J. Lake Sci.(湖泊科学), 2024, **36**(2): 416-429
DOI 10. 18307/2024. 0217

广东新丰江水库极端旱情期浮游藻类功能群特征及与环境因子的关系*

张 辉[1],彭宇琼[1],邹贤妮[1],张婷婷[1],廖志惠[1],林小平[1],乔永民[2**],陈 瑞[2]
(1:广东省河源生态环境监测站,河源 517000)
(2:暨南大学水生生物研究所,广州 510632)

摘 要: 为了解极端旱情对新丰江水库的浮游植物功能群(functional group)的演替规律及驱动机制,在干旱期以月为频次开展浮游植物和水质调查。结果表明,水库旱情期(2021 年)浮游植物功能群可归类为 23 个,其中功能群 A/E/F/J/K/L_o/M/MP/NA/P/SN/TB/X1/X2/X3/Y 频率较高,且 A/E/F/J/L_o/MP/P/X3/Y 为优势功能群,水库功能群变化趋势为 A/E/MP/P/X3(1 月)→E/L_o/MP(2 月)→A/E/L_o(3 月)→A/E/L_o(4 月)→A/L_o(5 月)→A/L_o/Y(6 月)→A/F/L_o/MP/Y(7 月)→A/F/L_o/Y(8 月)→A/F/L_o(9 月)→A/F/L_o/MP(10 月)→A/E/F/L_o/MP/Y(11 月)→A/E/L_o(12 月)。适应贫营养生境的功能群 A/E/L_o/Y 等为旱情期藻类群落结构的主体优势类群。相关分析(Spearman)和冗余分析(RDA)结果表明,旱情期影响水库浮游植物功能群组成的主要驱动因子是水温和透明度。水库月度生态状态指数(Q)值范围为 4.07~4.87,达到极好水平,说明旱情对新丰江水库浮游植物群落结构影响相对较弱。
关键词: 新丰江水库;极端旱情;功能群;环境因子

Characteristics of phytoplankton functional groups and their relationships with environmental factors during extreme drought in Xinfengjiang Reservoir, Guangdong Province*

Zhang Hui[1], Peng Yuqiong[1], Zou Xianni[1], Zhang Tingting[1], Liao Zhihui[1], Lin Xiaoping[1], Qiao Yongmin[2**] & Chen Rui[2]
(1: *Heyuan Sub-branch of Guangdong Ecological and Environmental Monitoring Center*, *Heyuan* 517000, *P.R.China*)
(2: *Institute of Hydrobiology*, *Jinan University*, *Guangzhou* 510632, *P.R.China*)

Abstract: In order to understand the structural and succession of the phytoplankton functional groups (FGs) and its the ecological driving mechanism during extreme drought in Xinfengjiang Reservoir, the composition of phytoplankton community and physico-chemical factors of water quality were investigated monthly in 2021. The results showed that the phytoplankton communities were classified into 23 functional groups during extreme drought period. Among them, functional groups A/E/F/J/K/L_o/M/MP/NA/P/SN/TB/X1/X2/X3/Y occurred higher frequently, and the dominant functional groups were A/E/F/J/L_o/MP/P/X3/Y. The main temporal changes characteristics of phytoplankton FGs occurred for A/E/MP/P/X3→E/L_o/MP→A/E/L_o→A/E/L_o→A/L_o→A/L_o/Y→A/F/L_o/MP/Y→A/F/L_o/Y→A/F/L_o→A/F/L_o/MP→A/E/F/L_o/MP/Y→A/E/L_o from January to December in 2021. The main dominant FGs of Xinfengjiang Reservoir during extreme drought were A/E/L_o/Y, and they were suitable for the oligotrophic water bodies. Spearman correlation and redundancy analysis showed that water temperature and transparency were the primary environmental factors affecting the structural of most phytoplankton FGs during extreme drought in Xinfengjiang Reservoir. The ecological status index during extreme drought of Xingfengjiang Reservoir was considered as in excellent condition, as shown by its ecological status index value ranged from 4.07 to 4.87.
Keywords: Xinfengjiang Reservoir; extreme drought; functional groups; environmental factor

---

* 2023-03-31 收稿; 2023-05-12 收修改稿。
国家水体污染控制与治理科技重大专项(2013ZX07105-005-02)、广东省河源市河科社农大专项(2022014)和广东省河源市社会发展科技计划(河科社发 2022102)联合资助。
** 通信作者; E-mail: qym77@163.com。

水库入库流量的变化决定了水库水位、水域面积和营养盐入库量,是影响湖泊生态系统功能的一个重要因素[1-2]。浮游植物作为评估水域健康状况的指示性生物类群[3-4],已应用于分析、评估水体水质状况,是水体生态学研究的热点方向[5-9]。Reynolds 等[10-11]、Padisák 等[12-13]提出浮游植物功能群概念、归类方法和生态状态指数(Q),并应用于水体生态状况评估[14-19]。目前,国内相关研究内容主要为不同类型水体浮游植物功能群的季节性演替特征和水质评价的研究,如洱海[20]、淀山湖[21]、南湖[22]、洞庭湖[23]、阿哈水库[24]、紫坪铺水库[25]、百花水库[26]、青海湖[27]等。极端旱情状态下水库水体浮游藻类功能群结构变化演替特征和生态状况变化研究少有报道。

新丰江水库作为广东省第一大型深水水库,是珠江流域中东江水资源的核心调节枢纽,也是下游城市重要饮用水源,水库水质稳定保持为地表水Ⅰ类标准和贫营养状态,对大湾区的社会经济和稳定发展至关重要[28-29]。2021 年新丰江水库流域经历了历史罕见的极端旱情,降水量不足常年平均降水量六成,水库水位降至历史最低(已至死水位)。当前,水库浮游藻类功能群状况的相关研究仅见于张辉、王雅文等[30-31]。然而对极端气象条件下新丰江水库的营养盐状况和藻类群落结构特征并未见报道。因此,深入研究新丰江水库极端旱情期浮游藻类的群落变化,探索其变化途径和主要环境影响因子,对水库环境保护具有重要意义。本研究基于 2020 年(旱情前)和 2021 年(旱情期)水库逐月的浮游藻类和水质观测结果,利用浮游植物功能群(FG)归类方法,划分极端旱情期水库浮游藻类功能群分组,探究旱情低水位状况下浮游藻类功能群构成和时空演替趋势;采用 Q 值进行水库生态学和水质评价,利用相关分析及冗余分析探索浮游藻类的类群组成与水质驱动因子间关系,探讨相互的响应特征,以期为水库的生态环境保护提供理论依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 水库概况

新丰江水库流域面积 5813 km^2,水域面积 370 km^2,库容 1.39×10^{10} m^3,多年平均水深 28.7 m,最大水深 93 m,降雨期主要集中在 4—9 月份,年均降雨量 1974.7 mm[32]。2021 年年均降雨量 1242 mm,水库最低水位 93 m。

1.2 样品采集及处理

在水库主库区和进出口设置采样站点 6 个(图 1),站点设置参照《全国淡水生物物种资源调查技术规定》[33]。于 2020 年(旱情前)和 2021 年(旱情期),逐月进行藻类和水质混合样采集。透明度(SD)测定方法为 secchi 盘法[34];溶解氧(DO)、水温(WT)、电导率(EC)和 pH 值测定方法为电极法[34],总磷(TP)、总氮(TN)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、氨氮(NH_3-N)和叶绿素 a(Chl.a)按标准方法实验室测定[34]。参照《淡水浮游生物研究方法》等[35-36]和《中国淡水藻类——系统、分类及生态》[37]方法进行浮游植物定性和定量样品采集、鉴定、计数和生物量计算。

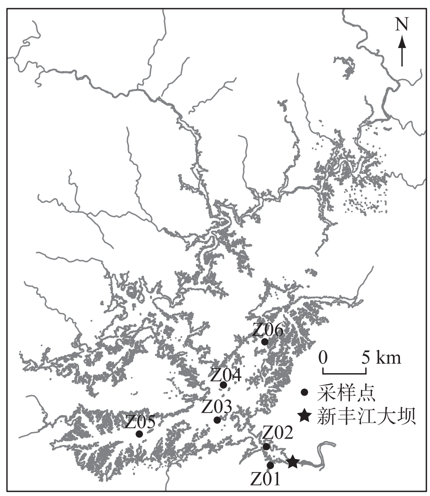

图 1 新丰江水库采样点示意

Fig.1 Location of sampling sites in Xinfengjiang Reservoir

1.3 优势功能群及生态状态指数

采用 Reynolds 和 Padisák 等[11-12]提出的归类方法进行功能群分类,采用相对生物量判断功能群优势度[31,38]。采用 FG 功能群计算 Q 值,公式为[12,39]:

$$Q = \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{n_i}{N}\cdot F_i\right) \tag{1}$$

