

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.03.002

张福河浮游植物群落结构及生态位特征

刘凌¹, 朱良珍¹, 叶键², 邢小蕾¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 江阴市水资源管理办公室, 江苏 江阴 214431)

摘要: 为了解张福河浮游植物群落结构特征, 于2019年7月(夏季)、9月(秋季)和12月(冬季)进行3次调查与取样, 利用改进的 Levins 生态位宽度和 Petraitis 生态位重叠指数测度浮游植物优势种的生态位。结果表明: 共鉴定到浮游植物 140 种, 其总平均密度大小顺序为秋季、夏季、冬季; 优势种共 16 种, 以硅藻门和绿藻门为主且多为中富营养指示物种, 季节更替显著, 优势度指数的变化范围为 0.021~0.360; 优势种生态位宽度的变化范围为 0.333~0.966, 生态位重叠指数的变化范围为 0.000~0.998; 张福河浮游植物种类较丰富, 但具有潜在水华风险。

关键词: 浮游植物; 优势种; 生态位; 张福河

中图分类号: TV213.4; X824

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2021)03-0007-06

Community structure and niche characteristics of phytoplankton in Zhangfu River // LIU Ling¹, ZHU Liangzhen¹, YE Jian², XING Xiaolei¹ (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Water Resources Management Office of Jiangyin, Jiangyin 214431, China)

Abstract: In order to find out the characteristics of phytoplankton community structure of Zhangfu River, three surveys and samples were conducted in July (summer), September (autumn) and December (winter) of 2019. Niche of the dominant species of phytoplankton was measured by the improved Levins niche width and Petraitis niche overlap index. The results show that a total of 140 species of phytoplankton are identified in the samples taken. The total average density is greater in autumn than in summer and also than in winter. There were 16 dominant species, mainly Diatom and Chlorophyta, and most of which are the mesotrophic and eutrophic indicator species. The seasonal change was significant. The dominance index varies from 0.021 to 0.360. The niche width varies from 0.333 to 0.966, The niche overlap index varies from 0.000 to 0.998, The above results indicate that phytoplankton species in Zhangfu River are abundant, but there is a potential risk of water bloom.

Key words: phytoplankton; dominant species; niche; Zhangfu River

浮游植物在生物演化系统中处于承上启下的重要位置, 是水环境中最主要的初级生产者, 也是消费者的重要食物来源, 对水体多种理化和生物因素的变化反应灵敏, 常作为水环境评价的依据和良好指标^[1]。生态位(niche)可以在一定程度上反映物种对其生存环境的时空分布、占有和利用, 其影响因素为生物因子和环境因子(光照、温度、营养等)^[2], 迄今为止应用较广的方法是生态位宽度(niche breadth)和生态位重叠(niche overlap)。生态位宽度表示某物种在其生存环境中对各种资源的利用总和, 常用于反映物种分布和对资源的占用程度, 生态位宽度越大, 说明该种具有更强的竞争力, 反之竞争

力弱。生态位重叠可以反映物种对资源的竞争和共享关系, 生态位重叠大说明物种对资源需求相似或截然不同^[3]。

起初, 有关生态位的研究主要集中在陆生动植物群落, 用于研究物种关系、生物多样性、种群进化等内容, 近年来该理论也应用到水生态系统研究中。如 Kuprijanov 等^[4]通过量化本地物种和非本地物种的生态位, 研究非本地物种入侵过程的生态机制, 评估外来入侵物种对原生生态系造成的威胁程度^[5]。还有相关专家将生态位与传统研究内容和方法相结合, 以底栖动物^[6]、鱼虾^[7-8]、浮游生物^[9-10]等水生生物为研究对象, 探究物种的种群结构特征以及对环

