

· 调查与评价 ·

射阳湖浮游动物群落结构特征及其与环境因子相关性研究

许静波¹, 徐明¹, 刘军¹, 夏卫中¹, 李一平², 朱立琴^{3*}(1. 江苏省泰州引江河管理处, 江苏 泰州 225321; 2. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学马克思主义学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 2016—2017年对射阳湖开展浮游动物群落结构和水质指标逐月监测。结果表明,射阳湖共鉴定出浮游动物61种,其中原生动物、轮虫、枝角类和桡足类分别为25种、24种、7种和5种。浮游动物种类数呈现春夏季多于秋冬季的变化趋势。浮游动物优势种数量较多、分布广,群落结构相对复杂且稳定。运用Shannon-Wiener指数、均匀度指数和B/T指数对射阳湖水水质作评价,结果表明,该湖处于轻度—中度污染状态,生物学指标评价法与常规水质评价结果一致。浮游动物群落结构与水质指标相关性分析表明,水温、透明度、Chl-a和DO是影响射阳湖浮游动物群落结构的主要水质指标。

关键词: 浮游动物; 群落结构; 环境因子; 浅水型湖泊; 射阳湖

中图分类号: Q145; X824

文献标志码: B

文章编号: 1006-2009(2020)02-0027-05

Zooplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Sheyang Lake

XU Jing-bo¹, XU Ming¹, LIU Jun¹, XIA Wei-zhong¹, LI Yi-ping², ZHU Li-qin^{3*}(1. Taizhou Yinjiang Canal Administration of Jiangsu Province, Taizhou, Jiangsu 225321, China;
2. School of Environment, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;
3. School of Marxism, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: In this study, zooplankton community structure and the water quality indexes were investigated monthly in Sheyang Lake during the year from 2016 to 2017. The results showed that 61 species of zooplankton were detected, including 25 species of protozoa, 24 species of rotifers, 7 species of cladocerans and 5 species of copepods. The numbers of zooplankton species in spring and summer were larger than that in autumn and winter. The dominant species were of much in quantity and wide in distribution, and the community structure was complex and stable. The water quality was mildly to moderately contaminated evaluated by Shannon-Wiener biodiversity index, Pielou evenness index and B/T index, which were consistent with the results from conventional water quality assessment. Water temperature, transparency, Chl-a and DO were the main water quality indexes influencing the zooplankton community structure in Sheyang Lake by correlation analysis of zooplankton community and water quality.

Key words: Zooplankton; Community structure; Environmental factor; Shallow lake; Sheyang Lake

浮游动物是水生态系统重要组成部分,在水生态系统物质循环与能量流动过程中发挥着承上启下重要作用^[1],其有助于维持湖泊生态系统结构和功能的稳定^[2-3]。浮游动物群落结构与水环境因子关系密切,其群落组成和数量时空分布能准确、快速地反映出水生态环境状况,故常被作为指示生物,应用于水质评价、水污染治理等方面^[4-5]。研究浮游动物的种类组成、群落结构及物种多样性

等特征,对于了解湖泊生态系统功能、状态、健康变

收稿日期: 2019-01-02; 修订日期: 2020-01-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51609060, 51879082); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20150810); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(2017B14614)

作者简介: 许静波(1969—),男,江苏泰州人,高级工程师,本科,主要从事河湖管理保护和生态监测研究工作。

* 通信作者: 朱立琴 E-mail: lqzhu@hhu.edu.cn

化,以及湖泊健康评价管理具有重要意义。

近年来,关于淡水湖泊系统浮游动物群落结构及其时空分布已有较多研究报道,主要包括群落多样性、稳定性、能量转化及其环境因子关系等^[6-7]。如朱新鹏^[8]研究了梁子湖不同湖区浮游动物种类组成、优势种、密度和生物量时空分布特征,并利用典范对应分析筛选影响浮游动物群落结构变化的环境因子。孟顺龙等^[9]探讨了里下河腹地典型水体浮游动物群落结构特征,可该调查主要聚焦在河网区,湖泊群浮游动物群落情况还有待进一步研究。今选取里下河腹地最大湖泊——射阳湖,开展浮游动物及水质因子的逐月监测,系统分析射阳湖浮游动物群落结构、优势种群、密度与生物量等时空特征,利用相关性分析法探讨浮游动物与水环境因子之间的相应关系,评价水环境健康状况,以期为里下河湖荡区水资源可持续开发、生物多样性保护提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区域概况

