董 江,范中亚,黄 露,等.花亭湖水库坝前春夏季叶绿素 a 波动规律及驱动因素 [J]. 中国环境科学, 2026,46(3):1499-1508.
Dong J, Fan Z Y, Huang L, et al. Spring-summer dynamics of chlorophyll-a and its hydrological and water quality drivers at the dam forebay of Huating lake reservoir [J]. China environmental science, 2026,46(3):1499-1508.

花亭湖水库坝前春夏季叶绿素 a 波动规律及驱动因素

董 江[1],范中亚[2],黄 露[2],李 丹[2],杨梦迪[2],仇逸璇[1],王 彪[1],段 彬[3],王文才[2*] (1.安徽大学资源与环境工程学院,安徽 合肥 230039；2.生态环境部华南环境科学研究所,生态环境部水环境模拟与污染控制重点实验室,广东省水与大气污染防治重点实验室,广东 广州 510655；3.安庆市生态环境局,安徽 安庆 246002)

摘要：本研究基于 2022 年 4~6 月花亭湖坝前连续监测数据,运用主成分分析(PCA)、多因子相关性分析及偏最小二乘结构方程模型(PLS-SEM),探究 chl.a 变化规律及其在浮游藻类增长和衰退阶段对水文和水质指标的响应.结果表明:监测期间花亭湖 Chl.a 浓度范围为 6.54~65.90μg/L,平均浓度为(34.62±12.14)μg/L,呈随时间先升后降的倒“V”型变化.Chl.a 在增长期与衰退期受不同水质因子主导.多元统计与相关性分析显示,增长期 Chl.a 主要受营养盐(TP、COD_{Mn} 等)与水文过程(水文、出库流量等)的共同驱动,而衰退期则主要受 pH 值及部分营养盐(TN 等)影响,表明不同阶段水质和水文因子的驱动作用存在显著差异.基于 PLS-SEM 的结果表明,水质因子在增长期和衰退期对 Chl.a 均具有显著正向直接作用,路径系数分别为 0.729 和 0.941.水文因子对 Chl.a 的直接效应在两个时期均不显著,但可通过水质因子间接作用于 Chl.a:增长期表现为负向作用(路径系数-0.780),衰退期则表现为正向作用(路径系数 0.583).进一步分析显示,增长期 Chl.a 主要受水质因子中的 COD_{Mn} 和 TP 及水文因子中的出库流量和水位影响;衰退期则主要受 pH 值、TP、TN、COD_{Mn} 及水位的影响.增长期 chl.a 浓度升高,主要源于降雨冲刷和水库调度引起的水位变化,促进氮、磷等营养盐及浮游藻类向坝前迁移、扩散和增殖.进入衰退期后,随着氮磷营养盐的消耗以及强降雨导致水位骤升和水体扰动,藻类生长受到限制,chl.a 浓度逐渐下降.

关键词：山区水库；叶绿素 a；水文；水质；浮游藻类
中图分类号：X524 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2026)03-1499-10

Spring-summer dynamics of chlorophyll-a and its hydrological and water quality drivers at the dam forebay of Huating lake reservoir. DONG Jiang[1], FAN Zhong-ya[2], HUANG Lu[2], LI Dan[2], YANG Meng-di[2], QIU Yi-xuan[1], WANG Biao[1], DUAN Bin[3], WANG Wen-cai[2*] (1.School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230039, China；2. Key Laboratory of Water and Air Pollution Prevention and Control of Guangdong Province, Key Laboratory of Water Environment Simulation and Pollution Control, Ministry of Ecology and Environment, South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou 510655, China；3.Anqing Municipal Bureau of Ecology and Environment, Anqing 246002, China). *China environmental science*, 2026,46(3)：1499~1508

Abstract：Using high-frequency continuous monitoring data collected at the dam forebay of Huating Lake from April to June 2022, this study quantified chlorophyll-a (Chl.a) dynamics and examined its phase-dependent responses to hydrological and water-quality drivers during phytoplankton growth and decline stages. Principal component analysis, multivariate correlation analysis, and partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM) were integrated to disentangle the relative contributions and interaction pathways of these drivers. Chl.a concentrations ranged from 6.54 to 65.90μg/L (mean: (34.62±12.14)μg/L), exhibiting a pronounced unimodal temporal pattern. The dominant controls on Chl.a differed substantially between growth and decline phases. During the growth phase, Chl.a variability was primarily driven by the combined effects of nutrient availability—especially total phosphorus (TP) and permanganate index (COD_{Mn})—and hydrological processes, including water-level fluctuations and outflow discharge. In contrast, Chl.a dynamics during the decline phase were mainly regulated by pH and total nitrogen (TN), indicating a shift in controlling mechanisms across phytoplankton life stages. PLS-SEM results showed that water-quality factors exerted significant positive direct effects on Chl.a in both phases (standardized path coefficients: 0.729 in the growth phase and 0.941 in the decline phase). Hydrological factors did not directly affect Chl.a but influenced it indirectly through water-quality pathways, producing a negative indirect effect during the growth phase (−0.780) and a positive indirect effect during the decline phase (0.583). Variable-level analysis identified COD_{Mn} and TP, together with outflow discharge and water level, as key drivers during the growth phase, whereas pH, TP, TN, COD_{Mn}, and water level dominated during the decline phase.

Key words：reservoir；chlorophyll a；hydrology；water quality；phytoplankton
收稿日期：2025-07-20
基金项目：广东省科技计划项目(2023B1212070031);京津冀环境综合治理国家科技重大专项(2025ZD1202103);长江生态环境保护修复联合研究二期项目(2022-LHYJ-02-0504-05)

* 责任作者, 高级工程师, wangwencai@scies.org

供水水库作为饮用水源,因其水质直接影响居民健康而备受关注[1-4].浮游藻类是水库生态系统中物质循环与能量流动的关键参与者,对水文、营养盐、水温等因素变化敏感,可有效指示水库水质的状态[5-7].当水库富营养化时,浮游藻类会大量增殖形成水华,破坏水生态平衡,威胁供水水质,引发供水危机[8].叶绿素 a 是浮游藻类中普遍存在的色素,可作为衡量水体营养状态和表征浮游藻类生物量的关键指标,其变化能反映水库水环境质量现状及演变趋势[9-10].

研究表明,水库 Chl.a 的变化与营养盐水平及水文过程密切相关[11-18].在长江中下游山区水库中,降雨集中和水位调度影响外源营养输入和水体流动条件,进而促进夏季藻类生长并增加水华发生概率[13-14].相关研究也发现,夏季藻类生物量升高通常源于营养盐、水温与水文条件的综合作用,其中营养盐和水文过程是关键控制因素[15,18].现有水华研究多聚焦于长江[19]、太湖[20]等大型水体,而与人类生产生活紧密相连的山区水源地水库相关研究则相对较少.另外山区水源地水库水华形成机制的研究存在不足:监测方法时效性不足,现有模型多基于年际/月际水质统计数据构建[18-21],难以揭示暴雨径流冲刷、闸站生态调度等水文突变事件对水库浮游藻类生长的瞬时影响;水华高发期缺乏日尺度高频监测数据[22-26],无法精准捕捉山区水库增殖的快速变化;机制研究系统性薄弱,尚未阐明山区水库特有的水文-水质-浮游藻类多维耦合关系,特别是水位骤变、强降雨等典型扰动过程对浮游藻类分布的影响,导致藻类增殖预测模型适用性受限.

