

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202307035



三峡库区源头溪流湾滩河 浮游植物群落特征

陈焱垚¹, 孙荣¹, 杨瑛¹, 胡家榕¹, 代晓涵²

(1. 华侨大学 化工学院, 福建 厦门 361021;

2. 甘肃农业大学 植物保护学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为探讨山地河流源头溪流浮游植物群落的空间格局和生物多样性维持机制,对湾滩河流域浮游植物群落空间结构变化特征及其与环境因子的关系进行研究;在三峡库区汤溪河上游的湾滩河干支流设置 9 个样地,调查浮游植物物种组成和环境变量,进行 Spearman 相关性分析。结果表明:丰水期和枯水期的浮游植物物种组成均主要以硅藻-绿藻型为主;均匀度指数和 Simpson 生物多样性指数变化不大,水质较为清洁;丰水期和枯水期浮游植物密度分别为 $1.9856 \times 10^4 \sim 5.7263 \times 10^4$, $2.0332 \times 10^4 \sim 6.0060 \times 10^4$ cells $\cdot L^{-1}$; pH 值、溶解氧(DO)、总磷(TP)、海拔是影响湾滩河浮游植物特征指数变化的关键因子。

关键词: 浮游植物; 群落特征; 空间格局; 生物多样性; 湾滩河; 三峡库区

中图分类号: Q 948.8

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2024)05-0661-06

Phytoplankton Community Characteristics of Headstream Wantan River in Three Gorges Reservoir Area

CHEN Yanyao¹, SUN Rong¹, YANG Ying¹,
HU Jiarong¹, DAI Xiaohan²

(1. College of Chemical Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. College of Plant Protection, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to explore the spatial pattern and biodiversity maintenance mechanism of phytoplankton community in headstream of mountain rivers and streams, the spatial structure change characteristics of phytoplankton community in Wantan River basin and their relationship with environmental factors were studied. Nine plots were set up in Wantan River tributaries in the upper reaches of Tangxi River in the Three Gorges Reservoir Area. The phytoplankton species composition and environmental variables were investigated, and Spearman correlation and other analyses were performed. The results showed that the phytoplankton species composition was mainly diatomic-green algae type in both wet and dry periods; evenness index and Simpson biodiversity index changed little, and the water quality was relatively clean; the phytoplankton densities in wet and dry periods were $1.9856 \times 10^4 \sim 5.7263 \times 10^4$ and $2.0332 \times 10^4 \sim 6.0060 \times 10^4$ cells $\cdot L^{-1}$ respectively; the pH value, dissolved oxygen (DO), total phosphorus (TP) and altitude were key factors affecting the variation of phytoplankton characteristic index in the Wantan River.

Keywords: phytoplankton; community characteristics; spatial pattern; biodiversity; Wantan River; Three Gorges Reservoir area

收稿日期: 2023-07-27

通信作者: 孙荣(1982-),男,副教授,博士,主要从事环境生态学、环境规划的研究。E-mail: sunrong@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51509094); 华侨大学本科教育教学改革研究项目(HQJGYB2339)

在水库建设和形成过程中,随着水动力学条件的变化,水生物群落也发生巨大变化。对我国三峡建坝后的浮游植物群落变化进行监测,发现生物多样性格局与水库调度和水体滞留时间密切相关,而浮游植物作为生产者,是形成水域生产力基础之一^[1-2],在维持水域生态系统平衡、物质循环及能量流动等方面起着重要的作用^[3]。由于浮游植物对水环境的变化十分敏感,河流连续性^[4]及库区水生态环境的改变通常会导致浮游植物种类组成及群落结构发生变化^[4]。

目前,长江支游浮游植物的野外调查主要从环境因子对浮游植物群落结构的影响进行研究。朱爱民等^[5]对长江干流和支流淹没区与回水区的浮游植物进行调查,研究表明三峡工程蓄水对回水区浮游植物与水质的影响比长江干流大;朱爱民等^[6]对水库浮游植物群落结构特征进行分析,发现对淹没支流河口,浮游植物群落组成特点明显改变,组成成分发生明显变化,硅藻优势种类占比、最高优势度明显下降;张静等^[7]对长江干支流的浮游植物进行调查,认为总磷(TP)和总氮(TN)与浮游植物密度呈现显著正相关;朱永锋等^[8]对三峡水库进行了大范围调查,发现硝态氮(NO₃-N)、水温是影响支流库湾浮游植物群落结构的主要环境因子。