境的适应性。如魏志兵等^[11]分析了长湖浮游植物优势种生态位特征,综合评价了长湖的富营养状况并提出修复措施;吴佳梦等^[12]探讨了舟山定海护城河浮游植物优势种的季节变化以及生态位的分化,为研究富营养化水体浮游植物提供了依据。研究水生生物的群落结构和生态位特征有助于了解种间关系和种群演替,但目前相关研究集中在湖泊、海洋等水域,对河流浮游植物生态位的研究还较缺乏。本文通过2019年3个季节的调查与采样,对张福河浮游植物群落结构特征和优势种生态位特征展开研究,旨在探索河流生态系统浮游植物的种间关系和种群演替,以期对河流生态系统健康良好多样性格局维护提供参考。

1 材料与方法

1.1 区域概况及采样点布设

张福河是洪泽湖的出湖河流,全长33.5 km,南端起点是洪泽湖湖口,与洪泽湖直接相连,无控制性构筑物,北端终点是张福河船闸,通过张福河船闸与二河相交,河流的主要功能是农业用水、工业用水和航运。于2019年7月(夏季)、9月(秋季)和12月(冬季)对张福河开展调查研究,根据河流自然特征和实地勘测结果布设3个采样点(图1),分别为S1、S2和S3,每个采样点均使用GPS仪记录经纬度。

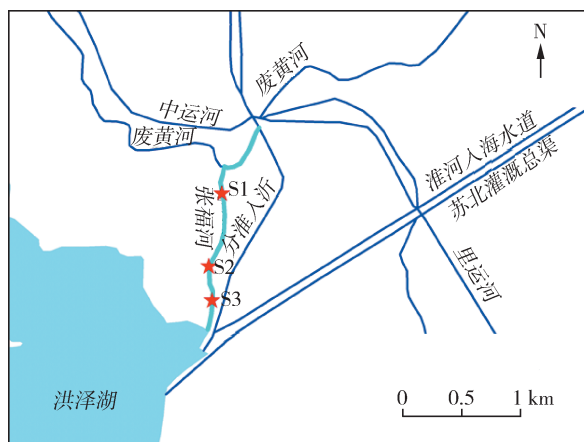


图1 张福河浮游植物采样点示意图

Fig. 1 The sampling sites of phytoplankton in Zhangfu River

1.2 样品采集与鉴定

浮游植物定性样品采集使用25号(孔径60 μm左右)浮游生物网,在水下0.5 m处以“∞”形单向拖拉4~5 min捞取采集,加入4%甲醛溶液固定;定量采集用有机玻璃采水器在相同水层采集1 L水样,加入鲁戈试剂固定,静置48 h后浓缩至30 mL备检。浮游植物的鉴定在10×40倍显微镜(NikonECLIPSE50i)下进行,参照《中国淡水藻

类——系统、分类及生态》^[13]鉴定到种。

1.3 数据分析

利用McNaughton优势度指数确定优势种,采用Levins公式计算生态位宽度,采用Petraitis指数公式确定生态位重叠指数:

$$Y_i = n_i f_i / N \quad (1)$$

$$B_i = 1/r \sum_{j=1}^r P_{ij}^2 \quad (2)$$

$$O_{ik} = \sum_{j=1}^r P_{ij} P_{kj} / \sqrt{\sum_{j=1}^r P_{ij}^2 \sum_{j=1}^r P_{kj}^2} \quad (3)$$

式中: Y_i 为浮游植物*i*的优势度指数, $Y_i > 0.02$ 的物种为优势种; n_i 为浮游植物*i*的密度; N 为浮游植物的总密度; f_i 为浮游植物*i*出现的频率; B_i 为浮游植物生态位宽度; r 为总站位数; P_{ij} 、 P_{kj} 分别为浮游植物*i*和*k*在*j*站位的个体数占该种所有个体数的比例; O_{ik} 为生态位重叠指数。