式中,n、N、n_i和 F_i分别代表功能群个数、总生物量、第 i 个功能群生物量和赋值。Q 值范围介于 0~5,其中:差(0~1),耐受(1~2),中等(2~3),好(3~4),极好(4~5)[12,39]。

1.4 综合营养状态指数

综合营养状态指数法 $TLI(\Sigma)$ 计算公式为[14,31]：

$$TLI(\Sigma)=\sum_{j=1}^{m} W_j \cdot TLI(j) \tag{2}$$

式中,$TLI(j)$ 和 W_j 分别代表第 j 种参数的营养状态指数和权重。评价标准:贫营养($TLI(\Sigma)<30$),中营养($30\leqslant TLI(\Sigma)\leqslant 50$),富营养($TLI(\Sigma)>50$)[31]。

1.5 数据处理

数据统计和分析采用 Excel、SPSS 和 Canoco 等工具,制图采用 Origin 和 ArcGIS[31]。

2 结果与分析

2.1 水环境因子

调查期间水库 WT 范围为 16.7~32.2℃,均值为 25.3℃; 水体中 DO 浓度范围为 6.9~8.9 mg/L,均值为 7.9 mg/L; SD 范围为 2.1~4.2 m,均值为 3.3 m; EC 范围为 67.2~106.6 μS/cm,均值为 89.3 μS/cm;pH 值范围为 7.4~8.2,均值为 7.7; TN 浓度范围为 0.44~0.73 mg/L,均值为 0.56 mg/L; TP 浓度范围为0.001~0.01 mg/L,均值为 0.005 mg/L; NH_3-N 浓度范围为 0.022~0.048 mg/L,均值为 0.034 mg/L; COD_{Mn}浓度范围为 0.9~2.2 mg/L,均值为 1.5 mg/L; Chl.*a* 浓度范围为 1.0~1.9 μg/L,均值为 1.4 μg/L。各站点间水质差异性较小,除 TN 外,水库的 TP、NH_3-N 和 COD_{Mn}等均满足地表水(GB 3838－2002)I 类要求[40]。

2.2 浮游植物群落组成和时空分布

极端旱情期 6 个站点位共鉴定出浮游植物 8 门 86 属 191 种(表 1),绿藻门最多(49.2%),其次为蓝藻门(18.3%)和硅藻门(15.7%),裸藻门(7.3%)和甲藻门(5.2%)相对较少,隐藻门(2.1%)、金藻门(1.6%)和黄藻门(0.5%)最少。极端旱情前共鉴定出浮游植物 8 门 90 属 201 种(表 1)。旱情期比旱情前绿藻种类比例略有下降,硅藻、裸藻和甲藻种类比例略有上升,旱情前后浮游植物种群相似度为 86.7%,种类共有度为 76.6%。

表 1 浮游植物组成

Tab.1 Phytoplankton composition

门	2020 年					2021 年				
	纲	目	科	属	种	纲	目	科	属	种
蓝藻门	1	3	8	21	37	1	3	8	17	35
绿藻门	2	5	14	40	106	2	5	13	38	94
硅藻门	2	7	9	14	29	2	7	10	15	30
裸藻门	1	1	1	4	12	1	1	1	5	14
隐藻门	1	1	1	2	3	1	1	1	2	4
甲藻门	1	1	2	5	9	1	1	4	5	10
金藻门	1	2	3	3	4	1	2	3	3	3
黄藻门	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
合计	10	21	39	90	201	10	21	41	86	191

旱情期水库浮游植物丰度介于 12.0×10^4~75.0×10^4 cells/L,丰度均值为 41.0×10^4 cells/L,以绿藻和硅藻为主(图 2)。其中 10 月绿藻对丰度的贡献最大,占比达 60%,2 月则以硅藻占优势,占比达 52%,主要优势种为小环藻和小球藻。旱情前水库浮游植物丰度(138.0×10^4 cells/L)明显高于旱情期间。旱情前丰度呈先降后升趋势,最低值与最高值比值达 1/10;旱情期丰度时间变化呈先升后降趋势,变化幅度明显减弱,最低值与最高值比值降为 1/5。种类变化上,旱情前蓝藻贡献相对较大(最高达 90.09%),而旱情期演变为绿藻和硅藻的贡献占绝对优势(61.85%~91.65%),金藻在个别月份贡献相对较高(12 月 21.84%)。空间上(图 3)旱情期水库浮游植物丰度介于 30.0×10^4~48.0×10^4 cells/L,整体特征表现为上游高下游低,最高值为水库

中心开阔区(Z04),最低值则为出水口(Z01),组成上绿藻和硅藻在各站点的贡献比相似。相比极端旱情前,旱情期各站点蓝藻贡献比例下降明显,尤其是 Z05 站点蓝藻贡献比从 55.8% 下降为 15.7% 。

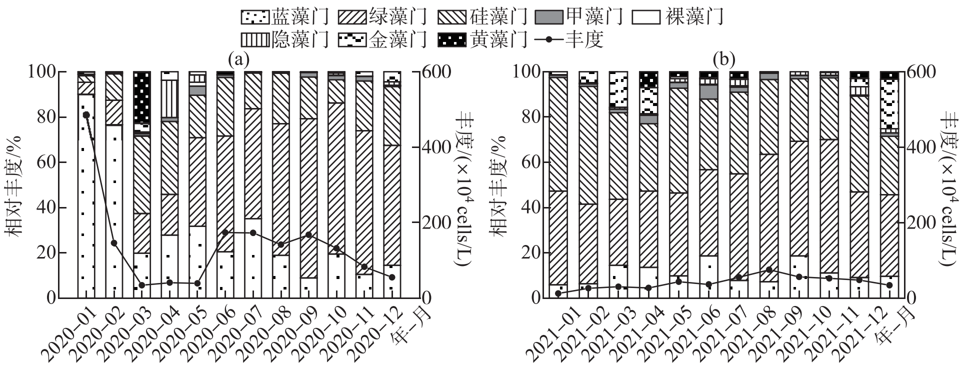

图 2 旱情前后藻类丰度和相对丰度时间变化(2020(a)、2021(b))

Fig.2 Temporal variations of alga abundance and relative abundance before and after extreme drought

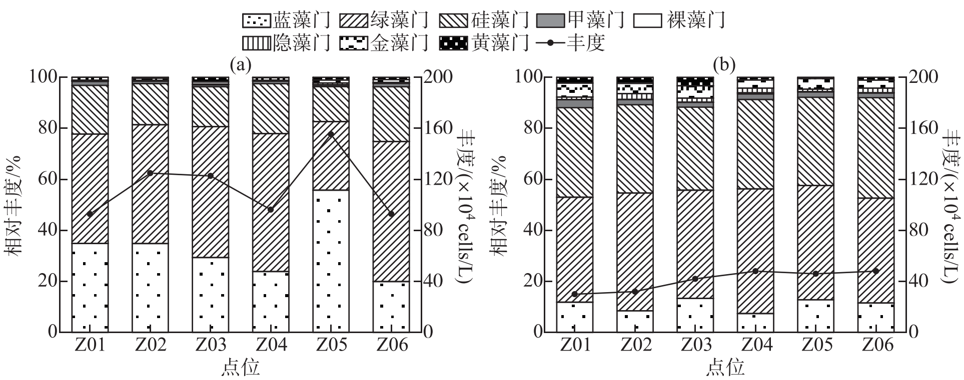

图 3 旱情前后浮游植物丰度和相对丰度空间变化(2020(a)、2021(b))

Fig.3 Spatial variations of alga abundance and relative abundance before and after extreme drought

旱情期水库浮游植物生物量介于 0.08~1.11 mg/L,生物量均值为 0.62 mg/L,12 月最高,1 月最低。甲藻是生物量主要贡献类群(图 4),绿藻、硅藻和金藻在部分时间贡献较高,其中 1 月绿藻和硅藻贡献比高达 90.8%,主要优势种为小环藻和小球藻; 2－5 月甲藻贡献最大,最高为 74.4%,主要优势种为角甲藻; 7－10 月绿藻和硅藻贡献与甲藻相当,绿藻和硅藻贡献比最高为 52.9%; 11 和 12 月金藻贡献上升明显,贡献比最高达 48.7%,主要优势种为锥囊藻。旱情期水库浮游植物生物量与旱情前(0.79 mg/L)相当,差异较小,旱情期略低于旱情前,但是生物量时间变化上存在一定差异,旱情前生物量呈先降后升,月度变化较大,旱情期月度变化幅度明显减弱,基本保持稳定。生物量贡献上旱情前后主要藻类种群基本一致,但旱情期甲藻的贡献比例上升明显,大部分时间均为主要优势贡献类群。空间上(图 5)旱情期水库浮游植物生物量介于 0.34~0.9 mg/L,变化特征与丰度一致,最高值出现在水库开阔区右侧的 Z06 站点,最低值则出现在出水口 Z01 站点。生物量藻类组成上甲藻最大,贡献比高达 64.5%(Z06),同时金藻和硅藻在 Z01 站点的贡献比也分别达 26.6% 和 20.7%,绿藻在 Z02 站点的贡献比达 21.3%。相比极端旱情前,旱情期上游站点甲藻贡献比例上升明显,尤其是 Z06 站点甲藻贡献比从 51.5% 上升为 64.5%。

