

## 三峡水库香溪河库湾浮游植物功能群对水位变化的响应\*

方灵超<sup>1,2</sup>, 任玉峰<sup>3,4</sup>, 毕永红<sup>1</sup>, 许萍萍<sup>1,2</sup>, 张春梅<sup>1,2</sup>, 宋高飞<sup>1</sup>, 米武娟<sup>1\*\*</sup>

(1: 中国科学院水生生物研究所, 淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072)

(2: 中国科学院大学, 北京 100049)

(3: 中国长江电力股份有限公司, 宜昌 443000)

(4: 智慧长江与水电科学湖北省重点实验室, 宜昌 443000)

**摘要:** 三峡水库每年经历“水位下降(4-5月)-低水位(6-8月)-蓄水(9-10月)-高水位(11月-次年3月)”的季节波动, 年水位落差达 30 m。为探究香溪河库湾浮游植物功能群对三峡水库水位变化的响应, 于 2017 年对浮游植物群落和主要环境因子开展逐月调查。共检出浮游植物 7 门 65 属 79 种, 隶属于 21 个功能群, 其中优势功能群 10 个, 分别为 C、D、F、G、J、Lo、M、P、X2、Y。适应营养丰富环境的 C、P 功能群在全年维持优势, 指示香溪河库湾为中-富营养水体。消落期偏好水体扰动较弱、中-富营养水体的功能群(F、G、X2、Y)成为优势类群; 汛期偏好稳定富营养、耐受高光强且对冲刷敏感的功能群(G、J、M)成为优势类群; 蓄水期和高水位运行期偏好混合的中-富营养水体, 耐受低光强且对水体分层敏感的功能群(C、P、D)是优势类群; 浮游植物功能类群组成结构随水位变化明显改变。综合营养状态指数表明香溪河库湾在消落期和高水位运行期处于中营养状态, 另外两个时期处于富营养状态( $39.84 \leq TSI_M \leq 60.9$ );  $Q$  指数表明香溪河库湾整体水质为“好”( $3.02 \leq Q$  指数  $\leq 4.17$ ); 且两者均随着水位下降而降低, 表明了水质变差的趋势。RDA 分析表明水位不仅直接影响浮游植物功能群, 且通过影响总氮、透明度、高锰酸盐指数、电导率、pH 值等因子对浮游植物优势功能群及其生物量产生显著影响。本研究证实水位变化对香溪河库湾浮游植物功能群具有显著影响, 显示通过水库调度实现对浮游植物调节的可能性。

**关键词:** 三峡水库; 香溪河库湾; 水位变化; 浮游植物; 功能群; 环境因子

## Responses of phytoplankton functional groups to water level fluctuations in the Xiangxi Bay, Three Gorges Reservoir\*

Fang Lingchao<sup>1,2</sup>, Ren Yufeng<sup>3,4</sup>, Bi Yonghong<sup>1</sup>, Xu Pingping<sup>1,2</sup>, Zhang Chunmei<sup>1,2</sup>, Song Gaofei<sup>1</sup> & Mi Wujuan<sup>1\*\*</sup>

(1: State Key Laboratory of Fresh Water Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, P.R.China)

(2: University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China)

(3: China Yangtze Power Co., Ltd, Yichang 443000, P.R.China)

(4: Hubei Key Laboratory of Intelligent Yangtze and Hydroelectric Science, Yichang 443000, P.R.China)

**Abstract:** The water level in Three Gorges Reservoir exhibited drastic change (30 m) within a year, i.e. fall period of water level decrease (April to May), flood period of low water level (June to August), storage period of water level increase (September to October) and high-water period (from November to next March). To study the response of phytoplankton functional groups to changes in water level in Xiangxi Bay (XXB), Three Gorges Reservoir, the characteristics of phytoplankton and physicochemical factors were monitored monthly in 2017. The results showed that phytoplankton species were detected as 7 phyla, 65 genera, 79 species. According to the functional group classification method, the phytoplankton in XXB could be divided into 21 functional groups,

\* 2022-10-31 收稿; 2023-02-18 收修改稿。

国家自然科学基金长江水科学研究联合基金项目(U2040210)资助。

\*\* 通信作者; E-mail: miwj@ihb.ac.cn。

among which C, D, F, G, J, Lo, M, P, X2 and Y were the dominant functional groups. C and P functional groups, which are adapted to high nutrient conditions, dominated throughout the year, indicating that XXB was a moderately eutrophic water body. Functional groups (F, G, X2, Y) preferring less disturbed waters and moderately eutrophic waters during the low flow period became dominant taxa; functional groups (G, J, M) preferring stable eutrophication, tolerating high light intensity and being sensitive to scouring during the high flow period became dominant taxa; functional groups (C, P, D) preferring mixed moderately eutrophic waters, tolerating low light intensity and being sensitive to water stratification during the high flow period became dominant taxa. The compositional structure of phytoplankton functional groups changed significantly with water level fluctuations. The comprehensive trophic state index indicated that XXB was mesotrophic during the storage and flood periods, and eutrophic during the other two periods ( $39.84 \leq TSI_M \leq 60.9$ ). The ecological status index values indicated that the water quality of XXB was "good". Both indicated a deterioration in water quality with decreasing water levels. RDA analysis showed that water level not only directly affected the phytoplankton functional group, but also significantly affected the dominant phytoplankton functional group and its biomass through other factors such as total nitrogen, transparency,  $COD_{Mn}$ , conductivity and pH. The study confirmed that water level fluctuations had a significant effect on the phytoplankton functional group in Xiangxi Bay and demonstrated the possibility of phytoplankton regulation by reservoir operation.

**Keywords:** Three Gorges Reservoir; Xiangxi Bay; water level fluctuation; phytoplankton; functional groups; environmental factors

浮游植物群落结构特征和演替过程一直是水域生态学研究中的重要内容。浮游植物群落对水环境物理、化学和生物因子的变化响应敏感,但主要影响因素具有系统的特殊性和时空差异,因此,水生态系统中影响浮游植物群落因子的研究对水生态系统管理有重要意义。香溪河是三峡水库湖北省境内最大的支流,位于三峡大坝上游 38 km 处,三峡水库蓄水后,香溪河下游河段水位随之升高,流速减缓,成为三峡水库的重要组成部分。近年来,由于水力滞留时间增加,富营养程度加剧,该区域几乎每年暴发水华,严重影响水体景观和生态服务功能。显然,水动力的改变对浮游植物群落有重要的作用<sup>[1-2]</sup>,但目前对该作用的理解还有待加深。

水动力过程一方面影响水域生态系统中悬浮物质和溶解物质的运动过程来影响浮游植物的分布<sup>[3]</sup>;另一方面改变营养盐浓度和循环过程,影响浮游植物的生长和生物量。水位变化是水动力过程改变最主要的表征,对水域生态系统有重要影响<sup>[4]</sup>。Yang 等<sup>[5]</sup>研究表明水位升高会稀释营养盐,使蓝藻生物量降低。频繁的水位变动能改变水体营养盐循环过程,如:沉积物磷的吸附-解吸过程,从而影响水体中磷的浓度<sup>[6]</sup>,进而影响浮游植物。此外,水位变动还会影响水体混合状态,改变水下光照条件,影响浮游植物群落。Zhu 等<sup>[7]</sup>对三峡库区支流大宁河的研究结果表明,由于稳定的水位和高温,低水位的汛期形成热分层,浮游植物以隐藻、甲藻为代表的 Y 和 Lo 功能群为主;水库蓄水打破热分层,高水位枯水期水体混合增强、光可利用性降低,群落以适应低光的硅藻(B 和 C 功能群)为主。可见,水位变动对浮游植物的影响分为直接影响和间接影响,直接影响表现为水位变动对浮游植物分布和密度的直接稀释作用和冲刷作用<sup>[8-9]</sup>;间接影响表现为水位变动通过影响营养盐浓度、水下光照条件等影响浮游植物生长和群落组成。

