

引用格式:

徐大建, 张建国, 王佩, 秦溱, 熊钢, 王晓清. 湘江浮游植物的生态特征及其与环境因子的相关性[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2022, 48(5): 594–600.

XU D J, ZHANG J G, WANG P, QIN Q, XIONG G, WANG X Q. The phytoplankton ecological characteristics and its relationship with environmental factors in Xiangjiang River[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2022, 48(5): 594–600.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



## 湘江浮游植物的生态特征及其与环境因子的相关性

徐大建<sup>1,2</sup>, 张建国<sup>3</sup>, 王佩<sup>1</sup>, 秦溱<sup>1</sup>, 熊钢<sup>3</sup>, 王晓清<sup>1\*</sup>

(1.湖南农业大学动物科学技术学院, 湖南 长沙 410128; 2.长沙市农业综合行政执法局, 湖南 长沙 410013;  
3.湖南生物机电职业技术学院动物科技学院, 湖南 长沙 410127)

**摘要:** 2020年4月至2021年1月按4个季节, 在永州、衡阳、株洲、湘潭、长沙、岳阳共设6个采样站, 35个采样点, 对湘江浮游植物的种类组成、优势种群、密度分布与群落结构进行调查, 分析浮游植物种类数、生物指数及其与环境因子的相关性。结果表明: 调查期间, 在湘江共鉴定出浮游植物8门133属259种, 其中绿藻(92种)和硅藻(71种)种类较多, 分别占总种类数的35.52%、27.41%, 密度分别为 $1.00 \times 10^4$ 、 $6.20 \times 10^3$  ind/L, 分别占总密度的47.39%和29.38%, 呈绿藻-硅藻型水体; 浮游植物种类整体呈现冬、春、夏、秋季逐渐增加的趋势, 春、冬季主要为硅藻型水体, 夏、秋季则变为绿藻型水体; 湘江四季浮游植物密度为 $6.20 \times 10^3 \sim 9.29 \times 10^4$  ind/L, 四季平均密度为 $2.11 \times 10^4$  ind/L, 其中以秋季密度最大, 春季最小, 除衡阳站夏季浮游植物密度最大外, 其余各站均以秋季的最大; 四季共出现13种浮游植物优势种, 全年浮游植物的优势种主要为绿藻门的普通小球藻; 浮游植物 $\alpha$ 多样性指数( $H$ )、丰富度指数( $D$ )、均匀度指数( $J$ )年平均值分别为3.20~4.80、1.13~4.79、0.73~0.81, 冬、春、夏、秋季的 $H$ 和 $D$ 均依次升高,  $J$ 的季节差异不明显, 而 $D$ 的季节变化较大, 6个采样站中, 株洲站的 $H$ 、 $D$ 、 $J$ 年平均值均为最低, 永州站的 $H$ 值最高, 衡阳的 $D$ 值最高, 永州站的 $D$ 值次之, 永州及湘潭站的 $J$ 值最高, 可见, 湘江水质较好, 属于轻污染或无污染, 且上游水质优于下游; 相关性分析发现, 浮游植物群落分布与溶解氧、pH、营养盐等环境因子存在一定的相关性。

**关键词:** 浮游植物; 群落结构; 生物指数; 优势种; 环境因子; 相关性; 湘江

中图分类号: S932.7

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2022)05-0594-07

## The phytoplankton ecological characteristics and its relationship with environmental factors in Xiangjiang River

XU Dajian<sup>1,2</sup>, ZHANG Jianguo<sup>3</sup>, WANG Pei<sup>1</sup>, QIN Qin<sup>1</sup>, XIONG Gang<sup>3</sup>, WANG Xiaoping<sup>1\*</sup>

(1.College of Animal Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China;  
2.Bureau of Agricultural Comprehensive Administrative Law Enforcement of Changsha City, Changsha, Hunan 410013, China;  
3.College of Animal Science and Technology, Hunan Biological and Electromechanical Polytechnic, Changsha, Hunan 410127, China)

**Abstract:** By setting a total of 6 sampling stations, Yongzhou, Hengyang, Zhuzhou, Xiangtan, Changsha, Yueyang, and 35 sampling points, we investigated the species composition, dominant population, density distribution and community structure of phytoplankton in Xiangjiang River of Hunan Province, and analyzed the phytoplankton species, biological

收稿日期: 2022-06-13

修回日期: 2022-10-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(31100282)