湾滩河是三峡库区左岸一级支流汤溪河的上游河段,干流长 46.2 km,流域面积 633.8 km²,截止目前湾滩河干流规划和建成的电站有 18 座,在我国西南山地河流梯级水电开发中具有典型的代表性。因此,针对湾滩河开展浮游植物群落结构研究对于西南山地河流和三峡库区河流水质安全和生态系统完整性具有重要意义。本文通过开展湾滩河浮游植物采样调查及水质评价,分析枯水期、丰水期湾滩河浮游植物群落结构特征及其与环境因子间的相关性,探明湾滩河水生态状况,以期对湾滩河水生态保护提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 采样点设置

湾滩河流域径流主要来源于降雨和地下水,径流的年内变化与降雨一致。每年 3 月下旬开始,随着降雨增加,径流也相应增大,4 月为汛前过渡期,5—9 月流域进入主汛期,径流量大增,10 月为汛后过渡期,降雨减少,径流也逐渐减少,11 月至次年 2 月很少降雨,径流主要由地下水补给。于 2020 年 7 月(丰水期)和 2020 年 12 月(枯水期)在湾滩河共布设 9 个采样点,涵盖回龙电站(S1)、鱼泉电站(S2)、汇合口(S3)、中源一级电站水坝(S4)、中源二级电站水坝(S5)、红池坝镇下(S6)、游家河汇口上(S7)、温水(S8)、转角楼(S9),如图 1 所示。样地特征一览表,如表 1 所示。表 1 中: L 为距电站水坝距离; H 为海拔; θ 为温度; $\rho(\text{DO})$ 为溶解氧(DO)的质量浓度; $\rho(\text{NH}_4\text{N})$ 为氨氮质量浓度; $\rho(\text{TP})$ 为总磷的质量浓度。

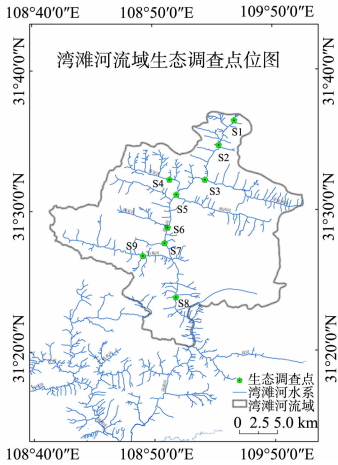


图 1 湾滩河流域生态调查点位图
Fig. 1 Bitmap of ecological survey points in Wantan River basin

表 1 样地特征一览表
Tab. 1 List of plot features

采样点	L/m	H/m	所在溪流	丰水期						枯水期					
				$\theta/^\circ\text{C}$	pH	$\rho(\text{DO})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\rho(\text{NH}_4\text{N})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\rho(\text{TP})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		$\theta/^\circ\text{C}$	pH	$\rho(\text{DO})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\rho(\text{NH}_4\text{N})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\rho(\text{TP})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	
S1	200	1 330	干流	22.2	7.9	8.5	0.14	0.01		14.3	7.8	8.1	0.16	0.01	
S2	600	685	干流	24.3	7.8	8.1	0.17	0.08		16.6	7.8	7.8	0.23	0.11	
S3	550	560	干流	24.6	7.8	8.3	0.48	0.09		15.5	7.6	7.9	0.62	0.16	
S4	430	660	支流	25.6	7.7	8.1	0.44	0.16		16.2	7.6	7.8	0.56	0.21	
S5	400	660	支流	25.5	7.6	6.8	1.01	0.21		15.8	7.5	6.6	1.22	0.29	
S6	1 120	450	干流	26.1	7.5	6.6	1.22	0.29		16.6	7.5	6.3	1.56	0.32	
S7	180	490	干流	25.9	7.6	7.1	1.02	0.28		16.2	7.4	6.7	1.35	0.31	
S8	3 000	510	干流	26.2	7.5	6.2	1.44	0.28		17.8	7.3	5.8	1.62	0.38	
S9	580	505	支流	25.8	7.4	5.8	1.49	0.27		18.2	7.3	6.1	1.63	0.39	

