

文章编号: 1674-5566(2026)01-0158-15

DOI:10.12024/jsou.20250204776

2022—2023年九江市主要水生生物保护区浮游植物优势种生态位与种间联结性分析

董佳怡¹, 张 玮^{1,2}, 李乐康³, 瞿焯玲¹, 孔赤平³, 张 宝³, 王丽卿¹, 许 群³

(1. 上海海洋大学 水产种质资源发掘与利用教育部重点实验室, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 环境 DNA 技术与水生态健康评估工程中心, 上海 201306; 3. 九江市农业科学院, 江西 九江 332000)

摘 要: 鄱阳湖水系作为长江中下游关键生态屏障, 研究其浮游植物群落在极端气候与人类活动双重胁迫下的响应机制, 对流域生态保护极为重要。本研究聚焦2022年极端干旱至2023年水文恢复期, 鄱阳湖水系和长江干流九江市段重要水生生物保护区的浮游植物优势种动态特征, 通过枯水期与丰水期的18个采样点调查, 运用生态位宽度、方差比率法及种间联结性分析, 初步探究水文波动下浮游植物群落稳定性维持机制。结果表明: (1) 研究共鉴定出浮游植物7门161种, 优势种3门13种, 硅藻门(颗粒沟链藻 *Aulacoseira granulata*、尖肘形藻 *Ulnaria acus*) 始终占主导; (2) 2022年极端枯水期浮游植物生态位重叠值显著升高, 宽生态位泛化种通过资源互补形成稳定共生体系, 群落整体显著正关联; (3) 颗粒沟链藻与尖肘形藻的持续优势源于形态功能和“浮游-底栖”转换的生态适应性, 其生态位分化有效缓解了高重叠种对舟形藻属未定种 (*Navicula* spp.) ($O_{jk} = 0.93$) 的竞争压力; (4) 丰水期生态位宽度均值下降且特化种比例增加, 表明水文的恢复条件使群落向高稳定性的功能结构演替。本研究首次探究了极端干旱下, 长江中游水生生物保护区浮游植物生态位分化与种间协同机制, 为鄱阳湖和长江水生态保护提供基础数据, 并为极端气候下的淡水生态系统管理提供理论支撑。

关键词: 浮游植物; 生态位; 种间联结; 干旱胁迫; 水文波动; 鄱阳湖

中图分类号: S 948.8

文献标志码: A

生态位理论是生态学领域的基石性理论之一。生态位是指种群在多维空间中维持生存的能力, 可解释群落内物种共存、竞争及资源利用状态^[1]; 描述生态位的指标主要有生态位宽度和生态位重叠^[2-3]。生态位宽度能衡量物种在特定栖息地利用资源的能力, 宽生态位种群生长状态对群落结构功能影响大, 且适应性和资源利用能力高于窄生态位物种^[4-6]。相似生态位物种面临激烈竞争, 在进化中发展独特生态位以减少重叠和资源分化是共存的关键^[7]。该理论最初应用于动物生态学, 后拓展至动植物种间关系、群落结构等多方面, 在城市规划、森林资源评价等领域也有广泛应用^[8]。近年来, 该理论逐渐在水生生物

学研究中得到应用, 多集中为浮游植物^[9-10], 且相关研究多关注于单一的河道、水库或某个浅水湖泊等水体^[11-14]。长江是中华文明的发源地, 其水生生物资源保护及水域生态环境修复重要性突出, 然而生态位理论在针对长江流域水生生物保护区的研究方面, 还相对匮乏。

鄱阳湖是长江中下游重要的生态屏障, 其水系构成复杂, 由赣江、抚河、信江、修水、饶河等河流共同汇聚而成^[15-16], 这些河流携带大量的泥沙和营养物质, 为水生生物的繁衍提供了丰富的物质基础, 同时也造就了多样的水域环境。浮游植物是水体中重要的初级生产者, 是水生生物食物网构成的基础环节, 能够快速有效地反映水体的

收稿日期: 2025-02-14

修回日期: 2025-04-23

基金项目: 江西省水生生物资源调查监测体系专项资金(JXSSJC-2024-03)

作者简介: 董佳怡(2001—), 女, 硕士研究生, 研究方向为藻类生态。E-mail: aquadjy@qq.com

通信作者: 许 群, E-mail: xq2020358658@126.com

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

健康状况^[17]。目前,国内对鄱阳湖流域浮游植物的研究,主要集中在环境因子对浮游植物群落的影响。自2009年起,有学者开始关注鄱阳湖环境变化与浮游植物功能群特征之间的关系^[18-20],钟可儿等^[21]对2021—2022年不同水文期浮游植物及水质理化特征开展了调查,并建立生物完整性指数评价体系。2022年,由于气候变化和人类活动的影响,鄱阳湖流域经历了5个月的极端干旱,导致水位降至60年来的最低点^[22]。水体连通性减弱使得碟形湖水质变差,水生生物生存空间被严重压缩^[23],扰乱了原本相对稳定的生态平衡。尽管,已有不少研究关注了鄱阳湖流域浮游植物时空特征及其与富营养化的关系^[24-28],但对其生态位分化与种间协同机制的研究鲜有报道,尤其缺乏极端干旱背景下的动态分析。

以鄱阳湖和长江干流在九江市境内的十余个水生生物保护水域为对象,于2022年枯水期、2023年丰水期以及2023年枯水期开展了浮游植物群落特征的调查。通过分析不同水情条件下,浮游植物群落结构的变化、优势物种的生态位以及种间关系,旨在阐明极端干旱(2022年)及水文恢复期(2023年)水体浮游植物生态位和群落稳定性的响应特征,从而为长江中下游水体水生态监测和保护提供基础数据,并为极端气候下的淡水生态系统管理提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域和采样点布设

九江市位于江西省北部,地处113°56'E~116°54'E,28°41'N~30°05'N,包含了鄱阳湖近70%的水面和152 km的长江水域。九江市所辖的重要水生生物保护区由两个省级自然保护区:鄱阳湖长江江豚省级自然保护区和鄱阳湖鲤鲫鱼产卵场省级自然保护区、7个国家级种质资源保护区、长江干流江西段及鄱阳湖九江管辖区域等组成。本研究在九江市水生生物保护区共设置了18个监测点。于2022年枯水期(9—11月),2023年丰水期(5—8月),2023年枯水期(9月—11月)3个水情时期,开展了浮游植物调查。采样点位分布如图1所示。

1.2 样品的采集与鉴定

使用有机玻璃采水器在水面下约0.5 m处采集1 000 mL的表层水样,随后加入10 mL的鲁哥

氏碘液和10%甲醛进行固定。样本在加入固定剂后,室内静置48 h后,采用虹吸法将其浓缩至30 mL,吸取0.1 mL的浓缩液置于计数框内,在40×10倍的光学显微镜下观察计数,计数技术严格参照《淡水浮游生物研究方法》^[29]进行。定性样品使用25号浮游生物网进行采集,在水面表层呈“∞”字形缓慢捞取浮游植物样品,并加入10%甲醛溶液进行固定。浮游植物分类鉴定参考《中国淡水藻类-系统、分类及生态》^[30]《长江下游地区常见浮游植物图集》^[31]等。

1.3 数据处理

1.3.1 多样性指数

香农(Shannon)多样性指数(H')、辛普森(Simpson)多样性指数(D)和Pielou均匀度指数(J)计算公式分别为^[32]

$$H' = -\sum_{i=1}^S (n_i/N) \log_2 (n_i/N) \quad (1)$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S (n_i/N)^2 \quad (2)$$

$$J = H'/\log_2 S \quad (3)$$

式中: S 为样品中出现的物种数,即物种丰富度(Richness); N 为同一样品中的总个体数; n_i 为第 i 种个体数。

Shannon-Wiener指数越大,表示群落结构越复杂,群落越趋于稳定。其评价标准为 $0 < H' < 1$,重污染; $1 \leq H' \leq 3$,中污染; $H' > 3$,清洁^[33]。

Pielou均匀度指数介于0至1之间,数值越大物种分布越均匀。评价指标: $0 < J < 0.3$,为重污染; $0.3 \leq J < 0.5$,为中污染; $0.5 \leq J \leq 0.8$,为轻污染或无污染^[33]。

