

# 不同水期东江干流浮游植物群落结构特征及其与水环境因子的关系

周铭浩<sup>1</sup>, 李彤<sup>1</sup>, 邓滢<sup>1</sup>, 叶四化<sup>1</sup>, 张家卫<sup>2</sup>, 黄少峰<sup>2</sup>, 林学明<sup>3</sup>

1. 广东省生态环境监测中心, 广东 广州 510308

2. 生态环境部珠江流域南海海域生态环境监督管理局生态环境监测与科学研究中心, 广东 广州 510611

3. 华南农业大学资源环境学院, 广东 广州 510642

**摘要:**为探究东江干流浮游植物群落结构特征及其与水环境因子的关系,于2022年1月(枯水期)和2022年7月(丰水期)对东江干流29个断面开展了浮游植物和水环境因子调查,对比了枯水期与丰水期浮游植物群落种类组成、优势种、密度、生物量、多样性指数的变化特征,采用Pearson相关性分析及冗余分析方法研究了水环境因子[水温(WT)、pH、溶解氧(DO)、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、总磷(TP)、总氮(TN)、浊度(TUR)、透明度(SD)]对东江干流浮游植物群落结构的影响。结果表明:东江干流枯、丰水期浮游植物群落结构主要为绿藻-硅藻型,枯水期浮游植物种类数(7门186种)高于丰水期(7门181种)。全年优势种共有6种,为空球藻(*Eudorina elegans*)、普通小球藻(*Chlorella vulgaris*)、颗粒直链藻(*Melosira granulata*)、小环藻(*Cyclotella* sp.)、假鱼腥藻(*Pseudanabaena* sp.)和隐藻(*Cryptomonas* sp.),其中枯水期优势种有3种,丰水期优势种有4种。丰水期浮游植物密度和生物量(8.09×10<sup>7</sup> cells/L,130.06 mg/L)分别为枯水期(2.57×10<sup>7</sup> cells/L,40.04 mg/L)的3.1倍和3.2倍。浮游植物Shannon-Wiener多样性指数(*H'*)、Pielou均匀度指数(*J*)、Margalef丰富度指数(*D*)分析结果显示,丰水期生物多样性高于枯水期,研究断面的水质总体处于轻度~中污染状态。单因素方差分析(ANOVA)结果显示,不同水期的WT、pH、DO、TN、TUR存在显著差异。Pearson相关性分析及冗余分析结果表明,WT、DO、TUR是东江干流浮游植物群落结构的主要水环境影响因子。

**关键词:**东江;浮游植物;群落结构;水环境因子

中图分类号:X826;Q178.1

文献标志码:A

文章编号:1002-6002(2025)01-0121-13

DOI:10.19316/j.issn.1002-6002.2025.01.13

## Phytoplankton Community Structural Characteristics and Its Relationship with Water Environmental Factors in the Main Stream of Dongjiang River During Different Water Periods

ZHOU Minghao<sup>1</sup>, LI Tong<sup>1</sup>, DENG Ying<sup>1</sup>, YE Sihua<sup>1</sup>, ZHANG Jiawei<sup>2</sup>, HUANG Shaofeng<sup>2</sup>, LIN Xueming<sup>3</sup>

1. Guangdong Ecological and Environmental Monitoring Center, Guangzhou 510308, China

2. Ecological Environment Monitoring and Scientific Research Center, South China Sea Ecological Environment Supervision and Administration Bureau, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou 510611, China

3. College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

**Abstract:**To explore the characteristics of phytoplankton community structure and its relationship with water environmental factors in the main stream of Dongjiang River, phytoplankton and water environmental factors were investigated in 29 sections of the main stream of Dongjiang River in January 2022 (dry season) and July 2022 (wet season). Variation characteristics of species composition, dominant species, density, biomass and diversity index of phytoplankton community in dry and wet season were compared. Pearson correlation analysis and redundancy analysis (RDA) were used to study the effects of water environmental factors such as water temperature (WT), pH, dissolved oxygen (DO), permanganate index (COD<sub>Mn</sub>), ammonia nitrogen (NH<sub>3</sub>-N), total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), turbidity (TUR) and transparency (SD) on the phytoplankton community structure in the main stream of Dongjiang River. The results showed that the phytoplankton species in the dry and wet seasons of the Dongjiang River were mainly green algae-diatom type, and the number of phytoplankton species in dry season (7 phyla, 186 species)

收稿日期:2023-08-06;修订日期:2023-11-06

基金项目:广东省省级科技计划项目(2022B0202160007);广东省自然科学基金(2022A151010807);广东省重点领域研发计划项目(2020B1111350001)

第一作者简介:周铭浩(1990-),男,湖南常德人,博士,高级工程师。

通讯作者:林学明

was higher than that in wet season (7 phyla, 181 species). There were 6 dominant species in the whole year, which were *Eudorina elegans*, *Chlorella vulgaris*, *Melosira granulata*, *Cyclotella* sp., *Pseudanabaena* sp., and *Cryptomonas* sp., including 3 dominant species in dry season and 4 dominant species in wet season. Density and biomass of phytoplankton in wet season ( $8.09 \times 10^7$  cells/L, 130.06 mg/L) were 3.1 and 3.2 times higher than those in dry season ( $2.57 \times 10^7$  cells/L, 40.04 mg/L), respectively. The Shannon-Wiener diversity index ( $H'$ ), Pielou evenness index ( $J$ ) and Margalef index ( $D$ ) of phytoplankton showed that the biodiversity in wet season was higher than that in dry season, and the overall evaluation of water quality in study section was mild to moderate pollution. One-way analysis of variance (ANOVA) showed that there were significant differences in WT, pH, DO, TN and TUR in different water periods. Pearson correlation analysis and RDA results showed that WT, DO and TUR were the main water environmental influencing factors of phytoplankton community in the main stream of Dongjiang River.

**Keywords:** Dongjiang River; phytoplankton; community structure; water environmental factors

浮游植物是水生态系统的主要初级生产者,对维持水体食物网结构及功能起着关键作用。其物种组成及数量的变化也会影响其他水生生物群落结构,从而影响水生态系统的稳定性<sup>[1]</sup>。浮游植物具备细胞体积小、结构简单、生命周期短等特点,能够对河流水体中的理化因子及污染物的细微变化作出迅速响应<sup>[2]</sup>。相比于传统水质监测中的理化指标,浮游植物的群落结构变化特征能更全面地反映水体环境质量状况,已被广泛应用于水体环境监测与评价<sup>[3-7]</sup>。在水生态环境中,环境因子的时空变化会影响浮游植物群落的组成与分布<sup>[8]</sup>。马煜等<sup>[9]</sup>研究发现,松花江哈尔滨段的浮游植物种群分布主要受季节变化及人类活动的影响。白海锋等<sup>[10]</sup>对渭河陕西段浮游植物进行了研究,发现不同水期的物种类型、优势种、密度及生物量都存在显著变化。李思阳等<sup>[11]</sup>研究了东江重要支流西枝江浮游植物的群落结构特征及其与主要环境因子的关系,发现不同水期浮游植物群落结构的环境影响因子存在差异。此外,湖泊、水库水体浮游植物群落结构也表现出明显的时空变化特征<sup>[12-13]</sup>。

东江作为珠江流域三大水系之一,为香港、河源、惠州、东莞、深圳等城市近4 000万居民提供了生产、生活等用水<sup>[14]</sup>。东江以占广东省约18%的水资源量,有力支撑着全省约31%的人口及43%的经济总量。由于近年来城市化进程发展快速,人类活动如农业、工业、居民生活等对东江流域的干扰加重,使得东江的水生态环境质量有所下降<sup>[15]</sup>。当前,我国水体监测评价正在由水质要素监测评价向水生态综合要素监测评价转变,水环境管理的目标也由改善水环境质量提升至维护水生态健康<sup>[16]</sup>。研究表明,水质变化会对浮游植物群落演变产生影响,因此,分析浮游植物群落演替特征及其与环境因子的关系,可为水生态管理

