

DOI: 10.5846/stxb202101080079

刘振中, 赵文倩, 郭文莉, 周忠泽. 芡实分区刈割试验对陈瑶湖后生浮游动物群落结构的影响. 生态学报, 2022, 42(1): 400-409.

Liu Z Z, Zhao W Q, Guo W L, Zhou Z Z. Effects of mowing experiment in different channel areas on metazooplankton community structure in Chenyao Lake. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(1): 400-409.

芡实分区刈割试验对陈瑶湖后生浮游动物群落结构的影响

刘振中, 赵文倩, 郭文莉, 周忠泽*

安徽大学资源与环境工作学院, 合肥 230601

摘要: 陈瑶湖流域是长江中下游重要的水禽省级自然保护区, 近年来随着农业的发展, 湖区存在芡实种植过密, 汛期影响行洪的隐患, 对湖区的水生态系统结构与功能的稳定性造成严重影响。为研究芡实分区刈割试验对陈瑶湖后生浮游动物群落结构的影响, 于 2019 年 8 月期间对陈瑶湖后生浮游动物进行调查。共鉴定出后生浮游动物 15 科 22 属 40 种, 其中轮虫 12 属 26 种, 枝角类 8 属 11 种, 桡足类 2 属 3 种, 群落结构主要以轮虫为主, 后生浮游动物种类分布时空上无显著差异 ($P>0.05$)。共发现优势种 8 属 10 种, 分别为萼花臂尾轮虫 (*Brachionus calyciflorus*)、角突臂尾轮虫 (*Brachionus angularis*)、剪形臂尾轮虫 (*Brachionus forficula*)、螺形龟甲轮虫 (*Keratella cochlearis*)、囊形单趾轮虫 (*Monostyla bulla*)、蹄形腔轮虫 (*Lecane unguolata*)、针簇多肢轮虫 (*Polyarthra trigla*)、迈氏三肢轮虫 (*Filinia maior*)、长额象鼻溞 (*Bosmina longirostris*) 和广布中剑水蚤 (*Mesocyclops leuckarti*)。后生浮游动物密度和生物量平均值分别为 (1681.49 ± 205.73) 个/L 和 (7.8 ± 1.52) mg/L, 密度和生物量峰值均出现在初期的未刈割区, 最低值均出现在后期的河道。后生浮游动物密度的空间分布呈现未刈割区>刈割区>河道的特征, 时间变化呈现刈割初期>前期>中期>后期的趋势, 生物量的时空变化趋势与密度一致。ShannonWiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数和 Pielou 均匀度指数变化范围分别为 1.67—3.42、1.64—3.57 和 0.41—1.13。统计分析结果表明 TN、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、Chl. a、EC 和 SD 是影响浮游动物群落结构的主要因子。综合生物和理化指标判别陈瑶湖水体已处于中污染状态; 营养状态参数结果表明, 陈瑶湖已处于中度富营养状态。

关键词: 陈瑶湖; 浅水湖泊; 后生浮游动物; 群落结构; 刈割试验

Effects of mowing experiment in different channel areas on metazooplankton community structure in Chenyao Lake

LIU Zhenzhong, ZHAO Wenqian, GUO Wenli, ZHOU Zhongze*

School of resources and environmental engineering, Anhui University, Hefei 230601, China

Abstract: Chenyao Lake basin is an important waterfowl Provincial Nature Reserve in the middle and lower reaches of the Yangtze River. In recent years, with the development of agriculture, there are some hidden dangers in the lake area, such as planting too much *Euryale ferox*, affecting the flood discharge in flood season, and seriously affecting the stability of the structure and function of the aquatic ecosystem in the lake area. In order to study the effects of mowing experiment in different areas of *Euryale ferox* on the community structure of metazoan zooplankton in Chenyao Lake, the metazoan zooplankton was investigated in August 2019. A total of 40 species of metazooplankton belonging to 22 genera, 15 families were identified. Among them, 26 species belong to 12 genera of Rotifer, 11 species belong to 8 genera of Cladocera and 3 species belong to 2 genera of Copepoda. The community structure was dominated by Rotifers. There was no significant

基金项目: 企事业单位委托科技项目 (K160139144)

收稿日期: 2021-01-08; 网络出版日期: 2021-08-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhzz@ahu.edu.cn

difference in the spatial and temporal distribution of metazoan zooplankton ($P>0.05$). A total of 8 genera and 10 species of dominant species were found, including *Brachionus calyciflorus*, *B. angularis*, *B. forficula*, *Keratella cochlearis*, *Monostyla bulla*, *Lecane unguolata*, *Polyarthra trigla*, *Filinia maior*, *Bosmina longirostris* and *Mesocyclops leuckarti*. The average animal density and biomass of metazoan zooplankton were (1681.49 ± 205.73) ind/L and (7.8 ± 1.52) mg/L respectively. The peak values of density and biomass appeared in the initial stage of no mowing area and the lowest values all appeared in the later stage of channel. The spatial distribution of the density of metazoan zooplankton showed the characteristics of no mowing area > mowing area > river channel, while the temporal change trend was in the initial stage > early stage > middle stage > late stage. The trend of spatial and temporal variation in biomass and density was consistent. The Shannon Wiener diversity index, Margalef richness index and Pielou evenness index of the metazoan zooplankton community were 1.67—3.42, 1.64—3.57 and 0.41—1.13, respectively. The results of Redundancy analysis and Pearson correlation analysis showed that TN, TP, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, Chl a, EC and SD were the main factors affecting the community structure of zooplankton. According to the comprehensive biological and physical and chemical indicators, Chenyao Lake was in a state of moderate pollution. The results of nutritional parameters indicated that Chenyao Lake was in a state of moderate eutrophication.

