

丹江口水库(丹库区)浮游植物功能群时空特征及水质评价*

靳佳霖^{1,2}, 吕绪聪^{1,2}, 曾大海^{1,2}, 丁厚宽^{1,2}, 高云霓^{1,2}, 陈海燕^{2,3}, 袁华涛^{1,2}, 李学军^{1,2**}

(1: 河南师范大学水产学院, 新乡 453007)

(2: 河南省丹江口水库水域生态系统野外科学观测研究站, 南阳 474450)

(3: 河南省南水北调中线渠首生态环境监测中心, 南阳 474475)

摘要: 丹江口水库是南水北调中线工程的重要水源地及国家一级水源保护区, 自 2014 年通水以来, 库区水质整体保持在 II 类及以上, 具备重要的生态功能和水资源保障作用。水位变化作为水库运行的关键参数, 直接影响水体的环境特征, 进而间接作用于浮游植物的生长、分布及多样性。为探究丹江口水库丹库区水位波动引发的生境变化对浮游植物功能群的影响, 本研究选取高水位时期(2023 年 10—12 月)与低水位时期(2024 年 4—6 月)进行调查采样, 分析浮游植物功能群结构组成与环境因子对浮游植物功能群的影响。结果表明, 丹江口水库丹库区在不同时空共鉴定出浮游植物 7 门 75 属 128 种, 主要由绿藻门(37.33%)、硅藻门(36.00%)、蓝藻门(14.67%)组成, 不同时空条件下浮游植物功能群组成存在显著差异。共划分 26 个浮游植物功能群, 包括适应混合水层环境的功能群 N、P, 适应静水环境的功能群 Y、T, 以及具有普适性的功能群 M、Lo。高水位时期, 库区的优势功能群为功能群 B; 而低水位时期, 优势功能群为功能群 MP、P 和 Lo。支流高水位时期优势功能群为功能群 M、Lo 和 S₁; 低水位时期优势功能群为功能群 T_c 和 B。冗余分析结果表明, pH、浊度、硝态氮、正磷酸盐是影响浮游植物优势功能群的主要环境因子。基于 Q 指数的水质评价结果显示, 库区水质总体处于“良好”状态; 而支流区水质处于“差—良好”状态。研究表明, 丹江口水库丹库区水质总体稳定, 但支流在高水位时期, 营养盐污染对浮游植物群落造成显著干扰, 提示水库管理需重点关注高水位时期外源输入对生态系统的潜在影响。
关键词: 丹江口水库; 浮游植物; 功能群; 水质评价; Q 指数

Spatiotemporal characteristics of phytoplankton functional groups and water quality evaluation in Dankou District, Danjiangkou Reservoir*

Jin Jialin^{1,2}, Lv Xucong^{1,2}, Zeng Dahai^{1,2}, Ding Houkuan^{1,2}, Gao Yunni^{1,2}, Chen Haiyan^{2,3}, Yuan Huatao^{1,2} & Li Xuejun^{1,2**}

(1: College of Fisheries, Henan Normal University, Xinxiang 453007, P. R. China)

(2: Field Scientific Observation and Research Station of the Danjiangkou Reservoir Aquatic Ecosystem, Henan Province, Nanyang 474450, P. R. China)

(3: Ecological Environment Monitoring Center of the Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project in Henan Province, Nanyang 474475, P. R. China)

Abstract: The Danjiangkou Reservoir serves as a critical water source for the middle route of the South-to-North Water Diversion Project and is designated as a national first-level drinking water protection zone. Since the project's impoundment in 2014, the overall water quality in the reservoir area has consistently met or exceeded Class II standards, underscoring its vital ecological and water resource functions. Water level fluctuation, as a key operational parameter, directly shapes the aquatic environment and indirectly influences the growth, distribution, and diversity of phytoplankton. To evaluate how water-level-induced habitat changes affect phytoplankton functional groups in the Dankou District of Danjiangkou Reservoir, this study conducted sampling and analysis during high-water (October–December 2023) and low-water (April–June 2024) periods. We examined the structure and composi-

* 2025-05-05 收稿; 2025-09-01 收修改稿。

河南省南水北调渠首生态环境监测应急中心、河南省生态质量监测样地现场调查与评价项目资助。

** 通信作者; E-mail: xjli@htu.cn。

tion of phytoplankton functional groups and the environmental drivers affecting them. A total of 128 phytoplankton species from 75 genera and 7 phyla were identified across varying spatiotemporal conditions. Chlorophyta (37.33%), Bacillariophyta (36.00%), and Cyanophyta (14.67%) dominated the phytoplankton community. Significant differences in functional group composition were observed across time and space. In total, 26 functional groups were identified, including groups N and P (adapted to mixed water columns), Y and T (suited to stagnant waters), and generalist groups M and Lo. During the high-water period, functional group B dominated in the main reservoir, whereas groups MP, P, and Lo were dominant during the low-water period. In the tributaries, groups M, Lo, and S₁ prevailed in the high-water period, while groups T_C and B dominated in the low-water period. Redundancy analysis revealed that pH, turbidity, nitrate nitrogen, and phosphate were the primary environmental factors influencing dominant functional groups. Q-index-based water quality assessment indicated that the main reservoir water quality was generally “good”, while tributary water quality ranged from “poor” to “good”. These findings suggest that although water quality remains stable in the main reservoir, tributaries experience notable nutrient pollution impacts on phytoplankton communities during high-water periods, highlighting the need for management attention to external inputs under high-water conditions.

Keywords: Danjiangkou Reservoir; phytoplankton; functional groups; water quality assessment; Q-index

浮游植物是水生态系统中的重要初级生产者,对水域中的物质循环和能量流动起着关键作用。由于其体型小、生命周期短、运动能力较弱以及对环境变化敏感等特点,常被用作水体环境变化的指示生物^[1]。环境因素的变化通过直接或间接途径影响浮游植物的群落结构,湖泊中环境因子的波动变化会对浮游植物的群落组成及其动态变化产生显著影响^[2]。水位变化是水库运行的关键水文因素,直接影响水体特征,改变浮游植物的生长环境和群落结构^[3]。探讨不同水位下浮游植物群落结构及其与环境因子的关系,有助于深入解析水位波动对群落演替和生态功能变化的影响机制。

与传统的浮游植物分类相比,浮游植物功能群的分类可以更好地识别环境变量和人为干扰对生态系统的影响^[4]。Reynolds 等^[5]根据浮游植物对不同环境条件的敏感性和耐受性差异,推导出浮游植物的生境属性,并划分为 31 个不同的功能群。Padisák 等^[6]与胡韧等^[7]进一步完善了浮游植物功能群的划分,提升了对水体状态和群落结构的评估精度。浮游植物功能群能够反映水生态健康状况,由于浮游植物功能群与环境特征能够相互响应^[8],《欧盟水框架指令》基于此特点^[7],开发了生态健康指数(Q 指数),从生态健康层面评估群落结构完整性与系统稳定性,反映了水体生态系统对抗动的生物响应。Q 指数作为水生态健康评价的重要工具,能够揭示水体生态系统的整体状态,有助于从响应视角识别关键生态变化。