提供理论依据<sup>[17-20]</sup>,而研究东江干流浮游植物群落结构特征并探究其对水环境因子的响应情况,有助于评估东江干流水生态环境健康状况。

本文通过对东江干流沿程29个监测断面开展浮游植物及水环境因子采样调查,分析其枯水期和丰水期浮游植物种类、密度、生物量、生物多样性等的变化特征,并运用Pearson分析和冗余分析(Redundancy Analysis)方法探讨浮游植物群落结构与水环境因子的相关关系,以期为东江流域水环境监控、治理和保护提供基础资料及科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域及采样点

东江发源于江西寻乌县桫髻钵山,在广东省境内由东北向西南先后流经河源市和惠州市,至东莞市石龙镇流入珠三角东部网河区。东江流域属于亚热带季风湿润气候,干湿季节差异明显,多年平均降水量为1 795 mm,多年平均水资源总量为331.1亿 $m^3$ <sup>[21]</sup>。本研究主要针对广东省东江干流区域,共设置29个采样点位(图1),在2020年1月(枯水期)及7月(丰水期)开展了野外采样工作。

### 1.2 样品采集与测定

#### 1.2.1 浮游植物采集及测定

参照《淡水浮游生物研究方法》<sup>[22]</sup>进行浮游植物样品采集与处理。浮游植物定性样品:使用25#浮游生物网(孔径0.064 mm)在水面下0.5 m处以“∞”字形拖动3~5 min,将所得滤液放入采样瓶,并用4%甲醛溶液进行固定。浮游植物定量样品:使用1 L有机玻璃采水器采集水面下0.5 m处水样,并加入15 mL鲁哥试剂摇匀固定。将所得样品带回实验室静置48 h后,采用虹吸法

将样品浓缩至 50 mL。取 0.1 mL 浓缩后的样品,在 40×10 倍标准光学显微镜下进行种类鉴定和计数。参照《中国淡水藻类——系统、分类及生

态》<sup>[23]</sup>进行种类鉴定。根据细胞体积测定结果计算浮游植物生物量,即把 1 mm<sup>3</sup> 细胞体积换算为 1 mg 鲜重生物量<sup>[22]</sup>。

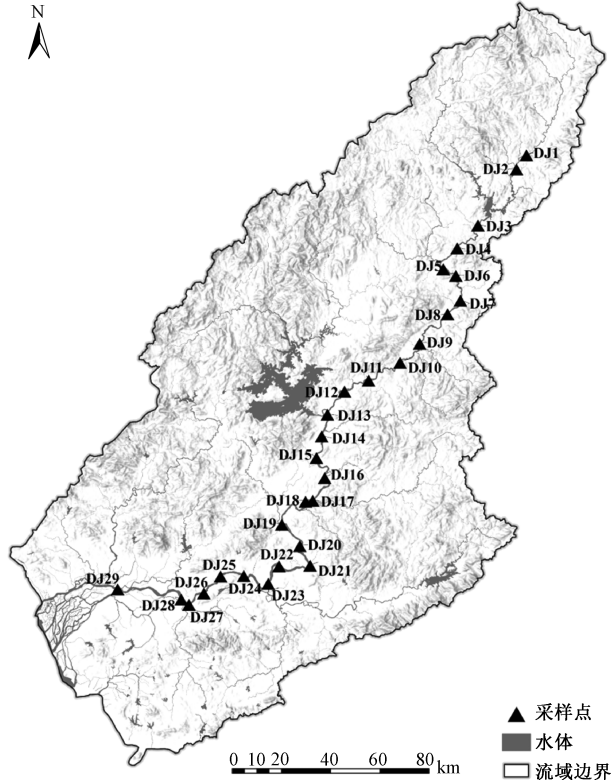


图 1 东江干流采样点位示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sampling sites in the main stream of Dongjiang River

### 1.2.2 水环境指标测定

水环境指标测定样品与浮游植物样品同步采集,采集方法依据《地表水环境质量监测技术规范》(HJ 91.2—2022)<sup>[24]</sup>。水温(WT)、pH、溶解氧(DO)采用多参数水质分析仪(美国 HACH, DS5X)现场测定,透明度(SD)采用塞式透明度盘测定,高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、总磷(TP)、总氮(TN)、浊度(TUR)等指标的测定参考《水和废水监测分析方法》<sup>[25]</sup>。

### 1.3 数据处理与分析

采用 Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )、Pielou 均匀度指数( $J$ )、Margalef 丰富度指数( $D$ )和优势度( $Y$ )描述各采样断面浮游植物群落特征。具体计算方法如公式(1)~公式(4)所示。

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \times \ln P_i \quad (1)$$

$$J = H' / \ln S \quad (2)$$

$$D = (S - 1) / \ln N \quad (3)$$

$$Y = n_i / N \times f_i \quad (4)$$

式中: $P_i$ 为第*i*种浮游植物密度与总密度的比值, $P_i = n_i / N$ ;  $n_i$ 为第*i*种浮游植物的密度; $N$ 为浮游植物总密度; $S$ 为浮游植物物种数; $f_i$ 为第*i*种浮游植物在各采样断面的出现频率。参考相关研究,将  $Y \geq 0.02$  的浮游植物定义为优势种<sup>[26]</sup>。

$H'$ 用于描述物种个体出现的紊乱及不确定性, $J$ 用于评价物种多样性水平, $D$ 用于指示群落/生境中物种数量的多寡,评价标准如表 1 所示。

本文应用 Excel 2021 软件处理所得实验数据,采用 ArcGIS Pro V2.5 和 Origin 2021 软件进行图形绘制与分析,应用 SPSS Statistics 27 软件对数据进行方差分析(ANOVA),使用 CANOCO 5.0 软件中的束缚型排序方法分析经筛选的浮游植物群落分布与水环境因子之间的相关关系。将浮游植物优势种的群落密度作为物种数据源<sup>[28]</sup>,水环境因子参数作为环境数据源,构成物种与环境因子矩阵。由群落分布去趋势对应分析(DCA)结果可知,枯水期和丰水期 Gradient

Length 第一轴的大小分别为 1.95 和 1.45,均小于 3.00,因而对两时期数据均选用冗余分析方法进

行分析<sup>[29]</sup>。此外,物种及环境数据(pH 除外)均经  $\log_{10}(x + 1)$  标准化处理。

表 1 多样性指数水质评价标准<sup>[27]</sup>  
Table 1 Water quality evaluation standard of diversity indices

水质状况	$H'$	$J$	$D$
清洁	>4.5	>0.8	>4
轻度污染	>3~4.5	>0.5~0.8	>3~4
$\beta$ -中污染	>2~3	>0.3~0.5	>2~3
$\alpha$ -中污染	>1~2	>0.1~0.3	>1~2
重污染	$\leq 1$	$\leq 0.1$	$\leq 1$

## 2 结果与分析

### 2.1 浮游植物群落结构特征

#### 2.1.1 浮游植物物种组成及优势类群

本研究在东江干流枯水期水样中共检出浮游植物 7 门 186 种,其中:绿藻门 70 种,占比 37.63%;硅藻门 65 种,占比 34.95%;蓝藻门 19 种,占比 10.22%;金藻门、甲藻门、裸藻门、隐藻门共计 32 种,总占比 17.20%。在丰水期水样中

共检出浮游植物 7 门 181 种,其中:绿藻门 79 种,占比 43.65%;硅藻门 50 种,占比 27.62%;蓝藻门 28 种,占比 15.47%;裸藻门、甲藻门、隐藻门、金藻门共计 24 种,总占比 13.26%。如图 2 所示,相比于枯水期,东江干流丰水期绿藻门和蓝藻门占比增加,硅藻门占比减小。隐藻门在枯水期的占比高于丰水期,而金藻门在枯水期各采样断面的出现频率远高于丰水期。整体上,东江干流浮游植物结构为绿藻-硅藻型,而蓝藻门也占据一定比例。