作者简介: 徐大建(1969—), 男, 湖南望城人, 博士研究生, 主要从事水生生物学研究, 657434990@qq.com; \*通信作者, 王晓清, 博士, 教授, 主要从事水产动物育种与水生生物学研究, wangxiao8258@126.com

index and their correlation with environmental factors during April 2020 to January 2021. The results showed that 259 species of 133 genera were identified in the studied area including 92 species of Chlorophyta and 71 species of Bacillariophyta, accounting for 35.52% and 27.41% of the total species, respectively. The phytoplankton density of Chlorophyta and Bacillariophyta reached  $1.00 \times 10^4$  ind/L and  $6.20 \times 10^3$  ind/L, accounting for 47.39% and 29.38%. The Xiangjiang River was Chlorophyta-Bacillariophyta type of water body. The overall phytoplankton species increased gradually over winter, spring, summer and autumn. In spring and winter, it was mainly Bacillariophyta water, and in summer and autumn, it was mainly Chlorophyta water. Densities of phytoplankton were ranged from  $6.2 \times 10^3$  ind/L to  $1.00 \times 10^4$  ind/L, average density of  $2.11 \times 10^4$  ind/L in four seasons. The most maximum density was in autumn, and the most minimum density was in spring. Except for the maximum density of Hengyang station in summer, autumn was the season for getting maximum density in other sampling stations. A total of 13 dominant phytoplankton species appeared in the four seasons, and the dominant species of phytoplankton was mainly *Chlorella vulgaris*. The annual average values of phytoplankton  $\alpha$ -diversity index( $H$ ), richness index( $D$ ), and evenness index( $J$ ) were 3.20-4.80, 1.13-4.79, 0.73-0.81, respectively.  $H$  and  $D$  increased successively in Winter, Spring, Summer and Autumn, and the seasonal difference in  $J$  was not obvious, but the quarterly change of  $D$  was large. Among the 6 sampling stations, the  $H$ ,  $D$ ,  $J$  annual average of Zhuzhou station were the lowest; Yongzhou station had the highest  $H$ ; Hengyang station had the highest  $D$  value, Yongzhou station was the second; Yongzhou station and Xiangtan station had the highest  $J$ . It could be seen that the Xiangjiang River water was in a good quality with slight pollution, and the upstream water quality was better than that of the downstream. Correlation analysis found that the phytoplankton community distribution was somewhat correlated with environmental factors such as dissolved oxygen, pH and nutrient salt.

**Keywords:** phytoplankton; community structure; biotic index; dominant species; environmental factor; relativity; Xiangjiang River

浮游植物作为水体的第一生产力,在水生态系统中发挥着不可替代的作用,其种类组成、密度分布、群落结构的时空变动与环境因子密切相关,通常是作为衡量水生态系统的重要指标<sup>[1-4]</sup>。湘江是长江中游南岸的重要支流,源出于广西临桂区海洋坪的龙门界,向北流入湖南省,经 17 县、市,是洞庭湖区的最大支流,干流全长 856 km,流域面积约 9.46 万  $\text{km}^2$ <sup>[5]</sup>。湘江是湖南人民生活及工业用水的直接来源,也是湖南的重要渔业区域。随着湘江流域人口压力的加重,工业化及经济的快速发展,流域生态环境不断遭到破坏,导致一些稀有物种相继消失<sup>[6-7]</sup>。有关湘江流域水生生物<sup>[8-11]</sup>、部分区段的水质监测及评价<sup>[12-15]</sup>、天然渔业资源调查<sup>[16]</sup>等研究已有报道,而关于湘江干流浮游植物及水质状况的调查研究仍少见。本研究旨在了解湘江浮游植物的生态特征及其随环境因子的变化规律,以期评价湘江水质污染、保护湘江生态环境及渔业资源提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样时间及采样点设置

于 2020 年 4 月(春)、7 月(夏)、11 月(秋)、2021 年 1 月(冬)进行 4 次季节性采样。根据湘江流域特

点及两岸城镇发展情况,设永州站(东安、零陵、祁阳),衡阳站(常宁水口山矿务区湘江的上游、中游、下游 1 km 和 2 km、蒸水口湘江上游、耒水与蒸水湘江中间段、耒水湘江下游、衡南、洙水湘江上游、洙水湘江下游),株洲站(渌口、渌水湘江上游和下游、霞湾湘江上游、霞湾排污口、霞湾排污口湘江下游 2.5 km 和 5 km),湘潭站(涓水湘江上游、涓水河口、涟水口、湘潭城区、出湘潭城区第 1 个点和第 2 个点),长沙站(坪塘、柏家洲、捞刀河、三汉矶),岳阳站(湘阴、汨罗、岳阳、濠河口、城陵矶)共 6 个采样站,35 个采样点。

