

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2025.06.026

鄂北工程对封江口水库浮游植物组成影响

肖 洋¹,刘金珍¹,陈 诺²,王中敏¹,翟红娟¹,宋宏炎¹

(1.长江水资源保护科学研究所,湖北 武汉 430051; 2.鄂北地区水资源配置工程建设与管理局(筹),湖北 武汉 430062)

摘要:通过丰、平、枯水期浮游植物采样与监测,分析了封江口水库浮游植物组成结构特征与多样性水平;采用对比分析法和均匀混合模型,探究了丹江口水库与封江口水库浮游植物群落组成差异,并预测了鄂北工程实施后封江口水库浮游植物密度变化情况。结果表明,封江口水库浮游植物优势种共 17 种,隶属于蓝藻门、绿藻门、硅藻门和隐藻门,并以蓝藻门为优势;浮游植物密度在时间和空间上具有较明显的差异性,枯水期各采样点总密度平均值高达 5 155 万个/L,显著高于其他时期;不同时期,封江口河、小黄家塆优势藻门总密度均显著高于其他采样点,是封江口水库藻类异常增殖需重点关注的区域,且封江口水库浮游植物种数均显著高于丹江口水库,多样性水平也优于丹江口水库;丹江口水库浮游植物总密度隐藻门占据优势;鄂北工程实施可对封江口水库藻类密度起到一定的调节作用,但封江口水库逐月总氮质量浓度将升高 40%~130%,8—11 月总磷质量浓度将升高 10%~30%。建议将 8 月、9 月、11 月列为重点关注时段,避免营养盐增加引发浮游植物优势种异常繁殖,进而导致富营养化风险。

关键词:引调水工程;浮游植物;富营养化;封江口水库;鄂北工程

中图分类号:P964;TV67 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)06-0239-12

Influence of the Northern Hubei Project on phytoplankton composition of the Fengjiangkou Reservoir//XIAO Yang¹, LIU Jinzhen¹, CHEN Nuo², WANG Zhongmin¹, ZHAI Hongjuan¹, SONG hongyan¹ (1. Changjiang Water Resources Protection Institute, Wuhan 430051, China; 2. Construction & Management Bureau of North Hubei Water Transfer Project, Wuhan 430062, China)

Abstract: Taking the Fengjiangkou Reservoir as research area, sampling and monitoring of phytoplankton were carried out during the flood, normal and dry seasons to analyze the composition structure characteristics and diversity level. By using the comparative analysis method and the uniform mixing model, the differences in phytoplankton community composition between the Danjiangkou Reservoir and Fengjiangkou Reservoir were explored, and the changes in phytoplankton density in the Fengjiangkou Reservoir after the implementation of the North Hubei Project were predicted. The results showed that there were 17 dominant species of phytoplankton in the Fengjiangkou Reservoir, belonging to Cyanophyta, Chlorophyta, Bacillariophyta and Cryptophyta, with Cyanophyta being the dominant one. The density of phytoplankton showed significant differences in time and space. The average total density of all sampling points in the dry season was as high as 51.55 million cells/L, which was significantly higher than that in other periods. In different periods, the total density of dominant algal phyla in the Fengjiangkou River and Xiaohuangjiapang was significantly higher than that in other sampling points, which were the areas that needed to be focused on for abnormal proliferation of algae in the Fengjiangkou Reservoir. The number of phytoplankton species in the Fengjiangkou Reservoir was significantly higher than that in the Danjiangkou Reservoir, and the diversity level was also better than that in the Danjiangkou Reservoir. In the Danjiangkou Reservoir, the total density of phytoplankton was dominated by Cryptophyta. The implementation of the North Hubei Project could play a certain regulatory role in the density of algae in the Fengjiangkou Reservoir. However, after the implementation of the project, the total nitrogen mass concentration in the Fengjiangkou Reservoir increased by 40% to 130% month by month, and the total phosphorus mass concentration increased by 10% to 30% from August to November. It is suggested that August, September and November be listed as key monitoring periods to avoid abnormal reproduction of dominant phytoplankton species due to increased nutrients, which may lead to the risk of eutrophication.

Key words: water diversion project; phytoplankton; eutrophication; the Fengjiangkou Reservoir; the Northern Hubei Project

基金项目:国家自然科学基金项目(52109005)
作者简介:肖洋(1989—),男,高级工程师,博士,主要从事水环境模拟研究。E-mail:xiaoyang198990@outlook.com

我国水资源时空分布不均,且水资源分布与经济社会发展布局不匹配的问题较为突出。通过实施引调水工程,调配部分丰水地区水资源以满足缺水地区发展需求,是解决我国水资源矛盾、促进经济社会可持续发展的重要举措^[1-2]。

湖北省鄂北地区水资源配置工程(以下简称鄂北工程)以丹江口水库为水源,起点为清泉沟输水隧洞进口,自西北向东南穿越鄂北岗地,终点位于湖北省孝感市大悟县城附近的王家冲水库。工程输水线路总长约270 km,受水区面积约1万 km²,涉及襄阳市、随州市、孝感市3个市7个县(市、区),是湖北省水利建设史上工程规模最大、覆盖范围最广、受益人口最多的民生工程。为保障水资源配置的灵活性,鄂北工程将输水线路中下段的已建大型水库——封江口水库设为在线调节水库。该水库既是湖北省县级以上饮用水水源地,同时承担着鄂北工程供水范围中下游约200万人的供水任务。封江口水库汇水区域属于浅丘岗地,区域内无城镇及工业企业分布,但沙河店河、封江口河等主要入库支流两侧分布有约4万 hm²耕地。灌溉期内,农田氮磷污染物会随着降雨径流进入库湾区域,可能引发水体富营养化,对库区水质构成威胁并影响区域饮水安全。

富营养化是指水体中氮、磷等营养物质富集,导致藻类及其他浮游生物大量繁殖的现象,会造成水体溶解氧下降、水质恶化,是影响地表水水环境安全的主要问题^[3]。当前引起水体富营养化的藻类主要有蓝藻、绿藻和硅藻。其中河流以硅藻引起的富营养化为主(如汉江^[4]);湖库则以蓝藻、绿藻引发的富营养化为主(如巢湖蓝藻^[5]、太湖蓝藻^[6]、滇池蓝藻^[7]、长湖绿藻^[8]等)。不同区域藻类异常增殖的驱动因子存在差异,例如太湖流域典型水源水库的蓝藻易受TP、水温和水位的影响^[9];滇池蓝藻则易受风速、水温和日照时长的影响^[7]。为防控湖库富营养化对饮水安全的不利影响,结合蓝藻和绿藻富营养化驱动因子识别,国内外开展了一系列湖库富营养化防控研究。例如通过科学调度,降低水体营养盐浓度、减少水龄,抑制蓝藻生长^[10-12];增加曝气扰动,推动藻类群落结构趋向多样化^[13-14];冬季来临前大量投放螺、蚌、蚬、螃蟹等底栖性食藻动物及鲢鳙鱼类,使其尽可能摄食冬季越冬藻种或初春刚复苏、增殖的藻体;利用蓝藻的垂直分布与漂移特性,结合滤食鱼类的活动规律,通过水体流场设计打造鱼类集中活动区域,同时引导蓝藻漂移至该区域,实现鱼、藻集中分布,将蓝藻种群数量控制在暴发阈值以下,有效防控蓝藻富营养化风险^[15]。已有

研究成果为封江口水库富营养化风险防控提供了重要技术借鉴,但其应用与拓展,首先需要识别水域的藻类优势种。

引调水工程在建立水源区与受水区水力联系的同时,也构建了调节水库、自然河湖等不同水域间生物、营养盐等物质与能量的流动通道^[1,16]。目前,对于引调水工程对受水区水文情势和水环境质量的影响已有大量研究,但对于其是否会改变调节水库、自然河湖等不同水体浮游植物的组成特征,并改变富营养化驱动类型的相关研究尚较为缺乏。数学模型是定量评估藻类等浮游植物组成与生长状况的主要方法之一,主要分为两类:①过程机理模型,基于对自然过程的研究和解析,具有可解释性和通用性,但存在一定的研究和测试门槛,且成本较高;②数据驱动模型,依托机器学习等人工智能技术,建模方法灵活多样,但对数据质量依赖性较强,缺乏机理支撑且存在地点特异性^[17-18]。