Key Words: Chenyao Lake; the shallow lake; metazoan zooplankton; community structure; mowing experiment

陈瑶湖自古以来就是安徽省境内重要的浅水通江湖泊组成部分,湿地具有类型多样的生境以及丰富的水生生物物种,在长江中下游生态区中占据着重要的地位^[1]。自 20 世纪中期以来,由于大面积的围湖造田,使得湖区面积骤减。近年来,由于农业发展和水产养殖的兴起,导致陈瑶湖水质日趋恶化,生物多样性锐减。2019 年夏季调查发现陈瑶湖水域芡实(*Euryale ferox*)生长过密,湖面 95% 的区域被水生植被所覆盖,其中芡实和莲(*Nelumbo nucifera*)其盖度达到 90%,伴生种主要有野菱(*Trapa incisa*)、金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)、黑藻(*Hydrilla verticillata*)、槐叶萍(*Salvinia natans*)和浮萍(*Lemna minor*)。在浅水通江湖泊中,由于自然生长的浮水植物芡实过度生长,导致沉水植被在 5 月份因缺少光照腐烂从而影响鱼类的生长。为防止湖面因芡实生长过密影响鱼类生存以及芡实成熟腐烂后进一步影响水体水质,当地政府于 2019 年 8 月期间首次对湖面进行通道式分区刈割试验,分 20 条通道沿南北走向按条状分布,通道宽度为 20 m,每 2 个通道之间是以芡实为主的水生植被覆盖区,宽约 200 m。刈割方法为距水面下方 30 cm 处割断芡实和莲的叶柄,并打捞上岸。刈割试验使刈割区水体水质短期内发生显著变化,相比于未刈割区,刈割区水体中的 DO、EC 和 Turb 显著提高,SD 有所下降,TN、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 以及 Chl. a 含量都有不同程度的增加。

一些研究表明,在浅水湖泊中水生植被与浮游动物丰度和多样性存在显著正相关,因为水生植被能够为后生浮游动物提供避难所以及更加复杂多样的生态位^[2-3]。后生浮游动物是水生生态系统的初级消费者,因其具有体型小、数量多、代谢能力强等特点而成为水生生态系统中独特的生命形式之一^[4],同时后生浮游动物对水环境变化反应灵敏,也是水环境变化的重要指示生物^[5]。为探讨刈割试验对后生浮游动物的影响,本研究调查了陈瑶湖刈割期间与刈割结束两个时期三种不同区域下的后生浮游动物群落结构和水质状况,分析环境因子与后生浮游动物群落结构间的关系,确定影响后生浮游动物群落结构的主要因素,以为陈瑶湖水环境保护及生态恢复提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样点及采样时间

陈瑶湖位于长江中下游北岸,地处北纬 $30^\circ 51' 59''$ — $30^\circ 55' 49''$,东经 $117^\circ 37' 50''$ — $117^\circ 42' 36''$ 之间。本研究根据陈瑶湖整体水域分布及刈割分区试验情况,共设置 3 个采样点,分别为刈割区、未刈割区以及河道。其中刈割区为宽 20 m 的刈割通道;2 个刈割通道间之间为宽约 200 m 的未刈割区,是以芡实为主的水生植被覆盖区;河道水面以莲为优势种,伴生种有野菱、黑藻等水生植物,水生植被盖度约 60%,为不受刈割试验影响

区域(图 1)。采样时间为 2019 年 8 月 5 日、12 日、17 日以及 26 日,每次采样间隔一星期,并根据采样时间将刈割区分为刈割初期、前期、中期以及后期 4 个阶段;其中初期和前期为刈割期间,中期和后期为刈割结束时期。

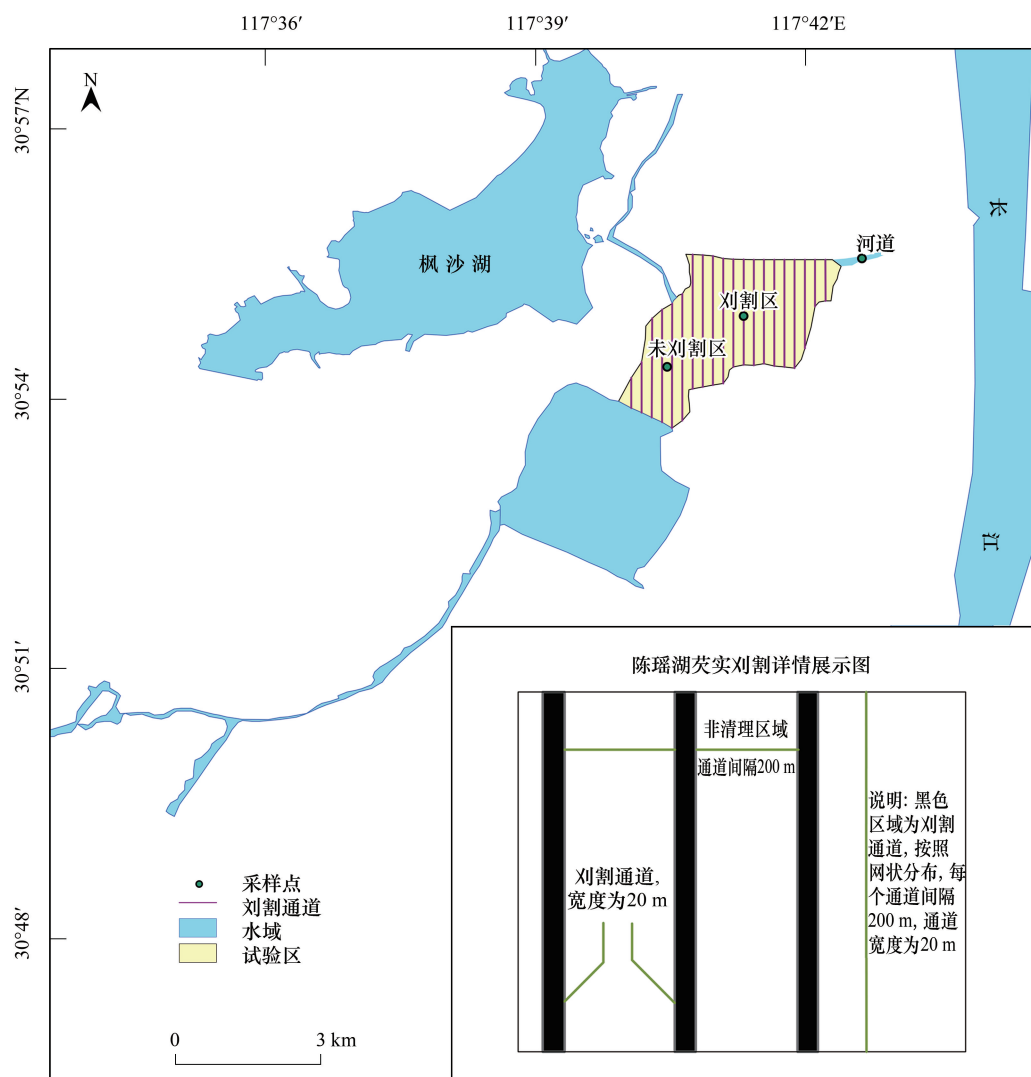


图 1 采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling points

1.2 样品采集和处理

后生浮游动物的采集包括轮虫、枝角类和桡足类,样品的采集分为定性和定量,轮虫的定性样品用 25# (孔径 = 64 μm) 浮游生物网在表层水体呈“ ∞ ”字形拖曳 3—5 min,并过滤浓缩至 50 mL 定量瓶中,再现场加入 1 mL 鲁哥试剂固定。定量样品用 1 L 样品瓶采集,现场加入 10 mL 鲁哥试剂固定,然后带回实验室沉淀浓缩定容至 30 mL。甲壳类浮游动物定性样品用 13# (孔径 = 112 μm) 浮游生物网在表层水体呈“ ∞ ”字形拖曳 3—5 min,然后将样品滤缩至 50 mL 定量瓶中,现场加入 4% 甲醛 1 mL 固定。定量样品用有机玻璃采水器采集水样 10 L,通过 25# 浮游生物网过滤,浓缩至 50 mL 定量瓶中,再现场加入 4% 甲醛 1 mL 固定并加以标注^[6]。轮虫生物量采用体积法计算浮游甲壳类动物生物量采用体长-体质量回归方程计算。浮游动物种类鉴定主要依据伍焯田^[7]、沈嘉瑞^[8]等人的分类系统进行种类鉴定。

