

# 长江安庆新洲水域浮游动物群落结构特征 及其与环境因子的关系

代培, 王银平, 匡箴, 蔺丹清, 杨彦平, 刘思磊, 刘凯\*

(农村农业部长江下游渔业资源环境科学观测实验站(中国水产科学研究院淡水渔业研究中心), 无锡 214081)

**摘要:** 为研究长江安庆新洲水域浮游动物群落结构及其环境影响因子, 于2017年2月、4月、8月和11月对该水域进行了浮游动物及水环境因子调查采样。新洲水域共采集鉴定浮游动物32属46种, 其中原生动物9属12种, 轮虫9属13种, 枝角类9属12种, 桡足类5属9种; 优势种共11种, 其中长额象鼻溞(*Bosmina longirostris*)为4个季度共有优势种, 淡水麻铃虫(*Leprotintinnus fluviatile*)和球状许水蚤(*Schmackeria forbesti*)为夏季特有优势种。浮游动物密度和生物量均值分别为 $192.53 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 群落结构以小型浮游动物为主。浮游动物现存量季节差异明显, 原生动物密度和生物量夏季最高, 冬季最低, 而浮游动物、轮虫、枝角类和桡足类均为春、秋季较高, 夏季最低。同时, 浮游动物空间分布格局也存在较大差异, 干流和南汉水域浮游动物物种数最多, 北汉最少, 密度和生物量则表现为干流和北汉水域高于南汉, 中汉水域最低。典型对应分析表明, 总氮、高锰酸钾盐指数、温度和浊度是影响浮游动物群落结构的关键环境因子 ( $P < 0.05$ ), 夏季浮游动物群落结构与其余3个季节差异显著, 且与温度和浊度呈正相关, 与总氮和高锰酸钾盐指数等呈负相关。

**关键词:** 浮游动物; 群落结构; 环境因子; 新洲水域

中图分类号: S917.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X(2019)04-0623-09

## Community structure of zooplankton and its relation with environmental factors in Xinzhou water, Anqing section of Yangtze River

DAI Pei, WANG Yinping, KUANG Zheng, LIN Danqing, YANG Yanping, LIU Silei, LIU Kai

(Scientific Observing and Experimental Station of Fishery Resources and Environment in the Lower Reaches of the Changjiang River (Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences), Wuxi 214081)

**Abstract:** To understand the community structure of zooplankton and related environmental factors, a field investigation of temporal-spatial variations of zooplankton and environmental parameters was conducted in Xinzhou water, Anqing section of Yangtze River, in February, April, August and November in 2017. The results showed that 32 genera and 46 species of zooplankton were identified, including 9 genera and 12 species of Protozoa, 9 genera and 13 species of Rotifera, 9 genera and 12 species of Cladocera, 5 genera and 9 species of Cladocera copepoda. A total of 11 dominant species were recorded, of which *Bosmina longirostris* were dominant species throughout the whole year, and *Leprotintinnus fluviatile* are the dominant species in summer as well as *Schmackeria forbesti*. The annual average density and biomass of zooplankton in Xinzhou water were  $192.53 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$  and  $0.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , respectively. And the micro-zooplankton were on predominance in the zooplankton community. The community structure of zooplankton differed seasonally as density and biomass of Protozoa were highest in summer and lowest in winter while that of other groups were highest in autumn or spring and lowest in summer. As significant spatial difference also existed, the species number of the zooplankton and its groups was largest in the main stream or South reaches, smallest in northern reaches. Beside, the density and biomass of all the zooplankton groups was largest in the main

收稿日期: 2018-11-19

基金项目: 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心基本科研业务费(2017JBFR05), 农业财政专项“长江下游渔业资源与环境调查”(CJDC-2017-22)和长江三峡工程生态与环境监测系统水生生物与渔业环境监测重点站(下游站)监测项目(JJ[2017]-010)共同资助。

作者简介: 代培, 研究实习员。E-mail: 1376720970@qq.com

\* 通信作者: 刘凯, 博士, 研究员。E-mail: liuk@ffrc.cn

stream or South reaches, smallest in northern reaches. Besides, the density and biomass of all the zooplankton groups was largest in the main stream or South reaches, smallest in northern reaches. The community structure of zooplankton was analyzed in relation to water quality parameters by canonical correspondence analysis( CCA). The results showed that T, Tur, TN and  $COD_{Mn}$  were strongly correlated with the zooplankton community structures, and the zooplankton community structure was significantly different from the other three seasons in summer, which was positively correlated with T and Tur, negatively correlated with TN and  $COD_{Mn}$ .