优势种更替率^[14]计算公式:

$$R = (a + b - 2c) / (a + b - c) \quad (4)$$

式中: R 为优势种的更替率; a 、 b 分别为相邻两季优势种的个数; c 为相邻两季共有的优势种的个数。

2 结果与讨论

2.1 浮游植物群落结构

共镜检到浮游植物7门58属140种,硅藻门(53种,占比38%)、绿藻门(41种,占比29%)和裸藻门(22种,占比16%)种类数占比较高。3季中浮游植物平均密度的变化范围是 $3.6 \times 10^6 \sim 7.3 \times 10^6$ 个/L,其中秋季最大,冬季最小,该密度反映出河流秋季富营养化发展的现状^[15]。张福河浮游植物种类组成和密度分布与洪泽湖相似,种类上均以硅藻门和绿藻门为主,密度夏秋大、冬季小^[16]。

浮游植物密度的季节变化明显,如图2所示。夏季,浮游植物各门类密度的变化范围为 $0 \sim 1.9 \times 10^6$ 个/L,其中蓝藻门密度占比最大(50%),其次是硅藻门和绿藻门(26%和22%)。秋季,浮游植物各门类密度的变化范围为 $0 \sim 2.7 \times 10^6$ 个/L,其中绿藻门密度占比最大(37%),其次是硅藻门和蓝藻门(32%和21%)。冬季浮游植物各门类密度的变化范围为 $0 \sim 1.7 \times 10^6$ 个/L,其中金藻门密度占比最大(48%),其次是绿藻门(35%)。浮游植物密度在各采样点的分布如图3所示,空间分布差异较大。夏季密度沿河从上游至下游呈先增加后减少的趋势。秋季密度沿河在上游最大,中下游相差不大,冬季密度沿河从上游至下游呈逐渐减小的分布趋势。

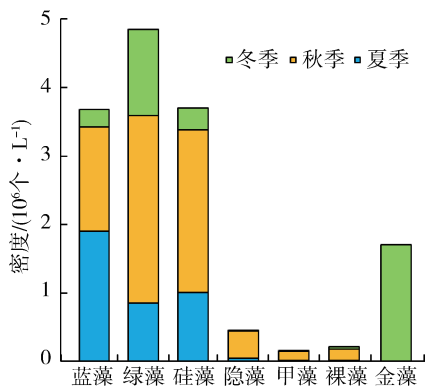


图2 张福河浮游植物密度季节分布

Fig.2 Seasonal distribution of phytoplankton density in Zhangfu River

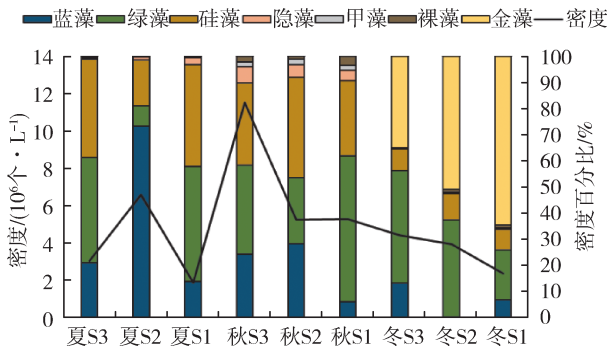


图3 张福河浮游植物密度空间分布

Fig.3 Spatial distribution of phytoplankton density in Zhangfu River

从夏季到秋季,蓝藻门的密度占比减少,硅藻门和绿藻门的密度占比增加,从秋季到冬季,金藻门的密度占比显著增加,绿藻门的密度占比基本不变,硅藻门的密度占比减少。说明蓝藻门在夏季大量繁殖,秋冬季减少或消失,硅藻门更适宜在秋季生长,