调节水库,尤其是在线调节水库作为引调水工程储存水量、调节供水过程的关键场所,其浮游植物组成和富营养化类型鲜少被纳入水环境例行监测与管理范围,无法提供大量数据以满足上述数学模型的应用需要。

河流均匀混合模型是一种简化的水质模型,主要用于模拟污染物在河流中的扩散和迁移过程,其核心假设是污染物在河流断面上快速且均匀混合,可描述引调水工程在线调节水库补水点污染物浓度的时间变化特征,并拓展应用于浮游植物等物质,具有参数需求少、计算速度快等优点。尽管该模型不适用于距离补水点较远或水源区来水与水库汇水范围来水混合不充分的水域,但可宏观评估引调水工程实施对在线调节水库浮游植物密度的影响,为数据质量有限的水库在引调水工程背景下富营养化驱动类型的转换评估提供一种简便的方法。

鉴于此,本文以封江口水库为研究区域,通过藻类监测对浮游植物优势种进行识别,对比封江口水库与丹江口水库的浮游植物组成差异,采用河流均匀混合模型宏观预测鄂北工程实施后封江口水库浮游植物优势种密度变化,分析鄂北工程对封江口水库浮游植物组成的影响,为封江口水库富营养化风险防患提供依据。

1 研究区概况

封江口水库是鄂北工程重要的在线调节水库,大坝地理坐标为(31°59'N,113°20'E),控制流域面积460 km²。流域多年平均气温15.7℃,多年平均降水量958 mm,其中汛期(5—9月)675 mm;多年平

均径流量 1.72 亿 m³,其中汛期 1.21 亿 m³。该水库具有多年调节功能,正常蓄水位 124.0 m;水库总库容 2.65 亿 m³,其中兴利库容 1.37 亿 m³,死库容 0.558 亿 m³;水力停留时间约 407 d,水体交换能力较弱。封江口库为河道型水库,水面面积 20.14 km²,平均水面宽 500 m,主要入库河流包括沙河店河、封江口河和陈家河等,其中封江口河为封江口水库的干流。

鄂北工程以封江口水库右坝肩为补水点,以左坝肩为输水隧洞起点,实现向广水、大悟地区补水的目标。

2 材料与方法

2.1 采样与监测

以封江口水库库区,以及沙河店河、封江口河和陈家河等主要库湾为监测范围,覆盖鄂北工程入、出库闸的库湾区域,于 2023 年 6 月(丰水期)、2023 年 11 月(平水期)、2024 年 3 月(枯水期)开展浮游植物和营养盐的采样与监测,监测点如图 1 所示(陈家河、沙河店河、封江口河分别为主要河流入库控制点;编号 S1~S14 分别为封江口河、小黄家塆、楼子塆、明义村、明丰村、陈家河、明光村、付家塆、库区 1、库区 2、库区 3、库区 4、鄂北工程入库点、鄂北工程出库点)。考虑到封江口水库库区主流迁移扩散对浮游植物密度的影响,将监测点位分为库湾和库区两类,其中库区 1、库区 2、库区 3、库区 4、鄂北

工程入库点、鄂北工程出库点为库区监测点位。监测指标包括浮游植物种类和密度,以及 COD_{Mn}、NH₃-N、TN 和 TP 等营养盐指标。

浮游植物定性样本采用 25 号浮游生物网(网目 65 μm)采集,加入 4%甲醛固定后带回实验室,用于种类鉴定。定量样本使用 1 L 有机玻璃采水器,分别在表层至 0.5、>0.5~1.0 m 水层采样。样本充分混合后取 1 L 加入 15 mL 鲁哥氏液固定,带回实验室后沉淀、浓缩至 30~50 mL,用以定量计数^[19]。使用显微镜对浮游植物样本进行种类鉴定与计数,种类鉴定参考 HJ 1295—2023《水生态监测技术指南湖泊和水库水生生物监测与评价(试行)》及相关文献^[20-21],所有种类均鉴定至种级;计数采用目镜视野法,使用 0.1 mL 浮游植物计数框,在 10×40 倍光学显微镜下计数。计数前摇匀浓缩液,立即取 0.1 mL 样品移入计数框中全片计数,要求细胞总数不少于 300 个;每个样品至少计数 2 片,取平均值作为最终结果。根据细胞浓缩倍数换算为每升水样中的细胞数(个/L),该数值即为浮游植物密度。

采用有机玻璃采水器对取样点表层(水下 0.5 m)、中层(分层期为温跃层中部,混合期为水体垂向中部)和底层(沉积物以上 0.5 m)3 个不同深度水样进行采集,采集后将水样装入聚乙烯采样瓶,于实验室 4℃ 条件下保存,参照《水和废水监测分析方法》^[22],在 24 h 内完成 COD_{Mn}、NH₃-N、TN、TP 等营养盐指标的测定。

2.2 浮游植物生物多样性

采用香农-维纳多样性指数 H 和 Pielou 均匀度指数 J 对浮游植物多样性进行评价,并计算优势度指数 Y 以确定封江口水库浮游植物的优势种, $Y>0.02$ 时即确定为优势种。浮游植物物种多样性评价标准参见 HJ 1295—2023《水生态监测技术指南湖泊和水库水生生物监测与评价(试行)》。

2.3 鄂北工程对封江口水库浮游植物组成影响

封江口水库为河道型水库,鄂北工程补水点位于坝前区域、河段末端。工程补水可增强坝前区域水体的流动性与混合程度,直接影响该区域浮游植物种群的组成。考虑到浮游植物生长机理的复杂性,暂不考虑其衰减效应。采用河流均匀混合模型(式(1))对鄂北工程实施后封江口水库浮游植物密度进行预测:

$$M_i = (Q_0M_0 + Q_{in}M_{in}) / (Q_0 + Q_{in}) \quad (1)$$

式中: M_i 为鄂北工程实施后封江口水库第 i 门藻类的密度; M_0 为鄂北工程实施前封江口水库第 i 门藻类的密度; M_{in} 为丹江口水库第 i 门藻类的密度; Q_0 、 Q_{in} 分别为封江口水库来水和丹江口水库补水流量。

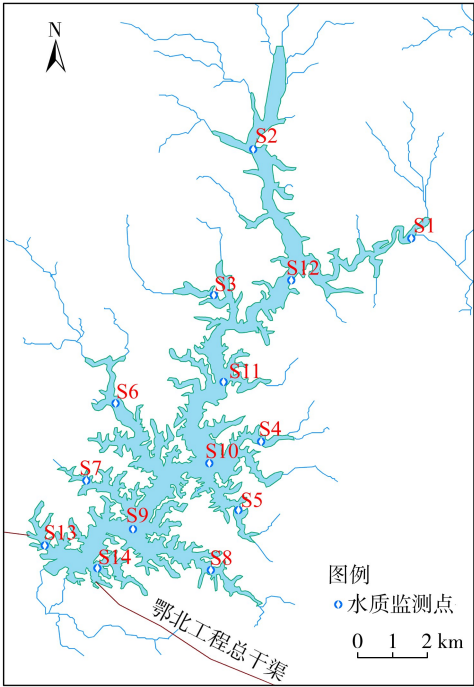


图 1 封江口水库浮游植物监测点分布

Fig. 1 Distribution of phytoplankton monitoring points in the Fengjiangkou Reservoir

同理,基于式(1)计算鄂北工程对封江口水库COD_{Mn}、NH₃-N、TN和TP等营养盐浓度的影响。考虑到长期监测成果有助于降低营养盐浓度变化规律的随机性,鄂北工程运行后封江口水库营养盐浓度变化采用丹江口水库和封江口水库2021—2023年逐月例行水质监测成果进行计算与分析,数据分别来源于南水北调中线水源有限责任公司和随州市生态环境局。

3 结果与分析

3.1 封江口水库浮游植物组成结构

3.1.1 种类组成及优势种

本次调查共鉴定出浮游植物8门185种,主要包括绿藻门(86种,占比46%)、硅藻门(41种,占比22%)、蓝藻门(24种,占比13%)、裸藻门(16种,占比9%)、甲藻门(9种,占比5%)、隐藻门(4种,占比2%)、金藻门(3种,占比2%)和黄藻门(2种,占比1%)。封江口水库浮游植物优势种出现频率*f*见表1,可见优势种共17种,隶属于4门。其中,伪鱼腥藻是不同时期的共有优势种。