### 1.2 样品采集与鉴定

分别按 SC/T 9102—2007《渔业生态环境监测规范第 3 部分:淡水》<sup>[17]</sup>和 DB43/T 432—2009《淡水生物调查技术规范》<sup>[18]</sup>的方法采集水质样本和浮游植物样品。参照文献<sup>[19-21]</sup>,在显微镜(Nikon E100)下对所采集的浮游植物样品进行分类鉴定和计数,计算浮游植物密度、优势度( $Y$ )、 $\alpha$ 多样性指数( $H$ )、丰富度指数( $D$ )和均匀度指数( $J$ ),并根据这些指数评价水质状况。参照文献<sup>[15,17]</sup>的方法,测定水质样品的水体透明度、温度、pH、溶解氧、叶绿素 a、总氮、总磷和亚硝酸盐含量。

### 1.3 数据处理

采用Excel和SPSS19.0对调查数据进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 浮游植物的种类组成及时空变动

调查期间,共鉴定出浮游植物8门133属259种。其中,绿藻门最多,有57属92种,占总种类数的35.52%;其次为硅藻门,有32属71种,占27.41%;裸藻门有6属39种,占15.06%;蓝藻门有14属26种,占10.04%;金藻门有8属8种,占3.09%;甲藻门有6属9种,占3.47%;隐藻门有5属6种,占2.32%;黄藻门有5属8种,占3.09%。绿藻和硅藻共有163种,占总种类数的62.93%,呈绿藻-硅藻型水体。

从表1可知,湘江浮游植物的种类组成四季变

化明显,冬季种类为全年最少;进入春季,水温升高,降水量增加,加之流域周边的农田开始耕作,大量营养盐类随雨水注入江内,致使浮游植物种类数增加;至夏季、秋季,种类数继续增加。浮游植物种类整体呈现冬、春、夏、秋季逐渐增加的趋势。绿藻门和硅藻门在各个季节种类组成中占绝对优势,其中春季和冬季硅藻门种类分别占43.66%和50.00%,夏季和秋季绿藻门种类分别占36.91%和38.27%。可见湘江春季、冬季主要为硅藻型水体,而进入夏季、秋季则变为绿藻型水体。从图1可知,春季,湘江浮游植物种类数自上游至下游逐渐上升;夏、秋季,湘江浮游植物种类数自上游至下游上下波动,衡阳站的最高;冬季,湘江浮游植物种类数自上游至下游先逐渐下降,到株洲站时最低,随后又小幅上升。

表1 不同季节湘江浮游植物的种类组成

Table 1 Composition of phytoplankton species of the Xiangjiang River in different seasons

季节	绿藻门	硅藻门	裸藻门	蓝藻门	黄藻门	金藻门	甲藻门	隐藻门	合计
春季	19	31	4	6	4	1	5	1	71
夏季	55	48	11	21	5	3	5	1	149
秋季	75	53	27	13	8	8	7	5	196
冬季	5	17	4	4	0	1	2	1	34

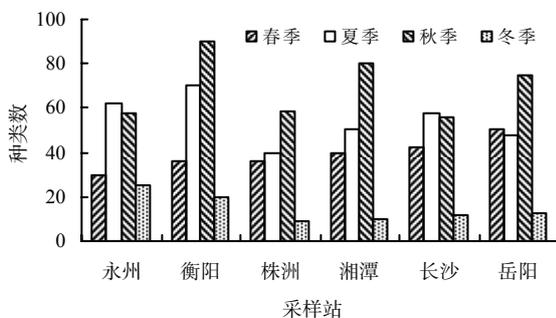


图1 不同季节和江段湘江浮游植物的种类数

Fig.1 Numbers of species of phytoplankton in different seasons at each station in Xiangjiang River

### 2.2 浮游植物密度分布的时空变动及优势种类

经调查发现,湘江四季浮游植物的密度为 $6.20 \times 10^3 \sim 9.29 \times 10^4$  ind/L,四季平均密度 $2.11 \times 10^4$  ind/L。其中,以秋季的最大,达 $3.89 \times 10^4$  ind/L,春季的最小,仅 $1.08 \times 10^4$  ind/L。从表2可知,除衡阳站夏季浮游植物密度最大外,其余各站均以秋季最大;夏季峰值出现在衡阳站,衡山大源渡坝下游出现最高峰,达 $9.29 \times 10^4$  ind/L,这可能由于大坝下游长期囤水积累了大量的营养盐所致;冬季在长沙站

出现高峰,为 $3.72 \times 10^4$  ind/L。春季,永州站到株洲站浮游植物密度逐渐降低,随后沿水流方向呈递增的趋势;夏季,株洲站到长沙站呈递增的趋势,随后到岳阳站又大幅减小;秋季,从衡阳站到湘潭站呈递增的趋势,随后沿水流方向又逐渐减小;冬季,从永州站到湘潭站呈递减的趋势,到长沙站急剧增加。这也可能与采样站所在城市的排污情况有关。