本文认为水位变动是影响香溪河库湾浮游植物生物量和组成的主要驱动力,三峡水库周期性的水位变动是导致浮游植物功能群季节变化的重要原因。为探究香溪河库湾不同水文时期浮游植物功能群特征以及水位变动对浮游植物功能群组成的作用,于 2017 年 1—12 月在香溪河库湾开展逐月调查,探究 4 个水位时期:水位下降的消落期(4—5 月)、低水位的汛期(6—8 月)、水位逐渐升高的蓄水期(9—10 月)、高水位运行期(11 月—次年 3 月)的浮游植物群落功能群动态及其环境影响因子,识别水位变化对功能群结构和季节动态的作用。相关结果可为保护三峡支流水环境提供基础数据,为探究水库调度调控藻类群落和预防水华的技术方法提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样点与采样时间

本研究选取三峡支流香溪河为研究对象,在香溪河沿线共设置 8 个采样点,分别位于库湾下游(XX01~

XX03)、中游(XX04~XX06)和上游(XX07~XX08)(图1),中下游受回水区影响较大,中游有丰富的磷矿资源。自2017年1月至2017年12月,每月采样一次。香溪河XX08采样点在夏季的水深小于10 m,无法行船,在6月和8月没有样品。

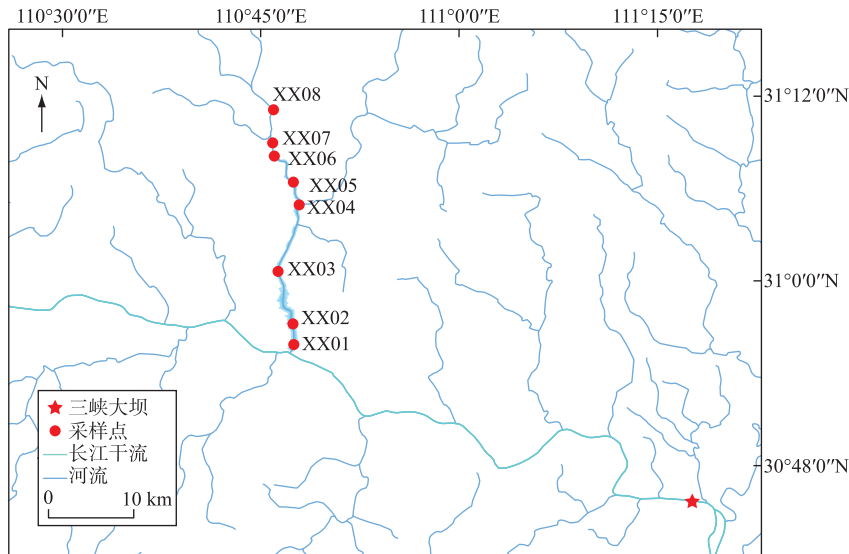


图1 香溪河库湾采样点分布示意

Fig.1 Sketch map of sampling sites distribution in Xiangxi Bay

## 1.2 样品采集与分析方法

采集1 L水样,现场用鲁哥氏液固定,并沉淀浓缩至30 mL,充分摇匀后吸取0.1 mL至浮游生物计数框,在Olympus CX21显微镜下计数。藻类鉴定方法参照文献<sup>[10]</sup>。依据Reynolds<sup>[11]</sup>等和Padisák<sup>[12]</sup>等进行功能群划分。浮游植物生物量利用体积公式将浮游植物丰度转换成生物量,其计算公式为:生物量=浮游植物生物学密度×体积×丰度×10<sup>-9</sup><sup>[13]</sup>,此处假定浮游植物生物学密度为1 g/cm<sup>3</sup>,体积单位为μm<sup>3</sup>,丰度单位为cells/L,生物量单位为mg/L。

用2.5 L有机玻璃采水器采集表层(水下0.5 m处)用于水体物理化学指标分析。参照《水和废水监测分析方法》<sup>[14]</sup>测定总磷(TP)、总氮(TN)、磷酸盐(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P)、硝酸盐(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)和高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)<sup>[14]</sup>。用美国产多参数水质测定仪Eureka Manta 2现场测定水温(WT)、溶解氧(DO)、pH值、电导率(Cond)、氧化还原电位(ORP)。用塞氏盘现场测定塞氏透明度(SD)。水位(WL)数据由中国长江三峡集团公司梯调中心提供。

## 1.3 数据处理与分析

浮游植物功能群优势度( $y$ )根据浮游植物功能群在监测期间的出现频率及相对生物量来确定,即:

$$y = f_i \cdot P_i \quad (1)$$

式中, $f_i$ 为第*i*种功能群出现的频率, $P_i$ 为第*i*种功能群生物量占总生物量的比例,当 $y > 0.02$ ,该功能群被定义为优势功能群,当 $y > 0.2$ 时,该功能群被定义为重要功能群<sup>[15]</sup>。本文浮游植物相对丰度/相对生物量计算过程为:时间上,第*m*月浮游植物相对丰度(或相对生物量)=第*m*月某浮游植物总丰度(或总生物量)/第*m*月所有浮游植物总丰度(或总生物量)( $m = 1, 2, \dots, 12$ );空间上,第*k*采样点浮游植物相对丰度(或相对生物量)=第*k*采样点某浮游植物总丰度(或总生物量)/第*k*采样点所有浮游植物总丰度(或总生物量)( $k = \text{XX01}, \text{XX02}, \dots, \text{XX08}$ )。

采用Carlson<sup>[16]</sup>提出的营养状态指数法评价香溪河的富营养化状态,经Aizaki修订后采用加权平均法计算,其计算公式分别为:

$$TSI_M(\text{Chl.}a) = 10 \times (2.46 + \ln(\text{Chl.}a) / \ln 2.5) \quad (2)$$

$$TSI_M(\text{TP}) = 10 \times (2.46 + (6.71 + 1.15 \times \ln(\text{TP})) / \ln 2.5) \quad (3)$$

$$TSI_M(\text{SD}) = 10 \times (2.46 + (3.69 - 1.53 \times \ln(\text{SD})) / \ln 2.5) \quad (4)$$

$$TSI_M = W(\text{Chl.}a) \times TSI_M(\text{Chl.}a) + W(\text{TP}) \times TSI_M(\text{TP}) + W(\text{SD}) \times TSI_M(\text{SD}) \quad (5)$$

式中,  $TSI_M$  为综合营养状态指数,  $W(X)$  为 3 个参数的权重,  $W(\text{Chl.}a) = 54.0\%$ ,  $W(\text{SD}) = 29.7\%$ ,  $W(\text{TP}) = 16.3\%$  [2,17]。评价标准为:  $TSI_M < 37$  为贫营养,  $37 \leq TSI_M < 53$  为中营养,  $TSI_M \geq 53$  为富营养。

