

三峡库区支流龙河和汝溪河浮游植物功能群的季节动态特征及其与环境的相关关系

刘香正 史邵华 张莘渲 王佳慧 马兰 黄钰轩 刘梅 阿依巧丽 曾波

SEASONAL DYNAMICS OF PHYTOPLANKTON FUNCTIONAL GROUPS IN TRIBUTARIES OF THE THREE GORGES RESERVOIR: LONGHE RIVER AND RUXI RIVER, AND THEIR CORRELATIONS WITH ENVIRONMENTAL FACTORS

LIU Xiang-Zheng, SHI Shao-Hua, ZHANG Yu-Xuan, WANG Jia-Hui, MA Lan, HUANG Yu-Xuan, LIU Mei, AYI Qiao-Li, ZENG Bo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7541/2025.2024.0213>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

四川丘陵区水库浮游植物功能群季节演替特征及驱动因子

SEASONAL SUCCESSION OF PHYTOPLANKTON FUNCTIONAL GROUPS AND ITS DRIVING FACTORS IN RESERVOIRS IN HILLY REGIONS OF SICHUAN PROVINCE

水生生物学报. 2021, 45(4): 826–837 <https://doi.org/10.7541/2021.2020.236>

刘家峡水库浮游植物群落结构与环境因子的关系

COMMUNITY STRUCTURES OF PHYTOPLANKTON AND ITS RELATIONSHIP WITH ENVIRONMENTAL FACTORS IN THE LIUJIAXIA RESERVOIR

水生生物学报. 2021, 45(6): 1299–1307 <https://doi.org/10.7541/2021.2021.026>

黄河流域河南段浮游藻类功能群分布特征及影响因子

DISTRIBUTION CHARACTERISTICS AND INFLUENCING FACTORS OF PHYTOPLANKTON FUNCTIONAL GROUPS OF THE YELLOW RIVER BASIN IN HENAN PROVINCE

水生生物学报. 2024, 48(3): 513–523 <https://doi.org/10.7541/2023.2022.0318>

西安城市河流浮游植物群落结构及其与环境因子的关系

PHYTOPLANKTON COMMUNITY STRUCTURE AND ITS RELATIONSHIP WITH ENVIRONMENTAL FACTORS IN XI' AN URBAN RIVERS SYSTEM

水生生物学报. 2023, 47(4): 543–555 <https://doi.org/10.7541/2023.2021.0345>

浮游植物优势属演替和丝状蓝藻增殖的驱动因子研究——以千岛湖为例

THE DRIVING FORCES FOR DOMINANT GENUS SUCCESSION OF PHYTOPLANKTON AND PROLIFERATION OF FILAMENTOUS CYANOBACTERIA: A CASE STUDY OF QIANDAOHU RESERVOIR

水生生物学报. 2023, 47(12): 1877–1888 <https://doi.org/10.7541/2023.2023.0089>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

doi: 10.7541/2025.2024.0213

CSTR: 32229.14.SSSWXB.2024.0213

三峡库区支流龙河和汝溪河浮游植物功能群的季节动态特征 及其与环境的相关关系

刘香正 史邵华 张葦渲 王佳慧 马 兰 黄钰轩 刘 梅
阿依巧丽 曾 波

(西南大学生命科学学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆市三峡库区植物生态与资源重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 根据不同季节的环境特点, 研究于2021年春季(3月)、夏季(7月)、秋季(9月)和冬季(11月)对龙河和汝溪河浮游植物和水环境进行调查研究。结果表明, 龙河共采集到浮游植物111种, 隶属6门; 汝溪河共采集到浮游植物142种, 隶属7门。依照Padisak理论, 在龙河和汝溪河共发现浮游植物功能群23个。龙河浮游植物优势功能群的季节演变规律: 春季(B、L_O、MP、X1)→夏季(D、J、S_N、T_B)→秋季(D、J、MP、P、T_B)→冬季(B、D、MP、T_B); 汝溪河浮游植物优势功能群的季节演变规律: 春季(B、D、X1、X2)→夏季(G、J、S1、X2)→秋季(S1、G、P)→冬季(D、J、MP、S1)。其中龙河和汝溪河的回水区受三峡工程蓄水的影响, 浮游植物功能群呈现出更为相似的特征。根据浮游植物功能群与环境因子冗余分析(RDA)可知, 水温(WT)、溶解氧(DO)、酸碱度(pH)、铵态氮(NH₄⁺-N)、磷酸盐(PO₄³⁻-P)是龙河和汝溪河浮游植物功能群分布的主要影响因素。研究为保护长江水生生态系统提供理论依据。

关键词: 浮游植物; 功能群; 季节动态; 三峡库区

中图分类号: Q178.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2025)05-052512-12



浮游植物在水生生态系统中发挥着重要的功能, 它不仅是水生生态系统的初级生产者, 而且是水中溶解氧的供应者, 在水生生态系统的能量流动、物质循环等方面有着至关重要的作用^[1]。另外, 浮游植物群落是一种指示性生物类群, 其物种组成、优势度、数量分布等特征是判断水生生态系统健康状态的重要指标。浮游植物还具有个体较小、结构相对稳定、分布广泛且对环境变化响应十分迅速的特点, 常被用于探究生物与环境的相关关系^[2]。有研究表明, 影响浮游植物群落变化的主要驱动因素通常为可利用的营养物质、温度、

光照、流速等^[3]。

传统的基于系统分类学的浮游植物群落研究常以种属作为最小研究单元^[4], 然而在实践中, 基于种属的分类有时并不能很好地解释浮游植物群落演替与环境变化间的相互关系^[5]。生态学家将生活习性和适应对策相近的浮游植物划分为相同“功能群”^[6], 并以此为基础进行浮游植物对环境变化响应的研究^[7]。因此, 浮游植物功能群是具有相近的形态、生理和生态习性特征的物种或群体的集合, 而并不以是否属于相同的种属等分类阶元作为划分依据。功能群分类方法包含两个主要观点:

收稿日期: 2024-05-27; **修订日期:** 2024-12-02

基金项目: 水利部三峡工程运行安全综合监测重点支流水质生态监测(JJ2013-016); 国家科技基础性工作专项(2014FY1202002); 国务院三峡办三峡后续工作库区生态与生物多样性保护专项(500002013BB5200002); 重庆市大学生创新创业训练计划项目(S202410635411)资助 [Supported by the Key Tributaries Water Quality and Ecological Monitoring Programme in Operation Safety Comprehensive Monitoring of the Three Gorges Project by Ministry of Water Resources (JJ2013-016); National Science and Technology Basic Work Special Project (2014FY1202002); Project for Ecological and Biodiversity Conservation in the Three Gorges Reservoir Area by State Council Three Gorges Project Construction Committee Executive Office (500002013BB5200002); Chongqing College Student Innovation and Entrepreneurship Training Programme (S202410635411)]

作者简介: 刘香正(2000—), 男, 硕士研究生; 主要从事环境生态学研究。E-mail: 671620680@qq.com

通信作者: 曾波(1972—), 男, 教授; 主要从事环境生态学研究。E-mail: bzeng@swu.edu.cn

其一,功能适应性良好的物种比适应性较差的物种更有可能成功地忍受具有限制条件的环境;其二,受光、磷、碳、氮或其他任何因子限制的环境,更有可能被具有适宜适应能力、能够在此种环境中正常生活的物种所占据^[8]。

龙河与汝溪河是长江三峡库区的关键一级支流。三峡库区位于亚热带气候带,其水环境具有明显的季节性特征^[9]。龙河发源于鄂渝交界,流经长江干流南岸,穿越于险峻山脉之中,自然落差大,尽管其集水面积辽阔,但河床狭窄,导致流量有限且流速较快。汝溪河发源于重庆市万州区,流经长江干流北岸,相对地,其自然落差小,河床深,且有多条次级支流汇入,因而流量较大,流速相对较缓。两条河流在流量、流速、流态等方面具有不同的特点,是三峡库区众多支流中特点鲜明的两条河流。自三峡工程竣工以来,龙河与汝溪河下游区域形成了广阔的蓄水水淹回水区。回水区流速减缓、水深增加、富营养化及水体滞留时间延长,这些特性均会对水生生态系统产生影响^[10]。

浮游植物的群落组成受环境的影响十分明显^[11],龙河和汝溪河河流季节动态和河流水文情势的差异及三峡水库蓄水对两条河流的浮游植物功能群均可能产生不同的影响。在不受三峡水库蓄水影响的自然河流区,本文推测其浮游植物功能群和水环境会因各自河流不同的水文特征而表现出不同的特点;在两条河流的受三峡水库蓄水影响的回水区,水文环境呈现出趋同的趋势,我们推测两条河流回水区浮游植物功能群也将表现出更为相似的特征。为揭示三峡水库不同流态支流浮游植物的季节变化规律及其与环境的相关关系,本研究选取三峡库区流态不同的一级支流龙河和汝溪河作为代表进行调查研究,通过在春季(3月)、夏季(7月)、秋季(9月)及冬季(11月)进行野外采样及室内分析测定,对浮游植物进行物种鉴定及计数,并对浮游植物进行功能群划分。本文通过对龙河和汝溪河不同季节浮游植物功能群特征进行研究,探讨三峡库区不同支流浮游植物的季节变化及三峡水库蓄水对水环境和浮游植物的影响,以期对三峡水库和长江水环境的保护与治理提供重要的科学参考。

