

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2023.05.007

三峡库区不同支流浮游植物群落 季节动态比较研究

王佳慧, 史邵华, 付千好, 曾波, 阿依巧丽

西南大学 生命科学学院/三峡库区生态环境教育部重点实验室/重庆市三峡库区植物生态与资源重点实验室, 重庆 400715

摘要: 为了解三峡库区支流汝溪河和龙河浮游植物群落季节动态及其差异, 分别于 2021 年春季(3 月)、夏季(7 月)、秋季(9 月)以及冬季(11 月)对汝溪河和龙河的浮游植物群落和水环境进行了调查。结果表明: 汝溪河共采集到浮游植物 7 门 139 种; 龙河共采集到浮游植物 6 门 108 种。汝溪河不同季节浮游植物丰度变动范围为 $0.44 \times 10^5 \sim 59.87 \times 10^5$ 个/L, 以硅藻门、蓝藻门、绿藻门为主; 龙河不同季节浮游植物丰度变动范围为 $0.28 \times 10^5 \sim 16.49 \times 10^5$ 个/L, 春季以甲藻门为主, 其他季节均以硅藻门为主。汝溪河共鉴定出优势种 11 种, 春季以硅藻门为优势类群, 其他季节均以蓝藻门为优势类群; 与汝溪河不同, 龙河共鉴定出优势种 26 种, 春季以甲藻门为优势类群, 其他季节均以硅藻门为优势类群。汝溪河 Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀性指数均在冬季显著高于春季和夏季 ($p < 0.05$); 龙河 Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀性指数在冬季显著高于夏季 ($p < 0.05$); 龙河和汝溪河 Margalef 丰富度指数在不同季节之间差异无统计学意义 ($p > 0.05$)。Pearson 相关分析表明: 汝溪河浮游植物总丰度与溶解氧和高锰酸盐指数呈显著正相关; 龙河浮游植物总丰度与 pH 值、溶解氧、氨氮和磷酸盐呈显著正相关。冗余分析表明: 汝溪河浮游植物群落在春季主要受 pH 值、溶解氧、电导率、总氮和总磷的影响, 在夏季和秋季主要受水温和浊度的影响, 在冬季主要受透明度的影响; 龙河浮游植物群落在春季主要受氧化还原电位的影响, 在夏季主要受浊度的影响, 在秋季和冬季主要受水温、电导率和流速的影响。研究为保护三峡库区支流物种多样性提供了一定的理论依据。

关键词: 三峡库区; 不同支流; 藻类多样性; 水体理化性质;
季节差异

中图分类号: Q948

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2023)05-0068-15

Comparative Study on the Seasonal Dynamics of Phytoplankton Communities in Different Tributaries of the Three Gorges Reservoir

WANG Jiahui, SHI Shaohua, FU Qianyu,
ZENG Bo, AYI Qiaoli

收稿日期: 2022-09-21

基金项目: 国家科技基础性工作专项(2014FY120200); 国务院三峡办三峡后续工作库区生态与生物多样性保护专项(5000002013BB5200002)。

作者简介: 王佳慧, 硕士研究生, 主要从事环境生态学研究。

通信作者: 阿依巧丽, 副教授, 硕士研究生导师。

*School of Life Sciences, Southwest University/Key Laboratory of Eco-environments
in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education/Chongqing Key Laboratory of
Plant Ecology and Resources Research in Three Gorges Reservoir Region, Chongqing 400715, China*

Abstract: In order to understand the seasonal dynamics of phytoplankton communities and their differences in Ruxi River and Longhe River, tributaries of the Three Gorges Reservoir, the phytoplankton communities and water environments of Ruxi River and Longhe River were investigated in spring (March), summer (July), autumn (September) and winter (November) in 2021, respectively. A total of 139 species of phytoplankton belonging to 7 phyla were collected from the Ruxi River, and a total of 108 species of phytoplankton belonging to 6 phyla were collected from the Longhe River. The range of variation of phytoplankton abundance in different seasons in Ruxi River was $0.44 \times 10^5 \sim 59.87 \times 10^5$ cells/L, dominated by Bacillariophyta, Cyanophyta, and Chlorophyta in all seasons. But, the range of variation of phytoplankton abundance in different seasons in Longhe River was $0.28 \times 10^5 \sim 16.49 \times 10^5$ cells/L, dominated by Pyrrophyta in spring and Bacillariophyta in other seasons. A total of 11 dominant species were identified in Ruxi River, with Bacillariophyta as the dominant taxon in spring and Cyanophyta in other seasons. Unlike Ruxi River, a total of 26 dominant species were identified in Longhe River, with Pyrrophyta as the dominant taxon in spring and Bacillariophyta in other seasons. The Shannon-Wiener index and Pielou index of Ruxi River were significantly higher in winter than in spring and summer ($p < 0.05$). However, the Shannon-Wiener index and Pielou index of Longhe River were significantly higher in winter than in summer ($p < 0.05$). The Margalef index of Longhe River and Ruxi River were not significantly different between the seasons ($p > 0.05$). Pearson correlation analysis showed that total phytoplankton abundance in Ruxi River was significantly and positively correlated with dissolved oxygen and permanganate index. However, total phytoplankton abundance in Longhe River was significantly and positively correlated with pH, dissolved oxygen, ammonia nitrogen. Orthophosphate Redundancy analysis showed that the phytoplankton community in Ruxi River was mainly influenced by pH, dissolved oxygen, electrical conductivity, total nitrogen and total phosphorus in spring, with water temperature and turbidity as the main factors affecting the phytoplankton community in summer and autumn, and transparency as the main factor determining the phytoplankton community in winter. Whereas, the phytoplankton community in Longhe River was mainly influenced by redox potential in spring, with turbidity as the main factor determining the phytoplankton in summer, and water temperature, electrical conductivity and flow rate as the main factors affecting the phytoplankton community in autumn and winter. The results of this study could provide some theoretical basis for the conservation of the species diversity in the tributaries of the Three Gorges Reservoir.

Key words: Three Gorges Reservoir; different tributaries; algal diversity; physical and chemical properties of water; seasonal differences

浮游植物处于水生生态系统食物链的最底端,是许多水生动物的主要食物来源,它们的丰度和群落组成直接影响水生生态系统的平衡^[1-2]。若水体中浮游植物的数量和种类过少,水生生态系统的物种多样性会下降,抗干扰能力会降低;若水体中浮游植物的数量过多,其群落结构过于单一,水体可能会发生水华,对水生生态系统及人类生活产生一系列的负面影响,如导致水体溶解氧降低^[3]、水生生态系统食物链和食物网被破坏^[4]、减少水生生态系统物种多样性^[5-6]、产生对消费者有毒的次生代谢产物^[7-8]等,因此,浮游植物的数量和物种组成直接影响着水生生态系统的物种多样性和功能稳定性。

随着季节的自然更替,水体中各种环境因子也在不断发生变化,如水温、光照、pH值、营养盐、溶解氧等^[9],水体中不同种类的浮游植物生长状况也在不断发生变化。大量研究表明,在春、秋季,硅藻常常成为水体中的优势种,而在夏季,蓝藻和绿藻往往占据主导地位^[10-13],因此,在同一生境中,水体中的浮游植物群落结构可能会随着季节的变化而变化。

三峡库区位于中国长江上游下段,拥有丰富的物种资源,被认为是中国最重要的生物多样性研究热点之一^[14]。由于人为活动的影响如修建大坝、污水排放等,三峡库区的生物多样性受到严重影响^[15-17]。三峡库区水体生物多样性的改变会对长江上游的生物多样性造成一定的影响。研究发现,三峡大坝的修建导致三峡库区水体流速变慢,进而使三峡库区支流和干流一些喜流水性的鱼类被迫向长江上游迁徙,导致长江上游的鱼类群落物种组成和功能类群发生改变^[18],因此,保护三峡库区水体生物多样性对维持整个长江生物多样性具有重要意义。浮游植物作为三峡库区水生生态系统中最重要初级生产者,对维持三峡库区水体生物多样性具有重要作用。三峡库区长江干流浮游植物物种多样性直接受到支流浮游植物物种多样性的影响,为了保护三峡库区水体物种多样性,了解支流浮游植物群落物种多样性变化就显得尤为重要。

三峡库区分布着许多大大小小的支流,其中一级支流有 38 条^[19]。不同支流所处的地理位置以及人为干扰程度不同,因此,每条支流为浮游植物提供的生长环境条件也不尽相同,如流速、水温、水体浊度等,导致不同支流的浮游植物群落可能存在一定的差异。目前,关于三峡库区不同支流浮游植物群落比较的研究较少。本研究选取了位于三峡库区北岸的一级支流汝溪河和位于三峡库区南岸的一级支流龙河作为研究对象,拟探究三峡库区不同支流浮游植物群落季节动态是否存在差异,为保护三峡库区水体物种多样性提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究支流概况及断面设置