$Q$  指数(浮游植物群落指数, phytoplankton assemblage index)由 Padisák 等推广, 用于评估水体生态健康状况 [18], 计算方法如下:

$$Q = \sum_{i=1}^s P_i \cdot F_i \quad (6)$$

式中,  $s$  为浮游植物功能群的数量,  $P_i$  为第  $i$  个功能群生物量占总生物量的比例,  $F_i$  为第  $i$  个功能群的赋值(表 1)。 $Q$  指数为 0~5 时分别表示: 0~1 差; 1~2 耐受; 2~3 中等; 3~4 好; 4~5 极好。

采用 ArcGIS 10.8 软件绘制采样点图; 利用 Excel 2021 和 Origin 2022 软件进行数据分析、统计和绘图; 差异显著性采用 Kruskal-Wallis 单因素 ANOVA 多重比较; 冗余分析(RDA)采用 Canoco 5.0 软件分析浮游植物优势种与环境因子的关系, 分析前对物种数据以及环境变量(除 pH 值外)进行  $\lg(x+1)$  转换。

## 2 结果

### 2.1 水位和环境因子变化

2.1.1 水位变化情况 根据水位变化过程, 三峡运行阶段主要分为消落期、汛期、蓄水期、高水位运行期 4 个阶段(图 2)。4—5 月为消落期, 水位由 163.66 m 降至 149.06 m, 降幅 14.6 m, 水位日变幅较小, 变化范围在 0~0.75 m/d; 6—8 月为汛期, 通过调节水库将水位控制在 145.27~156.81 m 之间, 因防洪要求, 此阶段水位日变幅有所增大, 最大日变幅达到 2.52 m/d; 9 月开始进入蓄水期, 10 月 31 日水位升高到 173.8 m, 升幅 23.43 m, 水位日变动幅度较大, 变动范围在 0.01~2.20 m/d 之间; 1—3 月和 11—12 月为高水位运行期, 11—12 月的水位介于 173.07~174.45 m 之间, 水位变幅为 1.38 m, 高水位运行期一直保持在高水位, 水位日变幅很小(0~0.28 m/d)。

