

长江干流浮游植物群落结构空间异质性及其影响因素¹

钟可儿^{1, 2} 杨潇^{1, 2} 马吉顺^{1, 2} 周琼^{1, 2*}

(1. 华中农业大学水产学院, 农业农村部淡水生物繁育重点实验室, 湖北 武汉 430070;

2. 长江经济带大宗水生生物产业绿色发展教育部工程研究中心, 湖北 武汉 430070)

【摘要】: 为探究长江干流浮游植物群落结构空间变化规律及区系组成特征, 于 2019 年 7 ~ 9 月在长江干流设置了 74 个采样断面, 并将其划分为源区、金沙江区、三峡库区、长江中游和长江下游 5 个区域进行浮游植物的调查研究。研究期间长江干流共鉴定浮游植物 6 门 53 属 112 种, 源区、金沙江区、三峡库区和长江中游浮游植物种类组成均以硅藻门为主, 且硅藻门种类在五个研究区域均占优势, 如尖针杆藻 (*Synedra acus*)、普通等片藻 (*Diatoma vulgare*)、颗粒直链藻极狭变种 (*Melosira granulata* var. *Angustissima*) 等。干流全流域浮游植物平均密度为 1.29×10^6 cells/L, 平均生物量为 1.34 mg/L。各区域物种组成、硅藻商、多样性指数呈现明显的空间异质性, 其中源区与其余各区域浮游植物物种均极不相似, 仅中游与下游浮游植物物种中等相似; 下游硅藻商显著高于其它区域 ($P < 0.05$), 金沙江、三峡库区多样性指数均显著高于其它各区域 ($P < 0.05$)。基于 Shannon-wiener (H')、Margalef (d)、Pielou (J) 生物多样性指数的水质评价结果表明: 长江干流整体水质呈中污水平。Pearson 相关性分析表明, 水温 (WT)、总氮 (TN)、氨氮 ($\text{NH}_3\text{-N}$) 是全流域浮游植物密度与生物量的主要影响因子, 溶解氧 (DO) 是影响浮游植物多样性水平的最主要环境因素。我们的调查结果将提供“十年禁渔”计划实施前期的水生生物基础数据, 为长江干流水域水生态管理和保护提供科学依据。

【关键词】: 长江干流; 浮游植物; 群落结构; 环境因子; 水质评价; 十年禁渔

【中图分类号】: Q948.8 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1004-8227(2022)11-2458-15

【DOI】: 10.11870/cjlyzyyhj202211011

长江是我国第一、世界第三大河流, 也是全球七大生物多样性栖息地之一。长江流域人口约 4 亿, 不仅人口密度最高、人类活动最强, 且地势落差最大、能量流与物质流最强^[1]。长江干流发源于青藏高原的唐古拉山脉, 自西向东穿过横断山脉和云贵

¹ 收稿日期: 2021-11-24; 修回日期: 2022-04-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31670459); 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”重点专项 (2019YFD0900601)

作者简介: 钟可儿 (1998 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为淡水生态学。E-mail: xxxzz@foxmail.com

* 通讯作者 E-mail: hainan@mail.hzau.edu.cn

高原, 跨越四川盆地和江南丘陵, 经过长江中下游平原, 最终于崇明岛以东汇入东海^[2,3]。其中, 长江源区呈盆谷地貌, 由于其高原大陆型气候, 年平均气温仅有 0℃; 长江上游河流比降大, 中下段连接盆地, 其中设有国家级自然保护区; 长江中下游冲积平原地区, 地势平缓, 接连于众多湖泊。因此, 长江干流各个江段地貌特征、气候条件等具有较大差异。由于其独特的自然地理特征以及丰富的生物资源, 长江在我国经济与社会发展中的影响举足轻重^[4]。然而, 受拦河筑坝、过度捕捞、环境污染、农田建设、城市生活等人类活动的影响, 长江流域水生生物多样性呈明显下降趋势^[5]。

浮游植物作为水生态系统食物链中的基础环节, 在维持水体食物网结构与功能中具有非常关键的作用^[6]。由于浮游植物对环境变化较为敏感, 其群落结构特征对水体的生态健康具有重要的指示作用^[7,8,9,10,11]。浮游植物作为水体富营养化程度和水质健康状况的重要指标^[12], 在与人类健康息息相关的水安全问题的调控、整治中具有重要的作用^[13]。不同水体中的浮游植物因受多种环境因子影响从而呈现出截然不同的群落结构^[14]。已有的长江各江段的研究表明, 温度(WT)、溶解性有机碳(DOC)、高锰酸盐指数(CODMn)、氨氮(NH₃-N)等是源区浮游植物分布的重要影响因素^[15], 上游浮游植物驱动因素主要为水体中 CODMn、溶解氧(DO)、浊度、流速等^[16]; 总磷(TP)、总氮(TN)、NH₃-N、WT 等是影响长江中下游江段浮游植物群落分布的重要因素^[17,18]。

根据国家整体规划, 长江干流自 2020 年 1 月 1 日起开始实行“十年禁渔”计划, 以保护与恢复长江自然水域生物资源^[19]。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》中提出对长江重点生态区生态系统质量改善的要求^[20]。因此, 开展长江干流整个水域生物饵料资源的前期研究非常有必要。然而, 已有的长江流域浮游植物研究多集中于长江某一江段(如长江源区^[21]、长江干流宜昌段^[22])或附属水体(通江湖泊), 近 30 年未见有对长江干流全流域的浮游植物群落结构特征的系统研究。本研究的目标主要包括三个方面: (1) 对长江干流全流域的浮游植物种类组成、优势种属、密度、生物量等进行系统的调查分析, 揭示其演变规律及区系组成特征; (2) 明确影响干流浮游植物群落结构特征的理化驱动因素; (3) 探讨长江干流各区域浮游植物群落结构空间异质性。本研究为长江干流的水生生物监测和 10 年禁渔实施效果的评估提供基础数据及理论依据。

1 研究方法

1.1 研究区域

本研究于 2019 年 7~9 月在长江干流水域采集浮游植物样品, 并测定水体理化因子。综合考虑干流生境尺度的形态、地理环境与气候特征及人类活动的影响等因素, 我们将长江干流全流域划分为 26 个江段(表 1), 并基于这些江段的地势、海拔、周边城市等特征, 从上至下将长江干流分为源区、金沙江江段(以下简称金沙江)、三峡库区、长江中游和长江下游等五个区域。各江段根据城市上、中、下游的地理特征设置 1~4 个采样点, 各调查江段的划分及采样点分布见图 1 与表 1。

1.2 样品采集与处理

在每个采样点分别采集浮游植物定性样品与定量样品。在水深 0.5 m 处, 使用 25#浮游生物网(网目直径为 64 μm)以“∞”型缓慢拖行从而捞取浮游植物定性样品。将采集后的样品转移至 50 mL 样品瓶内, 并加入 4%甲醛溶液进行固定以待镜检。使用 1L 有机玻璃采水器在水深 0.5 m 处采取水样注入 1L 采样瓶内, 随即加入 15 mL 鲁哥氏液进行固定, 带回实验室静置 24~48 h 后, 将样品浓缩后在显微镜 10×40 倍镜下进行物种鉴定与计数^[23,24,25]。

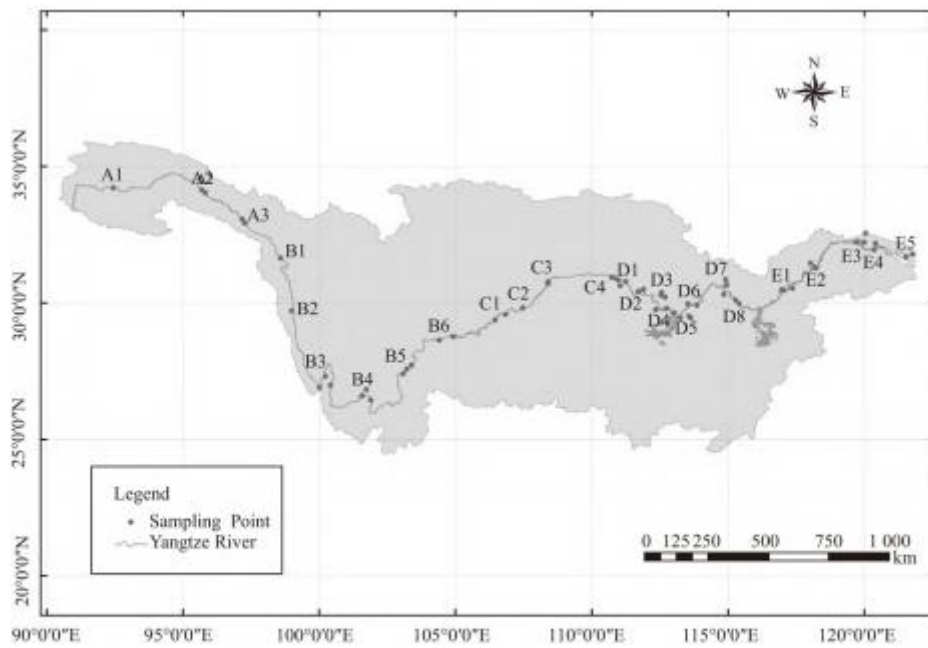


图 1 长江干流流域采样点与区域分布示意图

Fig. 1 Sketch map showing distribution of sample sites and research areas in main stem of Yangtze River

