

三峡水库汛期不同支流藻类群落结构特征及其影响因素

黄宇波¹,王旭¹,廖周伟¹,卢露¹,范向军¹,龙良红²,纪道斌²,米武娟³

(1.中国长江三峡集团有限公司 流域枢纽运行管理中心,湖北 宜昌 443133;2.三峡大学 三峡水库生态系统湖北省野外科学观测研究站,湖北 宜昌 443002;3.中国科学院 水生生物研究所,武汉 430072)

摘要:三峡水库运行后,开展库区藻类群落结构特征及其影响因素研究是深入认识三峡水库水华及防控的基础.为探究三峡水库汛期不同运行水位背景下的藻类群落结构及演替规律,于2021—2023年6至8月对香溪河、大宁河、小江藻类和环境因子进行了逐月调查.共检出藻类功能群15种,分别为M、H1、MP、S1、Y、LM、W1、C、D、TB、J、G、F、P、E,其中M功能群是各月共有的功能群.同一时期,3条支流库湾浮游藻类功能群高度一致,但不同支流库湾生物量差异较大,整体上由大到小依次为小江,香溪河,大宁河.汛期前期(6、7月)浮游藻类功能群以G和Y、M为主,后期(8月)以M功能群为主.水温及水位是影响浮游藻类功能群特征的重要因素;相比于水位绝对值,水位变幅对藻类密度影响较大,水位抬升幅度越大,藻类密度越低,证明通过水库调度保持动态水位对于缓解库湾水华具备可行性.

关键词:藻类功能群;汛期;水位;三峡水库

中图分类号:X524

文献标志码:A

文章编号:1000-2367(2025)06-0037-07

浮游植物群落结构特征是水生态环境状况的重要指标,当单一藻类在群落结构中占绝对优势,就会出现水华,因此水华现象是浮游植物群落结构失衡的表现.三峡水库支流库湾是水华敏感水域,水华优势藻种包括硅藻、隐藻、甲藻、蓝藻等多种类型^[1].三峡水库作为重要的生态功能区,研究浮游植物群落结构特征对于应对富营养化和水华风险具有重要意义.

浮游植物群落结构与营养盐、水温、光照和水动力条件密切相关.三峡库区氮、磷含量充足^[2],不是浮游植物生长的限制因素.水库较天然河流水速明显降低,特别是在支流库湾流速仅为厘米级^[3],有利于悬浮颗粒物沉积,水体透明度增加,春夏季,随着温度升高,太阳辐射增加,加上水体透光条件好,藻类生物量上升,局部水域容易暴发水华.汛期6至8月三峡水库水温在全年最高,藻密度增大,水华风险最高,同时汛期水库调度也成为藻类群落结构的重要影响因素.已有研究认为,水位变化通过稀释作用直接影响藻类分布^[4],或间接改变水体稳定性^[5]、水体混合度^[6]、营养盐^[7],来影响藻类群落结构.水位波动也影响水体混合层与真光层的深度^[8],从而决定藻类群落结构的演替.WANG等^[9]在香溪河调查发现,从生物量上讲,G、M、Lo功能群占优势,水位波动与许多理化变量有关,包括与水体稳定性和混合层深度显著相关,调度通过环境的变化筛选了藻类功能群.ZHU等^[10]对大宁河研究认为,水库水文变化导致的水体分层与混合决定了藻类功能群的演替.在香溪河的研究发现,水位不仅直接影响浮游植物功能群,也通过影响总氮、透明度、高锰酸盐指数、电导率、pH值等对浮游植物优势功能群及生物量产生显著影响^[11].然而,由于年内水库运行周期与季节变化

收稿日期:2024-07-03;**修回日期:**2024-09-29.

基金项目:水利部重大科技项目(SKS-2022077);长江水科学联合基金(U2040220).

作者简介(通信作者):黄宇波(1990—),男,湖北宜昌人,中国长江三峡集团有限公司高级工程师,博士,研究方向为水库生态环境监测与管理,E-mail:yubo618@163.com.

引用本文:黄宇波,王旭,廖周伟,等.三峡水库汛期不同支流藻类群落结构特征及其影响因素[J].河南师范大学学报(自然科学版),2025,53(6):37-43.(Huang Yubo,Wang Xu,Liao Zhouwei,et al.Characteristics and influencing factors of phytoplankton functional groups in different tributaries of the Three Gorges Reservoir during flood season[J].Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition),2025,53(6):37-43.DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2024.07.03.0001.)

重叠,藻类动态受季节气候和水位变动双重影响,难以辨别调度的单一影响.