2.3 浮游植物 FG 功能群组成和代表性属

依据 FG 功能群归类方法[11-12,39]可将旱情期水库浮游植物划分为 23 个功能群(表 2),分别为 A、D、E、F、G、J、K、L_o、M、MP、N、NA、P、S1、SN、T、TB、W1、W2、X1、X2、X3 和 Y。其中出现频率大于 50% 功能群有 A、

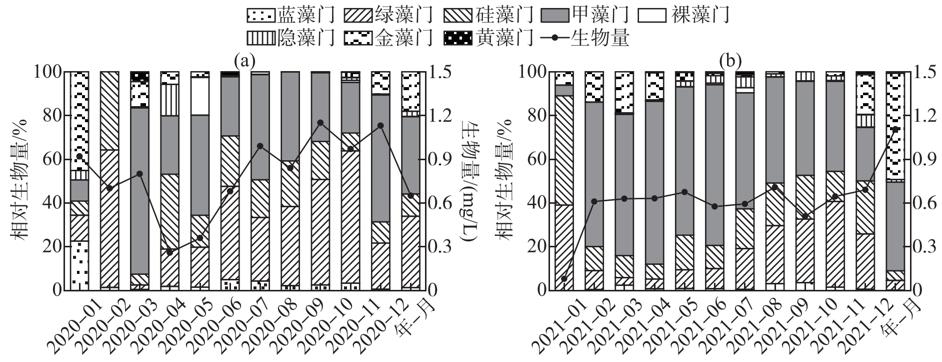

图 4 旱情前后浮游植物生物量和相对生物量时间变化(2020(a)、2021(b))

Fig.4 Temporal variations of alga biomass and relative biomass before and after extreme drought

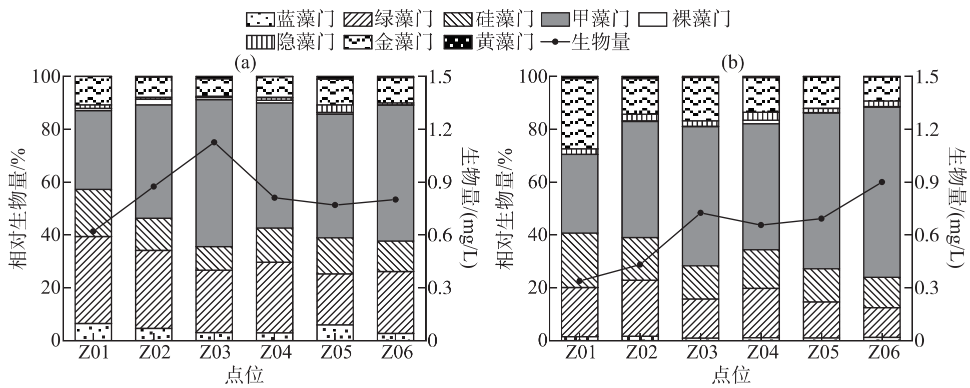

图 5 旱情前后浮游植物生物量和相对生物量空间变化(2020(a)、2021(b))

Fig.5 Spatial variations of alga biomass and relative biomass before and after extreme drought

E、F、J、K、L_o、MP、NA、P、SN、TB、X3 和 Y 共 13 个,是常见功能群;频率介于 20%~50%有 M、N、W1、X1 和 X2 共 5 个;频率小于 20%有 D、G、S1、T 和 W2 共 5 个,是偶见或罕见功能群。

2.4 浮游植物 FG 功能群时空变化

依据 FG 功能群时间变化可知(图 6),旱情期间优势功能群演替表现为 A/E/MP/P/X3(1 月)→E/L_o/MP(2 月)→A/E/L_o(3 月)→A/E/L_o(4 月)→A/L_o(5 月)→A/L_o/Y(6 月)→A/F/L_o/MP/Y(7 月)→A/F/L_o/Y(8 月)→A/F/L_o(9 月)→A/F/L_o/MP(10 月)→A/E/F/L_o/MP/Y(11 月)→A/E/L_o(12 月)。旱情期,2021 年 1 月功能群 A、E、MP、P 和 Y 为优势功能群,功能群 A 为主要优势,贡献达 32.0%,功能群 MP 和 P 为亚优势,贡献分别为 18.4%和 16.9%。2 月功能群 L_o 快速上升,成主要优势功能群,并在 2－7 月为绝对优势,贡献介于 51.2%~73.9%。2－4 月功能群 E 所上升,成为亚优势功能群,贡献最高为 18.8%(3 月),5－7 月亚优势功能类演替为 A。8－11 月功能群 L_o 均为主要优势,但未形成绝对优势,贡献率最小为 24.4%(11 月),功能群 A、F 和 Y 快速上升,成为亚优势功能群。12 月功能群 E 快速上升为主要优势,贡献率达49.1%,功能群 L_o 为亚优势功能群。相比旱情前,旱情期水库功能群变化明显,优势功能群数量有所减少,其中旱情前出现的优势功能群 G、J、K、NA、SN、T 和 W1 在旱情期并未形成优势,而主要优势功能群 E 和 L_o 在旱情期间的优势则上升明显,年均优势分别从 9.3%和 36.7%上升为 13.81%和 51.3%。

根据功能群站点相对生物量可知(图 7),旱情前后功能群空间分布存在一定差异。功能群 L_o 在旱情前后均是主要优势,旱情期在两翼(Z05、Z06)上升为绝对优势,贡献比分别达 58.1%和 63.8%。功能群 A、E 和 F 在旱情前后均为亚优势,旱情期贡献比略高于旱情前,最高分别为 18.3%(Z01)、26.5%(Z01)和 16.5%(Z03)。旱情期功能群 Y 在 Z01 和 Z04 形成微弱优势,贡献比较旱情前有所上升。

表 2 旱情期浮游植物功能类群归类

Tab.2 Phytoplankton FGs classify during extreme drought

功能群	主要代表属	拉丁文	生境条件	*F*	频率/%
A	小环藻属	*Cyclotella*	贫营养、洁净、低营养的深水水体	5	99
D	针杆藻属	*Synedra*	高营养盐、冲刷作用强的浑浊水体	2	15
E	锥囊藻属	*Dinobryon*	贫营养或异营养的小型或浅水水体	5	58
F	并联藻属 卵囊藻属	*Quadrigula* *Oocystis*	中到富营养、洁净和混合强的水体	3	99
G	空球藻属	*Eudorina*	富营养的停滞水体	0	1
J	单针藻属 四角藻属	*Monoraphidium* *Tetraedron*	富营养和混合的浅水水体	1	97
K	棒胶藻属	*Rhabdogloea*	富营养的浅水水体	2	97
L_o	多甲藻属 角甲藻属	*Peridinium* *Ceratium*	贫-富营养、中-大型水体的深水或浅水水体	5	96
M	微囊藻属	*Microcystis*	小-中型、富-超富营养的稳定水体	0	22
MP	克里藻属	*Klebsormidium*	经常性搅动的浑浊浅水水体	3	83
N	辐射鼓藻属	*Actinotaenium*	持续或半持续的混合水体	2	21
NA	角星鼓藻属	*Staurastrum*	贫-中营养的静水水体	5	65
P	脆杆藻属 直链藻属	*Fragilaria* *Melosira*	持续或半持续的混合水体	5	78
S1	贾丝藻属	*Jaaginema*	混合浑浊的透明度低水体	0	14
SN	拟柱孢藻属	*Cylindrospermopsis*	温暖的混合水体	0	54
T	转板藻属	*Mougeotia*	持续混合水体	4	3
TB	桥弯藻属	*Cymbella*	强急流的水体	2	64
W1	鳞孔藻属	*Lepocinclis*	污染高的浅水体	2	24
W2	囊裸藻属	*Trachelomonas*	中营养的浅水体	1	10
X1	纤维藻属	*Ankistrodesmus*	超富营养的浅水体	3	50
X2	蓝隐藻属	*Chroomonas*	中-富营养的浅水体	3	38
X3	小球藻属	*Chlorella*	贫营养的混合浅水水体	5	89
Y	隐藻属 薄甲藻属	*Cryptomonas* *Glenodinium*	静水水体	3	83