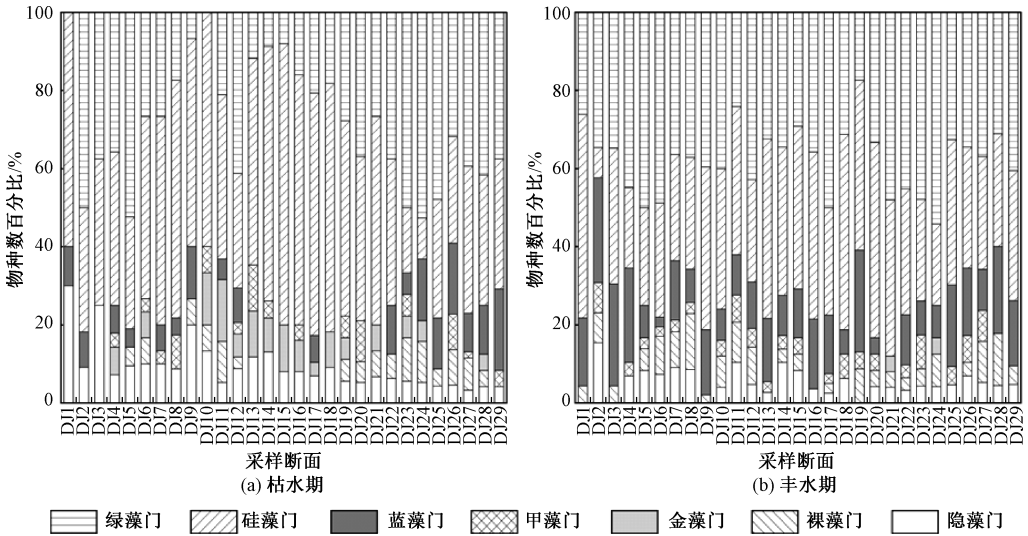


图 2 各采样断面枯水期及丰水期浮游植物物种分布

Fig. 2 Distribution of phytoplankton species during dry season and wet season at each sampling section

东江干流浮游植物优势种共有 6 种(表 2),其中:绿藻门有 2 种,为空球藻(*Eudorina elegans*)和普通小球藻(*Chlorella vulgaris*);硅藻门有 2 种,为颗粒直链藻(*Melosira granulata*)和小环藻(*Cyclotella* sp.);蓝藻门有 1 种,为假鱼腥藻(*Pseudanabaena* sp.);隐藻门

有 1 种,为隐藻(*Cryptomonas* sp.)。由表 2 可知,优势度最大的是枯水期硅藻门颗粒直链藻(0.145),硅藻门小环藻在东江干流不同水期均为优势种。丰水期优势种数量(4 种)多于枯水期(3 种),不同水期的浮游植物优势种存在显著差异。



表 2 浮游植物优势种及其在不同水期的优势度  
Table 2 Phytoplankton dominant species and their dominance in different water periods

门类	编码	优势种	优势度	
			枯水期	丰水期
绿藻门	z1	空球藻 ( <i>Eudorina elegans</i> )	—	0.029
	z2	普通小球藻 ( <i>Chlorella vulgaris</i> )	—	0.083
硅藻门	z3	颗粒直链藻 ( <i>Melosira granulata</i> )	0.145	—
	z4	小环藻 ( <i>Cyclotella</i> sp.)	0.140	0.033
蓝藻门	z5	假鱼腥藻 ( <i>Pseudanabaena</i> sp.)	—	0.098
隐藻门	z6	隐藻 ( <i>Cryptomonas</i> sp.)	0.070	—

### 2.1.2 浮游植物密度及生物量

在枯水期东江干流各采样点,硅藻门物种的密度最大( $1.68 \times 10^7$  cells/L),占比为 65.37%;其次是隐藻门( $4.53 \times 10^6$  cells/L)和绿藻门( $2.58 \times 10^6$  cells/L),占比分别为 17.63%和 10.04%;而金藻门( $8.43 \times 10^5$  cells/L)、裸藻门( $5.00 \times 10^5$  cells/L)、蓝藻门( $3.62 \times 10^5$  cells/L)和甲藻门( $1.29 \times 10^5$  cells/L)的密度相对较小,占比分别为 3.28%、1.95%、1.41%和 0.50%。在丰水期,绿藻门( $3.66 \times 10^7$  cells/L)和蓝藻门( $2.95 \times 10^7$

cells/L)物种的密度较大,占比分别达 45.24%和 36.46%;其次是硅藻门( $1.01 \times 10^7$  cells/L),占比为 12.48%;隐藻门( $2.94 \times 10^6$  cells/L)、裸藻门( $1.03 \times 10^6$  cells/L)、甲藻门( $7.34 \times 10^5$  cells/L)和金藻门( $2.10 \times 10^4$  cells/L)的密度相对较小,占比分别为 3.63%、1.27%、0.91%和 0.03%。东江干流枯水期和丰水期浮游植物的总密度分别为  $2.57 \times 10^7$  cells/L 和  $8.09 \times 10^7$  cells/L,丰水期浮游植物密度约为枯水期的 3.1 倍(图 3)。

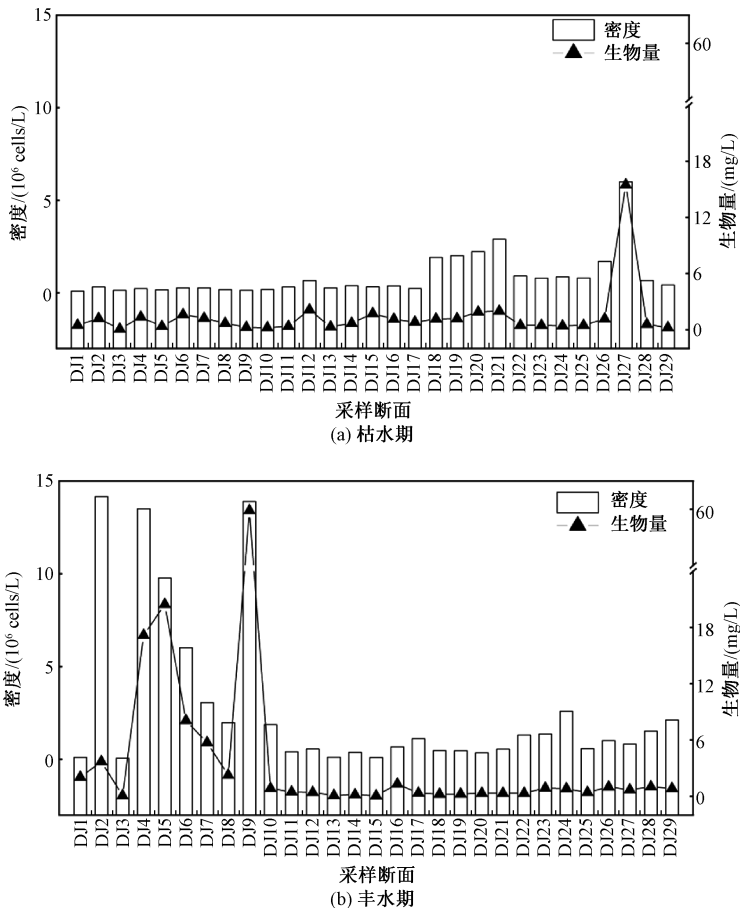


图 3 各采样断面枯水期及丰水期浮游植物密度与生物量

Fig. 3 Phytoplankton density and biomass during dry season and wet season at each sampling section