2021 年汛期各月份控制水位与往年相似,而 2022 年长江流域遭遇极端枯水,来水量偏低,汛期水位偏低,2023 年 6 至 8 月汛期三峡控制水位较往年偏高.为进一步厘清水库运行对藻类群落结构的影响,于 2021—2023 年 6 至 8 月对香溪河、大宁河、小江藻类和环境因子进行了逐月调查,分析水华易发时段不同水位背景下藻类群落结构特征及其影响因素,探究控制藻类水华的水库调度策略及内在机制,分析藻类功能群和水环境因子、水库调度的关系,为采取调度措施应对藻类水华风险提供依据.

1 材料与方法

1.1 采样点

本研究选取三峡水库北岸 3 条一级支流香溪河、大宁河、小江作为研究对象,在香溪河河口至平邑口设置 6 个采样点(XX01-XX06),大宁河设置水口(SK)、大昌(DC)、熊猫洞(XMD)上中下游 3 个采样点,小江设置河口(XJ)、黄石镇(HS02、HS01)、高阳镇(GY02、GY01)、渠马镇(QM02、QM01)共 7 个采样点,如图 1 所示.

1.2 数据采集

本研究现场采集数据包括三峡水库汛期坝前水位,各支流库湾水体理化参数(水温、pH、电导率、溶解氧、透明度、浊度等)、水质指标(总氮 TN、总磷 TP、化学需氧量 COD 等),以及库湾浮游藻类生物量、优势种和叶绿素 *a* 等,监测时间为 2021—2023 年 6 至 8 月.藻类采集与鉴定方法参照文献[12—13],并根据 REYNOLDS 等^[14]和胡昉等^[15]提出的方法对浮游藻类功能群进行划分.水体水质指标测定方法参照《水和废水监测分析方法》^[16].

1.3 分析方法

采用 ANOVA 方差分析比较不同年份汛期 6 至 8 月的水环境差异,用 Pearson 相关性分析探讨支流库湾理化因子与水位的关系,用 Mantel 检验比较年际间藻类群落结构差异,并用 RDA 分析不同环境因子对藻类功能群的影响.方差分析、相关性分析在 SPSS 13.0 中完成,Mantel 利用 R 中“ade4 包”完成,路径分析用 R 中“plspm 包”完成.RDA 分析在 Canoco 5.0 中完成.

2 结果

2.1 水库水位调度特征

2021—2023 年 6 月平均水位分别为 146.52、146.43、151.09 m,7 月的平均水位分别为 147.54、147.59、153.32 m,8 月的平均水位分别为 147.62、146.74、157.79 m.如图 2(a)所示,分组检验表明 2023 年水位显著高于 2021、2022 年($F=186.83, P<0.01$),2021、2022 年 6 至 8 月水位差异不大,除了 2021 年 8 月下旬提前蓄水水位快速上涨至 155 m 以外,其他时段水位基本维持在 145~150 m.2023 年 6 至 8 月水位逐月升高,8 月份长期维持在约 160 m.

利用当日水位与前一日水位的差值计算水位日变幅,负值表示水位消落,正值表示水位抬升,本研究通过取水位日波动的绝对值计算汛期水位日波动累积值,如图 2(b)所示.2021—2023 年汛期水位日波动累积从大到小依次为 2021 年,2023 年,2022 年.其中 3 年间 6 月的累积日波动趋于一致,增长较为平缓,说明 6 月库湾水位相对 7 至 8 月较为稳定,从 8 月中旬开始差异逐渐增大,尤其是 2021 年 7 月中旬和 8 月底经历了 2 次较大的水位变化.相对而言,2021 年 6 至 8 月平均水位日波动依次为 0.34、0.68、0.64 m/d;2022 年 6 至

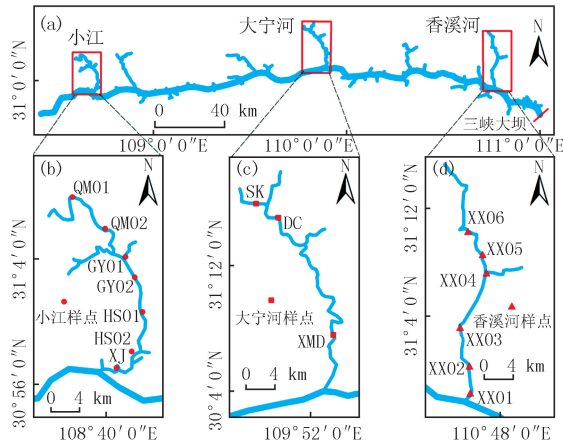


图1 三峡水库3条典型支流的位置及样点布置

Fig.1 Locations of three tributaries in TGR and sample sites

8 月平均水位日波动依次为 0.38、0.27、0.27 m/d;2023 年 6 至 8 月平均水位日波动依次为 0.28、0.56、0.43 m/d.