1.3.2 优势种

优势种是指在群落中数量多,生物量占比大,在特定生境中具有较强的适应能力,依据McNaughton优势度指数(Y)进行确定,选取优势度 $Y > 0.02$ 的浮游植物进行计算, $Y > 0.1$ 为绝对优势种。计算公式为^[34-35]

$$Y = \frac{n_i}{N} f_i \quad (4)$$

式中: n_i 为样点中第 i 种浮游植物的个体数; N 为所有样点中浮游植物细胞总数; f_i 为该种在各样点出现的频率。

1.3.3 生态位宽度

计算生态位宽度(B_i)^[36],选用Levins指数计算九江市水生生物保护区内浮游植物优势物种的生态位宽度,其计算公式为

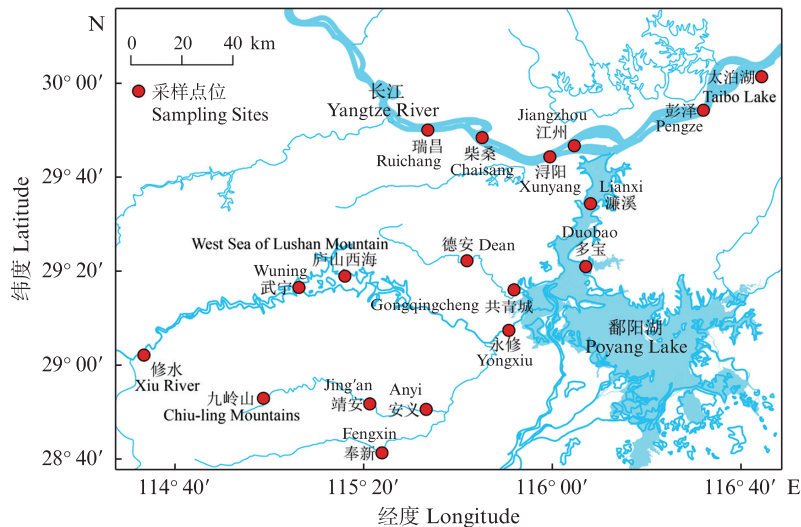


图1 采样点分布示意图

Fig. 1 Distribution of sampling sites

$$B_i = 1 / \sum_{j=1}^r P_{ij}^2 \quad (5)$$

式中: P_{ij} 为物种 i 在第 j 个样点的个体数占总个体数的比例; r 为样点总数。

1.3.4 生态位重叠值

选用 PIANKA^[37] 生态位重叠指数计算, 其公式为

$$O_{ik} = \sum_{j=1}^r (P_{ij} \cdot P_{kj}) / \sqrt{\sum_{j=1}^r P_{ij}^2 \cdot \sum_{j=1}^r P_{kj}^2} \quad (6)$$

式中: O_{ik} 为生态位重叠值, 取值范围为 $[0, 1]$ 。生态位重叠值越高, 说明占据相同的资源或其他环境变量越相似, 种间竞争激烈; 生态位重叠值越低, 说明共同利用资源部分越少, 种间竞争较小。当 O_{ik} 最小时, 表示生态位完全不重叠; 当 O_{ik} 最大时, 则表示生态位完全重叠。KREBS^[38] 认为生态位重叠值大于 0.6 表明种间生态重叠较显著。

1.3.5 物种间总体关联性

采用 Schluter 方差比率法 (VR)^[39], 公式为

$$\sigma T^2 = \sum_{i=1}^s P(1 - P_i)^2 \quad (7)$$

$$P_i = \frac{n_i}{N} \quad (8)$$

$$ST^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (T_j - t)^2 \quad (9)$$

$$VR = \frac{\sigma T^2}{ST^2} \quad (10)$$

式中: P_i 为物种 i 出现的采样点数 n_i 与总样点数的比值; S 为浮游植物物种总数; t 为浮游植物优势度 $Y > 0.01$ 物种种数平均数; σT^2 为样点方差, ST^2 为总物种数方差。VR 为总体间的关联性, $VR = 1$ 代表物种间是独立的, $VR > 1$, $VR < 1$ 则分别表示

物种间呈现正关联、负关联。采用统计量 W 用来检验 VR 值偏离 1 的程度, 若 $W < \chi^2_{0.95}(df)$, $P < 0.05$, 或 $W > \chi^2_{0.05}(df)$, $P < 0.05$, 总体间关联性显著; $\chi^2_{0.95}(df) < W < \chi^2_{0.05}(df)$, $P > 0.05$, 总体间关联性不显著^[40]。

1.3.6 种间联结性

采用 Yates 的连续矫正公式进行卡方检验^[40], 公式为

$$\chi^2 = \frac{N [|ad - bc| - \frac{N}{2}]^2}{(a+b)(a+c)(b+d)(c+d)} \quad (11)$$

式中: N 为样点总数; a 为物种 i, k 共同出现的样点数; b, c 为一对物种分别出现的样点数; d 为 i 和 k 物种均不出现的样点数。当 $\chi^2 < 3.841$ ($P > 0.05$) 种对间联结性不显著; $3.841 \leq \chi^2 \leq 6.635$ ($0.01 \leq P \leq 0.05$) 种对间联结性显著; $\chi^2 > 6.635$ ($P < 0.01$) 种对间联结性极显著。

结合联结系数 (AC) 进一步分析, 联结系数 (AC) 值域为 $[-1, 1]$, 当 $ac - bd > 0$, 且值越接近 1, 物种间的正联结性越强; 当 $ac - bd < 0$, 且越接近 -1, 物种间的负联结性越强; $AC = 0$ 则物种间完全独立, 无联结性。

采用 Spearman 秩相关分析, 用种的重要值作为计算秩相关系数的数量指标。公式为

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (12)$$

$$d_i = x_{ai} - x_{bi} \quad (13)$$

式中: d_i 为第 i 个数数据对的秩次差; x_{ai}, x_{bi} 分别为物

种 a 和物种 b 在样方 i 中的秩; n 为总样方数。

Spearman 秩相关系数是一种不受数据分布限制评估两个变量间关系强度的方法,其值在-1到1之间,正数表示正相关,负数表示负相关。系数 0.8~1.0 表示极强相关,0.6~0.8 表示强相关,0.4~0.6 表示中等相关,0.2~0.4 表示弱相关,0~0.2 表示极弱或无相关。

1.3.7 数据处理及分析

统计分析及可视化工作均在 R 语言环境(v4.3.2)中完成。基于 spaa 程序包计算浮游植物物种的生态位宽度、生态位重叠指数及总体关联性参数。采用 vegan 程序包进行群落结构相似性与差异性分析;通过主坐标分析(PCoA)解析多维群落结构特征,并配合置换多元方差分析(PERMANOVA)检验不同水情期与水生生物保护区对群落结构的显著性影响。上述分析结果均通过 ggplot2 程序包进行可视化呈现。使用 ArcGIS 10.8.1 进行地理信息制图,网络拓扑结构通过 Gephi 构建,其余图表由 Origin 2019b 64 完成。针对生物指标的组间差异,采用 SPSS 26.0

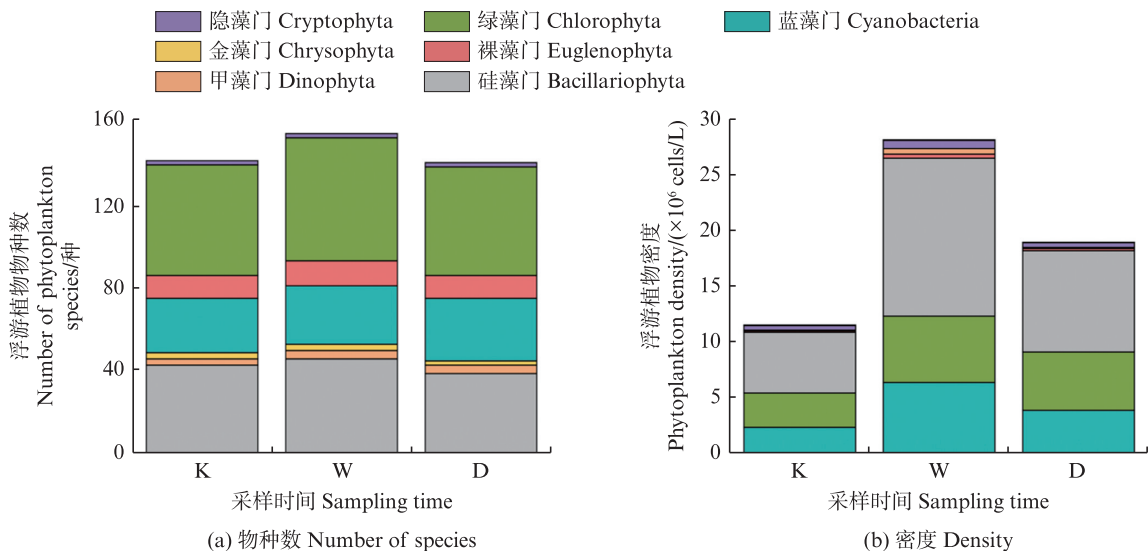
进行独立样本 t 检验,显著性水平设置为 $\alpha = 0.05$ 。所有统计分析的原始数据均通过 Shapiro-Wilk 检验验证正态性假设。