1 材料与方法

1.1 采样断面设置和调查采样时间

本研究选取长江一级支流龙河和汝溪河进行调查研究(图1)。龙河位于三峡库区南岸,发源于鄂渝交界处,是石柱县、丰都县内最大的一条河流。龙河干流总长度为140 km,流域面积2910 km²,

在丰都县内干流总长度59.4 km,流域面积1425 km²,是长江中上游连贯大武陵山区向三峡库区过渡的一级支流。汝溪河位于三峡库区北岸,起源于万州区黄泥乡杨告沟,流经梁平县紫阳乡与右支流汇合后,进入忠县汝溪镇,流经涂井乡、石宝镇,最终汇入长江^[11]。全河流域面积720 km²,干流总长度为54.5 km,在忠县内,干流总长度25.4 km,流域面积达272.9 km²。在本研究中,每条支流从上游至下游分别设置4个采样断面,龙河从上游至下游设置的4个采样断面分别为位于自然河流区的九溪沟大桥(L1),变动回水区的下刀弓溪(L2),三峡水库蓄水回水区的两河口(L3)、龙河入江口(L4);汝溪河从上游至下游设置的4个采样断面分别为位于自然河流区的白庙(R1),变动回水区的老涂井(R2),三峡水库蓄水回水区的龙滩大桥(R3)、汝溪河入江口(R4)。于2021年春季3月28—30日、夏季7月26—28日、秋季9月27—29日和冬季11月24—26日对两条河流的上述断面进行监测。研究区域当地的气候为降雨丰富、日照充足的亚热带季风气候,年均气温18.2℃,年降雨量1200 mm,年均相对湿度80%。

1.2 浮游植物样品采集与检测

浮游植物定性样品采集 使用25号浮游生物网采集定性样品,关闭浮游生物网底端出水开关

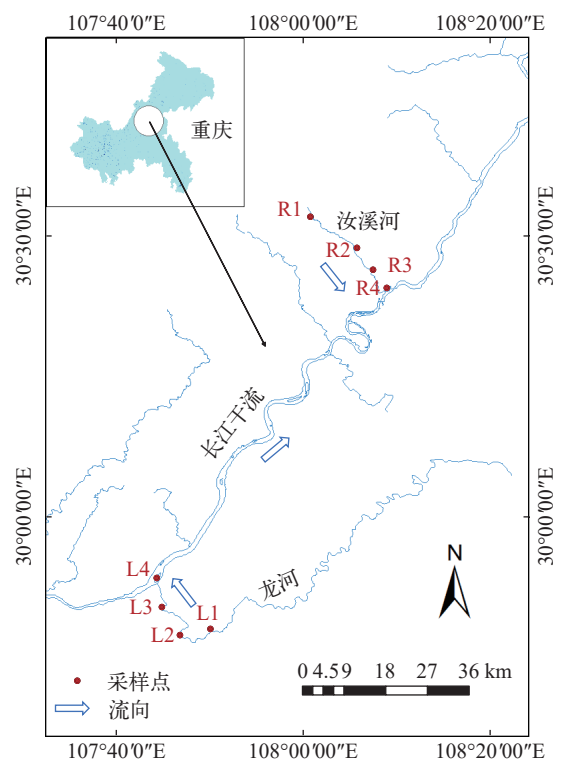


图1 研究区域及龙河、汝溪河的地理位置图

Fig. 1 The geographical location map of the study area, Longhe River and Ruxi River

活塞,在水面表层至0.5 m水深处以20—30 cm/s的速度做“∞”形往复缓慢拖动约1—3 min。将浮游生物网提出水面,将底端出口伸入50 mL棕色大口瓶中,打开底端活塞收集定性样品,重复3—4次。采集的样品避光保存在4—10℃环境条件下^[12]。

浮游植物定量样品采集 在每个采样断面用采样器在0.5 m深度处采集1 L水样,分别装入采样瓶中,立即加入15 mL鲁哥氏液,充分摇匀,固定并带回实验室静置。将采集的定量分析水样以虹吸的方法吸取不含浮游植物的上清液,将其浓缩至30 mL^[12]。

对定性样品用Nikon E-ci显微镜进行浮游植物的物种鉴定,对定量样品用Nikon E-ci显微镜进行浮游植物的物种鉴定并计数。浮游植物鉴定参考魏印心等^[13]编著《中国淡水藻志》、胡鸿钧等^[14]编著《中国淡水藻分类》、郑红萍等^[15]编著《福建省大中型水库常见淡水藻类图集》和邓坚等^[16]编著《中国内陆水域常见藻类图谱》等资料。

1.3 环境因子与理化指标测定分析

河流水体的透明度(Secchi depth, SD)使用赛氏透明盘测定;水体流速(Velocity, V)用LS45A型旋杯式流速仪测量(华正水文仪器有限公司,重庆);水温(Water temperature, WT)、溶解氧(Dissolved oxygen, DO)、酸碱度(pH)等指标使用DS5X多参数水质测定仪测定。

各采样断面在0.5 m水深处采集水样,运回实验室测定氮、磷、高锰酸盐指标等下列各项水环境指标。总氮(Total nitrogen, TN)用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定^[12];铵态氮(Ammonium nitrogen, NH_4^+-N)采用水质连续流动分析仪测定;硝态氮(Nitrate nitrogen, NO_3^--N)采用紫外分光光度法测定^[12];总磷(Total phosphorus, TP)用钼酸铵分光光度法测定^[12];磷酸盐(Phosphate, $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$)用钼锑抗分光光度法测定^[12];叶绿素 a (Chlorophyll a , Chl. a)用分光光度法测定^[12];高锰酸盐指数(Permanganate index, COD_{MN})采用水质—高锰酸盐指数的测定方法测定^[12]。

1.4 数据分析

浮游植物功能群分类及密度计算 依据Reynolds和Padisak等^[17]构建的浮游植物功能群分类方法,将龙河和汝溪河鉴定出的浮游植物划分为不同的功能群。浮游植物功能群密度是指各功能群中所有藻种(属)的细胞密度之和^[37]。

浮游植物功能群优势度和相似性分析 浮游植物功能群优势度通过计算优势度指数(Y)确定,计算公式:

$$Y = (n_i/N) \times f_i$$

式中, Y 为优势度指数; n_i 为第 i 种浮游植物功能群的细胞密度; N 为样品中浮游植物的总细胞密度; f_i 为第 i 种功能类群出现的采样断面数与总采样断面数的比率。龙河和汝溪河总采样断面数均为4个。当优势度指数 $Y \geq 0.02$ 时,被认定为优势功能群^[37],优势功能群数不超过总功能群数的25%。

为比较同一季节龙河和汝溪河功能群的相似性,本文引入相似性指数(H),计算公式:

$$H = (S/A) \times 100$$

式中, H 为相似性指数; S 为同一季节中龙河和汝溪河具有的相同功能群类型的数量; A 为同一季节中龙河和汝溪河具有的所有功能群类型的数量。

浮游植物功能群与环境因子相关性分析 使用IBM SPSS Statistics 21对数据进行统计分析,对不同季节的环境因子采用单因素方差分析,若差异显著则进行多重比较(LSD法), $P < 0.05$ 表示具有显著差异。使用Canoco for Windows 5.0对优势功能群和环境因子进行相关分析,并依据Lengths of gradient第一轴的大小选择恰当的模型,若第一轴 > 4.0 ,选择单峰模型CCA;若第一轴 < 3.0 ,选择线性模型RDA;如果在3.0—4.0,选择RDA和CCA均可。龙河和汝溪河的春、夏、秋、冬四季排序轴的梯度长度均 < 3.0 ,故采用RDA分析。

2 结果

2.1 不同季节水体常规理化参数特征

对龙河的水体理化指标进行显著性分析,结果表明水温、高锰酸盐指数、总氮、总磷在各季节存在显著差异($P < 0.05$)。龙河全年平均水温在15.63—22.39℃(表1),呈现出夏、秋两季温度较高,春、冬两季温度较低的状态。流速各断面变化范围为0.04—1.22 m/s,各季节流速不同,夏季流速最高,冬季流速最低。总氮在夏季出现最大值,变化范围为1.563—2.109 mg/L,各断面都出现秋季总氮浓度低于其余三季的现象。总磷在春季出现最大值,并呈现总磷浓度春季 $>$ 冬季 $>$ 夏季 $>$ 秋季。溶解氧整体在8.16—13.40 mg/L波动,各断面都是夏季溶解氧最低。透明度为0.18—2.88 m,在冬季出现最大值,水体最为清澈,其次是秋季,夏季水体透明度最低。叶绿素 a 浓度整体在0.599—98.625 $\mu\text{g/L}$ 波动,叶绿素 a 浓度在春季出现最大值,并呈现叶绿素 a 平均含量春季 $>$ 夏季 $>$ 秋季 $>$ 冬季,且春季叶绿素 a 浓度的峰值出现在两会口(L3)断面。pH为7.78—8.79,水体呈弱碱性。