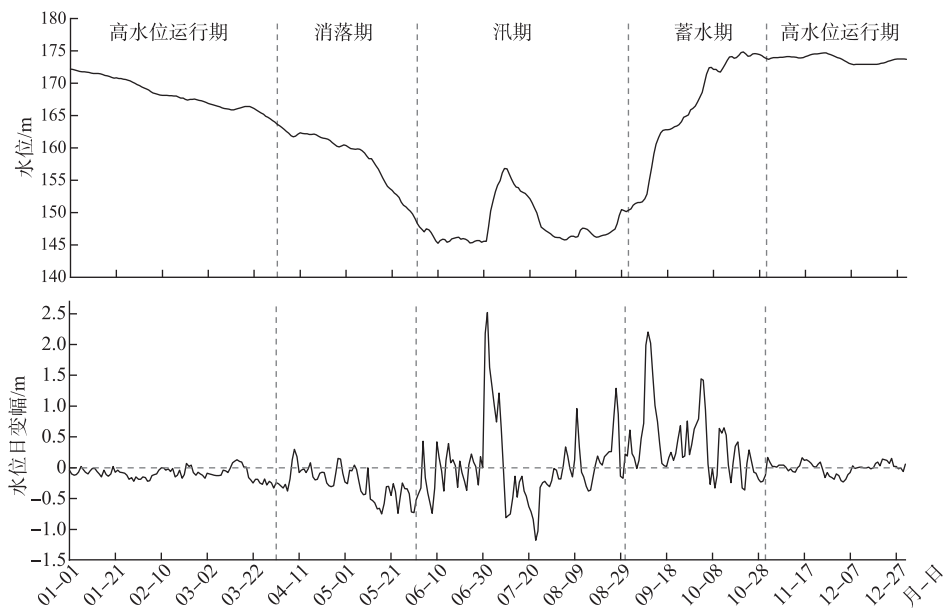


图 2 2017 年香溪河库湾水位及其日变幅

Fig.2 Water level and its daily fluctuations of Xiangxi Bay in 2017

2.1.2 环境因子 调查期间,香溪河库湾的环境因子变化如图 3 所示。时间上,汛期水温 ( $WT = (24.934 \pm$

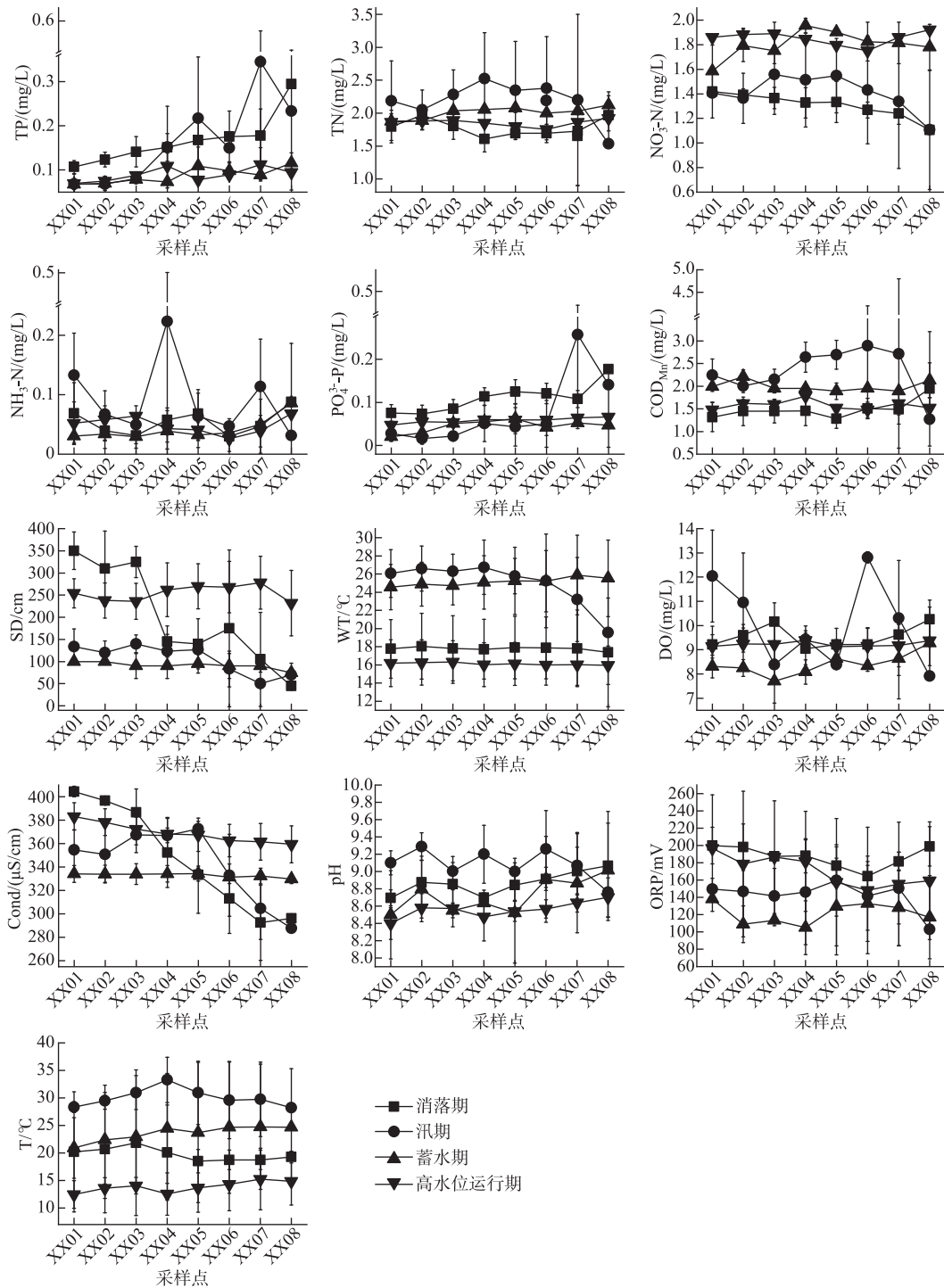


图 3 4 个水位时期香溪河库湾环境因子的空间变化

Fig.3 The spatial changes of environmental factors in Xiangxi Bay in the four water level periods

1.517)℃)显著高于消落期和高水位运行期( $P<0.05$ ),总氮总磷浓度高( $TN=(2.188\pm 0.363)$  mg/L,  $TP=(0.164\pm 0.079)$  mg/L)但透明度较低,表现为高温、富营养、低透明度。高水位运行期水温( $WT=(16.108\pm 0.126)$ ℃)显著低于其他3个时期( $P<0.05$ ),总氮总磷浓度低( $TN=(1.851\pm 0.051)$  mg/L,  $TP=(0.090\pm 0.015)$  mg/L)但透明度( $SD=(254.75\pm 16.399)$  cm)显著高于其他3个时期( $P<0.05$ ),特征为低温、低营养、高透明度。消落期和蓄水期的水温、总氮总磷浓度和透明度介于汛期和高水位运行期之间。空间上,磷浓度、透明度和电导率有明显的空间梯度,且各因子的空间梯度具有时期差异性:汛期表现为总磷和磷酸盐从上游到下游逐渐降低;消落期和汛期的透明度和电导率从上游到下游逐渐升高。

## 2.2 浮游植物特征

2.2.1 浮游植物群落结构 研究期间共检测出浮游植物7门65属79种,其中绿藻33属,占41.8%;其次是硅藻20属,占25.3%;蓝藻9属,占11.4%;甲藻6属、金藻5属、隐藻4属和裸藻2属。浮游植物丰度以硅藻、蓝藻、绿藻为主(图4),消落期硅藻相对丰度最大( $59.7\%\pm 10.5\%$ ),其次为甲藻( $20.4\%\pm 6.8\%$ )和绿藻( $12.6\%\pm 10.9\%$ );汛期蓝藻相对丰度( $50.2\%\pm 11.6\%$ )最大,硅藻相对丰度下降( $30.9\%\pm 8.4\%$ );蓄水区硅藻相对丰度增大( $78.1\%\pm 1.9\%$ ),蓝藻( $11.0\%\pm 0.9\%$ )和绿藻( $4.7\%\pm 1.9\%$ )减少;高水位运行期主要是硅藻( $73.2\%\pm 0.9\%$ )。说明香溪河水位升高时以硅藻为主,随着水位下降,蓝藻和绿藻占比增大。从空间上看,下游表现为硅藻相对丰度大,蓝藻相对丰度小;而中游和上游蓝藻逐渐增多,硅藻相对丰度逐渐减小(除XX08),绿藻相对丰度在样点间差别不大。

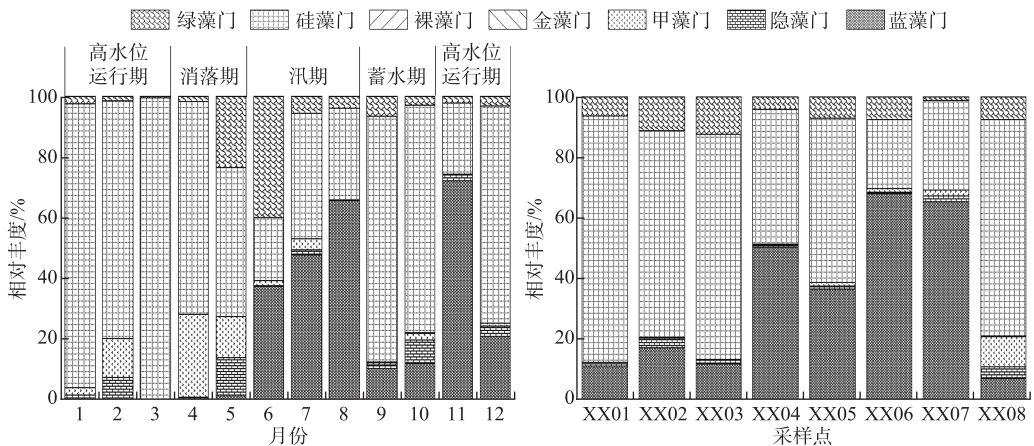


图4 香溪河库湾浮游植物相对丰度的时空格局

Fig.4 Spatiotemporal distribution pattern of the relative abundance of phytoplankton in Xiangxi Bay

2.2.2 浮游植物功能群划分 调查期间香溪河库湾共检出21个功能类群(表1),分别是C、D、E、F、G、H1、J、L<sub>M</sub>、Lo、M、MP、P、S1、S<sub>N</sub>、T、T<sub>B</sub>、W1、W2、X1、X2、Y。优势功能群10个( $y>0.02$ ),分别为C、D、F、G、J、Lo、M、P、X2、Y,均为适应中-富营养环境类群。优势功能群组成随时间的变化为C、F、G、Lo、P、X2、Y(消落期:4-5月)→C、D、G、J、M、P(汛期:6-8月)→C、Lo、P、Y(蓄水区:9-10月)→C、D、Lo、M、P、Y(高水位运行期:11-3月)(图5)。C、P功能群是4个时期的共有优势功能群,说明香溪河库湾4个时期均处于中-富营养状态。消落期优势功能群生活在偏扰动较弱、中-富营养水体;汛期的优势功能群偏好稳定富营养高温水体、耐受高光强且对水体冲刷敏感;蓄水区和高水位运行期的优势功能群偏好混合的中-富营养水体中,耐受低光强且对水体分层敏感。水位由高到低,功能群从偏好混合状态水体转为偏好静止、富含营养盐的水体。从空间上看,优势功能群有5种,分别为C、G、M、P、Y。沿线变化为C、P(库湾下游:XX01~XX03)→C、P、M、G(库湾中游:XX04~XX06)→C、M、P、G、Y(库湾上游:XX07~XX08)。下游的优势功能群为偏好混合水体、耐受冲刷,对分层敏感的类型;中游和上游的优势功能群偏好营养盐丰富、稳定、分层的水体。

表 1 香溪河库湾浮游植物功能群分组  
Tab.1 Functional group composition of phytoplankton in Xiangxi Bay