2.2 库湾水环境特征

2021—2023 年 6 至 8 月支流库湾水环境月平均特征见附录表 S1.2021—2023 年汛期 6、7、8 月水温整体成上升趋势(除了 2021 年 7 月),年际间有显著差异($P < 0.01$),相比而言 2021 年 7、8 月水温显著低于 2022、2023 年.2021 年 6 月 pH 值最高达到 9,2023 年 7 月 pH 值最低为 7.62,整体上库湾水体呈弱碱性.2022 年 8 月溶解氧

(DO)质量浓度最高,2023 年 8 月质量浓度最低.汛期支流库湾水体浊度整体上由大到小依次为:2021 年,2022 年,2023 年.年际间有显著差异($P < 0.01$).其中 2021 年 7 月最高,达到 58.15 NTU.统计检验显示,水位与浊度显著负相关,与 TP 质量浓度显著正相关($P < 0.01$, $N = 152$).支流库湾水体 TN 和 TP 水平年际间变化不大,TN 在 $1.23 \sim 2.98 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,TP 在 $0.10 \sim 0.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

2.3 藻类群落结构

2021—2023 年夏季 3 条支流库湾藻类生物量整体上空特征由大到小依次为:小江,香溪河,大宁河,时间特征为:2021 年大于 2022 年,2022 和 2023 年相似,不同月份之间差异显著(图 3).2021 年小江藻类密度峰值集中于高阳镇-河口段(GY01-XJ),上游渠马河段(QM01-QM02)藻密度极低,而 2021 年 7、8 月份小江藻类生物量很低.2022、2023 年小江 GY02-XJ 段细胞密度略高于 QM01、QM02,藻密度总体上接近但优势种有一定差异,2022 年汛期小江蓝藻占绝对优势,2023 年表现为蓝藻、硅藻并存(图 4).

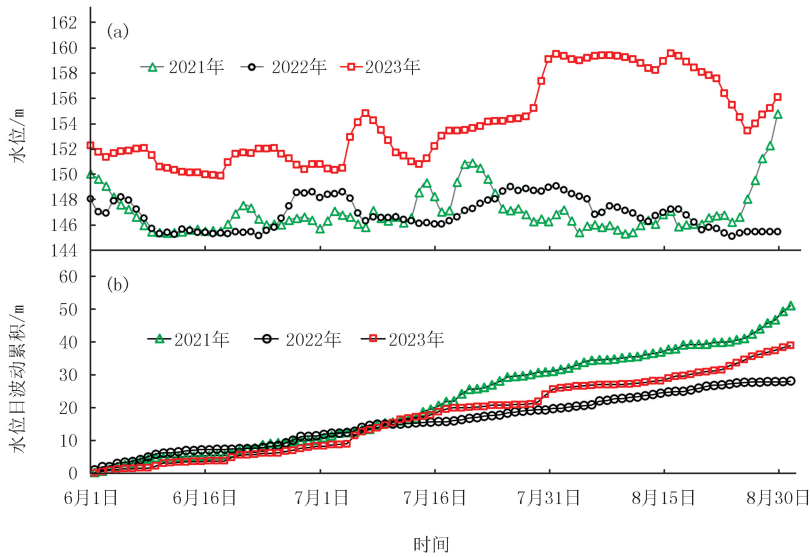


图2 2021-2023年6至8月水位与入库流量(a)和累积水位日变幅(b)
Fig.2 Water level and inflow from June to August 2021 to 2023(a) and daily variation of cumulative water level(b)

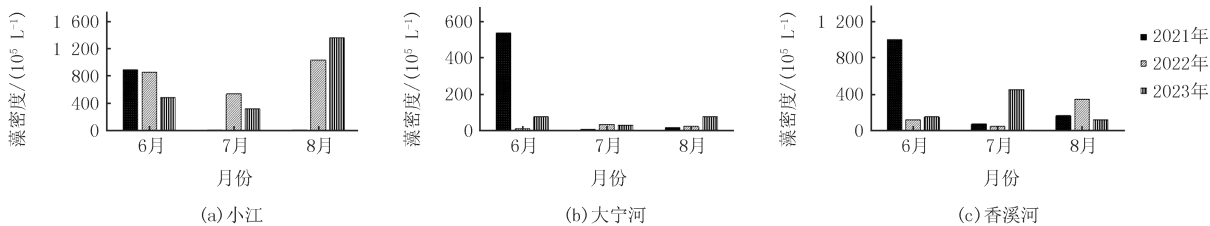


图3 藻细胞密度
Fig.3 Temporal distribution of cell density

2021 年汛期香溪河库湾藻密度时空差异显著,越靠近上游藻密度越高,XX06 河段达到 $3 \times 10^8 \text{ L}^{-1}$,绿藻占绝对优势;2022 年香溪河藻密度为 $1.10 \times 10^7 \sim 2.90 \times 10^7 \text{ L}^{-1}$,空间差异不大;2023 年香溪河藻密度为 $6.81 \times 10^6 \sim 7.30 \times 10^7 \text{ L}^{-1}$,藻密度呈现上游(XX04-XX06)高于下游(XX01-XX03),并且空间上优势种不同,从下游至上游优势种表现为从硅藻向蓝藻-绿藻过渡(图 4).