南水北调工程自 2002 年启动以来,通过构建贯通中国东、中、西部的水利调度系统,有效缓解了北京、天津、石家庄等北方城市的水资源短缺问题。作为该工程的核心水源地,丹江口水库在保障北方供水中具有不可替代的战略地位。南水北调中线自通水以来,丹江口水库的水质整体维持在 II 类水及以上水平^[9],但部分支流受农业、工业等污染,水质存在不同程度的富营养化问题,间接影响库区的水生态结构^[10]。自大坝加高后,多位学者对丹江口水库开展研究,如谭香等^[11]发现丹江口水库浮游植物组成中,硅藻门占比最高,其次为蓝藻门和隐藻门;王英华等^[12]发现丹江口水库在春、秋、冬三季的浮游植物群落中,硅藻门生物量占据优势,而夏季则表现为绿藻门迅速增长,逐渐占优。尽管已有研究在整个水库范围内对浮游植物群落特征进行了探讨,但针对丹江口水库丹库区浮游植物功能群结构及其在水质评价中的作用,尚缺乏系统性研究。本研究针对丹江口水库丹库区进行了不同时空的调查采样,通过分析浮游植物功能群的时空变化及影响浮游植物功能群的主要环境因子,基于功能群丰度比例变化,结合其生态意义,深入分析浮游植物功能群群落特征。本研究丹江口水库丹库区联合引入 Q 指数,从“响应”角度出发识别关键生态变化,填补丹库区在浮游植物功能群视角下生态状态评价方面的空白,为南水北调战略水源地生态保护提供理论支撑与技术参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域

丹江口水库作为南水北调中线工程的核心水源地,是一座集防洪、供水、发电和生态保护等多重功能于一体的特大型水利枢纽工程^[13]。库区横跨鄂豫两省,按河道特征划分为丹库区(河南淅川县,丹江入库段)

和汉库区(湖北丹江口市,汉江干流段)。丹库区位于丹江口库区北部,主要有丹江、老灌河等支流汇入,汇水范围广,流域涵盖山区、丘陵等多种地貌类型^[14]。2014年完成的大坝加高工程使正常蓄水位由157 m提升至170 m,水面面积达1050 km²,总库容达 2.90×10^{10} m³^[15]。作为国家二级饮用水源保护区,该库区水质长期保持在Ⅱ类标准,主要水质指标的年均值均符合生活饮用水地表水源地的水质要求。

1.2 样点布设

根据丹江口水库丹库区的地理形态、水文条件等调查采样要求,在丹库区设置4个采样点位,其中支流点位为丹江(DJ)和老灌河(LGH),库区点位为黑鸡咀(HJZ)和库心(KX)(图1)。LGH和DJ作为水库的主要支流,能够充分反映上游水质和生态条件;HJZ作为支流与水库的交汇点,水质受多源水流影响;KX则代表水库核心区域,反映整体水质和生态状况。在以下研究中,将库区高水位时期称为High_RA,支流高水位时期称为High_TB,库区低水位时期称为Low_RA,支流低水位时期称为Low_TB。

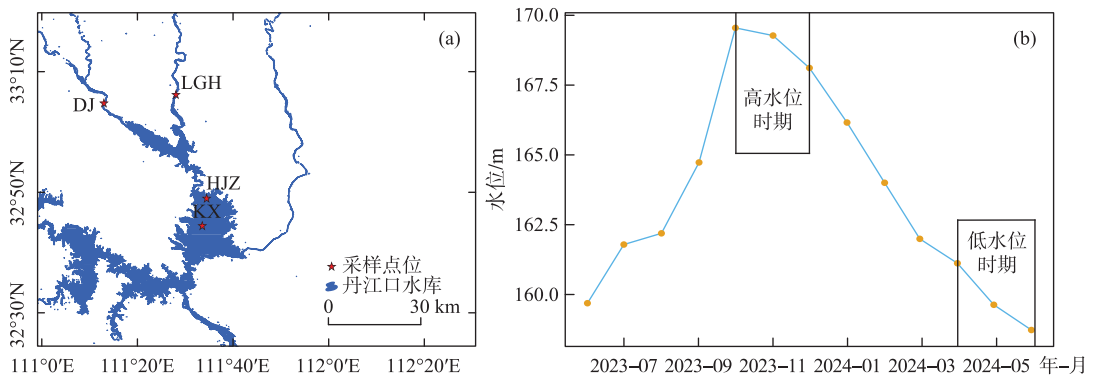


图1 丹江口水库丹库区采样点位分布(a)和水位变化(b)

Fig. 1 Geospatial arrangement of sampling stations (a) and temporal variation of reservoir water levels (b) in Danku District, Danjiangkou Reservoir

1.3 样品采集

通过收集全年水位变化数据,选取丹江口水库丹库区的高水位时期(2023年10—12月)和低水位时期(2024年4—6月)作为研究时段,并于每月25日对湖泊表层水体进行现场监测、水质样品取样和浮游植物样品采集。

浮游植物定量样品采用1 L采水器于水面之下0.5~1 m区域进行采样,采集的1 L水样转移至样品瓶后,立即加入1%~1.5%的鲁哥试剂进行固定处理^[16]。将固定样品静置沉淀48 h后,利用虹吸装置弃上清液,将定量样品浓缩至50~80 mL,避光保存。浮游植物定性样品使用25 μ 浮游生物网,在水体表面0.5 m水深处,以25~35 cm/s的速度将浮游生物网以“∞”形往复2~5 min,将收集的水样装入100 mL样品瓶中保存。定性样品使用含量为10%的甲醛溶液进行固定。采样过程中使用YSI(Xylem Inc., USA)水质分析仪记录水体表层的水温(WT)、水深(WD)、透明度(SD)、电导率(COND)、电阻率(Rho)、浊度(Tur)、pH、总溶解性固体(TDS)、溶解氧(DO)。将各点位采取的水样放至4℃冰箱中保存,48 h内在实验室中进行水化学指标分析,包括总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH₃-N)、硝态氮(NO₃-N)、正磷酸盐(PO₄³⁻-P)、亚硝态氮(NO₂-N)、溶解性总氮(TDN)、溶解性总磷(TDP)指标测定,叶绿素a(Chl. a)使用丙酮萃取分光光度计法测定,以上指标按照《水和废水监测分析方法》(第四版)^[17]测定。将已浓缩的定量样品混匀后取出0.1 mL,注入10×10的浮游植物计数框中,静置1 min后,在样品铺满整个浮游植物计数框并且没有气泡后,使用NIKON ECLIPSE Gi-L生物显微镜进行浮游植物鉴定,将浮游植物鉴定到属(种)^[18],通过浮游植物的丰度与藻类湿重的乘积计算出生物量。

划分功能群的方法有FG、MFG、MBFG和PFT,其中FG方法适用于丹江口水库丹库区这种封闭或半封闭的水体系统。本研究参照胡韧等^[6]在2009年补充的39种功能群分类法进行划分。