1.2 样品采集和处理

- 1) 水样定性。在调查水体的各采样点采集浮游植物定性水样,样品用质量分数 2%的鲁哥氏液固定后带回实验室观察,并进行浮游植物种类鉴别,确定水体中浮游植物的优势种。
- 2) 水样定量。将同一采样断面 3 个采样点水样混合后取 1 000 mL,加 15 mL 鲁哥氏液进行固定。
- 3) 室内观察与处理。种类鉴定参照《中国淡水藻类: 系统、分类及生态》,通过 0.1 mL 浮游生物计数框计数。

1.3 数据分析

采用优势度指数(Y)确定浮游植物的优势种,当优势度指数 $Y \geq 0.02$ 时,认定为优势种^[9]。优势度指数的计算式为

$$Y = \left(\frac{n_i}{N} \right) \cdot f_i。$$

上式中: n_i 为第 i 个物种的个体数; f_i 为第 i 个物种出现的频率; N 为每升水样中所有浮游植物的数量, $N = \frac{P_n}{F_n} \times \frac{C_s}{F_s} \times \frac{V}{v}$, 其中, P_n 为平均每片实际计数的某种浮游植物个数, F_n 为平均每片计数过的视野数, C_s 为计数框面积, F_s 为每个视野面积, V 为最终浓缩水量, v 为计数框容积。

2 研究结果与分析

2.1 湾滩河浮游植物群落结构时空分布特征

2.1.1 浮游植物的种类组成与优势种 湾滩河丰水期和枯水期浮游植物种类数(k),如图 2 所示。由图 2 可知:湾滩河丰水期共检出浮游植物 7 门 86 种,硅藻门种类最为丰富,共 47 种,绿藻门次之,有 22 种;枯水期共检出浮游植物 7 门 71 种,以硅藻门为主,共 42 种,其次是绿藻门 16 种。丰水期浮游植物种类数量比枯水期的种类数多。

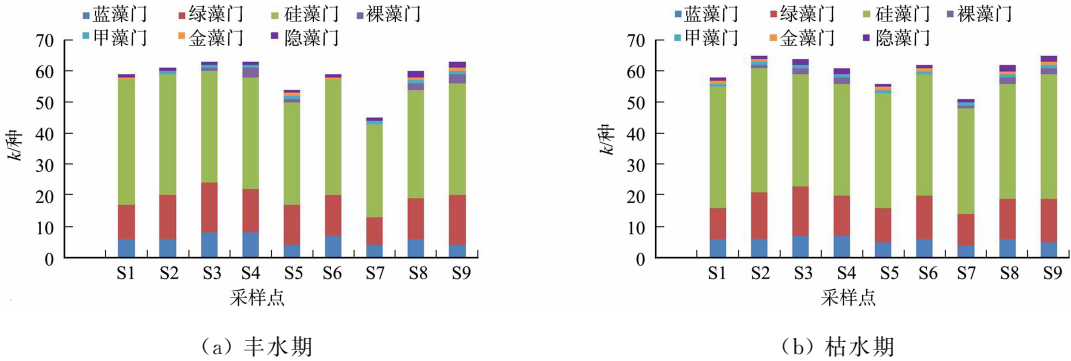


图 2 湾滩河丰水期和枯水期浮游植物种类数

Fig. 2 Number of phytoplankton species in Wantan River during wet and dry periods

调查期间,湾滩河丰水期和枯水期浮游植物优势种及优势度,如表 2 所示。由表 2 可知:不论丰水期还是枯水期,优势物种的种类均以蓝藻门的小颤藻为主,丰水期和枯水期浮游植物优势种种类相同。