汝溪河位于三峡库区北岸,发源于万州区分水镇三角函,流经梁平区与右支流汇合后,最后经忠县涂井乡汇入长江。该河主河道长 54.5 km,流域面积 720 km²,其中,忠县境内主河道长 25.4 km,流域面积 272.9 km²,年平均流量为 4.72 m³/s。忠县属于亚热带湿润季风气候,年平均气温 18.2 °C,年均降雨量 1 200 mm。龙河位于三峡库区南岸,发源于鄂渝交界处,是石柱县、丰都县境内最大的河流。龙河干流全长 164 km,流域面积 2 779 km²。龙河(丰都段)河流长 62.5 km,流域面积约 1 348 km²,年平均流量为 64.9 m³/s。丰都县年平均气温 18.0 °C,年均降雨量 1 229 mm。本研究中每条支流从上游至下游分别设置 4 个采样断面,其中汝溪河从上游至下游设置的 4 个采样断面分别为白庙(S1)、老涂井(S2)、龙滩大桥(S3)、汝溪河入江口(S4);龙河从上游至下游设置的 4 个采样断面分别为九溪沟大桥(S5)、下刀弓溪(S6)、两会口(S7)、龙河入江口(S8)(图 1)。本研究分别于 2021 年春季(3 月)、夏季(7 月)、秋季(9 月)以及冬季(11 月)开展野外调查研究工作。

1.2 样品采集和处理

样品采集方法参照《水环境监测规范》(SL219-2013),每个断面使用 5 L 的采水器分别采集左岸、中泓和右岸表层 0.5 m 处水样,采集的水样分别装入 550 mL 和 400 mL 采样瓶中,带回实验室用于营养盐指标的测定。用 25 # 浮游生物采集网(网孔 0.064 mm)于表层至 0.5 m 处划“∞”来回拖拽数次,将采集的浮游植物装入 50 mL 的采样瓶中,并立即加入 1.5 mL 鲁哥试剂进行固定,用于浮游植物定性鉴定;同时,采集 1 L 的表层水体装入采样瓶中,并立即加入 15 mL 鲁哥试剂现场固定,带回实验室浓缩至 30 mL 左右,用于浮游植物定量鉴定。将采集的浮游植物带回实验室于显微镜下进行物种鉴定并计数。本研究主要参照《中国淡水藻类》^[20]《中国淡水藻类:系统、分类及生态》^[21]《福建省大中型水库常见淡水藻类图集》^[22]《中国内陆水域常见藻类图谱》^[23]等进行浮游植物的物种鉴定。

1.3 水环境因子指标测定

水环境因子指标包括水温(WT),pH 值,氧化还原电位(ORP),电导率(EC),浊度(Tur),溶解氧(DO),流速(V),透明度(SD),高锰酸盐指数(COD_{Mn}),总氮(TN),硝态氮(NO₃⁻-N),氨氮(NH₄⁺-N),总磷(TP),磷酸盐(PO₄³⁻-P),总碱度(CaCO₃),叶绿素 a(Chl a)。WT, pH 值, ORP, EC, Tur, DO 使用 DS5X 多参数水质测定仪现场测定; V 使用国产 LS45A 型旋杯式流速仪测量(华正水文仪器有限公司,重庆); SD 使用赛氏圆盘现场测定; COD_{Mn}, TN, NO₃⁻-N, NH₄⁺-N, TP, PO₄³⁻-P, CaCO₃, 根据《水和废水监测分析方法》进行检测; 叶绿素 a 质量分数根据《水质叶绿素 a 的测定 分光光度法》测定。

1.4 数据分析

1.4.1 浮游植物群落结构分析

采用丰度、优势度(Y)、Shannon-Wiener 多样性指数(H)、Margalef 丰富度指数(D)和 Pielou 均匀度指数(J)对汝溪河和龙河浮游植物群落结构进行分析,各指标计算公式:

$$Y = (n_i / N) \times f_i \quad (1)$$

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

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

$$J = \frac{H}{\ln S} \quad (4)$$

式中, n_i 为样品中第 i 种浮游植物的个体数, N 为样品中浮游植物总个体数, f_i 为第 i 种浮游植物在各样点出现的频率, S 为浮游植物种类数。

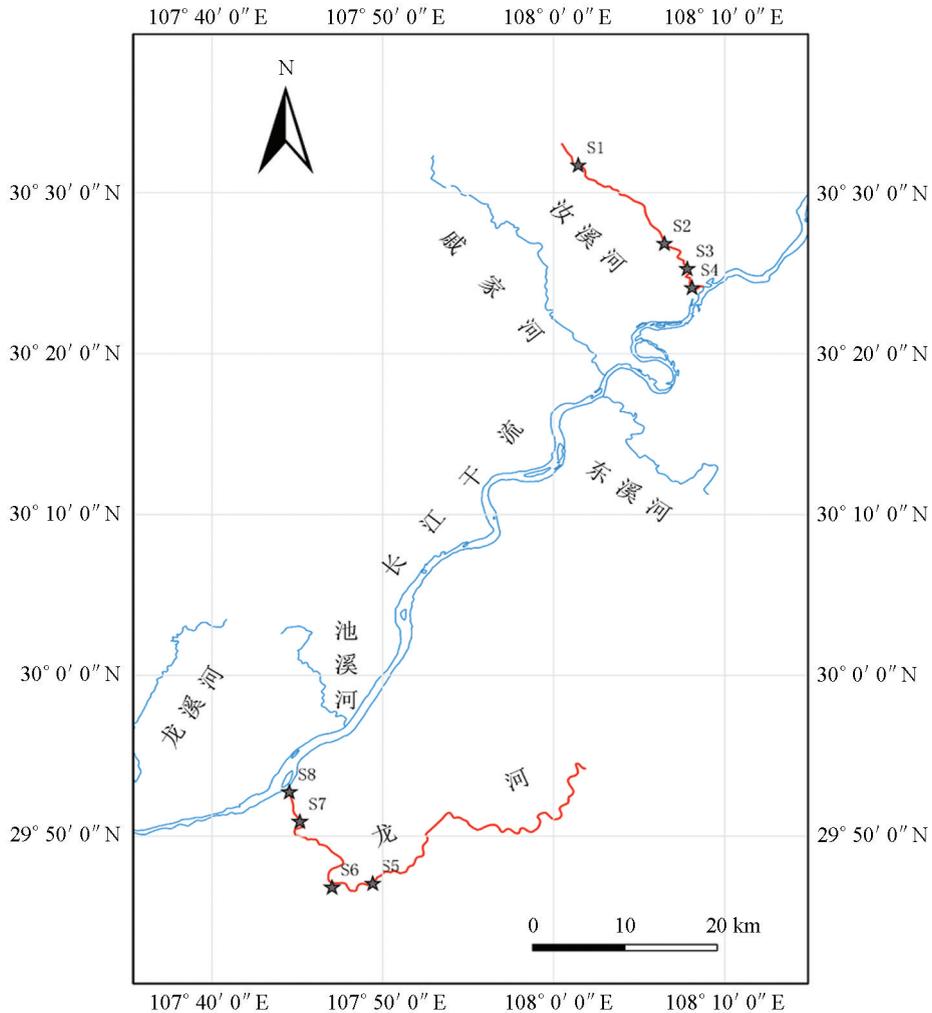


图 1 开展调查研究的支流地理位置

1.4.2 数据统计分析

采用 Microsoft Excel 2016, Origin 2021 和 SPSS 25.0 对环境因子指标和浮游植物物种数、丰度、优势种以及多样性指数进行相关统计分析和作图。

采用 Pearson 相关性分析浮游植物总丰度、优势藻门丰度、多样性指数与环境因子之间的关系。

采用典范排序分析汝溪河和龙河浮游植物群落与环境因子之间的相关性, 用于排序分析的种群为汝溪河和龙河浮游植物相对丰度大于 2% 的物种。根据去趋势对应分析 (Detrended Correspondence Analysis, DCA) 结果, 选择基于线性模型的冗余分析 (Redundancy Analysis, RDA)。由于环境变量之间可能存在较高的相关性, 首先将所有环境因子作为解释变量纳入 RDA, 查看其方差膨胀因子 (Variance Inflation Factor, VIF) 大小, 一般认为 VIF 大于 20 时, 变量共线性强, 需对环境因子进行筛选。采用前向选择法通过 Monte Carlo 检验 ($p < 0.01$, $n = 999$) 对变量进行筛选。通过筛选, 用于汝溪河浮游植物群落结构 RDA 的环境因子为 WT, pH 值, DO, EC, Tur, SD, TN 和 TP, 用于龙河浮游植物群落结构 RDA 的环境因子为 WT, EC, Tur, V 和 ORP。以上所有统计分析均使用 R 语言 (4.0.3 版) 进行。