用有机玻璃采水器自湖底向湖面采集混合水样,并使用便携式多参数水质分析仪现场测定指标包括浊度

(Turb)、水温、电导率(EC)、酸碱度(pH)、溶解氧(DO)、水深和透明度. 实验室测定指标主要有叶绿素 a(Chl. a)、总氮(TN)和总磷(TP)等。用丙酮萃取分光光度法测定叶绿素 a^[9]; 总氮用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(HJ 636—2012)^[10]; 总磷用钼锑氨分光光度法(GB 11893—1989)^[11]。

1.3 数据处理

采用 Margalef 物种丰富度指数(D)、Pielou 均匀度指数(J)、Shannon-Wiener 生物多样性指数(H')来分析浮游动物多样性结构特征^[12-13], 以 H' 指数评价水体污染状况标准: $0 \leq H' \leq 1$, 重污染; $1 < H' \leq 2$, α -中污型; $2 < H' \leq 3$, β -中污型; $H' > 3$, 轻污或无污染^[14-15], 计算公式为:

$$D = (S - 1) / \log_2 N \quad (1)$$

$$H' = - \sum_{i=1}^s (n_i / N) \times \log_2 (n_i / N) \quad (2)$$

$$J = H' / \log_2 S \quad (3)$$

浮游动物优势度计算公式为:

$$Y = n_i / N \times f_i \quad (4)$$

式中, S 为总种类数, N 为该水域出现的所有浮游动物种类的总个体数; n_i 为第 i 种的个体数; 为该种在各样点出现的频率; $Y \geq 0.02$ 时, 表明该浮游动物为优势种^[12]。

水体营养状态参数的计算采用均值、标准差的方法, 选取 SD、TN、TP 和 Chl. a 4 个指标, 用综合营养状态参数进行评价: $TLI(\Sigma) < 30$, 贫营养; $30 \leq TLI(\Sigma) \leq 50$, 中营养; $50 < TLI(\Sigma) \leq 60$, 轻度富营养; $60 < TLI(\Sigma) \leq 70$, 中度富营养; $TLI(\Sigma) > 70$, 重度富营养^[16-17], 计算公式为:

$$TLI(\Sigma) = \sum_{j=1}^m w_j \cdot TLI(j) \quad (5)$$

$$w_j = r_{ij}^2 / \sum_{j=1}^m r_{ij}^2 \quad (6)$$

式中, $TLI(\Sigma)$ 表示综合营养状态参数; w_j 为第 j 种参数的营养状态参数的相关权重; r_{ij} 为第 j 种参数与基准参数; m 为评价参数的个数; $TLI(j)$ 为第 j 种参数的营养状态参数, 分别由以下公式计算:

$$TLI(\text{chl. a}) = 10(2.5 + 1.086 \ln \text{chl. a}) \quad (7)$$

$$TLI(\text{TP}) = 10(9.436 + 1.624 \ln \text{TP}) \quad (8)$$

$$TLI(\text{TN}) = 10(5.453 + 1.694 \ln \text{TN}) \quad (9)$$

$$TLI(\text{SD}) = 10(5.118 - 1.94 \ln \text{SD}) \quad (10)$$

式中, Chl. a 为叶绿素 a 浓度 ($\mu\text{g/L}$), TP 为水中总磷浓度 (mg/L), TN 为水中总氮浓度 (mg/L), SD 为湖水透明度 (m)。

采样点的分布图采用 ArcGIS 10.2 软件绘制, 采用 SPSS 19.0 软件进行浮游动物种数、密度、生物量与环境因子的 Pearson 相关性分析, 用 Canoco 4.5 软件对后生浮游动物优势种密度数据进行去趋势分析(DCA), 得出第一轴长度小于 3(2.64), 因此选择 RDA 分析, 并通过蒙特卡罗置换检验对环境因子进行筛选, 绘制环境因子与优势种的关系图。

2 结果

2.1 调查期间水质特征

调查期间 DO、Turb、TP 在时空上均有显著差异($P < 0.05$), 其中 DO 在空间上波动较大($P < 0.01$), 变化范围在 0.86—4.06 之间。温度、pH 以及 WD 在时空上均无显著差异($P > 0.05$), 其它水环境因子仅在空间上有显著变化($P < 0.05$), 时间上无显著变化($P > 0.05$), 总体水质由好到坏空间上呈现河道 > 未刈割区 > 刈割区的分布特征, 时间上总体呈现刈割初期 > 前期 > 中期 > 后期的变化趋势(表 1)。TLI 均值为 62.54 ± 2.31 , 属于中度富营养水体。

表 1 水环境因子时空变化及相关性分析

Table 1 Spatiotemporal variation and correlation analysis of water environmental factors

环境因子 Environmental factor	未刈割区 No mowing area	刈割区 Mowing area	河道 River channel	<i>P</i>	初期 Initial mowing stage	前期 Early stage	中期 Middle stage	后期 Late stage	<i>P</i>
水温 WT/℃	30.18±0.26	30.38±0.46	30.15±0.24	—	30.73	30.80	29.90	30.07	—
pH	6.98±0.04	6.95±0.09	7.01±0.07	—	7.01	6.81	7.00	6.98	—
溶解氧 DO/(mg/L)	1.06±0.32	3.12±0.45	3.62±0.44	* *	2.50	3.17	3.25	3.56	*
电导率 EC/(μS/cm)	209.80±3.87	241.67±5.42	200.80±4.58	*	236.10	243.77	238.57	248.23	—
透明度 SD/m	0.51±0.02	0.46±0.01	0.62±0.01	*	0.45	0.46	0.45	0.46	—
水深 WD/m	1.30±0.01	1.3±0.04	1.20±0.02	—	1.35	1.30	1.30	1.25	—
浊度 Turb/(NTU)	6.21±1.32	9.02±1.26	6.20±1.58	*	7.44	8.69	10.37	9.58	*
总氮 TN/(mg/L)	2.06±0.06	3.46±0.04	1.59±0.01	*	3.42	3.43	3.48	3.51	—
氨氮 NH ₄ ⁺ -N/(mg/L)	0.69±0.03	0.75±0.04	0.55±0.05	*	0.70	0.73	0.77	0.78	—
硝氮 NO ₃ ⁻ -N/(mg/L)	0.05±0.02	0.06±0.01	0.03±0.01	*	0.06	0.05	0.06	0.08	—
总磷 TP/(mg/L)	0.10±0.03	0.19±0.04	0.09±0.02	*	0.14	0.16	0.20	0.24	*
叶绿素 a Chl. a/(μg/L)	23.46±1.58	25.09±2.04	16.31±1.68	*	22.37	24.67	26.61	26.71	—

