

## 赣江干流浮游植物群落结构分布与长期变化\*

钱奎梅<sup>1</sup>, 陈宇炜<sup>2\*\*</sup>, 罗淑葱<sup>2</sup>, 王舒娅<sup>1</sup>, 刘金福<sup>2</sup>, 谢欢庆<sup>2</sup>

(1 徐州工程学院 徐州 221018)

(2 江西水利电力大学 南昌 330099)

**摘要:** 浮游植物作为水生生态系统的初级生产者, 反映了水体的生态结构和功能状态。赣江作为长江主要支流及鄱阳湖流域最大河流, 受复杂水文与人类活动干扰叠加影响, 浮游植物对环境变化响应敏感。本研究基于 2019-2024 年赣江干流赣州至南昌段的水生态调查数据, 结合 1980 年以来的历史文献, 突破以往研究短期化、局部化的局限, 系统揭示浮游植物群落的时空分布规律及近 40 年长期演替特征。结果表明: 2019-2024 年赣江干流浮游植物的优势门类为硅藻门; 空间上呈现下游河湖交汇区生物量高于中游水库控制段的分布格局。冗余分析 (RDA) 表明, COD<sub>Mn</sub>、总磷、氨氮、总氮、水温、透明度、磷酸盐为影响群落分布的核心环境因子, 且河流流动性 (水动力梯度) 的调控作用不可忽视。长期演替方面, 1980 年代至 2024 年赣江干流浮游植物优势类群经历“硅藻 + 绿藻 → 蓝藻 + 硅藻 → 硅藻”的显著转变, 反映赣江干流生态系统对人类活动 (污染、水利工程) 与环境治理的响应过程。本研究通过短期连续观测与长期历史追溯的跨尺度数据整合, 精准识别了群落时空分布的核心驱动因子, 并首次揭示了近 40 年优势类群的演替规律与生态响应机制。研究结果既可为赣江流域水生态修复与长期管理提供数据支撑和科学依据, 也可为河流型生态系统对多重干扰的长期响应研究提供典型案例与方法参考。

**关键词:** 赣江干流; 浮游植物群落结构; 长期变化

## Distribution and long-term changes of phytoplankton community structure in the mainstream of Ganjiang River

Qian Kuimei<sup>1</sup>, Chen Yuwei<sup>2\*</sup>, Luo Liancong<sup>2</sup>, Wang Shuyua<sup>1</sup>, Liu Jinfu<sup>2</sup>, Xie Huanqing<sup>2</sup>

(1 Xuzhou University of Technology, Xuzhou 221018, P.R.China)

(2 Jiangxi University of Water Resources and Electric Power, Nanchang 330099, P.R.China)

**Abstract:** Phytoplankton, as primary producers in aquatic ecosystems, serve as key indicators of ecological structure and functional status in water bodies. The Ganjiang River, a major tributary of the Yangtze River and the largest river entering Poyang Lake, experiences combined influences of complex hydrological conditions and human activities, rendering its phytoplankton highly sensitive to environmental changes. Based on hydroecological surveys conducted along the mainstream of the Ganjiang River (from Ganzhou to Nanchang) between 2019 and 2024, together with historical literature dating back to the 1980s, this study reveals the spatiotemporal distribution patterns and long-term successional trends of phytoplankton communities over nearly 40 years. Results indicate that Bacillariophyta dominated the phytoplankton assemblage in the mainstream. Spatially, biomass was higher in downstream river-lake confluence zones than in the middle reaches influenced by reservoir regulation. Redundancy analysis identified COD<sub>Mn</sub>, total phosphorus, ammonia nitrogen, total nitrogen, water temperature, transparency, and phosphate as core environmental factors shaping phytoplankton community distribution, with river discharge (hydrodynamic gradient) playing a non-negligible regulatory role. Long-term shifts in dominant phytoplankton groups from the 1980s to 2024 followed a clear trajectory: "Bacillariophyta + Chlorophyta → Cyanobacteria + Bacillariophyta → Bacillariophyta", reflecting ecosystem responses to anthropogenic pressures (pollution, hydraulic engineering) and subsequent environmental governance. By integrating short-term continuous monitoring with long-term historical data, this study overcomes previous limitations of temporal and spatial constraints in Ganjiang River phytoplankton research, accurately identifies key drivers of community distribution, and reveals for the first time the successional pathway and ecological response mechanisms of dominant taxa over four decades. These findings provide scientific support for aquatic ecological restoration and long-term management of the Ganjiang River, while offering a methodological reference for studying long-term ecological responses of river systems under multiple stressors.

**Keywords:** The main stream of Ganjiang River; Phytoplankton community structure; Long-term change

\* 2025-08-05 收稿; 2026-01-23 收修改稿

江苏省徐州市推动科技创新专项资金项目 (KC22344) 资助

通信作者 E-mail: 976370923@qq.com

浮游植物是水生生态系统物质循环与能量流动的核心初级生产者，其物种组成、群落结构及丰度动态对水环境变化具有高度敏感性，是评估水体生态健康的关键指示生物<sup>[1]</sup>。赣江作为长江主要支流及鄱阳湖流域最大河流，其干流水生生态状况直接影响长江中下游生态安全，而浮游植物群落的结构与动态，更是反映流域生态系统变化的关键载体。近年来，赣江流域面临双重环境压力：一方面，氮、磷污染问题逐步显现<sup>[2-3]</sup>，改变了水体营养盐平衡；另一方面，为开发水资源修建的万安水电站、峡江水利枢纽等水利工程，虽然实现了防洪、发电、灌溉等综合效益，却也扰动了河流自然水文过程，改变径流节律与泥沙输移规律，对水生生物的栖息与繁殖环境造成显著影响。

现有针对赣江浮游植物的研究已取得一定进展：部分研究识别出硅藻门、绿藻门、蓝藻门为优势类群<sup>[4-7]</sup>，并证实营养盐与水动力条件对群落结构的调控作用<sup>[4,13]</sup>；也有研究聚焦局部河段的短期群落特征，初步揭示了不同区域的藻类分布差异<sup>[5,9]</sup>。但现有研究仍存在明显局限：其一，时间尺度偏短，多为 1-3 年的短期观测<sup>[4-7]</sup>，缺乏跨年度连续数据，难以捕捉浮游植物群落的年际演替规律；其二，空间覆盖不完整，多集中于中下游局部河段，尚未有覆盖赣江干流全段（赣州至南昌）的系统调查，无法反映全流域尺度的群落空间异质性；其三，关联分析不够深入，对不同季节、不同河段的浮游植物与环境因子耦合关系揭示不足，尤其缺乏对长期演替过程与流域尺度环境变化（如污染演变、水利工程长期影响）响应机制的探讨。基于此，本研究以赣江干流赣州至南昌段为研究区，整合 2019-2024 年连续 6 年的实地调查数据与 1980 年代以来的历史文献资料，通过分析浮游植物群落的时空分布特征、与环境因子的关联性及其长期演替规律，重点探讨赣江干流浮游植物群落的时空异质性特征及其关键驱动因子，并揭示近 40 年赣江干流浮游植物优势类群的演替路径。研究结果旨在为赣江流域水生态修复与长期管理提供科学依据，同时为理解河流型生态系统对多重干扰的响应机制提供典型案例。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究方案