2 结果

2.1 汝溪河和龙河不同季节水体理化因子特征

汝溪河不同季节水体理化因子特征见图 2。

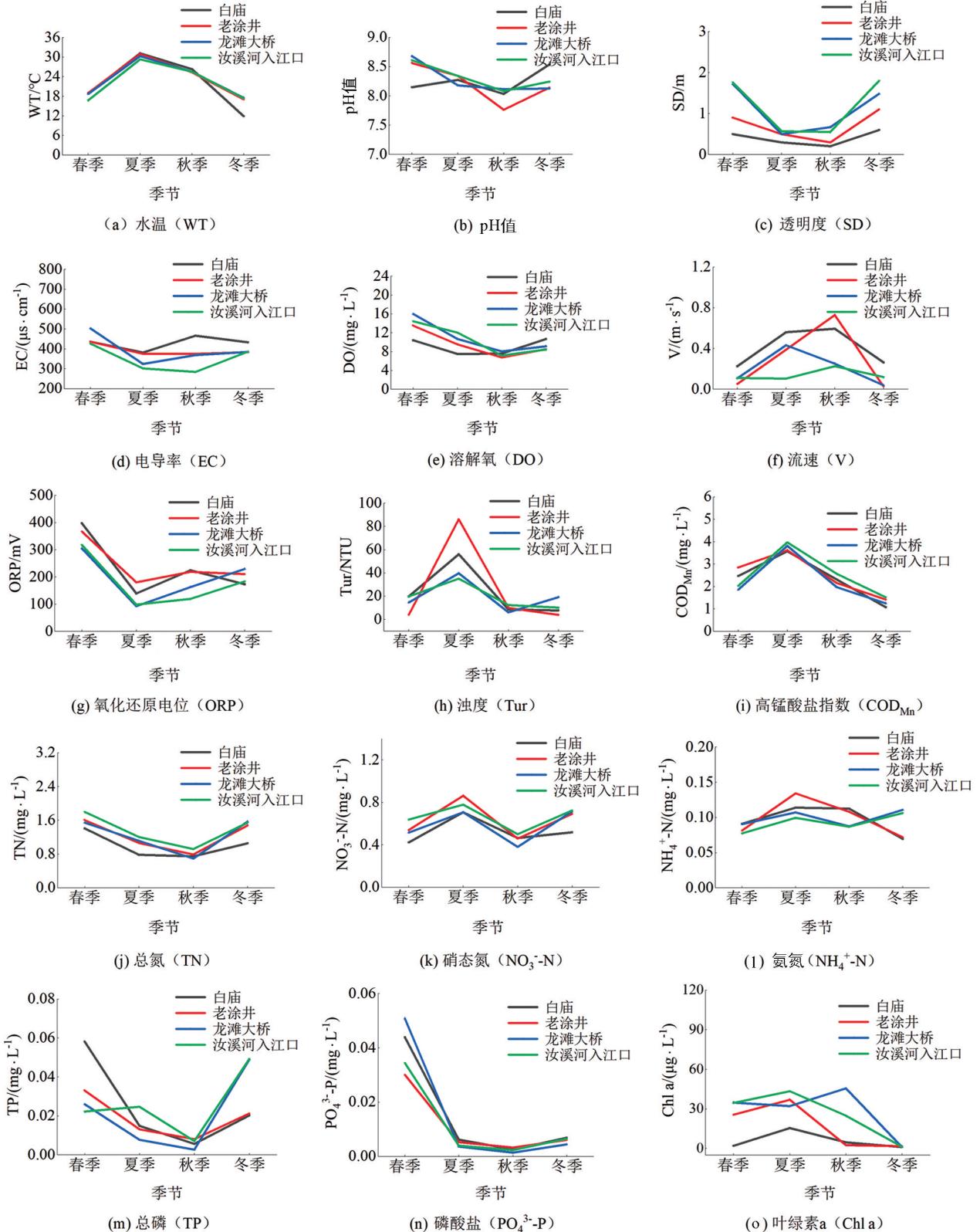


图 2 汝溪河不同季节水体理化因子

在同一季节,汝溪河4个断面的水温基本相同,其中,夏季水温最高,为 30.40 ± 0.41 °C,冬季水温最低,为 15.95 ± 1.36 °C;汝溪河不同季节各断面水体pH值变化范围为7.76~8.68,水体整体呈碱性;透明度变化范围为0.20~1.80 m,春季和冬季水体透明度较高;浊度变化范围为3.90~86.00 NTU,夏季水体浊度较高,平均值为54.17 NTU;溶解氧浓度变化范围为6.78~15.97 mg/L,各断面春季水体溶解氧均较高;高锰酸盐指数与水温呈现出相同的季节变化趋势,变化范围为1.07~3.97 mg/L,夏季水体高锰酸盐指数较高,平均值为3.75 mg/L;TN,TP质量浓度变化范围分别为0.69~1.80 mg/L,0.003~0.060 mg/L,春季TN,TP平均质量浓度分别为1.59 mg/L,0.040 mg/L;叶绿素a质量浓度平均为19.25 $\mu\text{g/L}$.

龙河不同季节水体理化因子特征见图3.各断面水温变化范围为14.59~25.67 °C,夏季水温较高,冬季水温较低;pH值变化范围为7.78~8.79,水体整体呈碱性;透明度变化范围为0.15~2.88 m,春季和冬季水体透明度较高;浊度变化范围为11.20~292.57 NTU,夏季水体浊度较高,平均值为158.28 NTU;溶解氧浓度变化范围为8.16~13.40 mg/L,春季水体溶解氧较高;高锰酸盐指数变化范围为1.10~3.10 mg/L,夏季水体高锰酸盐指数较高,平均值为2.72 mg/L;TN,TP质量浓度变化范围分别为0.89~2.11 mg/L,0.002~0.050 mg/L,春季TN,TP平均质量浓度分别为1.66 mg/L,0.030 mg/L;叶绿素a质量浓度平均为10.44 $\mu\text{g/L}$.

2.2 汝溪河和龙河不同季节浮游植物物种组成

本研究共鉴定出汝溪河中有浮游植物7门139种(图4),其中,硅藻门49种,占浮游植物种类数的35.3%;绿藻门58种,占41.7%;蓝藻门15种,占10.8%;甲藻门6种,占4.3%;裸藻门6种,占4.3%;隐藻门4种,占2.9%;金藻门1种,占0.7%.通过比较不同季节浮游植物的变化可以发现,夏季浮游植物物种数较多,除夏季外,其他季节均以硅藻门物种数占据优势,其次为绿藻门和蓝藻门.从不同优势门类来看,硅藻门浮游植物物种数在冬季最多,达30种,夏季最少,仅25种;绿藻门浮游植物物种数在夏季最多,达41种,春季和冬季最少,仅20种;蓝藻门浮游植物物种数在夏季最多,达13种,春季最少,仅3种.

本研究共鉴定出龙河中有浮游植物6门108种(图5),其中,硅藻门50种,占浮游植物种类数的46.3%;绿藻门36种,占33.3%;蓝藻门10种,占9.3%;甲藻门7种,占6.5%;裸藻门2种,占1.9%;隐藻门3种,占2.7%.通过比较不同季节浮游植物的变化发现,春、秋两季浮游植物物种数较多,且不同季节均以硅藻门物种数占据优势,其次为绿藻门和蓝藻门.从不同优势门类来看,硅藻门浮游植物物种数在春季最多,达35种,夏季最少,仅19种;绿藻门浮游植物物种数在秋季最多,达22种,春季最少,仅9种;蓝藻门浮游植物物种数在夏季最多,达7种,春季最少,仅2种.

2.3 汝溪河和龙河不同季节浮游植物丰度

调查期间,汝溪河不同季节浮游植物丰度变动范围为 $0.44 \times 10^5 \sim 59.87 \times 10^5$ 个/L,整体上丰度变动由大到小依次为夏季、春季、秋季、冬季(图6).汝溪河浮游植物群落以硅藻门、蓝藻门、绿藻门为主.汝溪河不同季节浮游植物群落丰度存在一定的差异,其中,春季浮游植物丰度主要由硅藻门贡献,占浮游植物总丰度的76%;夏季浮游植物丰度主要由蓝藻门和绿藻门贡献,分别占浮游植物总丰度的46%和51%;秋季浮游植物丰度主要由蓝藻门贡献,占浮游植物总丰度的70%;冬季浮游植物丰度主要由硅藻门贡献,占浮游植物总丰度的39%.硅藻门相对丰度在春季达到最高,为76%;蓝藻门相对丰度在秋季达到最高,为70%,绿藻门相对丰度在夏季达到最高,为51%.