1.4 数据处理及分析

为确保数据的准确性,将不同时期的浮游植物数据和环境数据进行平均值处理,以减少异常数据对结果的影响。使用 ArcGIS 10.3 软件绘制调查点位分布图;利用 Microsoft Excel 2021 对数据进行整理;使用 SPSS 26 软件进行统计分析。对于环境指标的组间差异比较,采用单因素方差分析(one-way ANOVA),若方差分析结果显著,再使用 LSD 法进行事后多重比较。为探究多个环境指标对某一因变量的联合影响及筛选重要变量,采用多元逐步线性回归分析(multiple stepwise linear regression analysis),其中 $P < 0.05$ 表示差异显著, $P > 0.05$ 表示差异无统计学意义。使用 Origin Pro 2023 对浮游植物群落数据(物种数、丰度、生物量、优势度)进行数据可视化。在 R-4.3.3 中使用 ggpubr、tidyverse、vegan、ggpubr 包对浮游植物功能群丰度进行非度量多维标度(NMDS)分析。NMDS 作为一种无监督降维技术,通过最小化原始数据的秩次相似性矩阵与低维空间中样本点间欧氏距离的秩次差异(即应力值 stress,其中 stress 值 < 0.2 表明排序结果具有可靠性^[19]),将高维数据映射到低维空间,从而实现群落结构的可视。使用 vegan、ggplot2 包对浮游植物功能群与环境变量进行去趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA)。若排序轴最大梯度值小于 3,使用冗余分析(redundancy analysis, RDA);若大于 4,使用典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA);若在 3~4 之间,使用 RDA、CCA 均可。使用 $\ln(x+1)$ 消除异常值对结果的影响,计算方差膨胀因子(VIF < 20)和前向选择,筛选出目标环境因子,使用置换检验(999 次排列)对丹江口水库丹库区的环境变量因子进行排序。

1.5 浮游植物优势度

使用优势度指数(Y)^[20]计算浮游植物的优势种优势度,计算公式为:

$$Y = \left(\frac{n_i}{N} \right) \times f_i \quad (1)$$

式中, n_i 为第 i 个物种的总个体数, N 为采集到的生物个体总数, f_i 为 i 物种的出现频率。当 $Y > 0.02$ 时,该物种为群落的优势种。

1.6 水质评价指数

《欧盟水框架指令》在功能群与环境特征相互响应的基础上开发出生态健康指数用于环境监测^[21],在水体生态状态评价方面采用生态健康状态指数(Q 指数)法,其计算公式为:

$$Q = \sum_{i=1}^n \left(\frac{n_i}{N} \times F_i \right) \quad (2)$$

式中, n 为 FG 功能群的数量, N 为浮游植物的总生物量, n_i 为第 i 个功能群的生物量, F_i 为第 i 个功能类群的 F 值。其生态健康状态分级如下:0~1 为差,1~2 为耐受,2~3 为中等,3~4 为好,4~5 为极好。

2 结果

2.1 环境指标的时空分布特征

丹江口水库丹库区的环境因子指标在不同时空具有显著差异(表 1)。方差分析结果显示,WT、pH 和 Tur 在不同时空的均值大小排列为:高水位库区>高水位支流>低水位库区>低水位支流($P < 0.05$);而 Cond 和 SD 在不同时空的均值大小呈现相反趋势,表现为:低水位支流>低水位库区>高水位支流>高水位库区($P < 0.05$)。DO、TN、TP 和 TDS 在不同时空的均值大小排列为:高水位支流>低水位支流>高水位库区>低水位库区,变化同样显著($P < 0.05$)。不同时空的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 Chl. a 等理化因子同样具有显著差异($P < 0.05$)。

2.2 浮游植物及其功能群时空变化特征

丹江口水库丹库区共鉴定出浮游植物 7 门 75 属 128 种,其中绿藻门 28 属,占有浮游植物属的 37.33%;硅藻门 27 属,占 36.00%;蓝藻门 11 属,占 14.67%;金藻门、裸藻门各 3 属;甲藻门 2 属;隐藻门 1 属。低水位支流浮游植物属组成最多,绿藻门藻属组成最多,达 24 属。高水位库区浮游植物属组成最少。浮游植物丰度排列为:高水位支流>低水位支流>低水位库区>高水位库区,其中高水位支流浮游植物丰度最高,为 371.17×10^6 cells/L,点位平均丰度为 $(61.86 \pm 124.5) \times 10^6$ cells/L;高水位时期库区浮游植物丰度最

低,为 5.79×10^6 cells/L,点位平均丰度为 $(0.97 \pm 0.74) \times 10^6$ cells/L。丹江口水库丹库区浮游植物不同时空生物量以硅藻门、蓝藻门、甲藻门为主,高水位支流生物量最高,为 147.03 mg/L,点位平均生物量为 (24.51 ± 36.66) mg/L;低水位库区的生物量最低,为 3.46 mg/L,点位平均生物量为 (0.58 ± 0.36) mg/L(图 2)。

表 1 丹江口水库丹库区不同时期的环境因子

Tab. 1 Temporal variations of environmental factors in Danku District, Danjiangkou Reservoir

指标	高水位时期		低水位时期	
	High_RA	High_TB	Low_RA	Low_TB
TDN/(mg/L)	1.42±0.42 ^b	3.38±1.29 ^a	0.95±0.15 ^b	1.62±0.43 ^b
TN/(mg/L)	1.89±0.99 ^b	6.21±4.03 ^a	1.20±0.15 ^b	1.78±0.45 ^b
NO ₃ ⁻ -N/(mg/L)	0.77±0.21 ^b	2.36±0.64 ^a	0.78±0.04 ^b	1.23±0.56 ^b
NH ₃ -N/(mg/L)	0.02±0.01 ^b	0.04±0.02 ^a	0.02±0.01 ^b	0.02±0.01 ^b
NO ₂ ⁻ -N/(μg/L)	2.92±0.54 ^b	20.38±17.09 ^a	8.33±1.59 ^b	36.57±25.91 ^a
TDP/(μg/L)	13.84±2.93 ^{bc}	22.75±5.69 ^{ab}	11.24±5.28 ^c	28.96±17.03 ^a
TP/(μg/L)	23.44±9.13 ^b	179.41±333.67 ^a	14.32±6.53 ^b	43.45±23.61 ^b
PO ₄ ³⁻ -P/(μg/L)	15.78±5.76 ^b	20.95±11.82 ^a	4.56±2.93 ^c	19.85±13.28 ^a
Chl. a/(μg/L)	2.09±0.65 ^b	26.35±34.66 ^a	2.06±0.51 ^a	6.70±6.23 ^a
WT/°C	16.93±4.21 ^b	13.13±5.42 ^b	23.80±4.61 ^a	26.77±3.23 ^a
DO/(mg/L)	8.93±1.11 ^b	10.74±0.92 ^a	9.08±0.38 ^b	9.81±0.88 ^a
WD/m	44.05±8.41 ^a	6.01±4.13 ^c	33.48±9.39 ^b	1.55±0.93 ^c
COND/(μS/cm)	261.67±20.54 ^b	390.50±55.15 ^a	284.17±5.27 ^b	426.33±33.10 ^a
SD/m	3.52±0.81 ^a	0.71±0.47 ^b	3.96±1.22 ^a	0.68±0.23 ^b
pH	8.18±0.60 ^a	7.68±0.53 ^b	8.49±0.23 ^a	8.44±0.61 ^a
TDS/(mg/L)	126.17±8.02 ^c	191.90±23.62 ^b	133.98±2.91 ^a	200.13±10.84 ^a
Rho/(KΩ×cm)	3.79±0.24 ^a	2.55±0.29 ^b	3.58±0.08 ^a	2.55±0.28 ^a
Tur/NTU	3.05±1.88 ^b	22.95±21.64 ^a	2.11±0.83 ^b	8.13±3.04 ^b