**Key words:** zooplankton; community structure; environmental factors; Xinzhou waters

长江安庆段位于长江下游安徽省境内,长约 243 km,多沙洲,渔业资源丰富<sup>[1]</sup>,且长江江豚密度较高<sup>[2]</sup>。新洲为安庆江段最大的江心洲,附近水域有较长的泥沙质自然岸线,鱼类种类及生物多样性较高,同时也是长江江豚重要的栖居地,并且分布有长江刀鲚国家级水产种质资源保护区和长江安庆段长吻鮠、大口鲶、鳊鱼国家级水产种质资源保护区等重要生态敏感区<sup>[3]</sup>。浮游动物是水生态系统中重要的组成部分,一方面浮游动物对水域环境变化较为敏感,可较好的反映水质状况<sup>[4-6]</sup>,另其作为鱼类的重要饵料,影响水域的渔业资源,并通过上行效应影响长江江豚的分布及种群规模<sup>[7]</sup>。目前长江安庆段浮游动物群落结构、现存量均未见报道,同时对长江江心洲水域浮游动物的分布特征等研究较少。

本研究选取长江下游安庆江段的典型沙洲—新洲作为研究点,对其附近水域浮游动物群落结构进行周年调查研究,一方面是了解长江安庆段浮游动物群落结构等,另一方面是探究新洲对浮游动物分布格局的影响,并分析影响浮游动物群落结构及分布特征的环境因子。本研究旨在帮助了解长江安庆段浮游动物的群落结构,也可为分布在该水域的重要生态敏感区提供本底资料,同时也可探究江心洲的生态影响提供一定参考资料。

## 1 材料与方法

### 1.1 调查区概况

调查区域位于  $30^{\circ}27'55'' \sim 30^{\circ}37'22''N$ ,  $116^{\circ}58'42'' \sim 117^{\circ}15'13''E$  之间,东西长约 32 km,其中在  $30^{\circ}29'34'' \sim 30^{\circ}31'51''N$ ,  $117^{\circ}9'40'' \sim 117^{\circ}13'56''E$  之间存在 2 个江心洲,分别为鹅毛洲和新洲,其中新洲较大,面积约为  $37.86 \text{ km}^2$ ,其将长江主江分为北汉和南汉,其中北汉为主江,两汉东西长分别约为 9 km 和 12 km。鹅毛洲较小,存于北汉与新洲间形成中汉(约 4 km),无居住人口。

### 1.2 样点设置和采样时间

本次调查在长江安庆皖河口至拦江矶段共设置 9 个断面,分别位于长江干流皖河口至鹅毛洲洲头

(断面 1—3)、中汉(断面 4)、北汉(断面 5)、南汉(断面 6、7)和长江干流新洲洲尾至拦江矶(断面 8、9),在每个断面的南岸、中线和北岸各设置一个采样点(图 1)。分别于冬季(2月)、春季(4月)、夏季(8月)、秋季(11月)各调查 1 次。