调查期间,龙河不同季节浮游植物丰度变动范围为 $0.28 \times 10^5 \sim 16.49 \times 10^5$ 个/L,整体上丰度变动由大到小依次为春季、夏季、秋季、冬季(图7).龙河浮游植物群落以硅藻门、甲藻门为主.龙河不同季节浮游植物群落丰度存在一定的差异,其中,春季浮游植物丰度主要由甲藻门贡献,占总丰度的63%;夏季、秋季、冬季浮游植物丰度均主要由硅藻门贡献,分别占总丰度的82%,63%和65%;甲藻门相对丰度在春

季达到最高,为 63%; 硅藻门相对丰度在夏季达到最高,为 82%。

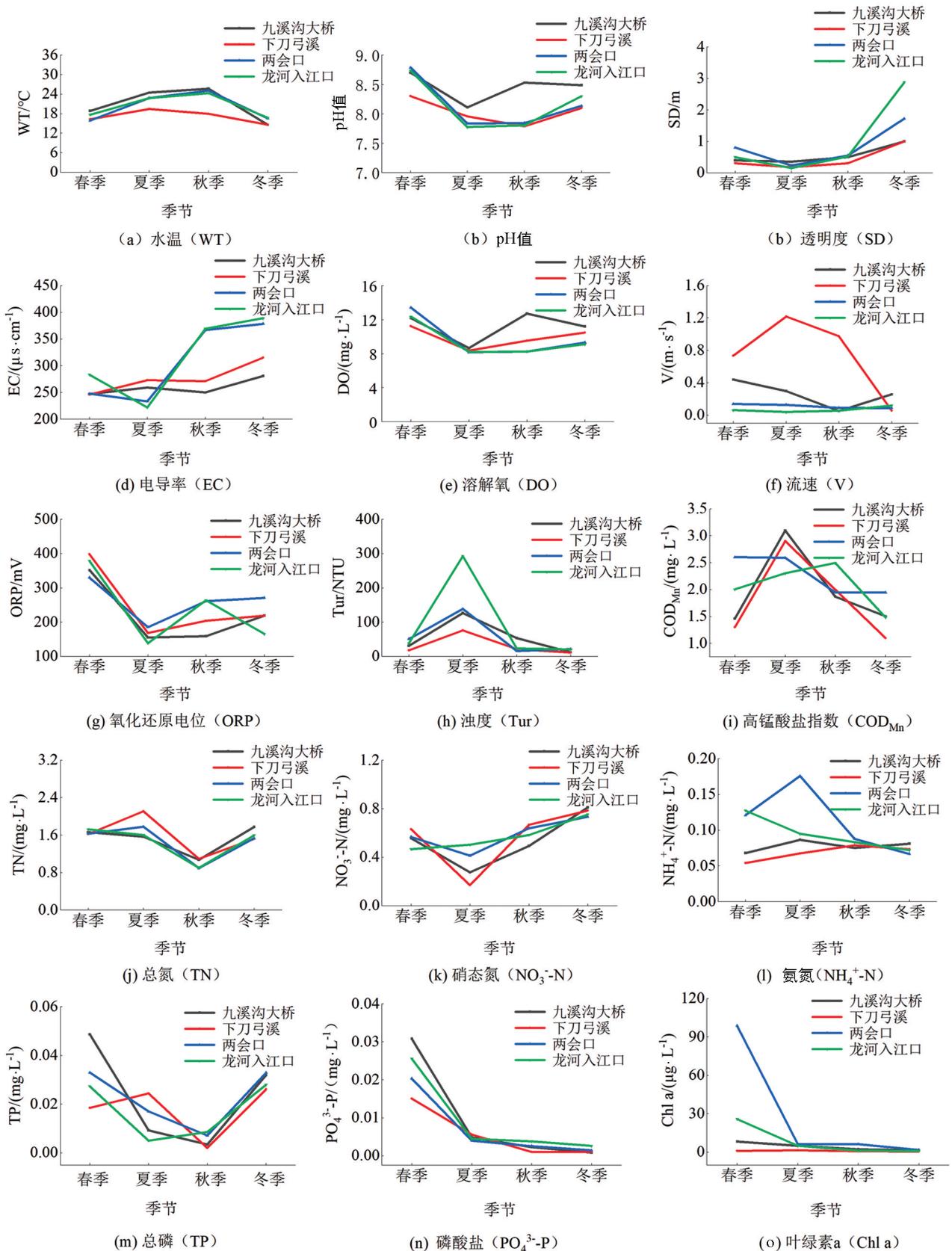


图 3 龙河不同季节水体理化因子

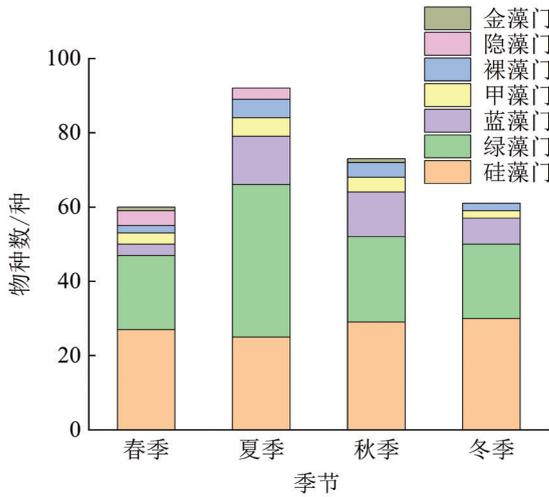


图 4 汝溪河不同季节浮游植物物种组成

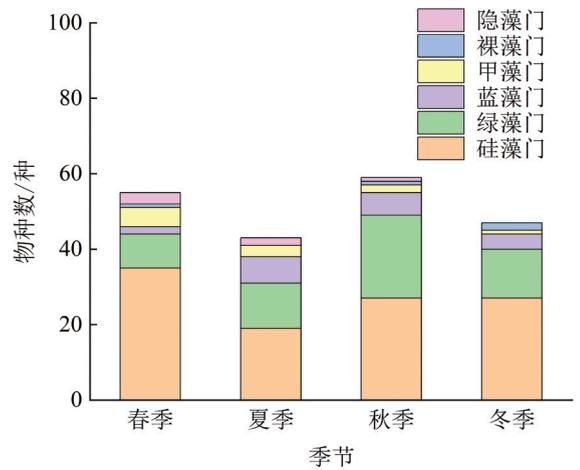


图 5 龙河不同季节浮游植物物种组成

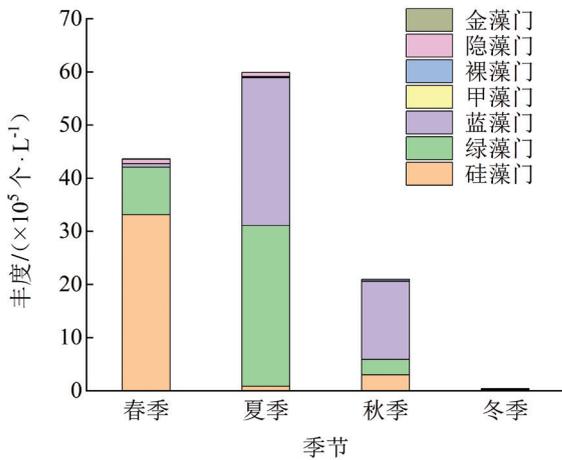


图 6 汝溪河不同季节浮游植物丰度

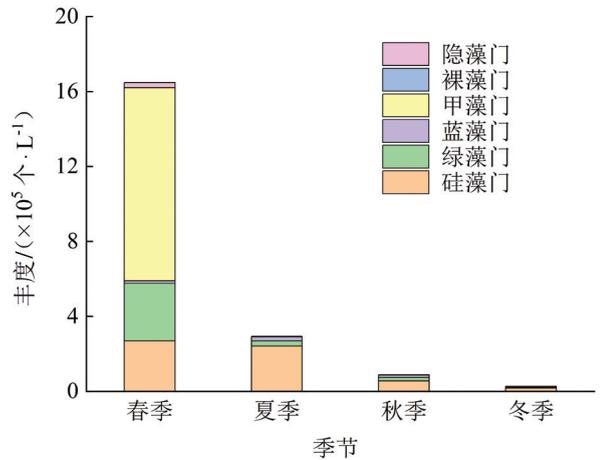


图 7 龙河不同季节浮游植物丰度

2.4 汝溪河和龙河不同季节浮游植物优势种

汝溪河共有优势种 11 种, 其中硅藻门 2 种、绿藻门 6 种、蓝藻门 2 种、裸藻门 1 种(表 1)。

表 1 汝溪河不同季节浮游植物的优势种和优势度

门类	优势种	季节优势度			
		春	夏	秋	冬
蓝藻门	假鱼腥藻 <i>Pseudoanabaena</i> sp.	—	0.10	0.18	0.07
	束丝藻 <i>Aphanizomenon</i>	—	+	+	0.04
绿藻门	盘藻 <i>Gonium</i>	—	+	—	0.02
	球衣藻 <i>Chlamydomonas globosa</i> Snow.	—	0.02	+	+
	实球藻 <i>Pandorina</i> Bory	—	0.08	0.11	—
	四足十字藻 <i>Crucigeniate trapedia</i> (Kirch.)	+	—	—	0.03
	小球藻 <i>Chlorella</i> sp.	0.03	+	+	+
	衣藻 <i>Chlamydomonas</i>	0.04	—	—	—
硅藻门	意大利直链藻 <i>Melosira italica</i>	0.14	+	—	—
	颗粒直链藻 <i>Melosira granulate</i>	+	+	0.02	+
裸藻门	尖尾裸藻 <i>Euglena oxuris</i> Schmarda	—	0.03	+	+