表 1 长江干流各研究区域调查江段的设置

编号	江段	编号	江段	编号	江段	编号	江段	编号	江段
A1	唐古拉	B1	德格	C1	重庆	D1	宜昌	E1	安庆
A2	曲麻莱	B2	巴塘	C2	涪陵	D2	枝江	E2	芜湖
A3	玉树	B3	丽江	C3	万州	D3	荆州	E3	镇江
		B4	攀枝花	C4	秭归	D4	监利	E4	南通
		B5	金阳			D5	岳阳	E5	启东
		B6	宜宾			D6	嘉鱼		
						D7	武汉		

水体环境因子的测定包括 WT、pH、电导率(Cond)、D0、TN、TP 及 NH₃-N 等, 其中, pH 值、D0、Sal、TDS、Cond、WT 使用便携式水质分析仪(YSI, 美国)现场测定。采取水样通过车载便携式冰箱保存于 4℃ 条件下, 将其带回实验室测定 TN、TP、NO₃-、NH₃-N 等指标[26]。

1.3 数据分析

1.3.1 优势种的确定与硅藻商

①根据优势度确定优势种, 计算公式如下。

$$Y = f_i \cdot \frac{n_i}{N}$$

式中: n_i 为 i 种的个体数, N 为所有种类总个体数, f_i 为第 i 种在各采样点出现的频率。将 $Y \geq 0.02$ 的物种视为优势种[27]。

硅藻商, 即中心壳目硅藻种数/羽状壳目硅藻种数, 其对水质营养程度的评判标准为: 0~1 贫营养、1~5 富营养、5~15 重富营养[24, 28]。

1.3.2 物种多样性指数

使用 Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Margalef 丰富度指数(D)、Pielou 均匀度指数(J)描述浮游植物群落结构特征, 并评价水质健康, 上述指标计算公式及评价标准如下。

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \cdot \log_2 P_i$$

$$D = \frac{(S - 1)}{\ln N}$$

$$J = \frac{H'}{\log_2 S}$$

式中: N 表示同一样品中的浮游植物总个体数; S 表示同一样品中浮游植物的总分类单元数; P_i 表示 n_i 与 N 的比值, 即第 i 物种的个体数占同一样品中的浮游植物总个体数的比值。

表 2 基于浮游植物多样性指数的水质评价标准

多样性指数	评价标准			
	0~1 重污	1~2 α-中污	2~3 β-中污	>3 寡污或无污
Shannon-Wiener index	0~1 重污	1~2 α-中污	2~3 β-中污	>3 寡污或无污
Margalef index	0~1 重污	1~2 α-中污	2~3 β-中污	>3 寡污或无污
Pielou index	0~0.3 重污	0.3~0.4 α-中污	0.4~0.5 β-中污	>0.5 寡污或无污

1.3.3 异质性检验

利用 Jaccard 相似性系数 K 对各个区域浮游植物物种进行相似性分析，计算公式如下：

$$K = \frac{c}{(a + b - c)}$$

式中：a 为出现在样点 1 的物种总数；b 为出现在样点 2 的物种总数；c 为样点 1 与样点 2 共有物种的总数。根据 Jaccard 相似性原理，当 K 值介于 0~0.25 时，为极不相似；K 值介于 0.25~0.5 时，为中等不相似；K 值介于 0.5~0.75 时，为中等相似；K 值介于 0.75~1 时，为极相似[29]。

进行单因素方差分析(One-way ANOVA)，以检验长江干流不同区域浮游植物群落结构特征的异质性，并对各区域密度、生物量、硅藻商、多样性指数绘制箱线图；进行 Pearson 相关性分析，以探究环境因子对长江干流浮游植物群落结构的影响程度。以上统计学分析使用统计软件 SPSS 26 进行，并以 Origin 2019b、excel 2016、ArcGIS 10.5 软件绘图。

1.3.4 约束排序分析

使用生态分析软件 Canoco 5.0 软件对不同水文期浮游生物与环境因子进行排序分析。为了确定合适的分析模型，首先对浮游植物种类数据进行去趋势分析(Detrended correspondence analysis, DCA)。DCA 结果中，如果这 4 个轴中梯度最长(最大值)超过 4，选择单峰模型典范对应分析(Canonical correspondence analysis, CCA)更合适；如果小于 3，选择线性模型冗余分析(Redundancy analysis, RDA)比较合理；如果介于 3~4，单峰模型和线性模型都是合适的。

2 结果

2.1 理化因子特征

长江干流水温(WT)自源区至下游呈现逐渐升高的趋势，WT 变化范围在 8.68~30.2℃(表 3)。各江段总氮范围在 0.62~2.39 mg/L，整体上 TN 自上游至下游呈现逐渐升高的趋势，源区 TN 最低，中、下游均呈现较高水平。总磷范围为 0.05~0.62 mg/L，中游最低，源区最高。氨氮浓度范围为 0.15~3.98 mg/L，均值为 0.54 mg/L。电导率范围为 219.5~10 075 us/cm，均值 889.29 us/cm，最高值出现在下游的 E5 江段。盐度范围为 0.1~5.78，均值 0.50，最高值亦出现在下游的 E5 江段。各站点 DO 变化范围

在 4.87~9.28 mg/L 之间，氧化还原电位范围为 58.05~233.4，均值 119.61。除三峡库区外，各调查江段水体 pH 值自上游至下游逐渐下降，范围为 7.59~8.69。

表 3 长江干流各研究区域的环境参数(平均值±标准差)

环境参数	源区 YQ	金沙江区 JSJQ	三峡库区 SXXQ	中游 ZY	下游 XY
WT (°C)	11.78±2.2	18.81±3.3	25.21±1.17	26.2±2.35	29.39±1.24
TN (mg/L)	0.67±0.03	1.4±1.19	1.8±0.3	2.07±0.13	1.97±0.29
TP (mg/L)	0.33±0.21	0.26±0.18	0.22±0.2	0.11±0.02	0.19±0.15
NO ₃ -N (mg/L)	0.46±0.1	0.61±0.23	1.42±0.24	1.59±0.18	1.46±0.04
NH ₃ -N (mg/L)	0.23±0.02	0.41±0.46	0.36±0.13	0.86±1.18	0.51±0.38
Cond (us/cm)	130.5±178.19	688.47±185.86	495.67±92.85	296.78±35.74	1919.72±926.08
Sal	0.76±0.09	0.39±0.13	0.23±0.04	0.13±0.01	1.25±2.26
DO (mg/L)	6.84±0.32	8.4±0.63	8.06±0.72	6.63±0.71	5.2±0.24
ORP	97.16±32.96	123.99±50.03	173.15±37.41	96.43±14.22	122.08±16.66
pH	8.54±0.14	8.38±0.25	8.05±0.38	8.29±0.16	8.08±0.1

2.2 浮游植物群落结构特征

长江干流水域共检出浮游植物 6 门 53 属，共 112 种，其中硅藻门为 21 属 53 种，绿藻门为 17 属 37 种，蓝藻门 9 属 14 种，甲藻门 3 属 4 种，裸藻门 2 属 3 种，隐藻门 1 属 1 种(图 2)。整体上，长江中游浮游植物物种丰富度最高(66 种)，隶属于 6 门 40 属，以硅藻门(14 属 26 种)为主；其次为流域面积最大的金沙江区域，共检出浮游植物 4 门 31 属 59 种，以硅藻门(17 属 40 种)为主。源区浮游植物物种丰富度最低，为 4 门 21 属 29 种，以硅藻门(10 属 18 种)为主；三峡库区共检出浮游植物 5 门 26 属 41 种，以硅藻门(13 属 24 种)为主；下游共检出浮游植物 4 门 31 属 49 种，以绿藻门(11 属 19 种)、硅藻门(11 属 18 种)为主。