以出现频率超过90%的优势种分布来看,丰水期是色球藻、伪鱼腥藻、极小集胞藻、双对栅藻、小球藻、小环藻,除伪鱼腥藻外其余5种的出现频率均为100%;平水期是伪鱼腥藻、栅藻、小环藻、针杆藻、蓝隐藻和隐藻,其中小环藻和隐藻的出现频率均为100%;枯水期是拟柱孢藻,出现频率为100%。

以各时期分布的优势度来看,伪鱼腥藻在丰、平、枯水期的*Y*均为最高,分别为0.131、0.214和

0.343。

3.1.2 优势种密度

各采样点浮游植物总密度丰、平、枯水期分别为146万~7891万、15万~4293万、102万~32904万个/L,浮游植物总密度平均值呈枯水期(5155万个/L)大于丰水期(1352万个/L)大于平水期(873万个/L)的变化趋势。丰、平、枯水期各采样点优势门总密度分别为145万~7797万、15万~4098万、101万~32889万个/L,占浮游植物总密度的比例分别为98%~100%、64%~100%和99%~100%;优势门总密度平均值分别占各采样点平均值的99%(1337万个/L)、93%(815万个/L)和99%(5147万个/L),是封江口水库浮游植物的主要组成部分。

丰、平、枯水期,优势种蓝藻门在各采样点浮游植物中密度占比最高,分别为44%~85%(68万~3540万个/L)、12%~63%(2万~2093万个/L)和13%~98%(13万~32225万个/L),各采样点密度平均值分别占浮游植物总密度平均值的54%(733万个/L)、48%(421万个/L)和94%(4833万个/L)。

优势种绿藻门次之,丰、平、枯水期在各采样点浮游植物中密度占比分别为11%~47%(26万~2069万个/L)、4%~28%(1万~841万个/L)和1%~69%(42万~402万个/L),各采样点密度平均值占浮游植物总密度平均值的27%(369万个/L)、14%(121万个/L)和4%(181万个/L)。

优势种隐藻门和硅藻门在各采样点浮游植物中

表1 封江口水库浮游植物优势种出现频率及优势度

Table 1 Occurrence frequency and dominance of dominant phytoplankton species in the Fengjiangkou Reservoir							
门	种	丰水期		平水期		枯水期	
		<i>f</i> /%	<i>Y</i>	<i>f</i> /%	<i>Y</i>	<i>f</i> /%	<i>Y</i>
蓝藻门	束丝藻 <i>Aphanizomenon</i> sp.	—	—	50	0.025	—	—
	色球藻 <i>Chroococcus</i> sp.	100	0.035	—	—	—	—
	拟柱孢藻 <i>Cylindrospermopsis</i> sp.	—	—	—	—	93	0.121
	长孢藻 <i>Dolichospermum</i> sp.	29	0.021	—	—	86	0.047
	鞘丝藻 <i>Lyngbya</i> sp.	—	—	43	0.039	—	—
	细鞘丝藻 <i>Leptolyngbya</i> sp.	—	—	—	—	—	—
	细小平裂藻 <i>Merismopedia minima</i>	36	0.043	—	—	—	—
	伪鱼腥藻 <i>Pseudoanabaena</i> sp.	93	0.131	93	0.214	71	0.343
	极小集胞藻 <i>Synechocystis minuscula</i>	100	0.096	—	—	71	0.116
绿藻门	栅藻 <i>Scenedesmus</i> sp.	—	—	93	0.023	—	—
	双对栅藻 <i>Scenedesmus bijuga</i>	100	0.058	—	—	—	—
	小球藻 <i>Chlorella</i> sp.	100	0.035	—	—	—	—
硅藻门	小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.	100	0.020	100	0.064	—	—
	针杆藻 <i>Synedra</i> sp.	—	—	93	0.025	—	—
	针形菱形藻 <i>Nitzschia acicularis</i>	57	0.034	—	—	—	—
隐藻门	蓝隐藻 <i>Chroomonas</i> sp.	—	—	93	0.026	—	—
	隐藻 <i>Cryptomonas</i> sp.	—	—	100	0.156	—	—

注:“—”表示该种在某季节出现但不形成优势种,空白代表该种未出现。

的密度占比随季节变化,其中丰水期和枯水期硅藻门仅次于蓝藻门和绿藻门,各采样点硅藻门密度平均值分别占浮游植物总密度平均值的 11% (152 万个/L)和 2% (124 万个/L);平水期隐藻门仅次于蓝藻门,各采样点隐藻门密度平均值占浮游植物总密度平均值的 18% (161 万个/L)。

各优势藻门密度在采样点的分布上表现出明显的差异性,见图 2。可见不同时期采样点 S1、S2、S6、S8、S12 优势藻门总密度均显著大于其他采样点;其中 S1 和 S2 是封江口水库藻类异常增殖需重点关注的区域。

3.2 封江口水库浮游植物多样性水平

不同时期封江口水库浮游植物多样性指数不同(表 2)。调查期间,各采样点丰水期 H 、 J 分别为 2.75~4.36、0.54~0.79,均值分别为 3.63、0.69;平水期 H 、 J 分别为 2.27~3.54、0.52~0.85,均值分别为 3.20、0.74;枯水期 H 、 J 分别为 1.16~3.65、0.29~1.07,平均值分别为 2.96、0.86。对于不同时期各采样点浮游植物,① H 平均值的规律为:丰水期,库区 (3.23) 小于库湾 (3.93),平水期库区 (3.21) 接近库湾 (3.18),枯水期库区 (3.21) 大于库湾 (2.77);丰水期 (3.63) 大于平水期 (3.20) 大于枯水期 (2.96)。② J 平均值的规律为:丰水期库区 (0.65) 小于库湾 (0.72),平水期库区 (0.80) 大于库湾 (0.70),枯水期库区 (0.97) 大于库湾 (0.78);丰水期 (0.69) 小于平水期 (0.74) 小于枯水期 (0.86)。

表 2 封江口水库浮游植物多样性水平

Table 2 Phytoplankton diversity in the Fengjiangkou Reservoir

采样点	断面位置	丰水期		平水期		枯水期	
		H	J	H	J	H	J
S1	库湾	3.99	0.71	3.33	0.69	1.16	0.29
S2	库湾	4.19	0.73	3.45	0.78	2.21	0.54
S3	库湾	3.36	0.65	3.54	0.66	2.78	0.73
S4	库湾	4.13	0.76	3.20	0.72	3.47	0.94
S5	库湾	3.88	0.74	3.26	0.78	3.38	0.91
S6	库湾	3.87	0.72	3.17	0.69	2.64	1.02
S7	库湾	4.36	0.79	2.27	0.52	3.63	0.89
S8	库湾	3.70	0.69	3.45	0.74	2.91	0.92
S9	库区	3.44	0.66	3.37	0.79	2.98	0.94
S10	库区	2.95	0.60	2.48	0.83	3.65	0.96
S11	库区	3.23	0.67	2.97	0.78	3.14	1.05
S12	库区	3.29	0.66	3.36	0.73	3.06	0.97
S13	库区	3.73	0.75	3.51	0.83	3.05	0.85
S14	库区	2.75	0.54	3.40	0.85	3.38	1.07

4 鄂北工程影响分析

4.1 营养盐

4.1.1 封江口水库

不同时间和空间条件下,封江口水库 COD_{Mn} 、 NH_3-N 、 TN 、 TP 等营养盐指标存在明显差异(图 3)。丰水期、平水期和枯水期封江口水库 COD_{Mn} 质量浓度分别为 2.00~7.92、3.55~5.02、2.75~3.34 mg/L,平均值分别为 3.37、4.00、3.09 mg/L; NH_3-N 质量浓度分别为 0.03~0.73、0.08~0.37、0.08~0.18 mg/L,平均值分别为 0.16、0.22、0.11 mg/L; TN 质量浓度分别为 0.36~2.17、0.53~1.18、0.68~1.42 mg/L,