注: + 表示在某一季节检测到该物种, 但该物种优势度小于 0.02; — 表示在某一季节没有检测到该物种。

不同季节优势种组成明显不同,春季优势种以硅藻门和绿藻门为主,意大利直链藻(*Melosira italica*)优势度最大;夏季、秋季及冬季优势种均以蓝藻门和绿藻门为主,假鱼腥藻(*Pseudoanabaena* sp.)优势度最大。

龙河共有优势种 26 种,其中硅藻门 13 种、绿藻门 9 种、蓝藻门 3 种、甲藻门 1 种(表 2)。不同季节优势种组成明显不同,春季优势种以甲藻门、硅藻门和绿藻门为主,倪氏拟多甲藻(*Peridiniopsis* sp.)优势度最大;夏季优势种以硅藻门和蓝藻门为主,尖针杆藻(*Synedra acus*)优势度最大;秋季优势种主要以硅藻门、蓝藻门和绿藻门为主,变异直链藻(*Melosira varians*)优势度最大;冬季优势种主要以硅藻门为主。

表 2 龙河不同季节浮游植物的优势种和优势度

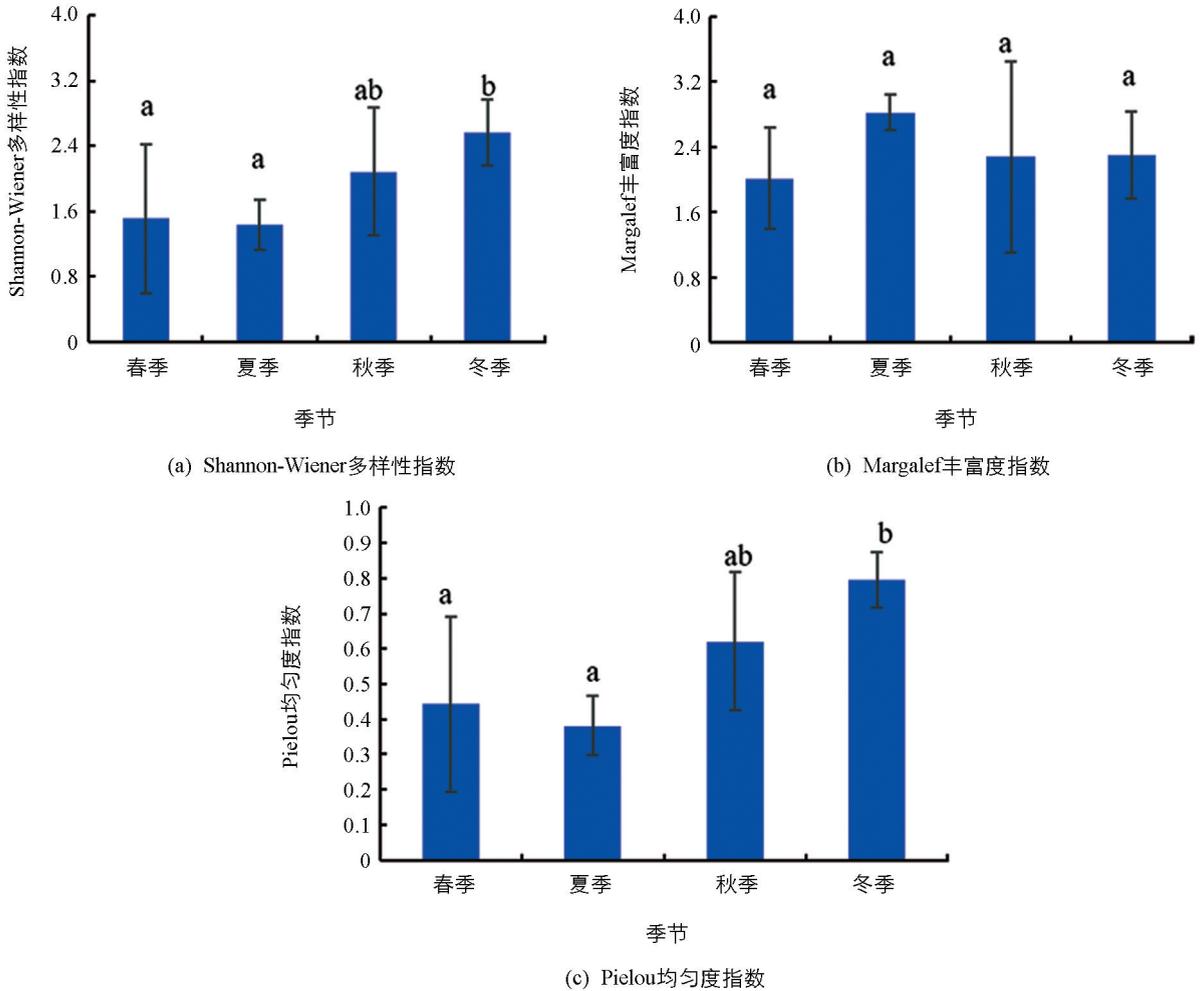
门类	优势种	季节优势度			
		春	夏	秋	冬
蓝藻门	假鱼腥藻 <i>Pseudoanabaena</i> sp.	+	+	0.04	0.06
	微囊藻 <i>Microcystis</i>	—	—	+	0.02
	卷曲鱼腥藻 <i>Anabaena circinalis</i>	—	0.03	—	—
绿藻门	棒形鼓藻 <i>Gonatozygon</i> sp.	—	0.03	—	—
	小球藻 <i>Chlorella</i> sp.	0.05	+	—	+
	衣藻 <i>Chlamydomonas</i>	0.02	—	—	—
	实球藻 <i>Pandorina</i> Bory	—	+	0.03	—
	单角盘星藻 <i>Pediastrum simplex</i>	—	—	—	0.02
	单角盘星藻具孔变种 <i>Pediastrum simplex</i> var. <i>Duodenarium</i>	—	+	0.03	—
	卵囊藻 <i>Oocystisnaegeli</i> A. Br.	—	—	+	0.02
	空球藻 <i>Eudorina elegans</i>	—	+	0.04	—
	空星藻 <i>Coelastrum sphaericum</i> Naegeli	—	—	+	0.02
	硅藻门	扁圆卵形藻 <i>Cocconeisplacentula</i> (Her.) Hust.	+	+	+
变异直链藻 <i>Melosira varians</i>		+	0.02	0.05	0.02
放射针杆藻 <i>Synedra actinastroides</i>		+	+	0.02	+
尖头藻 <i>Raphidiopsis</i>		—	—	+	0.02
尖针杆藻 <i>Synedra acus</i>		+	0.16	+	+
颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i>		+	+	0.02	+
颗粒直链藻极狭变种 <i>Melosiragranulata</i> var. <i>angustissima</i>		0.02	—	0.02	—
桥弯藻 <i>Cymbella</i> sp.		+	+	0.02	+
弯形弯楔藻 <i>Rhicosphenia curvata</i> (Kütz.) Grun.		—	0.02	+	—
小环藻 <i>Cyclotella operculata</i> Kütz.		+	+	+	0.02
意大利直链藻 <i>Melosira italica</i>		0.03	0.03	+	0.02
舟形藻 <i>Navicula</i> Bory		+	+	0.02	0.02
直链藻 <i>Melosira</i>		—	—	+	0.03
甲藻门	倪氏拟多甲藻 <i>Peridiniopsis</i> sp.	0.16	+	—	—

注: + 表示某一季节检测到该物种,但该物种优势度小于 0.02; — 表示在某一季节没有检测到该物种。

2.5 汝溪河和龙河不同季节浮游植物多样性

汝溪河不同季节浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数变化范围为 1.44 ~ 2.57, 均值为 1.90;

Margalef 丰富度指数变化范围为 2.01~2.82, 均值为 2.35; Pielou 均匀度指数变化范围为 0.38~0.79, 均值为 0.56(图 8). Shannon-Wiener 多样性指数在冬季显著高于春季和夏季($p < 0.05$), 与秋季差异无统计学意义($p > 0.05$); Margalef 丰富度指数在不同季节之间差异无统计学意义($p > 0.05$); Pielou 均匀度指数在冬季显著高于春季和夏季($p < 0.05$), 与秋季差异无统计学意义($p > 0.05$).