本次枯水期调查中,硅藻门的生物量最大(28.54 mg/L),占比达71.28%;其次是隐藻门(5.38 mg/L),占比为13.44%;裸藻门(2.28 mg/L)、绿藻门(2.00 mg/L)、甲藻门(0.96 mg/L)、蓝藻门(0.45 mg/L)和金藻门(0.42 mg/L)的生物量较小,占比分别为5.69%、5.00%、2.40%、1.12%和1.05%。丰水期调查中,硅藻门(63.64 mg/L)和绿藻门(50.00 mg/L)物种的生物量较大,占比分别达48.93%和38.44%;隐藻门(7.97 mg/L)、裸藻门(4.00 mg/L)、蓝藻门(2.94 mg/L)、甲藻门(1.49 mg/L)和金藻门(0.02 mg/L)的生物量较小,占比分别为6.13%、3.08%、2.26%、1.15%和0.02%。东江干流枯水期和丰水期浮游植物的总生物量分别为40.04 mg/L和130.06 mg/L,丰水期浮游植物生物量约为枯水期的3.2倍(图3)。在枯水期,浮游植物密度及生物量占绝对优势的均为硅藻门,其次为隐藻门。在丰水期,浮游植物密度占优势地位的均为绿藻门和蓝藻门;生物量最大的均为硅藻门,其次是绿藻门。

如图3所示,在枯水期,DJ1~DJ17采样点位浮游植物密度和生物量变化趋势不明显;DJ18~DJ21点位浮游植物密度呈明显上升趋势;剩余点

位中,除DJ27点位的浮游植物密度和生物量存在显著增长外,其他点位变化趋势不明显。在丰水期,东江上游出现多个浮游植物密度高值点位,其中DJ2、DJ4和DJ9点位的密度均高于 $1.30 \times 10^7$  cell/L;中下游区域DJ21~DJ24、DJ27~DJ29点位为浮游植物密度递增区间。

### 2.1.3 浮游植物生物多样性

不同水期浮游植物多样性指数变化如图4所示。枯水期各断面 $H'$ 的变化范围为1.15~2.68,均值为2.07;丰水期 $H'$ 的变化范围为1.30~3.21,均值为2.46。 $H'$ 计算结果显示,东江干流处于 $\beta$ -中污染状态。枯水期各断面 $J$ 的变化范围为0.52~0.86,均值为0.68;丰水期 $J$ 的变化范围为0.40~0.91,均值为0.72。 $J$ 计算结果显示,东江干流处于轻度污染状态。枯水期各断面 $D$ 的变化范围为0.59~3.84,均值为1.61;丰水期 $D$ 的变化范围为1.15~3.17,均值为2.20。 $D$ 计算结果显示,东江干流在枯水期和丰水期分别处于 $\alpha$ -中污染状态和 $\beta$ -中污染状态。整体而言,东江干流丰水期 $H'$ 、 $J$ 、 $D$ 高于枯水期(图5),即丰水期水质好于枯水期。此外,东江干流部分采样断面的浮游植物物种多样性受到一定程度损害,处于轻度~中污染状态。

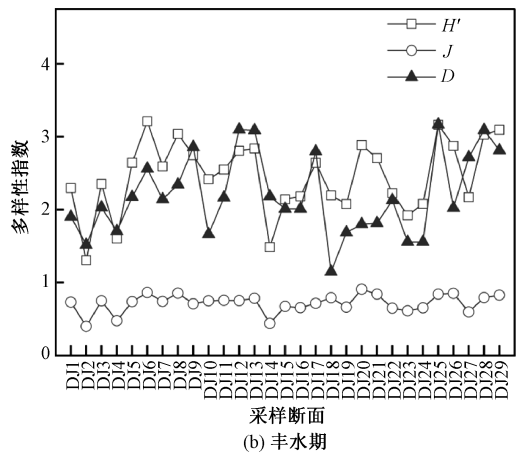
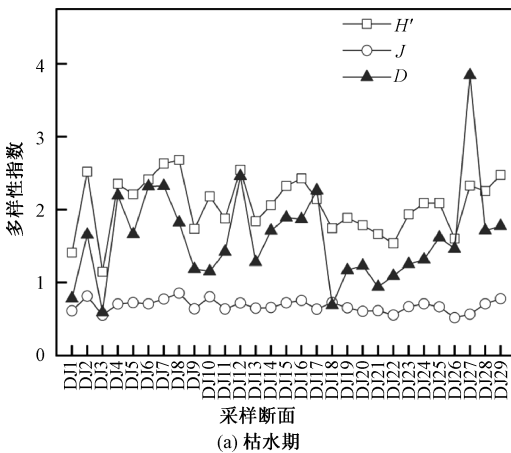


图4 浮游植物多样性指数空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of phytoplankton diversity index

## 2.2 水环境因子变化特征

东江干流各采样断面不同水期的水环境因子变化特征如表3所示。ANOVA结果表明,WT、pH、DO、TN、TUR在不同水期差异显著( $P < 0.05$ )。尽管不同水期的 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、SD差异不显著,但仍可观察到水期变化对这些因子

的影响。 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和SD从枯水期到丰水期均有下降,均值分别从枯水期的1.86 mg/L、0.30 mg/L和1.43 m下降至丰水期的1.61 mg/L、0.23 mg/L和1.06 m。TP在不同水期间的变化不显著。水环境因子变化特征显示,东江干流丰水期水质总体优于枯水期。

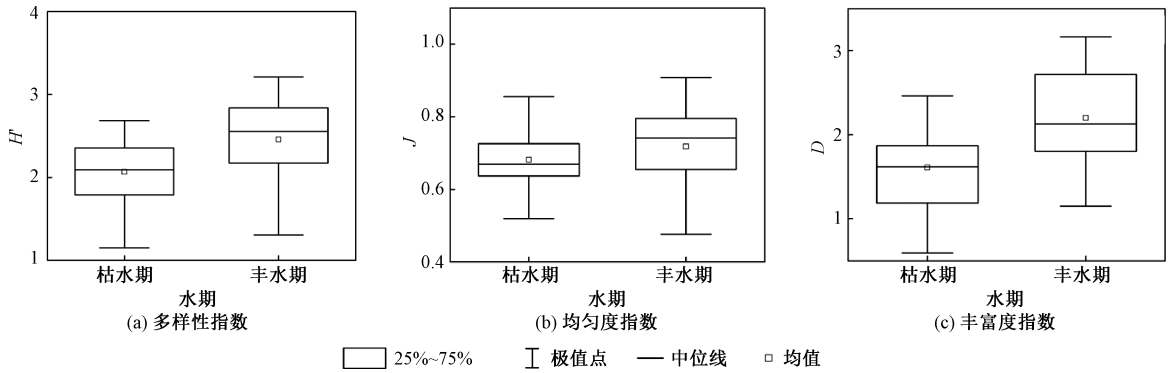


图5 不同水期浮游植物物种多样性变化

Fig. 5 Variations in phytoplankton species diversity in different water periods

表3 不同水期东江干流水环境因子变化特征

Table 3 Variation characteristics of water environmental factors during different water period in the main stream of Dongjiang River

水质指标	枯水期		丰水期		P
	范围	均值±标准差	范围	均值±标准差	
WT/℃	12.10~26.80	17.61±3.65	19.10~32.40	27.20±3.91	<0.001
pH	7.01~7.98	7.52±0.26	6.20~7.80	7.32±0.43	0.034
DO/(mg/L)	5.61~7.80	7.04±0.60	5.07~7.41	6.56±0.58	0.004
COD <sub>Mn</sub> /(mg/L)	1.05~3.69	1.86±0.60	1.00~2.48	1.61±0.37	0.063
NH <sub>3</sub> -N/(mg/L)	0.09~1.06	0.30±0.20	0.06~0.94	0.23±0.17	0.153
TP/(mg/L)	0.02~0.13	0.05±0.02	0.02~0.14	0.06±0.03	0.054
TN/(mg/L)	1.07~4.26	1.93±0.71	0.86~4.16	1.49±0.75	0.026
TUR/NTU	2.00~21.50	5.90±3.42	3.00~44.80	19.25±14.61	<0.001
SD/m	0.10~5.35	1.43±0.86	0.30~5.46	1.06±0.99	0.148