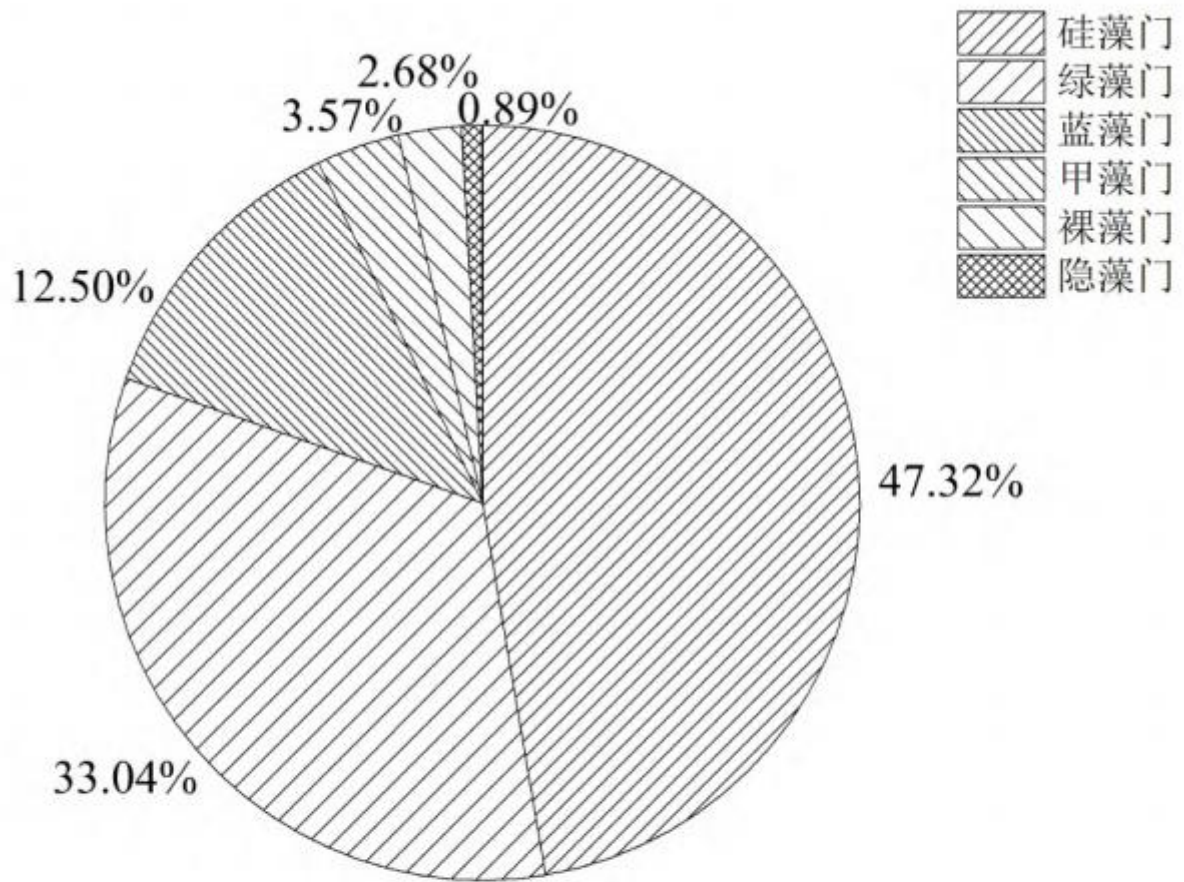


图 2 长江干流浮游植物的种类组成

Fig. 2 Species composition of phytoplankton in main stem of Yangtze River

分析长江干流各区域浮游植物优势种(表 4), 结果显示, 长江下游优势种最多(8 种), 三峡库区优势种最少(2 种)。在源区, 优势种主要为绿藻门、硅藻门、甲藻门种类, 其中, 伪鱼腥藻优势度最高; 在金沙江水域, 优势种为硅藻门、绿藻门种类, 其中以普通等片藻优势度最高; 在三峡库区, 浮游植物优势种为硅藻门尖针杆藻与蓝藻门伪鱼腥藻; 在中游段, 优势种主要是绿藻门、蓝藻门种类, 其中以伪鱼腥藻优势度最高; 在下游段, 优势种则以绿藻门、硅藻门为主, 优势度最高者为伪鱼腥藻。

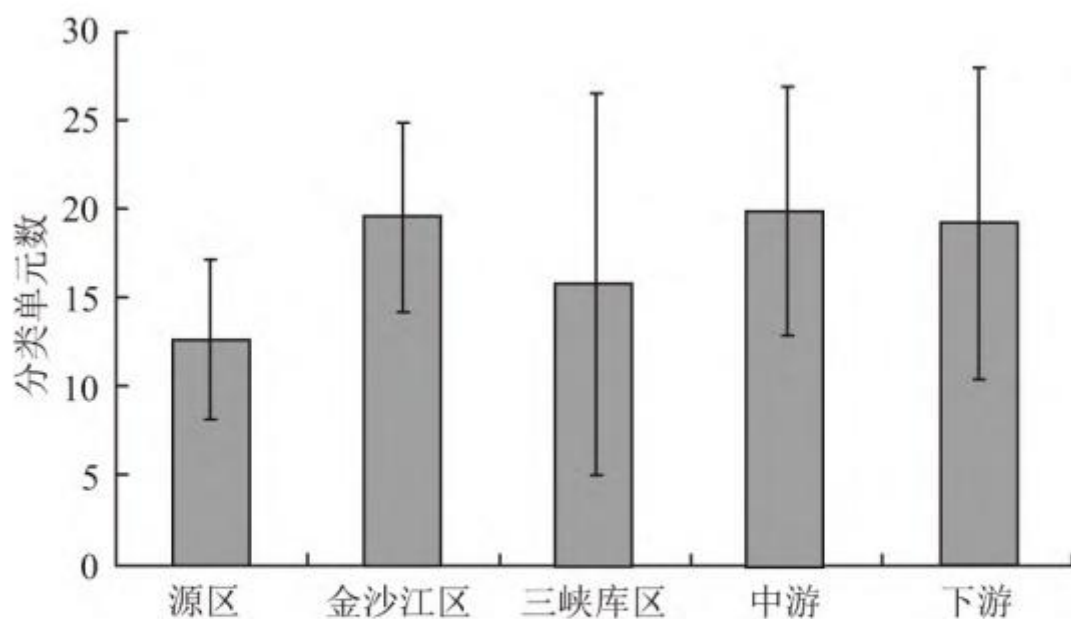


图 3 长江干流各区域浮游植物分类单元数

Fig. 3 Species numbers of phytoplankton at different research areas

表 4 各区域浮游植物优势种及优势度分布

门类 Category	优势种 Dominate species	源区 YQ	金沙江区 JSJQ	三峡库区 SXXQ	中游 ZY	下游 XY
硅藻门	颗粒直链藻极狭变种 <i>Melosira granulata</i> var. <i>Angustissima</i>				0.06	0.17
Bacillariophyta	梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i>		0.04		0.02	0.02
	美小针杆藻 <i>Synedra pulchella</i>	0.03				
	简单舟形藻 <i>Navicula simplex</i>	0.03				
	普通等片藻 <i>Diatoma vulgare</i>		0.14			
	肘状针杆藻 <i>Synedra ulna</i>		0.05			
	箱形桥弯藻 <i>Cymbella cistula</i>		0.02			
	尖针杆藻 <i>Synedra acus</i>		0.02	0.19		

	隐头舟形藻 <i>Navicula cryptocephala</i>		0.02			
蓝藻门	伪鱼腥藻 <i>Pseudoanabaena</i> sp.	0.2		0.19	0.34	0.56
Cyanophyta	拟短形颤藻 <i>Oscillatoria subbrevis</i>				0.03	0.09
	多变鱼腥藻 <i>Anabaena variabilis</i>					0.02
	类颤藻鱼腥藻 <i>Anabaena osicellarioides</i>				0.02	0.02
	膨胀色球藻 <i>Chlorococcus dilatatum</i>					0.02
	细小平裂藻 <i>Merismopedia tenuissima</i>	0.03			0.04	
绿藻门	双对栅藻 <i>Scenedesmus bijuga</i>					0.02
Chlorophyta	细丝藻 <i>Ulothrix tenerrima</i>		0.03		0.02	
	空球藻 <i>Eudorina</i> sp.	0.02				
甲藻门	不显著多甲藻 <i>Peridinium inconspicuum</i>	0.03				
Pyroptata	裸甲藻 <i>Gymnodinium aerucinosum</i> Stein.	0.04				

长江干流各江段浮游植物密度的变动范围为 $0.42 \times 10^4 \sim 7.73 \times 10^6$ (cells/L), 平均密度为 1.29×10^6 cells/L, 其中, 源区、金沙江、三峡库区、中游、下游五个区域的平均密度分别为 0.17×10^6 、 0.51×10^6 、 1.20×10^6 、 2.25×10^6 、 1.45×10^6 (cells/L), 在空间上整体呈现出“三峡库区以西密度低、以东密度高”的特点, 其中最高值出现在中游的 D8 江段 (7.73×10^6 cells/L), 最低值出现在同为中游的 D1 江段 (0.42×10^4 cells/L) (图 4)。长江干流各江段浮游植物生物量处于 $0.01 \sim 5.92$ mg/L 之间, 平均生物量为 1.34 mg/L。长江干流浮游植物生物量的贡献以硅藻为主 (60.34%), 其次为绿藻门 (26.75%)、蓝藻门 (10.24%)。五个研究区域浮游植物生物量的变化趋势为: 三峡库区 (1.76 mg/L) > 中游 (1.52 mg/L) > 下游 (1.45 mg/L) > 金沙江 (0.97 mg/L) > 源区 (0.3 mg/L)。从生物量组成来看, 源区生物量贡献率以硅藻门最高 (53%); 金沙江以硅藻门 (64.88%)、绿藻门 (24.67%) 为主; 三峡库区硅藻门的生物量贡献最高 (82.89%), 其次为绿藻门 (11.91%); 硅藻门 (43.84%)、绿藻门 (39.40%) 对中游生物量的贡献率相近; 下游硅藻对生物量的贡献最大, 为 67.18%, 绿藻次之为 16.46%。

2.3 长江干流浮游植物群落结构空间异质性检验

根据长江干流各区域浮游植物物种的 Jaccard 相似性系数 (表 5) 可知: 源区与其余各区域浮游植物物种均显示极不相似, 其中, 源区与中游浮游植物物种相似度最低 (0.20)。中游与下游浮游植物物种相似度最高 (0.60), 相似水平为中等相似。

运用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 对各区域浮游植物密度、生物量、硅藻商、多样性指数进行差异性检验, 结果显示, 各区域浮游植物生物量、密度之间无显著差异, 而浮游植物硅藻商 ($F=3.04, P<0.05$, 图 6)、Shannon 指数 ($F=6.14, P<0.01$, 图 6)、