WT:水温 Water temperature;DO:溶解氧 Dissolved oxygen;EC:电导率 Electroconductibility;SD:透明度 Secchi dise ;WD:水深 Water depth;Turb:浊度 Turbidity;
TN:总氮 Total nitrogen;NH₄⁺-N:氨氮 Ammonia nitrogen; NO₃⁻-N:硝氮 Nitrate nitrogen;TP:总磷 Total phosphorus;Chl. A:叶绿素 a Chlorophyll a; * *P*<0.05 表示在 0.05
水平(双侧)上显著相关; * * *P*<0.01 表示在 0.01 水平(双侧)上极显著相关

2.2 后生浮游动物种类组成

调查期间共鉴定出后生浮游动物 22 属 40 种,其中轮虫 12 属 26 种,枝角类 8 属 11 种,桡足类 2 属 3 种,群落结构以轮虫为主。其中刈割区共鉴定出后生浮游动物 26 种;未刈割区 9 种;河道 31 种。

2.3 后生浮游动物的优势种

根据物种优势度 $Y \geq 0.02$ 的判别,调查期间共鉴定出后生浮游动物优势种类群 8 属 10 种,分别为轮虫的萼花臂尾轮虫(*Brachionus calyciflorus*)、角突臂尾轮虫(*B. angularis*)、剪形臂尾轮虫(*B. forficula*)、螺形龟甲轮虫(*Keratella cochlearis*)、囊形单趾轮虫(*Monostyla bulla*)、蹄形腔轮虫(*Lecane unguolata*)、针簇多肢轮虫(*Polyarthra trigla*)、迈氏三肢轮虫(*Filinia maior*);枝角类的长额象鼻溞(*Bosmina longirostris*)以及桡足类的广布中剑水蚤(*Mesocyclops leuckarti*)。对未刈割区、刈割区、河道 3 个区域以及刈割初期、前期、中期以及后期 4 个阶段后生浮游动物优势种类群进行分析,结果表明空间上针簇多肢轮虫为 3 个区域共有优势种;剪形臂尾轮虫和广布中剑水蚤仅在未刈割区占优;囊形单趾轮虫仅在河道占优。时间上剪形臂尾轮虫与广布中剑水蚤仅在初期占优;螺形龟甲轮虫仅在后期占优,其它优势种在时间分布上均无差异(表 2)。

表 2 后生浮游动物优势种时空变化

Table 2 Temporal and spatial variation of dominant metazooplankton species

类别 Types	种名 Species name	未刈割区 No mowing area	刈割区 Mowing area	河道 River channel	初期 Initial mowing stage	前期 Early stage	中期 Middle stage	后期 Late stage
轮虫 Rotifer	萼花臂尾轮虫(<i>Brachionus calyciflorus</i> Pallas)	+	+		+	+	+	+
	角突臂尾轮虫(<i>Brachionus angularis</i> Gosse)	+	+		+	+	+	+
	剪形臂尾轮虫(<i>Brachionus forficula</i> Wierzejski)	+			+			
	螺形龟甲轮虫(<i>Keratella cochlearis</i> Gosse)	+		+				+
	囊形单趾轮虫(<i>Monostyla bulla</i> Gosse)			+				
	蹄形腔轮虫(<i>Lecane unguolata</i> Gosse)	+		+				
	针簇多肢轮虫(<i>Polyarthra trigla</i> Ehrenberg)	+	+	+	+	+	+	+
	迈氏三肢轮虫(<i>Filinia maior</i> Colditz)		+		+	+	+	
枝角类 Cladocera	长额象鼻溞(<i>Bosmina longirostris</i> O.F.Muller)	+		+	+	+		
桡足类 Copepods	广布中剑水蚤(<i>Mesocyclops leuckarti</i> Claus)	+			+			

“+”表示优势度 $Y \geq 0.02$,“空白”表示优势度 $Y < 0.02$

2.4 后生浮游动物密度和生物量

2.4.1 时间变化

调查期间后生浮游动物时间上平均密度为 (1686.18 ± 231.09) 个/L, 其中轮虫平均密度最高, 为 (1414.57 ± 191.31) 个/L, 占总密度的 83.89%, 桡足类密度最低, 为 (72.65 ± 10.34) 个/L, 仅占总密度的 4.31% (图 2); 后生浮游动物时间上平均生物量为 (7.67 ± 1.14) mg/L, 其中轮虫平均生物量最低, 为 (1.35 ± 0.67) mg/L, 占总生物量的 17.60%, 枝角类生物量最高, 为 (4.23 ± 1.67) mg/L, 占总生物量的 55.15% (图 2)。密度和生物量在时间上总体呈现初期>前期>中期>后期的变化趋势。