2 结果

2.1 浮游植物群落结构对水文条件的响应

3 个水情时期,共鉴定出浮游植物 7 门 161 种。其中绿藻门(62 种)、硅藻门(48 种)、蓝藻门(30 种)占主导,其余门类中甲藻门 4 种、金藻门 3 种、裸藻门 12 种和隐藻门 2 种。各时期各门种类数占比如图 2a 所示,各时期占比较大的均为绿藻门,蓝藻门及硅藻门,但蓝藻门的种类数量逐渐增加。3 个时期之间各门的种类数无显著的差异。

浮游植物密度变化如图 2b 所示。各时期中硅藻门的密度最大,绿藻门和蓝藻门的密度差异不大。3 个时期中,浮游植物密度呈现 2023 年丰水期>2023 年枯水期>2022 年枯水期,2023 年丰水期的浮游植物密度为 2.81×10^7 cells/L,2022 年枯水期的浮游植物密度为 1.15×10^7 cells/L。



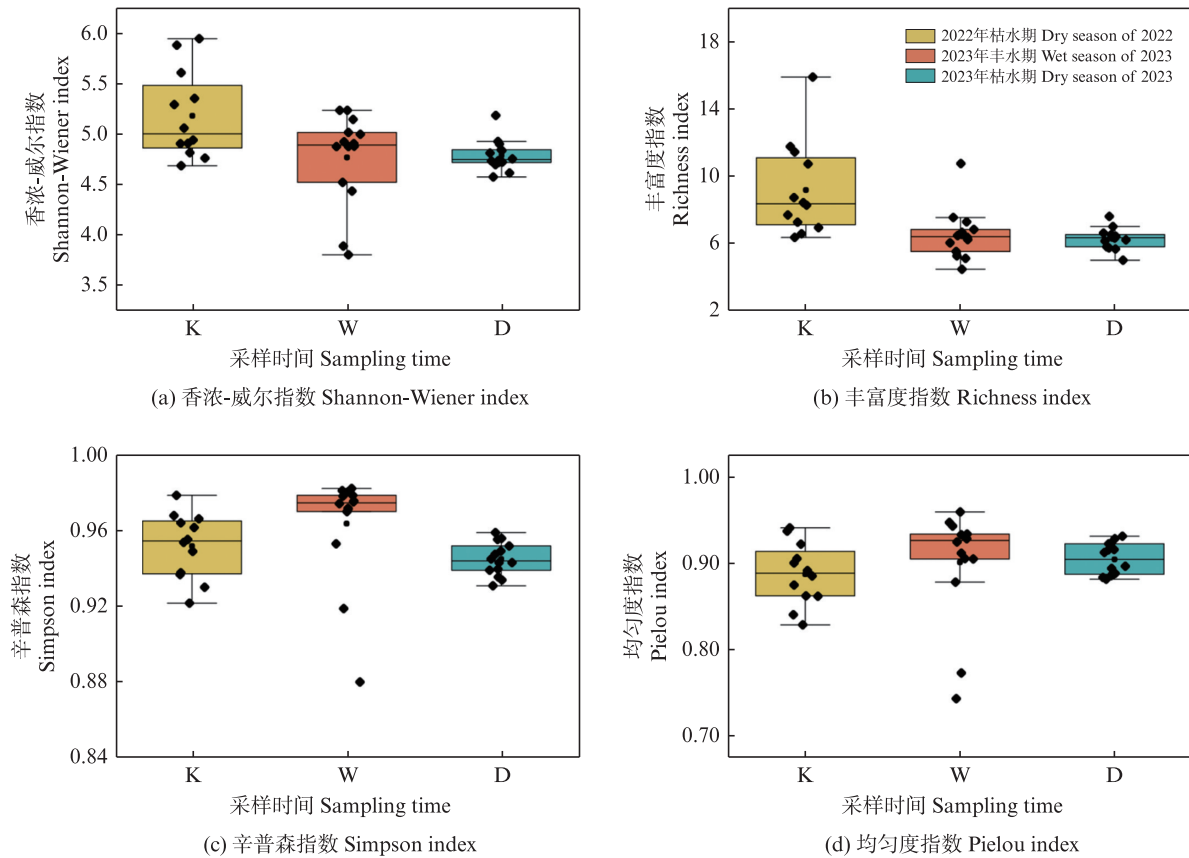
K. 2022 年枯水期; W. 2023 年丰水期; D. 2023 年枯水期。
K represents the dry season of 2022; W represents the wet season of 2023; D represents the dry season of 2023.

图 2 不同水情期浮游植物门类物种数及密度

Fig. 2 The number of phytoplankton species and density in each phylum in the three hydrologic regimes

3 个时期的浮游植物的多样性差异并不显著 ($P>0.05$), 见图 3。物种丰富度表现为 2022 年枯水期>2023 年丰水期>2023 年枯水期。香农多样性指数表现为 2022 年枯水期>2023 年丰水期>

2023 年枯水期, 辛普森指数表现为 2023 年丰水期>2022 年枯水期>2023 年枯水期, 均匀度指数表现为 2023 年丰水期>2023 年枯水期>2022 年枯水期。



图中K代表2022年枯水期,W代表2023年丰水期,D代表2023年枯水期。

In the figure, K represents the dry season of 2022, W represents the wet season of 2023, and D represents the dry season of 2023.

图3 3个水情期浮游植物 α 多样性变化情况

Fig. 3 Changes of phytoplankton α diversity in three hydrologic regimes

根据 Shannon-Wiener 指数评价标准来看^[33], 2022 年枯水期、2023 年丰水期、2023 年枯水期均处于清洁状态。根据 Pielou 均匀度指数评价标准^[33], 2022 年枯水期、2023 年丰水期、2023 年枯水期均处于轻污染或无污染状态。两个水质生物评价指标结合来看, 3 个水文时期均处于清洁状态。

2.2 浮游植物群落差异性分析

基于 Bray-Curtis 距离的主坐标分析 (PCoA) 显示, 由图 4 可知, 同一水情时期的样点分布较为聚集, 表明同一时期不同点位的浮游植物群落结构具有较高相似性, 而同一点位不同时期相似性较差。

2.3 浮游植物优势种

根据优势度计算结果 ($Y > 0.02$), 3 个时期共有 13 种优势种 (表 1), 蓝藻门 4 种, 绿藻门 4 种, 硅藻门 5 种。2022 年枯水期的 11 个优势种, 其中硅藻门 4 种, 蓝藻门 3 种, 绿藻门 4 种。2023 年丰水期有 4 种优势种, 硅藻门占了 75%。2023 年枯

水期有 6 种优势种, 硅藻门有 3 种, 蓝藻门有 1 种, 绿藻门有 2 种。硅藻门的颗粒沟链藻 (*Aulacoseira granulata*) 和尖肘形藻 (*Ulnaria acus*) 在 3 个时期均为优势种。

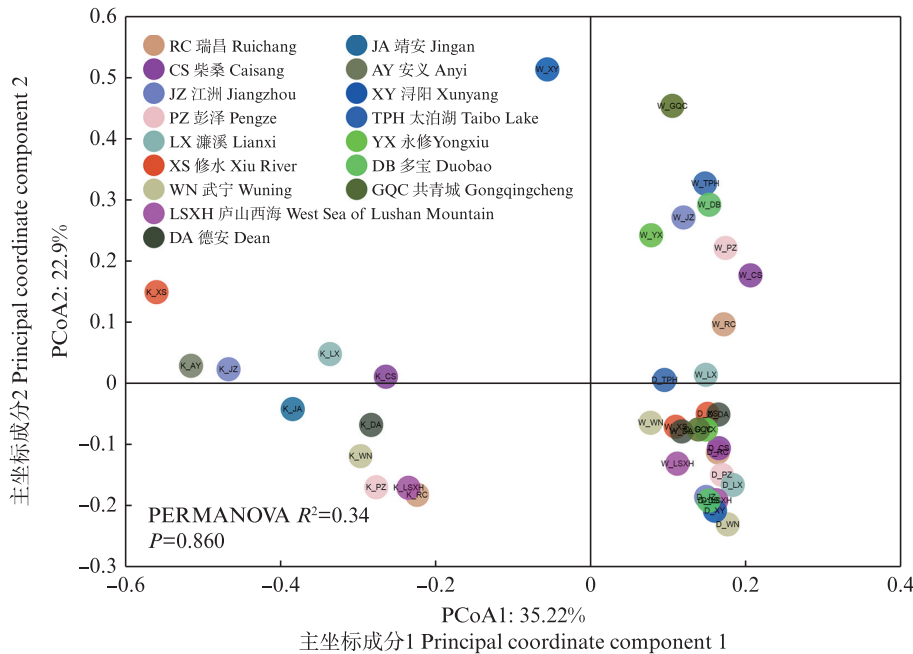
2.4 浮游植物优势种生态位宽度

本研究中浮游植物优势种生态位宽度的变化范围为 5.16~28.05, 最大值和最小值分别出现在 2023 年枯水期的四尾栅藻 (*Scenedesmus quadricauda*) (绿藻) 和 2022 年枯水期的尖肘形藻 (硅藻)。2023 年枯水期的生态位宽度均值为 24.91, 远大于 2022 年枯水期均值 6.75 和 2023 年丰水期均值 7.54。由表 2 可知, 2022 年枯水期及 2023 年枯水期, 浮游植物优势种的总生态位宽度基本相同, 且远大于 2023 年丰水期。

