, 沉积物中存在磷释放进入上覆水体的风险, 水体磷浓度增加, 改变水体营养盐结构, 从而影响浮游植物群落结构^[6]。目前山美水库处于中营养化状态, 有向富营养化发展的趋势, 其水质安全受到严重

影响。2020—2021 年福建省河流和重要湖库健康评估报告指出山美水库综合营养状态指数超过 40 分,生态状态指数为 79.2 分,进一步表明山美水库水环境质量下降,水体富营养化显现^[7]。此外,山美水库浮游植物丰度较高:王江滨^[8]的研究发现 2019—2020 年山美水库浮游植物丰度平均值为 10^7 L^{-1} (以细胞数目计,下同);刘小宇^[9]基于 2022 年 11 月对山美水库不同区域的调查数据,研究表明秋季山美水库表层浮游植物丰度为 10^7 L^{-1} ,浮游植物的优势门类为绿藻门和蓝藻门,分别占浮游植物总丰度的 27% 和 56%。由此可知,山美水库库区总体的浮游植物丰度相对较高,存在水华暴发风险。为确保水库水质安全和水资源可持续利用,防治山美水库水环境污染问题势在必行。然而,目前对山美水库的研究大多聚焦于库区表层水体或沉积物中污染物的时空分布^[5,10],仅有少量研究关注山美水库浮游植物分布模式,浮游植物变化的驱动因素暂不清楚。此外,已有大量研究表明全球气候变化会影响湖库初级生产力和浮游植物生物量和群落演替^[11-13],然而山美水库浮游植物在全球变暖和人为调控影响下的丰度变化趋势尚未厘清。为保障人民的饮水安全和社会生产的稳定发展,预测山美水库浮游植物在全球变暖和人为调控影响下的变化趋势意义重大。

自 2018 年 5 月起,山美水库的国家地表水考核断面水质自动监测站(简称国控点)开始运行,进行每日连续监测^[7],大量连续的现场监测数据有助于对水质进行综合分析。此外,为控制浮游植物生物量,2020 年以来山美水库通过“以鱼控藻”,调整了水库鱼类放养策略和捕捞措施^[14]。因此,本研究基于山美水库国控点 2020—2023 年连续监测数据,对水温、pH、电导率、浊度、 COD_{Mn} 、溶解氧(dissolved oxygen, DO)、TP 和 TN 质量浓度以及浮游植物丰度等指标进行分析,探究各环境因子的季节变化及其对浮游植物丰度的影响,以期为保障泉州市饮用水安全和实现水资源的绿色可持续利用提供参考,并为类似的亚热带饮用水源地水库研究提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 研究区域

山美水库于 1958 年动工兴建,1972 年建成投产,位于中国福建省泉州市南安九都镇山美村,总库容 6.55 亿 m^3 ,正常蓄水位高 96.48 m,全年平均水深 15.3~46.6 m。为探究山美水库各环境因子的季节变化及其对浮游植物丰度的影响,本研究对山美水库国

控点(118.587° E, 24.821° N)每日连续监测数据进行分析,其中山美水库国控点位于山美水库大坝前,测定水样为水下 0.5 m 深度水体。

1.2 数据收集

数据来自国家地表水水质自动监测实时数据发布系统(<https://szzdj.cnemc.cn:8070/GJZ/Business/Publish/Main.html>),收集 1 个山美水库国控点数据,收集时间范围为 2020 年 12 月 17 日—2023 年 11 月 17 日,其中 2020 年 12 月 17 日—2021 年 9 月 10 日期间,监测频率为每天 1 次,2021 年 9 月 11 日—2023 年 11 月 17 日监测频率为每 4 h 1 次。收集指标包括水温、pH、DO 质量浓度、电导率、浊度、 COD_{Mn} 、TP 和 TN 质量浓度及浮游植物丰度。