射阳湖位于扬州市宝应县、淮安市淮安及盐城市建湖县和阜宁县交界处,南北宽约 28 km,东西长约 20 km,是里下河腹地保护面积最大的湖泊,保护面积 127.384 km²。该湖为浅水型湖泊,是一宽浅蝶形洼地^[10],研究期间平均水深 1.79 m,夏季丰水期水深为 1.95 m。该湖具有调蓄洪水、行洪和向下游地区供水、渔业养殖等综合功能。

1.2 采样点布设与样品采集处理

2016 年 9 月—2017 年 8 月,在射阳湖布设 5 个具有代表性的监测点(见图 1),每月采样 1 次,监测湖泊水质和浮游动物。

浮游动物样本采集、处理、种类鉴别和生物量

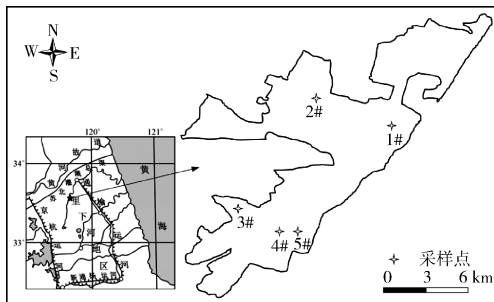


图 1 研究区域与监测点位分布

Fig. 1 Study area and monitoring sites

测算参照文献[11-12]中的方法进行。水质监测指标包括水温、透明度、pH 值、溶解氧(DO)、氨氮(NH₃-N)、高锰酸盐指数(I_{Mn})、总磷(TP)、总氮(TN)和叶绿素 a(Chl-a),水样的采集和分析参照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)进行。

1.3 研究方法

1.3.1 综合营养状态指数法

采用综合营养状态指数法对射阳湖富营养化状况作评价,计算公式为:

$$TLI = \sum_{j=1}^m W_j \times TLI_j \quad (1)$$

式中:TLI 为综合营养状态指数;W_j为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重;TLI_j为第 j 种参数的营养状态指数。选用 Chl-a、透明度、TP、TN 和 I_{Mn} 5 项参数,根据《湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规定》计算 TLI。

1.3.2 浮游动物优势种确定方法

浮游动物优势种依据其优势度值(Y)确定:

$$Y = (n_i/N) \times f_i \quad (2)$$

式中:n_i为第 i 种的个体总数;N 为所有浮游动物总个数;f_i为 i 种出现的频率。Y > 0.02 的种类为优势种^[13]。

1.3.3 水质生物学评价方法

采用 Shannon-Wiener 指数(H)、均匀度指数(J)和 B/T 指数(Q)对射阳湖进行水质评价。

$$H = - \sum_{i=1}^S \frac{n_i}{N} \log_2 \frac{n_i}{N} \quad (3)$$

$$J = H / \log_2 S \quad (4)$$

式中:S 为站点中浮游动物总种数。

两指数与水质的关系为:H > 3,轻度污染或无污染;1 < H ≤ 3,中度污染;H ≤ 1,重度污染。J > 0.5,轻度污染或无污染;0.3 < J ≤ 0.5,中度污染;0 < J ≤ 0.3,重度污染。

$$Q = B/T \quad (5)$$

式中:B 为臂尾轮虫属的种数;T 为异尾轮虫属的种数。Q < 1,贫营养型湖泊;1 ≤ Q ≤ 2,中营养型湖泊;Q > 2,富营养型湖泊。

2 结果与讨论

2.1 浮游动物群落结构与优势种

研究期间,射阳湖共鉴定出浮游动物 61 种,以原生动物和轮虫为主。其中,原生动物 25 种,占浮游动物总种类的 41.0%;轮虫 24 种,占 39.3%;枝

角类 7 种,占 11.5%;桡足类 5 种,占 8.2%。浮游动物种类数呈现出春夏季多于秋冬季的变化趋势,而且该湖的浮游动物大多属于季生性种类,周年行踪可见的种类较少(见图 2)。其中,轮虫种类数量月际变化幅度最大,2 月份鉴定出的种类数量最少(2 种),7 月份种类数最多(16 种);枝角类和桡足类种类数量全年相对稳定,且远小于原生动物和轮虫种类数量。这表明在种类组成上,射阳湖浮游动物是以小型的原生动物和轮虫为主。