2021 年 6 月大宁河下游河段(XMD)浮游藻类生物量相对较高,达到 10^8 L^{-1} ,且优势种为绿藻;而 2022、2023 年藻密度很低,时空特征不明显(图 3).

2021—2023 年 6 至 8 月共鉴定出藻类功能群 15 种(表 1),分别为 M、H1、MP、S1、Y、LM、W1、C、D、TB、J、G、F、P、E.各月均出现的藻类功能群为 M、H1、MP、Y、C、D、J、G,共有功能群藻类密度之和占所检出藻类总密度的 90%以上,包括蓝藻门、硅藻门、绿藻门、隐藻门(图 5).Mantel 分析显示,年际间藻类群落结构

存在显著差异($P<0.001$), 2021 年 6 至 8 月主要藻类功能群变化过程为 G、M、H1→Y、C、M、G→M、Y、J; 2022 年 6 至 8 月主要藻类功能群变化过程为 M、G、H1→M、H1、G→M、H1; 2023 年 6 至 8 月主要藻类功能群变化过程为 C、Y、M、G→C、M→M、H1.

2.4 浮游植物与环境因子的关系

藻类密度按照 $\lg(x+1)$ 转化, DCA 分析特征根长度 $SD=2.8<4$, 采用 RDA 分析. 运用向前逐步筛选法确定水温、水位、浊度、透明度、细胞密度、化学需氧量、电导率是具有显著解释度的影响因素. 第 1、2 排序轴特征值分别为 0.127 5、0.046 9. 水温、水位、浊度对藻类群落结构的影响排名前三, 其中以蓝藻为代表的 M、H1 等功能群与水温正相关, MP、J、D 等藻类功能群与水位正相关; 浊度与水位负相关, 与藻密度负相关. 2021—2023 年 6 至 8 月藻类月平均细胞密度与水位日变幅呈负相关关系($F=4.84, P=0.06$)(图 6(a)).

路径分析表明, 水动力和理化环境共同影响藻类群落结构, 水动力的影响强度为 0.28, 理化环境的影响强度为 0.48, 水温、浊度、透明度在理化环境因子中的载荷最大, 分别为 0.93、-0.69 和 0.32.

表 1 监测水域主要浮游植物功能群分组

Tab. 1 Dominant functional group composition of phytoplankton in the study area							
功能群	代表种(属)	代表种(门)	生境特征	功能群	代表种(属)	代表种(门)	生境特征
M	微囊藻	蓝藻	富营养、超富营养, 中小型水体	C	小环藻	硅藻	混合、富营养、中小型水体
H1	长胞藻、束丝藻	绿藻、蓝藻	富营养、分层、含氮低、浅水	D	针杆藻、脆杆藻	硅藻	含有营养盐、浑浊
MP	假鱼腥藻	蓝藻	搅动、浑浊、浅水	J	珊藻、盘星藻	红藻、绿藻	中营养、富营养、分层
Y	隐藻	隐藻	静水环境	G	实球藻、空球藻	绿藻	富营养、停滞水体

3 讨 论

浮游植物功能群是将一个生态系统内具有相似结构特征的种类归为一个类群, 从而尽可能多的捕捉到浮游植物群落的变化情况, 也反映了浮游植物所处水体生态环境的状况^[15], 因此本研究中浮游植物功能群结构特征反映了不同调度期水库的水环境特征. 监测结果显示汛期的 TN 和 TP 均超过了国际公认的水体富营养化临界值(TN 0.2 mg/L 和 TP 0.02 mg/L), 2021—2023 年 6 至 8 月藻类群落中, M、G、C 是各月共有功能群, 这些功能群主要偏好生长于富营养水体中(表 1). 虽然调查水体的总环境特征趋于一致, 但不同年份功能群组成呈现一定差异, 不同支流库湾生物量差异较大(图 3). 例如, 2021 年 6 月 G 功能群占优势, 7 月 Y、C、M、G 等功能群共存, 8 月演替为 M 功能群占绝对优势. 相比而言, 6、7 月三峡水库水位较低, 无洪水时主要为静水环境, 适宜 G、Y、C 功能群的生长, 功能群组成与