全球气候变化导致极端天气事件频发,水文节律的变化对内陆水体生态系统产生重要影响.作为长江中下游典型山区水库,花亭湖春夏季藻类增殖日益受到水文与水质因子共同调控.近年来,该区域呈现气温升高、物候期提前、降水强度增强等趋势,强降雨携带陆源营养盐促进藻类快速增长,高温加剧水体分层并影响藻类分布,水库调控与自然水文过程的叠加则增加了 Chl.a 浓度波动的复杂性.

在水质总体较好的背景下,花亭湖春夏季仍频繁发生藻类异常增殖,表明传统基于代谢机理的解析与预警方法可能存在局限.本研究依托坝前高频监测数据,综合运用主成分分析(PCA)、多因子相关性分析及偏最小二乘结构方程模型(PLS-SEM),系统揭示了 Chl.a 在增长与衰退阶段对水文和水质因子的响应机制.阐明气候变化条件下山区水库藻类增殖的驱动过程,旨在为构建适应气候不确定性的生态风险预警与精准管理体系提供参考科学依据.

1 数据来源及方法

1.1 研究区域

花亭湖位于安徽省西南部,长江中下游北岸、大别山南麓.该区域属北亚热带季风气候区,四季分明,冬季受西北冷空气影响,气温偏低,夏季受东南海洋暖湿气流影响,天气炎热且湿度较高.年平均气温为16.4℃,极端气温分别为 1 月的 3.7℃和 7 月的 28.4℃.年平均日照时长 1937.7h,多年平均降雨量 1426.6mm,降雨主要集中在 4~9 月.水库平均水深 17m,多年平均水域面积 78km²,平均库容 1.74×10^9m³.水库出库流量主要受降雨及上游支流(如安乐河)径流量影响,平均年径流量 1.39×10^9m³.作为太湖县主要供水源,花亭湖的水质安全与富营养化问题备受关注,水华现象多发生在春夏季节(4~9 月)[27].花亭湖流域如图 1 所示,国控监测站点位于水库出水口处(30°27′55.08″N,116°14′31.2″E),涵盖店前河、安乐河、南阳河等主要支流.

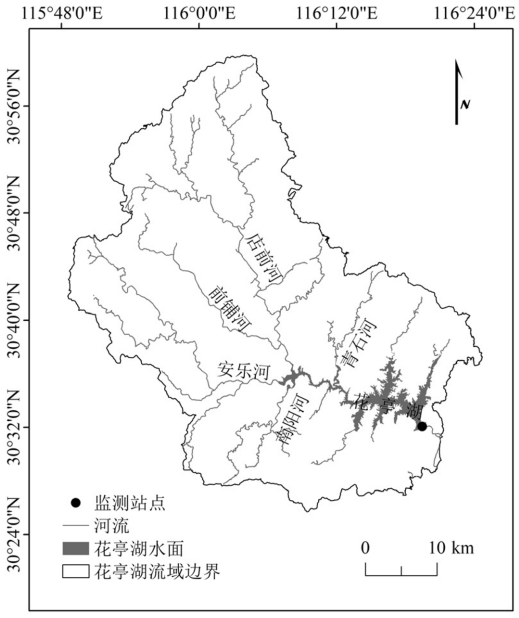


图 1 花亭湖流域及监测站点

Fig.1 Huating lake basin and monitoring stations

1.2 数据来源与处理

于 2022-04-01~2022-07-01 采集了花亭湖的水文、水质及浮游藻类数据,具体参数与监测频率见表 1.水文指标数据来源于安徽省水信息系统(http://yc.wswj.net/ahsxx/),水质指标及浮游藻类指标均来自国家水质自动综合监管平台(https://szzdjc.cnemc.cn:8070/).为便于统计分析及后续研究,本研究将不同频次的数据统一处理为日平均值.

表 1　数据信息

Table 1　Data information

指标类型	指标名称	监测频率
浮游藻类指标	叶绿素 a(Chl.a)	1 次/h
	藻密度(AD)	
水质指标	溶解氧(DO)	
	酸碱度(pH 值)	
	水温(WT)	
	浊度(Turb)	
	电导率(EC)	
	高锰酸盐指数(COD_{Mn})	1 次/4h
	总磷(TP)	
	总氮(TN)	
	氨氮(NH_3-N)	
水文指标	水位	1 次/d
	出库流量	
	降雨量	

1.3　研究方法

Isabwe 等[28]在研究伊利湖运用 Chl.a 峰值日期划分浮游藻类增长衰退阶段,在本研究中,峰值日期(5 月 18 日)也被用来划分增长和衰退阶段.在主成分分析(PCA)[29]前首先对数据进行 KMO 检验和 Bartlett 球形度检验,结果表明 KMO 值均大于 0.6,且 Bartlett 球形度检验显著(P<0.05),数据适宜进行 PCA 分析.后用 Z-Score 标准化处理数据,依特征值 λ>1 提取主成分并分析荷载.

采用 Pearson 相关性分析[30-31]方法对花亭湖各水质因子与 Chl.a 之间的相关性进行评估,并绘制相关性热图以直观展示结果.

本研究利用偏最小二乘结构方程模型(PLS-SEM)[31]探讨显变量与潜变量之间的多元相关性.将水质因子(TP、TN、COD_{Mn}、NH_3-N、pH 值、DO、WT、EC、Turb)与水文因子(水位、出库流量、降雨量)作为潜在变量,构建了 3 类路径关系:(1)水质因子对 Chl.a 的直接作用;(2)水文因子通过影响水质因子间接作用于 Chl.a;(3)水文因子通过改变库容或水动力条件直接作用于 Chl.a.PLS-SEM 包含测量模型和结构模型两部分,前者用于刻画潜变量与观测变量之间的关系,后者用于描述潜变量之间的因果关系,具体公式如下:

$$X = \lambda\zeta + \delta \tag{1}$$

$$Y = \boldsymbol{B}Y + \Gamma\zeta + \zeta \tag{2}$$

式中:X 为各观测变量;λ 为观测变量与各潜变量 ξ 之间的因子负荷矩阵;δ 为测量误差;Y 为潜变量中因变量的向量;$\boldsymbol{B}$ 为潜变量中因变量之间相互关系的系数矩阵;ξ 为潜变量中自变量的向量;Γ 为潜变量中自变量对因变量的效应系数矩阵;ζ 为结构模型的误差项.