* 不同小写字母上标表示不同时空分组数据之间存在显著差异($P < 0.05$),相同小写字母上标表示无显著差异。

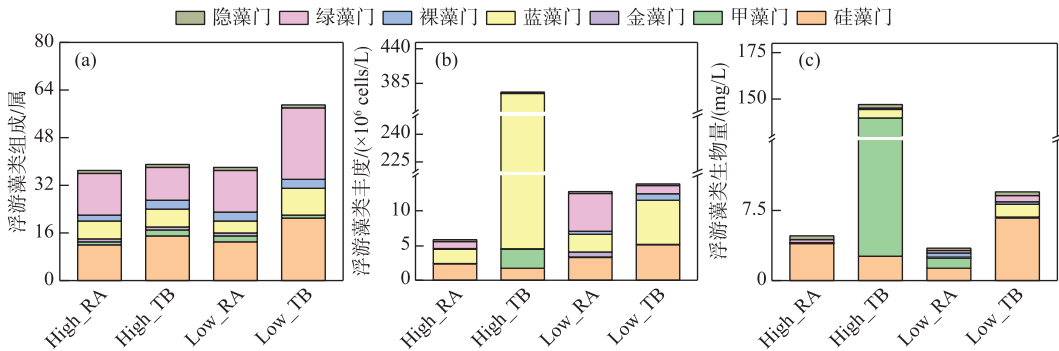


图 2 丹江口水库丹库区不同时空浮游植物组成(a)、丰度(b)和生物量(c)

Fig. 2 Spatiotemporal variations of phytoplankton community structure (a), abundance (b), and biomass (c) in Danku District, Danjiangkou Reservoir

本研究中,共识别出 26 个功能群,分别为 B、C、D、E、F、G、H1、J、K、L_M、Lo、M、MP、N、P、S₁、T_B、T_C、W₁、W₂、W_S、X1、X2、X3、Y 和 Z(表 2),其中功能群 MP 包含的属最多,共 13 属,主要包括舟形藻属、游丝藻属、桥弯藻属等。

表 2 丹江口水库丹库区浮游植物的功能群组成及生境特征

Tab. 2 Phytoplankton functional group assemblage and habitat attributes in Danku district, Danjiangkou Reservoir

功能群	藻属组成	生境特征	耐受性
B	沟链藻属 <i>Aulacoseira</i> sp.	中营养、中小型或大型浅水水体	低光照
	冠盘藻属 <i>Stephanodiscus</i> sp.		
	小环藻属 <i>Cyclotella</i> sp.		
C	星杆藻属 <i>Asterionella</i> sp.	富营养、中小型水体	低光照、低含碳量
	肘形藻属 <i>Synedra</i> sp.		
D	菱形藻属 <i>Nitzschia</i> sp.	含有营养盐、浑浊	—
	针杆藻属 <i>Synedra</i> sp.		
E	鱼鳞藻属 <i>Mallomonas</i> sp.	贫营养或异养型、小型水体、浅水	低营养(有赖于混合营养)
	锥囊藻属 <i>Dinobryon</i> sp.		
F	卵囊藻属 <i>Oocystis</i> sp.	中到富营养、洁净、混合强	低营养、高浑浊
	盘状藻属 <i>Placoneis</i> sp.		
	肾形藻属 <i>Nephrocytium</i> sp.		
	蹄形藻属 <i>Kirchneriella</i> sp.		
	微芒藻属 <i>Micractinium</i> sp.		
	月牙藻属 <i>Selenastrum</i> sp.		
G	空球藻属 <i>Eudorina</i> sp.	富营养、停滞水体	高光照
	团藻属 <i>Volvox</i> sp.		
H1	矛丝藻属 <i>Cuspidothrix</i> sp.	富营养、分层、含氮低、浅水	低含氮量、低含碳量
	长孢藻属 <i>Dolichospermum</i> sp.		
J	顶棘藻属 <i>Chodatella</i> sp.	富营养、混合、浅水	—
	多芒藻属 <i>Golenkinia</i> sp.		
	空星藻属 <i>Coelastrum</i> sp.		
	盘星藻属 <i>Pediastrum</i> sp.		
	盘状栅藻 <i>Scenedesmus disciformis</i>		
	十字藻属 <i>Crucigenia</i> sp.		
	四角藻属 <i>Tetraedron</i> sp.		
	月形藻属 <i>Closteridium</i> sp.		
	栅藻属 <i>Scenedesmus</i> sp.		
	K		
L _M	角甲藻属 <i>Ceratium</i> sp.	富到超富营养、中小型水体	很低的碳含量
	隐杆藻属 <i>Aphanothece</i> sp.		
Lo	胶球藻属 <i>Coccomyxa</i> sp.	贫到富营养、中到大型水体、可深可浅	营养分层
	平裂藻属 <i>Merismopedia</i> sp.		
	色球藻属 <i>Chroococcus</i> sp.		
M	双菱藻属 <i>Surirella</i> sp.	小到中型、富营养到超富营养、稳定、透明度较高	暴晒
	水绵属 <i>Spirogyra</i> sp.		
	微囊藻属 <i>Microcystis</i> sp.		
MP	鞍形藻属 <i>Campyloneis</i> sp.	经常性搅动、浑浊、浅水	混合搅动
	杯状藻属 <i>Chlamydomonas</i> sp.		
	短缝藻属 <i>Eunotia</i> sp.		
	杆状藻属 <i>Bacillaria</i> sp.		
	卵形藻属 <i>Cocconeis</i> sp.		
	美壁藻属 <i>Caloneis</i> sp.		
	内丝藻属 <i>Liagorophila</i> sp.		
	拟内丝藻属 <i>Encyonopsis</i> sp.		

续表 2

功能群	藻属组成	生境特征	耐受性
	桥弯藻属 <i>Cymbella</i> sp.		
	异极藻属 <i>Gomphonema</i> sp.		
	游丝藻属 <i>Planctonema</i> sp.		
	羽纹藻属 <i>Pinnularia</i> sp.		
	舟形藻属 <i>Navicula</i> sp.		
N	鼓藻属 <i>Cosmarium</i> sp.	持续或半持续的混合水层	低营养
P	脆杆藻属 <i>Fragilaria</i> sp.	持续或半持续的混合水层	中程度的低光照和低碳含量
	等片藻属 <i>Diatoma</i> sp.		
	新月藻属 <i>Closterium</i> sp.		
S ₁	浮丝藻属 <i>Planktothrix</i> sp.	混合浑浊、透明度低	极低的光照
	假鱼腥藻属 <i>Pseudanabaena</i> sp.		
	鞘丝藻属 <i>Lyngbya</i> sp.		
T _B	直链藻属 <i>Melosira</i> sp.	强急流	冲刷
T _C	颤藻属 <i>Oscillatoria</i> sp.	富营养、静水或者流动缓慢、具有挺水植物	—
W ₁	扁裸藻属 <i>Phacus</i> sp.	有机污染、浅水	高生化需氧量
	裸藻属 <i>Euglena</i> sp.		
W ₂	囊裸藻属 <i>Trachelomonas</i> sp.	中营养、浅水	—
W _S	黄群藻属 <i>Synura</i> sp.	富含植物分解有机质	—
X ₁	单针藻属 <i>Monoraphidium</i> sp.	超富营养、浅水	分层
	纤维藻属 <i>Ankistrodesmus</i> sp.		
	小球藻属 <i>Chlorella</i> sp.		
X ₂	衣球藻属 <i>Chlamydomonas</i> sp.	中到富营养、浅水	分层
	翼膜藻属 <i>Pteromonas</i> sp.		
X ₃	波缘藻属 <i>Cymatopleura</i> sp.	贫营养、混合、浅水	恶劣环境条件
	弓形藻属 <i>Schroederia</i> sp.		
	双壁藻属 <i>Diploneis</i> sp.		
Y	裸甲藻属 <i>Gymnodinium</i> sp.	静水环境	低光照
	双楔藻属 <i>Didymosphenia</i> sp.		
	隐藻属 <i>Cryptomonas</i> sp.		
Z	集星藻属 <i>Actinastrum</i> sp.	贫营养	低营养