1.3 数据处理

收集 2020 年 12 月 17 日—2023 年 11 月 17 日山美水库国控点各水质指标数据,剔除异常数据,其中 2020 年 12 月 17 日—2021 年 10 月 23 日期间 TP 质量浓度大多为零,可能是低于检出限,因此将这部分数据直接剔除。在描述环境因子季节变化时,定义 3、4、5 月为春季,6、7、8 月为夏季,9、10、11 月为秋季,12、1、2 月为冬季,按月作箱型图,用于探究环境因子季节变化。基于 R 软件“randomForest”程序包的 randomForest 函数构建随机森林回归模型^[15],用于初步选择影响浮游植物丰度的环境因子。采用“mgcv”包的广义加性混合模型(generalized additive mixed model, GAMM)分析水温、pH、 COD_{Mn} 、DO、TN 和 TP 质量浓度等环境因子对浮游植物丰度的影响。Tong 等^[16]基于卫星遥感和数值模型提供的 92 245 个湖泊的时间和空间详细高分辨率湖泊表面水温数据,表明 1981—2020 年间每 10 年水温平均增加 0.24 °C (不确定性为 0.02 °C)。因此,假设山美水库水温每 5 年增加 0.1 °C,构建 2025—2050 年的 5 个温度梯度。此外,山美水库 TN 质量浓度常年大于 2 mg/L, pH 超过 9,高于地表水 V 类标准,而山美水库作为饮用水源地, TN 质量浓度应低于 1 mg/L。假设水库 TN 质量浓度在人为调控影响下按 0.2 mg/L 梯度减小,构建 5 个质量浓度梯度; COD_{Mn} 按 0.2 mg/L 梯度减小,构建 5 个梯度;pH 按 0.1 梯度下降,构建 5 个梯度。构建 GAMM 形式为 $\lg C_{\text{pa}} \sim s(t, \text{bs}='cr') + s(\text{COD}_{\text{Mn}}, \text{bs}='cr') + s(\text{TN}, \text{bs}='cr') + s(\text{pH}, \text{bs}='cr') + \alpha$,分别预测水温、 COD_{Mn} 、TN 质量浓度、pH 单因子,水温和 TN 质量浓度、水温和 COD_{Mn} 双因子, COD_{Mn} 、TN 质量浓度和 pH 三因子,水温、 COD_{Mn} 、TN 质量浓度和 pH 四

因子同时变化对浮游植物丰度的影响。其中: C_{pa} 表示浮游植物丰度; t 表示水温; α 代表固定截距; $s()$ 表示平滑项,平滑的方法可以通过 bs 参数自定义, cr 表示3次回归样条。

2 结果与分析

2.1 山美水库环境因子季节变化特征

基于2020年12月17日—2023年11月17日山美水库国控点数据集分析,结果表明(图1):山美水库水

温变化范围为 $16.26\sim 35.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ [$(25.06\pm 4.86)\text{ }^{\circ}\text{C}$],呈夏季高冬季低的分布特征;水库 pH 介于 $6.37\sim 9.76$ 范围 (8.08 ± 1.03),具有明显季节变化,与水温季节变化类似,均在夏季出现高值;DO 质量浓度 [$(8.78\pm 2.94)\text{ mg/L}$]、电导率 [$(153.84\pm 16.80)\mu\text{S/cm}$] 和 COD_{Mn} [$(1.75\pm 1.18)\text{ mg/L}$] 的季节变化相似,均在春末夏初出现高值。此外,水库浊度 [$(4.80\pm 3.24)\text{ NTU}$, NTU 为散射浊度单位] 在2021年10月—2022年6月呈现较高值,其他时间段相对稳定;而 COD_{Mn} 在近3年呈上升趋势 (t -test, $P<0.05$)。