功能群	代表性种(属)	生境特征	赋值 <i>F</i>
C	小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.	混合、富营养、中小型水体	5
D	脆杆藻 <i>Fragilaria</i> sp.	含有富营养盐、透明度低	2
E	锥囊藻 <i>Dinobryon</i> sp.	贫中营养型水体	3
F	月牙藻 <i>Selenastrum</i> sp., 球囊藻 <i>Sphaerocystis</i> sp.	混合、中富营养型湖泊	5
G	实球藻 <i>Pandorina</i> sp., 空球藻 <i>Eudorina</i> sp.	富营养、停滞水体	1
H1	拟鱼腥藻 <i>Anabaenopsis</i> sp.	富营养、分层、含氮低、浅水	1
J	栅藻 <i>Scenedesmus</i> sp., 四星藻 <i>Tetrastrum</i> sp.	中到富营养、分层	1
L <sub>M</sub>	蓝纤维藻 <i>Rhabdogloea</i> sp.	富到超富营养、中小型水体	0
Lo	色球藻 <i>Chroococcus</i> sp., 拟多甲藻 <i>Peridiniopsis</i> sp.	贫到富营养、中到大型水体	0
M	微囊藻 <i>Microcystis</i> sp.	富到超富营养、中小型水体	0
MP	卵形藻 <i>Cocconeis</i> sp.	搅动、浑浊、浅水	5
P	直链藻 <i>Aulacoseira</i> sp., 新月藻 <i>Closterium</i> sp.	持续或半持续混合水体	5
S1	假鱼腥藻 <i>Pseudanabaena</i> sp.	中富营养、混合浑浊、透明度低	0
S <sub>N</sub>	尖头藻 <i>Raphidiopsis</i> sp.	温度较高、混合水体	0
T	转板藻 <i>Mougeotia</i> sp.	光限制、持续混合水体	5
T <sub>B</sub>	舟形藻 <i>Navicula</i> sp.	强急流	5
W1	裸藻 <i>Euglena</i> sp.	有机污染、浅水	0
W2	囊裸藻 <i>Trachelomonas</i> sp.	中营养、浅水	1
X1	小球藻 <i>Chlorella</i> sp., 纤维藻 <i>Ankistrodesmus</i> sp.	超富营养、浅水	3
X2	尖尾蓝隐藻 <i>Chroomonas acuta</i>	中富营养、浅水	3.5
Y	隐藻 <i>Cryptomonas</i> sp.	静水环境	2

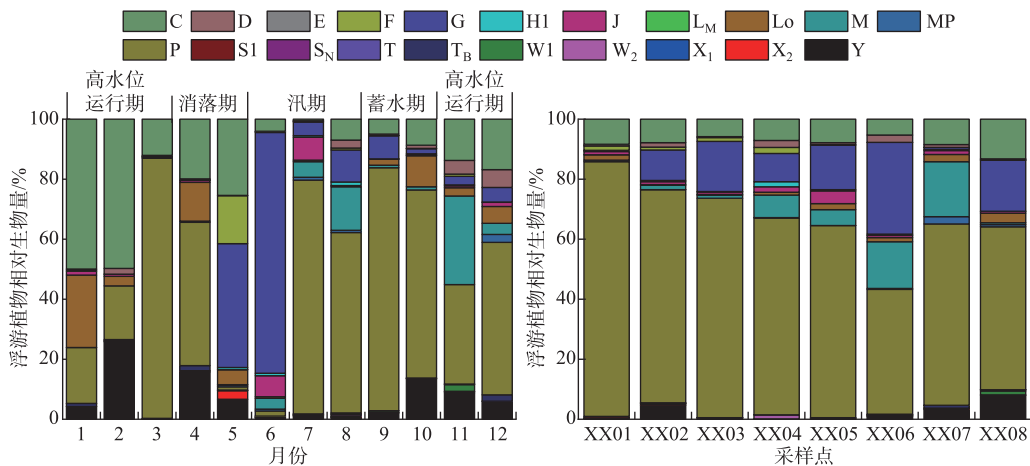


图 5 香溪河库湾浮游植物不同功能群生物量占比的时空分布

Fig.5 Spatiotemporal distribution of biomass ratio of different phytoplankton functional groups in Xiangxi Bay

2.2.3 香溪河库湾水质评价 基于浮游植物功能群 *Q* 指数和综合营养状态指数 (*TSI<sub>M</sub>*) 对香溪河库湾的水质进行评价。*Q* 指数的范围为 1.25~4.98 (图 6), 消落期、汛期、蓄水期和高水位运行期 *Q* 指数分别为  $3.33 \pm 0.51$ ,  $3.02 \pm 1.27$ ,  $4.17 \pm 0.27$ ,  $3.84 \pm 0.73$ , 均值均大于 3, 说明香溪河库湾 4 个时期的水质整体处于“好”的级别, 蓄水期的水质能达到“极好”的状态, 消落期和高水位运行期水质稍差, 汛期的水质相对最差; *TSI<sub>M</sub>* 结果确认消落期 ( $TSI_M = 52.02 \pm 11.84$ ) 和高水位运行期 ( $TSI_M = 39.84 \pm 7.96$ ) 均值处于中营养状态, 汛期 ( $TSI_M =$

60.9±6.14)和蓄水期( $TSI_M = 55.46 \pm 7.2$ )为富营养状态,香溪河库湾整体处于中-富营养状态。空间上, $Q$ 指数的范围为2.77~4.80(图6),其中,下、中和上游的 $Q$ 指数分别为 $4.42 \pm 0.27$ 、 $3.51 \pm 0.52$ 、 $3.76 \pm 0.02$ ;3个河段的水质均值均大于3,说明香溪河库湾各河段的水质处于“好”的级别; $TSI_M$ 在库湾下游( $47.14 \pm 11.1$ )和中游( $49.11 \pm 12.28$ )处于中营养状态,在上游处于( $54.01 \pm 12.03$ )富营养状态。香溪河库湾整体表现为 $Q$ 指数越大, $TSI_M$ 越小,结果表明香溪河库湾在高水位时期的水质优于低水位时期,库湾中下游水质优于上游。

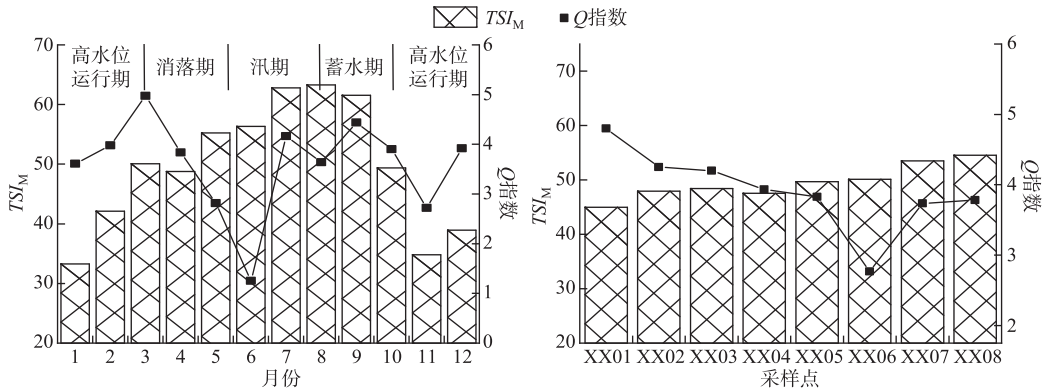


图6  $Q$ 指数和综合营养状态指数( $TSI_M$ )的时空分布

Fig.6 Spatiotemporal distribution of  $Q$  index and comprehensive trophic state index