Margalef 指数 ($F=8.63, P<0.01$, 图 6)、Pielou 指数 ($F=5.56, P<0.01$, 图 6) 存在显著或极显著差异, 具体表现为: (1) 下游硅藻商极显著高于中游 ($P<0.01$) 且显著高于源区、金沙江、三峡库区 ($P<0.05$); (2) 对于浮游植物 Shannon 指数, 金沙江极显著高于源区、中游、下游 ($P<0.01$), 而三峡库区与源区和下游、中游与下游之间存在显著差异 ($P<0.05$); (3) 对于 Margalef 指数, 金沙江、三峡水库与源区、中游、下游之间分别存在极显著差异 ($P<0.01$); (4) 对于 Pielou 指数, 金沙江、三峡水库与中游、下游之间存在极显著差异 ($P<0.01$)。

表 5 长江干流各区域的浮游植物物种相似性系数

	源区	金沙江	三峡库区	中游
金沙江	0.24**			
三峡库区	0.25**	0.33*		
中游	0.20**	0.36*	0.37*	
下游	0.22**	0.35*	0.32*	0.6

注: **为极不相似, *为中等不相似。

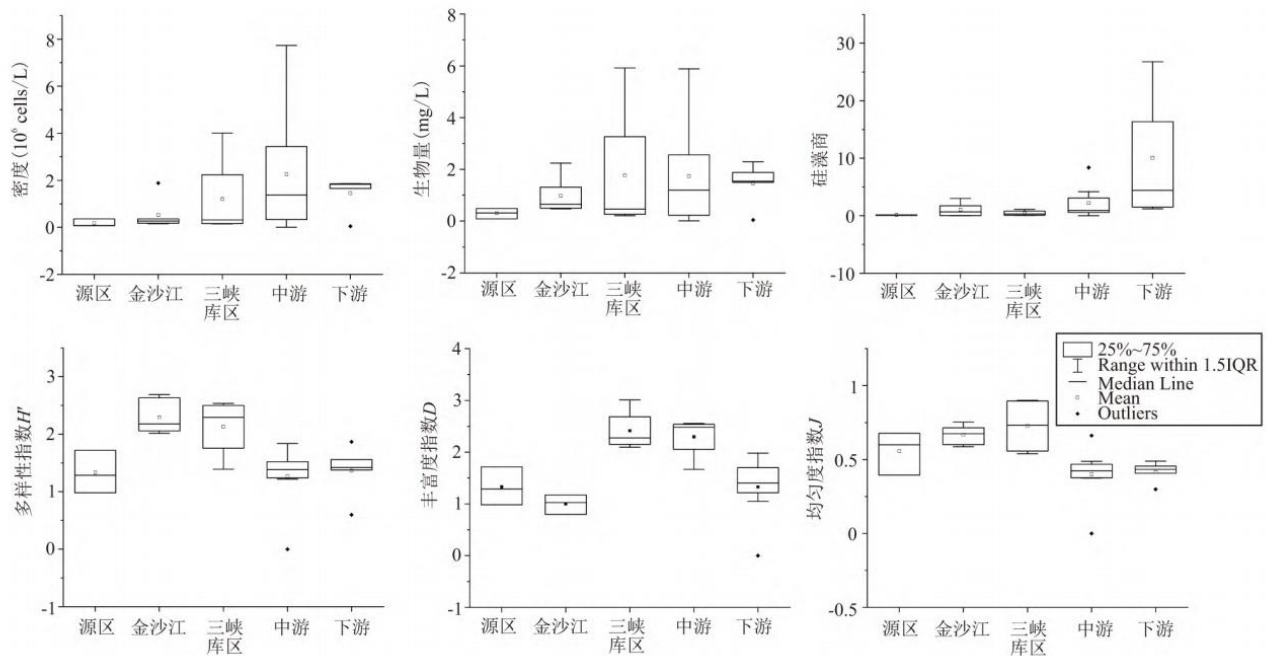


图 4 长江干流各区域浮游植物群落结构空间变化趋势

Fig. 4 Spatial patterns of phytoplankton community structure at different research areas in main stem of Yangtze River

2.4 浮游植物多样性指数

在长江干流水域各采样江段中,浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数 (H') 值的变化范围在 0.59~2.69 之间,均值为 1.66,参照表 2 的水质评估标准,对应水质类型为 α -中污型;Margalef 丰富度指数 (d) 的变动范围为 0.56~3.01,均值为 1.68;Pielou 均匀度指数 (J) 波动范围为 0.30~0.90,各江段均值为 0.53。

源区、金沙江区、三峡库区、中游、下游的 Shannon-Wiener 指数值分别为: 1.33、2.29、2.13、1.27、1.36;Pielou 指数值分别为: 0.56、0.67、0.73、0.40、0.42。五个区域的 Margalef 指数值分别为: 1.00、2.42、2.30、1.33、1.29。其中,各多样性指数的最高值均出现在金沙江,最低值均出现在中游江段。综合各指数评价各区域水质结果为:源区为 α -中污型、金沙江为 β -中污型、三峡库区为 β -中污型、中游为 α -中污型、下游为 α -中污型(图 5)。

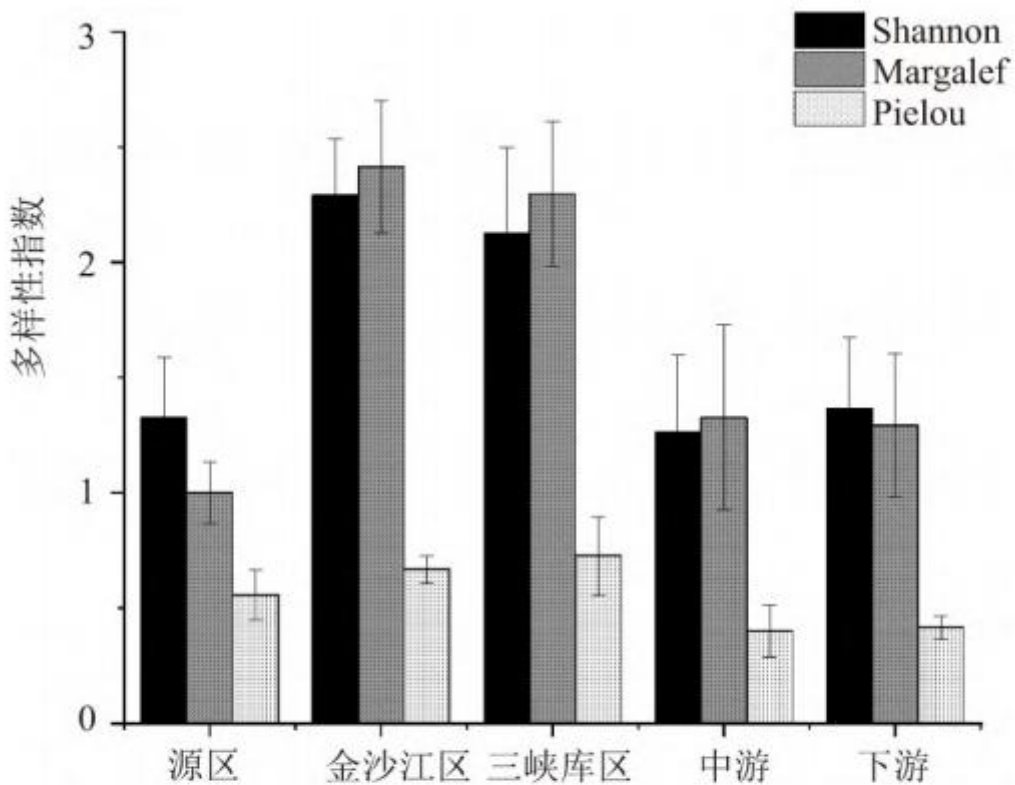


图 5 长江干流各区域浮游植物多样性指数

Fig. 5 Phytoplankton diversity indices of different research areas in main stem of Yangtze River

2.5 浮游植物群落结构与环境因子的关系

将长江干流各江段浮游植物群落结构特征(密度、生物量、 H' 、 D 、 J)与环境参数进行 Pearson 相关分析(表 6),结果表明:长江干流浮游植物密度与 WT、TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$),生物量与 WT 呈显著正相关关系 ($P < 0.05$),浮游植物 Shannon-wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数与 DO 均呈显著正相关关系 ($P < 0.05$)。