根据各优势种的平均生态位宽度 (T_{Bi}) 与优势种群落生态位宽度 ($\sum B_i$) 的比值, 即显著程度 ($\alpha < 0.5, 0.5 \leq \alpha < 0.9, 0.9 \leq \alpha$), 将优势种分为 3 类^[13]。资源总数 $r=18$ 的调查样本中生态位宽度范围在 $[0, 18)$, 由表 3 可知, 第一类优势种均占有绝大多

数的资源,主要为硅藻门的颗粒沟链藻、尖肘形藻和颗粒沟链藻极狭变种(*Aulacoseira granulata* var. *angustissima*),对环境的适应能力强,资源利用广,第二类优势种占有部分资源,为蓝藻门的鱼腥藻(*Anabaena* sp.)和固氮鱼腥藻(*Anabaena*

azotica),第三类优势种每个物种占有的资源较少,只在环境适合自身生存的水情期出现,如肘状肘形藻(*Ulnaria ulna*)(硅藻),具缘微囊藻(*Microcystis marginata*)(蓝藻),二角盘星藻纤细变种(*Pediastrum duplex* var. *gracillimum*)(绿藻)等。



图中K代表2022年枯水期,W代表2023年丰水期,D代表2023年枯水期。
In the figure, K represents the dry season of 2022, W represents the wet season of 2023, and D represents the dry season of 2023.

图4 各点位浮游植物群落PCoA分析
Fig. 4 PCoA analysis of phytoplankton communities at each site

表1 不同水情期浮游植物优势种优势度(Y)
Tab. 1 Phytoplankton dominant degree (Y) at different hydrologic regimes

序号 Number	门类 Classification	中文名 Chinese name	拉丁名 Latin name	2022年枯 水期 Dry season of 2022	2023年丰 水期 Wet season of 2023	2023年枯 水期 Dry season of 2023
1	硅藻门 Bacillariophyta	颗粒沟链藻	<i>Aulacoseira granulata</i>	0.07	0.09	0.13
2		颗粒沟链藻极狭变种	<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	—	0.02	0.02
3		尖肘形藻	<i>Ulnaria acus</i>	0.09	0.13	0.10
4		肘状肘形藻	<i>Ulnaria ulna</i>	0.04	—	—
5		舟形藻属未定种	<i>Navicula</i> spp.	0.05	—	—
6	蓝藻门 Cyanophyta	具缘微囊藻	<i>Microcystis marginata</i>	0.02	—	—
7		湖生假鱼腥藻	<i>Pseudanabaena limnetica</i>	0.04	—	—
8		鱼腥藻	<i>Anabaena</i> sp.	0.04	0.07	—
9		固氮鱼腥藻	<i>Anabaena azotica</i>	—	—	0.02
10	绿藻门 Chlorophyta	空球藻	<i>Eudorina elegans</i>	0.02	—	—
11		单角盘星藻具孔变种	<i>Pediastrum simplex</i> var. <i>duodenarium</i>	0.03	—	0.02
12		二角盘星藻纤细变种	<i>Pediastrum duplex</i> var. <i>gracillimum</i>	0.02	—	—
13		四尾栅藻	<i>Scenedesmus quadricauda</i>	0.03	—	0.03

表2 3个时期浮游植物优势种生态位宽度
Tab. 2 Niche widths of phytoplankton dominant species in the three periods

编号 Number	中文名 Chinese name	拉丁名 Latin name	2022年枯水期 Dry season of 2022	2023年丰水期 Wet season of 2023	2023年枯 水期 Dry season of 2023
K01、W01、D01	颗粒沟链藻	<i>Aulacoseira granulata</i>	6.90	10.47	12.20
W02、D02	颗粒沟链藻极狭变种	<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	—	7.62	11.90
K02、W03	尖肘形藻	<i>Ulnaria acus</i>	5.16	6.42	12.47
K03	肘状肘形藻	<i>Ulnaria ulna</i>	8.10	—	—
K04	舟形藻属未定种	<i>Navicula</i> spp.	6.51	—	—
K05	具缘微囊藻	<i>Microcystis marginata</i>	7.35	—	—
K06	湖生假鱼腥藻	<i>Pseudanabaena limnetica</i>	6.77	—	—
K07、W04	鱼腥藻	<i>Anabaena</i> sp.	7.95	5.66	—
D04	固氮鱼腥藻	<i>Anabaena azotica</i>	—	—	10.07
K08	空球藻	<i>Eudorina elegans</i>	6.58	—	—
K09、D05	单角盘星藻具孔变种	<i>Pediastrum simplex</i> var. <i>duodenarium</i>	6.33	—	12.81
K10	二角盘星藻纤细变种	<i>Pediastrum duplex</i> var. <i>gracillimum</i>	6.96	—	—
K11、D06	四尾栅藻	<i>Scenedesmus quadricauda</i>	5.63	—	12.62

表3 3类优势种的平均生态位宽度与占比
Tab. 3 The average niche width and proportion of the three dominant species

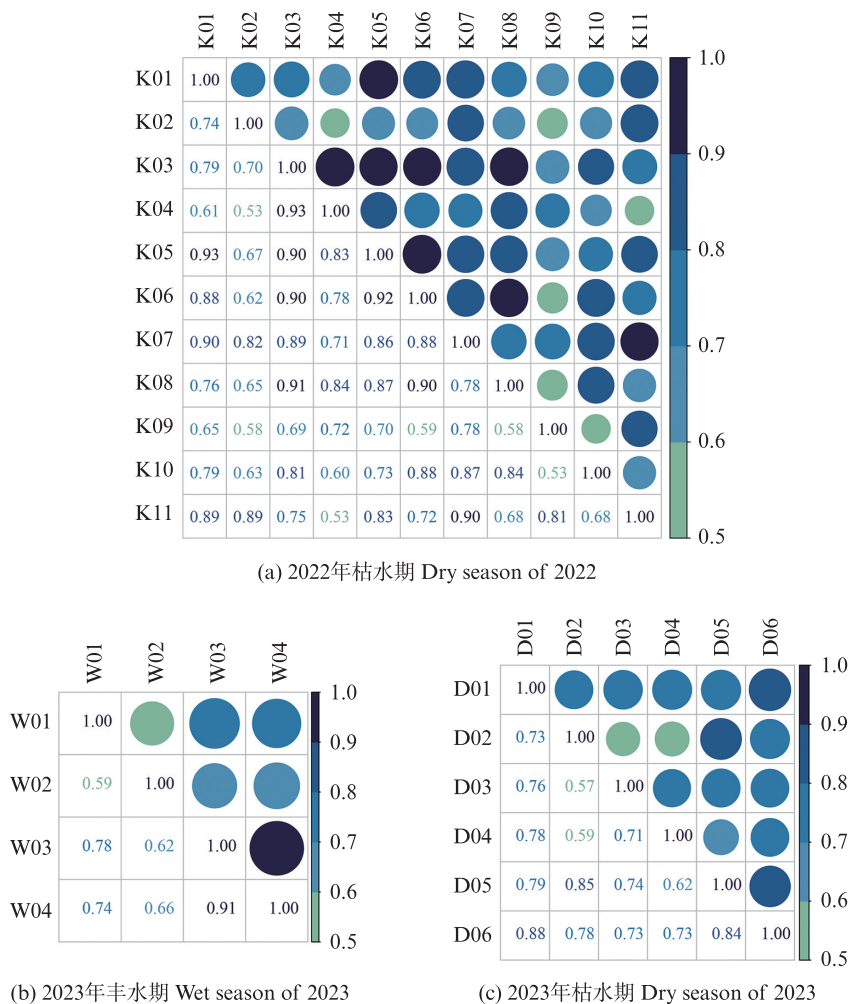
分类 Classification	优势种 Dominant species	T_{Bi}	$T_{Bi}/\sum B_i$	总占比 Total proportion
第一类 First kind	颗粒沟链藻	9.86	16.76%	62.63%
	尖肘形藻	8.02	13.63%	
	颗粒沟链藻极狭变种	6.51	11.06%	
	单角盘星藻具孔变种	6.38	10.85%	
	四尾栅藻	6.08	10.34%	
第二类 Second kind	鱼腥藻	4.54	7.71%	13.41%
	固氮鱼腥藻	3.35	5.70%	
第三类 Third kind	肘状肘形藻	2.7	4.59%	23.95%
	具缘微囊藻	2.45	4.17%	
	二角盘星藻纤细变种	2.32	3.94%	
	湖生假鱼腥藻	2.26	3.84%	
	空球藻	2.19	3.73%	
	舟形藻属未定种	2.17	3.69%	