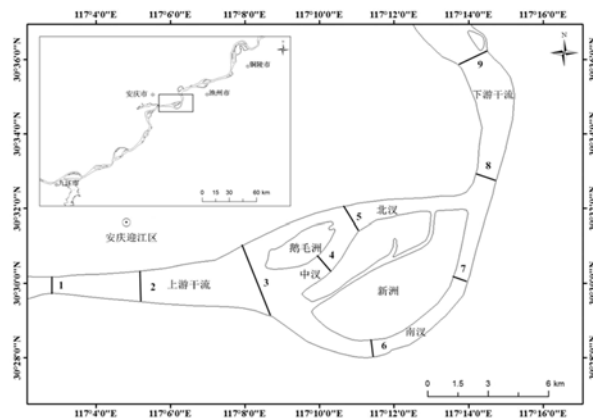


图 1 采样断面示意图

Figure 1 Sketch of sampling transects

### 1.3 样品的采集与分析

**1.3.1 浮游动物** (1) 原生动物和轮虫定量采集: 使用 5 L 有机玻璃采水器, 每个样品根据采样点的深度每隔 1 m 或 2 m 采集混合水样 1 L, 加入 1% 鲁哥试剂固定带回实验室沉淀 48 h 后浓缩并定容到 30 mL, 然后分别吸取 0.1 mL (计数原生动物) 和 1 mL (计数轮虫) 的浓缩液注入 0.1 mL 和 1 mL 的计数框中, 在  $10 \times 20$  的放大倍数下计数 2 片, 取其平均值, 然后按下式换算单位体积中原生动物或轮虫的个体数量  $N = (Vs \times n) / (V \times Va)$ , 式中,  $N$  为 1 L 水中浮游动物的个体数 ( $\text{ind} \cdot \text{L}^{-1}$ ),  $V$  为采样体积 (L);  $Vs$  为沉淀体积 (mL);  $Va$  为计算体积 (mL);  $n$  为计数所得的个体数; (2) 枝角类与桡足类定量采集: 使用 5 L 有机玻璃采水器, 每个样品根据采样点的深度每隔 1 m 或 2 m 采集混合水样 20 L, 用 25 号浮游生物网过滤浓缩, 收集的样品用 4% 的甲醛溶液固定。浓缩后样品带回实验室全部计数。

浮游动物样品采集和生物量的换算参照《水生生物学》<sup>[8]</sup>, 样品鉴定参照文献<sup>[9-13]</sup>。

**1.3.2 水体理化参数** 按水样采集的标准, 用有机玻璃采水器采集距表层 0.5 m 处水样, 采集的水样放于 2~8℃ 的保温箱中保存, 带回实验室后立即进行待测指标的分析测试。

水质监测指标共计 12 项, 其中现场测定指标 5 项: 浊度 (Tur)、酸碱度 (pH)、溶解氧 (DO)、水温 (T) 和透明度 (SD), 测定仪器分别为: HANNA HI 98703 型浊度计、HACH HQ 11D 型 pH 计和 HACH HQ 30D 型溶氧仪和萨氏盘; 实验室内测定指标 7 项: 总磷 (TP)、总氮 (TN)、高锰酸钾盐指数 (COD<sub>Mn</sub>)、叶绿素 *a* (Chl<sub>a</sub>)、磷酸盐 (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P)、氨氮 (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N) 和亚氮 (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N), 水样各指标的测定方法参考《水和废水监测分析方法》<sup>[14]</sup>。

#### 1.4 数据处理与统计分析

优势度  $Y=(N_i/N)f_i$ , 以优势度指数  $Y>0.02$  定为优势种; 利用 Shannon-Wiener 指数 ( $H'$ )<sup>[15]</sup> 和 Pielou

均匀度指数 ( $J$ )<sup>[16]</sup> 对长江安庆段新洲水域浮游动物群落多样性进行描述, 计算公式如下:  $H'=-\sum(N_i/N)\ln(N_i/N)$ ;  $J=H'/\ln S$  式中,  $S$  为物种总数,  $N$  为所有种类的总个体数,  $N_i$  为第  $i$  种的个体数。

利用 SPSS17.0 软件对各季节的水体理化指标进行单因素方差分析 (one-way ANOVA) 并取  $P<0.05$  作为差异显著性的判定标准。用 CANOCO4.5 软件分析浮游动物分布与环境因子的关系。

## 2 结果与分析

### 2.1 水体理化参数

调查水域水体理化参数季节差异显著 ( $P<0.05$ ), 其中冬季 TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 和 pH 均最高, 水质相对较差; 夏季 TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 和 TP 均最低, 但 Chl<sub>a</sub> 和 Tur 则最高。4 个季节各水体理化指标如下表 1。