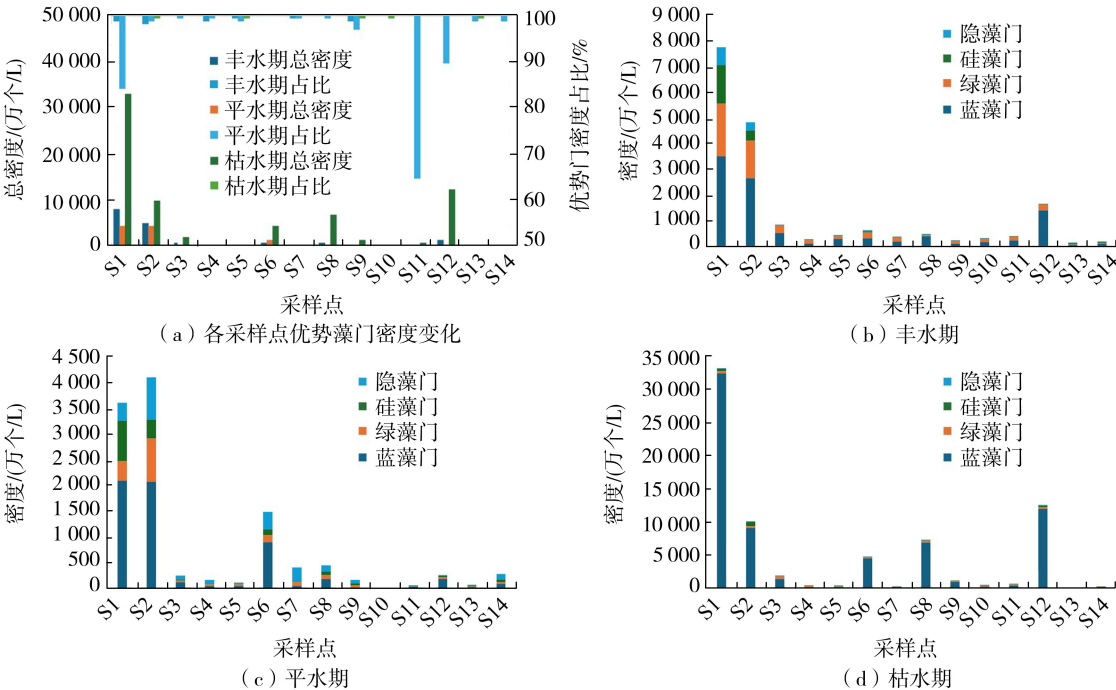


图 2 封江口水库浮游植物优势类群密度变化

Fig. 2 Density changes of dominant phytoplankton groups in the Fengjiangkou Reservoir

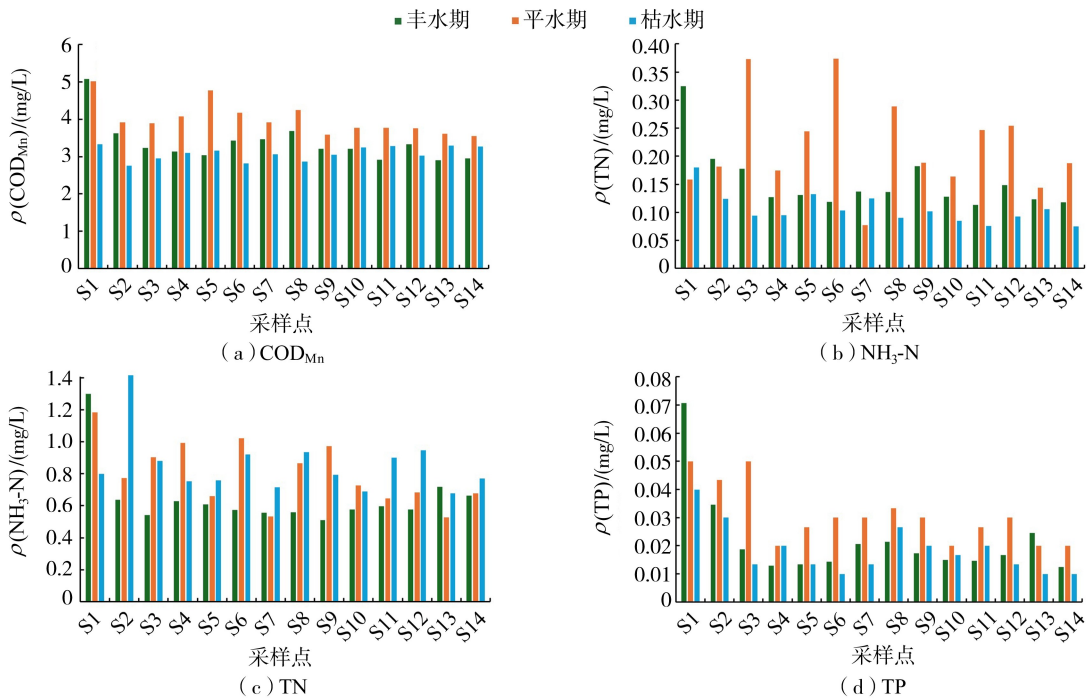


图3 封江口水库营养盐指标质量浓度时空分布

Fig.3 Spatio-temporal distribution of nutrient mass concentration in the Fengjiangkou Reservoir

平均值分别为 0.65、0.80、0.85 mg/L;TP 质量浓度分别为 0.01~0.19、0.02~0.05、0.01~0.04 mg/L,平均值分别为 0.02、0.03、0.02 mg/L。丰水期 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 及 TP 的质量浓度最大值显著高于其他时期,主要源于灌溉期农田耕作与农药化肥施用强度增加,降雨冲刷作用导致大量面源污染汇入封江口水库。而枯水期 TN 质量浓度的峰值和均值均显著高于其他时期,可能是因为枯水期径流量减少,而入库支流的 TN 质量浓度显著高于其他时期造成的。

S6、S3、S2、S1 等采样点位于封江口水库库尾,受陈家河、沙河店河和封江口河等主要污染物汇入影响,不同时期营养盐水平总体大于其他采样点。受回水顶托、与库尾支流距离关系等影响,库区采样点营养盐质量浓度总体呈现由坝前向库尾逐渐升高的趋势。

4.1.2 丹江口水库

丹江口水库作为鄂北工程水源区,水质类别常年达到或优于 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》规定的Ⅱ类水标准,并优于封江口水库水质类别。① COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 等主要营养盐 2021—2023 年月均质量浓度分别为 1.60~2.14、0.04~0.11 mg/L,约为封江口水库的 40%~50%、30%~70%,因此鄂北工程的实施将会降低封江口水库,尤其是工程补水点所在水域的 COD_{Mn} 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度(图4,比值为丹江口水库与封江口水库营养盐质量浓度的比值)。②2021—2023 年 TP 月均质量浓度为 0.010~0.020 mg/L,大部分月份为封江口水库的 50%~

90%,但 8 月、9 月、11 月超出封江口水库的 10%~40%,而鄂北工程的实施将会造成封江口水库 8 月、9 月、11 月 TP 质量浓度升高 10%~30%。③2021—2023 年逐月 TN 质量浓度为 0.95~1.45 mg/L,超出封江口水库 50%~150%,而鄂北工程的实施将会使封江口水库逐月 TN 质量浓度升高 40%~130%。

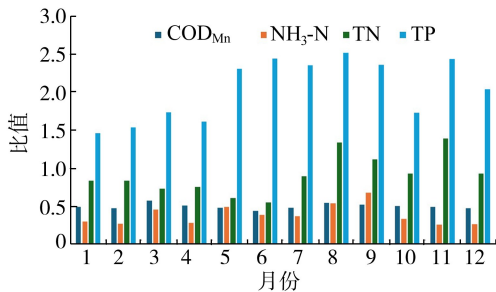


图4 2021—2023 年封江口水库与丹江口水库月均营养盐质量浓度差异

Fig.4 Differences in monthly average nutrient salt mass concentrations between the Fengjiangkou Reservoir and Danjiangkou Reservoir from 2021 to 2023

综合考虑富营养化相关关键水质指标质量浓度变化趋势,建议将 8 月、9 月和 11 月列为重点监测时段,避免因营养盐质量浓度升高引发浮游植物优势种异常增殖而导致的富营养化风险。

4.2 水库优势种群落结构特征

4.2.1 丹江口水库与封江口水库浮游植物种群组成差异

2024 年 3 月和 6 月,水利部中国科学院水工程生态研究所在丹江口水库库中、库尾和坝前设置

3个采样点,共检出浮游植物 5 门 62 种。如表 3 所示,尽管封江口水库浮游植物种数显著高于丹江口水库,但两者均以绿藻门和硅藻门居多。

表 3 封江口水库与丹江口水库浮游植物种类对比

种类	丹江口库区		封江口水库	
	种数	占比/%	种数	占比/%
硅藻门	22	36	41	22
蓝藻门	10	16	24	13
绿藻门	25	40	86	46
甲藻门	3	5	6	5
金藻门	0	0	3	2
隐藻门	2	3	4	2
裸藻门	0	0	16	9
黄藻门	0	0	2	1
合计	62	100	185	100