测量模型的评估包括内部一致性、收敛效度和区分效度 3 方面:内部一致性主要通过组合信度(CR>0.7)进行检验,Cronbach's α 可作为辅助参考;收敛效度则以平均方差提取量(AVE>0.5)为判据;区分效度主要依据 HTMT 比率(<0.9).结构模型的评估则需检验路径系数的显著性,以及决定系数(当 R^2≥0.26 时,可认为模型具有较强的解释力)和预测相关性(Q^2 显著大于 0),以判断模型的解释力与预测力.

数据统计分析、KMO、Bartlett 球度检验及 Z-Score 标准化方法等采用 SPSS 27 和 Excel 2019 软件进行,时间序列图、相关性热图和主成分分析双序图等通过 Origin2024b 实现,偏最小二乘结构方程模型(PLS-SEM)则利用 SmartPLS 3 构建.

2　结果与分析

2.1　花亭湖各环境因子变化特征

如图 2,Chl.a 浓度在观测期内呈显著波动,范围为 6.54~65.90μg/L(均值±标准差:(34.62±12.14)μg/L),峰值出现在 2022-05-18(65.90μg/L).该峰值与 TP、TN 和 COD_{Mn} 的突变响应相一致.AD 呈先升后降趋势,变化范围为 6.25×10^5~5.90×10^6cell/L(均值:(1.65±0.88)$\times10^6$cell/L).

同时,水质指标也表现出明显的时序波动.DO 呈双峰波动,范围为 8.85~12.44mg/L(均值:(10.93±0.61)mg/L).pH 值变化显著(6.57~10.10;均值:(9.17±0.92)),初期下降后上升并趋稳.稳定阶段数值超出国家地表水标准上限(6~9)[32-33].WT 呈波动上升趋势,范围为 13.18~27.98°C(均值:(21.65±4.09)°C).Turb 呈

无规律波动,范围为 1.26~7.84NTU(均值:(3.11±1.25)NTU).EC 持续上升,范围为 82.39~108.65μS/cm(均值:(91.27±5.54)μS/cm).COD_{Mn} 初期波动上升,5 月中旬略降后趋稳,范围为 1.19~2.46mg/L(均值:(1.88±0.29)mg/L).TP 呈先增后减趋势,6 月底显著回升,范围为 0.0090~0.0195mg/L(均值:(0.0125±0.0023)mg/L).TN 范围为 0.29~0.84mg/L(均值:0.52±0.14)mg/L),5 月中旬后降至 0.30mg/L 并趋稳.NH_3-N 呈无规律波动,范围为 0.001~0.0167mg/L(均值:(0.0046±0.0029)mg/L).

水文过程同样表现出阶段性特征.水位变化表现为:4 月上旬下降,4 月下旬回升后再次下降,6 月下旬显著回升.变化范围为 76.96~79.88m(均值:(78.18±0.68)m).出库流量前期较高,中期降至低位,后期小幅回升,变化范围为 0.95×10^6~$8.05\times10^6 m^3/d$(均值:$(4.52\pm1.96)\times10^6 m^3/d$).降雨集中于 4 月底和 6 月底,单日降雨量范围为 0~65.40mm(均值:(4.48±12.22)mm).

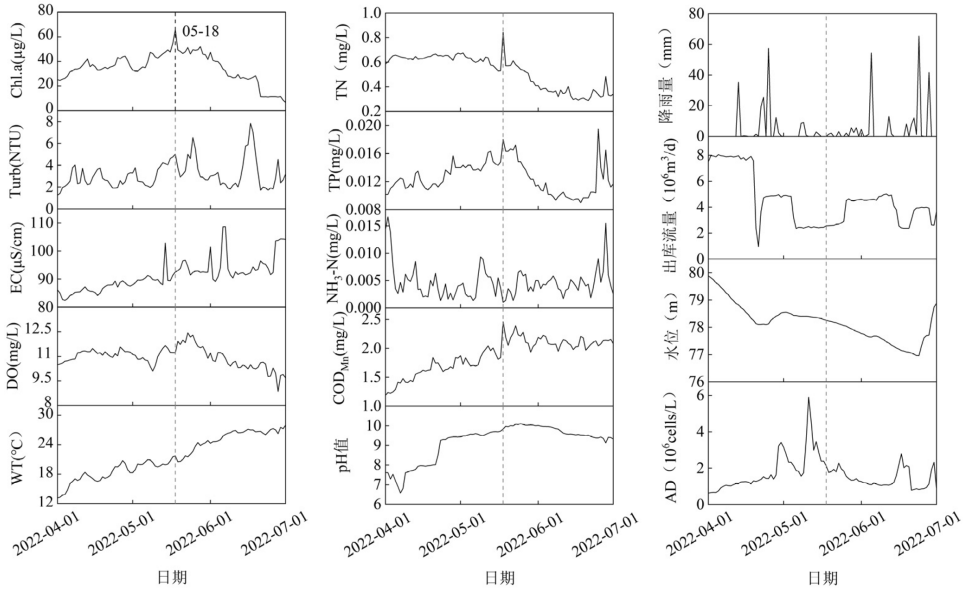


图 2 花亭湖各环境因子变化

Fig.2 Changes of environmental factors in Huating Lake

2.2 花亭湖环境因子多元统计和相关性分析

主成分分析(PCA)结果显示,环境因子间存在显著相关性(KMO=0.717,$P<0.001$),满足因子分析条件.基于特征值>1 准则提取的 4 个主成分累计解释 77.51%的总方差,其中前两个主成分(PC1 和 PC2)共同解释 60.70%的变异,其中 PC1 占 37.03%,PC2 占 23.67%(图 3).沿着 PC1,主要是变量(pH 值、COD_{Mn} 和 WT)表现出强烈的正载荷,负方向与水位、出库流量和 TN 强负载荷关联,代表水文和有机物污染程度的综合变化.而沿着 PC2,主要是 DO、Chl.a、TP 和 AD 正负荷较高,指示了营养盐、浮游藻类生物量及其对光合作用产氧的影响.样本聚类特征显示,浮游藻类增长期样本集中分布于第二、三象限,与衰退期样本(第一、四象限)聚类效应显著,反映了不同时期驱动的水质环境特征存在本质差异,且这种差异主要由 PC1 轴(水文-有机物污染程度)所主导.