表 2 湾滩河丰水期和枯水期的浮游植物优势种及优势度

Tab. 2 Dominant species and degree of phytoplankton in Wantan River during wet and dry periods

门类	优势种	Y	
		丰水期	枯水期
蓝藻门	小颤藻(<i>Oscillatoria tenuis</i>)	0.087	0.046
	尖针杆藻(<i>Synedra acus</i> var.)	0.046	0.031
硅藻门	线性舟形藻(<i>Navicula graciloides</i>)	0.033	0.022
	简单舟形藻(<i>Navicula simplex</i>)	0.036	0.022
	膨胀桥弯藻(<i>Cymbella tumida</i>)	0.041	0.019
金藻门	黄群藻(<i>Synuraceae urelin</i>)	0.033	0.019
绿藻门	普通水绵(<i>Spirogyra communis</i>)	0.044	0.021

2.1.2 浮游植物密度及生物量 湾滩河丰水期和枯水期浮游植物密度和生物量变化,如图 3 所示. 图 3 中: P 为浮游植物密度; w_B 为生物量。

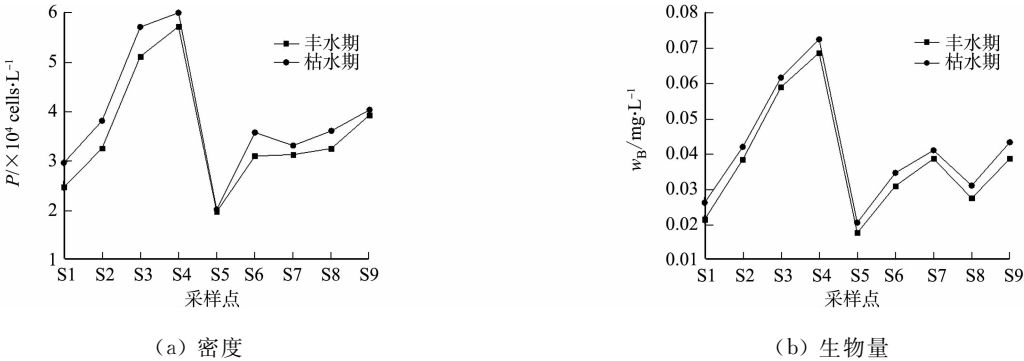


图 3 湾滩河丰水期和枯水期浮游植物密度和生物量变化

Fig. 3 Changes in phytoplankton density and biomass in Wantan River during wet and dry periods

由图 3 可知:丰水期浮游植物密度为 $1.985\ 6 \times 10^4 \sim 5.726\ 3 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$,生物量为 $0.017\ 8 \sim 0.068\ 8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;枯水期浮游植物密度为 $2.033\ 2 \times 10^4 \sim 6.006\ 0 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$,生物量为 $0.020\ 7 \sim 0.072\ 6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;不论是丰水期还是枯水期,采样点 S4 浮游植物密度及生物量最高,采样点 S3 次之,采样点 S5 的浮游植物密度及生物量最低。

2.1.3 浮游植物特征指数 湾滩河丰水期和枯水期浮游植物特征指数变化,如图 4 所示. 图 4 中: δ_H 为多样性指数; δ_j 为均匀度指数。

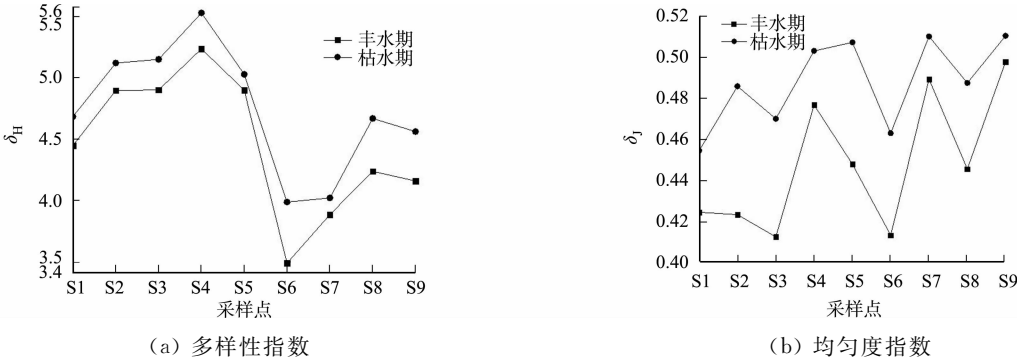


图 4 湾滩河丰水期和枯水期浮游植物特征指数变化

Fig. 4 Changes in phytoplankton characteristic indices in Wantan River during wet and dry periods