### 2.3 浮游植物群落结构与水环境因子的关系

使用 SPSS Statistics 27 软件对所选水环境因子与研究点位的浮游植物密度及生物量进行 Pearson 相关性分析(表4)。

结果显示,水环境因子中,WT 与 pH 呈极显著相关关系( $P<0.01$ ),TUR 与 COD<sub>Mn</sub>、TN、SD

呈极显著相关关系( $P<0.01$ ),DO 与 TP 呈显著相关关系( $P<0.05$ ),TN 与 NH<sub>3</sub>-N 呈极显著相关关系( $P<0.01$ )。此外,浮游植物密度与 WT、DO、TUR 显著相关。由此可知,WT、DO、TUR 是东江干流浮游植物群落结构的关键水环境影响因子。

表4 浮游植物密度及生物量与水环境因子的相关性分析

Table 4 Correlation analysis of phytoplankton density and biomass with water environmental factors

水质指标	WT	pH	DO	COD <sub>Mn</sub>	NH <sub>3</sub> -N	TP	TN	TUR	SD	密度	生物量
WT	1	-0.350**	-0.222	-0.139	-0.106	0.139	-0.183	0.591**	-0.132	0.373**	0.243
pH		1	0.442**	-0.304*	0.109	-0.444**	-0.086	0.250	-0.246	0.094	0.136
DO			1	-0.163	-0.165	-0.324*	-0.167	0.092	0.065	-0.276*	-0.110
COD <sub>Mn</sub>				1	0.010	0.207	0.264*	-0.357**	0.245	-0.117	-0.142
NH <sub>3</sub> -N					1	0.036	0.518**	0.003	-0.159	0.092	-0.085
TP						1	-0.150	-0.044	-0.083	-0.075	0.030
TN							1	-0.412**	0.085	0.019	-0.187
TUR								1	-0.546**	0.295*	0.336*
SD									1	-0.181	-0.168
密度										1	0.748**
生物量											1

注:“\*”表示在 0.05 水平(双尾)显著相关,“\*\*”表示在 0.01 水平(双尾)显著相关。

选择东江干流枯水期和丰水期优势种数据进行冗余分析(表5)。轴1、轴2共解释了52.0%

的枯水期优势种数据累积变化和34.1%的丰水期优势种数据累积变化;轴1、轴2的枯水期优势

种与水环境因子的相关系数分别为 0.809、0.688, 丰水期优势种与水环境因子的相关系数分别为 0.670、0.708; 轴 1 和轴 2 的枯水期物种-环境关系累积方差为 92.4%, 丰水期物种-环境关系

累积方差为 81.3%。经蒙特卡罗置换检验, 所有排序轴都达到显著水平 ( $P < 0.05$ ), 表明该排序可靠, 前两轴水环境因子与物种的相关性较高, 能较好地反映水环境因子对浮游植物分布的影响<sup>[30]</sup>。

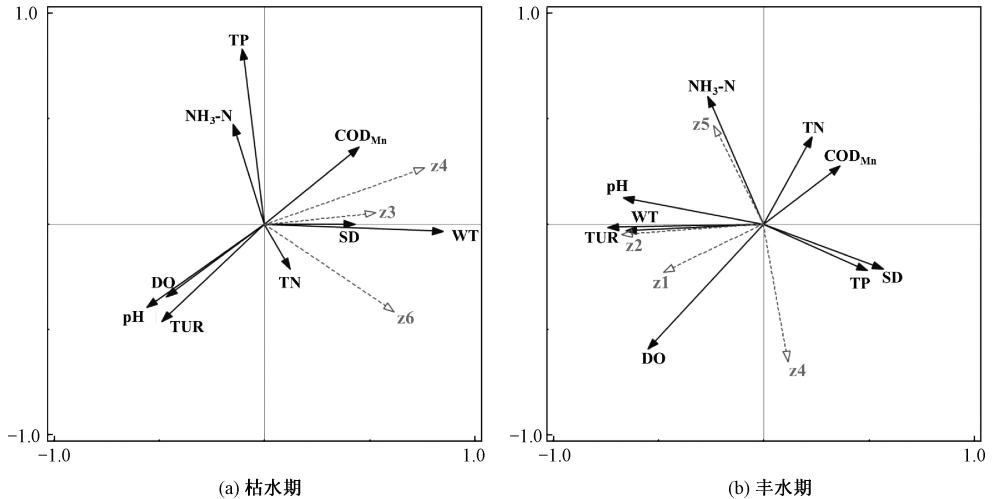
表 5 不同水期的浮游植物与水环境因子冗余分析结果

Table 5 Redundancy analysis results of phytoplankton and water environmental factors in different water periods

统计值	枯水期		丰水期	
	轴 1	轴 2	轴 1	轴 2
特征值	0.432	0.088	0.214	0.128
物种-水环境因子相关系数	0.809	0.688	0.670	0.708
物种数据累积方差/%	43.1	52.0	21.4	34.1
物种-环境关系累积方差/%	76.7	92.4	50.9	81.3

选取东江干流浮游植物优势种(6种)密度与环境因子(9项), 进行东江干流枯水期和丰水期浮游植物群落与水环境因子冗余分析。通过观察冗余分析排序图中的水环境因子向量长度可知, 东江干流枯水期以 WT、TP、TUR、pH、DO 的影响最为显著, 而丰水期的主要影响因子则为 DO、TUR、NH<sub>3</sub>-N、WT、pH(图 6)。冗余分析结

果表明, WT、DO、TUR 对浮游植物影响显著, 与前文 Pearson 相关性分析结果大致吻合。在枯水期, 颗粒直链藻、小环藻与 WT、COD<sub>Mn</sub>、SD 相关性较高, 隐藻与 WT、TN 相关性较高; 在丰水期, 空球藻、普通小球藻与 WT、TUR、DO 相关性较高, 小环藻与 DO、TP 相关性较高, 假鱼腥藻与 NH<sub>3</sub>-N 相关性较高。



注: z1~z6 对应的优势种类见 2。

图 6 东江干流枯水期和丰水期浮游植物优势种与水环境因子的冗余分析结果

Fig. 6 Redundancy analysis results between phytoplankton dominant species and water environmental factors during dry and wet season in the main stream of Dongjiang River

### 3 讨论

#### 3.1 浮游植物群落结构特征分析

东江干流枯水期及丰水期的浮游植物群落组成均以绿藻-硅藻型为主。不同水期的浮游植物物种组成差异显著, 其中枯水期硅藻物种数明显高于丰水期, 绿藻、蓝藻物种数则低于丰水期。枯

水期东江干流浮游植物密度以硅藻(占比高于 65%)为最高, 丰水期浮游植物密度则以绿藻、蓝藻(二者合计占比高于 81%)为最高。由于绿藻和硅藻能够耐受不同的营养盐及温度条件, 我国大多数河流的主要优势类群均属于这两个门类<sup>[31-33]</sup>。丰水期的高温条件会提升蓝藻的物种数和密度, 使之成为主要优势类群<sup>[34]</sup>。分析不同水期各采样点位的浮游植物群落密度发现: 在枯