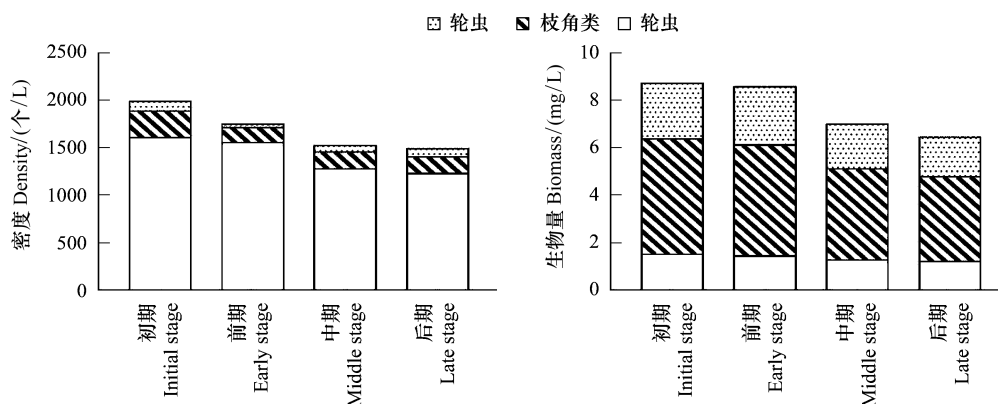


图 2 后生浮游动物密度和生物量时间变化

Fig.2 Temporal variation of density and biomass of metazooplankton

2.4.2 空间变化

调查期间后生浮游动物空间上平均密度为 (1676.77 ± 225.74) 个/L, 其中轮虫平均密度最高, 为 (1401.86 ± 164.33) 个/L, 占总密度的 83.60%, 桡足类密度最低, 为 (83.37 ± 11.07) 个/L, 仅占总密度的 4.97% (图 3); 后生浮游动物空间上平均生物量为 (7.93 ± 1.62) mg/L, 其中轮虫平均生物量最低, 为 (1.32 ± 0.57) mg/L, 占总生物量的 16.61%, 枝角类生物量最高, 为 (4.53 ± 1.49) mg/L, 占总生物量的 57.09% (图 3)。后生浮游动物的密度和生物量具有显著的空间差异, 整体呈未刈割区>刈割区>河道的分布特征。

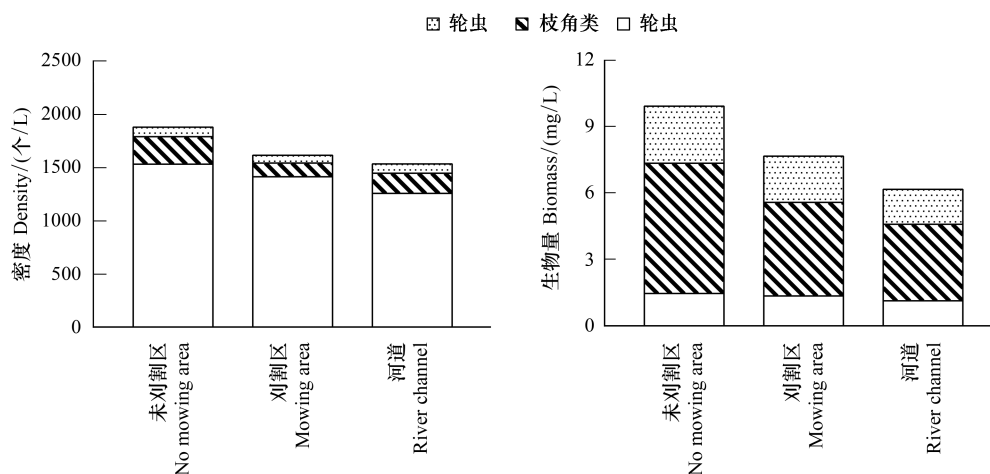


图 3 后生浮游动物密度和生物量空间分布

Fig.3 Spatial distribution of density and biomass of metazooplankton

2.5 后生浮游动物多样性指数

后生浮游动物 D 指数时间上分别为 2 (1.92—2.13), H' 指数为 1.87 (1.58—2.07), J 指数为 0.66 (0.57—0.69) (图 4); 空间上 D 指数为 2.56 (1.64—3.57), H' 指数为 2.45 (1.67—3.42), J 指数为 0.73 (0.41—1.13) (图 4)。 D 、 H' 、 J 在时空上变化趋势基本保持一致, 空间上呈现河道>未刈割区>刈割区的分布特征, 时间上呈初期>前期>中期>后期的变化趋势。

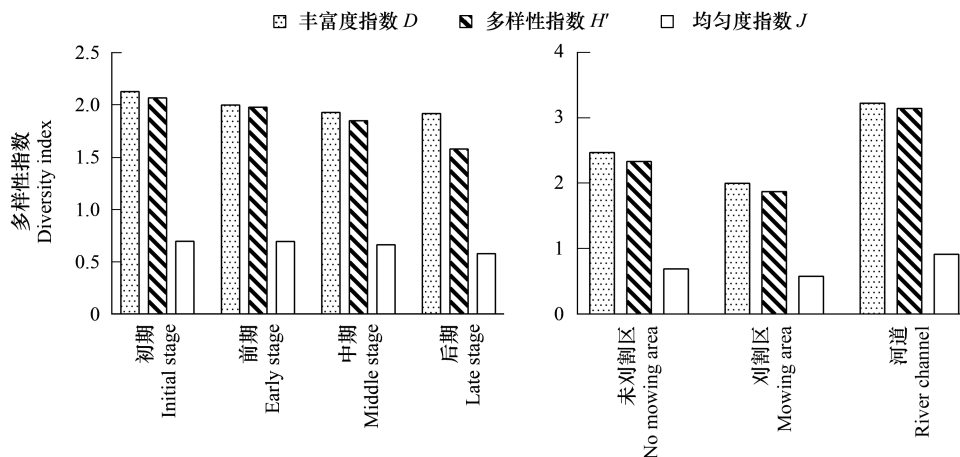


图 4 后生浮游动物多样性指数时空变化

Fig.4 Spatiotemporal variation of metazooplankton diversity index

D : 丰富度指数 Margalef richness index; H' : 多样性指数 ShannonWiener diversity index; J : 均匀度指数 Pielou evenness index

2.6 后生浮游动物与环境因子相关分析

结果表明不同区域的后生浮游动物生物指标与环境因子的相关性略有不同, 未刈割区后生浮游动物密度 (DZ) 与电导率显著正相关 ($P < 0.05$); 刈割区后生浮游动物密度 (DZ) 与 DO 呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与 Chl. a 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与 NH_4^+-N 呈显著负相关 ($P < 0.05$), 生物量与 NH_4^+-N 和 N/P 呈显著负相关 ($P < 0.05$); 河道后生浮游动物种类数 (SZ) 与 WT 显著正相关 ($P < 0.05$) (表 3)。总体来说刈割区后生浮游动物与环境因子的相关性较强, 未刈割区与河道的相关性较弱。