表 1 为射阳湖各监测点浮游动物优势种。由表 1 可知,在不同监测点位,浮游动物优势种不尽相同,既有交叉又有差异,这主要由不同湖区生境的相似性和差异性所致^[4]。浮游动物优势种种类及数量对群落结构的稳定性有重要作用,若优势种种类多且优势度小,则群落结构越复杂、稳定^[14]。整体来说,射阳湖浮游动物优势种数量较多、分布广,且优势度较小,说明其群落结构相对复杂且稳定。

2.2 浮游动物密度与生物量

图 3(a)(b)分别为射阳湖浮游动物密度与生物

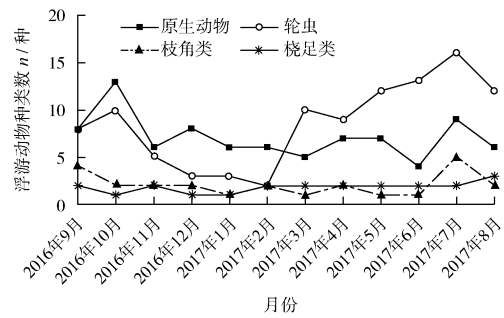


图 2 射阳湖浮游动物种类数月际变化

Fig. 2 Monthly variation of zooplankton species number in Sheyang Lake

量月际变化。调查显示,射阳湖中浮游动物较丰富,其总密度变化范围为 474.4 ind./L~1 941.7 ind./L,年均值为 1 165.9 ind./L,总体呈现出夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季的变化趋势,8 月出现峰值,1 月出现谷值。其中,轮虫的密度为 687.1 ind./L,对总密度累积贡献最大,为 58.93%;原生动物的密度为 475.1 ind./L,占总密度的 40.75%;枝角类和桡

表 1 射阳湖各监测点浮游动物优势种

Table 1 Dominant species of zooplankton in Sheyang Lake

监测点	门类	种属	优势指数	监测点	门类	种属	优势指数	
1#	原生动物	淡水薄铃虫	0.040	4#	原生动物	筒弧象鼻溞	0.058	
		湖沼砂壳虫	0.026			长额象鼻溞	0.028	
		拟铃壳虫	0.068			广布中剑水蚤	0.083	
		球形砂壳虫	0.174			湖沼砂壳虫	0.021	
		尾草履虫	0.138			急游虫	0.025	
	轮虫	剪形臂尾轮虫	0.125		拟铃壳虫	0.031		
		迈氏三肢轮虫	0.023		瓶累枝虫	0.082		
		针簇多肢轮虫	0.043		尾草履虫	0.055		
		真翅多肢轮虫	0.070		独角聚花轮虫	0.070		
	枝角类	微型裸腹溞	0.325		方形臂尾轮虫	0.091		
		长额象鼻溞	0.051		晶囊轮属	0.023		
		长肢秀体溞	0.021		针簇多肢轮虫	0.022		
2#	原生动物	淡水薄铃虫	0.137	5#	原生动物	真翅多肢轮虫	0.025	
		湖沼砂壳虫	0.109			多刺裸腹溞	0.167	
		拟铃壳虫	0.021			广布中剑水蚤	0.158	
		太阳虫属	0.025			无节幼体	0.362	
		无节幼体	0.091			淡水薄铃虫	0.102	
	轮虫	剪形臂尾轮虫	0.037		褐砂壳虫	0.028		
		针簇多肢轮虫	0.041		湖沼砂壳虫	0.031		
		微型裸腹溞	0.302		拟铃壳虫	0.128		
		长肢秀体溞	0.021		尾草履虫	0.048		
	枝角类	广布中剑水蚤	0.051		轮虫	臂尾轮虫属	0.020	
		汤匙华哲水蚤	0.056			剪形臂尾轮虫	0.067	
	3#	原生动物	无节幼体		0.091	6#	枝角类	微型裸腹溞
淡水薄铃虫			0.031	长肢秀体溞	0.033			
瓶累枝虫			0.130	广布中剑水蚤	0.179			
王氏似铃壳虫			0.030	汤匙华哲水蚤	0.043			
尾草履虫			0.038	无节幼体	0.034			
轮虫		真翅多肢轮虫	0.040	7#	原生动物		淡水薄铃虫	0.031
		多刺裸腹溞	0.102				湖沼砂壳虫	0.021
		拟铃壳虫	0.068				拟铃壳虫	0.031
		枝角类	湖沼砂壳虫		0.174		枝角类	广布中剑水蚤
尾草履虫			0.138		广布中剑水蚤			0.158
球形砂壳虫			0.174		无节幼体			0.362
尾草履虫		0.138	无节幼体		0.362			