表2 不同季节和江段湘江浮游植物的密度

Table 2 Temporal dynamic of phytoplankton density in the

采样站	Xiangjing River			
	四季浮游植物密度			
	春季	夏季	秋季	冬季
永州	$7.65 \times 10^3$	$8.00 \times 10^3$	$2.35 \times 10^4$	$1.50 \times 10^4$
衡阳	$7.50 \times 10^3$	$9.29 \times 10^4$	$2.20 \times 10^4$	$1.10 \times 10^4$
株洲	$6.20 \times 10^3$	$1.00 \times 10^4$	$4.85 \times 10^4$	$9.00 \times 10^3$
湘潭	$8.50 \times 10^3$	$1.60 \times 10^4$	$5.50 \times 10^4$	$8.00 \times 10^3$
长沙	$1.45 \times 10^4$	$3.80 \times 10^4$	$4.20 \times 10^4$	$3.72 \times 10^4$
岳阳	$1.70 \times 10^4$	$5.00 \times 10^3$	$3.90 \times 10^4$	$1.50 \times 10^4$

湘江四季优势类群为硅藻门和绿藻门,密度分别为 $1.00 \times 10^4$ 、 $6.20 \times 10^3$  ind/L,占总密度的47.39%和29.38%。在水温最低的冬季,硅藻门密度在所有

藻类中占绝对主导地位，达到 80.95%；进入春季，绿藻门和喜好高温及肥水型水质的蓝藻门开始大量繁殖，分别达到 15.46%、12.01%；自夏季进入秋季，绿藻门逐渐占主导地位，达到 35.29%，并且隐藻门的某些种类也成为继硅藻门之后的第 3 优势种

群，占 15.74%。从表 3 可知，调查湘江四季共出现的浮游植物优势种( $P>0.02$ )有 13 种，绿藻门的普通小球藻全年四季均有出现，硅藻门的变异直链藻在春、夏、冬季均有出现，而秋季的优势种主要为隐藻门种类。

表 3 不同季节湘江浮游植物的优势种类及其优势度

**Table 3 Dominant species and their dominances of phytoplankton in different seasons of Xiangjing River**

季节	优势门	优势种(优势度)
春季	硅藻门	变异直链藻(0.11)、缘花舟形藻(0.08)、尖针杆藻(0.08)、大羽纹藻(0.05)、针形纤维藻(0.02)
	绿藻门	普通小球藻(0.06)
夏季	硅藻门	变异直链藻(0.07)、双头针杆藻(0.06)、颗粒直链藻(0.05)、窗格平板藻(0.03)、尖针杆藻(0.02)
	绿藻门	普通小球藻(0.09)
	裸藻门	绿裸藻(0.02)
秋季	硅藻门	颗粒直链藻(0.03)
	绿藻门	普通小球藻(0.06)
	隐藻门	齿蚀隐藻(0.06)、尖尾蓝隐藻(0.02)、卵形隐藻(0.02)
冬季	硅藻门	变异直链藻(0.24)、尖针杆藻(0.11)、双头针杆藻(0.06)、窗格平板藻(0.03)、巴豆叶脆杆藻(0.02)
	绿藻门	普通小球藻(0.04)

### 2.3 浮游植物群落结构的时空变化

由表 4 可见，调查期间，各站  $H$  值为 2.08~5.83，其中秋季株洲站的最低，秋季衡阳站的最高；各站  $D$  值为 0.61~6.42，其中冬季株洲站的最低，秋季衡阳站的最高；各站  $J$  值为 0.35~0.91，其中秋季株洲站的最低，秋季湘潭站的最高。湘江四季浮游植物的  $H$ 、 $D$ 、 $J$  的平均值分别为 3.20~4.80、1.13~4.79、

0.73~0.81，冬、春、夏、秋季的  $H$  和  $D$  均依次升高， $J$  的季节差异不明显，而  $D$  的季度变化较大。各站  $H$  的年平均值为 3.21~4.46，其中株洲站的最低，永州站的最高； $D$  的年平均值为 2.48~3.78，其中株洲站的最低，衡阳站的最高，其次是永州站的； $J$  的年平均值为 0.69~0.82，其中株洲站的最低，永州站和湘潭站的最高。