表 1 新洲水域水体理化参数季节变化

Table 1 Seasonal changes of environmental parameters in Xinzhou water

参数 Parameters	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter
TN/mg·L <sup>-1</sup>	2.29±0.018 <sup>a</sup>	1.81±0.08 <sup>b</sup>	2.21±0.08 <sup>c</sup>	2.31±0.11 <sup>a</sup>
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/mg·L <sup>-1</sup>	0.13±0.06 <sup>a</sup>	0.05±0.06 <sup>b</sup>	0.10±0.04 <sup>a</sup>	0.28±0.06 <sup>c</sup>
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N/mg·L <sup>-1</sup>	0.08±0.01 <sup>a</sup>	0.01±0.00 <sup>b</sup>	0.04±0.00 <sup>c</sup>	0.02±0.00 <sup>d</sup>
TP/mg·L <sup>-1</sup>	0.12±0.01 <sup>c</sup>	0.11±0.01 <sup>b</sup>	0.11±0.01 <sup>ab</sup>	0.12±0.01 <sup>c</sup>
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P/mg·L <sup>-1</sup>	0.06±0.01 <sup>a</sup>	0.06±0.01 <sup>a</sup>	0.05±0.00 <sup>b</sup>	0.06±0.00 <sup>ab</sup>
COD <sub>Mn</sub> /mg·L <sup>-1</sup>	2.58±0.33 <sup>ab</sup>	2.48±0.13 <sup>b</sup>	2.79±0.17 <sup>c</sup>	2.77±0.31 <sup>ac</sup>
Chl. <i>a</i> /μg·L <sup>-1</sup>	4.35±1.27 <sup>a</sup>	5.00±2.56 <sup>a</sup>	2.58±0.51 <sup>b</sup>	2.54±0.39 <sup>bc</sup>
pH	8.23±0.16 <sup>a</sup>	7.98±0.04 <sup>b</sup>	7.68±0.28 <sup>c</sup>	8.43±0.07 <sup>d</sup>
DO/mg·L <sup>-1</sup>	7.73±0.11 <sup>a</sup>	7.23±0.15 <sup>b</sup>	9.61±0.15 <sup>c</sup>	11.15±0.27 <sup>d</sup>
Tur/NTU	43.34±15.25 <sup>a</sup>	66.95±8.66 <sup>b</sup>	37.44±24.94 <sup>a</sup>	32.00±5.10 <sup>a</sup>
SD/cm	31.19±5.40 <sup>ab</sup>	28.30±6.35 <sup>a</sup>	32.52±4.36 <sup>b</sup>	38.43±0.07 <sup>ab</sup>
WT/℃	18.86±0.45 <sup>a</sup>	26.39±0.33 <sup>b</sup>	11.66±0.66 <sup>c</sup>	7.29±0.48 <sup>d</sup>

注: 表中不同的上标字母表示有显著差异。Note: The different superscripts in the table indicate significant differences.

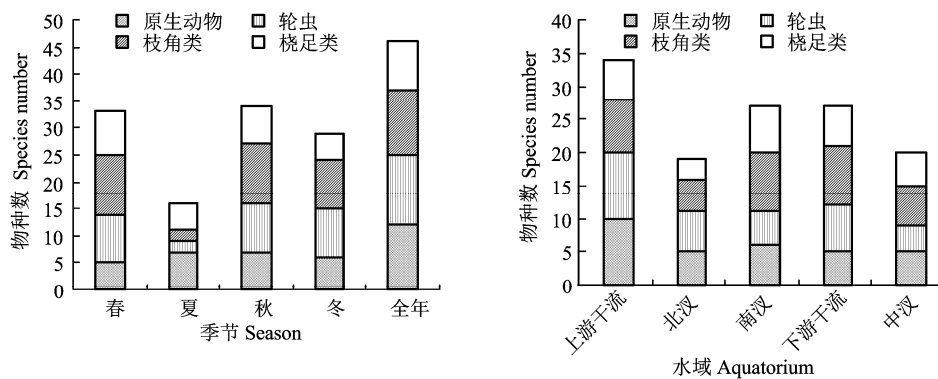


图 2 浮游动物物种组成的时空特征

Figure 2 Temporal-spatial variations of the species composition of zooplankton

### 2.2 群落组成

调查期间共采集浮游动物 32 属 46 种, 其中原生动物 9 属 12 种, 占物种总数的 26.09%; 轮虫 9

属 13 种, 占物种总数的 28.26%; 枝角类 9 属 12 种, 占物种总数的 26.09%; 桡足类 5 属 9 种, 占物种总数的 19.57%。浮游动物物种组成季节差异分析显示,