各功能群的出现频率以功能群在点位中出现次数占总采样点位次数的比例表示。功能群 B、Y、MP、Lo、X₁、W₂、D、J、F、M、S₁ 和 P 的出现频率在 50%~90% 之间,构成了丹江口水库丹库区常见的功能群(图 3);功能群 W₁、T_B、X₃、E、L_M、T_C 和 X₂ 出现频率在 30%~50% 之间;功能群 E、L_M、T_C、X₂、G、H₁、C、N、Z、K 和 W_S 的出现频率低于 30%。

按采样点丰度大于 10% 的功能群定义为优势功能群,本研究共划分出 7 个优势功能群,分别为功能群 B、M、Lo、S₁、MP、P 和 T_C(表 3)。在高水位时期,功能群 B 为库区优势功能群,优势度为 0.36;支流以功能群 M、Lo 和 S₁ 为优势功能群,优势度分别为 0.29、0.13 和 0.13。在低水位时期,库区的优势功能群为 MP,优势度为 0.35,功能群 P、Lo 次之;在支流中,功能群 T_C 和 B 为优势功能群,优势度分别为 0.16 和 0.12。相较于低水位期,高水位期的特有功能群为 M 和 S₁;而相较于高水位期,低水位期新增了功能群 T_C 和 MP,其中功能群 MP 占据绝对优势。

基于 Bray-Curtis 相似性矩阵,采用非度量多维标度排序(non-metric multidimensional scaling, NMDS)对不同时空的浮游植物功能群进行分析(图 4)。结果显示,其 stress 值为 0.1737,表明数据的拟合程度较好。不同时空浮游植物功能群所形成的聚类区域在空间分布上存在显著差异(P<0.05),表明不同时空条件下浮游植物功能群的组成存在显著变化。

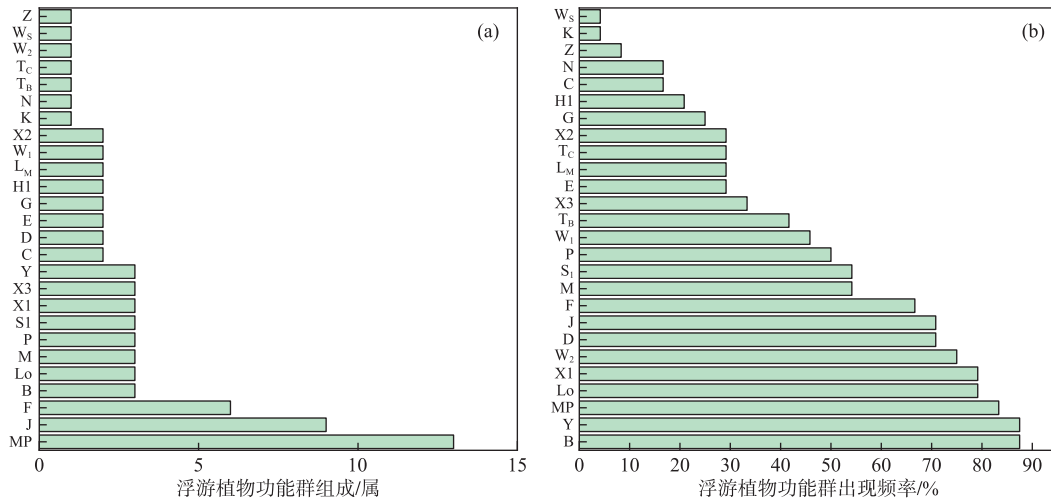


图3 丹江口水库丹库区浮游植物功能群组成(a)和出现频率(b)

Fig. 3 Phytoplankton functional group composition (a) and occurrence frequency (b) in Danku District, Danjiangkou Reservoir

表3 丹江口水库丹库区不同时空下浮游植物优势功能群及优势度
Tab. 3 Dominant phytoplankton functional groups and their dominance degrees under different spatiotemporal conditions in Danku District, Danjiangkou Reservoir

时期	功能群	优势度
High_RA	B	0.36
High_TB	M	0.29
	Lo	0.13
	S ₁	0.13
Low_RA	MP	0.35
	P	0.10
	Lo	0.10
Low_TB	T _C	0.16
	B	0.12

2.3 不同时空条件下浮游植物优势功能群与环境因子的关系

为确定丹江口水库丹库区浮游植物功能群与环境因子的关系,将不同时空的浮游植物优势功能群与其环境因子进行RDA分析(图5)。结果显示,RDA1轴与RDA2轴的解释度分别为17.48%和10.14%,前两轴可以较好地解释浮游植物功能群与环境理化因子的关系。使用环境因子进行蒙特卡洛置换检验($P < 0.05$)筛选,确定pH、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、Tur、 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 是具有显著解释性的环境因子。结果表明,功能群MP、P、Lo与 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、Tur呈正相关,与pH和 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 呈负相关。功能群M、B、S₁、T_C与pH、 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 呈正相关,与 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、Tur呈负相关。

2.4 不同时空条件下的Q指数评价

基于浮游植物功能群Q指数对丹江口水库丹库区进行水质评价(图6)。不同时空Q指数范围为0.07~3.68,库区在高水位时期水质整体接近“好”的状态(2.95~3.09),而支流在高水位时期的水质处于“耐受”状态(Q指数=1.63)。低水位库区水质处于“中等”状态(Q指数=2.24),低水位支流水质处于

“好”的状态(Q指数=3.17)。由于两个时空Q指数均值在2~3之间,表明丹江口水库水质处于“中等”状态。

3 讨论

3.1 丹江口水库丹库区浮游植物及功能群特征

作为南水北调工程的核心水源地,丹江口水库的浮游植物群落特征直接影响其生态健康。浮游植物不仅是水生生态系统的初级生产者,其群落结构的变化也能反映水体的物理化学状态及营养水平^[22]。已有研究表明,硅藻门、绿藻门、蓝藻门是丹江口水库丹库区优势类群,其中硅藻门的种类最为丰富,然而自2014年丹江口大坝加高,绿藻门在低水位期间(春、夏季)逐渐成为主要优势类群^[19-22]。本研究发现,在低水位期间,浮游植物门水平主要由硅藻门、绿藻门、蓝藻门组成,与已有研究结果相似^[11-12,23-25]。但支流浮游植物的