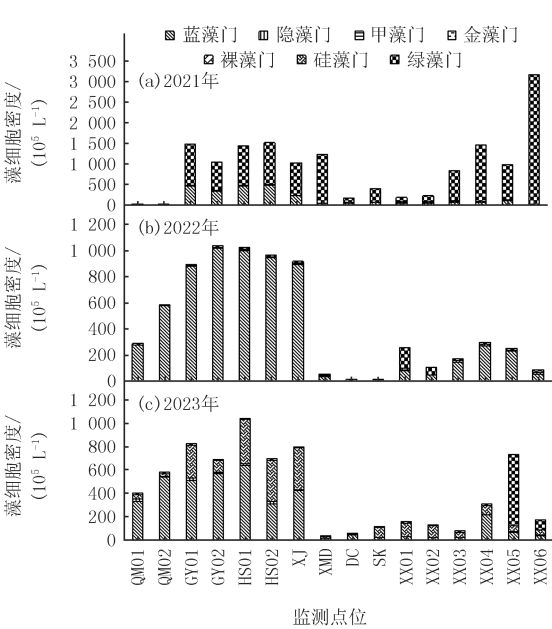


图4 2021—2023年不同采样点藻类细胞密度
Fig.4 Spatio distribution of cell density at different sites from 2021 to 2023

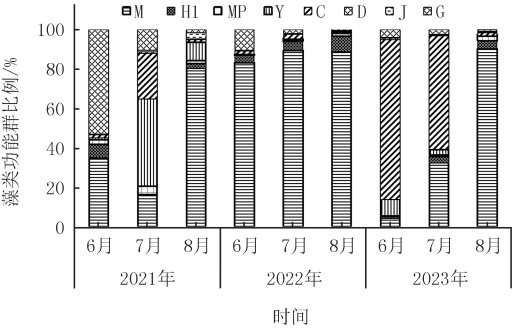
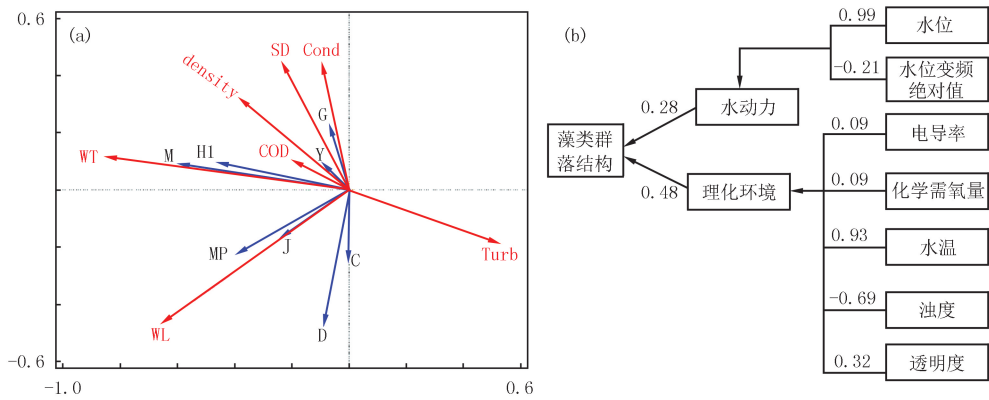


图5 浮游植物主要功能群时间变化
Fig.5 Temporal distribution of phytoplankton functional group from June to August in 2021-2023

藻类的生长特征相关,以蓝藻、隐藻为优势类群所在的功能群能更高效地利用夏季有限资源^[17],8 月水温高更适宜 M 功能群.2023 年 6、7 月 C 功能群占比较大,C 功能群适宜在混合水体中生长(表 1),对水体分层较敏感,而 2022 年同期 M 功能群占比大(图 5),这可能是因为 2023 年水位日波动高于 2022 年(图 2(b)),使得 2023 年同期水体混合度较 2022 年高,因此更适宜 C 功能群占优势.综合比较,2021、2022 年 6 至 7 月浮游植物功能群以 G 和 Y、M 为主,2023 年 6 至 7 月以 C 功能群为主,说明在相同程度的水位波动前提下,高水位背景更有利于 C 功能群(硅藻)生长.



注:水温(WT)、水位(WL)、浊度(Turb)、透明度(SD)、细胞密度(density)、化学需氧量(COD)、电导率(Cond).

图6 浮游植物功能群与环境因子RDA分析(a)与路径分析(b)

Fig.6 RDA analysis(a)and path analysis(b) of dominant phytoplankton functional groups and environmental factors

水体理化因子和水位变化共同影响了藻类群落结构(图 6(b)).RDA 分析表明水温是最重要的环境因子(图 6(a)).以微囊藻为主的功能群最适生长温度在 25 ℃ 以上,而硅藻、绿藻的最适生长温度低于蓝藻^[18].本研究中 2021 年汛期(6 月)绿藻占绝对优势,2022 年蓝藻占绝对优势,2023 年以蓝藻为主,硅藻并存(硅藻占优出现在 6、7 月,蓝藻占优出现在 8 月).2021 年 7、8 月降雨显著高于 2022、2023 年,这也导致同期水温最低、浊度最高(附录表 S1),从而抑制了藻类生长.2022 年 6 至 8 月各月水温普遍偏高(高于 2021、2023 年),这可能是导致 2022 年整个汛期蓝藻占绝对优势的主要原因.2023 年 6、7 月水温相对偏低,以小环藻为主的硅藻(功能群 C)占优,8 月水温升高之后逐渐演替为蓝藻(功能群 M)占优.以小环藻、针杆藻为主的硅藻群与水体浊度相关关系不明显,而其余类群与水体浊度呈负相关关系,浊度越大水体光强越弱,而且水温也相对偏低,不利于蓝、绿藻增殖.