由图 4(a)可知:丰水期各采样点浮游植物多样性指数的变化范围为 $3.489\ 6 \sim 5.236\ 4$,平均值为 $4.461\ 6$;枯水期多样性指数在 $3.987\ 6 \sim 5.528\ 6$ 波动,平均值为 $4.750\ 2$ 。由图 4(b)可知:丰水期各采样点浮游植物均匀度指数为 $0.412\ 8 \sim 0.497\ 9$,平均值为 $0.448\ 1$;枯水期均匀度指数为 $0.454\ 7 \sim 0.510\ 5$,平均值为 $0.488\ 1$ 。

2.1.4 Simpson 生物多样性指数 湾滩河丰水期和枯水期浮游植物 Simpson 生物多样性指数变化,如图 5 所示. 图 5 中: δ_D 为 Simpson 生物多样性指数。

由图 5 可知:丰水期各采样点浮游植物 Simpson 生物多样性指数为 $0.489\ 6 \sim 0.587\ 9$,平均值为 $0.534\ 8$;枯水期均匀度指数为 $0.518\ 7 \sim 0.610\ 2$,平均值为 $0.567\ 5$;枯水期 Simpson 生物多样性指数略高于丰水期。

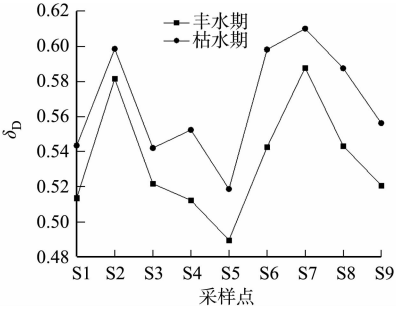


图 5 丰水期和枯水期 Simpson 生物多样性指数变化

Fig. 5 Changes in Simpson biodiversity index during wet and dry periods

2.2 湾滩河丰水期和枯水期浮游植物密度与环境因子关系

湾滩河丰水期和枯水期浮游植物密度及特征指数与环境影响因子的 Spearman 相关性分析热图,如图 6 所示. 图 6 中: t 为时间; r 为 Spearman 相关系数。

由图 6 可知:丰水期 δ_j 与 pH 值呈显著负相关($r=-0.667, p<0.05$),枯水期 δ_j 与 w_{DO} ($r=-0.703, P<0.05$)呈显著负相关, δ_j 与 w_{TP} 呈显著正相关($r=0.683, P<0.05$)。

3 讨论

3.1 湾滩河浮游植物的时空分布特征

丰水期和枯水期的浮游植物物种组成均主要以硅藻-绿藻型为主。丰水期和枯水期浮游植物群落组成差异较小(图 2),丰水期和枯水期浮游植物优势种种类相同。多样性指数和优势种也可用于水体污染程度划分及水质评价^[10-11],枯水期采样点 S4,S5,S7,S9 的水质类型为清洁-寡污型,其余采样点在不同水情期的水质类型均为 β -中污型。

从时间尺度分析,丰水期小颤藻的优势度明显高于其他物种,丰水期优势度指数明显高于枯水期(表 2),枯水期浮游植物的多样性指数、均匀度指数普遍高于丰水期,枯水期 Simpson 生物多样性指数也略高于丰水期。说明在丰水期的浮游植物物种数量分布较不均匀,生态系统的结构趋于简单化,而枯水期浮游植物物种数量分布均匀,异质度较高。此外,枯水期水温适宜,有利于浮游植物生长,使得枯水期的浮游植物密度高于丰水期。