对汝溪河的水体理化指标进行显著性分析, 结果表明水温、高锰酸盐、总氮在不同季节存在显著差异($P<0.05$)。汝溪河全年平均水温为15.95—30.40℃(表2), 白庙(R1)断面夏季温度最高, 达到31.13℃, 冬季温度最低, 低至11.90℃。流速为0.03—0.73 m/s, 秋季流速最大, 冬季流速最低。总氮在春季出现最大值, 变化范围为1.402—1.797 mg/L, 各断面秋季总氮浓度最低。秋季各断面总磷浓度最低。全年溶解氧在6.78—15.97 mg/L波动, 只有白

表1 龙河不同季节的水体理化特征

Tab. 1 The hydro-physicochemical characteristics of Longhe River in different seasons

理化指标 Physicochemical index	龙河Longhe River			
	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
水温WT (°C)	17.16±1.18 ^b	22.39±1.80 ^a	21.37±4.04 ^a	15.63±1.03 ^b
流速V (m/s)	0.34±0.26	0.42±0.47	0.31±0.39	0.13±0.07
溶解氧DO (mg/L)	12.29±0.77	8.34±0.19	9.68±1.83	10.01±0.85
透明度SD (m)	0.58±0.13	0.23±0.08	0.81±1.20	1.6±0.81
pH	8.63±0.19	7.92±0.13	7.80±0.31	8.26±0.15
叶绿素a Chl.a (μg/L)	33.49±38.67	4.48±0.13	2.60±2.15	1.20±0.49
高锰酸盐指数	1.84±0.51 ^b	2.72±0.30 ^a	2.08±0.25 ^b	1.51±0.30 ^b
COD _{MN} (mg/L)	1.66±0.04 ^a	1.76±0.22 ^a	0.99±0.09 ^b	1.60±0.10 ^a
总氮TN (mg/L)	0.03±0.01 ^a	0.01±0.01 ^b	0.01±0.00 ^b	0.03±0.00 ^a
总磷TP (mg/L)				

注: 表中数据为平均值±标准差; 同一行相同右上角含有相同英文上标或无上标表示无显著差异($P\geq 0.05$); 下同

Note: The data in table are means±standard deviations. The same or absence of superscripts letters indicate no significant differences ($P\geq 0.05$); The same applies below

表2 汝溪河不同季节的水体理化特征

Tab. 2 The hydro-physicochemical characteristics of Ruxi River in different seasons

理化指标 Physicochemical index	汝溪河Ruxi River			
	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
水温WT (°C)	18.28±0.90 ^c	30.40±0.71 ^a	25.66±0.37 ^b	15.95±2.35 ^c
流速V (m/s)	0.13±0.07	0.37±0.17	0.45±0.22	0.11±0.09
溶解氧DO (mg/L)	13.58±2.04	9.93±1.67	7.40±0.46	9.18±0.90
透明度SD (m)	1.3±0.51	0.43±0.11	0.43±0.19	1.25±0.45
pH	8.50±0.21	8.28±0.07	8.00±0.14	8.26±0.17
叶绿素a Chl.a (μg/L)	24.27±13.31	32.00±10.31	19.4±17.44	1.32±0.29
高锰酸盐指数	2.30±0.39 ^b	3.74±0.16 ^a	2.25±0.22 ^b	1.31±0.17 ^c
COD _{MN} (mg/L)	1.59±0.14 ^a	1.04±0.16 ^b	0.85±0.09 ^b	1.41±0.21 ^a
总氮TN (mg/L)	0.03±0.01	0.02±0.01	0.01±0.00	0.03±0.01
总磷TP (mg/L)				

庙(R1)溶解氧在夏季最低, 其余各断面都是秋季溶解氧含量最低。春、冬两季各断面透明度较高, 变化范围分别为0.5—1.76和0.6—1.8 m, 夏、秋两季透明度较低, 分别为0.3—0.57和0.2—0.67 m。叶绿素a浓度为0.991—45.583 μg/L, 夏季叶绿素a含量最高, 冬季叶绿素a含量远低于其余三季。pH为7.76—8.68, 整体呈弱碱性。

龙河和汝溪河的水环境表现出不同的特点, 水温表现为龙河夏季和秋季整体低于汝溪河, 春季和冬季大致相同。龙河河床两侧多高山, 夏季和秋季该区域气温较低, 水温也较低。流速表现为龙河春季、夏季、冬季高于汝溪河, 秋季低于汝溪河。透明度表现为龙河春季和夏季低于汝溪河, 秋季和冬季高于汝溪河。叶绿素a表现为龙河春季高于汝溪河, 其余季节低于汝溪河。

2.2 浮游植物群落组成

在龙河的调查检测中, 鉴定出6门68属111种浮游植物(图2a), 其中, 硅藻门24属50种, 占浮游植物物种总数的45.5%; 绿藻门28属37种, 占比33.3%; 蓝藻门9属12种, 占比10.8%; 甲藻门4属7种, 占比6.3%; 裸藻门1属2种, 占比1.8%; 隐藻门2属3种, 占比2.7%。龙河浮游植物在春、秋两季种类最丰富。秋季共6门46属61种, 占总种数55.0%, 其中, 硅藻门种数最多, 共27种, 占秋季调查种数的44.3%; 春季共6门35属56种, 占50.5%, 其中, 硅藻门35种, 占春季调查种数的62.5%。在夏、冬两季种类较少, 分别为夏季5门35属51种, 冬季5门31属47种, 其中硅藻门数量最多。

汝溪河流域共检测出浮游植物7门80属142种(图2b), 其中, 绿藻门31属58种, 占浮游植物总物种数的40.9%; 硅藻门24属52种, 占浮游植物总数的36.6%; 蓝藻门15属16种, 占比11.3%; 裸藻门4属5种, 占比3.5%; 甲藻门3属6种, 占比4.2%; 隐藻门2属4种, 占比2.8%; 金藻门1属1种, 占比0.7%。夏、秋两季因温度较高, 浮游植物的种类更为丰富。夏季共6门59属91种, 占总种数的64.1%, 绿藻门种类数最多, 有41种, 占45.1%; 秋季共6门50属72种, 占总种数的50.7%, 硅藻门种类数最多, 有28种, 占38.9%。在春、冬两季种类较少, 春季7门39属60种, 冬季5门46属64种, 其中硅藻门数量最多。

汝溪河浮游植物物种数在四个季节均高于龙河。龙河秋季浮游植物物种数最多, 冬季最少。汝溪河夏季浮游植物物种数最多, 春季最少。

2.3 浮游植物细胞密度变化及功能群划分

龙河水体中浮游植物细胞密度呈现出显著的季节性变化。浮游植物细胞密度春季>夏季>秋季>

冬季(图 3a)。春季各采样断面浮游植物细胞密度为 $(0.702—45.145) \times 10^5$ cells/L; 夏季各采样断面浮游植物细胞密度为 $(0.423—6.186) \times 10^5$ cells/L; 秋季各采样断面浮游植物细胞密度为 $(0.180—1.683) \times 10^5$ cells/L; 冬季各采样断面浮游植物细胞密度变化为 $(0.216—0.312) \times 10^5$ cells/L; 春、秋两季两会口(L3)细胞密度最大, 下刀弓溪(L2)最小; 秋季九溪沟大桥(L1)细胞密度最大, 龙河入江口(L4)最小; 冬季龙河入江口(L4)细胞密度最大, 下刀弓溪(L2)最小。整体来看, 浮游植物细胞密度从大到小依次为两会口(L3)、龙河入江口(L4)、九溪沟大桥(L1)、下刀弓溪(L2)。

汝溪河水体中浮游植物细胞密度组成呈现出显著的季节性变化。浮游植物细胞密度: 夏季>春季>秋季>冬季(图 3b)。春季各采样断面浮游植物细胞密度为 $(1.302—96.76) \times 10^5$ cells/L; 夏季各采样断面浮游植物细胞密度为 $(4.950—118.605) \times 10^5$ cells/L; 秋季各采样断面浮游植物细胞密度为 $(0.306—$

$61.5) \times 10^5$ cells/L; 冬季各采样断面浮游植物细胞密度为 $(0.306—0.699) \times 10^5$ cells/L; 春、冬两季细胞密度最大值都出现在龙滩大桥(R3), 夏、秋两季细胞密度最大值都出现在汝溪河入江口(R4), 除秋季外, 其余三季细胞密度最小值均出现在白庙(R1)。整体来看, 浮游植物细胞密度从大到小依次为汝溪河入江口(R4)、龙滩大桥(R3)、老涂井(R2)、白庙(R1)。