秋季物种数最多为 34 种, 其次为春季, 有 33 种, 夏季最少, 为 16 种, 各门类物种数则表现为, 原生动物和桡足类季节差异较小, 轮虫和枝角类差异明显; 空间上, 上游干流物种数最多为 34 种, 南汊和下游干流其次, 均为 27 种, 北汊最少为 19 种(图 2)。

### 2.3 群落优势种

以优势度指数  $Y>0.02$  定为优势种, 调查水域浮游动物优势种共计 11 种, 其中原生动物 4 种, 轮虫 3 种, 枝角类 2 种, 桡足类 2 种。长额象鼻溞(*Bosmina longirostris*) 在 4 个季节均作为优势种出现, 王氏似铃壳虫 (*Tintinnopsis wangi*)、螺形龟甲轮虫 (*Keratella cochlearis*)、梳状疣毛轮虫 (*Synchaeta pectindta*) 和汤匙华哲水蚤 (*Sinocalanus dorrii*) 作为春季、秋季和冬季的优势种出现。4 个季节浮游动物优势种组成存在差异, 其中秋季优势物种最多

共 8 种, 夏季最少为 3 种, 且淡水麻铃虫 (*Leprotintinnus fluviatile*) 和球状许水蚤 (*Schmackeria forbest*) 仅在夏季作为优势种出现 (表 2)。

### 2.4 密度和生物量

调查水域浮游动物密度变幅为  $0.1 \sim 701.35 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$ , 均值为  $192.53 \pm 153.77 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$ , 生物量变幅为  $0.00 \sim 0.85 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (生物量最小值小于  $0.005$ ), 均值为  $0.15 \pm 0.18 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在浮游动物密度组成中, 原生动物占比为 42.32%, 轮虫占比为 57.23%, 二者为新洲水域浮游动物密度的主体, 枝角类和桡足类密度占比较低分别为 0.20%和 0.25%; 在浮游动物生物量组成中, 轮虫占比为 88.97%, 为新洲水域浮游动物生物量主体, 原生动物、枝角类和桡足类占比较低, 分别为 3.74%、5.40%和 1.89% (表 3)。

表 2 浮游动物优势种及其优势度的季节变化

Table 2 Seasonal variations of the dominant species of zooplankton

物种 Species	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter
原生动物 Protozoa				
纤毛虫 <i>Ciliate</i>	0.03	-	0.07	-
淡水麻铃虫 <i>Leprotintinnus fluviatile</i>	-	0.36	-	-
管形似铃壳虫 <i>Tintinnopsis tutuformis</i>	0.023	-	-	-
王氏似铃壳虫 <i>Tintinnopsis wangi</i>	0.08	-	0.03	0.08
轮虫 Rotifer				
前节晶囊轮虫 <i>Asplachna priodonta</i>	-	-	0.02	-
螺形龟甲轮虫 <i>Keratella cochlearis</i>	0.08	-	0.03	0.08
梳状疣毛轮虫 <i>Synchaeta pectindta</i>	0.11	-	0.13	0.14
枝角类 Cladocera				
长额象鼻溞 <i>Bosmina longirostris</i>	0.89	0.99	0.78	0.91
小栉溞 <i>Daphnia cristata</i>	-	-	0.03	-
桡足类 Copepods				
球状许水蚤 <i>Schmackeria forbest</i>	-	0.03	-	-
汤匙华哲水蚤 <i>Sinocalanus dorrii</i>	0.1	-	0.06	0.1

表 3 各门类浮游动物密度及生物量

Table 3 Abundance and biomass of zooplankton and its taxas

群落 Community	密度/ $\text{ind}\cdot\text{L}^{-1}$ Density	密度百分比/% Density percentage	生物量/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Biomass	生物量百分比/% Biomass percentage
原生动物 Protozoa	81.48	42.32	0.01	3.74
轮虫 Rotifer	110.19	57.23	0.13	88.97
枝角类 Cladocera	0.39	0.20	0.01	5.40
桡足类 Copepods	0.47	0.25	0.003	1.89