从空间采样点分析,采样点 S6 浮游植物的多样性指数最低,采样点 S4 的多样性指数最高;从各采样点的均匀度指数变化来看,丰水期采样点 S7 浮游植物的均匀度指数最高,采样点 S3 最低,而枯水期采样点 S7 浮游植物的均匀度指数最高,采样点 S1 最低。采样点 S1 海拔较高;采样点 S7,S8 与电站水坝距离较远,受人类活动影响较少,因此浮游植物密度都较低;采样点 S3 由于处于干流支流汇合处,浮游植物密度较高;采样点 S4,S9 位于湾滩河的支流,且采样点 S4 位于上游位置,水流流速较缓、泥沙淤积、营养物质含量增加,导致浮游植物密度增加。

3.2 湾滩河浮游结构的主要影响因素

相关性分析表明,pH 值、溶解氧(DO)、总磷(TP)、海拔是影响湾滩河浮游植物特征指数变化的关键因子(图 6)。采样点 S4 的浮游植物密度及生物量最高,采样点 S5 的最低(图 3)。采样点 S4 位于采样点 S5 上游,入库河流带来部分营养盐和有机质,导致上游营养盐丰富,浮游植物群落大量繁殖,且人口活动相对较密集,生活污水排入其中,有机物含量相对高,为浮游植物的生长提供了一定的营养条件,有利于部分藻类生长,因此,浮游植物的数量和生物量增大;采样点 S5 人口稀疏、无大型工厂、有机污染少、营养盐含量低、水温相对低,限制了浮游植物的生长。DO 和 TP 是影响浮游植物均匀度指数变化的主要环境影响因子,因为藻类生长繁殖过程消耗水体中的 DO,水体中 DO 质量浓度降低,浮游植物密度增加,藻类竞争作用导致 DO 成为关键影响因子^[12-13];而高 TP 质量浓度导致部分浮游植物快速增长,这与张静等^[7]的研究结果一致。此外,水体 pH 值对浮游植物的组成和分布有一定的影响^[14]。丰水期和枯水期平均 pH 值分别为 7.6 和 7.5,影响了部分浮游植物的生长,与浮游植物群落结构变化表现为负相关关系。

浮游植物群落结构不仅受 pH 值、溶解氧(DO)、总磷(TP)等因素的限制,还受水文条件的影响较大。电站建成后,库区因为水体变深、增大,流速减小,库区河段的水生生态将发生较大的变化。此外,采样点所处位置附近的电站水坝运行时间为 4~5 a,生物趋向于适应新的环境,并与新环境之间达到新的平衡。根据调查结果,湾滩河流域内浮游植物以硅藻为主,硅藻属于流水型浮游植物,库区硅藻数量将减少,而适宜静水的蓝藻门、绿藻等其他门类的种类将会增加并成为优势种,生活于急流浅水区的着生藻类将会因水环境的快速改变而消失^[15],这与朱爱民等^[5]的研究结果一致。因而,采样点与电站的距离和浮游植物密度呈正相关关系。

此外,回龙电站、鱼泉电站、中源一级电站、中源二级电站等依次分布于湾滩河的梯级电站,在各水

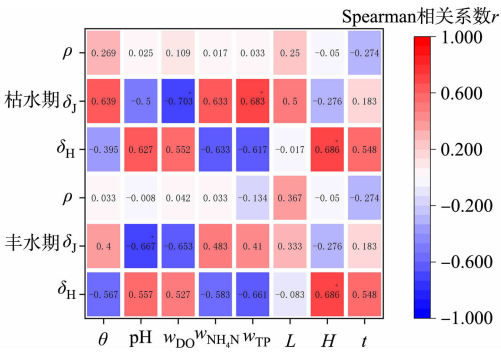


图 6 Spearman 相关性分析热图

Fig. 6 Spearman correlation analysis heat map

电站下游采集的浮游植物样品分析结果表明,虽然各梯级小电站浮游植物丰度存在一定差别,但优势种均相同,且浮游植物组成占比较为相似。浮游植物的生长、繁殖、休眠都在水体中,由于同一河流水系的连续性,即使存在水电站阻隔,同一河流水系水生生物种属来源仍可表现一定的趋同性^[16]。