对于浮游植物多样性水平,2024 年 3 月和 6 月丹江口水库 H 分别为 2.05 和 2.54,显示其处于良好水平;封江口水库在 2023 年 6 月和 2024 年 3 月的 H 分别为 3.63 和 2.96,表明其处于良好以上水平,可见封江口水库浮游植物多样性水平优于丹江口水库。对于浮游植物密度,丹江口水库 2024 年 3 月硅藻门、绿藻门和隐藻门均保持较高占比,6 月蓝藻门成为该水库浮游植物的主要组成部分;相比之下,蓝藻门在封江口水库浮游植物总密度中始终占据绝对优势,见表 4。

表 4 封江口水库与丹江口水库浮游植物密度对比

Table 4 Comparison of phytoplankton density between the Fengjiangkou Reservoir and Danjiangkou Reservoir

种类	丹江口水库			
	2024 年 3 月		2024 年 6 月	
	密度/(万个/L)	占比/%	密度/(万个/L)	占比/%
硅藻门	758.7	28	53.2	2
蓝藻门	382.9	14	1895.3	81
绿藻门	708.6	26	329	14
甲藻门	167.1	6	2	0
金藻门	0	0	0	0
隐藻门	668.8	25	61.6	3
裸藻门	0	0	0	0
黄藻门	0	0	0	0
合计	2685.2	100	2341	100

种类	封江口水库			
	2023 年 6 月		2024 年 3 月	
	密度/(万个/L)	占比/%	密度/(万个/L)	占比/%
硅藻门	138	13	124.2	2
蓝藻门	520	50	4833.5	94
绿藻门	313	30	180.9	4
甲藻门	2	0	1.8	0
金藻门	3	0	0.5	0
隐藻门	60	6	8.2	0
裸藻门	5	1	5	0
黄藻门	1	0	0	0
合计	1042	100	5154.8	100

4.2.2 封江口水库浮游植物群落组成变化

鄂北工程向封江口水库的多年平均补水量约为 13.2 m³/s,月均补水量为 5.6~16.0 m³/s;封江口水库汇水范围的多年平均入流量约 5.5 m³/s,月均入流量为 0.5~8.7 m³/s。

鄂北工程实施后,丰水期与枯水期的蓝藻门、绿藻门、硅藻门、隐藻门密度分别为 0.3 万~152.4 万、0.1 万~87.8 万个/L。相较于工程实施前,浮游植物密度变化幅度分别为-73.0%~193.0%、-88.9%~8271.2%。丰水期蓝藻门密度显著增加,绿藻门与隐藻门略有上升,其余藻门密度显著下降;枯水期蓝藻门、金藻门、裸藻门密度显著降低,其他藻门密度则显著升高(表 5),这主要源于丹江口水库与封江口水库浮游植物的组成差异。

表 5 鄂北工程实施后封江口水库浮游植物密度变化

Table 5 Changes in density of phytoplankton in the Fengjiangkou Reservoir after implementation of the Northern Hubei Project

种类	2023 年 6 月		2024 年 3 月	
	工程实施后浮游植物密度/(万个/L)	工程实施后浮游植物密度较工程实施前变化率/%	工程实施后浮游植物密度/(万个/L)	工程实施后浮游植物密度较工程实施前变化率/%
硅藻门	76.1	-44.8	688.1	454.0
蓝藻门	1523.6	193.0	877.9	-81.8
绿藻门	324.7	3.7	649.9	259.2
甲藻门	2.0	0.0	148.7	8271.2
金藻门	0.8	-73.0	0.1	-88.9
隐藻门	61.2	1.9	595.3	7177.1
裸藻门	1.4	-73.0	0.6	-88.9
黄藻门	0.3	-73.0	0	0

鄂北工程实施对封江口水库藻类密度起到一定的调节作用,但蓝藻门密度仍高于其他藻类。其中,枯水期各藻门密度均低于 1000 万个/L,表明工程补水对抑制枯水期水库富营养化具有积极作用;但工程实施后,丰水期蓝藻门密度超过 1000 万/L,使封江口水库面临富营养化风险^[23]。

5 讨论

5.1 封江口水库优势种群落结构特征

浮游植物的种类组成、密度及分布等群落结构特征对水域环境具有较强的指示作用,种类数量变化越小、密度越高,水域的富营养化程度就越高^[24-25]。本次调查结果显示,枯水期(2024 年 3 月),封江口水库蓝藻门生物密度占比达 94%,显著高于其他藻门,表明该时期封江口水库是典型以蓝藻门为主的水域类型,浮游植物种类组成单一,多样性较差,群落结构不稳定。其他时期蓝藻门生物密度虽接近 50%,但绿藻门、硅藻门占比均接近

20%,生物多样性水平有所提高。

相关研究表明,裸藻门适宜生活在有机质丰富的静水环境,金藻门则偏好有机质含量较低的水体。当水体受到有机污染时,金藻门会减少甚至消失,裸藻门则会大量繁殖并成为优势种^[19]。2024 年 3 月,封江口水库未检测到金藻门,表明该时期水体可能受到有机污染;其他时期,除优势藻门外,还检测到裸藻门、甲藻门、金藻门、黄藻门等浮游植物,尤其是平水期(2023 年 11 月),金藻门密度占比达 6%,显著大于裸藻门的 0.4%,表明封江口水库受有机污染的可能性低。

本次调查共鉴定出浮游植物优势种 17 种,其中色球藻、极小集胞藻、双对栅藻、小球藻、小环藻、隐藻等出现频率达 100%,优势种构成较丰富。优势度分析显示,各时期 Y 最高的种类均为伪鱼腥藻,优势度相对集中;但不同时期各采样点 H 平均值为 2.96~3.59, J 平均值为 0.67~0.86,浮游植物生物多样性处于良好—优秀水平,表明伪鱼腥藻的相对优势未对封江口水库浮游植物多样性造成不利影响。

从浮游植物密度的时间变化来看,枯水期(2024 年 3 月)浮游植物总密度显著高于其他时期。研究发现,蓝绿藻适宜生长的温度为 25~35℃,在该温度下蓝绿藻形成了耐高温的代谢机制,对温度的耐受能力强于其他藻类^[26]。封江口水库春季和夏季温度较高,满足蓝绿藻生长的温度需求,且营养盐充足,为其生长提供了有利条件。但 2024 年 3 月(枯水期)水库水温虽接近蓝绿藻适宜生长范围,但蓝绿藻密度显著高于温度更适宜的丰水期。推测其原因可能是枯水期水库上游来水量较少且处于蓄水阶段,库区水域相对静止,为浮游植物生长提供了适宜的温度与静水环境。

从浮游植物密度的平面分布来看,各时期采样点除 S1、S2、S6、S8、S12 外,其余采样点优势种密度均未超过 1 000 万个/L,表明该 5 个采样点存在富营养化风险,其余区域富营养化风险较低。水库浮游植物总密度呈现从封江口河、沙河店河(或小黄家塆)、陈家河库湾向库区腹地逐渐降低的分布规律,与流域面源污染通过支流汇入水库的污染物输入特征一致。相较于其他库区采样点,S12 浮游植物生物量异常偏高,主要因为该水域过水通道狭长,受水库回水顶托作用的影响,沙河店河与封江口河输入的营养物质经沿程降解后在此富集,为浮游植物生长提供了充足条件。

5.2 鄂北工程实施后封江口水库富营养化风险防患

尽管枯水期各藻门密度均低于 1 000 万个/L,

但仍需警惕各藻门密度累积超过富营养化阈值的潜在风险。相较于枯水期,丰水期受灌溉退水影响,封江口河、沙河店河等主要支流入库库湾区域是封江口水库面源污染物管控的重点水域与时段。

鄂北工程实施后,受丹江口水库来水高蓝藻密度的影响,丰水期封江口水库蓝藻密度已超过 1 000 万个/L。在灌溉期持续高温和灌溉退水带来的营养盐持续输入条件下,蓝藻的生长繁殖进一步加剧,富营养化风险显著增加。因此,在丹江口水库来水水环境状况难以调控的前提下,结合水环境监测与智慧化管理手段,加强封江口水库汇水范围面源污染削减,开展主要库湾藻类生物量调控,可作为封江口水库富营养化风险防患的有效措施。