### 2.3 浮游植物优势功能群与环境因子之间的关系

为了探究水位和各环境因子对香溪河库湾浮游植物群落分布的影响,将优势功能群生物量进行去除趋势对应分析(DCA),结果排序轴长度小于3,表明优势功能群的分布可使用线性模型。水位和13个环境因子(TP、 $PO_4^{3-}$ -P、 $NH_3$ -N、 $NO_3$ -N、TN、 $COD_{Mn}$ 、SD、WT、DO、Cond、pH值、T、ORP)采用蒙特卡洛置换检验进行筛选( $P < 0.05$ ),结果确定WL、WT、pH值、Cond、TN、SD、 $COD_{Mn}$ 是具有显著解释性的环境驱动因子。第1排序轴与第2排序轴的特征值分别为0.3588和0.0496。pH值、TN、 $COD_{Mn}$ 、WT、Cond与第1、2排序轴均呈正相关;WL与第1、2排序轴均呈负相关;SD与第1排序轴呈负相关,与第2排序轴呈正相关。由图7可以看出,J、F、G、M、D、X2、P、C功能群与WL呈负相关关系,WL与TN、pH值、 $COD_{Mn}$ 、Cond呈负相关关系。

## 3 讨论

### 3.1 浮游植物优势功能群时空变化

浮游植物群落结构及功能群组成变化主要是由水体营养盐、稳定性及浮游植物形态、生理适应性、营养盐吸收速率等相互作用的结果<sup>[19]</sup>。本次调查中,C、P功能群在4个时期均为优势类群,P功能群(以直链藻为代表)中的种类多具硅质外壳,质量较大且易在静水条件下沉降,在扰动水体中能抵抗水流冲刷并

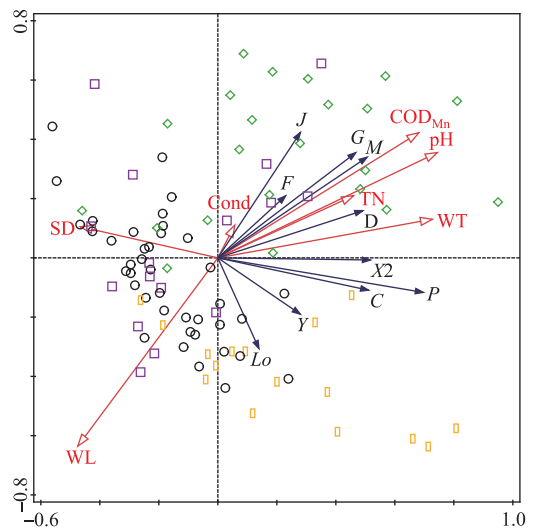


图7 香溪河库湾浮游植物优势功能群与环境因子RDA分析

(紫色标记代表消落期,绿色标记代表汛期,黄色标记代表蓄水期,黑色标记代表高水位运行期)

Fig.7 RDA analysis of dominant functional groups and environment factors in Xiangxi Bay

(purple markers represented the falling period, green markers represented the flooding period, yellow markers represented the storage period, black markers represent the high water level period)

占据优势地位,适合营养丰富水域<sup>[12]</sup>,通常是低纬度大型中营养湖泊中常见的丝状硅藻<sup>[20]</sup>,对光强降低和水体扰动有高度适应性;C 功能群指示混合、富营养的水体,对水体分层敏感。这两个功能群的全年优势地位指示水体环境营养优良。Lo、Y 功能群是消落期、蓄水期和高水位运行期 3 个时期共有的优势功能群,Lo 适应的生境为深水体和浅水水体,贫营养到富营养,中等到大型湖泊,生境较广,所以出现频率较高。以隐藻为代表的 Y 功能群生境范围同样广泛,因为较高的比表面积能快速吸收营养并生长,同时鞭毛也能增加该群体的竞争力<sup>[12,21]</sup>,所以在 3 个时期均为优势类群。高水位运行期的优势功能群 C、P(大型群体硅藻)占绝对优势,低温和混合水体环境为 C、P、D 和 Lo 功能群提供了适宜的条件,C、P 功能群的绝对优势地位说明高水位运行期为低温扰动水体。消落期除了 C、P 功能群外,G(以实球藻、空球藻等为代表)、F(以卵囊藻、月牙藻等为代表)、Y(以隐藻为代表)和 X2(以衣藻等为代表)功能群优势度升高,是偏好较弱扰动水体的类群且适宜生存在中-富营养水体,该结果说明消落期水位降低后水体趋于稳定,同时受气温升高的影响,水体由混合状态向热分层状态转变,良好的营养环境和稳定水体为 G、F、Y 和 X2 功能群提供了适宜的生境。汛期优势类群为 C、D、G、J、M、P 功能群,其中 M、G、J 功能群(群体蓝绿藻)优势度增大,P、C 功能群优势度较高水位时期减小,汛期水位稳定在 145 m 左右,波动很小,库湾进入了水体稳定期,水体稳定是 M 功能群(以微囊藻为代表)适宜生存的条件之一<sup>[22]</sup>,且这个时期水温升高至 25℃ 左右,达到 M 功能群的最适温度。J 功能群(以栅藻为代表)指示浑浊富营养水体。G 功能群偏好营养盐丰富的静止水体,适合生存在水库的稳定时期<sup>[12]</sup>。汛期较高的温度、营养盐浓度和水体稳定分层为这些类群的发展提供条件。蓄水期的优势功能群为 C、Lo、P、Y,又转变为 C、P 功能群占绝对优势,因为蓄水期快速的水位抬升、水体扰动和混合条件适合 C、P 功能群的生长繁殖;降雨导致高泥沙含量的地表径流水汇入库湾,使得水体浑浊,C、P 功能群是长链或辐射状的硅藻群体,能大面积接受光照,充分利用浑浊水体中不稳定的低光照进行光合作用<sup>[23]</sup>,所以 C、P 功能群在蓄水期优势度高。结果表明香溪河库湾浮游植物群落结构和功能群组成有明显的时间差异。

空间上,C、P 功能群为整个库湾的优势功能群,同样表明香溪河库湾处于中-富营养状态。库湾下游以群体硅藻为代表的 C、P 功能群优势度高,由于香溪河与三峡库区干流进行水体交换,下游受干流影响而处于混合状态,所以 C、P 功能群能抵抗这种扰动水体的冲刷作用并占据优势地位<sup>[12]</sup>。上、中游出现以蓝、绿藻为代表的优势功能群 M、G、M 功能群(以微囊藻为代表)的生长在满足营养条件时受物理因子的影响(包括水体稳定性)<sup>[24]</sup>,上、中游水体稳定性好,水交换率低且富营养程度大,微囊藻的悬浮机制能调节其在水体中的上浮与下沉,导致蓝藻优势度增高。G 功能群适宜生存在富营养静止水体,所以上、中游 G、M 功能群(以实球藻、微囊藻等为代表)优势度高。Y 功能群是上游的优势功能群,适宜生活在静水水体,所以在上游的优势度高。