**2.4.1 季节特征** 单因素方差分析显示, 新洲水域浮游动物密度 ( $F=3.72, P<0.05$ ) 和生物量 ( $F=7.44, P<0.05$ ) 季节差异显著。二者季节变化特征一致, 最大值均出现于秋季, 分别为  $249.43 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $0.21$

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 最小值均出现于夏季, 分别为  $118.78 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $0.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 夏季浮游动物密度显著低于春季和秋季, 生物量则均显著低于其余三个季节。统计各门类现存量季节变化特征, 结果显示: 作为密度主

体, 原生动物表现为先升高后降低, 最大值出现在夏季, 为  $111.11 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$ , 轮虫则在夏季下降显著, 较春季下降 95.13%; 作为生物量主体, 轮虫在夏季

出现显著下降, 较春季轮虫生物量下降了 95.06%。总体上, 轮虫现存量的季节变化趋势决定了浮游生物现存量的变化趋势(图 3)。

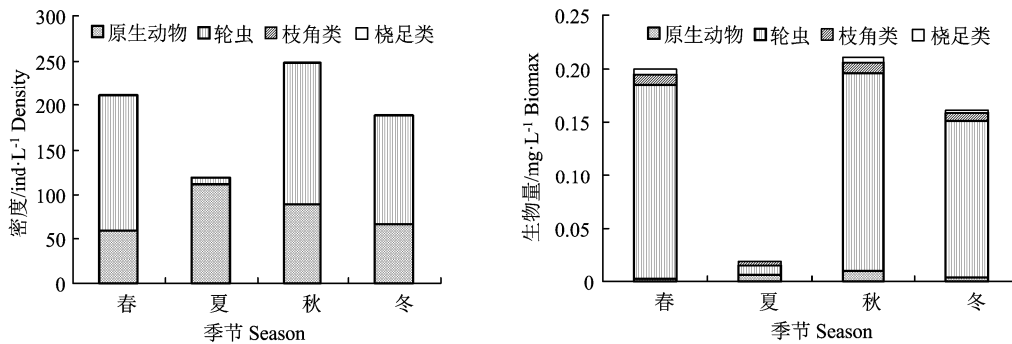


图 3 新洲水域浮游动物密度和生物量季节差异

Figure 3 Temporal variations of the density and biomass of zooplankton in Xinzhou waters