赣江流域位于长江中下游南岸，是鄱阳湖最大入湖河流，年降水量 1500~1800mm，降水主要集中在 4-6 月的梅雨季节和 7-9 月的台风雨季<sup>[8]</sup>。根据赣江干流年内季节变化以及赣江流域的丰枯特点，于 2019-2024 年 1、4、7、10 月对赣江干流进行野外采样，共设置赣州至南昌段 13 个采样点（图 1），上游赣州段（GJ1-GJ3）为峡谷型河道，水流湍急（流速 0.2-6.8 m/s），底栖与着生生物稀少；中游吉安段（GJ4-GJ7）受万安、峡江水库调控，水位人工控制，流速减缓（0.1-0.5 m/s），水生植物与丝状藻类罕见；下游南昌段（GJ8-GJ13）为河湖交汇区，受鄱阳湖水位顶托影响，水位与流速季节波动大，其中 GJ11-GJ13 邻近居民区与航运密集区，营养盐输入风险较高（表 1）。

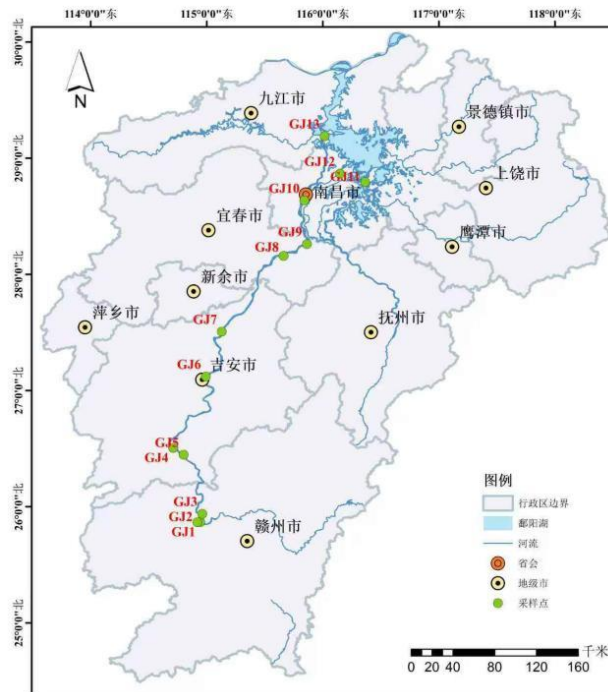


图 1 赣江干流采样点分布

Fig.1 The sampling areas in the mainstream of Ganjiang River

表1 采样点空间分布特点  
Tab. 1 Spatial distribution characteristics of sampling points

采样点	地理坐标	水深 (m)	流速 (m/s)	环境背景
GJ1 贡水	114.944°E, 25.867°N	1.5-4	0.2-3.2	赣江上游, 水流较急, 底栖和着生生物较少。
GJ2 章江	114.920°E, 25.866°N	1-4.5	0.1-0.5	赣江上游, 水流较缓。
GJ3 储潭	114.961°E, 25.938°N	1.2-6	0.3-6.8	赣江上游, 底栖和着生生物较少。
GJ4 万安水 库	114.712°E, 26.505°N	5-30	0.1-0.2	干流中游, 水位完全人工控制, 水生植物和丝状着生绿藻罕见。
GJ5 罗塘	114.801°E, 26.447°N	0.5-15	0.2-5.5	干流中游, 全年水位较高且变幅较小, 底栖和着生生物罕见。
GJ6 吉安	114.992°E, 27.120°N	0.5-5	0.1-4.2	干流中游, 水位变化全部由下游峡江枢纽人工控制。
GJ7 峡江水 库	115.130°E, 27.507°N	2-20	0.1-0.3	干流中游, 水位变化全部由峡江枢纽人工控制。
GJ8 拖船	115.662°E, 28.158°N	0.5-10	0.8-6.2	干流下游, 水位变幅较大, 流速全年较大, 丝状着生绿藻自 2020 年后显著增加。
GJ9 小港	115.863°E, 28.260°N	1-12	1.2-7.0	干流下游, 水位变幅较大, 流速全年较大, 水生植物和着生藻类极少。
GJ10 外洲	115.841°E, 28.635°N	3-15	0.8-5.5	干流下游, 流速在枯水期较快, 丰水期流速较缓, 水生植物和着生藻类罕见。
GJ11 赣江南 支	116.357°E, 28.805°N	0.5-12	0.5-4.6	河湖交汇区, 水位和流速变化受鄱阳湖大湖面影响, 全年差异较大。2020 年起春、夏、秋三季都能见蓝藻水华。
GJ12 赣江中 支	116.148°E, 28.866°N	0.5-8	0.4-3.6	河湖交汇区, 水生植物和丝状着生绿藻罕见。
GJ13 赣江主 支	116.016°E, 29.189°N	2-6	1.1-7.1	河湖交汇区, 水位和流速变化受鄱阳湖大湖面影响, 全年差异较大。

注: 表中水深、流速数据为 2019—2024 年历次实地监测获取的多年实测极值; 部分环境背景数据源于同期历次实地监测结果, 其余参考《赣江流域水资源公报(2019—2024)》及已有研究成果<sup>[48]</sup>。

浮游植物样品采集与处理严格参照《淡水浮游生物研究方法》<sup>[9]</sup>: 定性样品采用 25 号浮游生物网在水下 0.15m 处作“∞”字型拖拽 3~5 min, 收集后用 50 mL 容量瓶盛装并加入 5 mL 鲁哥试剂固定; 定量样品用 5L 有机玻璃采水器按 0.5m 水深分层等量采集, 混合后取 1L 水样加入 10 mL 鲁哥试剂固定, 实验室静置沉淀 48h 后浓缩至 30 mL。浮游植物种类鉴定依据《中国淡水藻类——系统分类及生态》<sup>[10]</sup>, 在 Olympus BX53 显微镜下(400 倍)进行种类识别与计数, 同步计算密度(cells/L)与生物量(mg/L): 密度按浓缩样品计数结果与稀释倍数推算, 生物量通过细胞体积换算(1mm<sup>3</sup> 细胞体积≈1 mg 鲜重)<sup>[9]</sup>。优势种判定采用公式  $Y=f_i \times P_i$  ( $f_i$  为物种出现频率,  $P_i$  为物种个体数占总个体数比例),  $Y \geq 0.02$  时定义为优势种<sup>[11]</sup>。

水环境因子与浮游植物样品同步采集, 总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、磷酸盐(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P)、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)参照《水和废水监测分析方法》(第 4 版)<sup>[12]</sup>测定, 采样的同时, pH、水温(WT)、溶解氧(DO)采用 YSI 6600 V2 多参数仪现场测定, 透明度(SD)用塞式透明度盘测定。

## 1.2 分析方法

本研究采用 ArcGIS 10.2 绘制采样点分布图, Origin 2024 绘制水环境因子分布图, Sigmaplot 12.0 绘制浮游植物密度和生物量分布图。以各采样点位和各采样时期为基本样本单位, 基于 2019—2024 年实测数据, 通过单因素方差分析(ANOVA)结合 Waller-Duncan 多重比较(显著性水平  $\alpha=0.05$ ), 分析水环境因子与浮游植物生物量及密度的时空差异; 采用除趋势对应分析(DCA)判断排序模型适用性(4 个排序轴梯度长度 < 3.0), 进而选取冗余分析