表1 张福河浮游植物优势种的优势度指数

Table 1 Dominance index of dominant species phytoplankton in Zhangfu River

优势种 编号	门	种	夏季		秋季		冬季	
			频率/%	优势度指数	频率/%	优势度指数	频率/%	优势度指数
A1	蓝藻	铜绿微囊藻	33.3	0.135	66.7	0.065		
A2		给水颤藻						
B1	绿藻	二角盘星藻	66.7	0.027	100	0.041	66.7	0.046
B2		近微细丝藻	66.7	0.061	100	0.104		
B3		四尾栅藻			100	0.044		
B4		空球藻						
B5		球囊藻						
C1	硅藻	谷皮菱形藻	100	0.021	100	0.069	66.7	0.022
C2		肘状针杆藻	100	0.024				
C3		颗粒直链藻	100	0.054				
C4		颗粒直链藻极狭变种			66.7	0.021		
C5		新星形冠盘藻			100	0.166		
C6		冬生等片藻						
D	隐藻	卵形隐藻			100	0.051		
E1	金藻	分歧锥囊藻					66.7	0.076
E2		密集锥囊藻					100	0.360

金藻门喜爱低温环境,绿藻门的生长温度范围宽。

2.2 浮游植物优势种组成

优势种是群落中数量大且适应能力较强的物种,对群落的结构和环境作用显著。本研究共调查出16个优势种,隶属于5门14属(表1),季节分布差异较大:夏季主要优势类群为蓝藻门和硅藻门,其中硅藻门优势种的数量较多,蓝藻门的铜绿微囊藻的优势度指数最大。秋季优势类群为硅藻门和绿藻门,二者优势种数量相同,以硅藻门的新星形冠盘藻和绿藻门的近微细丝藻的优势度指数最大。冬季优势类群为绿藻门和金藻门,其中绿藻门优势种的数量较多,以金藻门的密集锥囊藻的优势度指数最大。对比发现张福河浮游植物优势种组成与洪泽湖相似,绿藻门、硅藻门和蓝藻门为主要优势类群^[17]。

3个季节中出现频率为100%的浮游植物共有9种,分别是谷皮菱形藻、肘状针杆藻、颗粒直链藻、二角盘星藻、近微细丝藻、四尾栅藻、新星形冠盘藻、卵形隐藻和密集锥囊藻,另外铜绿微囊藻的出现频率较小但优势度指数较大,上述10种藻类多为中富营养水体的指示物种^[18],如铜绿微囊藻参与水华形成,新星形冠盘藻和颗粒直链藻极狭变种是中污型水体的指示物种,在富营养水体中大量分布,说明张福河夏秋两季富营养程度较高。

2.3 优势种的生态位宽度

由表2可见,夏季优势种生态位宽度变化范围为0.333~0.963,只有铜绿微囊藻的生态位宽度值小于0.600;秋季优势种生态位宽度整体较大,变化范围为0.634~0.933,与夏季相比,二角盘星藻和近微细丝藻的生态位宽度变大,颗粒直链藻的生态

位宽度变小; 冬季优势种生态位宽度为 0.600 ~ 0.966, 与秋季相比, 近微细丝藻的生态位宽度变小。根据生态位宽度的大小将优势种大致分为广生态位 ($B_i > 0.700$)、中生态位 ($0.500 \leq B_i \leq 0.700$) 和窄生态位 ($B_i < 0.500$) 3 大种类。张福河属于广生态位种类的藻类共有 9 种, 按生态位宽度从大到小排列依次为: 密集锥囊藻、谷皮菱形藻、新星形冠盘藻、二角盘星藻、颗粒直链藻、肘状针杆藻、四尾栅藻、近微细丝藻、卵形隐藻; 中生态位的种类共有 6 种, 按生态位宽度从大到小排列依次为: 空球藻、冬生等片藻、分歧锥囊藻、给水颤藻、颗粒直链藻极狭变种、球囊藻; 窄生态位的种类只有 1 种, 为铜绿微囊藻。