表 4 不同季节和江段湘江浮游植物的生物指数

**Table 4 Biotic index of phytoplankton at each station in different seasons**

采样站	$H$					$D$					$J$				
	春季	夏季	秋季	冬季	平均值	春季	夏季	秋季	冬季	平均值	春季	夏季	秋季	冬季	平均值
永州	4.12	4.86	4.57	3.96	4.46	2.92	4.99	3.99	1.65	3.54	0.79	0.81	0.78	0.86	0.82
衡阳	3.81	3.26	5.83	3.51	4.10	2.39	4.69	6.42	1.62	3.78	0.74	0.53	0.89	0.78	0.74
株洲	3.91	4.17	2.08	2.66	3.21	2.68	2.89	3.72	0.61	2.48	0.79	0.78	0.35	0.84	0.69
湘潭	4.34	4.05	5.77	2.90	4.26	2.72	3.57	6.28	0.76	3.33	0.83	0.71	0.91	0.84	0.82
长沙	4.17	4.13	4.97	2.89	4.04	3.19	3.76	3.43	1.09	2.87	0.80	0.70	0.86	0.84	0.80
岳阳	4.27	4.39	5.77	3.27	4.38	2.90	3.08	4.92	1.03	2.99	0.75	0.83	0.80	0.72	0.78
平均值	4.10	4.14	4.80	3.20	4.06	2.78	3.08	4.79	1.13	3.13	0.78	0.73	0.77	0.81	0.77

依据文献[22]的调查结果，当  $H$  值在 3 以上时，水体为轻污染或无污染，由此判断，湘江水体主要属轻污染或无污染型；以  $D$  判断时，当  $D>3$  为轻污染或无污染，当  $1<D\leq 3$  为中污染，当  $D\leq 1$  为重污染，由此判断，湘江水体主要处于中污染和无污染之间；以  $J$  判断时，当  $J$  为 0.5~0.8 时，为轻污

染或无污染，由此判断，湘江水体主要为轻污染或无污染。3 个指数评价结果基本一致，且秋、夏、春、冬季的湘江水质依次变差。可见，湘江浮游植物以秋季种类多样性最高，生态最稳定；而冬季则处于多样性和丰富度的低峰，冬季浮游植物生态易遭到破坏。

## 2.4 浮游植物种类数和密度及生物指数与湘江水环境因子的相关性

湘江水环境因子随季节变化情况列于表5。从表5可知,水体中的总氮为1.63~3.66 mg/L,总磷

为0.02~0.11 mg/L,亚硝酸盐为0.02~0.27 mg/L,叶绿素a为0.16~0.92  $\mu\text{g/L}$ ,溶解氧为6.42~9.03 mg/L, pH为6.70~8.33,水温为8.12~29.5  $^{\circ}\text{C}$ ,水的透明度为0.20~2.20 m。

表5 不同季节湘江的水环境因子

**Table 5 Environmental factors of Xiangjiang River in different seasons**

季节	总氮/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )		总磷/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )		亚硝酸盐/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )		叶绿素 a/( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值
春季	1.63~3.66	2.36	0.06~0.11	0.09	0.03~0.18	0.09	0.18~0.37	0.27
夏季	1.87~3.25	2.53	0.03~0.06	0.04	0.07~0.27	0.15	0.16~0.78	0.40
秋季	2.03~3.09	2.62	0.04~0.05	0.04	0.02~0.25	0.09	0.20~0.92	0.58
冬季	1.96~2.89	2.40	0.02~0.05	0.03	0.06~0.11	0.07	0.17~0.32	0.24

季节	溶解氧/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )		pH		温度/ $^{\circ}\text{C}$		透明度/m	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值
春季	6.42~8.06	7.60	7.31~7.82	7.60	22.90~24.80	23.90	0.97~1.17	1.12
夏季	6.78~8.14	7.27	7.90~8.33	8.20	27.20~29.50	28.90	0.20~2.20	1.35
秋季	8.06~8.63	8.42	7.44~7.97	7.69	17.00~19.80	19.30	0.25~1.17	0.62
冬季	8.39~9.03	8.89	6.70~7.82	7.34	8.12~11.90	9.88	0.47~0.72	0.60