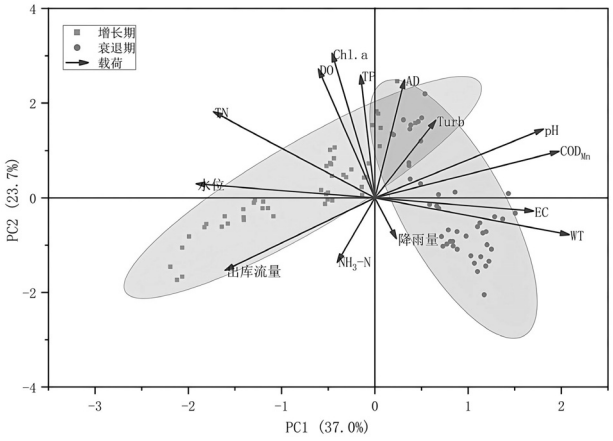


图 3 花亭湖环境因子 PCA 分析双序图

Fig.3 PCA analysis of environmental factors in Huating Lake

图中点代表不同采样日期,椭圆区域分别表示浮游藻类增长期和衰退期样本的 95%置信椭圆.箭头表示环境因子在主成分空间中的载荷(方向与长度分别代表载荷方向与大小)

相关性检验结果表明,Chl.a 与多项环境因子之

间存在显著相关关系(P<0.05,图 4),相关系数范围为–0.83~0.94.图 4 显示,在增长期,WT、pH 值、EC、Turb、COD_{Mn}、TP、AD 与 Chl.a 呈极显著正相关(P<0.01),水位、出库流量与 Chl.a 呈极显著负相关(P<0.01),DO 与 Chl.a 呈显著正相关(P<0.05),NH_3–N 与 Chl.a 显著负相关(P<0.05).进入衰退期后,pH 值、DO、TN 与 Chl.a 呈极显著正相关(P<0.01),而 WT 变为极显著负相关(P<0.01),COD_{Mn}、TP、AD、水位与 Chl.a 显著正相关(P<0.05),EC 与 Chl.a 显著负相关(P<0.05),其余参数的相关性依然不显著.衰退期其他环境因子对 chl.a 的相关性较增长期有所减弱.

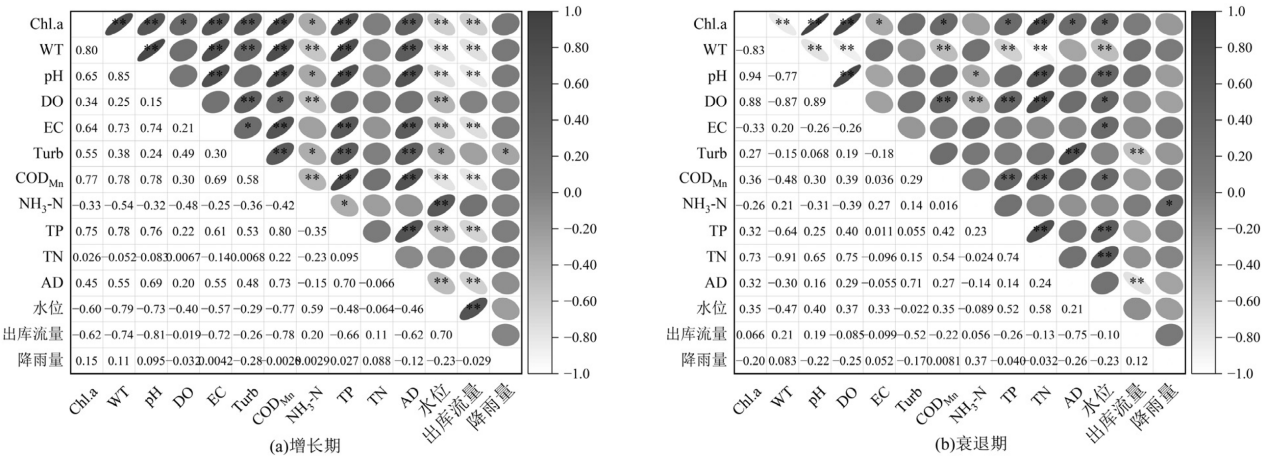


图 4　花亭湖各环境因子间相关性系数热力图

Fig.4　Heat map of correlation coefficients between environmental factors in Huating Lake

左图是增长期,右图为衰退期;*表示 P<0.05,**表示 P<0.01,椭圆越窄显著性水平越高

2.3　花亭湖 Chl.a 的结构方程模型分析

基于 PLS-SEM 分析,并结合 SmartPLS 的修正建议及模型参数识别原则[30-31],对测量模型进行了逐步检验与修正.在增长期与衰退期的初始模型中,均纳入 9 个水质指标(NH_3–N、DO、TN、Turb、WT、EC、pH 值、TP、COD_{Mn})和 3 个水文指标(水位、出库流量、降雨量).首先对外部载荷进行检验,部分指标的载荷低于 0.7(如增长期的 NH_3–N、DO、TN、Turb 和降雨量,衰退期的 NH_3–N、Turb、WT、EC、出库流量和降雨量),对模型的解释力有限.结合理论合理性,因此未被纳入后续修正模型.

信度检验结果表明,初始模型水文因子的 Cronbach's α 和 CR 均偏低(增长期:Cronbach's α=0.341, CR=0.608;衰退期:Cronbach's α=0.331,CR=0.585),表明整体信度不足.为提高信度和效度,最终仅保留水位和出库流量(增长期),以及水位(衰退期)来表征水文因子.在区分效度检验中发现,部分潜变量的 HTMT 值超过 0.9(增长期水文因子与水质因子 HTMT=0.974;衰退期水质因子与 Chl.a HTMT=0.925),提示区分效度不足.结合理论合理性及变量贡献度,对增长期的 WT、EC 和 pH 值,以及衰退期 DO 进行了调整,未进入最终模型.最终,增长期模型的水质因子由 TP 和 COD_{Mn} 构成,水文因子由水位和出库流量构成;衰退期模型的水质因子由 pH 值、TN、TP 和 COD_{Mn} 构成,水文因子由水位表征.

修正后的模型检验结果如表 2,修正后的各潜变量均满足内部一致性(Cronbach's α,CR>0.7)、收敛效度(AVE>0.5)和区分效度(HTMT<0.9)的要求.在结构模型方面,模型拟合度良好.各内生潜变量的 R^2 均大于 0.26,Q^2 均大于 0,表明模型具有较强的解释力和预测效度.路径系数均达到统计显著水平(P<0.05),方向与理论预期一致,验证了模型结构的合理性.

如图 5 所示,在增长期,水质因子对 Chl.a 表现出显著的正向作用(路径系数=0.729***),其中 TP(外部载荷=0.942***)和 COD_{Mn}(0.957***)是主要驱动因子;水文因子则对 Chl.a 产生负向抑制(−0.095),其测量变量水位(0.914***)和出库流量(0.928***)均表现为显著负效应.同时,水文因子对水质因子具有显著负向作用(−0.865***).

在衰退期,水质因子对 Chl.a 的正向作用更为显

著(0.941***),主要驱动因子为 pH 值(0.949***)、TP(0.793***)、TN(0.714***)和 COD_{Mn}(0.639***).此阶段水位对 Chl.a 转为正向作用,水文因子对水质因子也表现为正向驱动(0.583***).衰退期的水文因子由单一变量水位构成,直接定义该潜变量.