2.5 浮游植物优势种生态位重叠值

鄱阳湖流域优势种在2022年枯水期,2023年丰水期,2023年枯水期的生态位重叠值的变化范围分别为0.53~0.93、0.59~0.91和0.57~0.88,其中2022年枯水期的生态位重叠值跨度最大(图5)。最大值出现在2022年枯水期的肘状肘形藻和舟形藻属未定种之间,最小值出现在2022年枯水期的尖肘形藻和舟形藻属未定种之间。2022年枯水期,2023年丰水期和2023年枯水期的优势种种对为55对、6对、15对。鄱

阳湖流域浮游植物优势种各时期的生态位重叠值均大于0.3,即生态位重叠值全部有意义。3个水文时期 $O_{ik}>0.6$ 的对数分别占比为89%,83%,87%。在生态位重叠值超过0.9的种对中,2022年枯水期的肘状肘形藻与舟形藻的生态位重叠值为0.93,颗粒沟链藻与具缘微囊藻的生态位重叠值也为0.93。肘状肘形藻与具缘微囊藻的生态位重叠值为0.90,同时,肘状肘形藻与湖生假鱼腥藻的生态位重叠值同为0.90。肘状肘形藻与空球藻的生态位重叠值为0.91,

具缘微囊藻与湖生假鱼腥藻的生态位重叠值为 0.90。而在 2023 年丰水期,尖肘形藻与鱼腥藻的生态位重叠值为 0.91。鱼腥藻与四尾栅藻的生态位重叠值为



图中K,W,D序号代表物种与表2一致。
Serial numbers K, W, and D in the figure represent species consistent with Table 2.

图 5 各水情期浮游植物优势种生态位重叠值
Fig. 5 Niche overlap of phytoplankton dominant species

2.6 优势种关联性分析

种间联结性描述了物种的相互关系,通常基于物种的存在与否,是一种定性指标。而种间相关性则进一步考虑了物种数量,是一种定量关系,能更全面地反映物种间的相互作用。

2.6.1 总体关联性分析

由表 4 可知,2022 年枯水期、2023 年丰水期和 2023 年枯水期的方差比率(VR)均超过 1,分别为 1.40、1.59 和 1.07,排序为 2023 年丰水期>2022 年枯水期>2023 年枯水期,表明 3 个水情期浮游植物群落优势种总体关联性呈正关联,呈正向演替,其中 2022 年枯水期和 2023 年丰水期呈显著正关联,物种组成相对于 2023 年枯水期更稳定。

统计量 W 值与 χ^2 临界值的比较进一步证实了显著的正联结:2022 年枯水期 W 值为 12.57,超出 $\chi^2_{0.95}$ 和 $\chi^2_{0.05}$ 的临界值 0.34 和 0.99;2023 年丰水期 W 值为 22.28,同样超出临界值 0.36 和 0.98;2023 年枯水期 W 值高达 36.49,远超临界值 0.42 和 0.93。这些结果表明,各时期浮游植物群落优势种间均呈现显著正联结。

2.6.2 种间联结性分析

种间联结是群落重要的数量和结构特征之一,是描述不同物种间相互作用强度和性质的指标,群落的种间关系能反映群落的稳定性。种间关系一般被划分为正联结、负联结和无关联。群落内物种种间关系越复杂,生态位分化越合理,

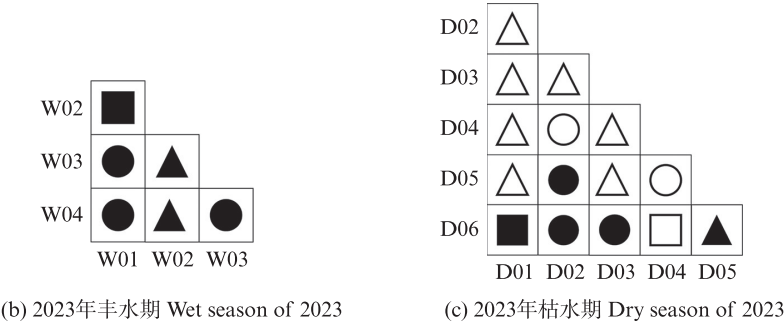
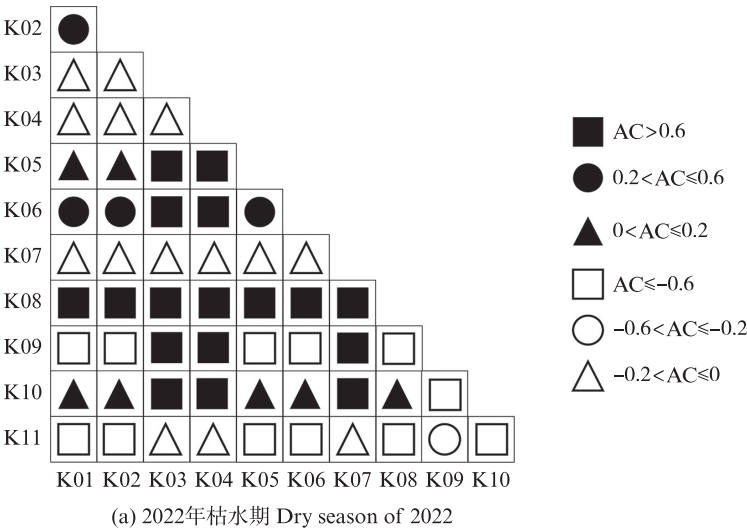
种间关系越趋于正联结。周先叶等^[41]的研究结果表明,正负关联比越高,群落结构越趋于稳定。

浮游植物 3 个水情期共有 39 个种对表现出正联结关系($AC>0$), 占总数的 51.31 %。其中有 19 对正联结系数程度较高($AC\geq 0.6$), 10 对正联结系数程度一般($0.2\leq AC<0.6$); 有 12 对负联结

系数程度较高($AC\leq -0.6$); 3 对负联结系数程度一般($-0.6<AC\leq -0.2$), 见图 6。从联结系数 AC 可以看出, 计算结果与总体联结性分析结果一致, 呈现正联结。优势种正负比高, 群落结构稳定, 群落种间联结紧密。

表 4 不同水文时期浮游植物优势种的总体关联性
Tab. 4 Overall correlation of phytoplankton dominant species in different hydrologic regimes

采样时间 Sampling time	方差比率 VR	统计量 W	χ^2 的临界值 The critical value of χ^2	校验结果 Verification result
2022 年枯水期 Dry season of 2022	1.4	12.57	(0.34, 0.99)	联结显著
2023 年丰水期 Wet season of 2023	1.59	22.28	(0.36, 0.98)	联结显著
2023 年枯水期 Dry season of 2023	1.07	36.49	(0.42, 0.93)	联结显著

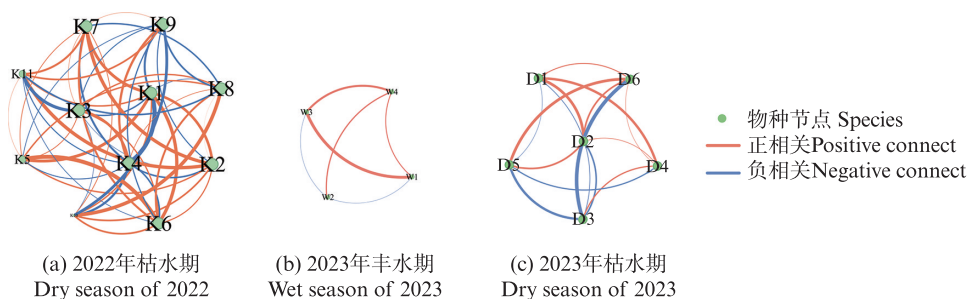


图中 K, W, D 序号代表物种与表 2 一致。
Serial numbers K, W, and D in the figure represent species consistent with Table 2.

图 6 不同水情期浮游植物优势种的种间联结系数 (AC) 半矩阵
Fig. 6 Semi-matrix diagram of interspecific connectivity coefficients (AC) for dominant phytoplankton species during different hydrologic regimes

由图7可知,共有43个种对正相关,32个种对负相关,从正负比例看,正负比高,群落结构越稳定,多物种可以共存,群落容易与环境相适应。2022年枯水期颗粒沟链藻和舟形藻属未定

种为极强负相关,2023年丰水期尖肘形藻和颗粒沟链藻为极强正相关。大多数种间呈现正相关,群落处于相对稳定状态,与联结指数检验结果相一致。



图中K, W, D序号代表物种与表2一致。

Serial numbers K, W, and D in the figure represent species consistent with Table 2.