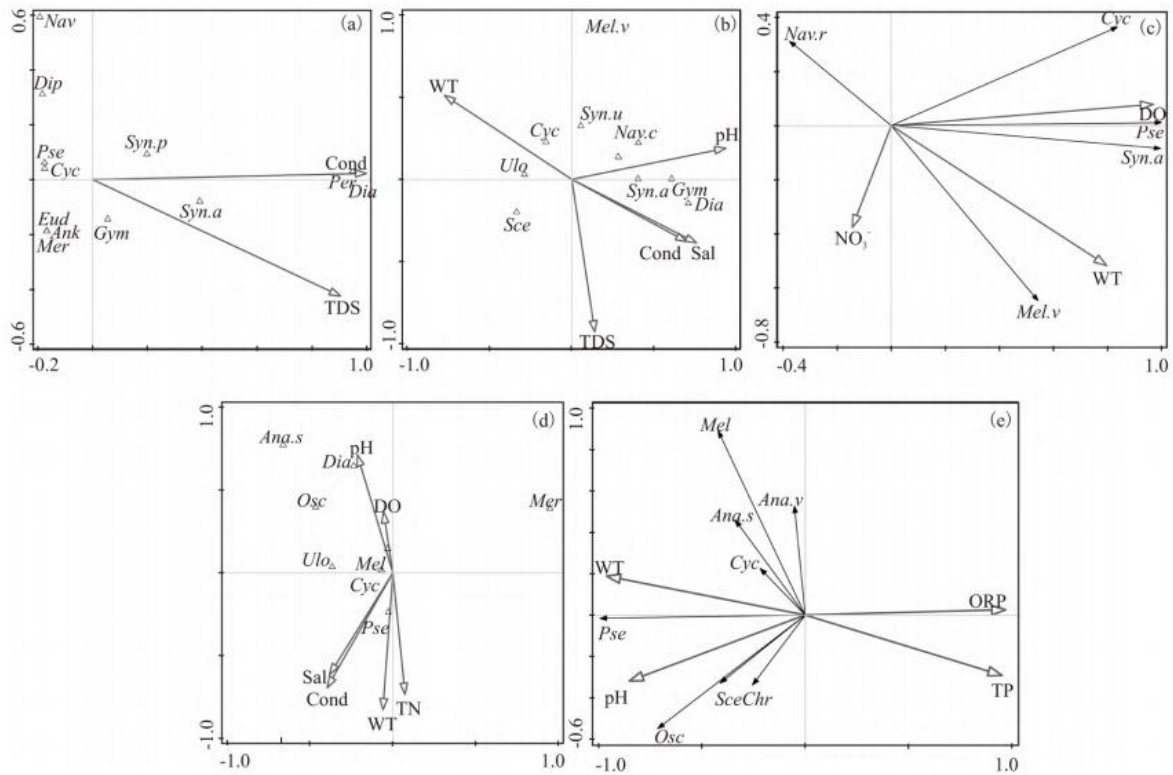
DCA(除趋势对应分析)检验结果表明,源区、金沙江、中游各轴梯度最大值大于3,三峡库区、下游各轴梯度最大值小于3,故对源区、金沙江、中游直接梯度采用典范对应分析(CCA),对三峡库区、下游采用冗余分析(RDA)。

表6 浮游植物群落结构特征与环境参数的Pearson 相关分析

	WT	TN	TP	NO ₃ ⁻	NH ₃ -N	Cond	TDS	Sal	DO	pH
密度	0.496**	0.646**	-0.344	0.255	0.656**	-0.202	-0.206	-0.218	-0.210	-0.227
生物量	0.422*	0.256	-0.310	0.160	0.218	-0.220	-0.217	-0.234	-0.044	-0.075
H'	-0.154	-0.184	0.119	-0.328	-0.143	-0.316	-0.324	-0.317	0.464*	0.124
D	-0.051	-0.110	0.048	-0.255	-0.093	-0.308	-0.328	-0.315	0.479*	0.053
J	-0.301	-0.227	0.190	-0.319	-0.156	-0.194	-0.203	-0.189	0.456*	0.074

注: **在0.01级别(双尾),相关性显著.*在0.05级别(双尾),相关性显著。

源区 CCA 排序图如图 6(a), 显示影响长江源区浮游植物常见物种分布的主要影响参数为 Cond、TDS, Cond 对群落变异的解释度为 81.3%, 可以认为 Cond 是驱动源区浮游植物变异的主要因子。不显著多甲藻、中型等片藻与 Cond 呈现强烈的正相关关系, 尖针杆藻与 Cond 呈正相关关系, 伪鱼腥藻、梅尼小环藻与 TDS 呈负相关关系。金沙江区 CCA 排序图如图 6(b)所示。轴 I、轴 II 特征值分别为 0.82、0.30, 累积贡献了 91.27%的物种变化解释值, pH 对金沙江物种的影响具有显著性 ($P < 0.05$), 对群落变异的解释度为 59.8%, TDS 的解释度为 25.1%。其中, 扁圆卵形藻、尖针杆藻与 pH 呈现明显的正相关关系, 变异直链藻与 TDS 呈现负相关关系, 细丝藻、梅尼小环藻与 WT 呈正相关关系, 与 Sal 呈负响应关系。三峡库区环境参数 RDA 分析表明, 轴 I、轴 II 分别解释了数据承载量的 99.84%、99.96%, DO 对群落变异的解释度为 93.8%, 见图 6(c)。浮游植物常见种多集中在坐标轴右侧, 与 WT 呈正相关关系, 伪鱼腥藻与 DO 具有强烈的正相关关系, 变异直链藻与 WT 呈正相关关系, 喙头舟形藻与 WT 呈现明显的负相关关系。中游 CCA 排序图如图 6(d)所示。轴 I、轴 II 特征值分别为 0.47、0.33, 累积解释了 87.45%的物种变化信息, 显示 Cond、TN、DO、WT、Sal、pH 是影响中游浮游植物群落结构的主要环境参数, 伪鱼腥藻与 WT 呈正相关关系, 普通等片藻与 pH 呈现明显的正相关关系, 细小平裂藻与 Sal、Cond 呈较强负相关性, 类颤藻鱼腥藻与 pH 有一定的正相关关系。下游环境参数与主要浮游植物 RDA 分析结果如图 6(e)所示, 其中, 轴 I、轴 II 的特征值为 0.69、0.21, 分别解释了物种变化信息的 68.53%、89.49%, 结果显示影响下游浮游植物群落结构的主要影响因素是 ORP、TP、pH、WT, 其中 ORP 对物种的影响具有显著性 ($P < 0.05$), 对驱动下游浮游植物群落的变异解释度为 64.8%。伪鱼腥藻与 ORP 具有强烈的负响应关系, 与 WT 呈正相关。拟短形颤藻与 pH 具有一定的正相关关系, 与 TP、ORP 呈负相关。硅藻门种类对 ORP、TP 有一定的负相关关系。



注: Nav: 简单舟形藻 *Navicula simplex*; Nav. c: 隐头舟形藻 *Navicula cryptocephala*; Nav. r: 喙头舟形藻 *Navicula rhynchocephala*; Cyc: 梅尼小环藻 *Cyclotella meneghiniana*; Syn. p: 美小针杆藻 *Synedra pulchella*; Syn. a: 尖针杆藻 *Synedra acus*; Syn. u: 肘状针杆藻 *Synedra ulna*; Mel: 颗粒直链藻极狭变种 *Melosira granulata* var. *Angustissima*; Mel. v: 变异直链藻 *Melosira varians*; Dip: 椭圆双壁藻 *Diploneis elliptica*; Coc: 扁圆卵形藻 *Cocconeis placentula*; Dia: 普通等片藻 *Diatoma vulgare*; Dia. m: 中型等片藻 *Diatoma mesodon*; Cym: 箱形桥弯藻 *Cymbella cistula*; Chr: 膨胀色球藻 *Chlorococcus dilatatum*; Mer: 细小平裂藻 *Merismopedia tenuissima*; Pse: 伪鱼腥藻 *Pseudoanabaena* sp.; Ana. s: 类颤藻鱼腥藻 *Anabaena osicellarioides*; Ana. v: 多变鱼腥藻 *Anabaena variabilis*; Ose: 拟短形颤藻 *Oscillatoria subbrevis*; Eud: 空球藻 *Eudorina* sp.; Ank: 镰形纤维藻 *Ankistrodesmus falcatus*; Sce: 双对栅藻 *Scenedesmus bijuga*; Ulo: 细丝藻 *Ulothrix tenerrima*; Gym: 裸甲藻 *Gymnodinium aerucinosum*; Per: 不显著多甲藻 *Peridinium inconspicuum*.

图 6 源区 (a)、金沙江 (b)、三峡库区 (c)、中游 (d)、下游 (e) 主要浮游植物与环境参数约束排序分析图

Fig. 6 CCA and RDA analysis of primary phytoplankton species and environmental parameters at each research area in main stem of Yangtze River

图 6 源区 (a)、金沙江 (b)、三峡库区 (c)、中游 (d)、下游 (e) 主要浮游植物与环境参数约束排序分析图

下载原图

Fig.6 CCA and RDA analysis of primary phytoplankton species and environmental parameters at each research area in main stem of Yangtze River

3 讨论

有研究表明, 国内大多数河流浮游植物类群以硅藻门、绿藻门种类(属数)为主[30]。从全流域来看, 长江干流浮游植物种类组成与生物量均以硅藻门为主, 其次为绿藻门。源区、金沙江、三峡库区、中游浮游植物物种组成呈现硅藻-绿藻型, 下游则呈现绿藻-硅藻-蓝藻型。从生物量组成来看, 源区、三峡库区、下游浮游植物为硅藻型, 金沙江、中游呈现硅藻-绿藻型, 具有河流的普遍性特征。调查期间各研究区域的优势门类中, 源区浮游植物以硅藻门、蓝藻门、绿藻门为主, 金沙江以硅藻门为主, 三峡库区以硅藻门、蓝藻门为主, 中、下游以蓝藻门、硅藻门、绿藻门为主, 这与已有研究中长江源头、金沙江、三峡库区、中下游浮游植物类群的研究结果大致相同[15, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39]。硅藻广泛分布于各种水体, 是较为原始的种类, 能够在低温、高盐、高碱的极端环境中生存, 在 15℃~35℃之间都能较好地生长[40, 41]。本研究期间 WT 变化范围在 8.68℃~