表 2 测量模型检验结果

Table 2 Measure the model inspection results

时期	潜变量	Cronbach's α	CR	AVE	相互关系	HTMT
增长期	Chl.a	1.000	1.000	1.000	水文−Chl.a	0.732
	水质因子	0.892	0.948	0.902	水文−水质	0.899
	水文因子	0.822	0.918	0.849	水质−Chl.a	0.850
衰退期	Chl.a	1.000	1.000	1.000	水文−Chl.a	0.354
	水质因子	0.789	0.860	0.612	水文−水质	0.661
	水文因子	1.000	1.000	1.000	水质−Chl.a	0.845

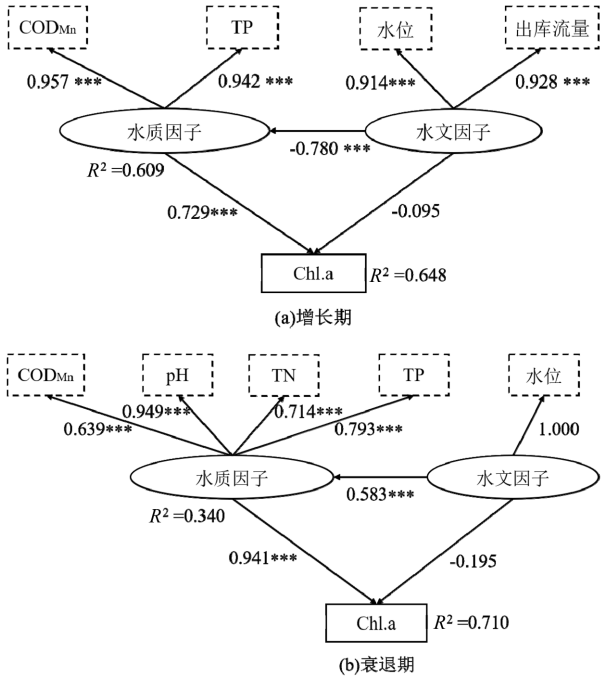


图 5 Chl.a 增长期与衰退期偏最小二乘结构方程模型

Fig.5 Partial least squares structural equation model of Chl.a during the growth and decay

***表示 P<0.001,无*则表示相关性不显著

3 讨论

3.1 影响水库 Chl.a 的关键水文过程

花亭湖位于长江中下游大别山区,具备典型山区型水库特征:库湾狭长、水位受降雨直接控制,坝前水文过程响应显著.花亭湖水库功能多样且人类活动频繁,库区持续受到生活污水和农业面源污染的影响[14,18].地表径流携带上游污染物入湖,改变营养盐通量,从而驱动浮游藻类生长,显著调控 Chl.a 浓度动态.

花亭湖在不同阶段表现出差异化的水文过程,通过改变水动力和营养盐分布显著影响浮游藻类生长动态(图 6).在增长初期(4 月 1 日~4 月 20 日),库区降雨量相对较低,出库流量维持在较高水平(均值 $7.84\times10^6 m^3/d$),使水位在期间由 79.88m 下降至 78.10m.该过程可能加速了污染物向坝前区的输移和水体浓缩,导致 TP 浓度升高,促进浮游藻类生长及 Chl.a 增加.随着春夏季降雨增加,入库水量显著增加而出库流量相对减小,使得水位回升至 78.55m.此阶段累计降雨量在 Chl.a 峰值时达到 177.8mm,降雨径流及下游泄流,可能将上游村镇的面源污染物带入湖中,并推动其向下游扩散[16,33],这导致坝前 TP 浓度快速上升,进一步刺激了浮游藻类增殖,推动藻类生长,与相关性分析结果(图 4)相一致.

进入衰退期后,随着降雨量减少与水位下降,外源营养输入减弱,库区氮磷逐渐被藻类消耗,Chl.a 浓度随之持续下降.与图 5 所示的衰退期水位与 Chl.a 的正相关关系相符.在衰退后期(6 月 24 日~7 月 1 日),连续强降雨使水位在 8d 内由 76.96m 迅速上升至 78.88m。强降雨增强了水体混合效应,稀释了 Chl.a 浓度,并增加了流速,可能缩短了水体换水周期,削弱了浮游藻类对营养物质的吸收能力,使得浮游藻类生长显著受限[34].这解释了在藻类衰退后期的强降雨过程中,尽管面源污染冲刷导致坝前 TP 浓度升高,但 Chl.a 浓度并未随之回升,而是维持在较低水平.其原因可能在于降雨引起 Turb 显著升高,削弱了水下光照条件,从而抑制了营养盐对藻类生长的促进作用(图 2).同时,降雨过程的稀释效应与水体扰动亦可能进一步加速了浮游藻类的衰退,导致水华消退[35-36].

结构方程模型结果(图 5)进一步印证了上述机制,水位在藻类变化的调控中居于核心地位.水位不仅直接决定藻类的生境条件,还综合反映降雨、入库和出库过程,因此,即便降雨量与出库流量在模型中未表现显著,其对藻类的影响仍可通过水位及营养盐通量间接体现.

总体而言,在水文过程的驱动下,花亭湖藻类变化主要表现为“水位调度—营养盐再分布—水动力

扰动”的共同作用.其中水位是关键的中介变量.它既整合了降雨、入库和出库过程,又决定了营养盐在库区的输移与再分布.值得注意的是,强降雨下 TP 浓度升高并不必然引发藻类暴发,提示水动力扰动可能存在阈值效应,也反映了山区水库中水文过程与藻类响应的复杂性与潜在非线性.这一发现为理解极端气候条件下水库生态风险提供了新的视角.

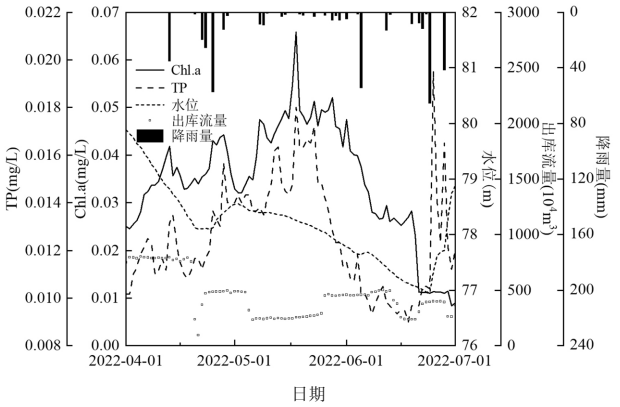


图 6　花亭湖水位、出库流量、降雨量、TP 和 Chl.a 的变化

Fig.6　Changes in water level, outflow, rainfall, total phosphorus and chlorophyll a in Huating Lake

3.2　关键水质因子变化对水库 Chl.a 的影响

营养盐对浮游藻类增殖具有核心调控作用.全球多数水体中磷被认为是主要限制因子[37-38].相关性分析(图 4)显示,TP 在增长期与衰退期均与 Chl.a 显著相关(P<0.01 与 P<0.05),且在 PLS-SEM 中两个阶段均作为测量变量,提示其在藻类生长中具有持续作用.然而,增长期 TP 对 Chl.a 可能主要通过提供充足磷源促进快速生长,而在衰退期,TP 对 Chl.a 的影响可能受到藻类吸收导致水体磷浓度下降以及水动力扰动引起营养盐稀释的影响,可能减弱其对藻类生长的促进作用.相比之下,TN 仅在衰退期表现出显著相关(P<0.01),可能与藻类前期营养竞争及有机物代谢积累有关,反映其作用具有阶段性和滞后性.