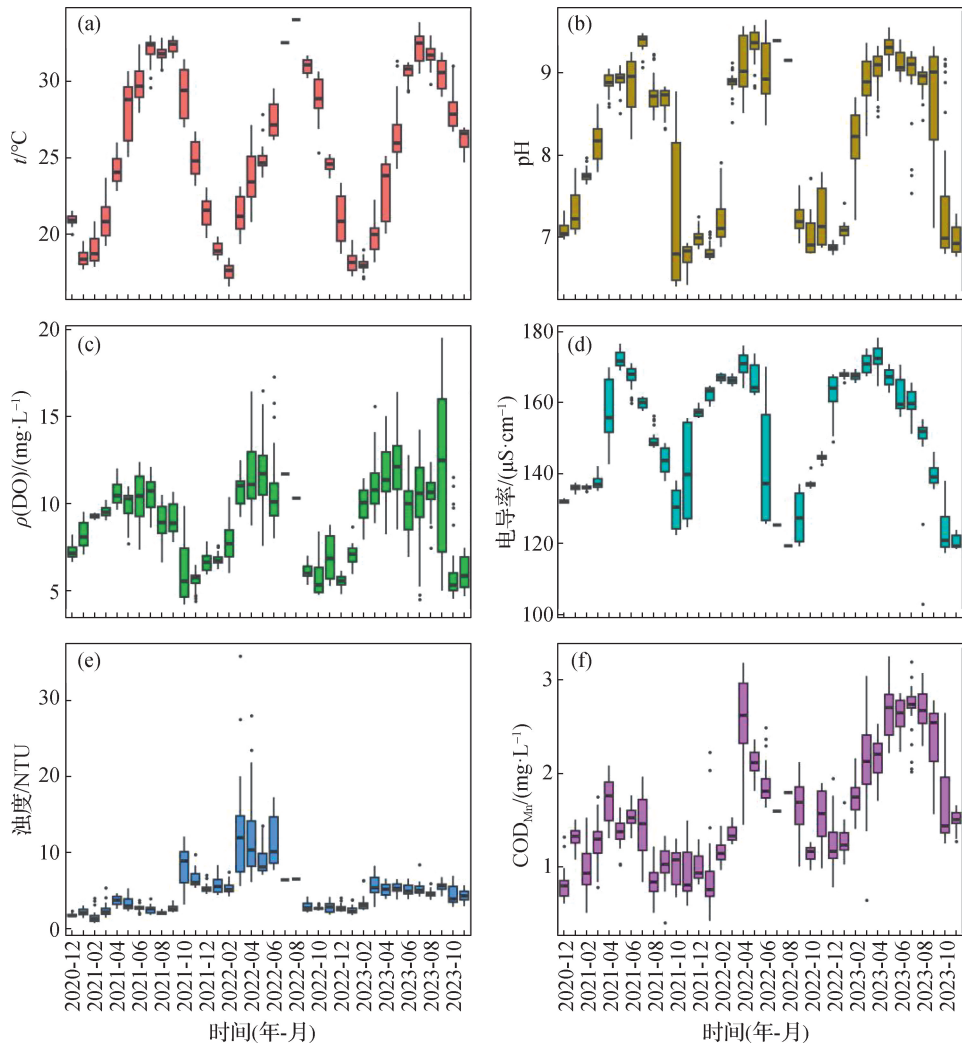


图1 2020—2023年山美水库水温(a)、pH(b)、DO质量浓度(c)、电导率(d)、浊度(e)和 COD_{Mn} (f)的季节变化

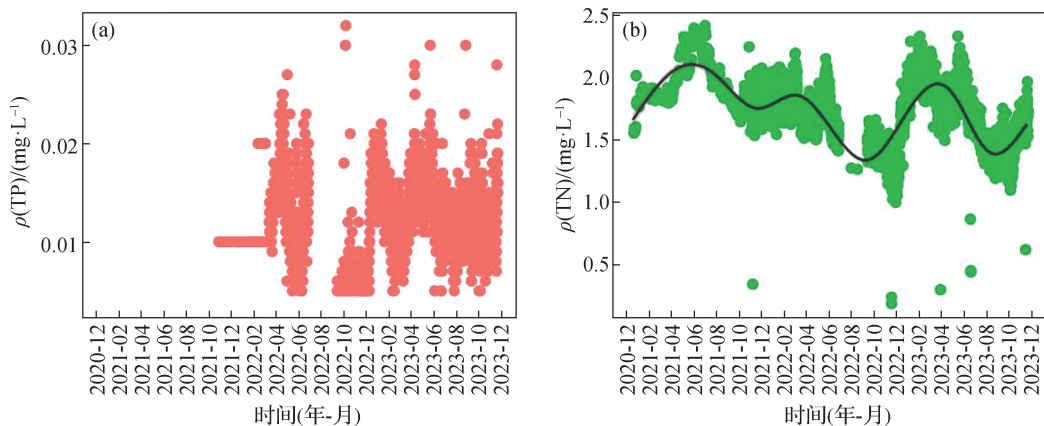
Fig. 1 Seasonal variations in water temperature (a), pH (b), DO mass concentration (c), conductivity (d), turbidity (e) and COD_{Mn} (f) of Shanmei Reservoir from 2020 to 2023

如图2所示:水库 TP 平均质量浓度为 0.012 mg/L ,近3年来并无明显变化;水库 TN 质量浓度为 $0.19\sim 2.41\text{ mg/L}$ [$(1.70\pm 0.26)\text{ mg/L}$],早春时期质量浓度明显较高,近3年 TN 质量浓度总体呈下降

趋势 (t -test, $P<0.05$)。

2.2 山美水库浮游植物丰度变化及其影响因素

如图3所示,山美水库浮游植物丰度范围为 $7.3\times 10^4\sim 2.9\times 10^7\text{ L}^{-1}$ 。浮游植物丰度随季节变化明显,



黑色线条为 loess 曲线拟合趋势,下同.