(RDA) 探究浮游植物群落与环境因子的关联性。

## 2 结果与分析

### 2.1 理化因子分析

赣江不同采样点 TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、TP、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P、COD<sub>Mn</sub>、DO 和 SD 的差异如图 2 所示。调查区域的 TN 平均浓度为 1.65±0.45 mg/L，变化范围为 0.69~3.85 mg/L，赣江 GJ1、GJ3、GJ13 三个采样点的 TN 平均浓度相对较高，分别为 2.02±0.51 mg/L、1.96±0.54 mg/L 和 1.83±0.48 mg/L。TP 平均浓度在 0.061±0.02 mg/L，变化范围为 0.022~0.144 mg/L，赣江 GJ3、GJ2、GJ10 三个采样点的 TP 平均浓度相对较高，分别为 0.072±0.029 mg/L、0.068±0.015 mg/L 和 0.066±0.018 mg/L。赣江 GJ4、GJ7、GJ8 三个采样点的 SD 相对较高，分别为 0.99±0.58 m、1.01±0.50 m 和 0.97±0.39 m。赣江 GJ11、GJ12、GJ13 三个采样点的 COD<sub>Mn</sub> 平均浓度相对较高，分别为 2.97±0.51 mg/L、2.65±0.67 mg/L 和 2.50±0.42 mg/L。

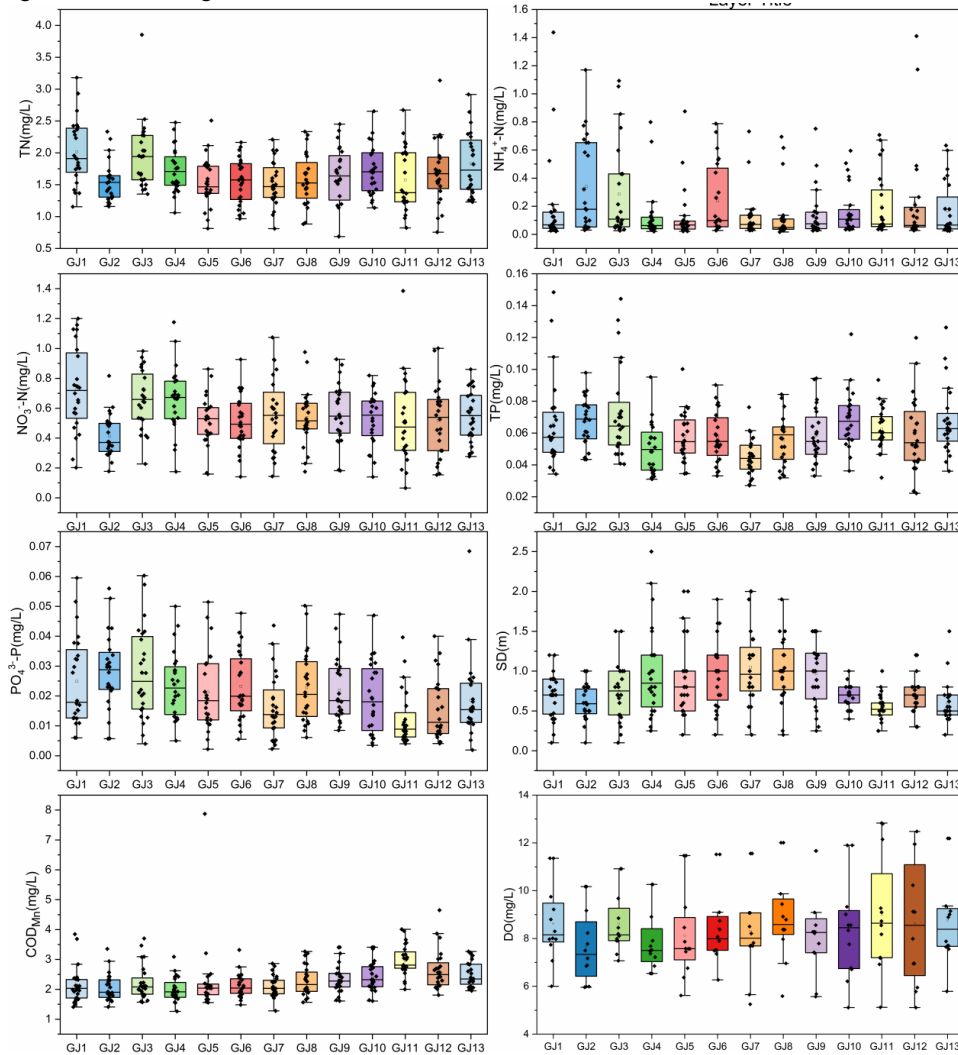


图 2 赣江干流不同采样点的水环境因子差异

Fig.2 Variations of water environmental factors in different sampling areas in the mainstream of Ganjiang River

赣江不同采样时期的水环境因子变化如图 3 所示。2021 年 4 月 TN 平均浓度最高，为 2.33±0.54 mg/L，其次为 2023 年 4 月和 2023 年 1 月，分别为 2.31±0.27 mg/L、2.26±0.35 mg/L。2019 年 4 月和 2020 年 4 月 TP 浓度相对较高，均为 0.220±0.168 mg/L。2020 年 1 月、2021 年 1 月和 2023 年 1 月的 DO 浓度相对较高，均为 11.52±0.74 mg/L。2023 年 4 月和 2024 年 4 月的 COD<sub>Mn</sub> 平均浓度相对较高，分别为 3.23±0.31 mg/L 和 3.12±1.47 mg/L。

## 2.2 浮游植物的时空分布特征

2019-2024年赣江干流共鉴定出浮游植物6门84种。其中,绿藻门40种,占总浮游植物种类的47.6%;硅藻门25种,占29.8%;蓝藻门10种,占11.9%;甲藻门4种,裸藻门2种,隐藻门2种。浮游植物密度与生物量的空间分布如图4所示。密度方面,GJ11采样点最高( $4.88\pm 4.93\times 10^6$  cells/L),其余采样点(如GJ1-GJ10、GJ12、GJ13)密度相对较低,均在 $2\times 10^6$  cells/L以下。GJ11的浮游植物平均总生物量最高,为 $2.83\pm 2.23$  mg/L。GJ5、GJ6和GJ7的浮游植物平均总生物量较低,分别为 $0.72\pm 0.66$  mg/L、 $0.72\pm 0.77$  mg/L和 $0.81\pm 0.46$  mg/L。从密度分布来看,各采样点蓝藻门的密度较大。从生物量分布来看,各采样点浮游植物优势门类均为硅藻门,其优势种为颗粒沟链藻(*Aulacoseira granulata*)、桥弯藻(*Cymbella* spp.)、脆杆藻(*Fragilaria* spp.)、双菱藻(*Surirella* spp.)。