浮游植物种类数和密度及生物指数与湘江水环境因子的相关系数列于表6。调查期间,全年湘

江浮游植物的种类数与水体亚硝酸盐质量浓度呈显著正相关,但相关系数仅为0.10;  $D$ 与pH、温

表6 浮游植物种类数和密度及生物指数与湘江水环境因子的相关系数

**Table 6 Correlation coefficients of phytoplankton species, abundance and biotic indices with environmental factors**

季节	指数	相关系数							
		总氮	总磷	亚硝酸盐	叶绿素 a	溶解氧	pH	温度	透明度
春季	种类数	0.88*	-0.42	0.83	0.61	-0.76	-0.73	-0.74	-0.89*
	密度	0.10*	-0.30	0.73	0.61	-0.82	-0.82	-0.69	-0.97**
	$H$	0.62	-0.33	0.03	0.96**	-0.79	-0.25	0.12	-0.57
	$D$	0.63	0.30	0.25	0.63	-0.90**	-0.78	-0.28	-0.86
	$J$	-0.01*	0.73	-0.70	0.59	-0.26	0.31	0.78	0.81
夏季	种类	-0.39	-0.64	-0.78	-0.38	0.05	0.42	0.43	0.24
	密度	0.04*	-0.47	-0.58	0.06	0.52	0.46	0.48	0.10
	$H$	0.76	0.85	0.91*	0.43	-0.03	-0.53	-0.57	-0.89*
	$D$	-0.48	0.78	-0.76	-0.50	-0.08	0.43	0.34	0.21
	$J$	0.59	0.79	0.89*	0.43	0.13	-0.21	-0.53	-0.44
秋季	种类	-0.82	-0.31	0.11	-0.54	-0.54	-0.09	-0.06	0.47
	密度	0.54	0.52	0.09	0.70*	0.70	-0.27	-0.15	-0.34
	$H$	-0.27	0.39	0.45	0.05*	0.05*	-0.55	-0.21	-0.02
	$D$	-0.77	-0.41	-0.35	-0.55	-0.55	-0.78	0.48	0.68
	$J$	-0.25	0.43	0.58	0.15	0.15	-0.45	-0.27	-0.12
冬季	种类	-0.29	0.23	-0.76	0.84	0.53	-0.28	0.18	0.52
	密度	0.07	-0.03*	0.84*	0.21	0.69	0.27	-0.21	-0.20
	$H$	0.89**	0.48	-0.89	0.80	0.37	-0.25	0.02	0.58
	$D$	-0.21	0.99**	-0.72	0.82	0.52	-0.27	0.23	0.47
	$J$	-0.38	0.48	0.85**	-0.16	-0.49	-0.19	-0.08	0.26
全年	种类	0.71	-0.04	0.10*	0.76	-0.85	0.95	0.91	0.93
	密度	0.94	-0.46	0.88	0.10	-0.55	0.72	0.63	0.69
	$H$	0.12	0.60	0.82	0.19	-0.99**	0.94	0.97*	0.95*
	$D$	0.44	-0.30	0.96	0.51	-0.98*	0.99**	0.99**	0.99**
	$J$	-0.79	0.16	-0.98*	-0.84	0.78	-0.90	-0.85	-0.88

“\*”“\*\*”“\*\*\*”分别示相关性显著( $P<0.05$ )、极显著( $P<0.01$ )。

度和透明度均呈极显著正相关,相关系数都为 0.99,与溶解氧质量浓度呈显著负相关; $H$ 与温度和透明度均呈显著正相关,与溶解氧质量浓度呈极显著负相关; $J$ 与水体亚硝酸盐质量浓度呈显著负相关。在不同季度中,春季浮游植物种类数和密度与水体总氮质量浓度呈显著正相关,与水体透明度呈显著或极显著负相关; $H$ 与水体叶绿素 a 质量浓度呈极显著正相关; $D$ 与溶解氧质量浓度呈极显著负相关; $J$ 与水体总氮质量浓度呈显著负相关。夏季浮游植物密度与水体总氮质量浓度呈显著正相关; $H$ 和  $J$ 均与水体亚硝酸盐质量浓度呈显著正相关; $H$ 与水体透明度呈显著负相关。秋季浮游植物密度与叶绿素 a 呈显著正相关; $H$ 与水体叶绿素 a 和溶解氧质量浓度呈显著正相关。冬季浮游植物密度与水体亚硝酸盐质量浓度呈显著正相关,与水体总磷质量浓度呈显著正相关; $H$ 与水体总氮质量浓度呈极显著正相关; $D$ 与水体总磷质量浓度呈极显著正相关; $J$ 与水体亚硝酸盐质量浓度呈极显著正相关。