表 3 后生浮游动物与环境因子相关性分析

Table 3 Correlation analysis between metazooplankton and environmental factors

区域 Areas	指标 Index	水温 WT	pH	溶解氧 DO	电导率 EC	透明度 SD	电导率 Turb	总氮 TN	氨氮 NH_4^+-N	硝氮 NO_3^--N	总磷 TP	叶绿素 a Chl. a	氮磷比 N/P
未刈割区 No mowing area	SZ	0.35	-0.08	0.06	0.76	-0.06	0.21	-0.24	-0.83	-0.21	0.32	0.26	0.64
	DZ	0.47	-0.35	0.12	0.82 *	-0.35	0.14	-0.35	-0.23	-0.31	0.48	0.87	-0.81
	BZ	0.97	-0.46	0.28	0.46	-0.04	0.06	0.14	-0.48	-0.09	0.88	0.18	0.23
刈割区 Mowing area	SZ	0.24	0.07	0.76	0.36	0.08	0.09	-0.49	-0.35	-0.51	0.86	0.06	-0.58
	DZ	0.31	-0.34	0.93 *	0.87	-0.57	0.56	0.54	-0.88 *	0.31	0.83	0.88 **	-0.32
	BZ	0.08	-0.32	0.78	0.65	-0.69	0.03	0.87 *	-0.78 *	-0.14	0.88	0.86	-0.96 *
河道 River channel	SZ	0.59	-0.52	0.69	0.87	0.91	-0.18	-0.31	-0.33	-0.8	0.57	-0.13	-0.64
	DZ	0.15	0.84	0.14	-0.22	0.38	0.74	0.85	-0.93	-0.16	0.55	-0.36	-0.36
	BZ	0.89 *	0.85	0.01	0.05	0.43	0.9	0.95	0.89	-0.26	0.97 *	0.98	-0.49

“*”在 0.01 水平 (双侧) 上显著相关; “*”在 0.05 水平 (双侧) 上显著相关; SZ: 后生浮游动物种类数 Species of metazoan zooplankton; DZ: 后生浮游动物密度 Density of metazoan zooplankton; BZ: 后生浮游动物生物量 Biomass of metazoan zooplankton; N/P: 氮磷比 Total nitrogen/Total phosphorus

2.7 后生浮游动物优势种密度与环境因子的 RDA 分析

后生浮游动物优势种与环境因子的 RDA 结果显示, 第一和第二排序轴的特征根分别为 0.43 和 0.33, 排

序轴的物种解释率分别为 43.2% 和 33.3%, 两个轴的累计解释率为 76.5% (表 4)。对后生浮游动物群落结构影响最强的环境因子是 DO、Chl. a 和 TN, 其中萼花臂尾轮虫 (*B. calyciflorus*) 和角突臂尾轮虫 (*B. angularis*) 与 Chl. a 呈显著正相关, 与 DO 呈显著负相关; TN、NH₄⁺-N、EC 与螺形龟甲轮虫 (*K. cochlearis*)、剪形臂尾轮虫 (*B. forficula*) 呈显著负相关, 与迈氏三肢轮虫 (*F. maior*) 呈正相关 (图 5)。

表 4 后生浮游动物密度与环境因子的冗余分析
Table 4 Redundancy analysis of metazooplankton density and environmental factors

排序轴 Axis	1	2	3	4
特征值 Eigenvalues	0.432	0.333	0.119	0.061
物种环境相关性 Species-environment correlations	0.637	0.694	0.634	0.587
物种变异累计百分数/% Cumulative percentage variance of species data	37.6	40.8	42.5	43.0
物种-环境变异累计百分数/% Cumulative percentage variance of species-environment relation	43.2	76.5	88.4	94.5
全部特征值总和 Sum of all eigenvalues	1			

3 讨论

3.1 水质总体评价

陈瑶湖地势低洼, 周围由农田环绕, 化肥、农药、除草剂等的使用, 使得大量氮、磷随地表径流流入湖体, 此外湖面种植茭实与水产养殖过程中过量施肥也是导致陈瑶湖富营养化的重要因素。根据湖泊富营养化分级标准^[18], 陈瑶湖总氮浓度均值在 1.5 mg/L 以上, 总磷浓度均值在 1 mg/L 以上, TLI 指数均值在 60 以上, 说明其水体呈中度富营养状态。许多研究结果表明富营养化湖泊中浮游动物存在丰度大, 优势种多为耐污种的特点^[19–20], 陈瑶湖优势种有萼花臂尾轮虫、角突臂尾轮虫、针簇多肢轮虫、长额象鼻溞等, 均为富营养水体指示种。多样性指数的大小与水体污染程度呈负相关, 多样性指数越大, 则水质越好^[21], 参考通用标准对水质进行初步评价, *D* 指数为 2.62 (1.64—3.57), 表明水体处于中污染, *H'* 指数为 2.5 (1.58—3.42), 表明水体处于 β-中污染, *J* 指数为 0.77 (0.41—1.13), 表明水体处于中污染。综合 TLI 指数、优势种特征及生物多样性指数, 表明陈瑶湖水体已处于中度富营养状态, 水质处于中污染状态。

3.2 浮游动物群落结构特征

本研究中共鉴定出轮虫 12 属 26 种, 枝角类 8 属 11 种, 桡足类 2 属 3 种, 密度以轮虫占绝对优势, 枝角类其次, 桡足类最少; 生物量以枝角类最高, 桡足类其次, 轮虫最少; 优势种为萼花臂尾轮虫、角突臂尾轮虫、长额象鼻溞这类典型的污染指示种^[22]。这一结论与其它富营养化较严重的湖泊相类似^[23–24]。优势种时间上无显著变化, 但在空间上有显著变化, 这种变化的原因可能与不同区域的营养浓度有关, 许多研究表明, 营养浓度的变化是浮游动物群落结构空间变化的主要驱动因素^[25], 富营养化的水体中一般是耐污种类形成优势种

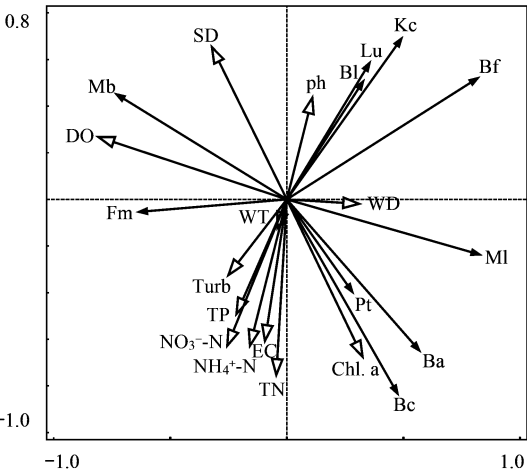


图 5 后生浮游动物优势种密度与环境因子的 RDA 分析排序
Fig.5 RDA analysis and ordination of dominant species density and environmental factors of metazooplankton
Bc: 萼花臂尾轮虫 *Brachionus calyciflorus*; Ba: 角突臂尾轮虫 *Brachionus angularis*; Bf: 剪形臂尾轮虫 *Brachionus forficula*; Kc: 螺形龟甲轮虫 *Keratella cochlearis*; Mb: 囊形单趾轮虫 *Monostyla bulla*; Lu: 蹄形腔轮虫 *Lecane unguolata*; Pt: 针簇多肢轮虫 *Polyarthra trigla*; Fm: 迈氏三肢轮虫 *Filinia maior*; Bl: 长额象鼻溞 *Bosmina longirostris*; MI: 广布中剑水蚤 *Mesocyclops leuckarti*