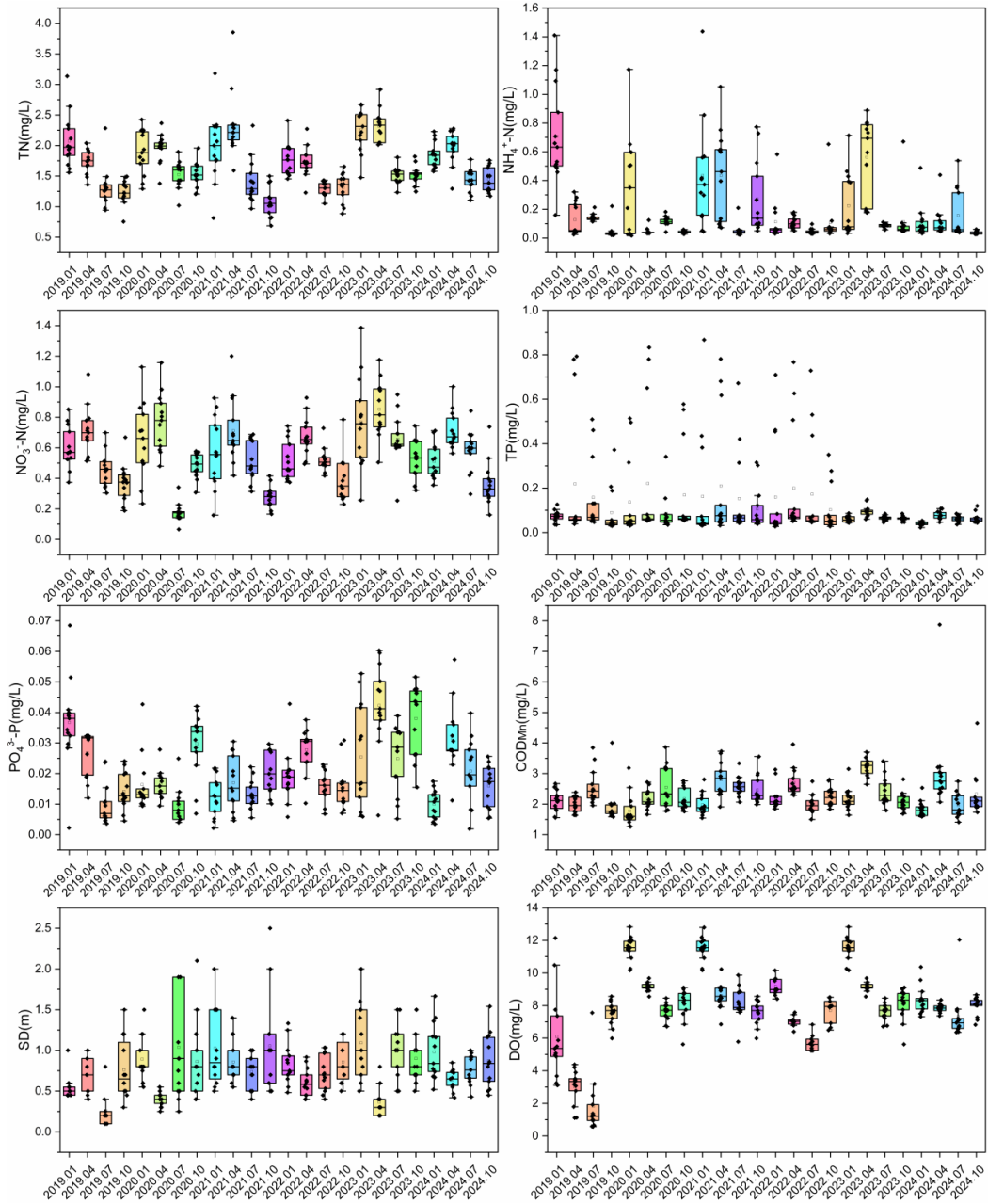


图3 赣江干流不同采样时期的水环境因子变化

Fig.3 Variations of water environmental factors in different sampling phases in the mainstream of Ganjiang River

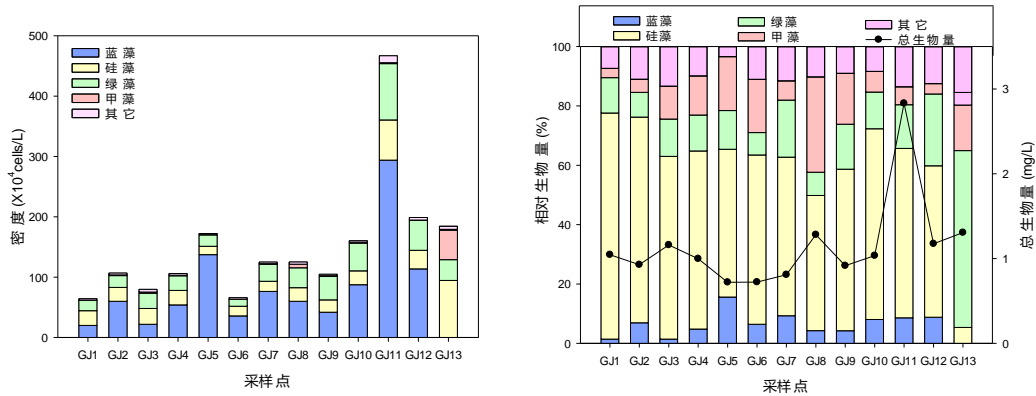


图 4 不同采样点赣江干流浮游植物的密度和生物量

Fig.4 Phytoplankton density and biomass in different sampling areas of the mainstream of Ganjiang River

不同采样时期赣江干流浮游植物的密度和生物量如图 5 所示。2020 年 7 月的浮游植物密度最高 ( $4.55 \pm 4.71 \times 10^6$  cells/L)，2020 年 1 月最低 ( $2.72 \pm 1.74 \times 10^5$  cells/L)，其次为 2023 年 1 月 ( $2.91 \pm 1.53 \times 10^5$  cells/L)。2020 年 7 月的浮游植物平均总生物量最高，为  $2.38 \pm 2.45$  mg/L，其次为 2019 年 1 月和 2021 年 4 月，分别为  $2.29 \pm 1.14$  mg/L 和  $2.03 \pm 1.95$  mg/L。2022 年 1 月的浮游植物平均总生物量最低，为  $0.40 \pm 0.27$  mg/L，其次为 2019 年 7 月，为  $0.66 \pm 0.60$  mg/L。从密度分布来看，赣江干流大部分采样时期浮游植物蓝藻门的密度相对较大，而生物量分布显示为硅藻门生物量占比较大。

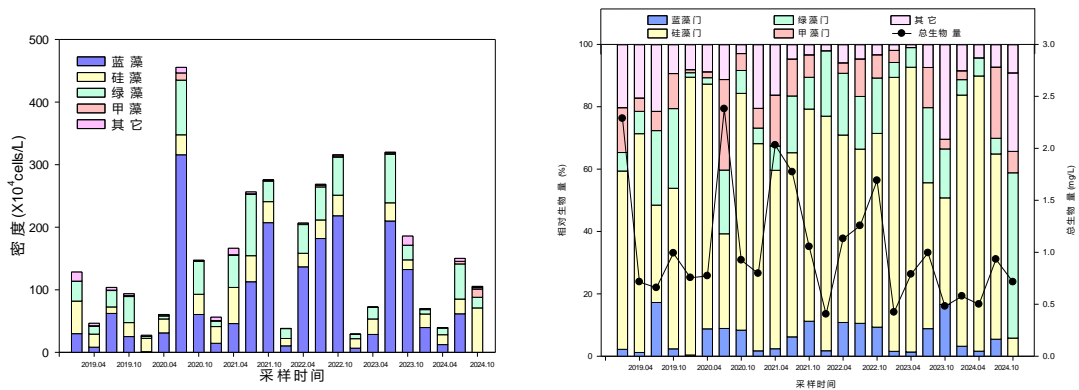


图 5 赣江干流浮游植物的密度和生物量

Fig.5 Phytoplankton density and biomass in the mainstream of Ganjiang River in different sampling phases

### 2.3 浮游植物群落分布与水环境因子之间的关系

本研究中浮游植物总生物量、硅藻门、甲藻门、绿藻门和蓝藻门生物量数据与环境因子数据的 RDA 分析结果如图 6 赣江干流浮游植物样品 (6a) 及浮游植物生物量 (6b) 与水环境因子的冗余分析 (6a 图中, A、B、C、D 分别代表 1 月、4 月、7 月和 10 月)