5.2.1 丰水期流域面源污染削减

将封江口水库汇水范围划分为不同子流域,丰水期面源污染排放量调查结果表明,封江口河中、下游及沙河店河下游(汇水点以上范围)是水库的主要面源污染源。TN 和 TP 流失强度等级划分见表 6,丰水期封江口水库汇水范围内 TN 和 TP 流失强度见图 5(结果源于 SWAT 模型模拟)。

表 6 TN 和 TP 流失强度等级划分

Table 6 Classification of TN and TP loss intensity levels		
流失强度	$\rho(\text{TN})/(\text{kg}/\text{hm}^2)$	$\rho(\text{TP})/(\text{kg}/\text{hm}^2)$
轻度	>0.399~0.776	>0~0.0004
较轻	>0.776~0.985	>0.0004~0.0009
中度	>0.985~1.323	>0.0009~0.0018
较重	>1.323~1.490	>0.0018~0.0026
重度	>1.490~1.705	>0.0026~0.0131

结合鄂北工程实施后封江口水库营养盐浓度的变化情况,以 TN 和 TP 双控为目标,以封江口河中下游、沙河店河下游(汇水点以上范围)为重点区域,提出农作物农药、化肥施用强度优化方案,从源头减少流域氮、磷等面源污染物的输入量^[27-28];通过种植适合当地生长的植物篱作物,对田间径流进行物理拦截,有效降低泥沙及肥料中氮、磷等污染物的流失^[29-30];建议在支流入口处建立人工湿地系统,利用土壤、人工介质、植物以及微生物的共同作用,进一步削减入库水体中的氮、磷等主要污染物,构建“源头减量-过程阻断-末端修复”的面源污染综合防控技术体系^[31]。

5.2.2 库湾藻类生物量调控

由于营养盐富集导致藻类异常增殖所引发的水体富营养化,已成为威胁我国水库水源地安全的主要环境问题之一^[32]。在阻控外源性营养盐输入的同时,通过人工手段降低关键藻类的含量,也是水库富营养化防控的主要手段。在开展丰、平、枯水期藻类常规监测的基础上,选择 2023 年 6 月 2 日和

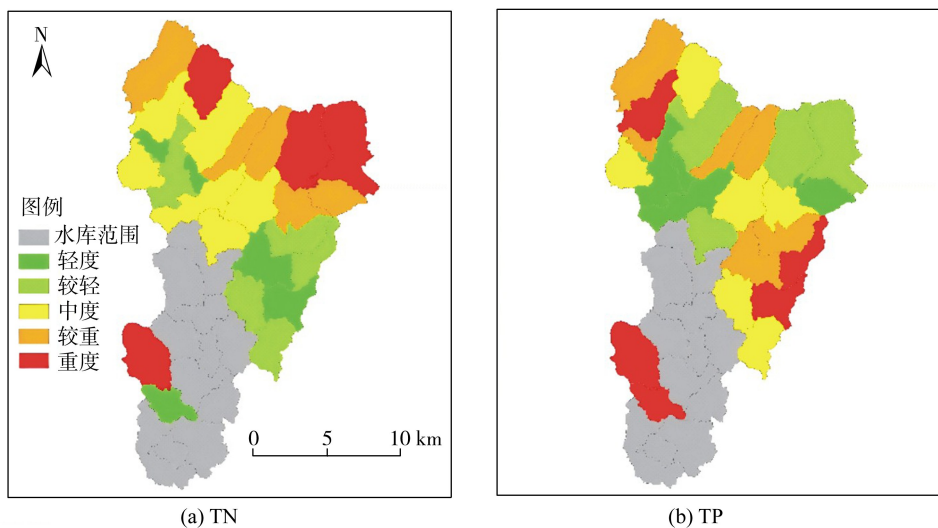


图 5 丰水期封江口水库汇水范围内总氮和总磷流失强度

Fig. 5 Intensity of total nitrogen and total phosphorus loss within the catchment area of the Fengjiangkou Reservoir during flood season

19 日进行封江口水库库区浮游植物专项监测,以识别灌溉退水量较大时浮游植物的分布特征及动态变化。6 月 2 日,库区藻类密度平均值为 8 万~156 万个/L,极小集胞藻密度最大,小环藻、伪鱼腥藻、双对栅藻次之;质量浓度平均值为 1.56~294.68 $\mu\text{g/L}$,其中极小环藻最大,针形菱形藻、双对栅藻和伪鱼腥藻次之。6 月 19 日,藻类密度平均值为 8 万~205 万个/L,其中伪鱼腥藻最大,极小集胞藻、色球藻和小环藻次之;质量浓度平均值为 1.30~82.98 $\mu\text{g/L}$,小环藻最大,针形菱形藻、色球藻和伪鱼腥藻次之。相较于 6 月 2 日,6 月 19 日极小集胞

藻、小环藻、双对栅藻和小球藻的密度与质量浓度均有所下降,下降幅度为 16.2%~71.8%;而伪鱼腥藻、色球藻和针形菱形藻的密度与质量浓度则有所上升,增幅为 4.6%~295.1%。

各优势种分布在不同区域,极小集胞藻(蓝藻门)主要集中分布于陈家河、封江口河口以下至小黄家塆库湾区域;伪鱼腥藻(蓝藻门)在封江口河及付家塆等库湾均有可能分布;双对栅藻(蓝藻门)与小环藻(硅藻门)主要分布于封江口河和小黄家塆等库湾段(见图 6,采用空间插值法得到)。灌溉期大量营养盐随退水输入水库,为水库藻类生长提

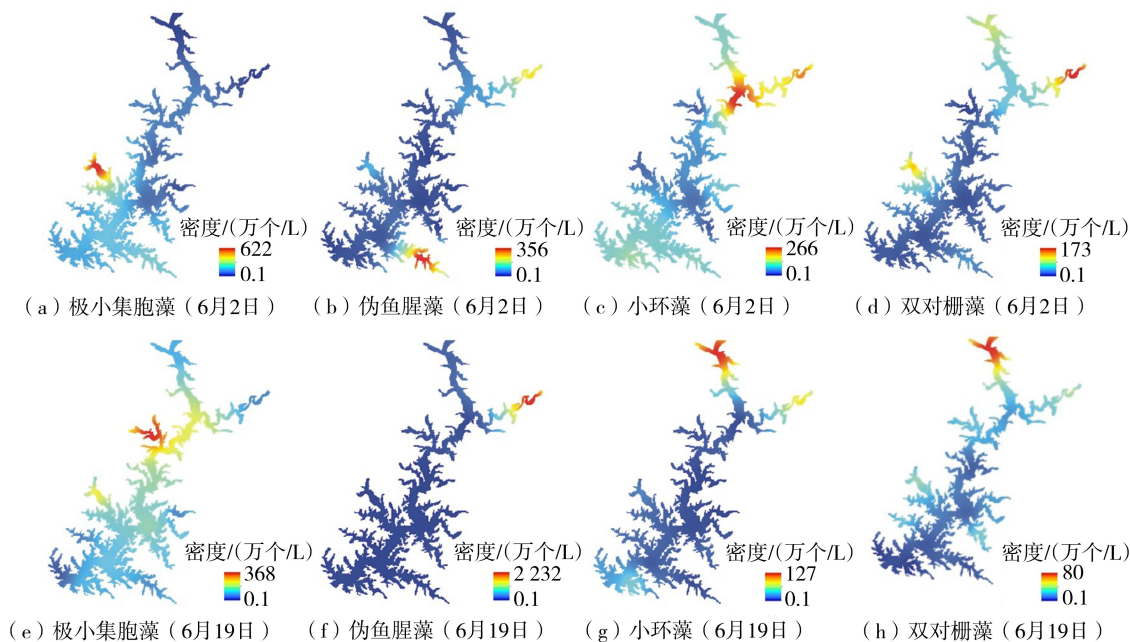


图 6 封江口水库浮游植物优势种密度空间分布特征

Fig. 6 Spatial distribution characteristics of dominant species density of phytoplankton in the Fengjiangkou Reservoir

供了充足的营养盐水平,促进了藻类过度繁殖及优势种群更替,进而加剧了富营养化风险。为实现水陆协同治理,有效防控库区富营养化,建议在严格管控陆域营养盐输入的同时,综合运用生物操纵、鄂北工程与封江口水库联合调度等措施,加强对陈家河至小黄家塆库湾、付家湾等重点水域藻类生物量的调控^[33-34]。