图 2 2020—2023 年山美水库 TP(a)和 TN(b)质量浓度的季节变化

Fig. 2 Seasonal changes of TP (a) and TN (b) mass concentrations in Shanmei Reservoir from 2020 to 2023

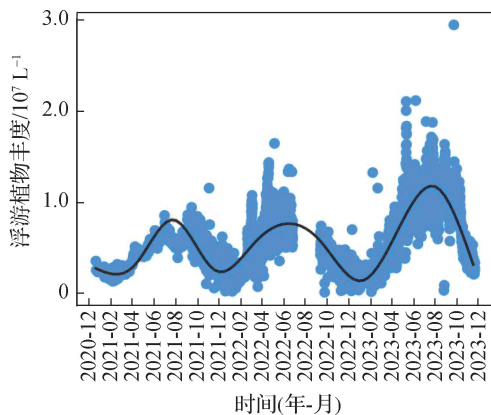


图 3 2020—2023 年山美水库浮游植物丰度的季节变化

Fig. 3 Seasonal changes in phytoplankton abundance in Shanmei Reservoir from 2020 to 2023

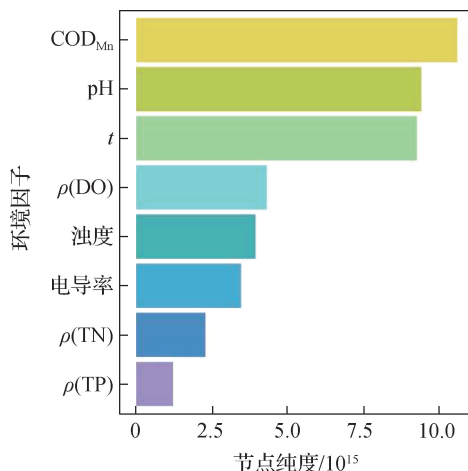


图 4 所有环境因子的节点纯度排序

Fig. 4 Ordering of node purity of all environmental factors

整体呈现双峰型,春季和秋季浮游植物丰度高,冬季浮游植物丰度最低.从长期变化看,山美水库浮游植物丰度呈增加趋势(t -test, $P < 0.05$).

为进一步探究各环境因子对浮游植物丰度的影响,采用随机森林回归模型通过残差平方和来评估各环境因子对浮游植物丰度影响的重要性,结果表明影响浮游植物丰度的前 3 个重要环境因子为 COD_{Mn} 、pH 和水温(图 4).与此同时,通过 GAMM 进行多因子拟合,模型结果中的 R^2 可理解为模型拟合值对响应变量的方差(即解释程度), R^2 越接近 1,则该模型拟合效果越好^[17].通过 GAMM 得出的结果如表 1 所示,可以看出:在双因子组合中水温和 pH 对浮游植物丰度的解释度最高($R^2 = 0.732$),比水温和 COD_{Mn} 组合($R^2 = 0.654$)提高了 0.078,比 pH 和 COD_{Mn} 组合($R^2 = 0.563$)提高了 0.169.在双因子最优组合(水温

和 pH)基础上引入 COD_{Mn} 后,其解释程度提高至 0.761.在此基础上,分别进一步引入 DO、TN 和 TP 质量浓度等因子,发现水温、pH、 COD_{Mn} 与 DO 质量浓度组合对浮游植物丰度的解释度($R^2 = 0.766$)与未引入 DO 质量浓度时基本持平;而水温、pH、 COD_{Mn} 与 TN 质量浓度组合($R^2 = 0.774$)和水温、pH、 COD_{Mn} 与 TP 质量浓度组合($R^2 = 0.781$)对浮游植物丰度的解释度相比未引入 TN 和 TP 质量浓度时均有所提高.因此,水温、pH、 COD_{Mn} 、TN 与 TP 质量浓度是影响山美水库浮游植物丰度的主要因子.