Fig.6 Redundancy analysis of phytoplankton and water environmental factors in the mainstream of Ganjiang River (In fig. 6a, A, B, C, and D represent January, April, July, and October, respectively)

a 所示，浮游植物前两个排序轴共解释了 86.73% 的浮游植物变量，A 组 (1 月) 的主要影响因子为 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ；B 组 (4 月) 的主要影响因子为 TP、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ；C 组 (7 月) 的主要影响因子为  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ ；D 组 (10 月) 的主要影响因子为 DO、WT。9 个环境因子与浮游植物生物量均存在显著相关关系 ( $P < 0.05$ )，解释率如错误!未找到引用源。。赣江干流浮游植物生物量与水环境因子的 RDA 分析如图 6b 所示，浮游植物在排序轴上的分布具有明显的规律，所有浮游植物都分布在第二排序轴右侧，浮游植物总生物量、甲藻门与  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、WT、SD 呈正相关，与  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  呈负相关 ( $P < 0.05$ )；蓝藻门、绿藻门与  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、WT、SD 呈正相关，与  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  呈负相关；硅藻门与  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 和  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  呈正相关 ( $P < 0.05$ )。

表 2 RDA 环境因子解释率  
Tab. 2 Explanation rate of RDA environmental factors

环境因子	TN	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	TP	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	COD <sub>Mn</sub>	DO	SD	WT
解释率 (R <sup>2</sup> )	0.169	0.265	0.172	0.059	0.107	0.090	0.051	0.057	0.244
P	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05

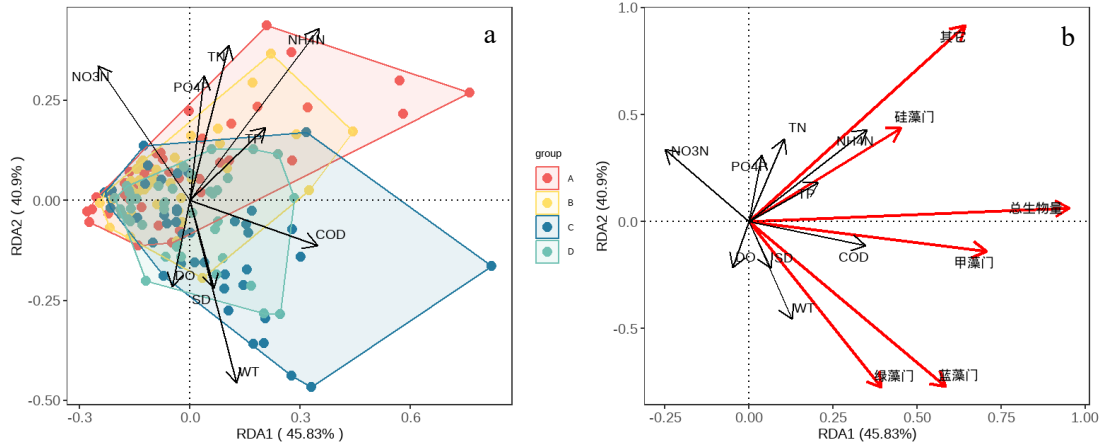


图 6 赣江干流浮游植物样品 (6a) 及浮游植物生物量 (6b) 与水环境因子的冗余分析 (6a 图中, A、B、C、D 分别代表 1 月、4 月、7 月和 10 月)

Fig.6 Redundancy analysis of phytoplankton and water environmental factors in the mainstream of Ganjiang River (In fig. 6a, A, B, C, and D represent January, April, July, and October, respectively)

### 3 讨论

#### 3.1 浮游植物群落分布特征

赣江干流浮游植物群落结构与生物量分布呈现显著时空异质性, 其分布格局与流域环境梯度及人类活动干扰密切相关。空间上, GJ11 (南支)、GJ12 和 GJ8 (拖船) 等采样点生物量较高, GJ5、GJ6 和 GJ7 等中游水库控制段生物量较低, 整体呈现下游高于中游的分布特征。GJ8、GJ11、GJ13 等生物量较高的采样点多位于居民区邻近区域和航运密集河段, 生活污水与航运排放可能增加氮磷营养盐输入<sup>[4]</sup>, 在一定程度上有利于浮游植物生长; 监测数据显示, 这些区域 TN 平均浓度为 1.83~2.02 mg/L、TP 平均浓度为 0.066~0.072 mg/L, 显著高于中游水库控制段 (TN 0.69~1.2 mg/L、TP 0.022~0.04 mg/L), 为这一推测提供了数据支撑。而万安水库、峡江水库等水利枢纽的水体自净作用可能降低了库区及周边河段的 TN、TP 浓度<sup>[4,13]</sup>, 在一定程度上不利于浮游植物繁殖, 这可能是 GJ5、GJ6、GJ7 生物量较低的原因之一。赣江氮营养盐浓度变化可能影响鄱阳湖氮营养盐水平, 研究表明北鄱阳湖 TN 浓度变化与赣江具有极强相关性<sup>[4]</sup>。对鄱阳湖主湖区的研究显示<sup>[15-16]</sup>, 浮游植物优势种包括微囊藻、长孢藻、卵形隐藻、颗粒沟链藻等, 与本研究赣江干流浮游植物优势类群存在一定相似性。这表明赣江径流输入可能是鄱阳湖主湖区浮游植物的重要来源之一, 同时鄱阳湖还接纳抚河、信江、修水、饶河等多条入湖河流的径流输入, 且湖内水体在适宜水温、光照条件下也可能发生浮游植物原位繁殖, 多重因素共同影响鄱阳湖浮游植物群落结构。

赣江干流浮游植物生物量呈现明显季节波动, 2020 年 7 月平均总生物量达到最高值 (2.38±2.45 mg/L), 其次为 2019 年 1 月 (2.29±1.14 mg/L) 和 2021 年 4 月 (2.03±1.95 mg/L), 2022 年 1 月生物量最低 (0.40±0.27 mg/L), 2019 年 7 月次之 (0.66±0.60 mg/L)。在群落组成方面, 硅藻门在各时期均占据优势地位, 相对生物量介于 30.38% 至 89.09% 之间, 这与何瑞等<sup>[17]</sup>的研究结果相吻合。尽管赣江径流量与降雨量均在 6 月达到峰值、1 月处于最低值<sup>[13]</sup>, 理论上夏季水文稀释作用可能降低浮游植物生物量, 但实际观测显示其季节分布规律与鄱阳湖湖区 2014-2016 年呈现的“冬春高、夏秋低”模式有所不同<sup>[8]</sup>, 这可能与赣江干流流速较快、浮游植物主要依靠外力输送的水文特征有关。2020 年 7 月浮游植物总生物量偏高具有特殊性, 该月虽为丰水期, 但赣江干流存在多处缓流区 (如 GJ2 章水橡胶坝库区), 流速仅 0.1-0.5 m/s, 水流滞留时间延长, 可能为硅藻 (如颗粒沟链藻) 提供了稳定生长环境, 使其形成局部聚集, 这一现象也反映了局部水动力条件对浮游植物空间分布和季节动态的潜在调控作用。