### 3 结论与讨论

笔者于 2020—2021 年对湘江干流的浮游植物进行调查,共鉴定出 259 种浮游植物,其中绿藻和硅藻共 163 种,占总种类数的 62.93%,说明湘江浮游植物群落是以绿藻和硅藻为主导型的群落。调查期间,湘江浮游植物的种类四季变化明显,最多的是秋季,为 196 种,最少是冬季,仅有 34 种;四季平均密度达  $2.11 \times 10^4$  ind/L,其中以秋季最大 ( $3.89 \times 10^4$  ind/L),春季最小 ( $1.08 \times 10^4$  ind/L)。春季优势种主要以变异直链藻(0.11)为主,其次是缘花舟形藻(0.08)和尖针杆藻(0.08);夏季主要以普通小球藻(0.09)为主,其次是变异直链藻(0.07);秋季主要以普通小球藻(0.06)和齿蚀隐藻(0.06)为主;冬季以变异直链藻(0.24)为主,其次是尖针杆藻(0.11)。春季、冬季优势种主要是属于硅藻门的,夏季优势种以绿藻门的为主,秋天以蓝藻门的为主。有报道<sup>[23]</sup>称湘江流域浮游植物的优势种主要为硅藻中的颗粒直链藻、尖针杆藻、缘花舟形藻和绿藻门中的小球藻等,本次研究的结果与其有相似之处。浮游植物群落结构不是简单且一成不变的,它有一定的季节性,又有较强的稳定性,如变异直链藻、尖针杆藻、普通小球藻为较稳定优势种。虽然每个季节都

有很多的优势种种类,但优势度较小,如针形纤维藻(0.02)、尖针杆藻(0.02)、卵形隐藻(0.02)和巴豆叶脆杆藻(0.02)等。

调查期间,湘江四季浮游植物的  $H$ 、 $D$ 、 $J$  平均值为 3.20~4.80, 1.13~4.79, 0.73~0.81; 6 个采样站中,株洲站的  $H$ 、 $D$ 、 $J$  年平均值均为最低,永州站的  $H$  值最高,衡阳的  $D$  值最高,永州站的  $D$  值次之,永州及湘潭站的  $J$  值最高。可见,永州段物种最丰富,且分布最均匀,水质相对最好,而株洲段水质相对较差。杜桂森等<sup>[24]</sup>的调查发现,硅藻型是水质污染较轻的典型特征,从湘江四季的浮游植物种类、密度及优势种来看,表现为绿藻-硅藻型水质,意味着水质富营养化程度比较低,水质较好。

浮游植物的丰度等变化与种类的组成、季节和水体中营养元素密切相关<sup>[25]</sup>,氮、磷是藻类生长的重要营养因子,在一定浓度范围内对浮游植物的生长有促进作用;反之,也会有抑制作用<sup>[26]</sup>。本研究中,总氮只在春季与种类数、密度,夏季与密度呈显著正相关,其他季节都没有显著相关性,总磷只在冬季与密度呈显著负相关,说明主要在春季总氮才会对浮游植物的生长有促进作用,且总磷对浮游植物生长影响极小。结合四季相应的环境因子进行相关性分析显示,全年湘江浮游植物种类数与水体亚硝酸盐质量浓度呈显著正相关,这表明亚硝酸盐的增加有利于浮游植物种类的增加; $D$ 与 pH 和透明度呈极显著相关,表明 pH 是浮游植物丰富度的决定性因素, $D$ 亦是影响透明度的主要因素; $J$ 与亚硝酸盐质量浓度呈显著负相关。春季总氮对种类和密度的贡献较大,说明此时总氮越丰富的地方,浮游植物种类数和密度越大,春季的  $H$  与叶绿素 a 质量浓度呈极显著正相关;夏季的  $H$  与亚硝酸盐质量浓度呈显著正相关,与透明度呈显著负相关;秋季的密度与叶绿素 a 质量浓度呈极显著正相关, $H$  与叶绿素 a 和溶解氧质量浓度呈显著正相关;冬季  $H$  与总氮质量浓度呈极显著正相关。说明在不同季节影响  $H$  改变的环境因子也不同,春季为叶绿素 a,夏季为亚硝酸盐和透明度,秋季为叶绿素 a 和溶解氧,冬季为总氮。由于受到不同季节水温、水位及流域内污染物排放差异的影响,湘江各江段的水质存在空间上的差异,同时也存在不同季节,特别是丰水期和枯水期的差异。这些水环境因子在一定程度上表现

在氮、磷等营养离子的变化,从而导致了水环境因子与浮游植物的关系存在一定的季节差异性。

依据肖风劲等<sup>[27]</sup>用浮游植物的密度评价水质状态,浮游植物密度小于或等于 $5.0 \times 10^5$  ind/L为极贫营养型判断,湘江整体属于极贫营养性水体。詹玉涛等<sup>[28]</sup>、王秋衡<sup>[29]</sup>研究表明,硅藻和绿藻密度各占30%左右时,则可判定为 $\beta$ -中污染;硅藻密度超过60%时,可判定为寡污带。湘江四季浮游植物密度统计显示,硅藻和绿藻密度分别占总密度的47.39%和29.38%,属 $\beta$ -中污染型水体。生物指数分析结果显示,3种不同的指数均显示湘江水质属轻污染或无污染,但丰富度指数显示有逐渐向中污染发展的趋势,特别是春、冬两季及夏、秋季的株洲段,水质相对较差。总体来说,湘江水质上游优于下游。