图7 不同水情期浮游植物优势种的Spearman秩相关系数关联图

Fig. 7 Spearman rank correlation coefficient of dominant phytoplankton species in different water seasons

3 讨论

3.1 浮游植物群落结构及其对不同水文情况的响应

九江市重要水生生物保护区水体的浮游植物群落,以硅藻门、绿藻门和蓝藻门为主,其中硅藻门在密度和优势种持续性上较其他门类明显突出,且与鄱阳湖流域既往研究^[15,21]一致,其中硅藻类群对水文波动的适应性强。研究结果显示,2022年极端干旱事件对群落结构动态有极大影响,枯水期优势种数量(11种)显著高于2023年水文恢复期(4~6种),但平均优势度低于其他时期(表1)。根据群落稳定性理论^[42-43],优势种数量增加且优势度降低,可能反映群落通过增加物种冗余以应对环境压力,这一现象在极端干旱导致的资源限制条件下尤为显著。颗粒沟链藻在3个时期持续占据优势地位,可能是其形态功能特征(如链状结构、具有油滴)和生态适应性(底栖-浮游生活状态转换),使其能够在低水位、高浊度、非极度贫营养和间歇性悬浮条件下维持种群稳定性。高琦等^[44]和葛大艳等^[45]对金沙江下游河段和珠三角河网中的研究发现在高浊度下硅藻沉降率低,其链状结构增强抗剪切能力,其中颗粒沟链藻还可形成稳定弯曲形态有效应对水体扰动,与本研究的情况一致。但本研究与珠三角河网中链状硅藻生物量随枯、丰水期波动不同,本研究中的硅藻优势种季节性变化较小,可能与水生生物保护区的营养负荷有关^[44-45]。印证了前

人的观点:硅藻在水力扰动环境中更易获得竞争优势^[46-48]。

3.2 生态位分化与种间竞争的权衡

生态位宽度与重叠值的时空分异揭示了水文条件对种间关系的调控机制。本研究中,2022年枯水期生态位重叠值($O_{ik}=0.53\sim0.93$)显著高于其他时期,表明极端干旱通过压缩生境空间加剧了种间资源竞争。极端干旱可能通过压缩生态位空间筛选出高耐受性物种(如颗粒沟链藻),进而重塑群落演替路径。肘状肘形藻与舟形藻属未定种的生态位重叠值高达0.93,表明两者在光照和营养利用策略上存在高度趋同性^[49]。然而,这种高竞争种对并未导致群落崩溃,这可能归因于硅藻类群对低营养条件的适应性分化^[48,50]。例如,颗粒沟链藻通过悬浮策略占据水体表层资源,而尖肘形藻则可通过底栖-浮游生态位转换实现共存^[43]。至2023年丰水期,浮游植物生态位宽度均值下降(7.54)且重叠范围缩小($O_{ik}=0.59\sim0.91$),反映资源丰度提升缓解了种间竞争压力,促使生态位向特化方向分化^[6]。在生态位重叠值超过0.9的种对中,肘状肘形藻多次出现,表明其在群落中有广泛的生态位。这种广泛的生态位可能使肘状肘形藻能够在多种环境条件下生存和繁衍,从而在竞争中占据优势,广生态位的优势种是群落结构和水环境状况的指标。

3.3 种间联结性对群落稳定性的影响

总体联结性可以反映群落演替的进程及其稳定性,种间联结性能反映一定时期内群落中物

种间的相互关系^[51]。在本研究中,方差比率(VR>1)种间联结性(正相关种对占比 51.31%)共同表明,3 个水文时期浮游植物群落总体呈显著正关联(表 4),支持了正向演替导致稳定性增强的结论^[52-54],即物种间通过生态位互补和互利效应减少直接竞争,进而提升群落功能冗余。例如,尖肘形藻与鱼腥藻在 2023 年丰水期表现出高生态位重叠($O_{ik}=0.91$)与强正相关($\rho=0.85$),可能源于光利用的时空分化:鱼腥藻通过伪空泡调节垂直迁移以优化对光吸收^[55-57],而尖肘形藻则可以依赖其昼夜分裂节律^[58]来实现资源的错峰利用。此外,枯水期种间负关联比例表明,环境压力下竞争局部激化,但总体仍由正关联主导,故维持了群落稳定性。

4 结论

鄱阳湖水系和长江干流九江市境内主要水生生物保护区水体的浮游植物群落呈现“绿藻-硅藻-蓝藻”主导的群落结构。丰水期的物种群更趋于稳定和分化,而枯水期的群落结构更为复杂,尤其是 2022 年受极端干旱天气影响,生态位重叠范围更大。硅藻类群的核心优势地位凸显其生态弹性,而蓝藻与绿藻的季节性演替,则反映了环境的筛选作用。本研究为长江中下游水体监测和保护提供了关键参数,但仍存在一定的不足之处,如未分析环境因子与生态位参数的定量关系及浮游动物摄食压力等生物互作,且缺少长期连续监测数据,限制了对群落恢复动态的预测能力。未来可结合生态模型与分子技术,深入揭示多营养级互作对生态位分化的影响,并为极端气候下的湖泊管理提供理论支撑,提升应对气候变化的管理能力。

作者声明本文无利益冲突。

参考文献:

- [1] HU Y, WANG H C, JIA H P, et al. Ecological niche and interspecific association of plant communities in alpine desertification grasslands: a case study of Qinghai Lake Basin[J]. *Plants*, 2022, 11(20): 2724.
- [2] 李德志, 石强, 臧润国, 等. 物种或种群生态位宽度与生态位重叠的计测模型[J]. *林业科学*, 2006, 42(7): 95-103.
- LI D Z, SHI Q, ZANG R G, et al. Models for niche breadth and niche overlap of species or populations[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(7): 95-103.
- [3] MARTÍNEZ I, WIEGAND T, GONZÁLEZ-TABOADA F, et al. Spatial associations among tree species in a temperate forest community in North-western Spain[J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 260(4): 456-465.
- [4] MANLICK P J, PAULI J N. Human disturbance increases trophic niche overlap in terrestrial carnivore communities[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(43): 26842-26848.
- [5] CHAPARRO-PEDRAZA P C, DE ROOS A M. Ecological changes with minor effect initiate evolution to delayed regime shifts[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2020, 4(3): 412-418.
- [6] STEPHENS R B, HOBBI E A, LEE T D, et al. Pulsed resource availability changes dietary niche breadth and partitioning between generalist rodent consumers[J]. *Ecology and Evolution*, 2019, 9(18): 10681-10693.
- [7] YUE L, WANG C, MENG B S, et al. The food niche overlap and interspecific relationship between the sympatric Tibetan macaque and grey snub-nosed monkey[J]. *Animals*, 2023, 13(15): 2536.
- [8] 李雪梅, 程小琴. 生态位理论的发展及其在生态学各领域中的应用[J]. *北京林业大学学报*, 2007, 29(s2): 294-298.
- LI X M, CHENG X Q. Development of niche theory and its application in each fields of ecology[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2007, 29(s2): 294-298.
- [9] 杨波, 张靖泽, 肖晶, 等. 贵州南北盘江浮游植物群落结构变化及优势种生态位特征[J]. *水生态学杂志*, 2024, 45(6): 125-133.
- YANG B, ZHANG J Z, XIAO J, et al. Phytoplankton community structure and dominant species niches in Nanpan and Beipan Rivers in Guizhou Province[J]. *Journal of Hydroecology*, 2024, 45(6): 125-133.
- [10] 李晓东, 巢欣, 刘惠秋, 等. 雅鲁藏布江中游浮游植物群落优势种时空生态位[J]. *生态学报*, 2023, 43(18): 7746-7760.
- LI X D, CHAO X, LIU H Q, et al. Spatio-temporal niche of dominant species of phytoplankton community in the middle reaches of Yarlung Zangbo River[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(18): 7746-7760.
- [11] 李晓东, 潘成梅, 安瑞志, 等. 西藏拉萨河中下游不同水文期浮游植物优势种生态位及种间联结性[J]. *湖泊科学*, 2023, 35(1): 118-130.
- LI X D, PAN C M, AN R Z, et al. Niche and interspecific association of dominant phytoplankton species in different hydro-logical periods in the middle and lower reaches of Lhasa River, Tibet, China[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(1): 118-130.