表 2 张福河浮游植物优势种生态位宽度

Table 2 Niche breadth of dominant species phytoplankton in Zhangfu River

优势种编号	夏季	秋季	冬季
A1	0.333		
A2		0.651	
B1	0.623	0.931	
B2	0.643	0.742	0.644
B3		0.841	
B4			0.664
B5			0.600
C1	0.963		
C2	0.867		
C3	0.874	0.813	
C4		0.634	
C5		0.933	
C6			0.663
D		0.727	
E1			0.661
E2			0.966

生态位宽度与季节变化关系紧密, 如二角盘星藻在夏季的出现频率为 67%, 在秋季的出现频率为 100%, 其生态位宽度秋季大于夏季; 颗粒直链藻在夏秋两季的出现频率均为 100%, 其生态位宽度夏季大于秋季。同一浮游植物在不同季节的生态位宽度不同, 分析原因可能是不同季节中河流环境不同。如夏秋两季温度较冬季要高, 直接影响了浮游植物的生存与繁殖^[19]。另外, 河流上游靠近洪泽湖, 湖泊生态系统对河流水位、流速等特征影响较大, 当湖泊的换水周期变快时, 可能会使藻类难以聚集^[20]。中游农业灌溉排水以及盐化企业排水污染较多, 对河流的营养盐水平影响较大, 这样的面源污染和点源污染会改变河流总氮、总磷等营养盐的浓度, 从而影响藻类的分布^[21]。下游靠近张福河船闸, 船运等人类活动对河流透明度、浊度等特征影响较大, 这样的人为扰动可能会导致水体浑浊, 抑制某些藻类的繁殖^[22]。以上多种因素会直接或间接影响浮游植

物的密度大小与分布, 从而导致其生态位宽度不同。

2.4 优势种的生态位重叠指数

夏季生态位重叠指数的变化范围是 0.000 ~ 0.992 (表 3), 其中肘状针杆藻和颗粒直链藻的生态位重叠指数最大, 铜绿微囊藻和近微细丝藻的生态位重叠指数最小。秋季生态位重叠指数变化范围是 0.803 ~ 0.998 (表 4), 其中给水颤藻和颗粒直链藻极狭变种的生态位重叠指数最大, 给水颤藻和近微细丝藻的生态位重叠指数最小。冬季生态位重叠指数变化范围是 0.344 ~ 0.993 (表 5), 其中空球藻和近微细丝藻的生态位重叠指数最大, 球囊藻和分歧锥囊藻的生态位重叠指数最小。

表 3 张福河夏季浮游植物优势种生态位重叠指数

Table 3 Niche overlaps of dominant species phytoplankton in Zhangfu River in summer

优势种编号	生态位重叠指数					
	A1	B1	B2	C1	C2	C3
A1	1.000					
B1	0.504	1.000				
B2	0.000	0.714	1.000			
C1	0.537	0.888	0.843	1.000		
C2	0.513	0.955	0.832	0.984	1.000	
C3	0.615	0.953	0.761	0.979	0.992	1.000

表 4 张福河秋季浮游植物优势种生态位重叠指数

Table 4 Niche overlaps of dominant species phytoplankton in Zhangfu River in autumn

优势种编号	生态位重叠指数							
	A2	B1	B2	B3	C3	C4	C5	D
A2	1.000							
B1	0.928	1.000						
B2	0.803	0.910	1.000					
B3	0.907	0.976	0.975	1.000				
C3	0.983	0.980	0.854	0.948	1.000			
C4	0.998	0.925	0.828	0.919	0.977	1.000		
C5	0.869	0.985	0.959	0.988	0.936	0.875	1.000	
D	0.916	0.944	0.972	0.990	0.934	0.935	0.956	1.000

表 5 张福河冬季浮游植物优势种生态位重叠指数

Table 5 Niche overlaps of dominant species phytoplankton in Zhangfu River in winter

优势种编号	生态位重叠指数					
	B2	B4	B5	C6	E1	E2
B2	1.000					
B4	0.993	1.000				
B5	0.991	0.968	1.000			
C6	0.968	0.991	0.924	1.000		
E1	0.434	0.506	0.344	0.581	1.000	
E2	0.899	0.904	0.876	0.895	0.728	1.000