研究期间 J、C、D、MP 等类群藻类生物量与水位正相关,说明水位波动改变了藻类群落结构(图 6(a)),类似研究也发现水位波动可以使藻类群落优势种从蓝藻演替为硅藻和绿藻,藻类多样性增加,这可能与水位波动引起的水流扰动有关^[19];同时水位也会影响其他环境因子,RDA 显示,水位与浊度、透明度、电导率呈负相关关系(图 6(a)),实测数据表明,水位与库湾流速呈反比^[19],说明水位抬升,库湾水流流速减缓,有利于颗粒物沉降,使水体浊度降低、透明度上升,水体光照的变化决定了藻类功能群的分布,电导率与水体无机盐浓度密切相关^[20],研究时段内水位升高降低了无机盐离子浓度,有利于喜静水和富营养的绿藻、隐藻类功能群占优势(图 6(a))^[21].

水位变幅是影响藻类群落结构的重要因素(图 6(b)),2023 年 8 月三峡水库水位高于 2022 年,但水位日变幅相似,8 月细胞密度相似,2021 年 8 月累积水位日变幅明显高于 2022、2023 年同期(图 2(b)),2021 年藻密度显著低于 2022、2023 年.历史统计数据表明,水位抬升阶段,抬升幅度达到 0.5 m/d,抬升时长不低于 5 d,叶绿素 a 下降的概率大^[22].而在其他水库的研究也证明了水位日变幅与藻密度的关联,例如,在福建某水库的研究中也发现:水位日变幅高于 2 m/月以上,能将藻类生物量控制在较低水平,且水位降低更容易诱发蓝藻水华^[23].其他学者在三峡水库的研究中也提出,水位日变幅与叶绿素 a 具有较好的相关性,水位上升或者下降均能降低叶绿素 a,但上升抑制藻类水华的效果更明显^[24].三峡水库各支流普遍存在因干支流温差和密度差引起的分层异重流,汛期水位变动增大了水体扰动,造成混合层与真光层的比例发生变化,打破了

水体分层异重流^[3],不利于藻类生长聚集,并且随着三峡水库水位变动幅度的增大,在支流形成较大范围的环流模式^[25],干支流水体交换增强,由于水库浮游植物迁移随机过程占主导,水库调度会加速浮游植物周转,造成藻类生物量降低^[26],本研究进一步证实相比于水位绝对值,水位变幅对藻密度的影响更显著,大水位日变幅有利于降低藻类细胞密度.

4 结 论

水温和水位变动驱动了藻类群落结构差异,2021 年汛期绿藻占绝对优势,2022 年高温和枯水使整个汛期蓝藻都占绝对优势,2023 年则以蓝藻为主但硅藻并存(硅藻占优出现在 6、7 月,蓝藻占优出现在 8 月).年际间的不同运行水位及变幅差异改变了藻类功能群结构,在 2023 年高水位运行下,研究水域由以蓝、绿藻为主的 G、M 功能群向以硅藻、蓝藻为主的 C、M 功能群转变.相比于水位绝对值,水位变幅对藻类密度影响较大,水位抬升幅度越大,藻类密度越低,说明通过水库调度保持动态水位能够缓解库湾水华.

附录见电子版(DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2024.07.03.0001).

参 考 文 献

[1] 姚金忠,范向军,杨霞,等.三峡库区重点支流水华现状、成因及防控对策[J].环境工程学报,2022,16(6):2041-2048.
YAO J Z,FAN X J,YANG X,et al.Current situation,causes and control measures of water bloom in the key tributaries of the Three Gorges Reservoir[J].Chinese Journal of Environmental Engineering,2022,16(6):2041-2048.

[2] HUANG Y L,ZHANG P,LIU D F,et al.Nutrient spatial pattern of the upstream,mainstream and tributaries of the Three Gorges Reservoir in China[J].Environmental Monitoring and Assessment,2014,186(10):6833-6847.

[3] 黄林显,张明芳,钱永,等.三种水质动态预测模型在米山水库的应用与结果对比[J].灌溉排水学报,2023,42(11):140-144.
HUANG L X,ZHANG M F,QIAN Y,et al.Comparison of Three Models for Predicting Water Quality in Mishan Reservoir[J].Journal of Irrigation and Drainage,2023,42(11):140-144.