物种组成较库区更为丰富,丰度最高的类群为蓝藻门,而生物量最高的类群为甲藻门。在高水位期间,浮游植物优势类群发生显著变化,以蓝藻门、甲藻门、硅藻门为主要优势类群。蓝藻门在高水位时期的丰度显著上升,而甲藻门和硅藻门则表现出较高的生物量。本研究发现,2023年10-11月期间支流 LGH 暴发蓝藻水华,导致蓝藻门丰度急剧上升,该点位蓝藻门丰度均为 $(1.81 \pm 1.82) \times 10^8$ cells/L,远超过已有研究的点位丰度范围 $(2.32 \times 10^5 \sim 7.35 \times 10^6$ cells/L)^[11-12,23-25];而甲藻门在同期出现异常生物量,其点位生物量均为 (67.50 ± 12.01) mg/L,远超已有研究的点位生物量。蓝藻门与甲藻门的异常增量可能与高水位时期营养盐富集有关。支流在高水位时期淹没部分河岸带,释放出大量营养盐,使水体营养水平显著提高^[26]。富营养环境为蓝藻门^[20]和甲藻门^[27]的繁殖提供了有利条件。

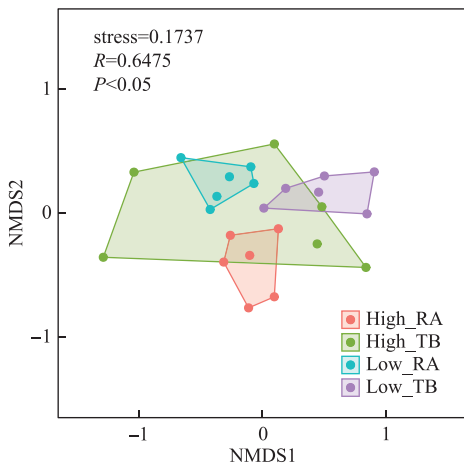


图4 丹江口水库丹库区浮游植物功能群组成不同时空下非度量多维排列分析

Fig. 4 Non-metric multidimensional scaling (NMSD) analysis of phytoplankton functional group composition across spatiotemporal gradients in Danku District, Danjiangkou Reservoir

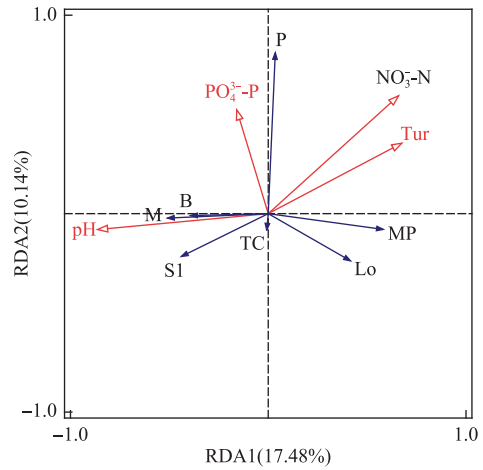


图5 丹江口水库丹库区浮游植物优势功能群与环境因子的RDA分析

Fig. 5 Redundancy analysis (RDA) of dominant phytoplankton functional groups in relation to environmental variables in Danku District, Danjiangkou Reservoir

浮游植物功能群反映了特定的水体生境状况,其群落分布会随着水体营养状况和季节变化而发生动态演替^[28]。调查期间,功能群 B、MP、M、T_c 为常见的优势功能群。本研究中,功能群 B 的代表藻种为小环藻,其对 pH 值变化及硅元素含量较为敏感,常分布在中营养化水体中。小环藻因其较大的细胞表面积,能够更有效地吸收光照,因此在低光照条件下具有较强的适应性,适宜在 16~26 °C 的温度下生长^[29]。而库区高水位期间水温为 12.7~21.14 °C,由于高水位库区和低水位支流水体普遍存在较高的营养盐水平,这为以小环藻为代表的功能群 B 的繁殖提供了适宜条件。功能群 MP 常见于受搅动影响较大的水体环境,而丹江口水库作为一座深水水库,具有明显的水层分层特征^[30],适合功能群 MP 生长。在低水位时期,库区的营养水平相较于高水位有所

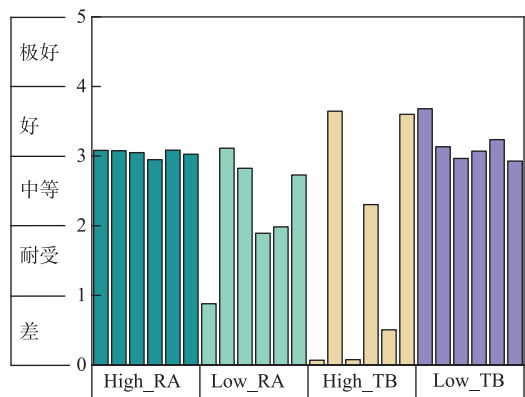


图6 丹江口水库丹库区 Q 指数

Fig. 6 Q-index in Danku District, Danjiangkou Reservoir

下降,而支流汇入库区时,尤其在 HJZ 汇入点,水体受到扰动,导致 Tur 升高,为功能群 MP、P、Lo 提供了适宜的生境。以微囊藻为代表的功能群 M 在高水位支流中为绝对优势功能群,其点度丰度均为 $(3.57 \pm 9.54) \times 10^7$ cells/L。功能群 M 常分布于富营养到超富营养、稳定且透明度较高的水体中,在本研究中高水位时期,水体透明度较低,可能是由于蓝藻水华暴发导致水体透明度下降,其水体富营养化状态可能优先支持功能群 M 的竞争优势。低水位期间,支流水体营养水平升高,同时水位下降使水体变浅,温度升高,为功能群 T_c、B 的生长提供了适宜的条件。

3.2 丹江口水库丹库区浮游植物功能群与环境因子的关系

浮游植物功能群与其对应的生境状态密切相关,能够较为准确地反映水体水质状况^[31]。不同功能群对环境因子的响应存在差异。本研究结果表明,pH、PO₄³⁻-P、NO₃⁻-N 和 Tur 是影响丹江口水库丹库区浮游植物功能群分布的关键因子。pH 是调控浮游植物代谢与生长的重要参数,过高或过低均会抑制光合作用^[32]。刘春光等^[33]指出,当 pH 值为 8.5 时,水体碳酸系统稳定性较高,利于浮游植物繁殖。丹江口水库丹库区 pH 值范围为 7.15~9.05,整体呈弱碱性,这种环境有助于藻类吸收大气 CO₂,从而促进光合作用^[34]。RDA 分析显示,功能群 M、B、S1 和 TC 与 pH 呈正相关,尤其以蓝藻为主的 M、S1 和 TC 在高 pH 环境中具有显著竞争优势,这可能源于蓝藻在弱碱条件下对 CO₂ 的高效利用能力,从而更有效地进行光合作用^[35]。

氮、磷等营养盐是浮游植物繁殖的限制性因子,对功能群分布具有重要影响。本研究中,功能群 M、TC 和 S₁ 与 NO₃⁻-N 和 PO₄³⁻-P 呈正相关,尤其在高水位支流区域,营养盐浓度较高,为蓝藻类功能群的快速增殖提供了有利条件。Anderson 等^[36]的研究结果表明,蓝藻可高效利用磷元素并形成优势群落,这与功能群 M 在高水位支流区的主导地位一致。NO₃⁻-N 作为总氮的主要形态,其高浓度促进了真核藻类的生长^[37],如功能群 B 在高水位库区的优势可能与其较高的氮素利用效率有关。相反,功能群 MP、P 和 Lo 在低水位库区占优势,可能是由于低营养条件下更适应分层水体生境^[8]。此外,高水位支流区营养盐富集与水华暴发密切相关,提示外源性污染输入可能是驱动功能群演替的重要原因。浊度通过影响光的透射率而间接调控浮游植物光合作用。本研究发现,功能群 MP、P 和 Lo 与浊度呈正相关,尤其在低水位支流和 HJZ 区域,水体扰动导致浊度升高,为这些功能群提供了适宜的生长条件。Silvoso 等^[38]的研究表明,浊度与水体颗粒物浓度相关,高浊度环境有利于耐受扰动的功能群(如 MP),本研究结果与其一致。