足类的密度分别为 2.046 ind./L 和 1.640 ind./L, 占 0.18% 和 0.14%。由此可见,射阳湖浮游动物密度主要由轮虫数量多寡决定,其次是原生动物,此二者占 99.68%;而枝角类和桡足类的数量较少,仅占 0.32%。原生动物密度 12 月最高,为 731.3 ind./L,2 月最低,为 320.0 ind./L,秋冬季相对较高;轮虫密度 8 月最高,为 1 540 ind./L,1 月最低,仅为 65.0 ind./L,调查周年中有 7 个月超过年均值,主要集中在夏秋季。枝角类周年数量最多的是 7 月 (10.0 ind./L),最少在 3 月 (0.04 ind./L),且夏季数量均超过年均值;桡足类周年数量 7 月出现峰值 4.12 ind./L,谷值为 1 月的 0.40 ind./L,夏季月均数量高于年均值。

射阳湖中枝角类和桡足类的密度变化符合一般湖泊的规律,桡足类的数量变化幅度小于枝角类,这是因为桡足类的生活史较枝角类更复杂,生活周期也长,所以其数量的周年变化也相对缓和。枝角类的数量在夏末秋初最多,这是由于枝角类生命周期较短,只要外界条件合适,其能在较短的时间内大量地繁殖,数量急剧上升;到了秋末和冬季,气温和水温快速下降,且射阳湖秋冬季风浪大,造成枝角类的食物变少,致使其数量大幅度下跌。

调查显示,射阳湖浮游动物的生物量较低,在 83.9 $\mu\text{g/L}$ ~ 1 057.2 $\mu\text{g/L}$ 之间变化,年均值为 409.4 $\mu\text{g/L}$,峰值和谷值分别出现在 1 月和 7 月。其中,原生动物的生物量为 16.6 $\mu\text{g/L}$,占总生物量

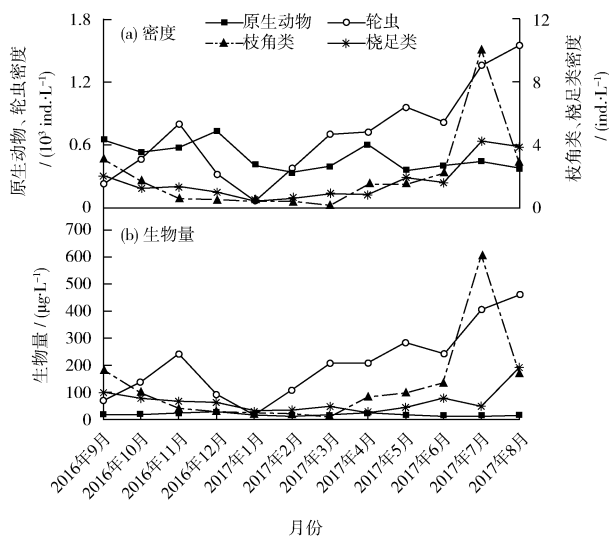


图3 射阳湖浮游动物密度与生物量月际变化

Fig. 3 Monthly variation of zooplankton density and biomass in Sheyang Lake

的 4.05%; 轮虫的生物量为 206.1 $\mu\text{g/L}$, 占 50.34%; 枝角类和桡足类的生物量分别为 122.8 $\mu\text{g/L}$ 和 63.9 $\mu\text{g/L}$, 占 30.00% 和 15.61%。虽然枝角类和桡足类的密度总和仅占浮游动物总数的 0.32%, 但生物量却占到 45.61%。可见, 枝角类和桡足类组成的浮游甲壳类生物量的变化是引起射阳湖浮游动物生物量变化的重要原因。