2.5 水质状况评价

采用生态指数(*Q*)值法评价水库旱情期水库水质状况。时间上 *Q* 值介于 4.07~4.87 之间(表 3),均值为 4.57,说明旱情期水库各时期均处于极好状态,仅在夏秋相交的 9、10 月份 *Q* 值相对偏低。相比极端旱情前,水库生态指数有所改善,年均指数从 4.27 上升为 4.57,且全部月份均为极好状态,未出现生态状态为好的月份。从各站点来看,*Q* 值介于 4.48~4.67 之间(表 4),各调查站点生态环境无显著性差异,略高于极端旱情前站点生态状况,说明极端旱情未新丰江水库水生态状况产生显著影响。

表 3 旱情期月度生态指数值及评价结果

Tab.3 The monthly ecological status index value and assessment results during extreme drought

时间		1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	年均值
2020 年	*Q* 值	3.56	4.14	4.86	3.62	3.69	4.54	4.31	4.42	4.17	4.10	4.57	3.99	4.27
	评价结果	+	++	++	+	+	++	++	++	++	++	++	+	++
2021 年	*Q* 值	4.30	4.81	4.77	4.87	4.78	4.54	4.40	4.33	4.12	4.07	4.34	4.87	4.57
	评价结果	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++

+表示生态状态好,++表示生态状态极好。

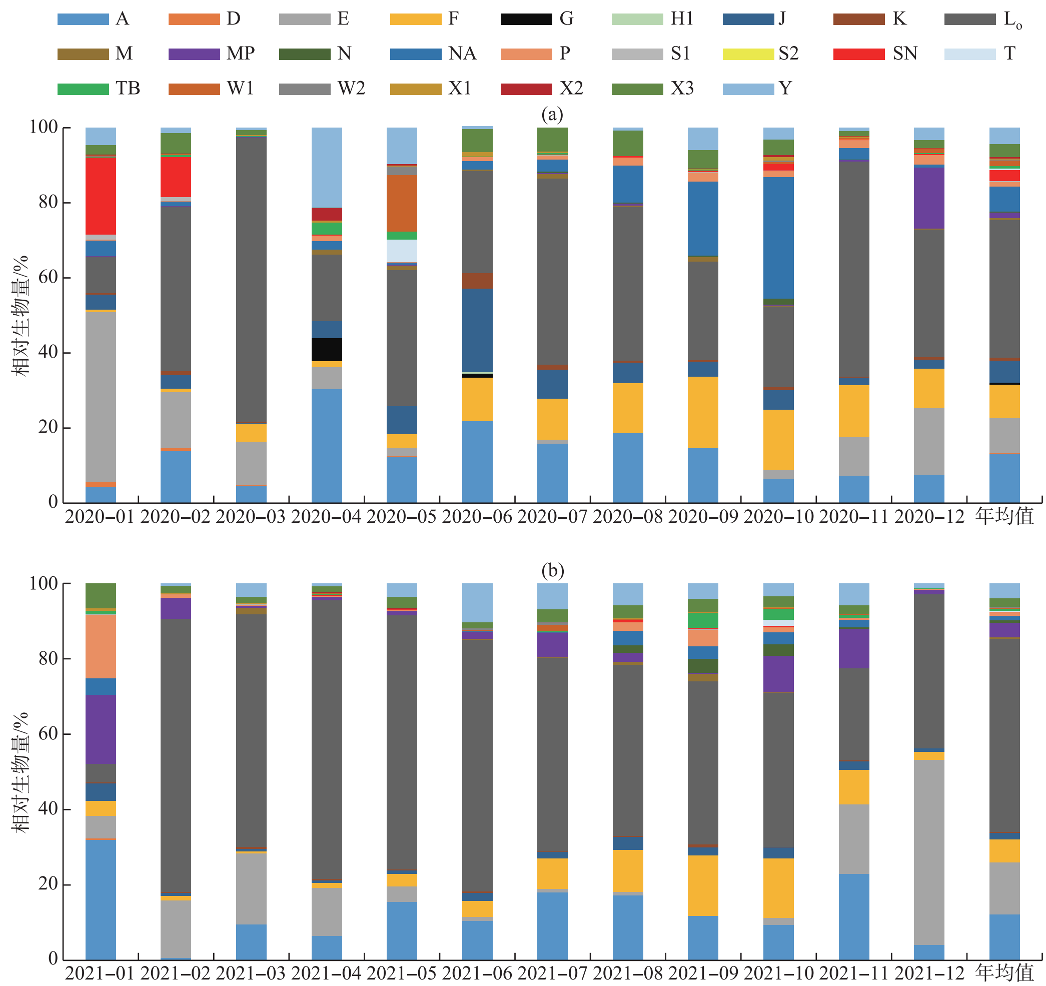

图 6 旱情前后功能群相对生物量时间变化(2020(a)、2021(b))

Fig.6 Temporal variation and proportion of alga biomass for FGs before and after extreme drought

表 4 旱情期站点生态指数值及评价结果

Tab.4 Ecological status index value and assessment results of different sites during extreme drought

时间		Z01	Z02	Z03	Z04	Z05	Z06
2020 年	*Q* 值	4.04	4.27	4.38	4.26	4.25	4.35
	评价结果	++	++	++	++	++	++
2021 年	*Q* 值	4.48	4.46	4.61	4.48	4.66	4.67
	评价结果	++	++	++	++	++	++

+表示生态状态好,++表示生态状态极好。

水库综合营养状态指数计算结果表明(图 8),时间上,旱情期水库水体 *TLI*(Σ)均低于 30,指数值介于 14~28,上半年高于下半年;空间上,各站点 *TLI*(Σ)介于 22~26,空间差异小,水库出口相对较低(Z01)。根据 *TLI*(Σ)<30 为贫营养的评价标准,水库旱情期保持为贫营养状态。

2.6 优势功能群与环境因子的关系

优势功能群 DCA 分析表明相应梯度为 2.6,小于 3,可使用线性模型进行排序分析。因此,采用 RDA 线性模型对优势功类群和环境变量进行冗余分析,置换检验表明排序结果可靠[41](表 5),可累计解释 92.25% 物种与环境信息。

由表 6 和图 9 可知,浮游植物群落最显著环境驱动因子是 WT 和 SD。其中 WT 与第二排序轴的相关系数为-0.3942,SD 与第一和第二排序轴的相关系数分别为 0.2260 和 0.2911。功能群 E 与 DO、SD 和 NH_3-N

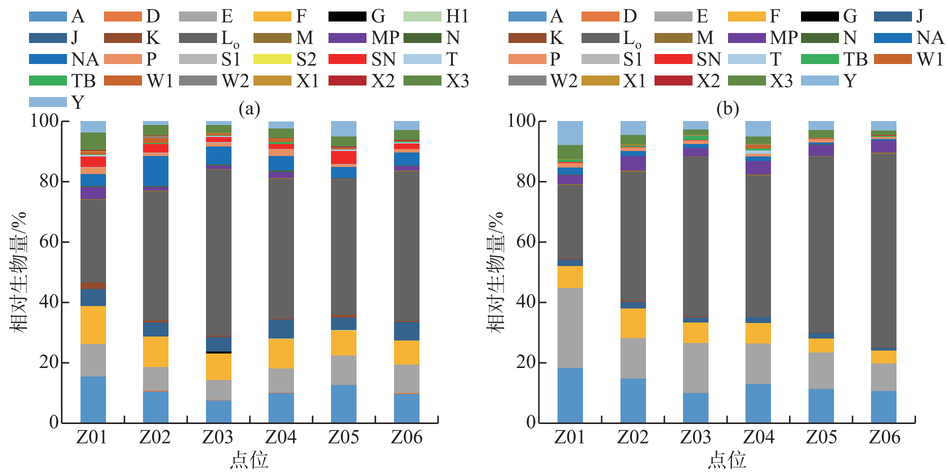

图 7 旱情前后功能群相对生物量空间变化(2020(a)、2021(b))

Fig.7 Spatial variation and proportion of alga biomass for FGs before and after extreme drought