### 3.2 水位与浮游植物功能群和环境因子相关性

水位变动会直接影响浮游植物功能群的生物量,如直接稀释和冲刷作用<sup>[8-9]</sup>。RDA 分析结果表明优势功能群生物量与水位呈负相关关系。低水位汛期由于稳定的水位和高温而形成热分层,藻类生长增殖快,浮游植物生物量大。蓄水后水位快速上升,稀释了水库水体中藻类的密度,使浮游植物生物量下降;另一方面,水库蓄水打破了水体热分层使水体深度混合,不利于对扰动敏感的类群大量积累,同时伴随着水温和营养盐浓度下降,进一步导致浮游植物生物量下降。

另一方面,水位变动会通过改变水体理化因子间接影响浮游植物功能群。首先,RDA 分析结果表明水位与 TN 呈负相关关系,低水位汛期的 TN 浓度高于其他 3 个时期。汛期的优势功能群 M、G、J 等偏好富营养水体,蓄水期之后水位上升,水量增大稀释营养盐,造成水体中 TN 浓度减小,进而影响浮游植物生物量。Yang<sup>[5]</sup>探究了水位变化与蓝藻水华的关系,证明水位升高会通过稀释营养而削弱蓝藻水华,表现为水位升高,TN 浓度下降,浮游植物生物量减小。Wu 等<sup>[25]</sup>的研究表明,长江中下游多个湖泊均表现为水位升高而营养盐降低的现象,均与本研究结果一致。其次,水位与透明度呈显著正相关,高水位运行期透明度显著高于其他 3 个水位时期( $P < 0.05$ )。由于高水位时期流速减缓,水体中颗粒物沉降使得透明度增加<sup>[26]</sup>;透明度及其影响下的水下光强对浮游植物群落的功能群分布具有决定性影响<sup>[27]</sup>。再者,水位与 pH 值呈负相关关系,低水位汛期的 pH 值最高,显著高于蓄水期和高水位运行期( $P < 0.05$ ),由于汛期浮游植物大量繁殖,光合作用增强对 CO<sub>2</sub> 的需求量加大,导致水体 pH 值升高<sup>[28-29]</sup>,水体 pH 值是浮游植物生长代谢的重要因素,

过高或过低都会抑制浮游植物的光合作用<sup>[30]</sup>;Brasil等<sup>[29]</sup>对40个人工湖的研究发现,低水位时期的高pH值有利于蓝藻的生长,与本研究结果一致。此外,RDA分析结果表明水位与COD<sub>Mn</sub>呈负相关关系,COD<sub>Mn</sub>反映了水体中有机物的含量<sup>[31]</sup>,也是影响浮游植物优势功能群的环境因子,在适当范围内有机物质能够促进浮游植物的生长代谢<sup>[32]</sup>,浮游植物生物量的大量增加也会使得水体COD<sub>Mn</sub>升高<sup>[33]</sup>,这可能是多数功能群与COD<sub>Mn</sub>呈正相关的原因。水位与Cond呈负相关关系,Cond是水体中浮游植物生长密切相关的环境变量,取决于溶解在水中的离子种类、浓度和水温等<sup>[19]</sup>。有研究表明,Cond与水体营养盐浓度成正比<sup>[34]</sup>,香溪河库湾低水位时期营养程度高,所以Cond高。除水位,水温也是浮游植物功能群的影响因子,水温通过控制光合作用的酶促反应或呼吸作用的强度来影响浮游植物的生长,低水位的汛期温度升高,喜高温的蓝藻和绿藻繁殖旺盛,有利于提高功能群M、G的优势地位。在浮游植物功能群响应水位变化的过程中,温度起了重要的作用,但此内容超出本文研究范围,有待后续研究分析。

由此可见,水位变动不仅对水体浮游植物功能群和生物量有直接的影响。而且,可以通过影响水体的理化性状改变水体微生境间接影响浮游植物;另一方面,本研究也证实了通过水位调节,可调控浮游植物功能群并影响其生物量,证实了通过水库调度防控藻类水华存在理论可行性。

## 4 结论

1) 本研究揭示了香溪河库湾浮游植物功能群分布具有时空异质性,2017年香溪河库湾划分为21个功能群,优势功能群10个,指示香溪河库湾处于中-富营养状态。4个水文时期的水体特征分别为:消落期为弱扰动、中-富营养水体;汛期是稳定富营养水体;蓄水期和高水位运行期是混合、中-富营养水体。空间上,靠近河口的下游区域为扰动水体;中、上游为稳定富营养水体。

2) 水位变动不仅对浮游植物功能群有直接影响,而且,通过改变水体理化性状间接影响功能群的演变。证实了通过水库调度实现对浮游植物调节的可能性。

## 5 参考文献

- [1] Yang M, Bi YH, Hu JL *et al.* Diel vertical migration and distribution of phytoplankton during spring blooms in Xiangxi Bay, Three Gorges Reservoir. *J Lake Sci*, 2011, **23**(3): 375-382. DOI: 10.18307/2011.0309. [杨敏, 毕永红, 胡建林等. 三峡水库香溪河库湾春季水华期间浮游植物昼夜垂直分布与迁移. 湖泊科学, 2011, **23**(3): 375-382.]
- [2] Cai QH, Hu ZY. Studies on eutrophication problem and control strategy in the Three Gorges Reservoir. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, **30**(1): 7-11. DOI:10.3321/j.issn:1000-3207.2006.01.002. [蔡庆华, 胡征宇. 三峡水库富营养化问题与对策研究. 水生生物学报, 2006, **30**(1): 7-11.]
- [3] Dubnyak S, Timchenko V. Ecological role of hydrodynamic processes in the Dnieper Reservoirs. *Ecological Engineering*, 2000, **16**(1): 181-188. DOI: 10.1016/s0925-8574(00)00103-8.
- [4] Gulati RD, Pires LMD, Van Donk E. Lake restoration studies: Failures, bottlenecks and prospects of new ecotechnological measures. *Limnologia*, 2008, **38**(3/4): 233-247. DOI: 10.1016/j.limno.2008.05.008.
- [5] Yang J, Lv H, Yang J *et al.* Decline in water level boosts cyanobacteria dominance in subtropical reservoirs. *Science of the Total Environment*, 2016, **557/558**: 445-452. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.03.094.
- [6] Yuan HZ, Wang HX, Zhou YW *et al.* Water-level fluctuations regulate the availability and diffusion kinetics process of phosphorus at lake water-sediment interface. *Water Research*, 2021, **200**: 117258. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117258.
- [7] Zhu KX, Bi YH, Hu ZY. Responses of phytoplankton functional groups to the hydrologic regime in the Daning River, a tributary of Three Gorges Reservoir, China. *Science of the Total Environment*, 2013, **450**: 169-177. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.01.101.
- [8] Stevic F, Mihaljevic M, Spoljaric D. Changes of phytoplankton functional groups in a floodplain lake associated with hydrological perturbations. *Hydrobiologia*, 2013, **709**(1): 143-158. DOI: 10.1007/s10750-013-1444-6.
- [9] Leupold M, Hindersin S, Gust G *et al.* Influence of mixing and shear stress on *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus obliquus*, and *Chlamydomonas reinhardtii*. *Journal of Applied Phycology*, 2013, **25**(2): 485-495. DOI: 10.1007/s10811-012-9882-5.
- [10] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类: 系统分类及生态. 北京: 科学出版社, 2006.
- [11] Reynolds CS, Huszar V, Kruk C *et al.* Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 2002, **24**(5): 417-428. DOI: 10.1093/plankt/24.5.417.
- [12] Padisa K, Crossetti LO, Naselli-Flores L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: A critical review with updates. *Hydrobiologia*, 2009, **621**: 1-19. DOI: 10.1007/s10750-008-9645-0.