#### 3.2 浮游植物群落分布与环境因子的关系

冗余分析 (RDA) 结合赣江干流独特的水文格局与污染特征, 明确了浮游植物群落分布的核心驱动因子及季节分

异规律,其调控机制与赣江“峡谷-水库-河湖交汇”的纵向梯度及人类活动干扰特征高度耦合。1月(枯水期),TN与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 成为群落调控核心因子,这与赣江枯水期的水文特征密切相关。该时期水位降至全年最低,上游峡谷段水流减缓、中游水库水体滞留时间延长,沿岸城镇生活污水与农业面源污染排放缺乏径流稀释,可能导致直接被藻类利用的与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在河道中持续累积<sup>[2-3]</sup>。而赣江干流硅藻门(如颗粒沟链藻)对铵盐的高效吸收能力,使其在高氮环境中占据竞争优势<sup>[9]</sup>。4月(涨水期),TP与 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 成为主导因子,这一规律紧扣赣江流域的农业生产与水库调度节奏。此时春耕施肥导致农业面源污染加剧,地表径流携带大量磷素汇入干流;同时中游万安、峡江水库为汛期防洪腾库,水位小幅下降引发底泥磷释放<sup>[13]</sup>,双重来源导致水体生物有效磷浓度显著上升。而赣江中游水库控制段流速仅0.1-0.5 m/s,磷素滞留效应明显,为浮游植物繁殖提供关键营养支撑,推动群落生物量进入累积期。7月(丰水期), $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 成为关键调控因子,凸显赣江流域的面源污染与水文耦合效应。该时期流域降雨集中,上游峡谷段地表径流冲刷强烈,携带大量枯枝落叶、农业残体等有机物质进入干流<sup>[9]</sup>;而下游河湖交汇区(如GJ11)受鄱阳湖水位顶托,流速减缓至0.5-4.6 m/s,有机物质滞留时间延长,分解过程中不仅释放氮磷营养盐,还为藻类提供额外碳源。尤其GJ11等航运密集区,船舶排放进一步增加水体有机负荷,导致 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 浓度高达 $2.97 \pm 0.51 \text{ mg/L}$ ,显著促进蓝藻与硅藻的局部聚集。10月(退水期),DO与WT的协同作用显著,与赣江干流的水温变化及水体混合特征直接相关。此时流域降雨减少,水温从夏季的28-32℃逐步回落至18-22℃,水体垂向混合增强,溶解氧分布趋于均匀,而赣江干流硅藻门对低温、高氧环境的适应性<sup>[20]</sup>,使其在群落中持续占据优势,这与鄱阳湖湖区10月仍以蓝藻为优势类群的特征形成鲜明对比<sup>[15]</sup>,反映出河流强流动性对藻类群落的筛选作用。

RDA排序结果显示,赣江浮游植物不同门类与环境因子关联的核心是对赣江干流环境梯度的适应性。浮游植物总生物量、硅藻门与 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 等因子的正相关( $P < 0.05$ ),直接呼应了赣江下游河湖交汇区的污染特征——GJ11、GJ13等区域受生活污水、航运排放影响,氮磷营养盐与有机负荷偏高,为藻类繁殖提供了适宜条件<sup>[21]</sup>。蓝藻门、绿藻门与 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、WT、SD的正相关,揭示了其对赣江局部缓流区生境的偏好:GJ2章水橡胶坝库区、GJ11赣江南支等区域流速较缓(0.1-0.5 m/s),透明度相对较高(0.5-1.2 m),夏季水温升高时易形成蓝藻局部暴发,这与中游水库控制段因水体自净能力强、蓝藻难以增殖的特征形成空间分异<sup>[9]</sup>。硅藻门与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的正相关( $P < 0.05$ ),进一步印证其对赣江营养盐梯度的广泛适应性。赣江干流硅藻门优势种(如颗粒沟链藻)的硅质细胞壁使其能耐上游峡谷段的湍急水流(0.2-6.8 m/s)<sup>[19]</sup>,同时对营养盐的宽幅耐受范围,使其在中游水库低营养盐区(TN 0.69-1.2 mg/L、TP 0.022-0.04 mg/L)与下游高营养盐区(TN 1.8-3.85 mg/L、TP 0.06-0.144 mg/L)均能占据优势,这一特性是硅藻成为赣江干流长期优势类群的核心原因。

此外,河流流动性(水动力梯度)作为赣江特有的关键间接驱动因子,通过改变藻类滞留时间、营养盐迁移扩散效率,调控浮游植物的空间分布<sup>[22-23]</sup>。例如2025年4月采样期间发现,GJ7点位的峡江水库出现长孢藻水华,可能与上游营养盐输入后在库区静水环境中聚集有关。硅藻在多数时期成为优势类群(相对生物量46.39%-88.28%),其坚固的硅质细胞壁增强了在流动水体中的耐受性<sup>[19]</sup>,符合河流环境中硅藻占优的普遍规律。室内实验与自然研究均表明<sup>[24-25]</sup>,流速较高时硅藻占优,静止水体则利于绿藻和蓝藻,进一步说明水动力条件是驱动赣江浮游植物群落演替不可忽视的因素。

### 3.3 赣江干流浮游植物群落结构的长期变化特征

赣江作为重要的水域生态系统,其浮游植物群落结构的变化对水环境状况具有重要指示意义。回顾历史监测数据(表3),1982-1983年期间,赣江浮游植物以硅藻为优势类群<sup>[4]</sup>。硅藻通常被认为是清洁水体的指示类群,在该时期的优势地位,可能反映出当时赣江水质相对较好。随着时间推移,浮游植物组成逐渐发生变化。2009-2010年,优势类群演变为硅藻和绿藻<sup>[4]</sup>。绿藻在营养水平较高的水体中易于繁殖,其成为优势类群之一,可能指示水体营养盐含量有所上升<sup>[19]</sup>。至2011年,浮游植物优势类群进一步扩展为硅藻、绿藻和蓝藻<sup>[26]</sup>。蓝藻的出现通常与水体富营养化密切相关,其在适宜条件下可能大量增殖并引发水华。2016-2017年,蓝藻成为绝对优势类群<sup>[6]</sup>,有研究认为这种变化与水体富营养化程度加剧及蓝藻水华频发现象存在关联<sup>[57]</sup>。2019年,浮游植物优势类群再次转为硅藻和绿藻<sup>[7]</sup>,而本研究结果显示2019-2024年硅藻重新成为赣江干流浮游植物的优势类群。

上世纪80年代,赣江流域新建工厂较多,大量未经处理的工业废水直接排入江中,有研究指出当时水质为中污类型<sup>[4]</sup>。万安水库于1958年开工建设,1990年下闸蓄水,该水利工程在一定程度上改变了赣江的水文条件,如流速减缓,可能影响污染物的迁移与自净能力。2009年6月至2010年4月,赣江下游袁河段及干流下游呈超富营养化状态<sup>[27]</sup>,这可能与农业面源污染、城市生活污水和工业废水排放等多种因素有关。2010年12月至2011年7月,赣江中下游水质总体处于轻度至较重污染状态,除持续人为排放影响外,季节性降雨导致的地表径流也可能加剧污染物输入<sup>[3]</sup>。2016-2017年,赣江中下游水体处于富营养化及中重度污染状态<sup>[6]</sup>,蓝藻大量繁殖可能产生次生代谢产物,对水生生态系统构成威胁。2019年调查显示,赣江中下游水质理化指标为V类,多项生物多样性指数评价表明水体处于中度至重度污染水平<sup>[7]</sup>。

总体来看,赣江浮游植物群落结构在过去几十年间发生了动态演替,优势类群从早期以硅藻为主,逐渐演替为多种藻类共存,再到蓝藻占优,近年又呈现硅藻回归的趋势。这一过程可能受到工业污染、生活与农业排放、水利工程等人类活动的综合影响,同时水文与季节变化等自然因素也发挥一定作用。需要指出的是,浮游植物群落结构的变化

可作为水环境变化的参考指标，但水质评价仍需结合水体理化参数、污染物通量及生态系统整体响应等多方面证据进行综合判断。

表3 赣江干流浮游植物群落丰度和优势种/属的长期变化

Tab. 3 Changes in the abundance and dominant species/genera of phytoplankton communities in the main stream of the Ganjiang River