3.3 丹江口水库丹库区 Q 指数评价

本研究基于浮游植物功能群 Q 指数,对丹江口水库丹库区在不同水位及空间条件下的水质特征进行了系统评估。结果显示,Q 指数总体范围为 0.07~3.68。由于不同功能群赋值具有差异^[7],高水位时期,库区 Q 指数为 2.95~3.09(接近“好”的状态),而支流降至 1.63(“耐受”状态),显示其浮游植物功能群结构受扰动明显,这与同期支流 LGH 优势功能群及水华现象密切相关。低水位时期,库区 Q 指数下降至 2.24(“中等”状态),支流则回升至 3.17(“好”的状态),这可能是在水位下降后浮游植物群落趋于稳定,高赋值的功能群重新占据优势。综合分析显示,高水位时期营养盐浓度显著升高,支流 Q 指数低至 1.63,表明在高营养盐条件下浮游植物群落结构受到明显扰动,功能群多样性下降,群落组成以低赋值功能群(如 M、Lo)为主。而低水位期支流 Q 指数升高至 3.17,该时期水体环境条件相较于高水位时期有所改善,适宜部分高赋值功能群(如 TC、B)生存,且多样性提升在一定程度上增强了群落对外界干扰的缓冲能力^[5]。因此,Q 指数能够揭示环境变化对浮游植物功能群群落结构特征及生态功能的实质性影响,可为水质动态评估与生态修复提供科学参考。综上,丹江口水库丹库区总体水质较为稳定,但支流水质波动显著,高水位时期支流区域的生态风险尤为突出。建议加强支流入库区的点源与面源污染控制,并关注水位波动对浮游植物群落演替及生态功能的影响。

4 结论

1) 丹江口水库丹库区浮游植物共鉴定浮游植物 7 门 75 属 128 种,划分为 26 个功能群,群落结构在高、低水位间显著分化,优势功能群发生替换,支流变化幅度大于库区。

2) 浮游植物功能群结构受环境变化影响,RDA 分析表明,pH、Tur、PO₄³⁻-P 和 NO₃⁻-N 是影响丹江口水库丹库区优势浮游植物功能群的主要环境因子。

3) 基于 Q 指数的综合评价,丹库区总体水质处于“中等”水平,但高水位时期水体生态状况低于低水位时期,提示水库管理需重点关注高水位时期外源输入对群落结构与水生生态功能的潜在影响。

5 参考文献

- [1] Zhang T, Li L, Song LR. Annual dynamics of phytoplankton abundance and community structure in the Xionghe Reservoir. *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. 生态学报, 2009, **29**(6): 2971-2979.]
- [2] Liu XX, Chen L, Jiang YN *et al.* Spatiotemporal variation of phytoplankton communities and their relationship with environmental factors in Lake Fuxian. *J Lake Sci*, 2020, **32**(3): 793-803. DOI: 10.18307/2020.0319. [刘晓曦, 陈丽, 蒋伊能等. 抚仙湖浮游植物群落时空变化特征及其与环境因子的关系. 湖泊科学, 2020, **32**(3): 793-803.]
- [3] Liu JF, Chen YW, Li MJ *et al.* Water-level fluctuations are key for phytoplankton taxonomic communities and functional groups in Poyang Lake. *Ecological Indicators*, 2019, **104**: 470-478. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.05.021.
- [4] Abonyi A, Leitão M, Stanković I *et al.* A large river (River Loire, France) survey to compare phytoplankton functional approaches: Do they display river zones in similar ways *Ecological Indicators*, 2014, **46**: 11-22. DOI: 10.1016/j.ecolind.2014.05.038.
- [5] 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.
- [6] Padišák J, 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): 1-19. DOI: 10.1007/s10750-008-9645-0.
- [7] Hu R, Lan YQ, Xiao LJ *et al.* The concepts, classification and application of freshwater phytoplankton functional groups. *J Lake Sci*, 2015, **27**(1): 11-23. DOI: 10.18307/2015.0102. [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. 湖泊科学, 2015, **27**(1): 11-23.]
- [8] Dong J, Li YH, Li GB *et al.* Seasonal dynamics characteristics and affecting physical factors of phytoplankton functional groups in Dongjiang River. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2013, **37**(5): 836-843. DOI: 10.7541/2013.107. [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. 水生生物学报, 2013, **37**(5): 836-843.]
- [9] Jing LX, Ma LK, Xu YX *et al.* Study on the ecological environment protection of Danjiangkou Reservoir area and its upper reaches during the 14th Five-Year Plan period. *Environmental Protection*, 2021, **49**(14): 59-62. [井柳新, 马乐宽, 续衍雪等. “十四五”丹江口库区及上游生态环境保护思路研究. 环境保护, 2021, **49**(14): 59-62.]
- [10] Li NX, Xu JF, Yin W *et al.* Effect of local watershed landscapes on the nitrogen and phosphorus concentrations in the waterbodies of reservoir bays. *Science of the Total Environment*, 2020, **716**: 137132. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137132.
- [11] Tan X, Xia XL, Cheng XL *et al.* Temporal and spatial pattern of phytoplankton community and its biodiversity indices in the Danjiangkou Reservoir. *Environmental Science*, 2011, **32**(10): 2875-2882. DOI: 10.13227/j.hjxx.2011.10.008. [谭香, 夏小玲, 程晓莉等. 丹江口水库浮游植物群落时空动态及其多样性指数. 环境科学, 2011, **32**(10): 2875-2882.]
- [12] Wang YH, Chen L, Niu Y *et al.* Spatio-temporal variation in phytoplankton community and its influencing factors in Danjiangkou Reservoir. *J Lake Sci*, 2016, **28**(5): 1057-1065. DOI: 10.18307/2016.0516. [王英华, 陈雷, 牛远等. 丹江口水库浮游植物时空变化特征. 湖泊科学, 2016, **28**(5): 1057-1065.]
- [13] Pang ZL, Chang HJ, Li YY *et al.* Analytical hierarchy process (AHP) evaluation of water quality in Danjiangkou Reservoir-source of the middle line project to transfer water from south to north, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(4): 1810-1819. [庞振凌, 常红军, 李玉英等. 层次分析法对南水北调中线水源区的水质评价. 生态学报, 2008, **28**(4): 1810-1819.]
- [14] Shi ZF, Xiong GC, Yin LN *et al.* “Ecological Space” of Xichuan County. *Remote Sensing Technology and Application*, 2022, **37**(6): 1525-1536. [史志方, 熊广成, 尹利娜等. 丹江口水库扩张对淅川县“三生空间”的影响研究. 遥感技术与应用, 2022, **37**(6): 1525-1536.]
- [15] Yu Q, Shi CY, Zhuang NN *et al.* Analysis of impact of sub-watersheds landscape patterns on trophic state of Danjiangkou Reservoir. *Research of Environmental Sciences*, 2024, **37**(8): 1714-1724. [余祺, 时晨赓, 庄娜娜等. 子流域景观格局对丹江口水库营养状态的影响分析. 环境科学研究, 2024, **37**(8): 1714-1724.]
- [16] 尹静章. 水环境监测技术. 延吉: 延边大学出版社, 2023.
- [17] 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(第四版增补版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [18] 胡鸿钧. 中国淡水藻类. 上海: 上海科学技术出版社, 1980.
- [19] Chen B, Li WM, Chen QW *et al.* Effects of different bottom sediment and submerged macrophytes on macrofauna communities in the Li-jiang River during the summer. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(7): 1758-1765. DOI: 10.13671/j.hjxxb.2014.0704. [陈博, 李卫明, 陈求稳等. 夏季漓江不同底质类型和沉水植物对底栖动物分布的影响. 环境科学学报, 2014, **34**(7): 1758-1765.]