2.3 山美水库浮游植物丰度未来变化趋势

为探究气候变暖和人为调控下,山美水库浮游植物丰度未来变化趋势.根据 Tong 等^[16]的研究结果,

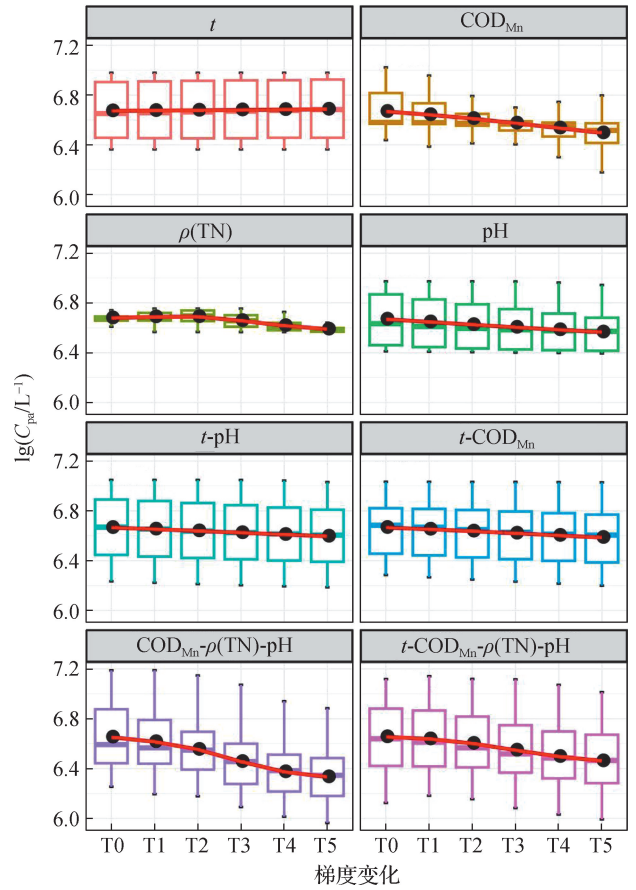
表 1 影响浮游植物丰度各模型的 R^2 值
Tab. 1 R^2 values of various models affecting the abundance of phytoplankton

影响因子	n	R^2	edf	P
t	4 007	0.654	6.827	<0.001
COD _{Mn}			6.246	<0.001
pH	4 007	0.563	6.532	<0.001
COD _{Mn}			6.361	<0.001
t	4 245	0.732	6.478	<0.001
pH			6.678	<0.001
t	4 007	0.761	6.867	<0.001
pH			1.000	<0.001
COD _{Mn}			6.275	<0.001
t	4 007	0.766	6.866	<0.001
pH			6.640	<0.001
COD _{Mn}			6.323	<0.001
$\rho(\text{DO})$			3.620	<0.001
t	3 235	0.781	6.698	<0.001
pH			1.000	<0.001
COD _{Mn}			1.001	<0.001
$\rho(\text{TP})$			6.153	<0.001
t			6.831	<0.001
pH	3 930	0.774	6.643	<0.001
COD _{Mn}			6.161	<0.001
$\rho(\text{TN})$			5.909	<0.001
t			6.831	<0.001

注: n 为样本数;edf 为有效自由度,用于衡量模型中平滑项复杂性的指标; $P < 0.001$ 表示极显著。

按每 5 年水温增加 0.1 °C 进行模拟,构建从 2025—2050 年的 5 个升温梯度. 与此同时,假设人为调控影响下 TN 质量浓度和 COD_{Mn} 按 0.2 mg/L 减小构建 5 个质量浓度梯度,pH 按 0.1 下降构建 5 个 pH 梯度. 结果表明(图 5):随着水温的增加,山美水库浮游植物细胞丰度上升,到 2050 年平均值增加至 $4.84 \times 10^6 \text{ L}^{-1}$;而随着 COD_{Mn}、TN 质量浓度和 pH 下降,浮游植物丰度均有所下降,到 2050 年平均值分别下降至 3.13×10^6 、 3.88×10^6 和 $3.68 \times 10^6 \text{ L}^{-1}$,其中 COD_{Mn} 和 pH 下降对控制浮游植物生长有明显作用;水温上升会缓解 pH 和 COD_{Mn} 下降导致的浮游植物细胞丰度下降趋势;当 TN 质量浓度、pH 和 COD_{Mn} 同时变动时,浮游植物细胞丰度下降,到 2050 年平均值下降至 $2.15 \times 10^6 \text{ L}^{-1}$;当引入水温变化时,即水温、COD_{Mn}、