[4] STEVIĆ F,MIHALJEVIĆ M,ŠPOLJARIĆ D.Changes of phytoplankton functional groups in a floodplain lake associated with hydrological perturbations[J].Hydrobiologia,2013,709(1):143-158.

[5] CUI G Y,WANG B L,XIAO J,et al.Water column stability driving the succession of phytoplankton functional groups in karst hydroelectric reservoirs[J].Journal of Hydrology,2021,592:125607.

[6] BECKER V,HUSZAR V L M,CROSSETTI L O.Responses of phytoplankton functional groups to the mixing regime in a deep subtropical reservoir[J].Hydrobiologia,2009,628(1):137-151.

[7] HE W,FENG S Y,BI Y H,et al.Influences of water level fluctuation on water exchange and nutrient distribution in a bay:Evidence from the Xiangxi Bay,Three Gorges Reservoir[J].Environmental Research,2023,222:115341.

[8] YANG Z J,WEI C Y,LIU D F,et al.The influence of hydraulic characteristics on algal bloom in Three Gorges Reservoir,China;a combination of cultural experiments and field monitoring[J].Water Research,2022,211:118030.

[9] WANG L,CAI Q H,XU Y Y,et al.Weekly dynamics of phytoplankton functional groups under high water level fluctuations in a subtropical reservoir-bay[J].Aquatic Ecology,2011,45(2):197-212.

[10] ZHU K X,BI Y H,HU Z Y.Responses of phytoplankton functional groups to the hydrologic regime in the Daning River,a tributary of Three Gorges Reservoir,China[J].Science of The Total Environment,2013,450:169-177.

[11] 方灵超,任玉峰,毕永红,等.三峡水库香溪河库湾浮游植物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.Responses of phytoplankton functional groups to water level fluctuations in the Xiangxi Bay,Three Gorges Reservoir[J].Journal of Lake Sciences,2023,35(5):1538-1548.

[12] 胡鸿钧,魏印心.中国淡水藻类:系统、分类及生态[M].北京:科学出版社,2006.

[13] 章宗涉,黄祥飞.淡水浮游生物研究方法[M].北京:科学出版社,1991.

[14] REYNOLDS C S,HUSZAR V,KRUK C,et al.Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton[J].Journal of Plankton Research,2002,24(5):417-428.

[15] 胡韧,蓝于倩,肖利娟,等.淡水浮游植物功能群的概念、划分方法和应用[J].湖泊科学,2015,27(1):11-23.
HU R,LAN Y Q,XIAO L J,et al.The concepts,classification and application of freshwater phytoplankton functional groups[J].Journal of Lake Sciences,2015,27(1):11-23.

[16] 国家环境保护总局,水和废水监测分析方法编委会编.水和废水监测分析方法[M].4 版.北京:中国环境科学出版社,2002.

[17] 赵璐,欧阳添,纪璐璐,等.三峡水库蓄水对支流浮游植物功能群的影响及与资源利用效率的关系[J].环境科学,2023,44(2):857-867.

ZHAO L,OUYANG T,JI L L,et al.Impounding impacts of the Three Gorges Reservoir on phytoplankton function groups and its relationship with resource use efficiency[J].Environmental Science,2023,44(2):857-867.

[18] 惠天翔,谢平,过龙根,等.洋河水库浮游植物组成及优势种演替规律研究[J].水生生物学报,2015,39(3):524-532.

HUI T X,XIE P,GUO L G,et al.Study on phytoplankton community and the succession of dominant species in the Yanghe reservoir[J].Acta Hydrobiologica Sinica,2015,39(3):524-532.

[19] LI Y,FANG L C,CAO G R,et al.Reservoir regulation-induced variations in water level impacts cyanobacterial bloom by the changing physiochemical conditions[J].Water Research,2024,259:121836.

[20] 李磊,张莹,陈宁,等.大庆龙凤湿地浮游植物功能类群季节变化及其驱动因子[J].生态学杂志,2021,40(9):2850-2859.

LI L,ZHANG Y,CHEN N,et al.Seasonal variations and driving factors of phytoplankton functional groups in the Longfeng wetland, Daqing City[J].Chinese Journal of Ecology,2021,40(9):2850-2859.

[21] 苏新然,于潘,尤庆敏,等.三峡库区浮游植物群落结构特征及水生生态评价[J].湖泊科学,2023,35(2):493-507.

SU X R,YU P,YOU Q M,et al.Phytoplankton community structure and water ecological assessment in the Three Gorges Reservoir[J].Journal of Lake Sciences,2023,35(2):493-507.