30.2℃, pH 范围在 7.59~8.69 之间(偏碱性), 适合硅藻的生长, 这可以解释本研究中硅藻门占优势的结果。

长江干流各区域浮游植物群落组成呈现明显的空间异质性。物种相似性分析表明, 长江中游、下游浮游植物物种组成相似性最高。源区与各区域物种组成相似性均为极不相似, 金沙江、三峡与中游、下游物种组成相似性均为中等不相似, 地势、海拔等地理环境条件的巨大落差使各区域之间浮游植物的交流减少, 而长江上游的水利工程显著降低了干流水域之间的连通性, 促进了长江干流各区域浮游植物群落结构异质化趋势的发展[42]。各区域浮游植物硅藻商、Shannon 指数、Margalef 指数、Pielou 指数存在显著或极显著差异关系。其中下游硅藻商(10.06, 重富营养)在 0.01 水平极显著高于中游(2.2, 富营养), 且在 0.05 水平显著高于源区(0.13, 贫营养)、金沙江(1.01, 富营养)、三峡库区(0.45, 贫营养)。基于硅藻商指数的长江干流水生态健康评价结果表明, 下游水体的富营养程度最高。基于 Shannon-Wiener 多样性及 Margalef 丰富度指数亦表明, 金沙江与三峡库区的水质要显著优于中、下游水质($P < 0.05$), 这可能与长江中下游区域密集的城市群及各种人类活动的影响有关[43, 44]。

伪鱼腥藻在本研究中多个区域占据优势地位, 其中在下游的优势度高达 0.56, 呈现绝对优势, 类似的研究结果也出现于国内外多地湖泊、水库[45, 46, 47, 48], 这主要是由于伪鱼腥藻为丝状群体, 且对不同气候和环境具有高度的适应能力[49]。随着长江流域工农业的快速发展, 城镇化程度不断加强, 人类活动导致大量的氮、磷等营养盐输入长江水体, 这为伪鱼腥藻的增殖提供了有利的营养条件[50]。伪鱼腥藻能产生毒素, 大规模蓝藻水华的分解会使蓝藻毒素达到较高浓度, 对人畜造成危害[51], 因此, 本研究认为, 长江的水生生物监测应加强对伪鱼腥藻的监控, 避免以伪鱼腥藻为主要优势种的蓝藻水华的发生。

水温、光照等环境因素对浮游植物类群分布具有重要的影响[52, 53]。水温对浮游植物的繁殖周期具有关键的影响作用[54], 约束排序分析结果显示, WT 是影响金沙江、三峡库区常见浮游植物种类分布的重要因素。这是由于金沙江至三峡库区期间横亘多个省份, 经过巨大的地理跨度与海拔落差, 形成了较大的温差[2]; 而地处高原腹地的源区温度较低且温差较小, 因此温度不是影响该区域浮游植物种类分布的重要因素。Cond 是反映通过径流进入水体的离子总量的指标, 与流域内周边土地利用类型密切相关, 在城镇化快速发展的地区尤为显著, 且 TDS 与 Cond 存在正相关关系[55]。尽管源区的 TDS、Cond 数值相较下游更低一些, 其对源区水域浮游植物仍表现出了强烈影响, 这可能与源区所在城市的快速发展有关[31, 56], 结合前文中伪鱼腥藻在源区浮游植物中的优势地位, 源区水体虽然相对金沙江、中游、下游清洁, 但是在一定程度上受到工业污染及人类活动的影响。本研究采样完成于高温多雨的夏季, 而降雨会将陆域积累的营养盐冲刷进河流中, 促使大量营养物质溶解于水中, 且源区农牧业相对发达, 这可能是源区水质逐步变差的潜在影响因素。此外, Cond 对中游浮游植物影响显著, 这可能是由于长江中游区域经济发展突出, 尤其中游城市人口众多, 工农业生产与城市生活对水生态健康干扰较大。

pH 是影响金沙江、中游、下游水域常见浮游植物种类分布的重要因素之一。土质及土壤的溶出物会直接影响水的 pH[57], 长江中下游地区降水充沛, 雨水与地下水溶出土质中的各种离子, 由于不同区段的土质不同, 溶出的水汇聚进入长江可能造成 pH 的差异, 进而影响浮游植物群落的分布, 此外受浮游植物光合作用、呼吸等过程影响的碳酸盐体系也会导致水体 pH 值的变化[58, 59]。因此, 作者推测 pH 与金沙江、中游、下游浮游植物分布的相关性是由于土壤溶出物、浮游植物与水体 pH 之间的相互作用造成的。自然水体中的溶解氧主要通过空气溶入水体和浮游植物的光合作用释放氧气两种途径获得, 溶解氧对水生生物的生长具有至关重要的作用, 其含量作为水质健康评价的指标被广泛运用[60]。浮游植物的特定增长率在一定浓度条件下与氮含量呈正反馈关系[61], 这与本研究中 TN、NH₄⁺浓度与长江干流浮游植物密度在 0.01 水平下显著正相关的结果相符。DO 与浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数呈显著正相关关系($P < 0.05$), 表明较高的 DO 对长江干流水生生物多样性具有明显的积极作用。

长江干流浮游植物的分布除了受 Cond、ORP、pH、DO 等环境因素影响外, 水体流速对浮游植物生物量影响也很显著, 流速较快时浮游植物难以聚集生长, 导致其数量受到限制[62]。三峡库区的水流相对三峡库区下游平缓, 采样点位于三峡大坝上游的 C4 在整个干流各江段中呈现最高的浮游植物生物量(5.92 mg/L), 而三峡大坝下游的 D1 江段浮游植物生物量仅有 0.01 mg/L, 由此可见, 三峡库区-中游之间的浮游植物生物量巨大落差可能是由于大坝上下游的流速差导致的[63]。三峡大坝的建设严重影响了浮游植物类群的分布, 这为大坝的建设与管理及生物多样性的保护提供理论参考。

浮游植物可用于指示水体受污染及富营养化的程度[55], Shannon-wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数能反映浮游植物群落结构, 并指示生态系统健康状况[39, 45, 53]。长江各区域的 Shannon-Wiener 多样性指数与 Margalef 丰富度指数自源区至下游均呈现先上升后下降的趋势, 评价结果显示长江干流的整体水质为中污, 而长江干流整体 Pielou 均匀度指数处于寡污水平, 这表明长江干流浮游植物种类数虽然不多, 但各种类个体分布均匀[64]。长江源区的 Shannon-Wiener 指数评价水平为 α -中污型, Margalef 指数为多污型, Pielou 指数为寡污型, 可能是长江源区恶劣的自然环境(水体温度低、流速快、泥沙含量高等)抑制了对环境敏感的浮游植物的生长, 导致其多样性、丰富度较低。金沙江、三峡库区的 Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数、Pielou 指数评价结果分别为 β -中污型、 β -中污型、寡污型。长江中下游地处平原地区, 生态健康状况受频繁的人类活动干预影响, 导致其生态环境系统逐渐转化为不断恶化的人工-自然复合地质环境系统[1]。长江中游的 Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数、Pielou 指数评价水平分别为 α -中污型、 α -中污型、 β -中污型, 下游三种指数依次为 α -中污型、 α -中污型、 β -中污型。总体而言, 在长江干流各研究区域, 金沙江水质优于其它区域, 中游、下游水质状况较差, 该结论与胡愈焯等使用着生藻类对长江流域生态评价的结果一致[65]。恢复长江水生生态系统的群落结构与生态功能具有重要意义[66], 生态治理工作仍需加大力度。

4 结论

(1) 长江干流流域共检测出浮游植物 6 门 53 属, 共 112 种, 以硅藻门(21 属 53 种)、绿藻门(17 属 37 种)为主, 种类数在空间上呈现中游>金沙江>下游>中游>源区的变化趋势。源区、金沙江、三峡库区、中游浮游植物种类组成中均以硅藻门物种丰富度最高; 下游以绿藻门、硅藻门为主。全流域各区域浮游植物优势种状况存在差异, 源区优势种以硅藻门优势度最高, 金沙江优势种无论是种类数量还是优势度均以硅藻最高; 三峡库区硅藻、蓝藻同样占据最高的优势地位; 中游、下游优势种均以蓝藻门优势度最高。从浮游植物生物量来看, 三峡库区最高, 源区最低; 藻密度则表现为中游最高, 源区最低。

(2) 长江干流五个区域浮游植物物种组成、硅藻商、Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数、Pielou 指数存在异质化趋势, 但中游与下游差异性相对较小。Pearson 相关分析表明, WT、TN、NH₃-N 与 DO 是影响长江干流浮游植物群落结构组成的主要因素。约束排序分析表明, 影响各区域浮游植物主要物种分布的主要因素如下, 源区: Cond、TDS; 金沙江: pH、TDS、Sal、WT、Cond; 三峡库区: DO、NO₃⁻、WT; 中游: Cond、TN、DO、WT、Sal、pH; 下游: ORP、TP、pH、WT。

(3) 综合 Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数、Pielou 指数评价各区域水质结果为: 长江干流整体处于寡污-中污水平, 其中源区为 α -中污型、金沙江为 β -中污型、三峡库区为 β -中污型、中游为 α -中污型、下游为 α -中污型。

参考文献

- [1] 李长安, 殷鸿福, 俞立中, 等. 关于长江流域生态环境系统演变与调控研究的思考[J]. 长江流域资源与环境, 2001(6):550-557. LI C A, YIN H F, YU L Z, et al. Some consideration on evolution and control of ecological environment system in Yangtze Basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2001(6):550-557.
- [2] 谢平. 长江及其生物多样性的前世今生[M]. 武汉: 长江出版社, 2020:1-6. XIE P. The past and present of the Yangtze River and its biodiversity [M]. Wuhan: Changjiang Press, 2020:1-6.
- [3] 李琴, 陈家宽. 长江大保护的理論思考: 长江流域的自然资本、文明溯源及保护对策[J]. 科学, 2017, 69(2):29-32. LI Q, CHEN J K. Theoretical thinking on the great protection of the Yangtze River: the natural capital, the origin of civilization and the protection countermeasures of the Yangtze River Basin [J]. Science, 2017, 69(2):29-32.
- [4] 王学雷, 吕晓蓉, 杨超. 长江流域湿地保护、修复与生态管理策略[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(12):2647-2654. WANG X L, LV X R, YANG C. Strategies of wetland protection, restoration and ecological management

in the Yangtze River Basin [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(12):2647-2654.