- [12] 刘凌, 朱良珍, 叶键, 等. 张福河浮游植物群落结构及生态位特征[J]. 水资源保护, 2021, 37(3): 7-12.
LIU L, ZHU L Z, YE J, et al. Community structure and niche characteristics of phytoplankton in Zhangfu River [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3): 7-12.
- [13] 罗江之, 欧腾, 邓恺芊, 等. 贵阳市翁井水库浮游植物优势种生态位与种间联结性分析[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2024, 42(3): 16-25.
LUO J Z, OU T, DENG K Q, et al. Ecological niche and interspecific connectivity of dominant phytoplankton species in Wengjing Reservoir, Guiyang City[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2024, 42(3): 16-25.
- [14] 王双艳, 肖晶, 陈春春, 等. 贵州小车河不同水文期浮游植物生态位及种间联结性分析[J]. 环境科学, 2025, 46(2): 900-909.
WANG S Y, XIAO J, CHEN C C, et al. Niche and interspecific association of phytoplankton dominant species at different hydrological periods in Xiaoche River, Guizhou Province[J]. Environmental Science, 2025, 46(2): 900-909.
- [15] 李文轩, 蒋名亮, 徐力刚, 等. 鄱阳湖浮游植物时空变化特征及其对极端洪枯事件的响应[J]. 湖泊科学, 2024, 36(4): 1001-1013.
LI W X, JIANG M L, XU L G, et al. Spatial and temporal characteristics of phytoplankton in Lake Poyang and its response to extreme flood and drying events[J]. Journal of Lake Sciences, 2024, 36(4): 1001-1013.
- [16] 李亚培, 孔赤平, 许群, 等. 不同水域刀鲚与短颌鲚肌间刺的比较分析[J]. 上海海洋大学学报, 2024, 33(5): 1166-1175.
LI Y P, KONG C P, XU Q, et al. Comparative analysis of the intermuscular bones of *Coilia nasus* and *Coilia brachygnathus* in different waters [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2024, 33(5): 1166-1175.
- [17] 邢雅微, 卢智灵, 王婷, 等. 上海城市河网冬季浮游植物功能群群落构建机制及其驱动因素[J]. 上海海洋大学学报, 2025, 34(1): 56-68.
XING Y W, LU Z L, WANG T, et al. Phytoplankton functional groups community assembly mechanisms and driving factors in Shanghai river network in winter[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2025, 34(1): 56-68.
- [18] 陈明华. 鄱阳湖浮游植物时空格局及环境解析[D]. 南昌: 南昌大学, 2019.
CHEN M H. Spatial-temporal pattern and environmental analysis of phytoplankton in Poyang Lake [D]. Nanchang: Nanchang University, 2019.
- [19] 万珊珊, 刘金福, 陈宇炜, 等. 鄱阳湖浮游植物群落结构时空分布特征及其影响因素[J]. 南昌工程学院学报, 2024, 43(1): 42-50, 64.
WAN S S, LIU J F, CHEN Y W, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of phytoplankton community structure and its influencing factors in Poyang Lake [J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2024, 43(1): 42-50, 64.
- [20] 钱奎梅, 刘宝贵, 陈宇炜. 鄱阳湖浮游植物功能群的长期变化特征(2009-2016年)[J]. 湖泊科学, 2019, 31(4): 1035-1044.
QIAN K M, LIU B G, CHEN Y W. Long term dynamics of phytoplankton functional groups in Lake Poyang during 2009-2016[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(4): 1035-1044.
- [21] 钟可儿. 鄱阳湖浮游植物群落结构与生物完整性的时空模式研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
ZHONG K E. Study on the spatio-temporal patterns of phytoplankton community structure and its bio-integrity in Poyang Lake [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023.
- [22] PENG Y J, CHEN G, CHAO N F, et al. Detection of extreme hydrological droughts in the poyang lake basin during 2021 - 2022 using GNSS-derived daily terrestrial water storage anomalies [J]. Science of the Total Environment, 2024, 919: 170875.
- [23] 张奇, 薛晨阳, 夏军. 鄱阳湖极端干旱的影响、成因与对策[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(12): 1894-1902.
ZHANG Q, XUE C Y, XIA J. Impacts, contributing factors and countermeasures of extreme droughts in Poyang Lake [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(12): 1894-1902.
- [24] 胡芳, 刘聚涛, 杨平, 等. 鄱阳湖蓝藻时空分布特征及其驱动因子研究[J]. 长江流域资源与环境, 2024, 33(3): 605-614.
HU F, LIU J T, YANG P, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of cyanobacteria and the driving factors in Poyang Lake [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2024, 33(3): 605-614.
- [25] 于新平, 陈宇炜, 刘金福, 等. 鄱阳湖典型河湖交汇区浮游植物现状分析[J]. 环境科学, 2023, 44(9): 4954-4964.
YU X P, CHEN Y W, LIU J F, et al. Analysis on the current situation of phytoplankton in the typical river-lake ecotone of Lake Poyang [J]. Environmental Science, 2023, 44(9): 4954-4964.
- [26] 杨潇, 马吉顺, 张欢, 等. 鄱阳湖不同水文期浮游生物群落结构特征和影响因素及水质评价[J]. 水生生物学报, 2021, 45(5): 1093-1103.
YANG X, MA J S, ZHANG H, et al. Community structure and the water quality during different hydrological periods in Poyang Lake [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2021, 45(5): 1093-1103.

- [27] 吴强, 刘聚涛, 温春云, 等. 丰水期鄱阳湖浮游植物群落构建机制及影响因素[J]. 湖泊科学, 2024, 36(5): 1353-1365.
WU Q, LIU J T, WEN C Y, et al. Phytoplankton community assembly mechanisms and driving factors during wet seasons in Lake Poyang[J]. Journal of Lake Science, 2024, 36(5): 1353-1365.
- [28] 谢慧钰, 胡梅, 嵇晓燕, 等. 2011~2019年鄱阳湖水水质演化特征及主要污染因子解析[J]. 环境科学, 2022, 43(12): 5585-5597.
XIE H Y, HU M, JI X Y, et al. Water quality evolution characteristics and pollution factor analysis in Poyang Lake from 2011 to 2019[J]. Environmental Science, 2022, 43(12): 5585-5597.
- [29] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 406-412.
ZHANG Z S, HUANG X F. Research methods of freshwater plankton[M]. Beijing: Science Press, 1991: 406-412.
- [30] 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: 23-437.
HU H J, WEI Y X. The freshwater algae of China: systematics, taxonomy and ecology[M]. Beijing: Science Press, 2006: 23-437.
- [31] 王全喜. 长江下游地区常见浮游植物图集[M]. 北京: 科学出版社, 2023: 2-217.
WANG Q X. Atlas of common phytoplankton in the lower Yangtze River[M]. Beijing: Science Press, 2023: 2-217.
- [32] MAGURRAN A E. Ecological diversity and its measurement[M]. London: Chapman & Hall, 1988: 11-44.
- [33] 周俊伟, 马殿光, 杨婷婷, 等. 长江江苏段浮游植物和着生藻类群落结构时空变化规律研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2023: 12-13.
ZHOU J W, MA D G, YANG T T, et al. Study on spatial and temporal variation of phytoplankton and periphyton community in Jiangsu province of Yangtze river[M]. Beijing: China Water Power Press, 2023: 12-13.
- [34] MCNAUGHTON S J. Relationships among functional properties of Californian grassland[J]. Nature, 1967, 216(5111): 168-169.
- [35] HABIB O A, TIPPETT R, MURPHY K J. Seasonal changes in phytoplankton community structure in relation to physico-chemical factors in Loch Lomond, Scotland[J]. Hydrobiologia, 1997, 350(1): 63-79.
- [36] 郭坤, 杨德国, 彭婷, 等. 湖北省长湖浮游植物优势种生态位分析[J]. 湖泊科学, 2016, 28(4): 825-834.
GUO K, YANG D G, PENG T, et al. Ecological niche analysis of dominant species of phytoplankton in Lake Changhu, Hubei Province[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(4): 825-834.
- [37] PIANKA E R. The structure of lizard communities[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 1973, 4: 53-74.
- [38] KREBS C J. Ecological methodology[M]. New York: Harper Collins Publishers, 1998: 371-405.
- [39] SCHLUTER D. A variance test for detecting species associations, with some example applications[J]. Ecology, 1984, 65(3): 998-1005.
- [40] 张金屯. 数量生态学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2011: 100-123.
ZHANG J T. Quantitative ecology[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2011: 100-123.
- [41] 周先叶, 王伯荪, 李鸣光, 等. 广东黑石顶自然保护区森林次生演替过程中群落的种间联结性分析[J]. 植物生态学报, 2000(3): 332-339.
ZHOU X Y, WANG B S, LI M G, et al. An analysis of interspecific associations in secondary succession forest communities in Heishiding Natural Reserve, Guangdong Province[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2000(3): 332-339.
- [42] 王海邻, 刘玉飞, 任玉芬, 等. 北京市河流秋季浮游动物群落特征分析[J]. 环境科学, 2019, 40(8): 3568-3576.
WANG H L, LIU Y F, REN Y F, et al. Analysis of river zooplankton community characteristics in Autumn in Beijing[J]. Environmental Science, 2019, 40(8): 3568-3576.
- [43] 严文逸, 王绍祥, 陈立婧. 青草沙水库直链藻种群特征及其对环境因子的响应[J]. 基因组学与应用生物学, 2017, 36(5): 2119-2127.
YAN W Y, WANG S X, CHEN L J. The population characteristics of *Aulacoseira* in Qingcaosha reservoir and its response to environmental factors[J]. Genomics and Applied Biology, 2017, 36(5): 2119-2127.
- [44] 葛大艳, 刘乾甫, 赖子尼, 等. 珠三角河网链状硅藻物种组成及生态特征[J]. 生态学报, 2021, 41(6): 2482-2495.
GE D Y, LIU Q F, LAI Z N, et al. Species composition and ecological characteristics of filamentous diatoms in the Pearl River Delta[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(6): 2482-2495.
- [45] 高琦, 倪晋仁, 赵先富, 等. 金沙江典型河段浮游藻类群落结构及影响因素研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 55(3): 571-579.
GAO Q, NI J R, ZHAO X F, et al. Community structure characteristics of phytoplankton and their relationship with environmental factors in the typical section of Chin-sha River[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2019, 55(3): 571-579.
- [46] WANG C, LEK S, LAI Z N, et al. Morphology of