在监测期内,WT 持续上升,如图 2 所示,变化范围为 13℃~28℃,该温度区间为春夏季藻类增殖的发生提供了适宜的生长条件[39].已有研究表明,水温对叶绿素 a 动态的预测能力较弱[28],本相关性分析亦显示,增长期 WT 与 Chl.a 显著正相关(P<0.01),衰退期转为显著负相关(P<0.01).尽管水温升高可促进藻类生长,但在衰退期其他负面因子(光照不足、营养消耗、水位调度等)更为显著,导致 Chl.a 下降,提示藻类对温度的响应具有阶段性和非线性特征.

COD_{Mn} 作为衡量水体中可氧化有机物总量的重要指标,其升高反映了大量外源有机物的输入[30].有机物的补充促进浮游藻类增殖,同时浮游藻类光合代谢亦会加剧有机物的积累[37,40].在藻类增长期,COD_{Mn} 升高主要源于外源有机物的补充及藻类光合代谢产物的积累[33],与 TP 协同促进藻类快速增殖;而在衰退期,藻类衰亡伴随有机物输入减少,加之降雨稀释和氧化作用增强,COD_{Mn} 浓度下降,可能反映系统的自净过程,并在一定程度上促使水华消退.相关性分析和 PLS-SEM 均提示了这一阶段性差异(图 4、图 5).

pH 值作为表征水体酸碱度的重要理化指标,对浮游藻类的生理代谢具有显著影响.本研究监测期内 pH 值维持在 6.57~10.10 的碱性范围,整体适宜藻类生长[41].相关性和 PLS-SEM 显示,增长期 pH 值对 Chl.a 具有促进作用,衰退期虽相关性增强,但藻类分解与呼吸可削弱甚至反向调控其作用.表明 pH 值对 Chl.a 存在明显阶段性影响,维持水体 pH 值稳定有助于抑制藻类异常增殖和水华形成.

Turb 是反映水下光照条件的重要水质参数,它与水生态系统的初级生产力和浮游藻类生长密切相关[41-42].相关性分析(图 4)显示,增长期 Turb 与 Chl.a 显著正相关(P<0.01),而衰退期不显著.可能是藻类生物量增加加剧水体浑浊,其主要原因在于藻类自身作为悬浮颗粒,提高了水体浊度.浊度升高不仅反馈影响光照条件,还可能调控藻类群落结构与优势种更替[42-43].在初级生产力旺盛阶段,适度 Turb 可为部分藻种提供遮光优势,减弱光抑制效应,进一步促进其扩张[44].

花亭湖 Chl.a 动态受多水质因子耦合作用调控,各因子在增长期与衰退期表现出阶段性主导效应.营养盐和有机物主导藻类增殖,而 WT、pH 值与 Turb 在不同阶段通过非线性机制调控藻类生长.这一多因子耦合及阶段性响应特征,为山区型水库浮游藻类演变及藻类增殖机制提供了新的认知框架.

3.3　该研究对山区水库治理的启示

针对藻类增殖防控,应分阶段实施精准管理.1.藻类增长期管理:结合气象预报调控水位和出库流量,防控春夏季降雨引发的面源磷输入与迁移,并加

强上游面源污染治理,从源头削弱藻类的营养供给.2.藻类衰退期管理:藻类衰亡过程中有机物释放与溶解氧下降易导致水质恶化.此阶段应通过增强水体交换和局部增氧(如曝气或分层取水),并辅以底泥控制以减少内源磷释放,从而缓解缺氧与有机物积累,降低继发性水质风险.3.应对气候变化的不确定性:在极端气候事件频发背景下,应加强藻类增殖过程的基础研究,深化对水文-水质-藻类耦合机制的认识,为水库的适应性管理提供支撑.

4 结论

4.1 水文过程与营养盐输入/迁移协同驱动 Chl.a 变化.花亭湖 Chl.a 浓度波动显著,主要受降雨、出库流量和水位等水文因子影响.驱动过程表现为“降雨径流—水文动力变化—营养盐向坝前迁移—坝前藻类增殖(Chl.a 升高)—营养盐消耗—藻类生长受限衰亡(Chl.a 下降).”

4.2 营养物质在 Chl.a 变化中发挥核心作用.TP 和 COD_{Mn} 在增长期和衰退期均呈显著正效应,其中 TP 的外部载荷分别为 0.942 和 0.793,COD_{Mn} 的外部载荷分别为 0.957 和 0.639,表明有机物在藻类代谢过程中具有协同作用.总氮(TN)在衰退期对 Chl.a 贡献显著(外部载荷为 0.714).

4.3 不同生长阶段藻类响应因子存在显著差异:增长期 Chl.a 主要受 COD_{Mn}、TP、出库流量和水位驱动;衰退期则以 pH 值、TP、TN、COD_{Mn} 及水位为主控因子.反映了藻类对复杂环境条件的阶段性响应特征.

参考文献:

[1] Li N X, Zhang Y, Wang L, et al. Linking water environmental factors and the local watershed landscape to the chlorophyll a concentration in reservoir bays [J]. Science of The Total Environment, 2020,758: 143617.

[2] Shi X H, Yan H F, Zhang S N, et al. Impacts of environmental factors on chlorophyll-a in lakes in cold and arid regions: A 10-year study of Wuliangsuhai Lake, China [J]. Ecological Indicators, 2023,148: 110133.

[3] Zhang H X, Huo S L, Feng L, et al. Geographic characteristics and meteorological factors dominate the variation of chlorophyll-a in lakes and reservoirs with higher TP concentrations [J]. Water Resources Research, 2024,60(6):e2023WR036587.

[4] Shi J H, Ni L X, Liu J M, et al. Spatiotemporal distribution of phytoplankton community structure and its relationship with environmental factors in Hongze Lake, China [J]. Urban Climate, 2023,52:101746.

[5] 彭成荣,陈 磊,毕永红,等.三峡水库洪水调度对香溪河藻类群落结构的影响 [J]. 中国环境科学, 2014,34(7):1863-1871.
Peng C R, Chen L, Bi Y H, et al. Effects of flood regulation in the Three Gorges Reservoir on phytoplankton community structure in the Xiangxi River [J]. China Environmental Science, 2014,34(7):1863–1871.