#### 参考文献:

- [1] 黄琪,高俊峰,张艳会,等. 长江中下游四大淡水湖生态系统完整性评价[J]. 生态学报, 2016, 36(1): 118-126.
- [2] 张校,肖玲,刘应迪,等. 湘江长沙段浮游植物区系组成及水质评价初步研究[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2012, 35(4): 74-79.
- [3] 解莹,张海萍,彭文启,等. 永定河上游河流健康评价[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(S1): 319-324.
- [4] 李港,林妙丽,陈诚,等. 京杭运河苏北段秋冬季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. 水生生态学杂志, 2021, 42(5): 119-126.
- [5] 贺旭成. 湘江长沙段渔业资源现状及保护对策[J]. 内陆水产, 2007, 32(9): 4-5.
- [6] 陈向阳. 湘江株洲段天然渔业资源调查研究[J]. 中国渔业经济, 2010, 28(1): 99-104.
- [7] 刘珊,颜智勇. 湘江流域长沙段水资源问题分析[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2009, 35(S1): 64-66.
- [8] 胡自强,刘俊,傅秀芹,等. 湘江干流软体动物研究[J]. 水生生物学报, 2007, 31(4): 524-531.
- [9] 张琦,王方鸣,罗岳平,等. 湘江流域大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 水生生态学杂志, 2018, 39(2): 48-57.
- [10] 王晓清,曾亚英,吴含含,等. 湘江干流浮游生物群落结构及水质状况分析[J]. 水生生物学报, 2013, 37(3): 488-494.
- [11] 刘年猛,沈建明,李立武,等. 2003—2007年湘江长沙段洲滩钉螺分布调查[J]. 中国血吸虫病防治杂志, 2008, 20(2): 121-124.
- [12] 武力,刘慧莹,向超,等. 湘江流域永州段水质变化趋势及突变分析[J]. 湖南农业科学, 2022(2): 72-76.
- [13] 陈明霞,熊贵耀,张佳鹏,等. 湘江流域水质综合评价及其时空演变分析[J]. 环境工程, 2019, 37(10): 83-90.
- [14] 杨志敏,毛德华,王江赢. 湘潭市湘江水质综合评价及成因探究[J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(3): 62-64.
- [15] 刘丽,廖伏初,邓时铭,等. 湘江干流水体无机氮污染现状分析[J]. 环境保护科学, 2011, 37(2): 14-16.
- [16] 师瑞丹,吴志强,黄亮亮,等. 湘江上游区桂北江段鱼类物种多样性研究[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2015, 33(4): 127-136.
- [17] SC/T9102—2007 渔业生态环境检测规范第3部分: 淡水[S].
- [18] DB43/T432—2009 淡水生物资源调查技术规范[S].
- [19] 韩茂森,束蕴芳. 中国淡水生物图谱[M]. 北京: 海洋出版社, 1995.
- [20] 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.
- [21] HUANG G J, WANG X Q, CHEN Y S, et al. Seasonal succession of phytoplankton functional groups in a reservoir in central China[J]. Fundamental and Applied Limnology, 2018, 192(1): 1-14.
- [22] 谭香,夏小玲,程晓莉,等. 丹江口水库浮游植物群落时空动态及其多样性指数[J]. 环境科学, 2011, 32(10): 2875-2882.
- [23] 曾亚英,王晓清,熊钢,等. 湘江浮游生物资源状况的调查与分析[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2012, 38(5): 535-541, 561.
- [24] 杜桂森,王建厅,武殿伟,等. 密云水库的浮游植物群落结构与密度[J]. 植物生态学报, 2001, 25(4): 501-504.
- [25] 胡俊,杨玉霞,池仕运,等. 邛山提灌站浮游植物群落结构空间变化对环境因子的响应[J]. 生态学报, 2017, 37(3): 1054-1062.
- [26] 曲克明,陈碧鹃,袁有宪,等. 氮磷营养盐影响海水浮游硅藻种群组成的初步研究[J]. 应用生态学报, 2000, 11(3): 445-448.
- [27] 肖风劲,欧阳华. 生态系统健康及其评价指标和方法[J]. 自然资源学报, 2002, 17(2): 203-209.
- [28] 詹玉涛,杨昌述,范正年. 浮游植物分布与水质有机污染的相关性研究[J]. 上海环境科学, 1990(8): 16-19.
- [29] 王秋衡,王淑云,刘美英. 湖南湘江流域污染的安全评价[J]. 中国给水排水, 2004, 20(8): 104-106.

责任编辑: 邹慧玲  
英文编辑: 柳正