水期, DJ18~DJ21、DJ27 等下游河段点位的密度较高;在丰水期, DJ2、DJ4~DJ6、DJ9 等上游河段点位的密度较高(图 3)。研究区域下游主要为居民区,枯水期河流水量较低,居民生活污水输移速度较慢,其中的氮磷物质易引发浮游植物密度上升。东江上游两岸以畜禽养殖业和种植业为主,丰水期的降雨冲刷作用导致大量氮磷物质进入河流,叠加高温条件后,使得上游河段较易出现浮游植物密度上升的情况<sup>[35-37]</sup>。如表 2 所示,东江干流丰水期的优势种类数高于枯水期,且优势种的优势度总体低于枯水期,表明丰水期群落结构比枯水期稳定<sup>[38]</sup>。不同水期共有的优势种为小环藻,其喜好静水、磷充足环境,耐受中污染水体<sup>[39]</sup>。枯水期小环藻优势度(0.140)高于丰水期(0.033),而研究区域不同水期的磷浓度变化不大,表明枯水期的低流速条件为小环藻提供了良好的生长环境。此外,枯水期优势种还包括硅藻门的颗粒直链藻、隐藻门的隐藻,丰水期优势种还包括绿藻门的空球藻和普通小球藻、蓝藻门的假鱼腥藻。值得注意的是,人类活动输入的氮磷营养盐可使假鱼腥藻大量增殖,其大规模分解产生的蓝藻毒素则会对人畜造成危害<sup>[40]</sup>。东江干流在丰水期具备产生蓝藻水华的潜力,可考虑应用遥感技术强化对该区域的监控。枯水期和丰水期的优势种类数分别为 3 种和 4 种,表明东江干流浮游植物群落结构相对简单<sup>[38]</sup>。

在水生态评价中,多样性指数常用于反映水体的浮游植物群落状况及水环境质量。一般而言,多样性指数越高,表示浮游植物群落受外界干扰越少或越稳定,所处水体质量较好<sup>[41]</sup>。江源等<sup>[42-43]</sup>分别于 2009 年 7 月(丰水期)及 2010 年 1 月(枯水期)对东江干流浮游植物群落结构进行了采样分析,计算得出丰水期和枯水期的  $H'$ 、 $J$ 、 $D$  变化范围分别为 3.43~4.33 和 1.02~2.47、0.33~0.95 和 0.56~0.97、1.28~10.43 和 1.27~4.65。其中: $H'$  和  $D$  均呈现为丰水期高于枯水期,与本文研究结果一致;而丰水期  $J$  低于枯水期,即东江干流丰水期浮游植物生物量的分类均匀度低于枯水期。王俊颖等<sup>[41]</sup>研究认为, $J$  的水质指示准确度低于  $H'$  和  $D$ 。相比 2009 年丰水期与 2010 年枯水期,东江干流 2022 年丰水期、枯水期  $H'$  和  $D$  均有所下降,表明近年来东江干流浮游植物群落稳定性及水体质量有所下降。

### 3.2 水环境因子与浮游植物群落结构关系分析

研究表明,水环境因子对浮游植物群落的形成与变化具有重要影响<sup>[44]</sup>。由前文 Pearson 相关性分析结果可知,WT、DO、TUR 对水体浮游植物群落结构的影响较为显著。WT 是最直接的浮游植物生长影响因子,适宜的温度可促进浮游植物生长。一般而言,绿藻门、蓝藻门易在高温环境下形成优势群,而硅藻门则易在相对低温条件下快速形成物种优势<sup>[45]</sup>。根据冗余分析结果,枯水期 WT 与硅藻门及隐藻门优势种呈正相关;丰水期 WT 与绿藻门、蓝藻门优势种呈正相关,但与硅藻门优势种呈负相关(图 5)。由此可知,丰水期平均 27.20 °C 的温度条件不利于硅藻门小环藻的生长,这与许珍等<sup>[46]</sup>的研究结果相一致。

DO 也是影响浮游植物群落的关键环境因子。水体中 DO 的变化主要源于大气复氧,以及浮游植物光合作用产生氧气、呼吸作用和衰亡分解消耗氧气<sup>[47]</sup>。在本研究中,根据冗余分析结果,枯水期 DO 与硅藻门、隐藻门优势种呈负相关[图 5(a)]。前人研究认为,其他藻类在 DO 升高的条件下会与硅藻、隐藻竞争水体中的资源,因而 DO 与这些藻类呈现负相关性<sup>[48-49]</sup>。丰水期 DO 与绿藻门、硅藻门优势种呈正相关,表明浮游植物光合作用会促进 DO 上升。值得注意的是,丰水期 DO 与蓝藻门的假鱼腥藻呈负相关,即该物种的分解、呼吸作用强于光合作用。根据周利等<sup>[50]</sup>的研究可知,东江干流丰水期氮浓度升高有助于假鱼腥藻的生长,而磷浓度过高不利于该物种的增殖。图 5(b)也显示了假鱼腥藻与 TP 的负相关关系。由此可知,调查区域的磷限制条件导致该物种与 DO 呈负相关关系,DO 上升会使其分解、呼吸作用的效率高于光合作用。相似的研究结果可见于路学堂<sup>[51]</sup>的研究。

TUR 反映水体对光线的阻碍程度,与水体中泥沙、浮游生物等杂质的含量相关<sup>[52]</sup>。如图 5(a)所示,枯水期 TUR 与硅藻门、隐藻门优势种呈负相关,表明 TUR 越高,上述浮游植物的光合作用效率越低,进而导致有机质的生产减少且浮游植物的生长受到限制<sup>[53]</sup>。类似的情况可见于丰水期硅藻门优势种小环藻[图 5(b)]。丰水期 TUR 与绿藻门、蓝藻门优势种呈正相关关系。安睿等<sup>[54]</sup>及叶又茵等<sup>[55]</sup>研究发现,蓝藻、绿藻比硅藻更能适应低光照条件,因而蓝藻、绿藻在较高 TUR 条件下表现出更强的生长繁殖能力。

随着水生态环境保护由以污染防治为主向水资源、水环境、水生态等流域要素系统治理、统筹推进转变,水生态监测的重要性和必要性日渐显现。当前,应根据东江流域水生态系统特点和生态管理需求,统筹现有地表水环境监测网,形成水生态环境监测网络,并逐步建立以水生态系统健康评价为核心的监测评价指标体系,通过开展东江流域水生态监测评价,准确识别和科学量化流域水生态问题及其变化趋势,引导相关地市科学开展水生态系统结构完整性恢复工作,有效提升东江水生态质量。

#### 4 结论

1) 东江干流枯水期、丰水期浮游植物群落结构均为绿藻-硅藻型。其中,枯水期水样中共检出浮游植物 7 门 186 种,丰水期水样中共检出浮游植物 7 门 181 种。枯水期和丰水期共有的浮游植物优势种为硅藻门的小环藻。

2) 东江干流丰水期的浮游植物密度、生物量、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数、Margalef 丰富度指数均高于枯水期。在枯水期,研究区域下游浮游植物密度较高,而在丰水期,上游河段浮游植物密度及生物量高于其他河段。

3) 东江干流丰水期水质总体优于枯水期,其中 WT、pH、DO、TN、TUR 在不同水期之间存在显著差异。

4) WT、DO、TUR 是东江干流浮游植物群落结构的主要水环境影响因子。

#### 参考文献 (References):

[ 1 ] ZHANG H, ZONG R, HE H, et al. Biogeographic Distribution Patterns of Algal Community in Different Urban Lakes in China: Insights into the Dynamics and Co-existence [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, 100: 216-227.

[ 2 ] BARBOUR M T, GERRITSEN J, SNYDER B D, et al. Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wadeable Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates and Fish, Second Edition; EPA 841-B-99-002 [R]. Washington: USEPA, 1999.

[ 3 ] TIAN C, LU X, PEI H, et al. Seasonal Dynamics of Phytoplankton and Its Relationship with the Environmental Factors in Dongping Lake, China [J].

*Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185: 2 627-2 645.