[6] 张 辉,彭宇琼,邹贤妮,等.新丰江水库浮游植物功能分组特征及其与环境因子的关系 [J]. 中国环境科学, 2022,42(01):380-392.DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20210721.002.
Zhang H, Peng Y Q, Zou X N, et al. Functional group characteristics of phytoplankton and their relationships with environmental factors in Xinfengjiang Reservoir [J]. China Environmental Science, 2022,42(1): 380–392.DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20210721.002.

[7] 张 萍,国超旋,俞 洁,等.钱塘江干流夏季浮游藻类群落结构特征及其对水文气象的响应 [J]. 湖泊科学, 2022,34(2):418-432.
Zhang P, Guo C X, Yu J, et al. Characteristics of phytoplankton community structure and its response to hydrological and meteorological conditions in the mainstream of Qiantang River in summer [J]. Journal of Lake Sciences, 2022,34(2):418-432.

[8] 方灵超,任玉峰,毕永红,等.三峡水库香溪河库湾浮游藻类功能群对水位变化的响应 [J]. 湖泊科学, 2023,35(5):1538-1548.
Fang L C, Ren Y F, Bi Y H, et al. Response of phytoplankton functional groups to water level changes in Xiangxi River Bay of Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Lake Sciences, 2023,35(5): 1538-1548.

[9] 严广寒,殷雪妍,汪 星,等.基于GAM模型的洞庭湖叶绿素a浓度与环境因子相关性分析 [J]. 中国环境科学, 2022,42(01):313-322.DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20210709.004.
Yan G H, Yin X Y, Wang X, et al. Relationship of chlorophyll a concentration and environmental factors in Dongting Lake based on GAM model [J]. China Environmental Science, 2022,42(1):313-322.DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20210709.004.

[10] 龙良红,黄宇擘,关文海,等.水动力过程驱动的三峡水库澎溪河水华生消机制 [J]. 中国环境科学, 2025,45(6):3245-3255.DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2025.0083.
Long L H, Huang Y B, Guan W H, et al. Mechanism of algal bloom formation and disappearance in Pengxi River of Three Gorges Reservoir driven by hydrodynamic processes [J]. China Environmental Science, 2025,45(6):3245-3255.DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2025.0083.

[11] Gao W Q, Zhang X X, Li Y Y, et al. Water quality and habitat drive phytoplankton taxonomic and functional group patterns in the Yangtze River [J]. Ecological Processes, 2024,13(1):144–158.

[12] 贺玉晓,买思婕,任玉芬,等.丹江口水库真核浮游藻类群落分布特征及其与环境因子的关系 [J]. 环境科学, 2022,43(11):5096-5105.DOI:10.13227/j.hjkx.202112135.
He Y X, Mai S J, Ren Y F, et al. Distribution characteristics of eukaryotic planktonic algae community and its relationship with environmental factors in Danjiangkou Reservoir [J]. Environmental Science, 2022,43(11):5096-5105.DOI:10.13227/j.hjkx.202112135.

[13] Jiang Z, Chen J, Zhou F, et al. Controlling factors of summer

phytoplankton community in the Changjiang (Yangtze River) Estuary and adjacent East China Sea shelf [J]. Continental Shelf Research, 2015,10171−84.

[14] 任　鹏,范中亚,杨忠勇,等.沿江城市中小型闸控通江湖泊总磷变化特征及成因分析——以安庆市石塘湖为例 [J]. 湖泊科学, 2023, 35(4):1359−1370.
Ren P, Fan Z Y, Yang Z Y, et al. Characteristics and causes of total phosphorus variation in small and medium−sized controlled lakes along the river—A case study of Shitang Lake in Anqing City [J]. Journal of Lake Sciences, 2023,35(4):1359−1370.

[15] Marañón E, Lorenzo M P, Cermeño P, et al. Nutrient limitation suppresses the temperature dependence of phytoplankton metabolic rates [J]. The ISME Journal, 2018,12(7):1836–1845.

[16] Qiu Y X, Fan Z Y, Feng H Y, et al. Estimation of phytoplankton community composition from satellite data using a fuzzy and probabilistic combination model in mountainous reservoirs: A case of Huating Lake in spring and summer [J]. Ecological Informatics, 2025, 89:103153.

[17] Yang S M, Ma Y T, Gao J, et al. Exploring the response and prediction of phytoplankton to environmental factors in eutrophic marine areas using interpretable machine learning methods [J]. Science of The Total Environment, 2024,951:175600.

[18] 郭诗君,王小军,韩品磊,等.丹江口水库叶绿素 a 浓度的时空特征及影响因子分析 [J]. 湖泊科学, 2021,33(2):366−376.
Guo S J, Wang X J, Han P L, et al. Spatial and temporal characteristics of chlorophyll a concentration and analysis of influencing factors in Danjiangkou Reservoir [J]. Journal of Lake Sciences, 2021,33(2): 366−376.

[19] 雷　波,刘朔孺,张方辉,等.三峡水库上游长寿湖浮游藻类的季节变化特征及关键环境影响因子 [J]. 湖泊科学, 2017,29(2):369−377.
Lei B, Liu S R, Zhang F H, et al. Seasonal variation characteristics of phytoplankton and key environmental influencing factors in Shouguang Lake upstream of Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Lake Sciences, 2017,29(2):369−377.

[20] 朱广伟,金颖薇,任　杰,等.太湖流域水库型水源地硅藻水华发生特征及对策分析 [J]. 湖泊科学, 2016,28(1):9−21.
Zhu G W, Jin Y W, Ren J, et al. Characteristics and countermeasures of diatom bloom in reservoir−type drinking water sources in Taihu Basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2016,28(1):9−21.

[21] 汪　星,李利强,郑丙辉,等.洞庭湖浮游藻类功能群的组成特征及其影响因素研究 [J]. 中国环境科学, 2016,36(12):3766−3776.
Wang X, Li L Q, Zheng B H, et al. Composition characteristics of phytoplankton functional groups and their influencing factors in Lake Dongting [J]. Chinese Environmental Science, 2016,36(12):3766−3776.

[22] O'Donnell D R, Briland R, Budnik R R, Ludsin S A, et al. Trends in Lake Erie phytoplankton biomass and community structure during a 20−year period of rapid environmental change [J]. Journal of Great Lakes Research, 2023,49(3):672–684.

[23] 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.

[24] 赵乐乐,耿志远,贺芷慧,等.汾河水库浮游植物种群变化及其与水环境因子的关系 [J]. 湿地科学, 2024,22(04):526−535.DOI:10.13248/j.cnki.wetlandsci.2024.04.006.
Zhao L L, Geng Z Y, He Z H, et al. Population changes of phytoplankton and their relationship with water environment factors in Fenhe Reservoir [J]. Wetland Science, 2024,22(4):526−535.DOI:10.13248/j.cnki.wetlandsci.2024.04.006.