时间	丰度 (cells/L)	优势种/属	文献
1982-1983	$8.1-211.625 \times 10^3$	常见种: 颗粒沟链藻( <i>Aulacoseira granulata</i> )、中型脆杆藻( <i>Fragilaria intermedia</i> )、粗壮双菱藻( <i>Surirella robusta</i> )、二角盘星藻( <i>Pediastrum duplex</i> )、空球藻( <i>Eudorina elegans</i> )、纤细新月藻( <i>Closterium gracile</i> )、不定微囊藻( <i>Microcystis incerta</i> )、分枝锥囊藻( <i>Dinobryon divergens</i> )、角甲藻( <i>Ceratium hirundinella</i> )	[4]
2009-2010	$8.3858 \times 10^5$	舟形桥弯藻( <i>Cymbella naviculiformis</i> )、梅尼小环藻( <i>Cyclotella meneghiniana</i> )、卵形隐藻( <i>Cryptomonas ovata</i> )、尖尾蓝隐藻( <i>Chroomonas caudata</i> )、四尾栅藻( <i>Scenedesmus quadricauda</i> )、小球藻( <i>Chlorella</i> spp.)	[5]
2010.12 和 2011.07	$1.87-10.12 \times 10^5$	衣藻( <i>Chlamydomonas</i> spp.)、团藻( <i>Volvox</i> spp.)、栅藻( <i>Scenedesmus</i> spp.)、小球藻( <i>Chlorella</i> spp.)、小环藻( <i>Cyclotella</i> spp.)、桥弯藻( <i>Cymbella</i> spp.)、双菱藻( <i>Surirella</i> spp.)、沟链藻( <i>Aulacoseira</i> spp.)、针杆藻( <i>Synedra</i> spp.)、舟形藻( <i>Navicula</i> spp.)	[36]
2016-2017	$8.23-90.6 \times 10^5$	小席藻( <i>Phormidium tenue</i> )、颗粒沟链藻( <i>Aulacoseira granulata</i> )、卵形隐藻( <i>Cryptomonas ovata</i> )、尖尾蓝隐藻( <i>Chroomonas acuta</i> )、微小平裂藻( <i>Merismopedia tenuissima</i> )、四尾栅藻( <i>Scenedesmus quadricauda</i> )、水华束丝藻( <i>Aphanizomenon flos-aquae</i> )	[6]
2019	$4.65-12.8 \times 10^5$	浮游蓝丝藻( <i>Planktothrix</i> spp.)、卷曲长孢藻( <i>Dolichospermum convolutus</i> )、微囊藻( <i>Microcystis</i> spp.)、卵形隐藻( <i>Cryptomonas ovata</i> )、颗粒沟链藻( <i>Aulacoseira granulata</i> )、小环藻( <i>Cyclotella</i> spp.)、针杆藻( <i>Synedra</i> spp.)、空球藻( <i>Eudorina</i> spp.)和小球藻( <i>Chlorella</i> spp.)	[7]

### 3.4 赣江与其他入湖支流浮游植物群落结构的异同点

鄱阳湖主要入湖河流浮游植物群落具有明显的流域一致性特征，其群落结构均受到营养盐条件的影响。赣江、抚河、信江、修水的优势种群均为硅藻门<sup>[28-34]</sup>，绿藻门和蓝藻门为次优势类群，这一特征与本研究中赣江流域浮游植物群落结构一致。其中，硅藻门的颗粒沟链藻(*Aulacoseira granulata*)、针杆藻(*Synedra* sp.)、小环藻(*Cyclotella* sp.)，绿藻门的栅藻(*Scenedesmus* sp.)、小球藻(*Chlorella* sp.)为跨支流常见种<sup>[28-34]</sup>，反映流域尺度上藻类对水温、营养盐等基础环境条件的适应性。抚河流域从2008年的56种<sup>[28]</sup>增至2020-2022年的304种<sup>[31]</sup>，优势种从2008年的多污带种类(铜绿微囊藻、绿色裸藻)逐步转变为硅藻-绿藻混合优势(颗粒沟链藻、四尾栅藻、小环藻)<sup>[28,31]</sup>，反映水质从重度污染向中营养状态的改善。信江流域2010-2011年种类数达85种<sup>[32]</sup>，2019-2022年降至65属<sup>[33]</sup>，优势种均为硅藻-绿藻-蓝藻，仅蓝藻门优势种从螺旋藻、颤藻替换为微囊藻、浮游蓝丝藻，显示水质维持轻度至中度污染的稳定状态<sup>[33]</sup>。修水流域2019-2022年的优势种群为蓝藻(长孢藻)和硅藻(颗粒沟链藻)<sup>[34]</sup>，与信江群落结构更接近<sup>[32-33]</sup>。四条支流浮游植物总生物量均与TP、TN呈显著正相关( $P < 0.05$ )，例如抚河2020-2022年优势种中的束丝藻、小环藻，信江2019-2022年的微囊藻、长孢藻，均为典型的富营养化指示种，印证营养盐对群落结构的调控作用<sup>[34]</sup>。

## 4 结论

1) 2019-2024年赣江干流赣州至南昌段的连续监测共鉴定出浮游植物6门84种，群落结构呈现显著时空异质性。空间上，下游河湖交汇区浮游植物平均总生物量最高，中游水库控制段最低，这可能与下游居民区及航运密集区的营养盐输入增加、中游水库水体自净作用增强有关；季节上，2020年7月生物量最高，2022年1月最低，硅藻门凭借耐冲刷性和广泛的营养盐适应性，在各时空尺度下均为绝对优势门类。

2) 赣江干流浮游植物群落分布受人类活动影响显著，COD<sub>Mn</sub>、总磷、氨氮、总氮、水温、透明度、磷酸盐是影响其群落分布的核心环境因子，同时河流流动性对浮游植物的分布和群落结构具有不可忽视的调控作用。

3) 从长期演变来看(20世纪80年代至2024年)，赣江浮游植物优势类群经历了清晰的演替过程，从最初的硅藻和绿藻，演变为蓝藻和硅藻，最终回归硅藻占绝对优势的状态。

4) 综合来看，赣江干流在多水库调控改变水文节律、河湖交互影响水质条件的双重作用下，硅藻凭借较强的耐冲刷性和对营养盐的广泛适应性，长期占据优势地位，而蓝藻因河流流动性较强、水库自净作用等因素，仅在局部缓流区或营养盐输入集中时段短期暴发，受限明显。本研究首次系统整合1980年以来的文献数据与2019-2024年实测数据，明确了赣江干流浮游植物群落结构的长期演替规律及其与环境因子的耦合关系，填补了该流域浮游植物长期动态研究的空白，为理解河流型生态系统对多重干扰的响应机制提供了典型案例，具有重要的学术参考价值。

5) 基于研究结果，对赣江流域水生态管理和藻华预警提出以下建议：一是强化河湖交汇区、居民区邻近河段及航运密集区的氮磷营养盐精准管控，减少生活污水与航运污染输入，切断藻类暴发的物质基础；二是优化万安水库、峡江水利枢纽等工程的调度方案，维持适宜河流流动性，利用水流冲刷抑制蓝藻聚集。