从总体来看, 汝溪河春季、夏季和秋季各断面的浮游植物细胞密度都要大于龙河, 冬季由于水温较低, 两条河各断面的浮游植物细胞密度均较低。

根据功能群分类法对龙河和汝溪河采集的浮游植物进行划分(表 3)。龙河的浮游植物可分为 22 个功能群: A、B、C、D、F、G、J、K、H1、L_M、L_O、M、MP、P、S1、S_N、T、T_B、W1、X1、X2、Y。其中, 春季出现的浮游植物可划分为 16 个功能群, 优势功能群: B、L_O、MP、X1; 夏季出现的浮游植物可划分为 16 个功能群, 优势功能

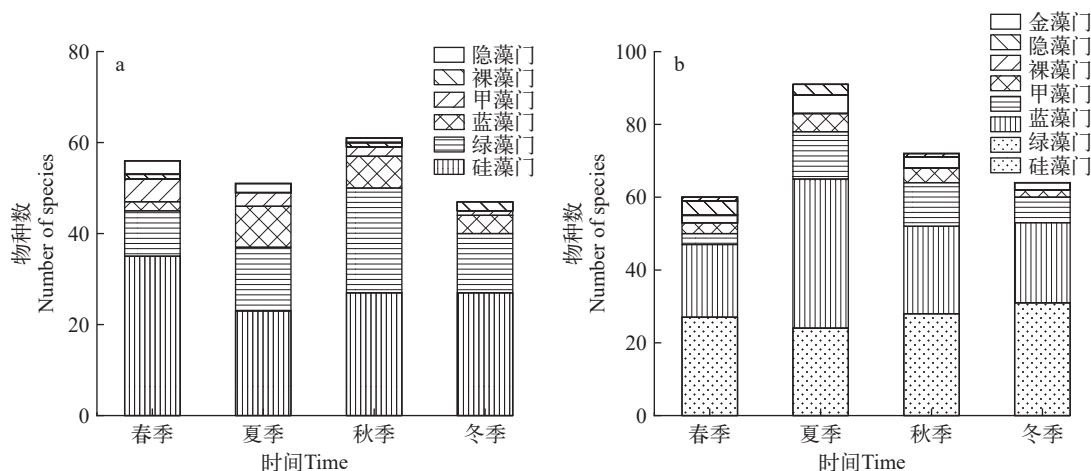


图 2 龙河(a)和汝溪河(b)浮游植物群落组成

Fig. 2 Phytoplankton community composition of Longhe River (a) and Ruxi River (b)

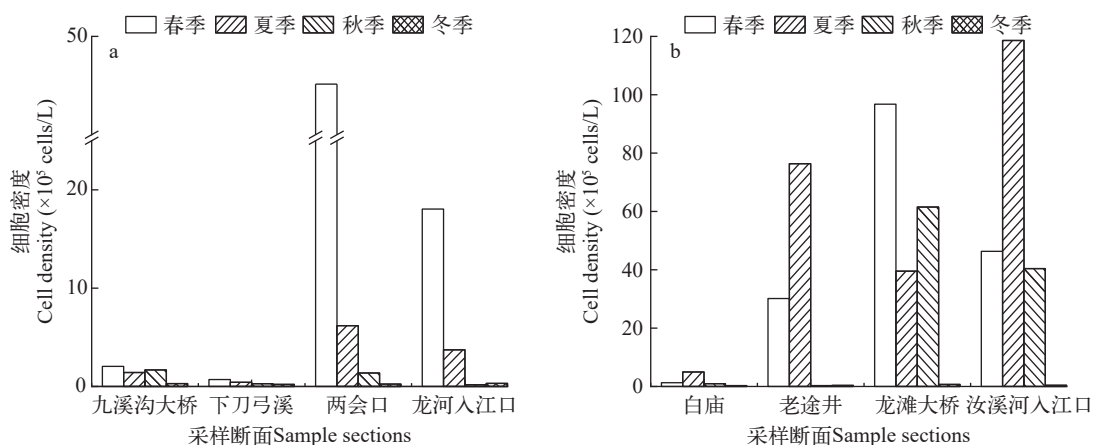


图 3 龙河(a)和汝溪河(b)浮游植物细胞密度的时空变化

Fig. 3 Spatiotemporal variations in phytoplankton cell density of Longhe River (a) and Ruxi River (b)

群: D、J、S_N、T_B; 秋季出现的浮游植物可划分为21个功能群, 优势功能群: D、J、MP、P、T_B; 冬季出现的浮游植物可划分为16个功能群, 优势功能群: B、D、MP、T_B。

对龙河不同季节浮游植物功能群的优势度进行分析, 春季以L_O、B和X1功能群占绝对优势(图4), 两种功能群的总相对细胞密度81%, 其中甲藻门倪氏拟多甲藻(*Peridiniopsis niei*)为L_O功能群的优势藻种, 硅藻门直链藻属(*Melosira*)为功能群B的优势藻属, 绿藻门小球藻属(*Chlorella*)为功能群X1的优势藻属。夏季以D功能群占绝对优势, 其相对细胞密度为71.4%, 硅藻门针杆藻属(*Synedra*)和硅藻门菱形藻属(*Nitzschia*)为D功能群的优势藻属(图4)。秋季以MP和T_B功能群占据优势, 两种功能群的总

相对细胞密度为30.7%, 硅藻门桥弯藻属(*Cymbella*)、硅藻门舟形藻属(*Navicula*)为MP功能群的主要藻属, 硅藻门变异直链藻(*Melosira varians*)为T_B功能群的主要藻种(图4)。冬季以MP和B功能群占优势, 硅藻门舟形藻属、硅藻门异极藻属(*Gomphonema*)为MP功能群的优势藻属, 硅藻门小环藻属(*Cyclotella*)是B功能群的优势藻属(图4)。值得注意的是在龙河的春、夏、秋、冬四个季节中, MP功能群的优势度均≥0.02。

汝溪河的浮游植物可以分为23个功能群: A、B、C、D、E、F、G、J、K、H1、L_M、L_O、M、MP、P、S1、S_N、T、T_B、W1、X1、X2、Y。其中, 春季出现的浮游植物可划分为18个功能群, 优势功能群: B、D、X1、X2; 夏季出现的浮游植物

表3 龙河和汝溪河浮游植物功能群划分

Tab. 3 The phytoplankton functional groups found in Longhe River and Ruxi River

功能群 Functional group	代表性种(属) Representative species (genus)	适应生境 Suitable habitat
Codon A	科曼小环藻 <i>Cyclotella comensis</i> 、扎卡四棘藻 <i>Attheya zachariasii</i>	寡营养型、深水湖泊, 对pH升高敏感
Codon B	直链藻 <i>Melosira</i> spp.	中营养、中小型湖泊, 对分层敏感
Codon C	小环藻 <i>Cyclotella</i> spp.、美丽星杆藻 <i>Asterionella formos</i>	富营养、中小型水体, 低光照
Codon D	菱形藻 <i>Nitzschia</i> spp.、针杆藻 <i>Synedra</i> spp.、菱板藻 <i>Hantzschia</i> spp.	浑浊浅水体, 耐扰动, 对低营养盐敏感
Codon E	锥囊藻属 <i>Dinobryon</i> sp.	小型浅水寡营养湖泊或者异养性的池塘
Codon F	卵囊藻 <i>Oocystis</i> sp.、四胞藻 <i>Tetraspora</i> sp.、蹄形藻 <i>Kirchneriella lunaris</i> 、月牙藻 <i>Selenastrum bibraianum</i>	中或富营养型均匀的、透明度高的深水湖泊, 耐低营养, 对高浊度敏感
Codon G	空球藻 <i>Eudorina elegans</i> 、实球藻 <i>Pandorina</i> sp.	富营养型小型湖泊及大型河流和贮水池等静水水域
Codon J	栅藻 <i>Scenedesmus</i> sp.、盘星藻 <i>Pediastrum</i> spp.、十字藻 <i>Crucigenia</i> spp.、四角藻 <i>Tetraedron</i> spp.、空星藻 <i>Coelastrum</i> spp.、棒形鼓藻 <i>Gonatozygon monotaenium</i>	浅水、混合型的富营养水体, 对低光敏感
Codon K	隐球藻 <i>Aphanocapsa</i> spp.	富营养小型浅水水体
Codon H1	鱼腥藻 <i>Anabaena</i> spp.	N含量低的、小型的、有分层现象的富营养湖泊
Codon L _M	拟多甲藻 <i>Peridiniopsis</i> sp.、多甲藻 <i>Peridinium</i> sp.	富营养湖泊变温层
Codon L _O	裸甲藻 <i>Gymnodinium</i> sp.、羽纹藻 <i>Pinnularia</i> sp.、平裂藻 <i>Merismopedia</i> sp.、色球藻 <i>Chroococcus</i> sp.	中营养, 耐低营养, 对分层敏感
Codon M	微囊藻 <i>Microcystis</i> spp.	富至超营养的中小湖泊, 耐低光, 对扰动敏感
Codon MP	舟形藻 <i>Navicula</i> spp.、颤藻 <i>Oscillatoria</i> spp.、桥弯藻 <i>Cymbella</i> spp.、异极藻 <i>Gomphonema</i> spp.、脆杆藻 <i>Fragilaria</i> spp.、辐节藻 <i>Stauroneis</i> sp.、卵形藻 <i>Cocconeis</i> sp.、曲壳藻 <i>chnanthes</i> sp.	频繁扰动的浑浊型浅水湖泊
Codon P	颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i> 、新月藻 <i>Closterium</i> sp.、拟新月藻 <i>Closteriopsis longissima</i>	富营养温跃层, 耐弱光, 对分层敏感
Codon S1	伪鱼腥藻 <i>Pseudanabaena limnetica</i> 、浮丝藻 <i>Planktothrix</i> sp.、束丝藻 <i>Aphanizomenon</i> sp.	浑浊水体, 耐低光、对冲刷敏感
Codon S _N	尖头藻 <i>Raphidiopsis</i> sp.、棒胶藻 <i>Rhabdogloea</i> sp.、拟柱孢藻 <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i>	混合均匀的深水水体变温层
Codon T	游丝藻 <i>Planctonema lauterborni</i> 、转板藻 <i>Mougeotia</i> sp.	持续混合水层, 耐低光
Codon T _B	变异直链藻 <i>Melosira varians</i>	强急流, 耐冲刷
Codon W1	裸藻 <i>Euglena</i> spp.	富营养混合水层, 对低营养敏感
Codon X1	纤维藻 <i>Ankistrodesmus</i> sp.、小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i>	中-富营养浅水湖泊的清洁混合层
Codon X2	尖尾蓝隐藻 <i>Chroomonas acuta</i>	中到富营养型均匀的浅水水体
Codon Y	隐藻 <i>Cryptomonas</i> spp.	牧食强度低的静水水体