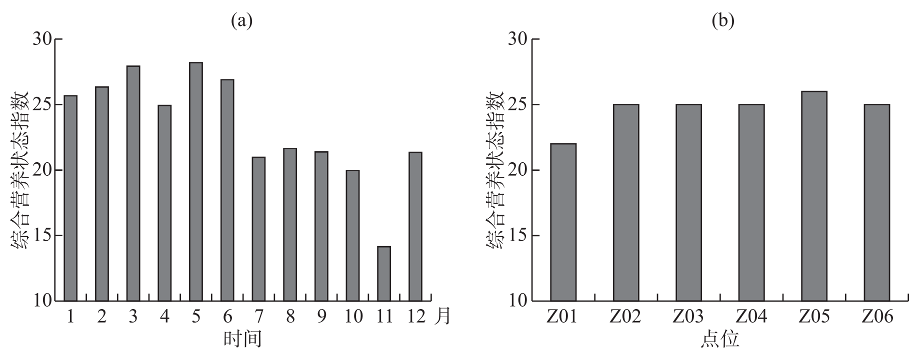

图 8 2021 年水库营养状态时(a)、空(b)特征

Fig.8 Temporal (a) and spatial (b) characteristic of $TLI(\Sigma)$ in 2021

正相关。功能群 L_o 与 TP、NH_3-N、COD_{Mn}、EC、WT 和 pH 值呈正相关。功能群 F 与 TN、WT、EC、COD_{Mn} 和 pH 值呈正相关。功能群 MP、P、X3、J、A 和 Y 接近中心,受多种环境因子共同影响。

表 5 旱情期优势功能群冗余分析

Tab.5 Redundancy analysis statistics of dominant FGs during extreme drought

统计信息	轴 1	轴 2	轴 3	轴 4
特征值	0.1597	0.0848	0.0151	0.0037
物种累积百分数/%	15.97	24.46	25.97	26.34
物种与环境因子相关系数	0.4997	0.5387	0.7032	0.5186
物种与环境因子相关性的累积百分数/%	60.25	92.25	97.95	99.33

3 讨论

3.1 极端旱情浮游植物功能群结构特征

新丰江水库在极端旱情期入库流量和水位发生了明显变化(图 10),水库水位较常年大幅下降,年均水位从约 110 m 下降至不足 95 m。气候、水文、营养盐等因子是驱动浮游植物功能群演替的主要因素,因子变化改变浮游植物生存环境,浮游植物通过演替适应新的生境条件,进而达到新的生态平衡[42-43]。水库水位作为水文状况的重要因子,水位变化会对浮游植物的群落结构产生影响[44]。研究期间新丰江水库检出浮游植物 191 种(略低于旱情前的 201 种),分属 A、D、E、F、G、J、K、L_o、M、MP、N、NA、P、S1、SN、T、TB、W1、W2、X1、X2、X3、Y 等 23 个功能群,比正常水位期水库的功能群调查结果(25 个)略低[31],其中功能群 H1 和 S2 未发现;功能群数低于流溪河水库[45],略高于横

表 6 驱动因子的显著性及重要性检验

Tab.6 Significance testing of redundancy analysis

环境因子	F	P
SD	4.3	0.026
WT	3.8	0.042
pH	3.2	0.058
TN	3.2	0.068
EC	3.0	0.082
NH_3-N	2.8	0.074
DO	0.2	0.844
TP	0.2	0.79
COD_{Mn}	0.2	0.76

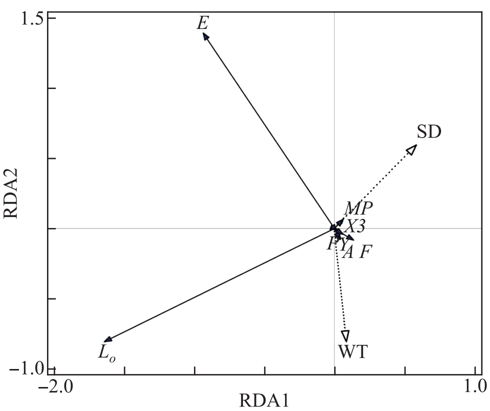

图 9 旱情期功能群与环境因子 RDA 分析

Fig.9 Redundancy analysis of FGs and environmental factors during extreme drought

岗水库[46]和长湖水库[18]等中小型水库,与小湾水库[47]、麦地卡湿地[48]等研究结果相似。

新丰江水库为特大河谷型水库,库湾多,急流缓流及深水浅滩并存,水文特征极其复杂,因水体中浮游植物种类、数量与水体环境关系密切[49],不同功能类群与相应的生境及其耐受性特性相对应[50],在多种因素的交叠影响下,促使水库浮游植物的演替。极端旱情前,功能群 A 和 L_o为优势功能群,其中 L_o是主要优势功能群,A 为亚优势功能群。极端旱情期,浮游植物功能群的组成上,功能群 A 和 L_o依然为新丰江水库优势功能群,且 L_o是主要优势功能群,但其优势上升明显,作为绝对优势的功能群的时间达 6 个月,功能群 A 保持为亚优势功能群,基本一致。旱情期功能群 E 作为亚优势类群的优势有所上升,在 12 月甚至接近绝对优势。功能群 A、E 和 L_o的代表性藻属均适应洁净、贫营养和低磷的水体环境[12,51],其中功能群 A 代表性藻属为硅藻中的小环藻属,功能群 E 代表性藻属为金藻中的锥囊藻属,功能群 L_o代表性藻属是为甲藻中的多甲藻和角甲藻,旱情前后未发生变化,说明极端旱情并未引起水库浮游植物结构的根本性演变,进而影响水库水质状况。

不同时期由于生境差异,尤其在极端旱情低水位状态,水库出现不同优势类群。旱情初期(1－4 月)和旱情末期(11－12 月),水库营养盐浓度低,适应贫营养或异营养环境的功能群 E 能在资源竞争中占据有利地位[12],是旱情初和旱情末的特有功能群,代表性藻属为金藻中的鱼鳞藻属和锥囊藻属,与桂家湖水库[52]研究成果相似。随着旱情的持续,水库入库流量大幅下降,适应水体静止条件的功能群 Y 易形成优势[53],代表性藻属为隐藻及薄甲藻属等,与百花水库[26]研究成果相似。2021 年 7 月以后,水库持续处于极低水位,混合性增强,为适应混合强及耐受高浑浊的功能群 F 提供有利增殖条件,代表性藻属为绿藻中的并联藻属和卵囊藻属,与红城湖[54]研究成果相似(图 11)。

图 10 2014－2021 年新丰江水库水位时间变化

Fig.10 The water level variation in Xinfengjiang Reservoir from 2014 to 2021

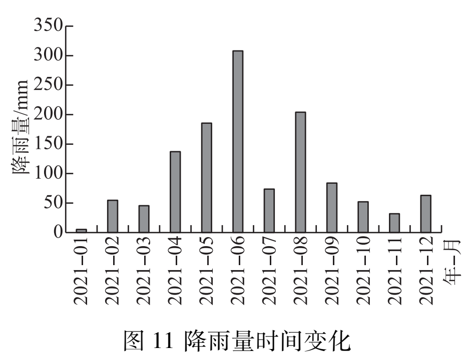

图 11 降雨量时间变化

Fig.11 The temporal variation of average rainfall of month

3.2 极端旱情浮游植物功能群的主要环境影响因素

环境条件决定了浮游植物群落结构状况,水体中 WT、TN 和 TP 等变化都会促使浮游藻类群落改变,从而藻类功能类群结构也会因不同的生境而变化[55]。冗余分析结果可知,游植物群落结构最显著环境影响因素是 WT 和 SD,与极端旱情前存在一定差异; 功能群 L_o 与 TP、COD_{Mn}、WT 和 pH 值呈显著正相关,与百花水库[56]、汤浦水库[57]等水体类似。功能群 E 与 NH_3-N 和 DO 呈显著正相关,与横岗水库[46]类似。功能群 F 与 EC 和 TN 呈显著正相关,与淀山湖水库[21]相似。功能群 MP、P、X3、J、A 和 Y 靠近坐标中心,与呼兰河口[58]相似。

水体温度影响营养盐扩散和分布,从而影响浮游藻类增殖活动[59],对藻类种群结构演替和组成至关重要[60-61]。极端干旱期间新丰江水库水位低、容量下降,温度适宜,为相应功能群增殖提供有利生境。Spearman 相关分析表明(表 7)。功能群 A、F、J、L_o、X3 和 Y 与 WT 的相关系数 $r>0.29$,为显著或极显著的正相关,功能群 MP 和 E 与 WT 的相关系数 $r<-0.234$,为显著或极显著负相关,功能群 P 与 WT 无显著相关性。功能群 L_o和 Y 与 WT 较强的正相关关系,说明水库低水位状态下 WT 对两种代表藻属甲藻(多甲藻和角甲藻)和隐藻(隐藻属)的影响有所增强。功能群 P 与 WT 的相关性低,说明硅藻中脆杆藻属和直链藻属对 WT 的具有广适性,与前期研究成果相似[31]。