5.2.3 水环境监测与智慧化管理

水库富营养化治理是流域层次的复杂系统工程,建立涵盖水文过程、污染源排放、理化水质指标及生物群落结构等的水库及其流域生态系统综合监测体系,有助于评估水质风险防控方案的科学性与合理性,检验各项治理措施的落实进展与实施成效,从而优化管理策略,落实水库水环境适应性管理要求^[35]。目前,封江口水库仅在坝前及库心区域布设了常规水质监测断面和水质自动监测站,监测频次与范围有限,难以全面反映重点风险区域的水质变化特征。为提升库区富营养化风险预警与防控能力,亟须在封江口河、沙河店河等主要入库支流增设水环境自动监测站,对库湾区域的关键营养盐指标、叶绿素 a 等开展实时在线监测;同时推进数字孪生封江口工程建设,集成监测感知系统、数字模型与预警预报工具,构建面向不同水动力条件与营养盐输入情景的水库应急调控模拟平台,为保障封江口水库水质和鄂北工程供水安全提供数据支撑。

6 结 论

a. 封江口水库浮游植物共有 17 种优势种,隶属于蓝藻门、绿藻门、硅藻门和隐藻门。其中蓝藻门伪鱼腥藻丰、平、枯水期的优势度指数均为最高,分别为 0.131、0.214 和 0.343,表明封江口水库浮游植物以蓝藻门为主。

b. 封江口水库浮游植物在时间和空间上具有较明显的差异性。枯水期各采样点浮游植物总密度平均值高达 5 155 万个/L,显著大于其他时期,其中,蓝藻门占比高达 94%,显著大于其他门类。不同时期 S1、S2 优势藻门总密度均显著大于其他采样点,是封江口水库藻类异常增殖需重点关注的区域。

c. 不同时期各采样点 *H* 平均值和 *J* 平均值分别为 2.96~3.59、0.67~0.86,浮游植物生物多样性处于良好—优秀水平。

d. 封江口水库浮游植物种数显著高于丹江口水库,即浮游植物多样性水平优于丹江口水库。丹江口水库和封江口水库浮游植物总密度中,隐藻门和蓝藻门分别占据优势。鄂北工程的实施对封江口水库藻类密度具有一定的调控作用;尽管工程运行

后蓝藻门密度仍显著高于其他藻类类群,但在枯水期(3 月)其密度持续稳定在 1 000 万个/L 以下,表明鄂北工程补水对抑制封江口水库富营养化现象发挥了积极作用。然而,鄂北工程的实施也将导致封江口水库逐月 TN 质量浓度上升 40%~130%,8 月、9 月、11 月 TP 质量浓度升高 10%~30%。建议将 8 月、9 月和 11 月列为重点监控时段,加强营养盐动态监测与藻类生长预警,防范因营养盐输入增加而引发浮游植物优势种异常增殖,进而加剧富营养化风险。

参考文献:

[1] 王中敏,刘金珍,刘扬扬,等. 引调水工程对汉江中下游生态环境的累积叠加影响研究[J]. 中国农村水利水电,2018(3):29-32. (WANG Zhongmin, LIU Jinzhen, LIU Yangyang, et al. Research on the cumulative superposition effect of water diversion project on ecological environment in the middle and lower reaches of Hanjiang River[J]. China Rural Water and Hydropower,2018(3):29-32. (in Chinese))

[2] 张怡雅,袁飞,张利敏,等. 中线调水对汉江中下游区水文情势影响研究[J]. 水文,2022,42(3):89-94. (ZHANG Yiya,YUAN Fei,ZHANG Limin,et al. Impacts of water diversion of middle-route project on hydrological regimes of middle and lower reaches of Hanjiang River [J]. Journal of China Hydrology,2022,42(3):89-94. (in Chinese))

[3] 宋子豪,邹伟,桂智凡,等. 我国常用湖泊营养状态指数研究进展与展望[J]. 湖泊科学,2024,36(4):987-1001. (SONG Zihao, ZOU Wei, GUI Zhifan, et al. Common-used trophic level index in Chinese lakes: progress and prospects [J]. Journal of Lake Sciences, 2024,36(4):987-1001. (in Chinese))

[4] 李建,尹炜,贾海燕,等. 汉江中下游硅藻水华研究进展与展望[J]. 水生态学杂志,2020,41(5):136-144. (LI Jian, YIN Wei, JIA Haiyan, et al. Research progress on diatom blooms in the middle and lower Hanjiang River: review and advances [J]. Journal of Hydroecology,2020,41(5):136-144. (in Chinese))

[5] 张民,史小丽,阳振,等. 2012—2018 年巢湖水质变化趋势分析和蓝藻防控建议[J]. 湖泊科学,2020,32(1):11-20. (ZHANG Min,SHI Xiaoli,YANG Zhen,et al. The variation of water quality from 2012 to 2018 in Lake Chaohu and the mitigating strategy on cyanobacterial blooms[J]. Journal of Lake Science,2020,32(1):11-20. (in Chinese))

[6] 曹晶,田泽斌,储昭升,等. 太湖蓝藻水华暴发的氮磷控制阈值分析[J]. 湖泊科学,2022,34(4):1075-1089. (CAO Jing,TIAN Zebin,CHU Zhaosheng,et al. Nitrogen

- and phosphorus control thresholds of cyanobacterial blooms in Lake Taihu[J]. *Journal of Lake Science*, 2022, 34(4): 1075-1089. (in Chinese))
- [7] 李加龙, 罗纯良, 吕恒, 等. 2002—2018 年滇池外海蓝藻水华暴发时空变化特征及其驱动因子[J]. *生态学报*, 2023, 43(2): 878-891. (LI Jialong, LUO Chunliang, LYU Heng, et al. Spatio-temporal variation and driving factors of algal bloom at Lake Dianchi from 2002 to 2018[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(2): 878-891. (in Chinese))
- [8] 魏志兵, 柴毅, 罗静波, 等. 长湖浮游植物优势种季节演替及生态位分析[J]. *水生生物学报*, 2020, 44(3): 612-621. (WEI Zhibing, CHAI Yi, LUO Jingbo, et al. Seasonal succession and ecological niche analysis of the dominant species of phytoplankton in Changhu Lake [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2020, 44(3): 612-621. (in Chinese))
- [9] 吕翔宇, 朱梦圆, 马永山, 等. 太湖流域典型水源水库藻类水华的促发条件[J]. *湖泊科学*, 2023, 35(5): 1516-1528. (LYU Xiangyu, ZHU Mengyuan, MA Yongshan, et al. Driving factors of algal blooms in drinking-water reservoirs in Lake Taihu Basin [J]. *Journal of Lake Science*, 2023, 35(5): 1516-1528. (in Chinese))
- [10] VISSER P M, IBELINGS B W, BORMANS M, et al. Artificial mixing to control cyanobacterial blooms: a review [J]. *Aquatic Ecology*, 2016, 50(3): 423-441.
- [11] 杨金艳, 徐勇, 周杰, 等. 基于水龄抑制蓝藻水华的供水水库取水方案优选[J]. *水利水运工程学报*, 2020(2): 85-90. (YANG Jinyan, XU Yong, ZHOU Jie, et al. Optimization of reservoir cycling water scheme based on water age to reduce algal bloom risk [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2020(2): 85-90. (in Chinese))
- [12] 黄宇波, 曹光荣, 范向军, 等. 汛期水库调度对小江水华的影响[J]. *长江科学院院报*, 2024, 41(1): 52-58. (HUANG Yubo, CAO Guangrong, FAN Xiangjun, et al. Influence of reservoir operation in flood season on water bloom of Xiaojiang River [J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2024, 41(1): 52-58. (in Chinese))
- [13] 王小冬, 刘子秋, 刘兴国, 等. 不同浓度微囊藻水华在曝气扰动下的光合作用[J]. *环境科学与技术*, 2021, 44(12): 136-143. (WANG Xiaodong, LIU Ziqiu, LIU Xingguo, et al. Study on Microcystis bloom: photosynthesis of Microcystis of different concentrations with aeration disturbance [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 44(12): 136-143. (in Chinese))
- [14] XU Hai, QIN Boqiang, PAERL H W, et al. Environmental controls of harmful cyanobacterial blooms in Chinese inland waters[J]. *Harmful Algae*, 2021, 10: 102127.
- [15] 王寿兵, 屈云芳, 徐紫然. 基于生物操纵的富营养化湖库蓝藻控制实践[J]. *水资源保护*, 2016, 32(5): 1-4. (WANG Shoubing, QU Yunfang, XU Ziran. Algal bloom control in eutrophic lakes and reservoirs based on biomanipulation[J]. *Water Resources Protection*, 2016, 32(5): 1-4. (in Chinese))
- [16] 许益新, 王文才, 曾伟峰, 等. 调水引流改善平原河网水环境质量模拟[J]. *水资源保护*, 2018, 34(1): 70-75. (XU Yixin, WANG Wencai, ZENG Weifeng, et al. Simulation on improvement of water environment in plain river network by water diversion [J]. *Water Resources Protection*, 2018, 34(1): 70-75. (in Chinese))
- [17] 郭正强, 严平川, 向宣好, 等. 藻类生产预测模型的研究: 以洪湖水体为例[J]. *湖泊科学*, 2022, 34(4): 1140-1149. (GUO Zhengqiang, YAN Pingchuan, XIANG Xuanhao, et al. Comparative study on algae growth prediction models: a case study of Lake Honghu [J]. *Journal of Lake Science*, 2022, 33(4): 1140-1149. (in Chinese))
- [18] 谢宇煊, 汪隼, 唐雨青, 等. 湖库水体藻类浓度预测模型的原理和应用[J]. *化学进展*, 2024, 36(9): 1412-1424. (XIE Yuxuan, WANG Jun, TANG Yuqing, et al. Principle and application of algae concentration prediction models in lakes and reservoirs [J]. *Progress in Chemistry*, 2024, 36(9): 1412-1424. (in Chinese))
- [19] 赵文. 水生生物学[M]. 2 版. 北京: 中国农业出版社, 2016: 490-498.
- [20] 梁象秋, 方纪祖, 杨和荃. 水生生物学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996: 16-125.
- [21] 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: 21-157.
- [22] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 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.
- [23] 况琪军, 马沛明, 胡征宇, 等. 湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展[J]. *安全与环境学报*, 2005, 5(2): 87-91. (KUANG Qijun, MA Peiming, HU Zhengyu, et al. Study on the evaluation and treatment of lake eutrophication by means of algae biology [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2005, 5(2): 87-91. (in Chinese))
- [24] 李娜, 黎佳茜, 李国文, 等. 中国典型湖泊富营养化现状与区域性差异分析[J]. *水生生物学报*, 2018, 42(4): 194-204. (LI Na, LI Jiaxi, LI Guowen, et al. Eutrophication status and regional difference analysis of typical lakes in China [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2018, 42(4): 194-204. (in Chinese))
- [25] 魏志兵, 柴毅, 罗静波, 等. 长湖浮游植物优势种季节演替及生态位分析[J]. *水生生物学报*, 2020, 44(3): 612-621. (WEI Zhibing, CHAI Yi, LUO Jingbo, et al. Seasonal succession and ecological niche analysis of the dominant species of phytoplankton in Changhu Lake [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2020, 44(3): 612-621. (in Chinese))