注: 属名后加sp.表示该属的特定种, 属名后加spp.表示该属多个种

Note: The genus appends with sp. indicates specific species of the genus, and the genus appends with spp. indicates multiple species of the genus

可划分为20个功能群, 优势功能群: G、J、S1、X2; 秋季出现的浮游植物可划分为19个功能群, 优势功能群: G、P、S1; 冬季出现的浮游植物可划分为18个功能群, 优势功能群为D、J、MP、S1。

对汝溪河不同季节浮游植物功能群的优势度进行分析表明, 春季以B功能群占绝对优势, 相对细胞密度达71%, 硅藻门意大利直链藻(*Melosira italica*)是其优势藻种(图5)。夏、秋两季均以S1功能群和G功能群占据优势, 其中S1功能群的优势属为蓝藻门伪鱼腥藻属(*Pseudanabaena*), G功能群的优势属为绿藻门空球藻属(*Eudorina*)和绿藻门实球藻属(*Pandorina*), 夏季两功能群的总相对细胞密度为35%, 秋季两功能群的总相对细胞密度为26.6%。冬季以S1和MP功能群占优势, 两种功能群的总相对细胞密度达36%, 蓝藻门伪鱼腥藻属是S1功能群的主要藻属, 硅藻门舟形藻属是MP功能群的主要藻属, 其次是D和J功能群占据优势, 两种功能群的总相对细胞密度为22%, 硅藻门针杆藻属和硅藻门菱形藻属是D功能群的主要藻属, 绿藻门栅藻属(*Scenedesmus*)是J功能群的主要藻属。

对龙河与汝溪河不同季节浮游植物功能群的相似度进行分析发现, 在四个季节中, 龙河与汝溪河回水区的功能群相似度指数均大于自然河流区(图6), 表明龙河与汝溪河回水区的浮游植物功能群呈现出趋同的特点。

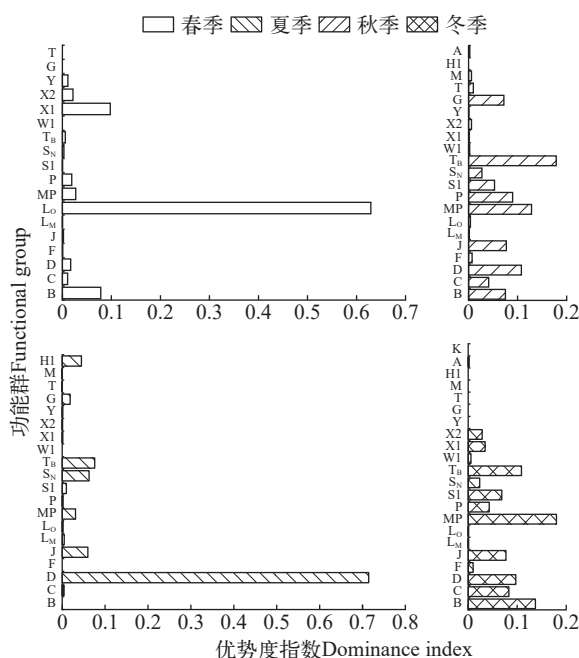


图4 龙河不同季节浮游植物功能群优势度

Fig. 4 Dominance of phytoplankton functional groups of Longhe River across different seasons

2.4 浮游植物功能群与环境因子的关系

对龙河浮游植物优势功能群的细胞密度与环境因子进行相关性分析(图7)。分析结果显示, 第一排序轴与第二排序轴的解解释率分别为21.79%和18.84%。WT是显著影响浮游植物功能群数量的环境因子($P < 0.05$), 其次是 $PO_4^{3-}-P$ 。功能群B、MP、 S_N 与环境因子 COD_{Mn} 和TN呈现强负相关关系, 代表性藻属有硅藻门直链藻属(*Melosira*)、硅藻门舟形藻属、蓝藻门拟柱孢藻(*Cylindrospermopsis raci-*

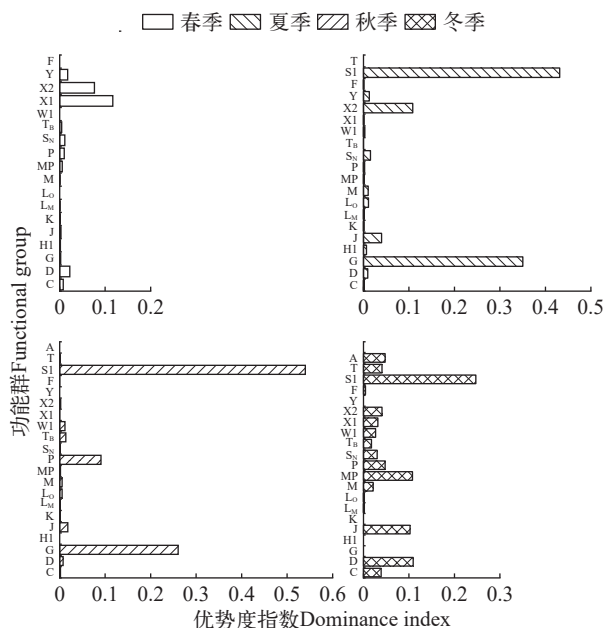


图5 汝溪河不同季节浮游植物功能群优势度

Fig. 5 Dominance of phytoplankton functional groups of Ruxi River across different seasons

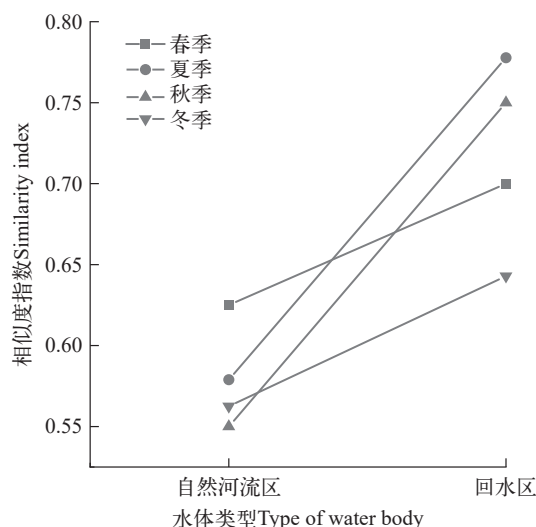


图6 龙河与汝溪河不同季节浮游植物功能群相似度

Fig. 6 Similarity of phytoplankton functional groups between Longhe River and Ruxi River in different seasons

borskii); 功能群D、G、J与环境因子 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和WT呈现强正相关关系, 与环境因子TP、SD、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 呈现强负相关关系, 代表性藻类有硅藻门菱形藻属、绿藻门空球藻属、绿藻门栅藻属; 功能群B、MP、 S_N 、X2与环境因子DO、pH、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 呈强正相关关系; 环境因子V与T_B、X1、P呈现显著负相关关系, 代表性藻类有硅藻门颗粒直链藻(*Melosira granulata*)、硅藻门变异直链藻(*Melosira varians*)、绿藻门纤维藻属(*Ankistrodesmus*)。