表 7 优势功能群生物量与驱动因子相关性

Tab.7 Spearman correlation between dominant FGs biomass and driving factors

环境因子	A	E	F	J	L_o	MP	P	X3	Y
TN	0.224	−0.376**	0.540**	0.442**	−0.152	0.179	0.341**	0.228	0.233
DO	−0.242*	0.260*	−0.314**	−0.183	−0.336**	0.124	0.149	−0.415**	−0.310**
SD	0.029	−0.061	0.165	0.102	−0.384**	0.073	0.277*	−0.012	−0.140
WT	0.356**	−0.498**	0.554**	0.312**	0.290*	−0.234*	−0.199	0.555**	0.422**
COD_{Mn}	−0.116	−0.195	−0.512**	−0.375**	0.099	−0.184	−0.234*	−0.020	−0.317**
TP	−0.338**	0.132	−0.627**	−0.460**	0.081	−0.096	−0.126	−0.284*	−0.522**
NH_3-N	−0.228	0.244*	−0.297*	−0.238*	0.049	−0.032	−0.247*	−0.370**	−0.308**
EC	0.338**	−0.227	0.821**	0.565**	0.241*	0.020	0.140	0.346**	0.599**
pH	0.048	−0.280*	0.064	−0.033	0.252*	−0.017	0.344**	0.373**	−0.222

* 表示 $P<0.5$, ** 表示 $P<0.01$。

透明度可直观反映水体清澈和浑浊程度[62],间接影响光合作用而对浮游植物群落结构变化产生影响[31,63]。Spearman 相关分析表明(表 7),功能群 P 与 SD 的相关系数为 0.277,两者呈显著的正相关,代表性藻属为硅藻(直链藻属等),与前期研究成果有所差异[31]。功能群 L_o 与 SD 的相关系数为-0.384,两者呈极显著的负相关,代表性藻属为甲藻(多甲藻和角甲藻),适应于雨季外源输入时水体环境[11]。

营养盐浓度作为影响浮游藻类季节变化的关键因子,浓度升高通常会导致浮游植物丰度和物种组成的变化[27]。新丰江水库磷的缺乏限制了浮游植物的生长繁殖[31],水体长期处于贫营养状态,对 A、E、L_o和 F 等耐受低营养、洁净水体的功能群的生长环境较为有利,使它们容易形成优势,尤其具有广适特性的 L_o长期占据绝对优势。但 J、MP 和 P 等对营养盐敏感并适应混浊水体的类群也存在短期优势,说明水位大幅下降,原有被水体淹没的区域因水位下降而外露,在风力搅动作用下导致沉积物等内源中磷的再次释放,以及雨季外源输入,引起磷浓度超过限制阈值,为 J、MP 和 P 等功能群增殖提供了条件并形成优势。类似结果也出现在百花水库[26]、青海湖[27]、麦地卡湿地[48]等水体。

3.3 生态评价

基于浮游植物水平,采用 Q 值可以更加精确地反映水体生境环境质量[13]。Q 值结果表明,时间上水库月度和年度生态状态均为极好的水平,空间上所有站点生态状态也均处于极好的水平。相比极端旱情前水库生态状况有所好转,说明极端旱情下新丰江水库的生态状态未发生本质改变,与张辉[31]、王雅文等[30]前期研究成果一致。浮游植物作为初级生产者,营养盐浓度水平影响藻类种群变化,藻类生物量与营养盐含

量密切相关,进而影响水体生态系统状况[64],新丰江水库作为大型深水水库,库区地理特征基本保持自然状况,人类活动的干扰少,水库营养盐来源主要为外部输入,而大气降水是驱动营养盐输入的主要途径。旱情期流域大气降水量和强度明显减弱(约为常年平均降水量六成),地表径流强度和入库流量均大幅下降,从而降低了外部营养盐的输入量,营养盐含量低于浮游植物的需求量,进而一定程度上限制了适应高营养盐的藻类种群增殖活动,减弱了旱情对水库生态状态的影响。*TLI*(Σ)计算结果表明,水库保持为贫营养状态。生态状态指数和综合营养状态指数评价结果一致,表明水库保持在生态良好状态,说明极端旱情并未对水库水生态状态产生较大影响,也说明新丰江水库良好的水生态系统具有的较强承载力和恢复力,有效承载了极端旱情对水库水生态环境影响,保障水库水生态系统的稳定。

4 结论

1)极端旱情期新丰江水库浮游植物共划分为 23 个功能群类别:A、D、E、F、G、J、K、L_o、M、MP、N、NA、P、S1、SN、T、TB、W1、W2、X1、X2、X3、Y。其中 A、E、F、J、K、L_o、MP、NA、P、SN、TB、X3、Y 为常见功能群,功能群 M、N、W1、X1、X2 仅在适宜的条件中出现,功能群 D、G、S1、T 和 W2 出现频率低,功能群 L_o为绝对优势类群,功能群 A 为亚优势类群。

2)相关分析和冗余分析结果表明,旱情超低水位状态下,WT 和 SD 是水库浮游藻类功能组成演替的主要因子。

3)基于 Q 值法结果表明,新丰江水库生态状态处于极好的水平,*TLI*(Σ)结果为贫营养状态,生态状态指数和综合营养状态指数评价结果一致,表明旱情对新丰江水库浮游植物群落结构影响相对较弱。但功能群 F、J 和 X3 在短期出现优势,应给予关注。

5 附录

附表Ⅰ见电子版(DOI:10.18307/2024.0217)。

6 参考文献

[1] Stefanidis K, Papastergiadou E. Effects of a long term water level reduction on the ecology and water quality in an eastern Mediterranean Lake. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*, 2013, **411**(5): 1-14. DOI: 10.1051/kmae/2013072.

[2] O'Farrell I, Izaguirre I, Chaparro G *et al*. Water level as the main driver of the alternation between a free-floating plant and a phytoplankton dominated state: A long-term study in a floodplain lake. *Aquatic Sciences*, 2011, **73**(2): 275-287. DOI: 10.1007/s00027-010-0175-2.

[3] Wang X, Liu LS, Li L *et al*. Correlation analysis of algae composition and environmental factors in Jingpo Lake. *China Environmental Science*, 2015, **35**(11): 3403-3413. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6923.2015.11.027. [汪星, 刘录三, 李黎等. 镜泊湖浮游藻类组成及其与环境因子的相关分析. 中国环境科学, 2015, **35**(11): 3403-3413.]

[4] 沈韫芬, 章宗涉, 龚循矩. 微型生物监测新技术. 北京:中国建筑工业出版社, 1990:119.

[5] Yang MZ, Xia JH, Cai WW *et al*. Seasonal and spatial distributions of Morpho-functional phytoplankton groups and the role of environmental factors in a subtropical river-type reservoir. *Water Science and Technology*, 2020, **82**(11): 2316-2330. DOI: 10.2166/wst.2020.489.

[6] Chen XJ, Li X, Yang J. The spatial and temporal dynamics of phytoplankton community and their correlation with environmental factors in Wuliangsuhai Lake, China. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, **14**(8): 713. DOI: 10.1007/s12517-021-07071-w.

[7] Liu XM, Chen LW, Zhang GX *et al*. Spatiotemporal dynamics of succession and growth limitation of phytoplankton for nutrients and light in a large shallow lake. *Water Research*, 2021, **194**: 116910. DOI: 10.1016/j.watres.2021.116910.

[8] Jia JJ, Gao Y, Zhou F *et al*. Identifying the main drivers of change of phytoplankton community structure and gross primary productivity in a river-lake system. *Journal of Hydrology*, 2020, **583**: 124633. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124633.

[9] Sabater-Liesa L, Ginebreda A, Barceló D. Shifts of environmental and phytoplankton variables in a regulated river: A spatial-driven analysis. *Science of the Total Environment*, 2018, **642**: 968-978. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.096.

[10] Reynolds CS. Phytoplankton assemblages and their periodicity in stratifying lake systems. *Holarctic Ecology*, 1980, **3**(3):141-159. DOI: 10.1111/j.1600-0587.1980.tb00721.x.

[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] Padisák 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.

[13] Padisák 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): 1-14. DOI: 10.1007/s10750-005-1393-9.

[14] 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. [夏莹霏, 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.]

[15] Gao GJ, Xiao LJ, Lin QQ *et al*. Structure of phytoplankton functional groups and water quality assessment of main reservoirs in Hainan Province. *Ecological Science*, 2013, **32**(2): 144-150. DOI: 10.3969/j.issn. 1008-8873.2013.02.002. [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. 生态科学, 2013, **32**(2): 144-150.]

[16] Shen HL, Li B, Cai QH *et al*. Phytoplankton functional groups in a high spatial heterogeneity subtropical reservoir in China. *Journal of Great Lakes Research*, 2014, **40**(4): 859-869. DOI: 10.1016/j.jglr.2014.09.007.