- Aulacoseira* filaments as indicator of the aquatic environment in a large subtropical river: the Pearl River, China[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 81: 325-332.
- [47] TAVERNINI S, PIEROBON E, VIAROLI P. Physical factors and dissolved reactive silica affect phytoplankton community structure and dynamics in a lowland eutrophic river (Po river, Italy) [J]. *Hydrobiologia*, 2011, 669 (1): 213-225.
- [48] 王菁. 环境因素对普通小球藻(*Chlorella vulgaris*)和鱼腥藻(*Anabaena* sp. strain PCC)生长竞争的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
- WANG J. The effect of environmental factors on the growth and competition of *Chlorella vulgaris* and *Anabaena* sp. strain PCC [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014.
- [49] 夏桢妍. 乐安河水域重金属污染下的硅藻标志物响应分析[D]. 南昌: 南昌工程学院, 2019.
- XIA Z Y. Response analysis of diatom markers under heavy metal pollution in the waters of Le'an River [D]. Nanchang: Nanchang Institute of Technology, 2019.
- [50] EGGE J K. Are diatoms poor competitors at low phosphate concentrations? [J]. *Journal of Marine Systems*, 1998, 16(3/4): 191-198.
- [51] 黄艳芬, 刘凌, 张顺婷, 等. 淮河流域江苏段浮游植物优势种时空生态位[J]. *水生生物学报*, 2024, 48(3): 436-443.
- HUANG Y F, LIU L, ZHANG S T, et al. Spatio-temporal niche of phytoplankton dominant species in Jiangsu section of Huaihe river basin [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2024, 48(3): 436-443.
- [52] 丁茂, 汪宇坤, 何煜然, 等. 安徽鹞落坪国家级自然保护区落叶阔叶林树种多样性、种间联结及群落稳定性变化[J]. *生态学报*, 2023, 43(7): 2818-2830.
- DING M, WANG Y K, HE Y R, et al. Changes of species diversity, interspecific associations and community stability for the deciduous broad-leaved forest in Yaoluping National Nature Reserve, Anhui Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(7): 2818-2830.
- [53] 陈绪辉, 叶宝鉴, 潘标志, 等. 珍稀濒危植物江南油杉群落乔木层主要树种种间关联性分析[J]. *热带亚热带植物学报*, 2023, 31(1): 21-30.
- CHEN X H, YE B J, PAN B Z, et al. Interspecific association analysis of dominant tree species of rare and endangered plant in *Keteleeria fortunei* var. *cyclolepis* community [J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2023, 31(1): 21-30.
- [54] 刁元彬, 吴从文, 董培昌, 等. 高原贫营养湖泊九寨沟湖群浮游藻类群落稳定性[J/OL]. *水生态学杂志*, 2025: 1-12. [2025-02-12]. <https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.20240315>.
- DIAO Y B, WU C W, DONG P C, et al. Stability of planktonic algal community in Jiuzhaigou lake group, a plateau nutrient-poor lake [J/OL]. *Journal of Hydroecology*, 2025: 1-12. [2025-02-12]. <https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.20240315>.
- [55] 殷志坤, 李哲, 王胜, 等. 磷限制下光照和温度对水华鱼腥藻生长动力学的影响[J]. *环境科学*, 2015, 36 (3): 963-968.
- YIN Z K, LI Z, WANG S, et al. Effect of light and temperature on growth kinetics of *Anabaena flosaquae* under phosphorus limitation [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(3): 963-968.
- [56] 张萍, 李哲, 王胜, 等. 不同磷浓度下光强、温度对水华鱼腥藻(*Anabaena flos-aquae*)生长的动力学[J]. *湖泊科学*, 2015, 27(3): 459-465.
- ZHANG P, LI Z, WANG S, et al. Modeling of *Anabaena flos-aquae* growth kinetics of light intensity and temperature within different levels of phosphorus concentrations [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, 27 (3): 459-465.
- [57] 高京, 曹晶, 储昭升, 等. 丝状藻响应温度变化的生长及功能特性[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2020, 42(6): 196-204.
- GAO J, CAO J, CHU Z S, et al. Growth and functional traits in filamentous algae responding to temperature [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2020, 42 (6): 196-204.
- [58] 邓华健, 陶建华. 浮游植物增长光响应动力学实验研究[J]. *河北建筑科技学院学报*, 2004, 21(1): 28-30, 34.
- DENG H J, TAO J H. The dynamical research on light response of phytoplankton growing [J]. *Journal of Hebei University of Architecture and Technology*, 2004, 21 (1): 28-30, 34.

Analysis of niche and interspecific associations of dominant phytoplankton species in key aquatic conservation zones of Jiujiang City, 2022–2023

DONG Jiayi¹, ZHANG Wei^{1,2}, LI Lekang³, QU Yeling¹, KONG Chiping³, ZHANG Bao³, WANG Liqing¹, XU Qun³

(1.Key Laboratory of Exploitation and Utilization of Aquatic Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2.Engineering Research Center of Environmental DNA Technology and Aquatic Ecological Health Assessment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3.Jiujiang Academy of Agricultural Sciences, Jiujiang 332000, Jiangxi, China)

Abstract: The Poyang Lake Basin serves as a critical ecological barrier in the middle and lower reaches of the Yangtze River. Investigating the response mechanisms of phytoplankton communities to the dual stressors of extreme climate events and anthropogenic activities is essential for regional ecological conservation. Our study focused on the dynamic characteristics of phytoplankton dominant species in key aquatic conservation zones of Jiujiang City during the extreme drought of 2022 and the subsequent hydrological recovery period in 2023. Through systematic surveys at 18 sampling sites across dry and wet seasons, we integrated niche breadth, niche overlap index (O_{ik}), variance ratio (VR) method, and interspecific association analyses (χ^2 test, association coefficient AC, and Spearman's rank correlation) to elucidate the mechanisms underlying phytoplankton community stability under hydrological fluctuations. Results showed that: (1) A total of 161 phytoplankton species from seven phyla were identified, with 13 dominant species from three phyla. Bacillariophyta (*Aulacoseira granulata* and *Ulnaria acus*) dominated both extreme drought and recovery phases. (2) During the 2022 extreme drought, niche overlap values significantly increased. Generalist species with broad niches formed stable symbiotic networks through complementary resource utilization, resulting in overall positive community associations (VR>1, 51.31% of species pairs positively linked). (3) The persistent dominance of *A. granulata* and *U. acus* was attributed to their morphological adaptability and niche differentiation, which alleviated competitive pressures from high-overlap species pairs (e.g., O_{ik} =0.93 with *Navicula* sp.). (4) Post-drought recovery reduced mean niche breadth (7.54) while increasing specialist species proportions, indicating hydrological stabilization drove succession toward functionally resilient community structures. Our study pioneers in exploring niche differentiation and interspecific synergy mechanisms of phytoplankton in mid-Yangtze waters under extreme drought, providing baseline data for ecological monitoring in Poyang Lake and the Yangtze Basin, as well as theoretical insights for freshwater ecosystem management under climate extremes.

Key words: phytoplankton; niche; interspecific association; drought stress; hydrological fluctuation; Poyang Lake