TN 质量浓度和 pH 4 个因子同时变动时,浮游植物细胞丰度下降幅度受到一定程度的抑制。



箱内水平线为中位值,箱顶部和底部分别表示 75%和 25%分位值, P 值代表当前环境与各环境变动最大梯度下模型预测值的差异显著性, P 均小于 0.05. T0 表示当前环境;T1~T5 表示水温比当前环境依次上升 0.1 °C、pH 比当前环境依次下降 0.1、TN 质量浓度和 COD_{Mn} 比当前环境依次下降 0.2 mg/L.

图 5 在气候变暖和人为调控下山美水库浮游植物丰度变化预测

Fig. 5 Predicted changes of phytoplankton abundance under the global warming and human regulation

3 讨论

3.1 山美水库水生态状况

山美水库水体各理化因子呈明显的季节变化,水温和 pH 季节变化类似,夏季出现高值;DO 质量浓度、电导率和 COD_{Mn} 在春末夏初出现高值. pH 值范围 6.37~9.76,春、夏两季存在 pH 超标现象. pH 超标可能与晋江东溪水质有关,因为晋江东溪水体整体偏碱性,水化学类型为 HCO₃-Ca 型^[18]. 与此同时,春、夏两季浮游植物的大量繁殖会消耗水中大量 CO₂,进一

步导致 pH 升高. 此外, 山美水库 TP 质量浓度较低, 但 TN 质量浓度常年超过 V 类地表水标准, 且在春、夏两季质量浓度较高. 该结果和已有研究结果类似, 如王俊毅^[5]的研究表明山美水库营养盐浓度较高, 且在丰水期进、出口的 TN 质量浓度明显高于大坝区. 由此可见, 山美水库氮污染较为严重, 导致水库的氮磷比较高, 所以磷浓度是山美水库浮游植物生长的限制因子.

浮游植物丰度和群落结构受环境因子影响. 基于随机森林回归模型和 GAMM 分析, 结果表明影响山美水库浮游植物丰度的主要环境因子为水温、COD_{Mn}、pH 和营养盐浓度. 水温会影响浮游植物生长过程中的光合作用、呼吸速率及生长代谢活动等, 在全球气候变暖的背景下, 可能引发浮游植物的大量繁殖^[19]. 如 Lü 等^[20]的研究表明温度和营养盐浓度是影响饮用水源地水库表层浮游植物群落季节演替的重要因子; 夏季温度较高、营养盐充沛时, 蓝藻类占主导地位, 而随着温度下降, 隐藻和硅藻主导浮游植物群落. 不同藻类具有不同的最适生长温度, 蓝藻和绿藻在水温高时生物量更高, 而隐藻对低温具有偏好^[21]. 此外, 近 3 年 COD_{Mn} 和浮游植物丰度变化趋势类似, 均呈上升趋势[图 1(f) 和 3]. COD_{Mn} 表征的是水体有机污染情况, 受生活污染排放、畜牧业养殖污染、密集的农业活动、雨水径流的输入和藻类衍生的有机物释放等影响^[22]. 大量研究表明藻类丰度与水体中 COD_{Mn} 的动态变化密切相关, 一方面藻类是 COD_{Mn} 的贡献者^[22], 另一方面 COD_{Mn} 也会影响藻类生长. 如: 韩志萍等^[23]的研究表明南太湖蓝藻生物量随着 COD_{Mn} 的增加而上升, COD_{Mn} 过高可能会导致蓝藻水华的暴发; 杨萍萍^[24]探究洱海浮游植物群落时空分布特征及其与环境因子的关系时, 发现绿藻门转板藻(*Mougeotia*)、蓝藻门假鱼腥藻(*Pseudanabaena*)、束丝藻(*Aphanizomenon*) 和浮游植物总细胞密度均与 COD_{Mn} 呈显著正相关. 2020 年以来山美水库通过投放大量鱼类以生物操纵方法控制藻类密度^[14], 而山美水库 COD_{Mn} 和 TN 质量浓度变化并不同步, 这暗示着水库 COD_{Mn} 主要受畜牧业养殖污染影响. pH 与藻类的生长密切相关, 不同浮游植物类群适宜生长的 pH 范围也不同. 已有研究表明, 水体为弱碱性时有利于藻类的生长, 尤其是蓝藻偏好较高的 pH^[25]. 这是因为弱碱性水体会促进藻类吸收 CO₂, 从而加强藻类的光合作用; 而在弱酸性水体中藻类生长通常较缓慢. 同时, 营养盐浓度也是影响浮游植物的重要因子. 磷和氮均是藻类生长和各种代谢活动中必不可少的营养元素, 参与藻类细胞代谢过程中的能