[25] Wei J L, Li Q, Liu W, et al. Changes of phytoplankton and water environment in a highly urbanized subtropical lake during the past ten years [J]. Science of The Total Environment, 2023,879:162985.

[26] Zhang Y X, Yu H X, Liu J M, et al. Analysis of water quality and the response of phytoplankton in the low−temperature environment of Majiagou Urban River, China [J]. Heliyon, 2024,10(4):e25955.

[27] 言文杰,王晓辉,石先阳.基于 MIKE21 的大型湖库型饮用水水源保护区划分研究——以花亭湖水库为例 [J]. 环境污染与防治, 2021, 43(1):109−114,120.DOI:10.15985/j.cnki.1001−3865.2021.01.020.
Yan W J, Wang X H, Shi X Y. A study on the demarcation of drinking water source protection zones in large lakes and reservoirs based on MIKE21: A case study of Huating Lake Reservoir [J]. Environmental Pollution and Control, 2021,43(1):109−114,120.DOI:10.15985/j.cnki.1001−3865.2021.01.020.

[28] Isabwe A, Maguire T J, Stow C A, et al. Lake Erie summer chlorophyll phenology: a Bayesian additive regression trees comparison of growth and decay phases [J]. Water Research, 2025,282:123770.

[29] Badapalli P K, Nakkala A B, Gugulothu S. Spatiotemporal assessment of hydrological degradation prone zones in the semi−arid regions: A PCA−based evaluation using spectral indices in the Tungabhadra River Basin in Kurnool District of AP, India [J]. Journal of Environmental Management, 2025,392:126820.

[30] Jia J J, Gao Y, Zhou F, et al. Identifying the main drivers of change of phytoplankton community structure and gross primary productivity in a river–lake system [J]. Journal of Hydrology, 2020,583:124633.

[31] 杨保祥,徐绮雯,何丙辉,等.基于结构方程模型的三峡库区汉丰湖叶绿素 a 与其关键影响因子关系识别 [J]. 湖泊科学, 2024,36(3): 708−716.
Yang B X, Xu Q W, He B H, et al. Identification of the relationship between chlorophyll a and its key influencing factors in Hanfeng Lake of Three Gorges Reservoir area based on structural equation model [J]. Journal of Lake Sciences, 2024,36(3):708−716.

[32] Zhang X, Li Y, Zhao J, et al. Temporal dynamics of the Chlorophyll a−Total phosphorus relationship and algal production efficiency: Drivers and management implications [J]. Ecological Indicators, 2024, 158:111339.

[33] 孙文秀,武道吉,裴海燕,等.山东某新建水库浮游藻类的群落结构特征及其环境驱动因子 [J]. 湖泊科学, 2019,31(3):734−745.
Sun W X, Wu D J, Pei H Y, et al. Phytoplankton community structure and environmental factors in a newly built reservoir, Shandong Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2019,31(3):734−745.

[34] 东　阳.降雨和土地利用对流域非点源污染的影响——以滇池流域为例 [J]. 人民长江, 2018,49(14):24−33.DOI:10.16232/j.cnki.1001−4179.2018.14.005.
Dong Y. Effects of rainfall and land use on non−point source pollution in Dianchi watershed [J]. Yangtze River, 2018,49(14):24−33.DOI:10.

16232/j.cnki.1001-4179.2018.14.005.

[35] 金晓玥,范中亚,罗千里,等.枯丰水年闸控入海河流溶解氧时空分布特征及其驱动因素 [J/OL]. 中国环境科学, 1-13[2025-07-18]. https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20250114.011.
Jin X Y, Fan Z Y, Luo Q L, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of dissolved oxygen in a controlled river and its driving factors in wet and dry years [J/OL]. China Environmental Science, 1-13[2025-07-18].https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20250114.011.

[36] 金文龙,乐 晖.强降雨对昆承湖总磷浓度的影响分析 [J]. 环境保护科学, 2021,47(5):123-125+139.DOI:10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2021.05.020.
Jin W L, Le H. Analysis of the impact of heavy rainfall on total phosphorus concentration in Kuncheng Lake [J]. Environmental Protection Science, 2021,47(5):123-125,139.DOI:10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2021.05.020.

[37] 李付宽,郑剑锋,贾泽宇,等.海河干流天津段氮磷对浮游藻类生长的影响及动力学分析 [J]. 环境工程学报, 2017,11(2):959-964.
Li F K, Zheng J F, Jia Z Y, et al. Effects of nitrogen and phosphorus on the growth of phytoplankton in the Tianjin section of the Haihe River and kinetic analysis [J]. Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(2):959-964.

[38] Yang Y, Pan J Y, Han B P, et al. The effects of absolute and relative nutrient concentrations (N/P) on phytoplankton in a subtropical reservoir [J]. Ecological Indicators, 2020,115:106466.

[39] 李亚楠,李心月,康 莹,等.强降雨对密云水库水质及其浮游藻类群落结构的影响 [J]. 北京水务, 2024,(1):18-22.DOI:10.19671/j.1673-4637.2024.01.004.
Li Y N, Li X Y, Kang Y, et al. Effects of heavy rainfall on water quality and phytoplankton community structure in Miyun Reservoir [J]. Beijing Water, 2024,(1):18-22.DOI:10.19671/j.1673-4637.2024.01.004.

[40] 葛 优,周彦锋,王晨赫,等.阳澄西湖浮游藻类功能群演替特征及其与环境因子的关系 [J]. 中国环境科学, 2019,39(7):3027-3039.
Ge Y, Zhou Y F, Wang C H, et al. Succession characteristics of phytoplankton functional groups and their relationships with environmental factors in Yangcheng West Lake [J]. Chinese Environmental Science, 2019,39(7):3027-3039.

[41] Zhang Y, Yu H, Liu J, et al. Investigating the differences in driving mechanisms for phytoplankton community composition under various human disturbances in cold regions [J]. Journal of Cleaner Production, 2024,461142686.

[42] Patrícia N, Fabio R M A A, et al. responses of phytoplanktonic chlorophyll-a composition to inorganic turbidity caused by mine tailings [J]. Frontiers in Environmental Science, 2022,9.

[43] Chorus I, Spijkerman E. What Colin Reynolds could tell us about nutrient limitation, N: P ratios and eutrophication control [J]. Hydrobiologia, 2020,848(1):1-17.

[44] 周 妍,赵巧华,刘 鹏.垂向湍流扩散和光耦合对下沉藻增长的影响——基于内陆混浊湖泊(太湖)分析 [J]. 中国环境科学, 2019, 39(2):792-801.
Zhou Y, Zhao Q H, Liu P. Effects of vertical turbulent diffusion and light coupling on the growth of sinking algae—Analysis based on Taihu Lake, an inland turbid lake [J]. China Environmental Science, 2019,39(2):792-801.

作者简介: 董 江(2002-),男,江西抚州人,安徽大学硕士研究生,从事流域水生态环境治理研究.dongjiang0307@163.com.