对汝溪河浮游植物优势功能群的细胞密度与环境因子进行相关性分析(图8)。分析结果显示,

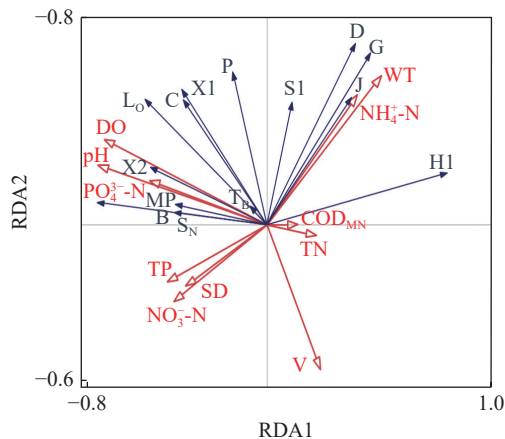


图7 龙河浮游植物优势功能群与主要环境因子的RDA分析

Fig. 7 RDA analysis of dominant phytoplankton functional groups and main environmental factors in Longhe River

DO. 溶解氧; pH. 酸碱度; $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$. 磷酸盐; TP. 总磷; TN. 总氮; SD. 透明度; V. 流速; COD_{MN} . 高锰酸盐指数; WT. 水温; $\text{NH}_4^+\text{-N}$. 铵态氮; $\text{NO}_3^-\text{-N}$. 硝态氮

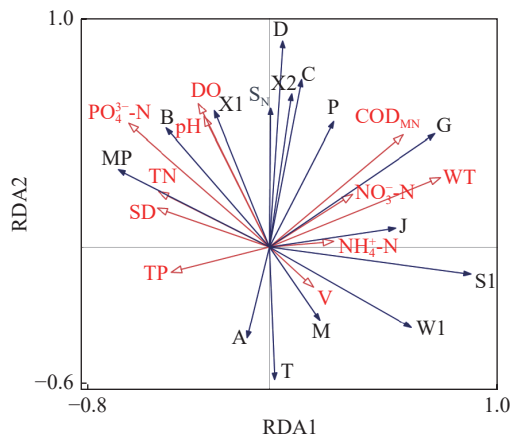


图8 汝溪河浮游植物优势功能群与主要环境因子的RDA分析

Fig. 8 RDA analysis of dominant phytoplankton functional groups and main environmental factors in Ruxi River

DO. 溶解氧; pH. 酸碱度; $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$. 磷酸盐; TP. 总磷; TN. 总氮; SD. 透明度; V. 流速; COD_{MN} . 高锰酸盐指数; WT. 水温; $\text{NH}_4^+\text{-N}$. 铵态氮; $\text{NO}_3^-\text{-N}$. 硝态氮

第一排序轴与第二排序轴的解释率分别为30.43%和22.29%。pH是显著影响功能群数量的环境因子($P < 0.05$), 其次是DO和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 。功能群B、MP、X1与环境因子pH、DO、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、TN、SD均呈现强正相关关系, 与环境因子V呈现强负相关关系, 代表性藻类有硅藻门直链藻属、硅藻门舟形藻属、绿藻门纤维藻属; 功能群M、S1、W1与环境因子pH、DO、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、TN呈现强负相关关系, 与环境因子V呈现强正相关关系, 代表性藻类有蓝藻门微囊藻属、蓝藻门伪鱼腥藻属、裸藻门裸藻属; 功能群P、G、J与环境因子TP呈现强负相关关系, 与环境因子WT、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 COD_{MN} 呈现强正相关关系, 代表性藻类有硅藻门颗粒直链藻、绿藻门栅藻属、绿藻门空球藻属。

如图7和图8所示, 环境因子V、TP、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、WT和功能群D、G、X1、MP在两条河的分析中处于相似的排序轴, 具有可靠的重复性和解释度。

3 讨论

3.1 不同季节浮游植物群落结构特征

我国对河流浮游植物种类组成的研究表明, 河流中浮游植物以硅藻门为主, 其次为蓝藻门或者绿藻门。洪松和陈静生^[38]通过研究中国河流水生生物群落的组成特点, 发现大多数河流以硅藻门和绿藻门为主。胡美琴等^[39]对长江干流宜宾至吴淞江段的研究首次发现长江浮游植物群落结构和构成, 硅藻门最多, 占浮游植物总数的42.6%。在本研究中, 龙河和汝溪河的浮游植物多为硅藻门和绿藻门, 蓝藻门、甲藻门次之, 冬季各浮游植物物种数相对较少。本研究发现, 除了汝溪河流域夏季是绿藻门占优势外, 其他季节均是硅藻门占优势, 各季节中出现频率较高的硅藻门有直链藻属、针杆藻属及卵形藻属, 这也与向蓉等^[11]对汝溪河浮游植物的调查结果类似。另外, 三峡水库自成库以来, 部分次级河流出现流速减缓、停滞时间延长、形成大面积“死水区”等情势变化, 造成水体对工业排放、城市及农业用水污染、消落带和库岸水土流失等引入河流的污染物自净能力减弱, 水体中氮、磷等物质累积浓度高, 从而易引发水华^[33]。在龙河和汝溪河调查期间, 虽未发生水华, 但在春夏季仍会发生某种浮游植物大量繁殖的现象, 会在一定程度上破坏原有生态过程, 改变浮游植物群落结构。

研究表明, 三峡库区许多支流都有明显的藻类更替, 温度、光照、流速、水体氮磷含量等都是影响浮游植物生长的重要环境因子^[16]。通过对龙河和汝溪河不同季节的浮游植物细胞密度进行统计

分析, 浮游植物细胞密度组成表现出明显的季节更替。从总体上看, 龙河浮游植物细胞密度呈现出春季>夏季>秋季>冬季的特点, 全年为 0.18×10^5 — 45.145×10^5 cells/L。汝溪河浮游植物细胞密度呈现出夏季>春季>秋季>冬季的特点, 全年为 0.306×10^5 — 118.605×10^5 cells/L。浮游植物细胞密度表现为春夏季明显高于秋冬季, 这主要与温度、光照等环境因子的季节性演替相关。研究结果呈现出汝溪河浮游植物细胞密度高于龙河浮游植物细胞密度的现象, 这可能与汝溪河水温相对较高有关, 汝溪河四季平均水温 15.95 — 30.40°C , 而龙河四季平均水温 15.63 — 22.39°C , 较高的温度有利于浮游植物生长和繁殖, 另外, 汝溪河水体从浅水至深水会出现分层现象, 水环境更为稳定, 而龙河水体扰动更大, 几乎无分层现象, 龙河浮游植物受到干扰作用更强, 这可能是龙河流域内浮游植物细胞密度往往不如汝溪河高的原因。

3.2 不同季节浮游植物功能群特征

不同时期不同水体理化因子之间存在差异, 导致浮游植物组成和分布的不同^[40]。龙河四个季节共发现有22个功能群, 春季16个, 夏季16个, 秋季21个, 冬季16个。汝溪河流域四个季节共发现有22个功能群, 春季18个, 夏季20个, 秋季19个, 冬季18个。调查结果显示夏秋季功能群数量多于冬季功能群数量。对龙河和汝溪河不同季节不同采样断面的浮游植物的调查显示, 浮游植物功能群在时间和空间上都有明显的差异。

龙河在不同季节的调查中MP功能群优势度均 ≥ 0.02 , 是龙河的常年优势功能群。功能群MP以硅藻门舟形藻属、桥弯藻属、异极藻属等为主, 适合频繁扰动的浑浊型浅水水体, 这与龙河的水体情况相符。春季以 L_0 和B功能群占据主导地位, 其中甲藻门倪氏拟多甲藻为 L_0 功能群的优势藻种, 硅藻门直链藻属为功能群B的优势藻属。 L_0 和B功能群都适宜中营养生境, 对分层敏感, 春季水体环境稳定, 营养盐含量适中, 适宜 L_0 和B功能群浮游植物生长。夏季以D功能群占绝对优势, 硅藻门针杆藻属和菱形藻属为D功能群的优势藻属, 在两会口(L3)、龙河入江口(L4)采样断面所占比例分别超过80%和70%, D功能群的生境特征为浑浊浅水体, 耐扰动, 对低营养盐敏感, 夏季降雨增多且水体流速较大, 造成水体的浑浊。秋季以 T_B 功能群占据优势, 硅藻门变异直链藻为 T_B 功能群的主要藻种。 T_B 功能群在九溪沟大桥(L1)和下刀弓溪(L2)占优, T_B 功能群适宜激流环境, 九溪沟大桥(L1)与下刀弓溪(L2)均属于上游激流浅水水体, 其本身易受到上

游来水和降雨的影响, 同时地势较高, 水体流速较大, 使得 T_B 功能群占据优势。冬季MP功能群在两会口(L3)和龙河入江口(L4)的比例明显低于九溪沟大桥(L1)和下刀弓溪(L2), 在该时期两会口(L3)和龙河入江口(L4)受长江回水影响较大, 水位高, 水环境更稳定。