[5] CHEN Y, CHAPMAN D C, JACKSON J. Fishery resources, environment, and conservation in the Mississippi and Yangtze (Changjiang) river basins [M]. North Bethesda: American Fisheries Society, 2016.

[6] RUBIN M A, LEFF L G. Nutrients and other abiotic factors affecting bacterial communities in an Ohio River (USA) [J]. *Microbial Ecology*, 2007, 54(2):374-383.

[7] STEPHEN R, JAMES F, JAMES R. Cascading trophic interactions and lake productivity [J]. *Limnology and Oceanography Bulletin*, 1985, 35(10):634-639.

[8] 刘懂, 陈晨, 王莉, 等. 象山港海洋牧场示范区浮游植物的群落特征及其与环境因子的关系 [J]. *海洋与湖沼*, 2016, 47(5):1024-1032. LIU D, CHEN C, WANG L, et al. Community structure of phytoplankton and the relationship with environmental variables in marine pasture demonstration area in Xiangshan Bay [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2016, 47(5):1024-1032.

[9] 刘林峰, 周先华, 高健, 等. 神农架大九湖湿地浮游植物群落结构特征及营养状态评价 [J]. *湖泊科学*, 2018, 30(2):417-430. LIU L F, ZHOU X H, GAO J, et al. Phytoplankton community structure and trophic status evaluation in Dajiuhu wetland of Shennongjia Alpine [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(2):417-430.

[10] BLAIS M, ARDYNA M, GOSSELIN M, et al. Contrasting interannual changes in phytoplankton productivity and community structure in the coastal Canadian Arctic Ocean [J]. *Limnology and Oceanography*, 2017, 62(6):2480-2497.

[11] KATSIAPI M, MOUSTAKA-GOUNI M, SOMMER U. Assessing ecological water quality of fresh waters: PhyCoI—a new phytoplankton community Index [J]. *Ecological Informatics*, 2016, 31:22-29.

[12] 贺蓉, 蒋礼, 郑曙明, 等. 三峡库区甘井河水域牧场浮游植物群落结构及水质评价 [J]. *水生生物学报*, 2015, 39(5):902-909. HE R, JIANG L, ZHENG S M, et al. The study of the community structure of the phytoplankton and the assessment of the water quality in the Ganjing River of the Three Gorge Reservoir [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2015, 39(5):902-909.

[13] HUISMAN J, MATTHIJS H C, VISSER P M. *Harmful Cyanobacteria* [M]. Berlin: Springer, 2005:1-23.

[14] 沈蓉蓉. 长江下游干流浮游植物分布格局及其与环境因子相关性 [D]. 上海: 上海师范大学, 2019:4-8. SHEN R R. Distribution pattern of phytoplankton in the lower reaches of the Yangtze River and its correlation with environmental factors [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2019:4-8.

[15] 闵敏, 柴元冰, 陈欣佛, 等. 长江源区浮游植物群落特征与水环境因子关系研究 [J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(12):28-33. MIN M, CHAI Y B, CHEN X F, et al. Relation between phytoplankton community characteristics and water environmental factors in the source region of Yangtze River [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*:2020, 37(12):28-33.

[16] 胡莲, 邹曦, 郑志伟, 等. 三峡水库神农溪浮游植物群落结构及其与环境因子的关系 [J]. *水生态学杂志*,

2020, 41(6):27-36. HU L, ZHOU X, ZHENG Z W, et al. Phytoplankton community structure and its relationship with environmental factors in Shennong Stream of Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Hydroecology, 2020, 41(6):27-36.

[17] 孙晓梅, 刘绍平, 段辛斌, 等. 长江中游江段浮游生物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 淡水渔业, 2021, 51(3):3-12. SUN X M, LIU S P, DUAN X B, et al. Plankton community structure and its relationship with environmental factors in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Freshwater Fisheries, 2021, 51(3):3-12.

[18] 张佳敏, 高健, 杨诚, 等. 以鲢、鳙养殖为主的长江中下游武山湖浮游植物群落结构特征[J]. 湖泊科学, 2020, 32(6):1771-1783. ZHANG J M, GAO J, YANG C, et al. Phytoplankton community structure of Lake Wushan stocked densely with planktivorous filter-feeding bighead and silver carp, middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(6):1771-1783.

[19] 黄园钧. 十年禁渔: 推动长江经济带发展的重大举措[N]. 学习时报, 2020-02-26(7) . HUANG Y J. Ten-year fishing ban: a major initiative to promote the development of the Yangtze River Economic Belt[N]. Study Time, 2020-02-26(7) .

[20] 第十三届全国人民代表大会第四次会议关于国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要的决议[J]. 中华人民共和国全国人民代表大会常务委员会公报, 2021(3):428-502. Resolution of the Fourth Session of the 13th National People's Congress on the 14th Five-Year Plan for National Economic and Social Development and the Outline of the Long-term Goals for 2035[J]. Gazette of the Standing Committee of the National People's Congress of the People's Republic of China, 2021(3):428-502.

[21] 韩谓, 潘保柱, 赵耿楠, 等. 长江源区浮游植物群落结构及分布特征[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(11):2621-2631. HAN X, PAN B Z, ZHAO G N, et al. Phytoplankton community structure and distribution characteristics in the source region of the Yangtze River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(11):2621-2631.

[22] 张馨月, 钱宝, 樊云, 等. 长江干流宜昌段浮游植物群落结构初步研究[J]. 人民长江, 2017, 48(3):28-32, 47. ZHANG X Y, QIAN B, FAN Y, et al. Preliminary research on phytoplankton community in Yichang reach of Yangtze River[J]. Yangtze River, 2017, 48(3):28-32, 47.

[23] 章宗涉, 黄翔飞. 淡水浮游生物研究方法. 科学出版社[M]. 1991:340-344. ZHANG Z S, HUANG X F. Methods for study on freshwater plankton[M]. Beijing: Science Press, 1991:340-344.

[24] 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, 2006:27-9. HU H J, WEI Y X. System, classification and ecology of freshwater algae in China[M]. Science Press. 2006:27-9.

[25] 胡鸿钧, 李尧英, 魏印心, 等. 中国淡水藻类[M]. 上海科学技术出版社, 1980. HU H J, LI Y Y, WEI Y X, et al. Classification of Phytoplankton in China[M]. Shanghai: Shanghai Science Press, 1980.

[26] 王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准[J]. 中国环境监测, 2002, 18(5):47-49. WANG M C, LIU X Q, ZHANG J H. Evaluation method and classification standard of lake eutrophication[J]. Environmental Monitoring in China, 2002, 18(5):47-49.

-
- [27] 陈红, 刘清, 潘建雄. 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 H, LIU Q, PAN J X. 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.
- [28] 沈韞芬, 章宗涉, 龚循矩, 等. 微型生物监测新技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990:127-128. SHEN Y F, ZHANG Z S, GONG X J, et al. New techniques for microbiological monitoring[M]. Beijing: China Building Industry Press, 1990:127-128.
- [29] 高原, 赖子尼, 李捷, 等. 连江浮游动物多样性的空间分布[J]. 生物多样性, 2013, 21(6):699-708. GAO Y, LAI Z N, LI J, et al. Spatial pattern of zooplankton diversity in Lianjiang River, Guangdong Province, China[J]. Biodiversity Science, 2013, 21(6):699-708.
- [30] 洪松, 陈静生. 中国河流水生生物群落结构特征探讨[J]. 水生生物学报, 2002(3):295-305. HONG S, CHEN J S. Structure characteristics of aquatic community from the main rivers in China[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2002(3):295-305.
- [31] 李伟, 李鲁丹, 李欢, 等. 长江三源浮游植物群落特征差异与环境因子关系研究[J]. 长江科学院院报: 1-7[2021-04-07]. LI W, LI L D, LI H, et al. Difference on the characteristics of phytoplankton community in headwaters of the Yangtze river and its interaction with environmental factors[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1-7[2021-04-07].
- [32] 殷大聪, 许继军, 金燕, 等. 长江源与澜沧江源区浮游植物组成与分布特性研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(1):61-66. YIN D C, XU J J, JIN Y, et al. Characteristics of phytoplankton assemblage and distribution in the source regions of the Yangtze River and Lancang River[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(1):61-66.
- [33] 崔玉香, 张静, 柴元冰, 等. 长江源区浮游植物群落特征研究[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(1):20-25. CUI Y X, ZHANG J, CHAI Y B, et al. Research on phytoplankton community in the source region of the Yangtze River[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43(1):20-25.
- [34] 魏志兵, 何勇凤, 龚进玲, 等. 金沙江干流浮游植物群落结构特征及其时空变化[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(6):1356-1365. WEI Z B, HE Y F, GONG J L, et al. Temporal and spatial variation of phytoplankton community structure in the main stream of the Jinsha River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(6):1356-1365.
- [35] 陈勇. 三峡库区浮游植物与轮虫的群落结构研究[D]. 重庆: 西南大学, 2009:13-22. CHEN Y. Studies on structure of phytoplankton and rotifer community in the three Gorges Reservoir[D]. Chongqing: Southwest University, 2009:13-22.
- [36] 杨浩. 三峡水库蓄水对长江干流浮游植物群落物种组成的影响研究. 重庆: 西南大学, 2012:15-23. YANG H. Effect of impoundment on community structure of the phytoplankton in the main stream of the Three Gorges Reservoir[D]. Chongqing: Southwest University, 2012:15-23.
- [37] 王松波, 耿红, 吴来燕. 三峡水库蓄水后库区浮游植物研究进展[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2013, 32(4):19-23. WANG S B, GENG H, WU L Y. Research advances of phytoplankton after impounding in the Three Gorges

Reservoir region[J]. Journal of South-Central University for Nationalities (Natural Science Edition), 2013, 32(4):19-23.