群,本研究也出现类似结果,在营养程度较高的刈割区与未刈割区,萼花臂尾轮虫与角突臂尾轮虫这类耐污性较强的 α -中污染指示种占优,而营养程度相对较低的河道,螺形龟甲轮虫、针簇多肢轮虫以及迈氏三肢轮虫这类耐污性相对弱一点的 β -中污染指示种占优。另外可能还与后生浮游动物本身的生长和繁殖特点有关,如萼花臂尾轮虫在生长过程中释放的一些化学物质能够提高自身与角突臂尾轮虫的种群增长率^[26]。此外种间竞争^[27]、捕食者选择性捕食^[28]都是影响群落结构的重要因素。

后生浮游动物物种数空间上呈河道>未刈割区>刈割区的特征。在河道,以莲为优势种,伴生种有四角刻叶菱、黑藻等水生植物,水生植被盖度约 60%,为不受刈割试验影响区域,河道水体的透明度最高(0.62 ± 0.01) m,河道处水体的溶解氧最高(3.62 ± 0.44) mg/L。据相关研究表明,水生植物在浅水型湖泊中能够帮助浮游动物维持一个较高的密度和生物量水平,因为水生植被具有改善水质和提供庇护场所的作用^[29-30],此外水生植物与浮游动物多样性和丰度也有着显著正相关^[31]。这些结论基本与陈瑶湖调查期间后生浮游动物群落结构空间变化趋势一致。密度和生物量空间分布为未刈割区>刈割区。导致这种空间分布不均的原因可能是刈割期间芡实的打捞,使得附着在上面的浮游动物伴随着芡实被一并带走。芡实宽大的浮叶在拖动过程中会卷走表面水体中的部分浮游动物,这也加剧了刈割区浮游动物数量以及物种多样性的降低。浮游动物密度和生物量时间变化趋势为初期<前期<中期<后期,导致这种变化的原因除了上述芡实刈割的影响之外,可能还与浮游动物本身的生长繁殖特点有关;许多研究表明轮虫具有繁殖速度快、发育时间短、食物转化率高、怀卵量大等特点^[32],并且刈割区高浓度的营养盐也十分适合小型浮游动物的生长繁殖^[33]。

3.3 刈割试验对浮游动物的影响

分区刈割试验短期内对陈瑶湖不同区域内水环境因子的影响程度不一,从而导致各个区域内水环境因子与浮游动物之间呈现不同程度的相关性。其中刈割区浮游动物受环境因子的影响较大,氨氮、Chl. a、电导率、总氮、总磷和透明度对浮游动物的影响较显著,主要原因可能是因为刈割区受人为活动影响较大,环境因子短期内较大的变幅改变了浮游动物原来相对稳定的生活环境,进而对浮游动物群落结构产生一定的影响。Arauzo^[34]的研究表明当水体中氨氮浓度升高时,浮游动物生物量会显著下降。本研究结果与其一致(图 2),可能是因为短期内氨氮浓度的升高对一些浮游动物物种具有抑制作用,并影响它们的生长和繁殖^[35-36]。Chl. a 是浮游植物进行光合作用的主要色素,反映水体中浮游植物现存量多少^[37],电导率可以反映出水体中的离子浓度^[38],氮磷含量也是影响浮游植物的重要因素^[39],它们的变化都可以直接影响到浮游植物的现存量,并间接影响浮游动物。大量研究表明水体透明度对浮游动物有显著负相关,当透明度高时,浮游动物的被捕食率增加^[40]。未刈割区除了电导率与浮游动物密度显著正相关外,河道除了温度与生物量呈显著正相关外,两个区域其余环境因子与浮游动物各指标之间无明显相关性。原因可能是因为刈割期间未刈割区与河道受人为活动影响小,各项水质指标变幅不大,因此浮游动物各指标变化幅度与环境因子的相关性较小。刈割期间,由于刈割方法是距水面下方 30 cm 处割断芡实和莲的叶柄,并打捞上岸下部残留的叶柄和跟会立即腐烂,将使刈割湖区的水体中的理化因素发生较大的变化,特别导致水体的溶解氧、透明度显著下降,会对浮游植物的生长与繁殖造成影响,进而间接影响浮游动物的群落结构。另外,浮游植物种类、现存量在刈割期间的减少也会影响浮游动物的数量变化,食植性浮游动物通过捕食作用浮游植物获取能量来源,浮游植物的减少导致其食物来源不足^[41],而且大量泥沙发生裹挟的同时可能会裹挟沉淀游动在水体的浮游动物,对浮游动物生存造成较大影响。

刈割试验短期内对陈瑶湖水质并没有起到改善作用,而且在一定程度上破坏了原有相对稳定的浮游动物群落结构,但是芡实刈割避免了因芡实成熟腐烂后导致水质进一步恶化的结果,并且刈割芡实过程中会带走水中大量氮磷等营养物质,有利于陈瑶湖未来的生态修复。另外刈割芡实还能够为鱼类提供呼吸通道,保护了陈瑶湖的渔业资源,具有一定的生态和经济价值。

参考文献 (References):

- [1] 唐红兵. 安徽省陈瑶湖流域 2016 年洪水重现期估计. 治淮, 2016, (12): 57-57.