[26] 笄文怡,朱广伟,吴志旭,等. 2002—2017 年千岛湖浮游植物群落结构变化及其影响因素[J]. 湖泊科学,2019,31(5):1320-1333. (DA Wenyi, ZHU Guangwei, WU Zhixu, et al. Long-term variation of phytoplankton community and driving factors in Qiandaohu Reservoir, southeast China [J]. Journal of Lake Science, 2019, 31(5):1320-1333. (in Chinese))

[27] 王维刚,史海滨,李仙岳,等. 基于改进 SWAT 模型的灌溉-施肥-耕作对乌梁素河流域营养物负荷及作物产量的影响[J]. 湖泊科学,2022,34(5):1505-1523. (WANG Weigang, SHI Haibin, LI Xian Yue, et al. Effect of irrigation-fertilization-tillage on nutrient loading and crop yield in Ulansuhai watershed based on improved SWAT model[J]. Journal of Lake Science, 2022, 34(5):1505-1523. (in Chinese))

[28] 陈丽娜,张文硕,徐俊增,等. 基于 SWAT 模型的南方水稻灌区全生育期面源污染特征及控制模拟[J]. 水资源保护,2024,40(6):198-205. (CHEN Lina, ZHANG Wenshuo, XU Junzeng, et al. Simulation of non-point source pollution characteristics and control effect in southern paddy irrigation district based on SWAT model during paddy growth period [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(6):198-205. (in Chinese))

[29] 张靖雨,夏小林,汪邦稳,等. 不同配置乡村植被缓冲带阻控径流污染特征研究[J]. 农业资源与环境学报,2024,41(2):383-391. (ZHANG Jingyu, XIA Xiaolin, WANG Bangwen, et al. Study on the characteristics of runoff pollution control in different configurations of rural vegetation buffer strips [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2024, 41(2):383-391. (in Chinese))

[30] 陆帅帅,周念清,蔡奕,等. 洞庭湖湿地潜流带地下水中氮磷迁移转化过程及驱动机制分析[J]. 水资源保护,2024,40(5):122-130. (LU Shuaishuai, ZHOU Nianqing, CAI Yi, et al. Analysis of nitrogen and phosphorus migration and transformation and driving mechanism in hyporheic zone groundwater of Dongting Lake wetland[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(5):122-130. (in Chinese))

[31] 秦沂樟,白静,赵健,等. 生态沟渠磷拦截效应对不同因子的响应特征[J]. 农业工程学报,2022,38(增刊1):122-130. (QIN Yizhang, BAI Jing, ZHAO Jian, et al. Response characteristics of phosphorus interception effects to different factors in ecological ditches[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(Sup1):122-130. (in Chinese))

[32] 吕翔宇,朱梦圆,马永山,等. 太湖流域典型水源水库藻类水华的促发条件[J]. 湖泊科学,2023,35(5):1516-1528. (LYU Xiangyu, ZHU Mengyuan, MA Yongshan, et al. Driving factors of algal blooms in drinking-water reservoirs in Lake Tai Basin[J]. Journal of Lake Science, 2023, 35(5):1516-1528. (in Chinese))

[33] 王寿兵,屈云芳,徐紫然. 基于生物操纵的富营养化湖泊蓝藻控制实践[J]. 水资源保护,2016,32(5):1-4. (WANG Shoubing, QU Yunfang, XU Ziran. Algal bloom control in eutrophic lakes and reservoirs based on biomanipulation[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(5):1-4. (in Chinese))

[34] 黄宇波,曹光荣,范向军,等. 汛期水库调度对小江水华的影响[J]. 长江科学院院报. 2024,41(1):52-58. (HUANG Yubo, CAO Guangrong, FAN Xiangjun, et al. Influence of reservoir operation in flood season on water bloom of Xiaojiang River[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2024, 41(1):52-58. (in Chinese))

[35] 褚俊英,周祖昊,王浩,等. 流域综合治理的多维嵌套理论与技术体系[J]. 水资源保护,2019,35(1):1-5. (CHU Junying, ZHOU Zuhao, WANG Hao, et al. Study on multi-dimensional nested theory and technological system for comprehensive watershed management [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(1):1-5. (in Chinese))

(收稿日期:2025-02-09 编辑:胡新宇)

+++++
(上接第 216 页)

[28] 王红瑞,林欣,钱龙霞,等. 基于异方差检验的水文过程隐含周期分析模型及其应用: II 应用[J]. 水利学报,2008,39(12):1296-1301. (WANG Hongrui, LIN Xin, QIAN Longxia, et al. Cryptic period analysis model of hydrological process based on heteroskedasticity test and its application: II application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(12):1296-1301. (in Chinese))

[29] 孙才志,刘淑彬. 基于 MRIO 模型的中国省(市)区水足迹测度及空间转移格局[J]. 自然资源学报,2019,34(5):945-956. (SUN Caizhi, LIU Shubin. Water footprint and space transfer at provincial level of China based on MRIO model[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(5):945-956. (in Chinese))

[30] 洪思扬,王红瑞,来文立,等. 我国能源耗水空间特征及其协调发展脱钩分析[J]. 自然资源学报,2017,32(5):800-813. (HONG Siyang, WANG Hongrui, LAI Wenli, et al. Spatial analysis and coordinated development decoupling analysis of energy-consumption water in China [J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(5):800-813. (in Chinese))

(收稿日期:2025-02-08 编辑:胡新宇)