- [20] Wu D, Wang HY, Zhang Z. Investigation of summer plankton community structure in Yuqiao Reservoir, Tianjin. *J Lake Sci*, 2013, **25**(5): 735-742. DOI: 10.18307/2013.0516. [武丹, 王海英, 张震. 天津于桥水库夏季浮游生物调查及群落结构变化. 湖泊科学, 2013, **25**(5): 735-742.]
- [21] Xia YF, Hu XD, Xu JX *et al.* Seasonal succession of phytoplankton functional group and assessment of water quality in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2019, **31**(1): 134-146. DOI: 10.18307/2019.0113. [夏莹莹, 胡晓东, 徐季雄等. 太湖浮游植物功能群季节演替特征及水质评价. 湖泊科学, 2019, **31**(1): 134-146.]
- [22] Zhu WJ, Xiao MZ, Chang KX *et al.* Analysis of phytoplankton community structure based on functional group classification in Hongcheng Lake, Haikou City. *Journal of Hydroecology*, 2022, **43**(6): 78-84. DOI: 10.15928/j.1674-3075.202104050092. [朱为菊, 肖明珠, 常开心等. 基于功能群分类法的海口市红城湖浮游植物群落特征分析. 水生态学杂志, 2022, **43**(6): 78-84.]
- [23] Shen HL, Xu YY, Wang L *et al.* Spatial and temporal variations of phytoplankton in Danjiangkou Reservoir and its affecting factors. *Plant Science Journal*, 2011, **29**(6): 683-690. DOI: 10.3724/SP.J.1142.2011.60683. [申恒伦, 徐耀阳, 王岚等. 丹江口水库浮游植物时空动态及影响因素. 植物科学学报, 2011, **29**(6): 683-690.]
- [24] Zhang CM, Zhu YX, Song GF *et al.* Spatio-temporal pattern of phytoplankton community structure and its determining factors in the channel of the middle route of South-to-North Water Diversion Project. *J Lake Sci*, 2021, **33**(3): 675-686. DOI: 10.18307/2021.0305. [张春梅, 朱宇轩, 宋高飞等. 南水北调中线干渠浮游植物群落时空格局及其决定因子. 湖泊科学, 2021, **33**(3): 675-686.]
- [25] Xiao YN, Cheng JH, Mo XC *et al.* Spatio-temporal variation of phytoplankton community and its relationship with environmental factors in Danjiangkou Reservoir. *J Lake Sci*, 2023, **35**(3): 821-832. DOI: 10.18307/2023.0306. [肖玉娜, 程靖华, 莫晓聪等. 丹江口水库浮游植物群落时空变化及其与环境因子的关系. 湖泊科学, 2023, **35**(3): 821-832.]
- [26] Yin J, Liu H, Chen XL. Dynamic change in the water-level fluctuation zone of the Danjiangkou Reservoir and its influence on water quality. *Sustainability*, 2018, **10**(4): 1025. DOI: 10.3390/su10041025.
- [27] Bian GG, Chen N, Hu ZY *et al.* A river in Fujian algal dinoflagellate relationship with the pollution index. *J Lake Sci*, 2010, **22**(3): 405-410. DOI: 10.18307/2010.0313. [边归国, 陈宁, 胡征宇等. 福建某河流甲藻水华与污染指标的关系. 湖泊科学, 2010, **22**(3): 405-410.]
- [28] Seip KL, Reynolds CS. Phytoplankton functional attributes along trophic gradient and season. *Limnology and Oceanography*, 1995, **40**(3): 589-597. DOI: 10.4319/lo.1995.40.3.0589.
- [29] Dalu T, Cuthbert RN, Weyl OLF *et al.* Community structure and environmental factors affecting diatom abundance and diversity in a Mediterranean climate river system. *Science of the Total Environment*, 2022, **810**: 152366. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152366.
- [30] Sheng CM, Lian JJ, Liu F *et al.* Study on the force of low-temperature water treatment curtain in deep water reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, **47**(12): 1548-1557. [盛传明, 练继建, 刘昉等. 深水水库下泄低温水治理挡水幕布受力研究. 水利学报, 2016, **47**(12): 1548-1557.]
- [31] Wei HX, Wang XB, Kou LX *et al.* The relationship between phytoplankton community structure and environment factors in the lower Yalu River. *Journal of Hydroecology*, 2018, **39**(4): 73-78. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2018.04.010. [魏洪祥, 王兴兵, 寇凌霄等. 鸭绿江下游浮游植物群落结构与环境因子的关系. 水生态学杂志, 2018, **39**(4): 73-78.]
- [32] Feng Y, Xiao LJ, Wui 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 and 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.]
- [33] Liu CG, Jin XC, Sun L *et al.* Effects of pH on growth and species changes of algae in freshwater. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2005, **24**(2): 294-298. [刘春光, 金相灿, 孙凌等. pH值对淡水藻类生长和种类变化的影响. 农业环境科学学报, 2005, **24**(2): 294-298.]
- [34] Ma BS, Xu B, Wei KJ *et al.* Phytoplankton community structure and its relation to environmental conditions in the middle Anning River, China. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, **39**(10): 3332-3341. DOI: 10.13292/j.1000-4890.202010.030. [马宝珊, 徐滨, 魏开金等. 安宁河中游浮游植物群落结构及其与环境因子的关系. 生态学杂志, 2020, **39**(10): 3332-3341.]
- [35] Xu H, Liu ZP, Yuan L *et al.* Effect of pH on growth of several freshwater algae. *Environmental Science & Technology*, 2009, **32**(1): 27-30. [许海, 刘兆普, 袁兰等. pH对几种淡水藻类生长的影响. 环境科学与技术, 2009, **32**(1): 27-30.]
- [36] Anderson SI, Barton AD, Clayton S *et al.* Marine phytoplankton functional types exhibit diverse responses to thermal change. *Nature Communications*, 2021, **12**: 6413. DOI: 10.1038/s41467-021-26651-8.
- [37] Berger SA, Diehl S, Stibor H *et al.* Separating effects of climatic drivers and biotic feedbacks on seasonal plankton dynamics: No sign of trophic mismatch. *Freshwater Biology*, 2014, **59**(10): 2204-2220. DOI: 10.1111/fwb.12424.
- [38] Silvo J, Izaguirre I, Allende L. Picoplankton structure in clear and turbid eutrophic shallow lakes: A seasonal study. *Limnologica*, 2011, **41**(3): 181-190. DOI: 10.1016/j.limno.2010.10.001.