## 5 参考文献

- [1] Reynolds CS. The Ecology of Freshwater Phytoplankton [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1984.
- [2] Wang ML, Zhou WB, Hu CH. The distribution characteristics of various forms of nitrogen and phosphorus in the Ganjiang catchment during dry seasons. *Earth and environment*, 2007, 35(2):166-170. [王毛兰,周文斌,胡春华.枯水期赣江流域氮磷的分布特征.地球与环境, 2007, 35(2):166-170.]
- [3] Liu XZ, Yang ZY, Cao BW, et al. Distribution characteristics of nitrogen and phosphorus nutrients in main rivers of Ganjiang River during wet and dry seasons. *Environmental Monitoring in China*, 2023, 39(2): 21-32. [刘小真,杨子依,曹炳伟等.赣江主要河流丰水期枯水期氮磷营养盐分布特征.中国环境监测, 2023, 39(2):21-32.]
- [4] Hu MQ, Lin XZ. Phytoplankton in the Ganjiang River before the closure of Wan'an Dam. *Freshwater Fisheries*, 1988, 3:39-43. [胡美琴, 林锡芝.万安大坝截流前赣江的浮游植物.淡水渔业, 1988, 3:39-43.]
- [5] Ji Y, Zhang J, Fan HB, et al. Space-time distribution characteristics of floating algae and water quality assessment in the middle and lower reaches of the Ganjiang River. *China Rural Water and Hydropower*, 2012(5):28-31. [计勇,张吉,樊后保等.赣江中下游浮游藻类群落结构与水质评价.中国农村水利水电, 2012, 5:28-31.]
- [6] Yang W, Liu Q, Zhang TT, et al. Phytoplankton community structure and biological evaluation of water quality in the middle and lower Ganjiang River. *Journal of Hydroecology*, 2020, 41 (2):68-76. [杨威,刘琪,张婷婷等.赣江中下游浮游植物群落结构及其水质生物学评价.水生态学杂志, 2020, 41(2):68-76.]
- [7] Wang JJ, Xia Y, Yu XP, et al. Temporal and spatial distribution characteristics and water quality evaluation of planktonic algae in the middle and lower reaches of Ganjiang River. *Ecology and Environment Sciences*, 2023, 39 (8): 1031-1041. [王俊娟,夏雨,于新平,等.赣江中下游浮游藻类时空分布特征及水质评价.生态与农村环境学报, 2023, 39 (8): 1031-1041.]
- [8] Liu GH, Qi SH, Zhu JX, et al. Quantitative estimation of runoff changes in Ganjiang River, Lake Poyang Basin under climate change and anthropogenic impacts. *Journal of Lake Sciences*, 2016, 28(003):682-690. [刘贵花,齐述华,朱婧喧等.气候变化和人类活动对鄱阳湖流域赣江径流影响的定量分析.湖泊科学, 2016, 28(3):682-690.]
- [9] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991.
- [10] 胡琳, 魏心. 中国淡水藻类——系统分类及生态. 科学出版社, 2006.
- [11] Ma Yu, Lu Xinxin, Fan Yawen. Correlation between phytoplankton community patterns and environmental factors in Harbin section of the Songhua River. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(1):224-234. [马煜, 陆欣鑫, 范亚文. 松花江哈尔滨段浮游植物群落格局及其与环境因子的相关性. 生态学报, 2021, 41(1): 224-234.]
- [12] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法第4版. 中国环境科学出版社, 2002.
- [13] Lu L, Xie FL. Research on the factors of Ganjiang River water nitrogen and phosphorus distribution characteristics and influence. *Journal of Nanchang University(Natural Science)*, 2017, 41 (6): 567-571. [卢龙, 谢芳立. 赣江水体氮磷营养盐分布特征及影响因素. 南昌大学学报(理科版), 2017, 41(6):567-571.]
- [14] 欧阳小军, 盛文涛. 赣江对鄱阳湖氮浓度影响及相关性分析. *当代化工研究*, 2021, 22:49-53.
- [15] 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. *南昌工程学院学报*, 2024, 43(1):42-50, 64.
- [16] Wu Y, Yang W, Liu J, et al. Eutrophication drives resource use efficiency variations in freshwater plankton communities across river - lake continuum in China's Poyang Lake Basin. *Hydrobiologia*, 2025: 1-17.
- [17] He R, Gao BY, Jin Z, et al. Exploring indication function of phytoplankton on water quality in Ganjiang River through the analysis of environmental DNA and ecological network. *Research of Environmental Sciences*, 2025, 38(7):1430-1439. [何瑞, 高保燕, 金宗安等. 利用环境 DNA 与生态网络分析探索赣江浮游植物对水质的指示作用. 环境科学研究, 2025, 38(7):1430-1439.]
- [18] Qian KM, Liu X, Chen YW. Effects of water level fluctuation on phytoplankton succession in Poyang Lake, China-A five year study. *Ecology & Hydrobiology*, 2016, 16(3): 175-184.
- [19] Padisák J, Crossetti L O, 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.
- [20] Wang Z, Jiang SY, Zhang Q, et al. Investigation on spatial and temporal variabilities and changes of hydrological regimes in Ganjiang River Basin. *Yangtze River*, 2024, 55(3):105-116. [王真, 姜三元, 张奇等. 赣江流域水文情势时空差异性及其变化分析. 人民长江, 2024, 55(3):105-116.]
- [21] Reynolds CS, Huszar V, Kruk C, et al. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 2002, 24: 417-428.
- [22] Jiang Y, Zhang J, Lu S. Plankton transport dynamics of Poyang Lake in relation to spatial and environmental regulators during wet season. *Journal of Environmental Sciences*, 2025 (In Press).
- [23] Li WX, Jiang ML, Xu LG, et al. Spatial and temporal characteristics of phytoplankton in Lake Poyang and its response to extreme flood and drying events. *Journal of Lake Sciences*, 2024, 36(4):1001-1013. [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. 湖泊科学, 2024, 36(4):1001-1013.]
- [24] 王利利. 水动力条件下藻类生长相关影响因素研究[学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2006: 98-112.
- [25] Fang L, Mi W, Li Y, et al. Water level fluctuations shape phytoplankton community in the Xiangxi Bay from Three Gorges Reservoir. *Journal of Environmental Sciences*, 2025, 157: 111-122.
- [26] Liu ZG, Zhang Z, Zhang M, et al. Classification of functional groups and community structure of phytoplankton in the Ganjiang River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(3): 375-384. [刘足根, 张柱, 张萌等. 赣江流域浮游植物群落结构与功能类群划分. 长江流域资源与环境, 2012, 21(3):375-384.]
- [27] Zhang M, Deng DG, Huang D, et al. Functional group diversity of planktonic diatoms and the driving pattern of water-period guild succession in Ganjiang River Basin. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(5):680-691. [张萌, 邓道贵, 黄丹等. 赣江流域浮游硅藻功能群多样性及其水期演替的驱动特征. 环境科学研究, 2016, 29(5):680-691.]
- [28] 黄德娟, 杨薇, 罗明标等. 抚河文昌桥段水生生态环境现状评价. *安徽农业科学*, 2008, 36(26): 11510-11511, 11516.
- [29] 黄德娟, 黄德超, 徐卫东等. 抚河源头水生生态环境评价. *安徽农业科学*, 2010, 38(4):1999-2000, 2087.
- [30] Hu F, Liu JT, Wen CY, et al. Phytoplankton community structure and evaluation of aquatic ecological conditions in Fu River Basin. *Ecology and Environment Sciences*, 2023, 32(4): 744-755. [胡芳, 刘聚涛, 温春云等. 抚河流域浮游植物群落结构特征及其水生态状况评价. 生态环境学报, 2023, 32(4): 744-755.]
- [31] 杨秋菊. 抚河浮游生物群落与鱼类早期资源的初步研究[学位论文]. 南昌大学, 2023.
- [32] 张吉, 吴义泉, 夏美龙等. 信江干流浮游藻类分布特征及水质评价. *湖北农业科学*, 2016, 55(9):2230-2232.
- [33] Zou HY. Characteristics and influencing factors of phytoplankton community structure in the middle and lower reaches of Xinjiang River. *Nanchang Institute of Technology*, 2024 [邹浩月. 信江中下游浮游植物群落结构特征及其影响因素[学位论文]. 南昌工程学院, 2024.]
- [34] 邓枫. 修水主支浮游植物时空格局与环境因子关系的研究[学位论文]. 南昌工程学院, 2024.