小写字母不同表示 $p < 0.05$, 差异有统计学意义。

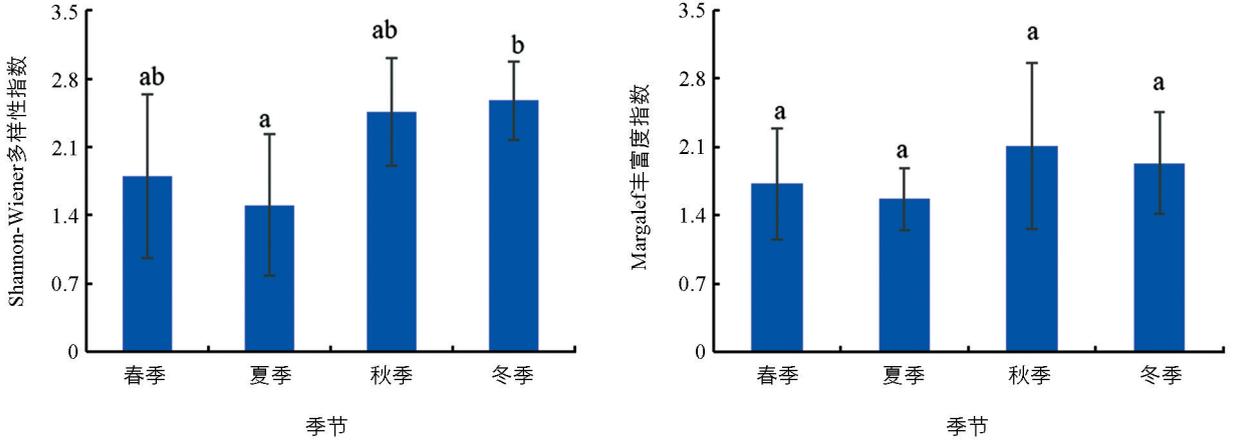
图 8 汝溪河不同季节浮游物植物多样性指数 ($\bar{x} \pm s$)

龙河不同季节浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数变化范围为 1.50~2.57, 均值为 2.08; Margalef 丰富度指数变化范围为 1.56~2.11, 均值为 1.83; Pielou 均匀度指数变化范围为 0.51~0.85, 均值为 0.68(图 9). Shannon-Wiener 多样性指数在冬季显著高于夏季($p < 0.05$), 与春季和秋季差异无统计学意义($p > 0.05$); Margalef 丰富度指数在不同季节之间差异无统计学意义($p > 0.05$); Pielou 均匀度指数在冬季显著高于夏季($p < 0.05$), 与春季和秋季差异无统计学意义($p > 0.05$).

2.6 汝溪河和龙河浮游植物群落与环境因子的相关性

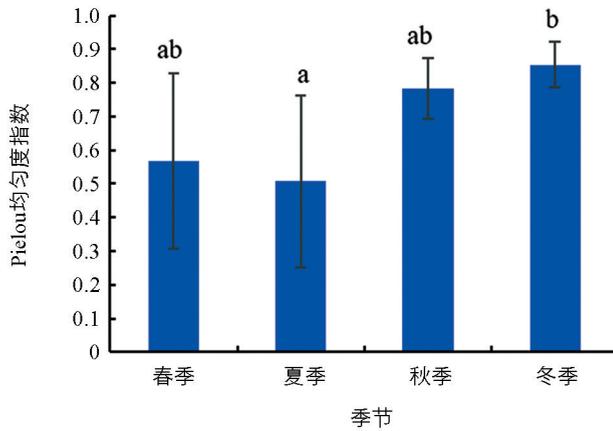
汝溪河浮游植物总丰度、优势藻门丰度和多样性指数与环境因子的 Pearson 相关系数分析见图 10. 结果表明: 汝溪河浮游植物总丰度与 DO 和 COD_{Mn} 呈显著正相关; 硅藻门丰度与 pH 值, DO 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 呈极显著正相关, 与 EC 和 SD 呈显著正相关; 绿藻门丰度与 Tur 呈极显著正相关, 与 COD_{Mn} 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 呈显著正相关; 蓝藻门丰度仅与 COD_{Mn} 呈显著正相关, 与 ORP, EC 和 CaCO_3 呈显著或极显著负相关; Shannon-Wiener 多样性指数与 COD_{Mn} 呈显著负相关; Margalef 丰富度指数仅与 SD 呈显著负相关, 与其

他环境因子相关性不大; Pielou 均匀度指数与 pH 值, DO 和 COD_{Mn} 呈显著或极显著负相关; Chl a 与浮游植物总丰度呈极显著正相关。



(a) Shannon-Wiener多样性指数

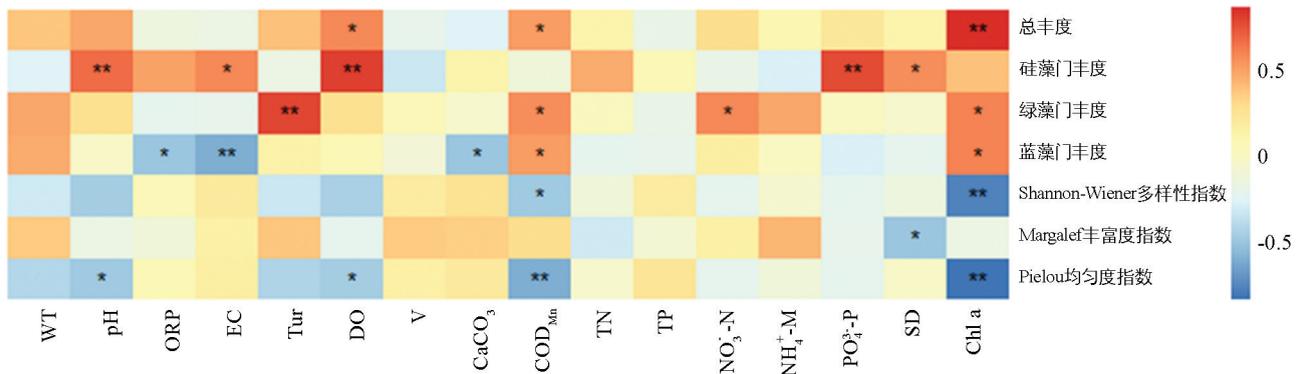
(b) Margalef丰富度指数



(c) Pielou均匀度指数

小写字母不同表示 $p < 0.05$, 差异有统计学意义。

图 9 龙河不同季节浮游物植物多样性指数 ($\bar{x} \pm s$)

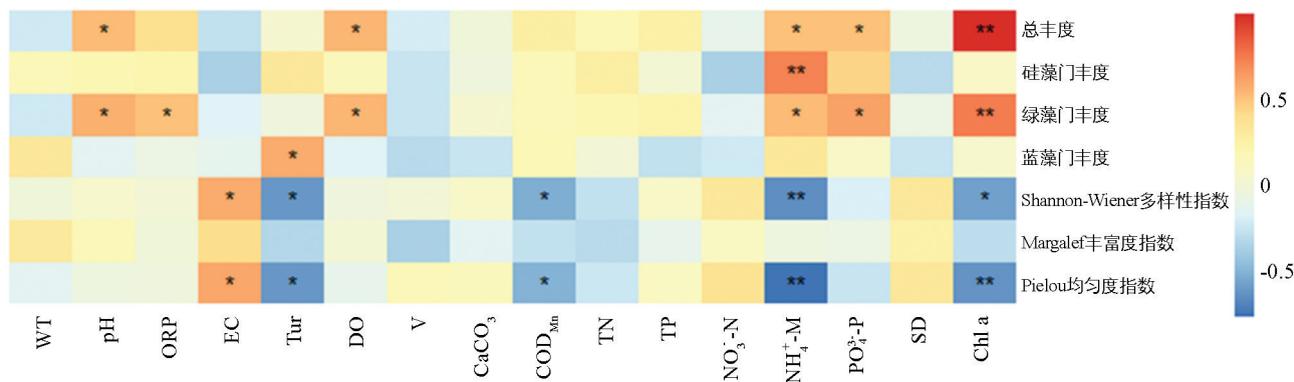


* 表示 $p < 0.05$, ** 表示 $p < 0.01$, 差异有统计学意义。

图 10 汝溪河浮游植物丰度和多样性指数与环境因子的 Pearson 相关系数热图

龙河浮游植物总丰度、优势藻门丰度和多样性指数与环境因子的 Pearson 相关系数分析见图 11。结果表明: 龙河浮游植物总丰度与 pH 值, DO, NH₄⁺-N 和 PO₄³⁻-P 呈显著正相关; 硅藻门丰度仅与 NH₄⁺-N 呈