2.3 射阳湖水水质生物学评价

基于浮游动物监测数据,计算各监测点不同生物学指数(见图4),对射阳湖水水质进行生物学评价。结果表明:Shannon-Wiener 指数 H 空间分布不均匀,3#监测点 H 值最低,为 2.03,水质为中度污染,5#点 H 值最高,为 3.06,水质为轻度污染,故射阳湖水水质基本处于轻度污染—中度污染状态;均匀度指数 J 空间分布较均匀,年均值最低为 0.78 (1#点),最高为 0.89 (4#点),说明射阳湖水水质整体处于轻度污染状态; Q 值变化范围为 1.5 ~ 3,均值为 2.1,且湖中有较多砂壳虫、臂尾轮虫、螺形龟甲轮虫等耐污种类,原生动物和轮虫的密度均较高,由此判断射阳湖整体为富营养型湖泊。

2.4 浮游动物群落结构与环境因子的相关性分析

表2为射阳湖水水质指标监测值和综合营养指数(TLI)。由表2可知,监测期间射阳湖综合营养指数(TLI)范围为 52.52 ~ 57.39,全年变化幅度不大,整体属于轻度富营养化状态。水质评价与上文浮游动物指标评价结果基本一致,反映出射阳湖的真实营养状态,进一步说明水质生物学指标评价的可行性。作为里下河腹地重要的生态湖泊,射阳湖水生态环境的治理及管理工作仍需进一步加强。

对射阳湖月际水质指标与浮游动物群落指数之间作 Pearson 相关性分析。结果表明,浮游动物种类数、密度、生物量均与水温、透明度和 Chl-a 呈显著正相关,与 DO 呈显著负相关,其余因子之间

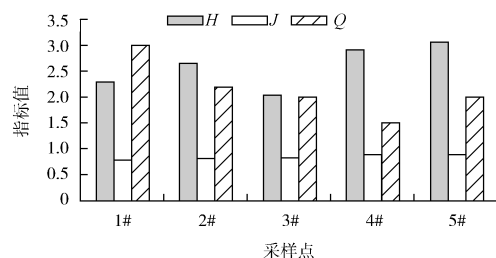


图4 射阳湖水水质生物学评价指标值

Fig. 4 Water quality biological assessment indexes in Sheyang Lake

表 2 射阳湖水质指标监测值和综合营养指数 (TLI)

Table 2 Water quality monitoring data and TLI of Sheyang Lake

日期	水温 $\theta/^\circ\text{C}$	透明度 d/m	pH 值	$\rho(\text{DO})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NH}_3 - \text{N})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{I}_{\text{Mn}})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TN})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Chl-a})/(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	TLI
2016 年 9 月	24.4	0.45	7.48	5.58	0.32	4.37	0.04	1.48	7.83	53.79
2016 年 10 月	20.1	0.51	7.35	6.62	0.28	3.96	0.04	1.52	7.49	52.83
2016 年 11 月	16.1	0.55	7.22	7.15	0.29	4.81	0.04	1.38	7.42	53.32
2016 年 12 月	12.4	0.48	7.56	8.04	0.24	4.65	0.04	1.43	6.82	53.40
2017 年 1 月	8.2	0.25	7.80	8.88	0.26	4.05	0.05	1.50	6.63	56.18
2017 年 2 月	11.8	0.22	7.36	8.73	0.34	4.27	0.06	1.42	6.25	57.12
2017 年 3 月	11.3	0.20	7.80	8.31	0.20	4.08	0.05	1.60	6.89	57.39
2017 年 4 月	24.2	0.40	7.44	6.19	0.21	4.58	0.04	1.29	7.23	54.00
2017 年 5 月	25.1	0.45	8.18	5.15	0.34	4.79	0.06	1.63	7.15	55.73
2017 年 6 月	26.7	0.66	7.21	5.73	0.60	6.21	0.06	1.60	7.53	55.02
2017 年 7 月	33.3	0.67	7.07	4.69	0.40	5.26	0.07	1.59	7.60	54.90
2017 年 8 月	31.3	0.71	6.74	3.54	0.11	4.80	0.04	1.58	8.91	52.52
均值	20.4	0.46	7.43	6.55	0.30	4.65	0.05	1.50	7.31	54.68