[38] 李欢, 赵伟华, 林莉. 长江中下游干流浮游藻类空间分布特征初探[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(6):94-99. LI H, ZHAO W H, LIN L. Spatial distribution features of phytoplankton community in middle-low reaches of mainstream Yangtze River[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(6):94-99.

[39] 郭杰, 王珂, 段辛斌, 等. 长江荆江段浮游生物群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(9):1954-1964. GUO J, WANG K, DUAN X B, et al. Characteristics of plankton community and its relationships with environmental factors in the Jingjiang reach of the Yangtze River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(9):1954-1964.

[40] BLINN DW. Diatom community structure along physicochemical gradients in Saline Lakes[J]. Ecology, 1993, 74(4):1246-1263.

[41] 张军燕, 高志, 沈红保, 等. 拉萨河春季浮游生物群落结构特征研究[J]. 淡水渔业, 2017, 47(4):23-28. ZHANG J Y, GAO Z, SHEN H B, et al. Community structure characteristics of plankton in Lhasa River in spring[J]. Freshwater Fisheries, 2017, 47(4):23-28.

[42] 胡俊, 舒卫先, 韦翠珍, 等. 基于浮游植物群落的纵向连通性初步研究[J]. 生态环境学报, 2018, 27(1):79-86. HU J, SHU W X, WEI C Z, et al. Study on the Longitudinal Connectivity Based on Community Structure of Phytoplankton[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(1):79-86.

[43] 孙玉平, 于恒国, 周钦, 等. 典型富营养化城市河流——浙江温瑞塘河的浮游植物群落类型与季节变化[J]. 湖泊科学, 2018, 30(2):375-384. SUN Y P, YU H G, ZHOU Q, et al. Seasonal variation of phytoplankton communities in Wenruitang River: A typical eutrophic urban river, Zhejiang Province[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(2):375-384.

[44] 陈向, 周伟奇, 李伟峰. 北京河流底栖硅藻沿城乡梯度带空间分布及其季节变化[J]. 生态学报, 2017, 37(10):3586-3595. CHEN X, ZHOU W Q, LI W F. Benthic diatom assemblages and their seasonal variation in streams along an urban-rural gradient in the Beijing metropolitan area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(10):3586-3595.

[45] 黄志敏, 陈椽, 刘之威, 等. 贵州百花湖夏季浮游植物昼夜垂直分布特征[J]. 生态学报, 2014, 34(19):5389-5397. HUANG Z M, CHEN C, LIU Z W, et al. Diel vertical distribution patterns of phytoplankton in Baihua Reservoir, Guizhou Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(19):5389-5397.

[46] 张鑫, 易齐涛, 谢凯, 等. 淮南采煤塌陷湖泊浮游植物优势种的营养动力学[J]. 湖泊科学, 2018, 30(3):713-722. ZHANG X, YI Q T, XIE K, et al. Nutrient kinetics of dominant species of phytoplankton in the artificial lakes formed from land subsidence by mining activities in the Huainan coalmine subsidence areas[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(3):713-722.

[47] HUANG X, HUANG Z, CHEN X, et al. The predominant phytoplankton of *Pseudoanabaena* holding specific biosynthesis gene-derived occurrence of 2-MIB in a drinking water reservoir[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25:19134-19142.

-
- [48] MOLICA R, OLIVEIRA E, CARVALHO P, et al. Occurrence of saxitoxins and an anatoxin-a(s)-like anticholinesterase in a Brazilian drinking water supply[J]. *Harmful Algae*, 2005, 4:743-753.
- [49] 庞一鸣, 陈淑华, 徐杭州, 等. 伪鱼腥藻(*Pseudanabaena* sp.)及其产生 2-甲基异莰醇(2-MIB)的研究进展[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(5):1530-1548. PANG Y M, CHEN S H, XU HZ, et al. Research progress on *Pseudanabaena* sp. and its metabolite 2-methylisoborneol (2-MIB) [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(5):1530-1548.
- [50] YAN X, XU X, WANG M, et al. Climate warming and cyanobacteria blooms: Looks at their relationships from a new perspective[J]. *Water Research*, 2017, 125:449-457.
- [51] 姜锦林, 宋睿, 任静华, 等. 蓝藻水华衍生的微囊藻毒素污染及其对水生生物的生态毒理学研究[J]. *化学进展*, 2011, 23(1):246-253. JIANG J L, SONG R, REN J H, et al. Advances in pollution of cyanobacterial blooms-producing microcystins and their ecotoxicological effects on aquatic organisms[J]. *Progress in Chemistry*, 2011, 23(1):246-253.
- [52] 黄国佳, 李秋华, 陈椽, 等. 贵州高原三板溪水库浮游植物功能群时空分布特征[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(2):418-428. HUANG G J, LI Q H, CHEN C, et al. Phytoplankton functional groups and their spatial and temporal distribution characteristics in Sanbanxi Reservoir, Guizhou Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(2):418-428.
- [53] GOMES L C, MIRANDA L E. Hydrologic and climatic regimes limit phytoplankton biomass in reservoirs of the Upper Parano River Basin, Brazil[J]. *Hydrobiologia*, 2001, 457(1-3):205-214.
- [54] PENG S T, QIN X B, SHI H H, et al. Distribution and controlling factors of phytoplankton assemblages in a semi-enclosed bay during spring and summer[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 64(5):941-948.
- [55] WALKER C E, PAN Y D. Using diatom assemblages to assess urban stream condition[J]. *Hydrobiologia*, 2006, 561:179-189.
- [56] 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):3290-3301. BAI H F, WANG Y R, SONG J X, 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):3290-3301.
- [57] 林海, 王源, 李冰. 北京市妫水河浮游动物群落结构与水质评价[J]. *生态学报*, 2019, 39(20):7583-7591. LIN H, WANG Y, LI B. Evaluation of zooplankton community structure and water quality of Guishui River, Beijing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20):7583-7591.
- [58] ABIRHIRE O, NORTH R L, HUNTER K, et al. Environmental factors influencing phytoplankton communities in Lake Diefenbaker, Saskatchewan, Canada[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2015, 41(S2):118-128.
- [59] 杨丽标, 韩小勇, 孙璞, 等. 巢湖藻类组成与环境因子典范对应分析[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(5):952-958. YANG L B, HAN X Y, SUN P, et al. Canonical Correspondence Analysis of Algae Community and Its Environmental Factors in the Lake Chaohu, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(5):952-958.

-
- [60] 俞焰, 刘德富, 杨正健. 千岛湖溶解氧与浮游植物垂向分层特征及其影响因素[J]. 环境科学, 2017, 38(4):1393-1402. YU Y, LIU D F, YANG Z J. Vertical stratification characteristics of dissolved oxygen and phytoplankton in Thousand-island Lake and their influencing factors[J]. Environmental Science, 2017, 38(4):1393-1402.
- [61] 郑晓宇, 顾詠洁, 金妍, 等. 不同氮、磷质量浓度下四尾栅藻的生长研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(11):2663-2668. ZHENG X Y, GU Y J, JIN Y, et al. Study on the growth of *Scenedesmus quadricauda* under different nutrients[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(11):2663-2668.
- [62] 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. TAN X, XIA X L, CHENG X L, et al. Temporal and spatial pattern of phytoplankton community and its biodiversity indices in the Danjiangkou Reservoir[J]. Environmental Science, 2011, 32(10):2875-2882.
- [63] 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. ZHANG J, YE D, ZHU H T, et al. Characteristics of spring algal blooms under different in ponded levels in tributaries of the three gorges reservoir[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2019, 43(4):884-891.
- [64] 韦丽丽, 周琼, 谢从新, 等. 新疆伊犁河周丛藻类群落结构及其水质生物学评价[J]. 水生态学杂志, 2015, 36(6):29-38. WEI L L, ZHOU Q, XIE C X, et al. Community structure of periphyton and biological assessment of water quality in the Yili River, Xinjiang Uyghur autonomous region[J]. Journal of Hydroecology, 2015, 36(6):29-38.
- [65] 胡愈忻, 曹亮, 屈仁超, 等. 长江流域着生藻类群落结构的空间格局及其生态评价[J]. 环境科学: 1-15[2022-05-31]. HU Y X, CAO L, QU R C, et al. Community composition and assessment on the aquatic ecosystem of periphytic algae in the Yangtze River Basin[J]. Environmental Science:1-15[2022-05-31].
- [66] 顾毓蓉, 薛庆举, 万翔, 等. 基于 P-IBI 因子分析法评价生态修复后松雅湖水生态状况[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26(6):1325-1334. GU Y R, XUE W J, WANG X, et al. Aquatic ecosystem state evaluation based on P-IBI factor analysis in Songya Lake after ecological restoration[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2020, 26(6):1325-1334.