在汝溪河水体中, 春季浮游植物以B功能群占绝对优势, 硅藻门意大利直链藻是B功能群的主要藻种, 在老涂井(R2)、龙滩大桥(R3)、汝溪河入江口(R4)都占据绝对优势, B功能群的适宜生境为中营养、中小型水体, 对分层敏感, 这与汝溪河水体情况基本一致。在夏、秋、冬三季以功能群S1为主, 蓝藻门伪鱼腥藻属是S1功能群的优势藻属, 其适应生境为浑浊、易受冲刷影响的复合水体。从国内外对湖泊、水库的研究结果中可知以S1功能群为优势功能群的情况并不少见。贵阳市内的红枫水库^[41]就是其中之一。功能群S1占据绝对优势, 其原因可能是汝溪河水体受到较强的干扰, 夏季, 雨水充足, 水温较高, 土壤中大量营养盐通过淋失的方式流入水体, 水体浑浊程度增加, 透明度降低, 而以伪鱼腥藻为代表的部分蓝藻适于在此种水体环境生存。

龙河和汝溪河浮游植物优势功能群在一年中具有明显的季节变化特征, 在春季、夏季和秋季易形成单优势种群落, 部分断面有水华暴发的风险, 在冬季各物种的优势度较为平衡。在不受三峡水库蓄水影响的自然河流区, 龙河和汝溪河的环境差异大, 浮游植物功能群的相似性也较低, 两条河流的回水区受到三峡水库蓄水的影响, 水环境趋同, 浮游植物功能群也表现得更为相似。

3.3 浮游植物功能群与环境因子的相关性

研究表明, pH、水温、溶解氧、总氮、透明度、总磷、氨氮、化学需氧量等水体理化性质对浮游植物群落分布格局有重要影响^[42]。在本实验中, WT、DO、pH、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 是影响龙河和汝溪河浮游植物功能群分布的主要影响因素。水温会影响酶的活性从而对浮游植物光合作用和呼吸作用的强度进行调控^[43]。此外, 水温还可以通过对浮游植物酶活性的影响, 间接的对其光能和营养盐的获取、利用产生影响, 对浮游植物的生长造成间接影响^[44]。在本研究中, 水温成为控制汝溪河J、P、G等多个功能群分布的主要影响因素。浮游植物的生长必须有溶解氧才能进行呼吸作用, 在一定范围内随着DO含量的增加, 浮游植物代谢强度也随之增加^[45]。在本研究中, DO是 S_N 、X1、B、MP、N等功能群分布的主要影响因素之

一。研究显示,水体的酸碱性能影响浮游植物的生长,当水体处于弱碱性时,会加快浮游植物吸收二氧化碳,促进浮游植物生长^[46]。龙河pH在7.78—8.79,汝溪河pH在7.76—8.68,均属于弱碱性水体。在本研究中,龙河优势功能群B、MP、X1、X2及汝溪河优势功能群B、MP、X1均与pH呈正相关关系。营养盐对浮游植物功能群也有重要影响^[47],营养盐的浓度会影响到浮游植物的生长与活动。在国内外湖泊、水库、河流等不同类型水域的研究结果中发现,磷、氮是影响浮游植物功能群的主要因素。本研究发现龙河功能群G、J、D与 NH_4^+ -N呈现正相关,汝溪河功能群P、G、J和 NO_3^- -N呈正相关。

三峡水库自建成以来,香溪河、澎溪河、大宁河、小江、汝溪河等库区支流的局部水域多次发生水华,影响库区的水质安全^[48]。原本流态各异、水质较好的库区支流,受三峡工程蓄水的影响,回水区水华暴发风险增加。本文探讨的环境因子可以帮助我们预防和治理水华的发生。在春夏季,浮游植物易于大量暴发,此时应加强监测频率,对于将要发生和已经发生水华的区域可以采取一系列措施进行有效治理。首先,通过调节水体的pH,可以改变藻类生长的化学环境,从而抑制某些藻类物种的过度增殖。其次,控制水体中氮(N)和磷(P)等营养盐的浓度,合理管理水体的营养盐负荷,减少外部输入,对于控制藻华具有重要意义。此外,还可以考虑采用生物方法来控制藻类的生长,如引入藻类天敌来控制其数量。然而,这些方法需要谨慎使用,以避免对水生生态系统造成不利影响。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

- [1] Zhang T, Li L, Song L R. Annual dynamics of phytoplankton abundance and community structure in the Xionghe Reservoir [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(6): 2971-2979. [张婷, 李林, 宋立荣. 熊河水库浮游植物群落结构的周年变化 [J]. *生态学报*, 2009, **29**(6): 2971-2979.]
- [2] Lean D R S, Pick F R. Photosynthetic response of lake plankton to nutrient enrichment: a test for nutrient limitation [J]. *Limnology and Oceanography*, 1981, **26**(6): 1001-1019.
- [3] O'Farrell I, De Tezanos Pinto P, Izaguirre I. Phytoplankton morphological response to the underwater light conditions in a vegetated wetland [J]. *Hydrobiologia*, 2007, **578**(1): 65-77.
- [4] Reynolds C S. Variability in the provision and function of mucilage in phytoplankton: facultative responses to the environment [J]. *Hydrobiologia*, 2007, **578**(1): 37-45.
- [5] Huang X H, Hu L M, Lei L, et al. Seasonal succession characteristics of phytoplankton functional groups in typical small and medium-sized reservoirs in southern subtropics [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, **22**(2): 311-318. [黄享辉, 胡韧, 雷腊梅, 等. 南亚热带典型中小型水库浮游植物功能群季节演替特征 [J]. *生态环境学报*, 2013, **22**(2): 311-318.]
- [6] 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.
- [7] Wang X L, Zhang M, Yin J. Composition and influential factors of phytoplankton function groups in Lake Chaohu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, **30**(2): 431-440. [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 [J]. *湖泊科学*, 2018, **30**(2): 431-440.]
- [8] 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. [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.]
- [9] Chen X J, Yang J, Du G S, et al. Relationships between environmental variables and seasonal succession in phytoplankton functional groups in the Guanting Reservoir [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2016, **32**(3): 74-81. [陈晓江, 杨劫, 杜桂森, 等. 官厅水库浮游植物功能群季节演替及其驱动因子 [J]. *中国环境监测*, 2016, **32**(3): 74-81.]
- [10] Wentzky V C, Tittel J, Jäger C G, et al. Seasonal succession of functional traits in phytoplankton communities and their interaction with trophic state [J]. *Journal of Ecology*, 2020, **108**(4): 1649-1663.
- [11] Xiang R, Li Q Y, Yu Y, et al. Functional group characteristics of planktonic diatoms and their relationship with environmental factors in the ruxi river [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(8): 3290-3301. [向蓉, 李巧玉, 喻焱, 等. 汝溪河浮游硅藻功能群特征及其与环境因子相关性分析 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(8): 3290-3301.]
- [12] The State Environmental Protection Administration the Water and Wastewater Monitoring Analysis Method Editorial Board. Water and Wastewater monitoring analysis method [M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 38-47. [国家环保总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法 [M]. 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 38-47.]
- [13] Wei Y X. Freshwater Algae of China [M]. Beijing: Science Press, 2014: 27-477. [魏印心. 中国淡水藻志 [M]. 北京: 科学出版社, 2014: 27-477.]
- [14] Hu H J, Wei Y X. Freshwater Algae in China-System, Taxonomy and Ecology [M]. Beijing: Science Press, 2006: 22-28. [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: 22-28.]
- [15] Fujian P E M C S. Atlas of Common Freshwater Algae in Large and Medium-Sized Reservoirs in Fujian Province [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2012: 10-120. [福建省环境监测中心站. 福建省大中型水库常见淡水藻类图集 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012: 10-120.]
- [16] Deng J. Atlas of Common Algae in Inland Waters of