夏季共有 11 组优势种的生态位重叠指数大于 0.600, 占比 73%, 秋季优势种的生态位重叠指数均大于 0.600, 占比 100%, 冬季也有 11 组优势种的生

态位重叠指数大于 0.600, 占比 73%。生态位重叠受季节影响较大, 总体上秋季大于夏冬两季。另外, 同一门类的藻类间均具有显著的重叠关系, 说明这些物种对温度、溶解氧等环境资源的需求与利用相似, 而绿藻门与硅藻门的生态位重叠指数也较大, 原因是不同门类的藻在资源利用上是竞争关系^[3]。

2.5 优势种的生态位特征分析

在 3 个季节中优势种有重叠和更替, 其中季节更替较明显, 从夏季到秋季优势种的更替率为 73%, 两季共有的优势种共有 3 种, 分别是二角盘星藻(三季均出现, 仅在夏秋两季成为优势种)、近微细丝藻和颗粒直链藻; 从秋季到冬季优势种的更替率为 92%, 两季共有的优势种仅有近微细丝藻。分析发现, 生态位宽度大的优势种的优势度指数不一定大, 如谷皮菱形藻生态位宽度为 0.963, 但优势度指数仅为 0.021; 同样生态位宽度小的优势种的优势度指数不一定小, 如夏季铜绿微囊藻的生态位宽度最小, 但优势度指数却最大, 原因是这些藻类在各采样点的密度分布不均匀。

生态位宽度与生态位重叠具有一定的联系: 生态位宽度值较大的优势种, 具有更大的机会与其他优势种生态位重叠^[23], 如夏季颗粒直链藻与其他优势种的重叠指数均大于 0.600, 秋季二角盘星藻与其他优势种的重叠指数均大于 0.900, 重叠显著; 若优势种的生态位宽度值较小, 则与其他优势种生态位重叠的机会较小, 如夏季铜绿微囊藻与其他优势种(除颗粒直链藻)的重叠指数均小于 0.600, 冬季分歧锥囊藻与其他优势种(除密集锥囊藻)的重叠指数均小于 0.600, 重叠不显著。说明具有较大生态位宽度的优势种, 适应环境和利用环境资源的能力均比生态位宽度小的优势种强, 分布范围也广, 所以与其他种群重叠的机会也较大。

3 结 论

张福河浮游植物有 140 种, 其中优势种 16 种, 其种类和密度随季节而变化。张福河浮游植物种类组成较丰富, 但夏秋两季的优势种多为中富营养指示物种, 说明该河在夏秋两季具有潜在水华风险, 值得关注。其浮游植物优势种的生态位宽度介于 0.333 ~ 0.966, 生态位重叠指数介于 0.000 ~ 0.998。结合优势种的组成和季节演替, 初步了解到优势种的生态位特征与生存环境、种间竞争、藻类自身特性等多种因素相关, 优势种对生境资源的占有和利用存在差异。建议进一步展开滤食性鱼类、浮游动物等对该水域浮游植物群落特征影响的研究。

参考文献:

- [1] 吴小伟, 刘平. 扬州境内湖泊浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 水资源保护, 2015, 31(5): 47-52, 71. (WU Xiaowei, LIU Ping. Phytoplankton community structure and its relationship with environmental factors in lakes in Yangzhou[J]. Water Resources Protection, 2015 (5): 47-52, 71. (in Chinese))
- [2] 高原, 王超, 刘乾甫, 等. 珠三角河网不同水文期浮游动物优势种及生态位[J]. 水生态学杂志, 2019, 40(6): 37-44. (GAO Yuan, WANG Chao, LIU Qianfu, et al. Dominant zooplankton species and their ecological niches under different hydrologic regimes in rivers of the Pearl River Delta[J]. Journal of Hydroecology, 2019, 40(6): 37-44. (in Chinese))
- [3] 杨文焕, 申涵, 周明利, 等. 包头南海湖浮游植物优势种生态位及种间联结性季节分析[J]. 中国环境科学, 2020, 40(1): 383-391. (Seasonal variation analysis of the niche and interspecific association with respect to the dominant phytoplankton species in Nanhai Lake[J]. China Environmental Science, 2020, 40(1): 383-391. (in Chinese))
- [4] KUPRIJANOV I, HERKÜL K, KOTTA J. Ecological niche differentiation between native and non-native shrimps in the northern Baltic Sea[J]. Aquatic Ecology, 2017, 51(3): 389-404.
- [5] ZHANG Zhixin, MAMMOLA S, MCLAY C L, et al. To invade or not to invade? exploring the niche-based processes underlying the failure of a biological invasion using the invasive Chinese mitten crab[J]. Science of the Total Environment, 2020, 728: 138815.
- [6] 汤雁滨, 廖一波, 寿鹿, 等. 南麂列岛潮间带大型底栖动物群落优势种生态位[J]. 生态学报, 2016, 36(2): 489-498. (TANG Yanbin, LIAO Yibo, SHOU Lu, et al. Intertidal zone of the Nanji Islands is a niche for dominant species of the macrobenthic community[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(2): 489-498. (in Chinese))
- [7] 韩晓凤, 王咏雪, 求锦津, 等. 台州南部近岸海域春秋季主要鱼类生态位及其种间联结性[J]. 水产学报, 2020, 44(4): 621-631. (HAN Xiaofeng, WANG Yongxue, QIU Jinjin, et al. Niche and interspecific associations of dominant fishes in southern coastal waters in Taizhou, China[J]. Journal of Fisheries of China, 2020, 44(4): 621-631. (in Chinese))
- [8] 刘明华, 梁君, 徐汉祥. 中街山列岛海洋保护区虾类优势种时空生态位[J]. 应用生态学报, 2020, 31(5): 1746-1752. (LIU Minghua, LIANG Jun, XU Hanxiang. Spatio-temporal niche of dominant shrimp species in the Zhongjieshan Islands Marine Protected Area, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(5): 1746-