量传递和储存, 是核酸、磷脂与蛋白质等生命必需物质的重要组成元素. 氮浓度较高导致水体氮磷比较高, 进而影响浮游植物丰度和群落结构^[26]. 对于山美水库, 2020—2023 年 TN 质量浓度虽呈下降趋势, 但浮游植物丰度呈上升趋势, 这可能是受水库 COD_{Mn} 增加的影响.

3.2 在气候变化和人为调控下山美水库浮游植物丰度变化趋势

在全球范围内, 受气候变化和人类活动等多重影响, 水生生态系统更易受到多重干扰. 水库通常作为饮用水源地, 其生态系统状态变化可能会影响生物多样性, 进一步导致生态系统产品和服务的损失. 气候变化会改变水温和降雨模式以及加强水体分层等, 进而影响浮游植物群落结构, 甚至延长藻华持续时间^[11, 27]. 通过模型预测未来气候变化情景下浮游植物丰度和群落结构的变化是较为常用的方法, 如 Xiao 等^[17]基于 GAMM 预测在全球变暖和富营养化双重影响下, 东海甲藻丰度将上升, 硅藻丰度将下降. 因此, 本研究基于 GAMM 预测山美水库浮游植物丰度在气候变暖和人为调控作用下未来变化趋势具有一定参考意义. 在其他环境因子不变的条件下, GAMM 预测结果表明随着水温的升高, 山美水库浮游植物丰度增加, 这一结果与已有研究报道^[28]类似. 全球变暖对水体初级生产力的影响与水体的营养水平紧密相关, 在营养盐水平较高时, 浮游植物初级生产力增加^[29]. 然而, 本研究结果显示尽管随着水温上升, 浮游植物丰度上升, 但是随着 COD_{Mn}、pH 和 TN 质量浓度的下降, 浮游植物丰度明显下降, COD_{Mn} 下降后浮游植物丰度下降尤为明显. 水温上升明显弱化了 pH、COD_{Mn} 和 TN 质量浓度下降对浮游植物丰度的影响.

4 结 论

1) 2020—2023 年山美水库各环境因子呈明显季节变化, 春、夏两季 pH 长时间处于超标状态, 2020—2023 年 TN 质量浓度虽有所下降, 但常高于 1.5 mg/L.

2) 2020—2023 年山美水库浮游植物丰度范围为 $7.3 \times 10^4 \sim 2.9 \times 10^7 \text{ L}^{-1}$, 近 3 年浮游植物丰度呈上升趋势, 水温、pH、COD_{Mn} 和营养盐浓度是影响浮游植物丰度的主要因子.

3) 基于 GAMM 预测山美水库在气候变暖和人为调控影响下随着 TN 质量浓度、COD_{Mn} 和 pH 下降, 浮游植物丰度将下降, 但水温上升明显弱化了 pH、TN 质量浓度和 COD_{Mn} 下降对浮游植物丰度的影响.

参考文献:

- [1] 朱梦峰. 昆明典型城市湖泊、水库的水质与富营养化现状研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2022: 1-79.
- [2] 申利亚, 朱宜平, 陈立婧. 我国水库污染治理现状及对策[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(11): 88-92.
- [3] 中华人民共和国生态环境部. 2023年第二季度和1—6月全国地表水环境质量状况[EB/OL]. (2023-07-21)[2024-03-20]. https://www.mee.gov.cn/ywdt/xwfb/202307/t20230721_1036895.shtml.
- [4] 刘俏. 山美水库浮游动物群落结构与水环境关系研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022: 1-10.
- [5] 王俊毅. 2016—2019年山美水库氮磷分布特征[J]. 环保科技, 2021, 27(2): 22-25, 52.
- [6] 邱祖凯, 胡小贞, 姚程, 等. 山美水库沉积物氮磷和有机质污染特征及评价[J]. 环境科学, 2016, 37(4): 1389-1396.
- [7] 福建省河湖健康研究中心. 福建省流域面积大于200平方公里河流和重要湖库健康评估报告(2020—2021)[M]//福建省河湖健康蓝皮书. 福州: 福建省河湖健康研究中心, 2021: 26-69.
- [8] 王江滨. 山美水库水质指标特征分析和生态调控效果评价[J]. 皮革制作与环保科技, 2021, 2(23): 51-55.
- [9] 刘小宇. 秋季山美水库表层浮游植物群落分布模式及其影响因素[D]. 泉州: 泉州师范学院, 2023: 1-16.
- [10] 王迪. 山美水库流域人类活动净氮输入及河流氮通量输出响应特征研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2019: 1-92.
- [11] YANG J R, LV H, ISABWE A, et al. Disturbance-induced phytoplankton regime shifts and recovery of cyanobacteria dominance in two subtropical reservoirs [J]. *Water Research*, 2017, 120: 52-63.
- [12] JIA J J, GAO Y, QIN B Q, et al. Evolving geographical gross primary productivity patterns in global lake systems and controlling mechanisms of associated phytoplankton communities since the 1950s [J]. *Earth Science Reviews*, 2022, 234: 104221.
- [13] 施文卿, 秦伯强. 气候变化下湖库蓝藻水华发展趋势及防控对策[J]. 水利学报, 2023, 54(8): 987-996.
- [14] 刘俏, 刘智暘, 王江滨, 等. 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[J]. 湖泊科学, 2022, 34(6): 2039-2057.
- [15] BREIMAN L. Random forests [J]. *Machine Learning*, 2001, 45: 5-32.
- [16] TONG Y, FENG L, WANG X C, et al. Global lakes are warming slower than surface air temperature due to accelerated evaporation [J]. *Nature Water*, 2023, 1(11): 929-940.
- [17] XIAO W P, LIU X, IRWIN A J, et al. Warming and eutrophication combine to restructure diatoms and dinoflagellates [J]. *Water Research*, 2018, 128: 206-216.
- [18] ZHU Y C, YANG H J, XIAO Y, et al. Identification of hydrochemical characteristics, spatial evolution, and driving forces of river water in Jinjiang watershed, China [J]. *Water*, 2024, 16(1): 45.
- [19] JÖHNK K D, HUISMAN J, SHARPLES J, et al. Summer heatwaves promote blooms of harmful cyanobacteria [J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(3): 495-512.
- [20] LÜ H, YANG J, LIU L M, et al. Temperature and nutrients are significant drivers of seasonal shift in phytoplankton community from a drinking water reservoir, subtropical China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21(9): 5917-5928.
- [21] ZHONG Y P, SU Y P, ZHANG D Y, et al. The spatio-temporal variations in microalgae communities in vertical waters of a subtropical reservoir [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 317: 115379.
- [22] YU H, ZHANG J Y, YIN Z, et al. A method for quantifying the contribution of algal sources to COD_{Mn} in water bodies based on ecological chemometrics and its potential applications [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(2): 111943.
- [23] 韩志萍, 邵朝纲, 杨志红, 等. 南太湖入湖口蓝藻生物量与 COD_{Mn} 和 DO 的相关性研究 [J]. *海洋与湖沼*, 2013, 44(2): 277-282.
- [24] 杨萍萍. 洱海浮游植物群落结构时空分布特征及其与环境因子的关系 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2023: 1-111.
- [25] 刘春光, 金相灿, 孙凌, 等. pH 值对淡水藻类生长和种类变化的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(2): 294-298.
- [26] WORM B, LOTZE H K. Effects of eutrophication, grazing, and algal blooms on rocky shores [J]. *Limnology and Oceanography*, 2006, 51(1part2): 569-579.
- [27] 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 [J]. *湖泊科学*, 2015, 27(1): 1-10.
- [28] YU H, ZHANG J Y, YIN Z, et al. A method for quantifying the contribution of algal sources to COD_{Mn} in water bodies based on ecological chemometrics and its potential applications [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(2): 111943.
- [29] TADONLEKE R D. Evidence of warming effects on phytoplankton productivity rates and their dependence on eutrophication status [J]. *Limnology and Oceanography*, 2010, 55(3): 973-982.

(责任编辑: 曾礼娜)

<http://jxmu.xmu.edu.cn>