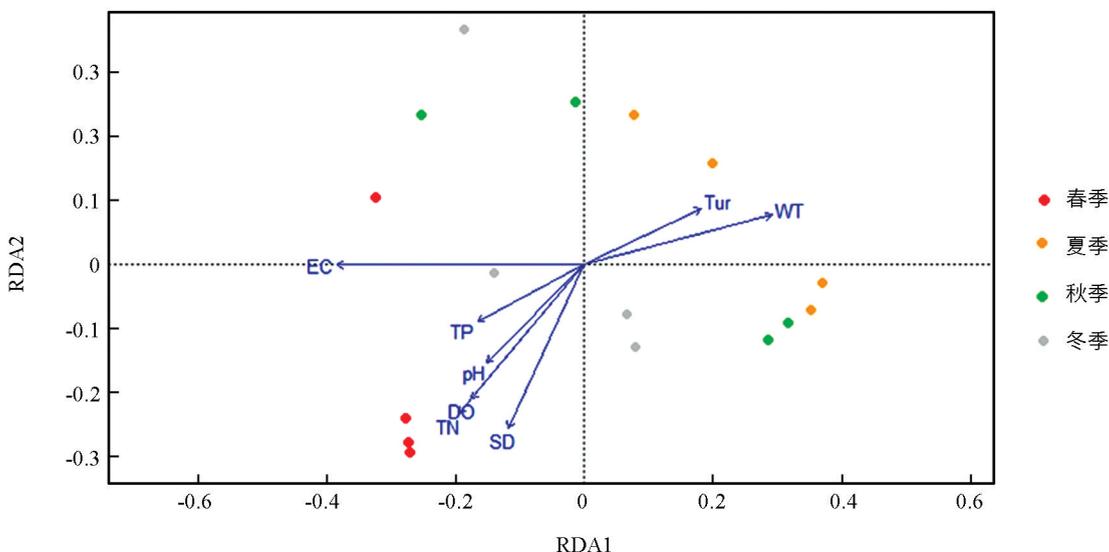
极显著正相关; 绿藻门丰度与 pH 值, ORP, DO, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 呈显著正相关; 蓝藻门丰度仅与 Tur 呈显著正相关, 与其他环境因子相关性不大; Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数均与 EC 呈显著正相关, 与 Tur, COD_{Mn} 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 呈显著或极显著负相关; Margalef 丰富度指数与各水环境因子的相关性不大; Chl a 与浮游植物总丰度、绿藻门丰度呈极显著正相关。



* 表示 $p < 0.05$, ** 表示 $p < 0.01$, 差异有统计学意义。

图 11 龙河浮游植物丰度和多样性指数与环境因子的 Pearson 相关系数热图

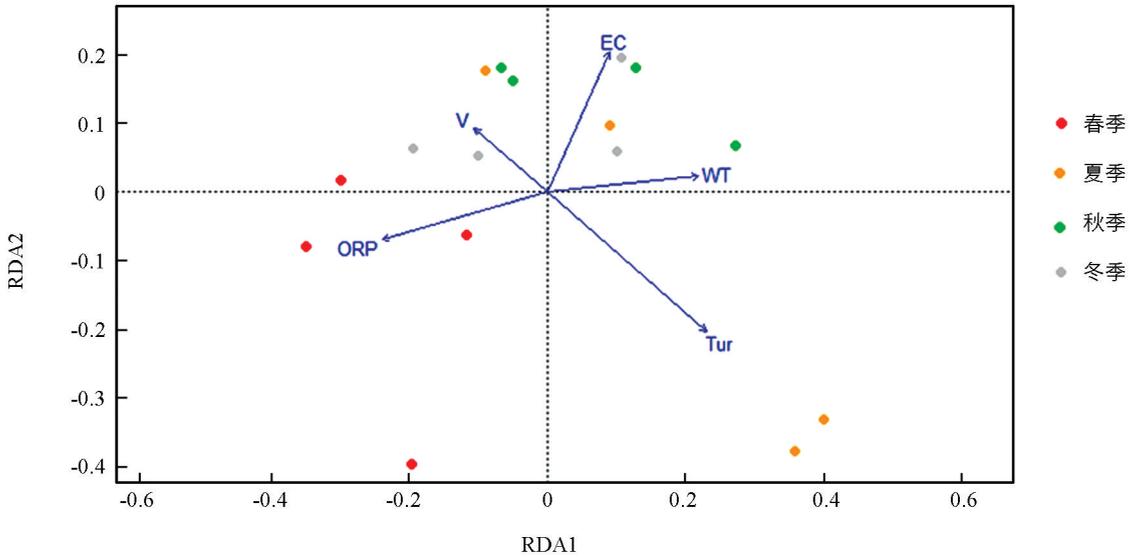
汝溪河不同季节浮游植物群落与环境因子的 RDA 结果见图 12。结果表明, 69.70% 的总方差由环境变量约束轴解释, 其中, 第 1 轴和第 2 轴的特征值分别为 0.193 和 0.119, 占总方差的 44.26%。第 1 轴与 WT 呈显著正相关, 与 EC 呈显著负相关 ($p < 0.001$); 第 2 轴与 SD 呈显著负相关 ($p < 0.001$)。春季浮游植物群落主要受 pH 值, DO, EC, TN 和 TP 的影响; 夏季和秋季浮游植物群落主要受 WT 和 Tur 的影响; 冬季浮游植物群落主要受 SD 的影响。



WT 为水温, EC 为电导率, Tur 为浊度, DO 为溶解氧, SD 为透明度, TN 为总氮, TP 为总磷。

图 12 汝溪河不同季节浮游植物群落与环境因子的 RDA 双序图

龙河不同季节浮游植物群落与环境因子的 RDA 结果见图 13。结果表明, 43.86% 的总方差由环境变量约束轴解释, 其中, 第 1 轴和第 2 轴的特征值分别为 0.108 和 0.083, 占总方差的 31.92%。第 1 轴与 WT 呈显著正相关, 与 ORP 呈显著负相关 ($p < 0.001$); 第 2 轴与 EC 呈显著正相关 ($p < 0.001$)。春季浮游植物群落主要受 ORP 的影响; 夏季浮游植物群落主要受 Tur 的影响; 秋季和冬季浮游植物群落主要受 WT, EC 和 V 的影响。



WT 为水温, EC 为电导率, Tur 为浊度, V 为流速, ORP 为氧化还原电位.

图 13 龙河不同季节浮游植物群落与环境因子的 RDA 双序图

3 讨论与结论

3.1 汝溪河和龙河浮游植物群落结构比较

在本研究中,共鉴定出汝溪河硅藻门浮游植物 49 种,占浮游植物总物种数的 35.3%,而龙河共鉴定出硅藻门浮游植物 50 种,占浮游植物总物种数的 46.3%,表明龙河喜流水性的硅藻种类占比高于汝溪河,这可能与两条支流水体的流量和流速不同有关.据调查显示,龙河年平均流量为 $64.9 \text{ m}^3/\text{s}$,而汝溪河年平均流量仅为 $4.72 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[24-25],因此,在具备高的水体流量和流速的水环境条件下,更有利于喜流水性浮游植物的生长和繁殖.另外,本研究发现,汝溪河一年四季的浮游植物丰度显著高于龙河,这可能与汝溪河和龙河的地理位置不同有关.汝溪河与龙河相比距离三峡大坝更近,汝溪河受到三峡大坝蓄水所引起的长江干流顶托作用更大.大量研究表明,水库蓄水导致水体流速减慢,营养盐升高,众多支流开始出现水华现象^[26-28].因此,与龙河相比,汝溪河水体的流速较慢,其营养盐更充足,更有利于浮游植物的生长.除此之外,汝溪河优势种主要以蓝藻为主,因此,汝溪河更具有暴发水华的潜力.对汝溪河和龙河的浮游植物群落物种多样性分析结果显示,龙河浮游植物 Pielou 均匀度指数大于汝溪河,表明龙河不同浮游植物物种个体数目分配均匀程度更大.研究表明,三峡水库周期性蓄水导致不同支流水环境发生了不同程度的改变,进而使不同支流浮游植物物种呈现出不同的分布格局^[12],因此,水库运行及其周期性蓄水倒灌引起的不同支流水文情势、栖息生境、水生生物等的差异均会对不同支流浮游植物群落物种分布产生不同的影响.