的相关性均不显著。浮游植物是浮游动物的重要食物源,当浮游植物密度较高时浮游动物密度也较高,两者呈显著的正相关性^[15],而水温是影响浮游植物生长发育、群落结构演替和数量变化的重要因子之一。陈光荣等^[16]研究表明,浮游动物密度和生物量与水温呈显著正相关,这与文中结果一致。

3 结论

(1) 射阳湖共鉴定出浮游动物 61 种,其中原生动物、轮虫、枝角类和桡足类分别为 25 种、24 种、7 种和 5 种;浮游动物优势种数量较多、分布广,且优势度较小,说明射阳湖浮游动物群落结构相对复杂且稳定。

(2) 射阳湖中的浮游动物比较丰富,总体呈现出夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季的分布趋势。轮虫和原生动物对射阳湖浮游动物密度累积贡献最大,达 99.68%。枝角类和桡足类虽仅占浮游动物密度的 0.32%,但对浮游动物总生物量贡献达 45.61%。

(3) 水质生物学评价结果表明,射阳湖整体处于轻度—中度污染、富营养化的状态,这与水质评价结果基本一致;水温、透明度、Chl-a 和 DO 是影响射阳湖浮游动物群落结构的主要水质指标。

[参考文献]

- 研究[J]. 环境监测管理与技术,2018,30(1):1-3.
- [4] 王婕妤,黄备,贾海波,等. 2011 年春、秋季浙江舟山海域浮游动物群落结构和多样性现状[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版),2014,33(4):311-316.
- [5] 冯素珍,李畅游. 基于水生生物的湖泊营养类型评价[J]. 环境监测管理与技术,2010,22(2):37-40.
- [6] MAGEED A A A, HEIKAL M T. Factors affecting seasonal patterns in epilimnion zooplankton community in one of the largest man-made lakes in Africa (Lake Nasser, Egypt) [J]. *Limnologia*, 2006, 36(2):91-97.
- [7] DJURHUUS A, PITZ K, SAWAYA N A, et al. Evaluation of marine zooplankton community structure through environmental DNA metabarcoding[J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2018, 16(4):209-221.
- [8] 朱新鹏. 梁子湖浮游动物群落结构及其与环境因子的关系研究[D]. 武汉:华中农业大学,2014.
- [9] 孟顺龙,肖代,陈小丽,等. 丰、枯水期里下河腹地典型水体浮游动物群落结构与水质评价[J]. 水生态学杂志,2016,37(6):76-83.
- [10] 柯长青,秦年秀. 过去 76 年来射阳湖湖沼环境的动态变化[J]. 湿地科学,2003,1(2):81-85.
- [11] 章宗涉,黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京:科学出版社,1991.
- [12] 韩茂森,束蕴芳. 中国淡水生物图谱[M]. 北京:海洋出版社,1995.
- [13] 蔡琨,陆维青,牛志春,等. 洮湍水系湖泊春季浮游植物群落结构和水质生物学评价[J]. 环境监测管理与技术,2018,30(3):37-41.
- [14] 柳丽华,左涛,陈瑞盛,等. 2004 年秋季长江口海域浮游植物的群落结构和多样性[J]. 海洋水产研究,2007,28(3):112-120.
- [15] 陈亮,刘一,禹娜,等. 分水江水库浮游动物群落结构的初步研究及水质评价[J]. 华东师范大学学报(自然科学版),2010(6):72-82.
- [16] 陈光荣,钟萍,张修峰,等. 惠州西湖浮游动物及其与水质的关系[J]. 湖泊科学,2008,20(3):351-356.
- [1] 冯钟,赵帅营,陈丽,等. 抚仙湖浮游动物群落分布特征及其影响因素分析[J]. 云南师范大学学报(自然科学版),2018,38(5):56-65.
- [2] 王文侠,陈非洲,谷孝鸿. 南京市 5 座中型水库浮游动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 湖泊科学,2017,29(1):216-223.
- [3] 牛志春,蔡琨,张宏,等. 太湖流域水生生态监控系统平台构建