[17] Dembowska EA, Napiórkowski P, Mieszczankin T *et al*. Planktonic indices in the evaluation of the ecological status and the trophic state of the longest lake in Poland. *Ecological Indicators*, 2015, **56**: 15-22. DOI: 10.1016/j.ecolind.2015.03.019.

[18] Zhang H, Qi GJ, Pan H. Characteristics of phytoplankton functional groups and evaluation of ecological status in Changhu Reservoir, Guangdong Province. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2020, **26**(5): 131-135. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7731.2020.05.049. [张红, 漆国佳, 潘鸿. 广东长湖水库浮游植物功能群特征及其生态状态评价. 安徽农学通报, 2020, **26**(5): 131-135.]

[19] Cui GY, Wang BL, Xiao J *et al*. Water column stability driving the succession of phytoplankton functional groups in Karst hydroelectric reservoirs. *Journal of Hydrology*, 2021, **592**: 125607. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125607.

[20] Cao J, Hou ZY, Li ZK *et al*. Succession of phytoplankton functional groups and their driving factors in a subtropical plateau lake. *Science of the Total Environment*, 2018, **631/632**: 1127-1137. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.03.026.

[21] Yang L, Zhang W, Shang GX *et al*. Succession characteristics of phytoplankton functional groups and their relationships with environmental factors in Dianshan Lake, Shanghai. *Environmental Science*, 2018, **39**(7): 3158-3167. DOI: 10.13227/j.hjkx.201710030. [杨丽, 张玮, 尚光霞等. 淀山湖浮游植物功能群演替特征及其与环境因子的关系. 环境科学, 2018, **39**(7): 3158-3167.]

[22] Yang W, Zhang FY, Sun YC *et al*. Seasonal succession and influencing factors of phytoplankton functional groups in Lake Nanhu, Huaibei City. *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. 中国环境科学, 2020, **40**(7): 3079-3086.]

[23] Wang X, Li LQ, Zheng BH *et al*. Composition and influential factors of algal function groups in Dongting Lake. *China Environmental Science*, 2016, **36**(12): 3766-3776. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6923.2016.12.031. [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. 中国环境科学, 2016, **36**(12): 3766-3776.]

[24] Li L, Li QH, Jiao SL *et al*. Spatial and temporal distribution characteristics of phytoplankton functional groups in aha reservoir and their influencing factors. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(11): 3604-3611. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0031. [李磊, 李秋华, 焦树林等. 阿哈水库浮游植物功能群时空分布特征及其影响因子分析. 环境科学学报, 2015, **35**(11): 3604-3611.]

[25] Liao N, Li H, You LH *et al*. Succession of phytoplankton functional groups and driving variables in a young canyon reservoir. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2021, **18**(7): 1911-1924. DOI: 10.1007/s13762-020-02949-w.

[26] Han LB, Wang X, Li QH *et al*. Dynamic changes and driving factors of phytoplankton functional groups in Baihua Reservoir, Guizhou Plateau. *J Lake Sci*, 2022, **34**(4): 1102-1114. DOI:10.18307/2022.0405. [韩丽彬, 王星, 李秋华等. 贵州高原百花水库浮游植物功能群的动态变化及驱动因子. 湖泊科学, 2022, **34**(4): 1102-1114.]

[27] Sun X, Jiang XM, Song GF *et al*. Spatio-temporal patterns of phytoplankton communities and their driving environmental factors in Lake Qinghai. *J Lake Sci*, 2023, **35**(2): 540-556. DOI:10.18307/2023.0212. [孙兴, 蒋小明, 宋高飞等. 青海湖浮游植物群落时空格局及其环境驱动因子. 湖泊科学, 2023, **35**(2): 540-556.]

[28] Hu R, Lei LM, Han BP. Phytoplankton assemblage and seasonal dynamics in the large oligotrophic Xinfengjiang Reservoir in Southern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(10): 4652-4664. [胡韧, 雷腊梅, 韩博平. 南亚热带大型贫营养水库浮游植物群落结构与季节变化——以新丰江水库为例. 生态学报, 2008, **28**(10): 4652-4664.]

[29] Zhang H, Peng YQ, Zou XN *et al*. Phytoplankton community structure and trophic status evaluation of large reservoir in southern China. *Environmental Science & Technology*, 2021, **44**(4): 186-194. [张辉, 彭宇琼, 邹贤妮等. 华南大型深水水库浮游植物群落特征及营养状态评价. 环境科学与技术, 2021, **44**(4): 186-194.]

[30] Wang YW, Yang Y, Pan H *et al*. Ecological region classification of 10 key reserviors in Guangdong Province based on phytoplankton functional groups. *J Lake Sci*, 2014, **26**(1): 147-153. DOI: 10.18307/2014.0118. [王雅文, 杨扬, 潘鸿等. 基于浮游植物功能类群的广东省大型水库生态分区初探. 湖泊科学, 2014, **26**(1): 147-153.]

[31] Zhang H, Peng YQ, Zou XN *et al*. Characteristics of phytoplankton functional groups and their relationships with environmental factors in Xinfengjiang Reservoir. *China Environmental Science*, 2022, **42**(1): 380-392. [张辉, 彭宇琼, 邹贤妮等. 新丰江水库浮游植物功能分组特征及其与环境因子的关系. 中国环境科学, 2022, **42**(1): 380-392.]

[32] Zhang H, Peng YQ, Zou XN *et al*. The characteristics of phytoplankton community structure and its relationship with environmental factors of a large reservoir in subtropic of Southern China: A case study of Xinfengjiang Reservoir. *J Lake Sci*, 2022, **34**(2): 404-417. DOI:10.18307/2022.0204. [张辉, 彭宇琼, 邹贤妮等. 南亚热带特大型水库浮游植物群落特征及其与环境因子的关系: 以新丰江水库为例. 湖泊科学, 2022, **34**(2): 404-417.]

[33] 环境保护部生态司. 全国淡水生物物种资源调查技术规定(试行). 北京: 环境保护部, 2010:167-176.

[34] 环境保护部环境监测司. 国家地表水环境质量监测网监测任务作业指导书(试行). 北京: 中国环境出版社, 2017: 3-188.

[35] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1995: 333-344.

[36] Hillebrand H, Dürselen CD, Kirschtel D *et al*. Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae. *Journal of Phycology*, 1999, **35**(2):403-424. DOI: 10.1046/j.1529-8817.1999.3520403.x.

[37] 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.

[38] Huang GJ, Li QH, Chen C *et al*. Phytoplankton functional groups and their spatial and temporal distribution characteristics in Hongfeng Reservoir, Guizhou Province. *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. 生态学报, 2015, **35**(17): 5573-5584.]

[39] 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.]

[40] 国家环境保护总局. 地表水环境质量标准(GB 3838—2002), 2020.

[41] Ter Braak CJF, Prentice IC. A theory of gradient analysis. *Advances in Ecological Research*, 2004, **34**: 235-282. DOI: 10.1016/S0065-2504(03)34003-6.

[42] Devercelli M, O'Farrell I. Factors affecting the structure and maintenance of phytoplankton functional groups in a nutrient rich lowland river. *Limnologica*, 2013, **43**(2): 67-78. DOI: 10.1016/j.limno.2012.05.001.

[43] Reynolds CS. What factors influence the species composition of phytoplankton in lakes of different trophic status? *Hydrobiologia*, 1998, **369**(1): 11-26. DOI: 10.1023/A:1017062213207.

[44] Leira M, Cantonati M. Effects of water-level fluctuations on lakes: An annotated bibliography. *Hydrobiologia*, 2008, **613**(1): 171-184. DOI: 10.1007/s10750-008-9465-2.

[45] Xiao LJ, Wang T, Hu R *et al*. Succession of phytoplankton functional groups regulated by monsoonal hydrology in a large canyon-shaped reservoir. *Water Research*, 2011, **45**(16): 5099-5109. DOI: 10.1016/j.watres.2011.07.012.

[46] Huang XH, Hu R, Lei LM *et al*. Seasonal succession of phytoplankton functional groups in typical small and medium-sized reservoirs in Southern China. *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类群季节演替特征. 生态环境学报, 2013, **22**(2): 311-318.]

[47] Peng M, Wu JW, Li LX *et al*. Characteristics of phytoplankton functional groups and their environmental drivers in Xiaowan Reservoir area of Lancang River during the summer of 2017-2019. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, **41**(1): 50-57. DOI: 10.13292/j.1000-4890.202201.028. [彭梦, 吴嘉伟, 李罗新等. 澜沧江小湾库区 2017—2019 夏季浮游植物功能群特征及其环境驱动因子. 生态学杂志, 2022, **41**(1): 50-57.]