- China [M]. Wuhan: Changjiang Press, 2012: 28-110. [邓坚. 中国内陆水域常见藻类图谱 [M]. 武汉: 长江出版社, 2012: 28-110.]
- [17] Grime J P. Evidence for the existence of three primary strategies in plants and its relevance to ecological and evolutionary theory [J]. *The American Naturalist*, 1977, **111**(982): 1169-1194.
- [18] Padisák J, Reynolds C S. Selection of phytoplankton associations in Lake Balaton, Hungary, in response to eutrophication and restoration measures, with special reference to the cyanoprokaryotes [J]. *Hydrobiologia*, 1998, **384**(1): 41-53.
- [19] McGill B J, Enquist B J, Weiher E, *et al.* Rebuilding community ecology from functional traits [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2006, **21**(4): 178-185.
- [20] Litchman E, Klausmeier C A. Trait-based community ecology of phytoplankton. [J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2008(39): 615-639.
- [21] Huisman J, Weissing F J. Fundamental unpredictability in multispecies competition. [J]. *The American Naturalist*, 2001, **157**(5): 488-494.
- [22] Padisák J, Crossetti L O, Naselli-Flores L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates [J]. *Hydrobiologia*, 2009, **621**(1): 1-19.
- [23] Weithoff G. The concepts of 'plant functional types' and 'functional diversity' in lake phytoplankton—a new understanding of phytoplankton ecology [J]. *Freshwater Biology*, 2003, **48**(9): 1669-1675.
- [24] Salmaso N, Padisák J. *Morpho*-Functional Groups and phytoplankton development in two deep lakes (Lake Garda, Italy and Lake Stechlin, Germany) [J]. *Hydrobiologia*, 2007, **578**(1): 97-112.
- [25] Kruk C, Huszar V L M, Peeters E T H M, *et al.* A morphological classification capturing functional variation in phytoplankton [J]. *Freshwater Biology*, 2010, **55**(3): 614-627.
- [26] Reynolds C S. What Factors Influence the Species Composition of Phytoplankton in Lakes of Different Trophic Status [M]? *Phytoplankton and Trophic Gradients*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1998: 11-26.
- [27] Ge Y, Zhou Y F, Wang C H, *et al.* Succession patterns of phytoplankton functional groups in western area of Yangcheng Lake and their relationship with environmental factors [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(7): 3027-3039. [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.]
- [28] 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. [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.]
- [29] Harder W. Reactions of plankton organisms to water stratification [J]. *Limnology and Oceanography*, 1968, **13**(1): 156-168.
- [30] 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.
- [31] Bovo-Scomparin V M, Train S, Rodrigues L C. Influence of reservoirs on phytoplankton dispersion and functional traits: a case study in the upper paraná river, Brazil [J]. *Hydrobiologia*, 2013, **702**(1): 115-127.
- [32] Abonyi A, Leitão M, Lançon A M, *et al.* Phytoplankton functional groups as indicators of human impacts along the River Loire (France) [J]. *Hydrobiologia*, 2012, **698**(1): 233-249.
- [33] Li Z, Fang F, Guo J S, *et al.* Seasonal succession of phytoplankton function groups in the Xiaojiang (Pengxi) river backwater area, Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(2): 392-400. [李哲, 方芳, 郭劲松, 等. 三峡小江(澎溪河)藻类功能分组及其季节演替特点 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(2): 392-400.]
- [34] Dong J, Li Y H, Li G B, *et al.* Seasonal dynamics characteristics and affecting physical factors of phytoplankton functional groups in Dongjiang river [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2013, **37**(5): 836-843. [董静, 李艳晖, 李根保, 等. 东江水系浮游植物功能群季节动态特征及影响因子 [J]. *水生生物学报*, 2013, **37**(5): 836-843.]
- [35] Zhang Y, Hu R, Xiao L J, *et al.* Comparative analysis of succession of the phytoplankton functional groups in two reservoirs with different hydrodynamics in Southern China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, **21**(1): 107-117. [张怡, 胡韧, 肖利娟, 等. 南亚热带两座不同水文动态的水库浮游植物的功能类群演替比较 [J]. *生态环境学报*, 2012, **21**(1): 107-117.]
- [36] Zhuang D K, Liu C Q, Liu L S, *et al.* Temporal and spatial succession of phytoplankton taxonomic and functional groups in Jingbo Lake basins [J]. *Environmental Science and Management*, 2015, **40**(5): 142-147. [庄道阔, 刘存歧, 刘录三, 等. 镜泊湖流域浮游植物群落及其功能类群的时空演替特征研究 [J]. *环境科学与管理*, 2015, **40**(5): 142-147.]
- [37] Yang W, Zhang F Y, Sun Y C, *et al.* Seasonal succession and influencing factors of phytoplankton functional groups in Lake Nanhu, Huaibei City [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(7): 3079-3086. [杨威, 张菲云, 孙雨琛, 等. 淮北南湖浮游植物功能群的季节演替及影响因子研究 [J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(7): 3079-3086.]
- [38] Hong S, Chen J S. Structure characteristics of aquatic community from the main rivers in China [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2002, **26**(3): 295-305. [洪松, 陈静生. 中国河流水生生物群落结构特征探讨 [J]. *水生生物学报*, 2002, **26**(3): 295-305.]
- [39] Hu M Q, Lin X Z. Phytoplankton in the main stream of the Yangtze River before the closure of Gezhouba Dam [J]. *Freshwater Fisheries*, 1986, **16**(4): 28-32. [胡美琴, 林锡芝. 葛洲坝截流前长江干流的浮游植物 [J]. *淡水渔业*, 1986, **16**(4): 28-32.]
- [40] Li L, Li Q H, Jiao S L, *et al.* Response of phytoplankton functional groups to eutrophication in summer at Xiaoguan Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2015,

- 36(12): 4436-4443. [李磊, 李秋华, 焦树林, 等. 小关水库夏季浮游植物功能群对富营养化特征的响应 [J]. 环境科学, 2015, 36(12): 4436-4443.]
- [41] Huang G J, Li Q H, Chen C, *et al.* Phytoplankton functional groups and their spatial and temporal distribution characteristics in Hongfeng Reservoir, Guizhou Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(17): 5573-5584. [黄国佳, 李秋华, 陈椽, 等. 贵州高原红枫湖水库浮游植物功能分组及其时空分布特征 [J]. 生态学报, 2015, 35(17): 5573-5584.]
- [42] Wang X, Li L Q, Zheng B H, *et al.* Composition and influential factors of algal function groups in Dongting Lake [J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(12): 3766-3776. [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.]
- [43] Blinn D W. Diatom community structure along physico-chemical gradients in saline lakes [J]. *Ecology*, 1993, 74(4): 1246-1263.
- [44] Butterwick C, Heaney S I, Talling J F. Diversity in the influence of temperature on the growth rates of freshwater algae, and its ecological relevance [J]. *Freshwater Biology*, 2005, 50(2): 291-300.
- [45] You L, Cui L F, Liu Z W, *et al.* Correlation analysis between DO, pH and chlorophyll during algae growth [J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, 30(9): 42-45. [游亮, 崔莉凤, 刘载文, 等. 藻类生长过程中DO、pH与叶绿素相关性分析 [J]. 环境科学与技术, 2007, 30(9): 42-45.]
- [46] Jakobsen H H, Blanda E, Staehr P A, *et al.* Development of phytoplankton communities: Implications of nutrient injections on phytoplankton composition, pH and ecosystem production [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2015(473): 81-89.
- [47] Gao G J, Xiao L J, Lin Q Q, *et al.* Structure of phytoplankton functional groups and water quality assessment of main reservoirs in Hainan Province [J]. *Ecological Science*, 2013, 32(2): 144-150. [高国敬, 肖利娟, 林秋奇, 等. 海南省典型水库浮游植物功能类群的结构特征与水质评价 [J]. 生态科学, 2013, 32(2): 144-150.]
- [48] Chen Z M, Wang W, Zhao Y, *et al.* Water eutrophication status and control strategy of tributaries in the Three Gorges Reservoir region [J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(4): 32-37. [陈昭明, 王伟, 赵迎, 等. 三峡水库支流水体富营养化现状及防治策略 [J]. 环境工程, 2019, 37(4): 32-37.]

SEASONAL DYNAMICS OF PHYTOPLANKTON FUNCTIONAL GROUPS IN TRIBUTARIES OF THE THREE GORGES RESERVOIR: LONGHE RIVER AND RUXI RIVER, AND THEIR CORRELATIONS WITH ENVIRONMENTAL FACTORS

LIU Xiang-Zheng, SHI Shao-Hua, ZHANG Yu-Xuan, WANG Jia-Hui, MA Lan, HUANG Yu-Xuan,
LIU Mei, AYI Qiao-Li and ZENG Bo

(School of Life Sciences, Southwest University, Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region (Ministry of Education), Chongqing Key Laboratory of Plant Ecology and Resources Research in Three Gorges Reservoir Region, Chongqing 400715, China)

Abstract: According to the environmental characteristics of different seasons, this study conducted surveys on phytoplankton and water environment in Longhe River and Ruxi River during spring (March), summer (July), autumn (September), and winter (November) in 2021. The results showed that 111 phytoplankton species were collected in Longhe River, belonging to 6 phyla. A total of 142 species of phytoplankton were collected from Ruxi River, belonging to 7 phyla. According to Padiasak theory, 23 phytoplankton functional groups were identified in both Longhe River and Ruxi River. The seasonal changes of dominant functional groups of phytoplankton in Longhe River were as follows: spring (B, L_O, MP, X₁)→summer (D, J, S_N, T_B)→autumn (D, J, MP, P, T_B)→winter (B, D, MP, T_B). The seasonal changes in Ruxi River were as follows: spring (B, D, X₁, X₂)→summer (G, J, S₁, X₂)→autumn (S₁, G, P)→winter (D, J, MP, S₁). The backwater areas of the Longhe River and Ruxi River were affected by the impoundment of the Three Gorges Project, leading to greater similarity in phytoplankton functional group composition. According to the redundancy analysis of phytoplankton functional groups and environmental factors, water temperature (WT), dissolved oxygen (DO), pH, ammonium nitrogen (NH₄⁺-N), and phosphate (PO₄³⁻-P) were the main factors affecting the phytoplankton distribution in the two rivers. This study provides a theoretical basis for protecting the aquatic ecosystem of the Yangtze River.

Key words: Phytoplankton; Functional groups; Seasonal dynamics; the Three Gorges Reservoir