- [13] Li C, Li SJ, Hu R *et al.* Comparative analysis of four methods for calculating biomass of phytoplankton community. *J Lake Sci*, 2013, **25** (6): 927-935. DOI: 10.18307/2013.0617. [陈纯, 李思嘉, 胡韧等. 四种浮游植物生物量计算方法的比较分析. 湖泊科学, 2013, **25**(6): 927-935.]
- [14] 《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法: 第四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [15] Bing H, Zhou J, Wu Y *et al.* Current state, sources, and potential risk of heavy metals in sediments of Three Gorges Reservoir, China. *Environmental Pollution*, 2016, **214**: 485-496. DOI: 10.1016/j.envpol.2016.04.062.
- [16] Carlson RE. Trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 1977, **22**(2): 361-369. DOI: 10.4319/lo.1977.22.2.0361.
- [17] Cai QH, Liu JK, King L. A comprehensive model for assessing lake eutrophication. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(12): 1674-1678. DOI: 10.13287/j.1001-9332.2002.0390. [蔡庆华, 刘建康, Lorenz King. 评价湖泊富营养化的一个综合模型. 应用生态学报, 2002, **13**(12): 1674-1678.]
- [18] Padiasak J, Borics G, Grigorszky I *et al.* Use of phytoplankton assemblages for monitoring ecological status of lakes within the Water Framework Directive: The assemblage index. *Hydrobiologia*, 2006, **553**: 1-14. DOI: 10.1007/s10750-005-1393-9.
- [19] Fan XC, Dai CF, Lu XX *et al.* Study on phytoplankton functional group succession and driving parameters in the Jinhewan Urban Wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(16): 5726-5738. DOI: 10.5846/stxb201710251916. [范小晨, 代存芳, 陆欣鑫等. 金河湾城市湿地浮游植物功能类群演替及驱动因子. 生态学报, 2018, **38**(16): 5726-5738.]
- [20] Huszar VLM, Silva LHS, Marinho M *et al.* Cyanoprokaryote assemblages in eight productive tropical Brazilian waters. *Hydrobiologia*, 2000, **424**: 67-77. DOI: 10.1023/A:1003996710416.
- [21] Bovo-Scomparin VM, Train S. Long-term variability of the phytoplankton community in an isolated floodplain lake of the Ivinhema River State Park, Brazil. *Hydrobiologia*, 2008, **610**: 331-344. DOI: 10.1007/s10750-008-9448-3.
- [22] Lu WK, Yu LX, Ou XK *et al.* Relationship between occurrence frequency of cyanobacteria bloom and meteorological factors in Lake Dianchi. *J Lake Sci*, 2017, **29**(3): 534-545. DOI: 10.18307/2017.0302. [鲁韦坤, 余凌翔, 欧晓昆等. 滇池蓝藻水华发生频率与气象因子的关系. 湖泊科学, 2017, **29**(3): 534-545.]
- [23] Gomez N, Hualde P, Licursi M *et al.* Spring phytoplankton of Rio de la Plata: A temperate estuary of South America. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2004, **61**(2): 301-309. DOI: 10.1016/j.ecss.2004.05.007.
- [24] Steinberg CEW, Hartmann HM. Planktonic bloom-forming Cyanobacteria and the eutrophication of lakes and rivers. *Freshwater Biology*, 1988, **20**(2): 279-287. DOI: 10.1111/j.1365-2427.1988.tb00452.x.
- [25] Wu SK, Xie P, Wang SB *et al.* Changes in the patterns of inorganic nitrogen and TN/TP ratio and the associated mechanism of biological regulation in the shallow lakes of the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Science in China Series D*, 2006, **49**(1): 126-134. DOI: 10.1007/s11430-006-8112-x.
- [26] Liu X, Liu BG, Chen YW *et al.* Responses of nutrients and chlorophyll-*a* to water level fluctuations in Poyang Lake. *Environmental Science*, 2016, **37**(6): 2141-2148. DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.06.017. [刘霞, 刘宝贵, 陈宇炜等. 鄱阳湖浮游植物叶绿素 *a* 及营养盐浓度对水位波动的响应. 环境科学, 2016, **37**(6): 2141-2148.]
- [27] Li FP, Gao Y, Zhang HP *et al.* Simulation experiment on the effect of flow velocity on phytoplankton growth and composition. *J Lake Sci*, 2015, **27**(1): 44-49. DOI: 10.18307/2015.0106. [李飞鹏, 高雅, 张海平等. 流速对浮游藻类生长和种群变化影响的模拟试验. 湖泊科学, 2015, **27**(1): 44-49.]
- [28] Paerl HW, Huisman J. Climate change: A catalyst for global expansion of harmful cyanobacterial blooms. *Environmental Microbiology Reports*, 2009, **1**(1): 27-37. DOI: 10.1111/j.1758-2229.2008.00004.x.
- [29] Brasil J, Attayde JL, Vasconcelos FR *et al.* Drought-induced water-level reduction favors cyanobacteria blooms in tropical shallow lakes. *Hydrobiologia*, 2016, **770**(1): 145-164. DOI: 10.1007/s10750-015-2578-5.
- [30] Feng Y, Xiao LJ, Wei GF *et al.* Responses of phytoplankton community to increasing water level in the lacustrine zone near the dam of a large tropical reservoir: Gaozhou Reservoir, South China. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2014, **20**(3): 529-536. DOI: 10.3724/SP.J.1145.2014.09033. [冯喻, 肖利娟, 韦桂峰等. 高州水库水位上升期坝前深水区浮游植物群落的响应特征. 应用与环境生物学报, 2014, **20**(3): 529-536.]
- [31] 兰子丽. 生活废水分析中化学需氧量与生化需氧量的相应关系分析. 环境与发展, 2018, **30**(3): 123, 126.
- [32] Han HH, Fan YW. Phytoplankton community structure in autumn of Anxing Wetland, Heilongjiang Province. *J Lake Sci*, 2012, **24**(4): 577-585. DOI: 10.18307/2012.0411. [韩欢欢, 范亚文. 黑龙江省安兴湿地秋季浮游植物群落结构. 湖泊科学, 2012, **24**(4): 577-585.]
- [33] Wang XL, Zhang M, Yin J. Composition and influential factors of phytoplankton function groups in Lake Chaohu. *J Lake Sci*, 2018, **30** (2): 431-440. DOI: 10.18307/2018.0214. [王徐林, 张民, 殷进. 巢湖浮游藻类功能群的组成特性及其影响因素. 湖泊科学, 2018, **30**(2): 431-440.]
- [34] Hu SH, Gao YN, Zhang SY *et al.* Distribution of nutrients and ecological indexes of Diatom about Moon Lake in Wuhan. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, **18**(3): 856-864. [胡胜华, 高云霓, 张世羊等. 武汉月湖水体营养物质的分布与硅藻的生态指示. 生态环境学报, 2009, **18**(3): 856-864.]