[22] 刘德富,黄钰铃,纪道斌,等.三峡水库支流水华与生态调度[M].北京:中国水利水电出版社,2013.

[23] YANG J,LV H,YANG J,et al.Decline in water level boosts cyanobacteria dominance in subtropical reservoirs[J].Science of The Total Environment,2016,557:445-452.

[24] YE L,TAN L,WU X H,et al.Nonlinear causal analysis reveals an effective water level regulation approach for phytoplankton blooms controlling in reservoirs[J].Science of The Total Environment,2022,806:150948.

[25] JI D B,WELLS S A,YANG Z J,et al.Impacts of water level rise on algal bloom prevention in the tributary of Three Gorges Reservoir, China[J].Ecological Engineering,2017,98:70-81.

[26] PENG C R,ZOU W X,LI D H,et al.Distinct effects of sediment regulation on phytoplankton community assembly in the tributaries and mainstream of the Three Gorges Reservoir[J].Journal of Cleaner Production,2022,368:133082.

Characteristics and influencing factors of phytoplankton functional groups in different tributaries of the Three Gorges Reservoir during flood season

Huang Yubo¹, Wang Xu¹, Liao Zhouwei¹, Lu Lu¹, Fan Xiangjun¹, Long Lianghong², Ji Daobin², Mi Wujuan³

(1. River Basin Complex Administration Center, China Three Gorges Co., Ltd., Yichang 443133, China; 2. Hubei Provincial Field Scientific Observation and Research Station of Three Gorges Reservoir Ecosystem, Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China)

Abstract: After the impoundment of the Three Gorges Reservoir(TGR), the study on the characteristics and influencing factors of phytoplankton functional group(PFG) in reservoir is the basis for further understanding and controlling the algae bloom in TGR. To explore the structure and succession rules of the algae community under different operational water levels during the flood season in TGR, monthly surveys of algae and environmental factors in Xiangxi River, Daning River and Xiaojiang River were conducted from June to August 2021—2023. A total of 15 species of PFG were detected, which were M, H1, MP, S1, Y, LM, W1, C, D, TB, J, G, F, P, E, and M functional group were common in each month. During the same period, the functional groups of planktonic algae in the reservoirs of the three tributaries were highly consistent, but the biomass in the reservoirs of different tributaries varied significantly. Generally speaking, from the largest to the smallest, they were: Xiaojiang River, Xiangxi River, and Daning River. The PFGs are mainly G, Y and M in early flood season(June and July), and turned into M functional group in later period(August). The algal community was affected by the water temperature and water level. Compared with the absolute water level, the variation of water level has a greater effect on algal density. The larger rise of water level, the lower the algal density, which proves that it is feasible to alleviate the water bloom in the tributary bay through reservoir operation.

Keywords: phytoplankton functional group; flood season; water level; Three Gorges Reservoir

表 S1 2021—2023 年 6 至 8 月期间主要水质指标均值($\bar{x}\pm\text{SD}$)
Tab. S1 Mean value of water quality from June to August during 2021—2023

年份	月份	水温/℃	pH	$\rho_{\text{溶解氧}}/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	浊度/NTU	电导率/ ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	$\rho_{\text{TN}}/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\rho_{\text{TP}}/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\rho_{\text{叶绿素}a}/$ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
2021	6 月	25.53±2.07	9.04±0.22	10.58±13.81	15.58±15.00	341.12±44.54	2.15±0.63	0.21±0.19	50.14±49.33
	7 月	22.57±2.13	8.20±0.24	8.61±1.19	58.15±61.18	311.37±54.58	1.94±0.47	0.14±0.07	11.54±14.28
	8 月	27.25±2.70	8.32±0.26	7.63±1.75	16.15±35.63	346.41±38.96	2.27±0.58	0.11±0.10	10.93±9.08
2022	6 月	25.90±1.92	8.18±0.12	7.79±0.48	11.51±11.37	344.57±30.18	1.87±0.52	0.14±0.10	19.25±15.87
	7 月	29.03±2.49	8.43±0.36	10.95±2.93	14.57±20.58	363.40±41.74	2.98±0.37	0.10±0.06	11.28±14.70
	8 月	31.24±1.49	8.87±0.50	13.18±4.59	11.39±15.36	339.39±44.30	1.23±0.40	0.14±0.10	43.19±55.92
2023	6 月	24.02±1.84	8.04±0.55	7.12±0.81	4.57±3.94	357.25±68.43	1.83±1.39	0.24±0.03	20.51±13.00
	7 月	27.70±1.77	7.62±0.31	6.72±0.97	3.10±3.01	321.02±48.79	2.03±0.43	0.15±0.05	17.27±10.93
	8 月	31.22±1.34	8.72±0.39	6.33±0.81	0.58±0.65	296.86±51.99	2.97±0.59	0.17±0.03	19.13±14.02