- [ 4 ] GUO K, WU N, WANG C, et al. Trait Dependent Roles of Environmental Factors, Spatial Processes and Grazing Pressure on Lake Phytoplankton Metacommunity [J]. *Ecological Indicators*, 2019, 103: 312-320.
- [ 5 ] 余业鑫,李艳,向罗京,等. 汉江下游干支流浮游植物群落特征及其对水质的指示评价[J]. *中国环境监测*, 2022, 38(1): 124-135.
- YU Yexin, LI Yan, XIANG Luojing, et al. Phytoplankton Assemblage Characteristic and Its Indication on Water Quality in the Lower Reaches of the Hanjiang River [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2022, 38(1): 124-135.
- [ 6 ] 彭定华,刘哲,张彦峥,等. 水生态环境质量评价方法及在黄河流域的应用进展[J]. *中国环境监测*, 2023, 39(2): 41-54.
- PENG Dinghua, LIU Zhe, ZHANG Yanzheng, et al. Evaluation Methods of Aquatic Ecological Environment Quality and Their Application Progress in the Yellow River Basin [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2023, 39(2): 41-54.
- [ 7 ] 古小超,王子璐,赵兴华,等. 河流生态环境健康评价技术体系构建及应用[J]. *中国环境监测*, 2023, 39(3): 87-98.
- GU Xiaochao, WANG Zilu, ZHAO Xinghua, et al. Establishment and Application of the Index System for River Ecosystem Health Assessment [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2023, 39(3): 87-98.
- [ 8 ] SOMMER U, ADRIAN R, DE SENERPONT DOMIS L, et al. Beyond the Plankton Ecology Group (PEG) Model: Mechanisms Driving Plankton Succession [J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2012, 43: 429-448.
- [ 9 ] 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[J]. *生态学报*, 2021, 41(1): 224-234.
- MA Yu, LU Xinxin, FAN Yawen. Correlation Between Phytoplankton Community Patterns and Environmental Factors in Harbin Section of the Songhua River [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(1): 224-234.
- [ 10 ] 白海锋,王怡睿,宋进喜,等. 渭河陕西段浮游植物群落结构时空变化与影响因子分析[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(8): 3 290-3 301.
- BAI Haifeng, WANG Yirui, SONG Jinxi, et al. Spatio-

- Temporal Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community Structure in the Shaanxi Section of Weihe River, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(8): 3 290-3 301.
- [11] 李思阳,张娟,姚玲爱,等.西枝江流域浮游植物群落结构特征与主要环境因子的关系研究[J].*环境科学学报*,2016,36(6):1 939-1 947.  
LI Siyang, ZHANG Juan, YAO Ling'ai, et al. The Community Structure of Phytoplankton and Its Relationship with Environmental Factors in Xizhijiang River [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(6): 1 939-1 947.
- [12] 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):1 093-1 103.  
YANG Xiao, MA Jishun, ZHANG Huan, et al. Community Structure and the Water Quality During Different Hydrological Periods in Poyang Lake [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2021, 45(5): 1 093-1 103.
- [13] 朱以敏,徐洪伟,张殊闻,等.大庆库里泡浮游植物群落时空变化及其与环境因子的相关性[J].*中国环境监测*,2022,38(4):104-117.  
ZHU Yimin, XU Hongwei, ZHANG Shuwen, et al. Spatio-Temporal Changes of Phytoplankton Communities and Their Correlation with Environmental Factors in Kulipao Lake, Daqing City [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2022, 38(4): 104-117.
- [14] 周夏飞,於方,刘琦,等.东江流域突发水污染风险分区研究[J].*生态学报*,2020,40(14):4 813-4 822.  
ZHOU Xiafei, YU Fang, LIU Qi, et al. Risk Zoning of Sudden Water Pollution in Dongjiang River Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(14): 4 813-4 822.
- [15] 裴德富,徐丽,赵学敏,等.基于同位素示踪方法的东江流域氮素分布特征和来源解析[J].*环境科学学报*,2023,43(3):206-215.  
PEI Defu, XU Li, ZHAO Xuemin, et al. Characterization of Nitrogen Distribution and Source Analysis in the Dongjiang River Basin Based on Isotope Tracing Method [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2023, 43(3): 206-215.
- [16] 孟伟,范俊韬,张远.流域水生态系统健康与生态文明建设[J].*环境科学研究*,2015,28(10):1 495-1 500.  
MENG Wei, FAN Juntao, ZHANG Yuan. Freshwater Ecosystem Health and Ecological Civilization Construction at the Watershed Scale [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(10): 1 495-1 500.
- [17] 张嘉嘉,赵景波,董雯,等.关中平原近十年来渭河水环境演变研究[J].*干旱区资源与环境*,2007(1):68-72.  
ZHANG Jiajia, ZHAO Jingbo, DONG Wen, et al. Water Environment Changes of Wei River in Guanzhong Plain in Recent Years [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2007(1): 68-72.
- [18] 闵文武,王培培,李丽娟,等.渭河流域浮游植物功能群与环境因子的关系[J].*环境科学研究*,2015,28(9):1 397-1 406.  
MIN Wenwu, WANG Peipei, LI Lijuan, et al. Relationship Between Phytoplankton Functional Groups and Environmental Factors in the Wei River Basin [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(9): 1 397-1 406.
- [19] 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[J].*中国环境科学*,2022,42(1):380-392.  
ZHANG Hui, PENG Yuqiong, ZOU Xianni, et al. Characteristics of Phytoplankton Functional Groups and Their Relationships with Environmental Factors in Xinfengjiang Reservoir [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(1): 380-392.
- [20] 陈红,刘清,潘建雄,等.灞河城市段浮游生物群落结构时空变化及其与环境因子的关系[J].*生态学报*,2019,39(1):173-184.  
CHEN Hong, LIU Qing, PAN Jianxiong, et al. Spatial and Temporal Variation of the Plankton Community and Its Relationship with Environmental Factors in the City Section of the Ba River [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(1): 173-184.
- [21] 广东省水利厅.东江流域概况[EB/OL].(2021-06-28)[2023-07-10].[http://slt.gd.gov.cn/ysgk\\_new/lygk/djly/content/post\\_3349285.html](http://slt.gd.gov.cn/ysgk_new/lygk/djly/content/post_3349285.html).
- [22] 章宗涉,黄祥飞.淡水浮游生物研究方法[M].北京:科学出版社,1995.
- [23] 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.
- [24] 生态环境部.地表水环境质量监测技术规范:HJ 91.2—2022[S].北京:中国环境出版社,2022.
- [25] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会.水和废水监测分析方法[M].4版北京:中国环境科学出版社,2002.
- [26] LAMPITT R S, WISHNER K F, TURLEY C M, et al.