3.2 环境因子对汝溪河和龙河浮游植物群落结构的影响比较

水体溶解氧通常会影响到水生生物的细胞呼吸和生长代谢^[29].本研究 Pearson 相关分析结果表明,DO 对龙河和汝溪河浮游植物群落结构均具有显著影响,其他研究结果与本研究结果一致^[30].水体浊度会影响水体中的光照强度,进而影响浮游植物进行光合作用^[31].本研究发现,龙河水体 Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数均与 Tur 呈显著负相关,而汝溪河水体 Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数与 Tur 相关性不大.由于龙河水体平均浊度显著高于汝溪河,水体浊度对龙河浮游植物群落结构影响更大.高锰酸盐指数是反映水体受到有机污染物和还原性无机污染物污染程度的综合指标^[32].本研究

发现,汝溪河水体的平均高锰酸盐指数大于龙河,与龙河相比,汝溪河浮游植物丰度受到高锰酸盐指数的影响更大(图10,图11),表明汝溪河水体受到的污染程度更严重. RDA双序图结果显示,水温对汝溪河和龙河浮游植物群落结构均具有显著影响. 在适宜的温度范围内,水温升高有利于提高浮游植物的生长代谢速率,进而加速浮游植物的生长^[33-34],但不同种类的浮游植物适宜生长的温度范围存在差异. 本研究发现,一年四季中,汝溪河和龙河的蓝藻门浮游植物物种数均在夏季最多,这可能与蓝藻更喜高温有关^[35],因此,汝溪河和龙河的浮游植物与水温的相关性在夏季、秋季较高(图12,图13).

根据本文研究结果发现,相较于龙河,汝溪河更具有暴发水华的潜质,因此,应重点关注汝溪河的水质状况,加大对汝溪河的水质监测力度. 为防止汝溪河水华的发生,需要对水体营养盐和污染物进行有效控制,以降低水体的综合营养状态.

参考文献:

- [1] ARINO O, RYSZARD R. Phytoplankton Dynamics [J]. *Comptes Rendus Biologies*, 2004, 327(11): 961-969.
- [2] LIU Y X, XU X M, WANG T, et al. Microscopic View of Phytoplankton along the Yangtze River [J]. *Science China Technological Sciences*, 2019, 62(11): 1873-1884.
- [3] DIAZ R J, ROSENBERG R. Spreading Dead Zones and Consequences for Marine Ecosystems [J]. *Science*, 2008, 321(5891): 926-929.
- [4] MICHELI F. Eutrophication, Fisheries, and Consumer-Resource Dynamics in Marine Pelagic Ecosystems [J]. *Science*, 1999, 285(5432): 1396-1398.
- [5] VONLANTHEN P, BITTNER D, HUDSON A G, et al. Eutrophication Causes Speciation Reversal in Whitefish Adaptive Radiations [J]. *Nature*, 2012, 482(7385): 357-362.
- [6] 施军琼, 张明, 杨燕君, 等. 基于高通量测序探讨大宁河不同水华期真核浮游生物群落组成 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2020, 42(2): 1-7.
- [7] CARMICHAEL W W. Health Effects of Toxin-Producing Cyanobacteria: "the CyanoHABs" [J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2001, 7(5): 1393-1407.
- [8] LIU W, QIU R L. Mini-Review Water Eutrophication in China and the Combating Strategies [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2007, 82(10): 781-786.
- [9] HO A Y T, XU J, YIN K D, et al. Seasonal and Spatial Dynamics of Nutrients and Phytoplankton Biomass in Victoria Harbour and Its Vicinity Before and After Sewage Abatement [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2008, 57(6-12): 313-324.
- [10] TANIUCHI Y, WATANABE T, KAKEHI S, et al. Seasonal Dynamics of the Phytoplankton Community in Sendai Bay, Northern Japan [J]. *Journal of Oceanography*, 2017, 73(1): 1-9.
- [11] TEMPONERAS M, KRISTIANSEN J, MOUSTAKA-GOUNI M. Seasonal Variation in Phytoplankton Composition and Physical-Chemical Features of the Shallow Lake Doirani, Macedonia, Greece [J]. *Hydrobiologia*, 2000, 424: 109-122.
- [12] 魏念, 余雨梅, 茹辉军, 等. 三峡库区典型支流回水区浮游植物群落结构特征及影响因子分析 [J]. *淡水渔业*, 2022, 52(1): 103-112.
- [13] 张静, 叶丹, 朱海涛, 等. 在不同蓄水位下三峡库区春季水华特征及趋势分析 [J]. *水生生物学报*, 2019, 43(4): 884-891.
- [14] LOPEZ-PUJOL J, REN M X. Biodiversity and the Three Gorges Reservoir: a Troubled Marriage [J]. *Journal of Natural History*, 2009, 43(43-44): 2765-2786.
- [15] ZHANG C, FUJIWARA M, PAWLUK M, et al. Changes in Taxonomic and Functional Diversity of Fish Communities

- after Catastrophic Habitat Alteration Caused by Construction of Three Gorges Dam [J]. *Ecology and Evolution*, 2020, 10(12): 5829-5839.
- [16] 李哲, 王胜, 郭劲松, 等. 三峡水库 156m 蓄水前后澎溪河回水区藻类多样性变化特征 [J]. *湖泊科学*, 2012, 24(2): 227-231.
- [17] 杨振冰, 刘园园, 何蕊廷, 等. 三峡库区不同水文类型支流大型底栖动物对蓄水的响应 [J]. *生态学报*, 2018, 38(20): 7231-7241.
- [18] ZHANG C, LIU F, LIU H Z, et al. Temporal Changes in Taxonomic and Functional Diversity of Fish Assemblages in the Upper Yangtze River After Impoundment of the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 975789.
- [19] 罗晓佼, 张妍, 黄伟, 等. 三峡库区澎溪河河段间水华程度差异及其机制 [J]. *环境科学*, 2023, 44(1): 282-292.
- [20] 胡鸿钧, 李尧英, 魏印心. 中国淡水藻类 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1980.
- [21] 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.
- [22] 郑洪萍. 福建省大中型水库常见淡水藻类图集 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [23] 邓坚. 中国内陆水域常见藻类图谱 [M]. 武汉: 长江出版社, 2012.
- [24] 李仁芳, 张信伟. 忠县汝溪河流域水质现状调查 [J]. *三峡环境与生态*, 2011, 33(2): 10-12.
- [25] 柳健, 龚旭, 陈玲. 重庆市龙河流域水生态环境现状及对策研究 [J]. *水利技术监督*, 2022, (6): 95-97, 106.
- [26] ZHANG L, XIA Z Q, ZHOU C, et al. Unique Surface Density Layers Promote Formation of Harmful Algal Blooms in the Pengxi River, Three Gorges Reservoir [J]. *Freshwater Science*, 2020, 39(4): 722-734.
- [27] 洪尚波, 吴光应, 万丹, 等. 三峡水库大宁河春季水华藻类分布及影响因子 [J]. *水资源保护*, 2012, 28(1): 80-84.
- [28] 张敏, 蔡庆华, 王岚, 等. 三峡水库香溪河库湾蓝藻水华生消过程初步研究 [J]. *湿地科学*, 2009, 7(3): 230-236.
- [29] GAN L, LIU Y J, TIAN L X, et al. Effects of Dissolved Oxygen and Dietary Lysine Levels on Growth Performance, Feed Conversion Ratio and Body Composition of Grass Carp, *Ctenopharyngodon idella* [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2013, 19(6): 860-869.
- [30] PAUDEL B, VELINSKY D, BELTON T, et al. Spatial Variability of Estuarine Environmental Drivers and Response by Phytoplankton: a Multivariate Modeling Approach [J]. *Ecological Informatics*, 2016, 34: 1-12.
- [31] MAY C L, KOSEFF J R, LUCAS L V, et al. Effects of Spatial and Temporal Variability of Turbidity on Phytoplankton Blooms [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2003, 254(25286): 111-128.
- [32] 邱俊娟, 白利方. 水质高锰酸盐指数中环境影响因素的分析 [J]. *化工管理*, 2022, 3(26): 26-28.
- [33] ZOHARY T, FLAIM G, SOMMER U. Temperature and the Size of Freshwater Phytoplankton [J]. *Hydrobiologia*, 2021, 848(1): 143-155.
- [34] DE SENERPONT DOMIS L N, VAN DE WAAL D B, HELMSING N R, et al. Community Stoichiometry In a Changing World: Combined Effects of Warming and Eutrophication on Phytoplankton Dynamics [J]. *Ecology*, 2014, 95(6): 1485-1495.
- [35] LURLING M, MELLO M M E, OOSTERHOUT F V, et al. Response of Natural Cyanobacteria and Algae Assemblages to a Nutrient Pulse and Elevated Temperature [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9(1851): 1-14.