- [2] Bolduc P, Bertolo A, Pinel-Alloul B. Does submerged aquatic vegetation shape zooplankton community structure and functional diversity? A test with a shallow fluvial lake system. *Hydrobiologia*, 2016, 778(1): 151-165.
- [3] 胡旭, 何亮, 曹特, 倪乐意, 谢平. 富营养化湖泊围隔中重建水生植被及其生态效应. *湖泊科学*, 2014, 26(3): 349-357.
- [4] Cavan E L, Henson S A, Belcher A, Sanders R. Role of zooplankton in determining the efficiency of the biological carbon pump. *Biogeosciences*, 2017, 14(1): 177-186.
- [5] 杜彩丽. 上海地区水体中后生浮游动物群落对不同环境因子的生态响应研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2019.
- [6] 陈受忠. 淡水浮游生物的采集与计数方法. *生物学通报*, 1955, (6): 52-55.
- [7] 伍焯田. 中国淡水轮虫新资料. *动物分类学报*, 1981, 6(3): 235-243.
- [8] 沈嘉瑞. 中国动物志·节肢动物门·甲壳纲·淡水桡足类. 北京: 科学出版社, 1979.
- [9] 李旭冉. 丙酮萃取分光光度法测定水中叶绿素 a 结果影响因素的研究//2015 年中国环境科学学会学术年会论文集(第一卷). 深圳: 中国环境科学学会, 2015: 1300-1307.
- [10] 谷东杰, 刘倩. 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定水中总氮. *山东化工*, 2020, 49(11): 103-105.
- [11] 吴思慧, 吴彩红, 薛文超. 钼酸铵分光光度法测定总磷的方法研究. *广州化工*, 2020, 48(7): 96-97, 159-159.
- [12] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991: 358-382.
- [13] 赵菲, 于洪贤, 马成学, 宋俊霖. 应用浮游动物群落结构评价扎龙自然保护区的水质现状. *水产学杂志*, 2013, 26(1): 41-45.
- [14] 陈琴, 程光平, 李文红, 姬永杰, 桑明远, 左婷, 赵天龙. 南宁邕江网箱养殖区浮游生物种群结构特征. *海洋与湖沼*, 2013, 44(1): 49-55.
- [15] 李志斐, 谢骏, 张晓可, 王广军, 连玉喜, 余德光, 王翠翠, 郁二蒙, 张凯. 珠三角高产养殖池塘浮游动物群落结构及水质评价. *水生生物学报*, 2017, 41(5): 1071-1079.
- [16] 王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准. *中国环境监测*, 2002, 18(5): 47-49.
- [17] 金璨, 张文涛, 孙卓. 湖库富营养化评价方法和分级标准的讨论. *贵州水力发电*, 2011, 25(5): 4-6, 9-9.
- [18] 褚一凡, 赵闪闪, 李杲光, 靳同霞, 马剑敏. 陈桥东湖浮游生物群落结构特征及水质评价. *长江科学院院报*, 2019, 36(8): 23-29.
- [19] Cremona F, Agasild H, Haberman J, Zingel J, Nöges P, Nöges T, Laas A. How warming and other stressors affect zooplankton abundance, biomass and community composition in shallow eutrophic lakes. *Climatic Change*, 2020, 159(4): 565-580.
- [20] 杨威, 孙雨琛, 张婷婷, 刘琪, 黄悦, 葛茜, 邓道贵. 富营养化对小型湖泊浮游甲壳动物群落结构及多样性的影响. *生态学报*, 2020, 40(14): 4874-4882.
- [21] García-Chicote J, Armengol X, Rojo C. Zooplankton species as indicators of trophic state in reservoirs from Mediterranean river basins. *Inland Waters*, 2019, 9(1): 113-123.
- [22] Napiórkowska-Krzebietke A, Kalinowska K, Bogacka-Kapusta E, Stawecki K, Traczuk P. Cyanobacterial blooms and zooplankton structure in Lake Ecosystem under limited human impact. *Water*, 2020, 12(5): 1252.
- [23] 贺萌. 气候变暖和水体富营养化对浅水湖泊浮游动物群落结构的影响研究[D]. 武汉: 中南民族大学, 2016.
- [24] Xiong W, Ni P, Chen Y Y, Gao Y C, Shan B Q, Zhan A B. Zooplankton community structure along a pollution gradient at fine geographical scales in river ecosystems; the importance of species sorting over dispersal. *Molecular Ecology*, 2017, 26(16): 4351-4360.
- [25] 黄海魁, 赵家聪. 利用浮游动物评价滇池的污染状况. *环境科学*, 1992, 13(3): 33-36.
- [26] 黄林, 席贻龙. 臂尾轮虫的种间竞争研究进展. *生态学杂志*, 2019, 38(10): 3177-3182.
- [27] 黄林, 席贻龙. 轮虫和枝角类的种间竞争及其影响因子研究进展. *生态学报*, 2020, 40(19): 6720-6728.
- [28] 张萌, 曹特, 过龙根, 倪乐意, 谢平. 武汉东湖水生植被重建及水质改善试验研究. *环境科学与技术*, 2010, 33(6): 154-159.
- [29] 望甜. 捕食与竞争—一流溪水库浮游动物群落的种间关系研究[D]. 广州: 暨南大学, 2010.
- [30] 商乃萱. 安徽沿江湖泊四种典型生境后生浮游动物群落结构及其影响因子[D]. 合肥: 安徽大学, 2020.
- [31] Zhang Y Z, Duan H T, Xi H Y, Huang Z J, Tsou J Y, Jiang T C, Liang X S. Evaluation of the influence of aquatic plants and Lake Bottom on the remote-sensing reflectance of optically shallow waters. *Atmosphere-Ocean*, 2018, 56(4): 277-288.
- [32] Sun Y W, Chai F Y, Yu H X, Ma C X, Cui S B. The characteristics of community structure of rotifer and water quality evaluation in Qixinghe Wetland. *Advances in Environmental Protection*, 2019, 9(2): 106-115.
- [33] 杨威, 张婷婷, 孙雨琛, 刘琪, 邓道贵, 金显文. 淮北采煤塌陷区两个小型湖泊轮虫的群落结构特征. *水资源保护*, 2020, 36(1): 82-88, 96-96.
- [34] Ríos-Arana J V, Del Carmen Agüero-Reyes L, Wallace R L, Walsh E J. Limnological characteristics and rotifer community composition of northern Mexico Chihuahuan desert springs. *Journal of Arid Environments*, 2019, 160: 32-41.
- [35] Arauzo M. Harmful effects of un-ionised ammonia on the zooplankton community in a deep waste treatment pond. *Water Research*, 2003, 37(5): 1048-1054.
- [36] Kir M, Sunar M C. Acute toxicity of ammonia and nitrite to Sea Bream, *Sparus aurata* (Linnaeus, 1758), in Relation to Salinity. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2018, 49(3): 516-522.
- [37] Martins J, Oliva Teles L, Vasconcelos V. Assays with *Daphnia magna* and *Danio rerio* as alert systems in aquatic toxicology. *Environment International*, 2007, 33(3): 414-425.
- [38] 都雪, 王齐东, 张超文, 李伟, 冯伟松, 张堂林, 刘家寿, 李钟杰. 洪泽湖轮虫群落结构及其与环境因子的关系. *湖泊科学*, 2014, 26(2): 269-276.
- [39] 李佳俊, 沈萍萍, 谭烨辉, 姜歆, 周林滨. 南海东北部浮游植物对氮、磷加富的响应及与不同水团的关系. *海洋学报*, 2015, 37(10): 88-99.
- [40] 张坤. 长江安徽段通江湖泊浮游动物群落特征及其与环境因子的关系[D]. 合肥: 安徽大学, 2019.
- [41] Henrikson L, Nyman H G, Oscarson H G, Stenson J A E. Trophic changes, without changes in the external nutrient loading. *Hydrobiologia*, 1980, 68(3): 257-263.