- Marine Snow Studies in the Northeast Atlantic Ocean; Distribution, Composition and Role as a Food Source for Migrating Plankton [J]. *Marine Biology*, 1993, 116:689-702.
- [27] BEYENE A, ADDIS T, KIFLE D, et al. Comparative Study of Diatoms and Macroinvertebrates as Indicators of Severe Water Pollution: Case Study of the Kebena and Akaki Rivers in Addis Ababa, Ethiopia [J]. *Ecological Indicators*, 2009, 9(2):381-392.
- [28] 周然, 彭士涛, 覃雪波, 等. 渤海湾浮游植物与环境因子关系的多元分析[J]. *环境科学*, 2013, 34(3):864-873.  
ZHOU Ran, PENG Shitao, QIN Xuebo, et al. Phytoplankton Assemblages and Their Relation to Environmental Factors by Multivariate Statistic Analysis in Bohai Bay [J]. *Environmental Science*, 2013, 34(3):864-873.
- [29] 邢锴, 张尘月, 任晓冬. 黄洲河流域浮游植物的季节变化及其环境影响因子[J]. *水生态学杂志*, 2021, 42(6):49-56.  
XING Kai, ZHANG Chenyue, REN Xiaodong. Seasonal Variation of Phytoplankton Community and Driving Environmental Factors in the Huangzhou River Basin [J]. *Journal of Hydroecology*, 2021, 42(6):49-56.
- [30] YAN F, YUHONG W, YIHAO L, et al. Feature of Phytoplankton Community and Canonical Correlation Analysis with Environmental Factors in Xiaoqing River Estuary in Autumn [J]. *Procedia Engineering*, 2012, 37:19-24.
- [31] BOYD P W, LAW C S, WONG C S, et al. The Decline and Fate of an Iron-Induced Subarctic Phytoplankton Bloom [J]. *Nature*, 2004, 428(6 982):549-553.
- [32] 杨宋琪, 祖廷勋, 王怀斌, 等. 黑河张掖段浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. *湖泊科学*, 2019, 31(1):159-170.  
YANG Songqi, ZU Tingxun, WANG Huaibin, et al. Relationship Between the Structure of Phytoplankton Community and Environmental Factors in the Zhangye Section of Heihe River [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(1):159-170.
- [33] 李娜, 周绪申, 孙博闻, 等. 白洋淀浮游植物群落的时空变化及其与环境因子的关系[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(3):772-783.  
LI Na, ZHOU Xushen, SUN Bowen, et al. Spatiotemporal Variation of Phytoplankton Community and Its Relationship with Environmental Factors in Lake Baiyangdian [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(3):772-783.
- [34] 陈开宁, 周万平, 鲍传和, 等. 浮游植物对湖泊水体生态重建的响应——以太湖五里湖大型围隔示范工程为例[J]. *湖泊科学*, 2007, 19(4):359-366.  
CHEN Kaining, ZHOU Wanping, BAO Chuanhe, et al. Response of Phytoplankton to Ecological Restoration in Eutrophic Lakes: An Experimental Large Enclosure in Wuli Lake, Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2007, 19(4):359-366.
- [35] 胡飞飞. 东江上游高风险支流水体农药类新兴污染物特征研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016.
- [36] 苟婷, 马千里, 许振成, 等. 贝江浮游藻类群落特征及富营养化风险分析[J]. *环境科学*, 2015, 36(3):946-954.  
GOU Ting, MA Qianli, XU Zhencheng, et al. Phytoplankton Community Structure and Eutrophication Risk Assessment of Beiji River [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(3):946-954.
- [37] 李泽敏, 马静, 景连东. 小型生活污水接纳水体浮游植物增长的氮、磷限制研究[J]. *水生生物学报*, 2016, 40(2):337-342.  
LI Zemin, MA Jing, JING Liandong. Study of the Phytoplankton Growth Limited by N and P in a Small Domestic Sewage-Receiving Water Body [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2016, 40(2):337-342.
- [38] 高梦蝶, 李艳粉, 李艳利, 等. 晋城市沁河流域秋季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. *环境科学*, 2022, 43(9):4 576-4 586.  
GAO Mengdie, LI Yanfen, LI Yanli, et al. Characteristics of Phytoplankton Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Autumn in Qinhe River Basin of Jincheng Region [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(9):4 576-4 586.
- [39] 李建, 尹炜, 贾海燕, 等. 汉江中下游硅藻水华研究进展与展望[J]. *水生态学杂志*, 2020, 41(5):136-144.  
LI Jian, YIN Wei, JIA Haiyan, et al. Research Progress on Diatom Blooms in the Middle and Lower Hanjiang River: Review and Advances [J]. *Journal of Hydroecology*, 2020, 41(5):136-144.
- [40] 钟可儿, 杨潇, 马吉顺, 等. 长江干流浮游植物群落结构空间异质性及其影响因素[J]. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(11):2 458-2 472.  
ZHONG Ke'er, YANG Xiao, MA Jishun, et al. Spatial Heterogeneity and Driving Factors of Phytoplankton Community Structure in the Main Stem of the Yangtze



- River [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(11): 2 458-2 472.
- [41] 王俊颢, 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[J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39(8): 1 031-1 041.
- WANG Junjie, XIA Yu, YU Xinping. Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Water Quality Evaluation of Planktonic Algae in the Middle and Lower Reaches of Ganjiang River [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2023, 39(8): 1 031-1 041.
- [42] 江源, 王博, 杨浩春, 等. 东江干流浮游植物群落结构特征及与水质的关系[J]. 生态环境学报, 2011, 20(11): 1 700-1 705.
- JIANG Yuan, WANG Bo, YANG Haochun, et al. Community structure of Phytoplankton and Its Relation with Water Quality in Dongjiang River [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(11): 1 700-1 705.
- [43] 王珊, 于明, 刘全儒, 等. 东江干流浮游植物的物种组成及多样性分析[J]. 资源科学, 2013, 35(3): 473-480.
- WANG Shan, YU Ming, LIU Quanru, et al. Phytoplankton Species Composition and Biodiversity in Dongjiang River [J]. Resources Science, 2013, 35(3): 473-480.
- [44] ARHONDITSIS G B, WINDER M, BRETT M T, et al. Patterns and Mechanisms of Phytoplankton Variability in Lake Washington (USA) [J]. Water Research, 2004, 38(18): 4 013-4 027.
- [45] CANALE R P, VOGEL A H. Effects of Temperature on Phytoplankton Growth [J]. Journal of the Environmental Engineering Division, 1974, 100(1): 231-241.
- [46] 许珍, 殷大聪, 陈进, 等. 温度和光强对 4 种常见水华藻叶绿素荧光特性的影响[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(6): 39-44.
- XU Zhen, YIN Dacong, CHEN Jin, et al. Effects of Temperature and Illumination on Chlorophyll Fluorescence Characteristics of Four Common Bloom Algae [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2017, 34(6): 39-44.
- [47] D'AUTILIA R, FALCUCCI M, HULL V, et al. Short Time Dissolved Oxygen Dynamics in Shallow Water Ecosystems [J]. Ecological Modelling, 2004, 179(3): 297-306.
- [48] 孙文卓. 白洋淀藻类季节性群落特征及驱动机制 [D]. 保定: 河北大学, 2022.
- [49] 周胤灵, 陈燕飞, 周元, 等. 黄柏河流域不同区域浮游植物群落特征及总磷分析[J]. 生物资源, 2023, 45(2): 125-133.
- ZHOU Yinling, CHEN Yanfei, ZHOU Yuan, et al. Phytoplankton Community Characteristics and Total Phosphorus Analysis in Different Areas of the Huangbai River Basin [J]. Biotic Resources, 2023, 45(2): 125-133.
- [50] 周利, 王茂伟, 高静思, 等. 氮、磷浓度对伪鱼腥藻生长及光合生理的影响[J]. 环境工程, 2020, 38(11): 110-116, 134.
- ZHOU Li, WANG Maowei, GAO Jingsi, et al. Effects of Nitrogen and Phosphorus Concentrations on Growth and Photosynthetic Physiology of *Pseudanabaena* sp. [J]. Environmental Engineering, 2020, 38(11): 110-116, 134.
- [51] 路学堂. 东平湖浮游植物群落结构与驱动因子及蓝藻水华可能性研究 [D]. 济南: 山东大学, 2013.
- [52] SILVOSO J, IZAGUIRRE I, ALLENDE L. Picoplankton Structure in Clear and Turbid Eutrophic Shallow Lakes: A Seasonal Study [J]. Limnologia, 2011, 41(3): 181-190.
- [53] SHEN P P, LI G, HUANG L M, et al. Spatio-Temporal Variability of Phytoplankton Assemblages in the Pearl River Estuary, with Special Reference to the Influence of Turbidity and Temperature [J]. Continental Shelf Research, 2011, 31(16): 1 672-1 681.
- [54] 安睿, 王凤友, 于洪贤, 等. 小兴凯湖浮游植物功能群特征及其影响因子[J]. 环境科学研究, 2016, 29(7): 985-994.
- AN Rui, WANG Fengyou, YU Hongxian, et al. Characteristics and Physical Factors of Phytoplankton Functional Groups in Small Xingkai Lake [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(7): 985-994.
- [55] 叶又茵, 项鹏, 王磊, 等. 南流江河口区春季浮游植物群落结构组成与分布特征[J]. 海洋学报, 2017, 39(10): 111-123.
- YE Youyin, XIANG Peng, WANG Lei, et al. The Structure and Distribution of Phytoplankton Community in the Nanliu River Estuary During Spring [J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(10): 111-123.