[48] Pan CM, Liu Y, An RZ *et al*. Phytoplankton in Mitika Wetland, Tibet, China: 2. Characteristics of functional groups and their relationship with environmental factors. *J Lake Sci*, 2022, **34**(4): 1115-1126. DOI:10.18307/2022.0406. [潘成梅, 刘洋, 安瑞志等. 西藏麦地卡湿地的浮游植物——2.功能群特征及其与环境因子的关系. 湖泊科学, 2022, **34**(4): 1115-1126.]

[49] Götzenberger L, de Bello F, Bråthen KA *et al*. Ecological assembly rules in plant communities-approaches, patterns and prospects. *Biological Reviews*, 2012, **87**(1): 111-127. DOI: 10.1111/j.1469-185x.2011.00187.x.

[50] Reynolds. The ecology of fresh water phytoplankton. Cambridge: Cambridge University Press, 2006: 24-28.

[51] Wu XH, Li C, Chen L *et al*. Response mechanism of *Peridiniopsis* bloom to phosphorus in Xiangxi River Bay of Three Gorges Reservoir. *J Lake Sci*, 2017, **29**(5): 1054-1060. DOI: 10.18307/2017.0503. [吴兴华, 李翀, 陈磊等. 三峡水库香溪河库湾拟多甲藻(*Peridiniopsis*)水华对环境中磷的响应机制. 湖泊科学, 2017, **29**(5): 1054-1060.]

[52] Hu YM, Li QH, Zhu CC *et al*. Contrasting phytoplankton structure based on functional groups of Puding Reservoir and Guijiahu Reservoir in the central of Guizhou Province. *J Lake Sci*, 2018, **30**(2): 403-416. DOI: 10.18307/2018.0212. [胡月敏, 李秋华, 朱冲冲等. 基于功能群对比分析黔中普定水库和桂家湖水库浮游植物群落结构特征. 湖泊科学, 2018, **30**(2): 403-416.]

[53] Yang CT, Nan J, Li JH. Driving factors and dynamics of phytoplankton community and functional groups in an estuary reservoir in the Yangtze River, China. *Water*, 2019, **11**(6): 1184. DOI: 10.3390/w11061184.

[54] 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.]

[55] Zhao XX, Fang T, Yang K *et al*. Community structure characteristics of phytoplankton and related environmental factors in summer in Tuohu

Lake, Anhui, China. *Plant Science Journal*, 2018, **36**(5): 687-695. [赵秀侠, 方婷, 杨坤等. 安徽沱湖夏季浮游植物群落结构特征与环境因子关系. 植物科学学报, 2018, **36**(5): 687-695.]

[56] Chen Q, Li QH, Hu YM *et al*. Spatial and temporal distribution characteristics of phytoplankton functional groups and their influencing factors in baihua reservoir, Guizhou Province. *Research of Environmental Sciences*, 2018, **31**(7): 1266-1274. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2018.04.19. [陈倩, 李秋华, 胡月敏等. 贵州百花水库浮游藻类功能群时空分布特征及影响因子分析. 环境科学研究, 2018, **31**(7): 1266-1274.]

[57] Cheng XJ, Yang J, Du GS *et al*. Seasonal succession of phytoplankton functional groups and its driving factors in Haizi Reservoir. *Water Resources Protection*, 2015, **31**(6): 122-127. [陈晓江, 杨劼, 杜桂森等. 海子水库浮游植物功能群季节演替及其驱动因子. 水资源保护, 2015, **31**(6): 122-127.]

[58] Jia P, Fan YW, Lu XX. Analysis of phytoplankton structure based on different functional groups in Hulanhe Wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(3): 1042-1054. [贾鹏, 范亚文, 陆欣鑫. 基于功能类群分析呼兰河口湿地浮游植物群落结构特征. 生态学报, 2021, **41**(3): 1042-1054.]

[59] Zhao QH, Sun GD, Wang JJ *et al*. Coupling effect of water temperature and light energy on the algal growth in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2018, **30**(2): 385-393. DOI: 10.18307/2018.0210. [赵巧华, 孙国栋, 王健健等. 水温、光能对春季太湖藻类生长的耦合影响. 湖泊科学, 2018, **30**(2): 385-393.]

[60] Li Y, Xiao LJ, Lin QQ *et al*. Phytoplankton community in a newly constructed reservoir—Jiantan Reservoir, South China. *J Lake Sci*, 2010, **22**(2): 227-234. DOI:10.18307/2010.0212. [李莹, 肖利娟, 林秋奇等. 一座新建水库——广东剑潭水库浮游植物动态特征. 湖泊科学, 2010, **22**(2): 227-234.]

[61] Fang LJ, Liu DF, Yang ZJ *et al*. Effects of water temperature on the phytoplankton community structure. *Environmental Science & Technology*, 2014, **37**(S2): 45-50. DOI:10.3969/j.issn.1003-6504.2014.12O.009. [方丽娟, 刘德富, 杨正健等. 水温对浮游植物群落结构的影响实验研究. 环境科学与技术, 2014, **37**(S2): 45-50.]

[62] Tian ZQ, Tian BH, Xin LH *et al*. Relationship between structure of phytoplankton community and water quality factors in Yuqiao Reservoir in autumn. *Environmental Pollution & Control*, 2011, **33**(5): 64-68. [田志强, 田秉晖, 辛丽花等. 于桥水库秋季浮游植物群落结构与水质因子的关系. 环境污染与防治, 2011, **33**(5): 64-68.]

[63] Zhang YL, Qin BQ, Chen WM *et al*. Distribution, seasonal variation and correlation analysis of the transparency in Taihu Lake. *Transaction of Oceanology and Limnology*, 2003,(2): 30-36. [张运林, 秦伯强, 陈伟民等. 太湖水体透明度的分析、变化及相关分析. 海洋湖沼通报, 2003,(2): 30-36.]

[64] Chen KF, Ye L, Tan L *et al*. Composition of phytoplankton functional groups and ecological status of typical tributaries of the Three Gorges Reservoir in 2015. *Wetland Science*, 2022, **20**(2): 268-276. [陈克峰, 叶麟, 谭路等. 2015 年三峡水库典型支流库湾的浮游植物功能群组成和生态状况. 湿地科学, 2022, **20**(2): 268-276.]

附表 I 水环境理化指标

Attached Tab.I Physical and chemical factors of water

指标		WT/℃	pH 值	EC/ (μS/cm)	SD/m	DO/ (mg/L)	Chl.*a*/ (μg/L)	TP/ (mg/L)	NH_3-N/ (mg/L)	COD_{Mn}/ (mg/L)	TN/ (mg/L)
Z01	范围	17.0~30.9	7.1~7.9	64.6~100.8	2.6~4.7	7.8~9.9	0.8~1.8	0.001~0.009	0.020~0.037	0.8~2.3	0.44~0.66
	均值	24.6	7.5	84.6	3.8	8.2	1.2	0.004	0.027	1.3	0.54
Z02	范围	17.1~32.3	7.5~8.1	67.4~108.6	2.0~4.6	6.4~9.0	0.9~1.8	0.002~0.011	0.020~0.053	0.8~2.8	0.42~0.74
	均值	25.4	7.7	90.0	3.3	7.9	1.3	0.005	0.034	1.8	0.56
Z03	范围	16.7~32.3	7.4~8.3	68.0~111.7	2.2~5.2	6.5~8.9	0.7~1.9	0.001~0.01	0.017~0.076	0.8~3.1	0.45~0.95
	均值	25.5	7.7	91.0	3.4	8.0	1.3	0.005	0.036	1.7	0.61
Z04	范围	16.8~32.3	7.3~8.3	70.9~109.3	2.2~4.5	6.8~9.3	0.9~2.3	0.001~0.014	0.025~0.081	0.9~2.9	0.41~0.79
	均值	25.4	7.7	92.7	3.5	8.0	1.5	0.006	0.036	1.5	0.58
Z05	范围	16.4~33.4	7.3~8.3	66.1~106.0	1.7~4.1	6.6~9.2	0.7~1.9	0.001~0.012	0.018~0.051	0.8~3.4	0.41~0.79
	均值	25.8	7.8	88.3	2.8	7.7	1.4	0.005	0.036	1.6	0.56
Z06	范围	16.0~32.5	7.4~8.3	66.4~103.9	1.8~3.8	6.8~9.2	0.9~1.9	0.001~0.01	0.019~0.042	0.8~3.5	0.43~0.72
	均值	25.4	7.9	89.4	3.0	7.8	1.4	0.005	0.032	1.7	0.53
全库	范围	16.7~32.2	7.4~8.2	67.2~106.6	2.1~4.2	6.9~8.9	1.0~1.9	0.001~0.01	0.022~0.048	0.9~2.2	0.44~0.73
	均值	25.3	7.7	89.3	3.3	7.9	1.4	0.005	0.034	1.5	0.56