4 结 论

1) 丰水期和枯水期的浮游植物物种组成均主要以蓝藻-硅藻型为主,丰水期共检出浮游植物 7 门 86 种,枯水期共检出浮游植物 7 门 71 种。丰水期和枯水期共有优势种为小颤藻、尖针杆藻、线性舟形藻、简单舟形藻、膨胀桥弯藻、黄群藻、普通水绵。

2) 湾滩河浮游植物具有时空异质性,枯水期的浮游植物密度、多样性指数和均匀度指数均高于丰水期。中源一级电站水坝(S4)浮游植物密度及生物量最高,中源二级电站水坝(S5)浮游植物密度及生物量最低。

3) pH 值、溶解氧(DO)、总磷(TP)、海拔是影响湾滩河浮游植物特征指数变化的关键因子。

参考文献:

[1] 潘晓洁,刘诚,万成炎,等. 三峡水库典型支流河口浮游植物群落与水环境相关性分析[J]. 水生态学杂志,2016,37(6):7-13. DOI:10.15928/j.1674-3075.2016.06.002.

[2] 潘晓洁,刘诚,朱梦灵,等. 三峡水库泄、蓄水过程对小江浮游植物群落结构的影响[J]. 水生态学杂志,2016,37(3):42-48. DOI:10.15928/j.1674-3075.2016.03.006.

[3] 朱为菊,庞婉婷,尤庆敏,等. 淮河流域春季浮游植物群落结构特征及其水质评价[J]. 湖泊科学,2017,29(3):637-645. DOI:10.18307/2017.0312.

[4] 王雪,张虹,林志蓉,等. 东张水库夏季浮游植物特征与健康评价[J]. 福建师范大学学报(自然科学版),2022,38(5):18-25. DOI:10.12046/j.issn.1000-5277.2022.05.003.

[5] 朱爱民,胡菊香,李嗣新,等. 三峡水库长江干流及其支流枯水期浮游植物多样性与水质[J]. 湖泊科学,2013,25(3):378-385. DOI:10.18307/2013.0311.

[6] 朱爱民,程郁春,周连凤,等. 三峡水库汛期运行对长江干支流浮游植物的影响[J]. 水生态学杂志,2018,39(5):22-30. DOI:10.15928/j.1674-3075.2018.05.004.

[7] 张静,胡愈妍,胡圣,等. 长江流域浮游植物群落的环境驱动及生态评价[J/OL]. 环境科学:1-15(2022-08-01)[2023-02-02]. DOI:10.13227/j.hjxx.202206095.

[8] 朱永锋,琚珊珊,蔡庆华,等. 三峡水库春季浮游植物群落特征及影响因素[J]. 长江流域资源与环境,2019,28(12):2893-2900. DOI:10.11870/cjlyzyyhj201912010.

[9] 赵文. 水生生物学[M]. 北京:中国农业出版社,2005.

[10] CARLSON R E. A trophic state index for lakes[J]. Limnology and Oceanography,1977,22(2):361-369.

[11] 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(5):47-49. DOI:10.19316/j.issn.1002-6002.2002.05.023.

[12] 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. DOI:10.18307/2020.0317.

[13] 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. DOI:10.13671/j.hjkxxb.2021.0273.

[14] 杨晓波. 白水江流域梯级引水式电站开发对生态环境的主要影响[J]. 环境保护与循环经济,2022,42(1):71-76. DOI:10.3969/j.issn.1674-1021.

[15] 林彰文,林生,顾继光,等. 浮游植物群落对海南小水电建设的响应[J]. 生态学报,2013,33(4):1186-1194. DOI:10.5846/stxb201205300790.

[16] 张琦,陈宇琛,林育青,等. 不同水期澜沧江梯级水库浮游植物群落结构空间分布特征[J]. 环境科学学报,2022,42(12):392-401. DOI:10.13671/j.hjkxxb.2022.0150.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:刘源岗)