1752. (in Chinese))
- [9] 张琳琳,蒋日进,印瑞,等. 乐清湾主要游泳动物空间生态位及其分化[J]. 应用生态学报,2019,30(11):3911-3920. (ZHANG Linlin, JIANG Rijin, YIN Rui, et al. Spatial niche and differentiation of major nekton species in Yueqing Bay, Zhejiang, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30 (11): 3911-3920 (in Chinese))
- [10] 郭坤,杨德国,彭婷,等. 湖北省长湖浮游植物优势种生态位分析[J]. 湖泊科学,2016,28(4):825-834. (GUO Kun, YANG Deguo, PENG Ting, et al. Ecological niche analysis of dominant species of phytoplankton in Lake Changhu, Hubei Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(4):825-834. (in Chinese))
- [11] 魏志兵,柴毅,罗静波,等. 长湖浮游植物优势种季节演替及生态位分析[J]. 水生生物学报,2020,44(3):612-621. (WEI Zhibing, CAI Yi, LUO Jingbo, et al. Seasonal succession and ecological niche analysis of the dominant species of phytoplankton in Changhu Lake [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2020, 44 (3): 612-621. (in Chinese))
- [12] 吴佳梦,徐娜娜,张文珺,等. 浙江舟山定海护城河浮游植物优势种生态位与种间联结性季节性分析[J]. 湖泊科学,2019,31(2):429-439. (WU Jiameng, XU Nana, ZHANG Wenjun, et al. Seasonal analysis of the niche and interspecific association of dominant species of phytoplankton in the Dinghai Moat, Zhoushan City [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31 (2): 429-439. (in Chinese))
- [13] 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.
- [14] YANG Guanming, HE Dehua, WANG Chunsheng, et al. Study on biological oceanography characteristics of planktonic copepods in waters north of Taiwan II. community characteristics [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2000(3):139-152.
- [15] 于一雷,郭菊兰,武高洁,等. 清澜港红树林浮游植物群落结构及水质对应分析[J]. 水资源保护,2018,34(2):102-110. (YU Yilei, GUO Julan, WU Gaojie, et al. Phytoplankton community structure and water quality correspondence analysis of mangrove forests in Qinglan Harbor [J]. Water Resources Protection, 2018, 34 (2): 102-110. (in Chinese))
- [16] 舒卫先,张云舒,韦翠珍. 洪泽湖浮游藻类变化动态及影响因素[J]. 水资源保护,2016,2(5):115-122. (SHU Weixian, ZHANG Yunshu, WEI Cuizhen. Seasonal dynamics of and factors in phytoplankton in Hongze Lake [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(5):115-122. (in Chinese))
- [17] 刘伟,郝达平. 洪泽湖微囊藻属演替模式及预警研究[J]. 安徽农业科学,2017,45(16):78-80. (LIU Wei, HAO Daping. Study on the succession pattern and early warning of microcystis in Hongze Lake [J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2017, 45 (16): 78-80. (in Chinese))
- [18] 贺玉晓,刘天慧,任玉芬,等. 北运河秋冬季浮游植物群落结构特征及影响因子分析[J]. 环境科学学报,2020,40(5):1710-1721. (HE Yuxiao, LIU Tianhui, REN Yufen, et al. Characteristics and influencing factors of phytoplankton community structure in autumn and winter of the North Canal, Beijing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(5):1710-1721. (in Chinese))
- [19] 李兴,李建茹,李畅游. 内蒙古乌梁素海浮游植物优势种的生态位分析[J]. 水生态学杂志,2017,38(6):40-47. (LI Xing, LI Jianru, LI Changyou. Ecological Niche Analysis of Dominant Phytoplankton Species in Wuliangsuhai Lake, Inner Mongolia [J]. Journal of Hydroecology, 2017, 38(6):40-47. (in Chinese))
- [20] 吴天浩,刘劲松,邓建明,等. 大型过水性湖泊:洪泽湖浮游植物群落结构及其水质生物评价[J]. 湖泊科学,2019,31(2):440-448. (WU Tianhao, LIU Jingsong, DENG Jianming, et al. Community structure of phytoplankton and bioassessment of water quality in a large water-carrying lake, Lake Hongze [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(2):440-448. (in Chinese))
- [21] 刘凌,朱燕,李博韬,等. 基于 MBFG 分类法的长江江苏段浮游植物生物完整性评价[J]. 水资源保护,2020,36(4):13-20. (LIU Ling, ZHU Yan, LI Botao, et al. Assessment of phytoplankton biological integrity in Jiangsu section of Yangtze River based on MBFG [J]. Water Resources Protection, 2020, 36 (4): 13-20. (in Chinese))
- [22] 代培,阎明军,周游,等. 太湖五里湖沿岸带浮游植物群落生态特征(2014—2015年)[J]. 长江流域资源与环境,2018,27(10):2348-2357. (DAI Pei, YAN Mingjun, ZHOU You, et al. Ecological characteristics of phytoplankton community structure in the littoral zone of Lake Wuli, Lake Taihu in 2014-2015 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(10):2348-2357. (in Chinese))
- [23] 杨文焕,申涵,周明利,等. 冻融期包头南海湖浮游植物群落及优势种生态特征[J]. 湖泊科学,2020,32(2):450-461. (YANG Wenhuan, SHEN Han, ZHOU Mingli, et al. Ecological characteristics of dominant phytoplankton community in Lake Nanhai (Baotou) during freezing-thawing period [J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32 (2): 450-461. (in Chinese))

(收稿日期:2020-08-17 编辑:彭桃英)