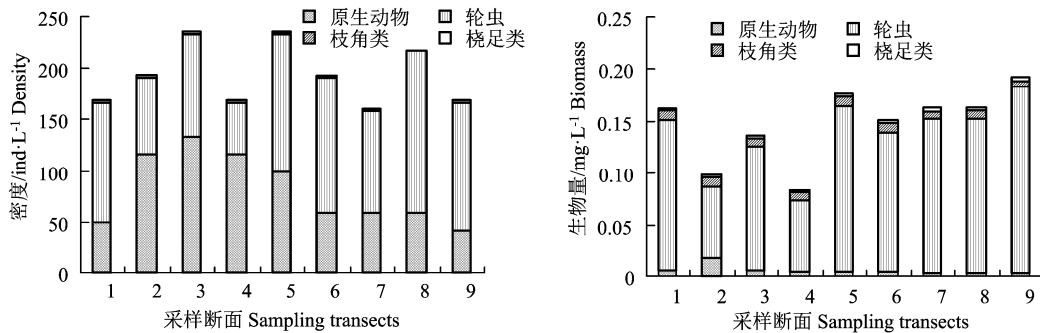


图 4 浮游动物密度和生物量的空间特征

Figure 4 Spatial variations of the density and biomass of zooplankton

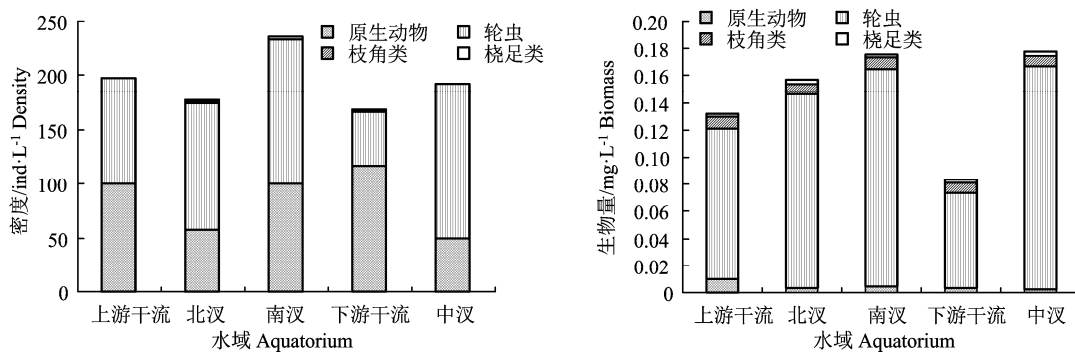


图 5 浮游动物密度和生物量空间特征

Figure 5 Spatial variations of the diversity index of zooplankton

**2.4.2 空间特征** (1) 不同采样断面浮游动物现存量: 结果显示, 浮游动物密度最大值出现在断面 5, 为  $234.25 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$ , 最小值出现在断面 7, 为  $159.21 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$ 。作为密度主体的原生动物和轮虫, 二者密度最大值分别出现在断面 3 ( $133.33 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 和断面 8 ( $158.33 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 最小值分别出现在断面 9 ( $41.67 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 和断面 4 ( $50.00 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$ )。浮游动物生物量与密度的空间特征有一定差异, 其最大值出现在断面 9, 为  $0.019 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 最小值出现在断面

4, 为  $0.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 轮虫作为浮游动物生物量的最大贡献门类, 其空间分布特征与浮游动物整体生物量的空间分布特征一致(图 4)。

(2) 不同采样水域浮游动物现存量: 浮游动物密度北汉最高, 为  $234.25 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$ , 上、下游干流次之, 分别为  $198.03 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $192.59 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$ , 中汉最低, 为  $167.37 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$ ; 浮游动物生物量北汉和下游干流最高, 均为  $0.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 南汉次之, 为  $0.16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 中汉最低, 为  $0.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  (图 5)。

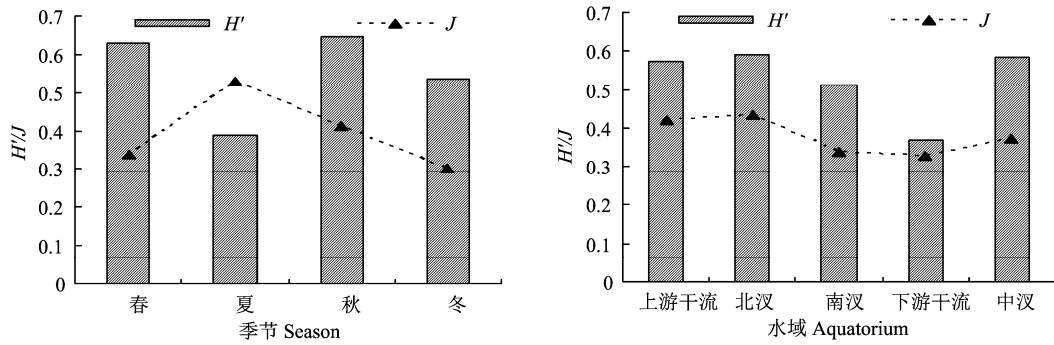


图 6 新洲水域浮游动物群落多样性的时空差异  
Figure 6 Spatial variations of the density and biomass of zooplankton

表 4 典型对应分析 (CCA) 结果

Table 4 Summary results of the canonical correspondence analysis (CCA)

轴 axes	轴 1	轴 2
TN	-0.81	0.12
TP	-0.31	0.25
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	-0.43	0.10
Chl <i>a</i>	0.33	0.16
COD <sub>Mn</sub>	-0.26	0.47
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	-0.52	0.16
pH	-0.24	0.18
T	0.63	0.03
DO	-0.43	-0.05
Tur	0.66	0.07
SD	-0.34	-0.24
特征值 Eigenvalues	0.472	0.103
属种-环境相关性累计方差百分比 Species-environment correlations	0.936	0.827
属种数据 Cumulative percentage variance of species data	47.20%	57.20%
属种环境关系 Cumulative percentage variance of species-environment relation	72.72%	88.60%
所有典范特征值之和 Sum of all canonical eigenvalues	0.649	

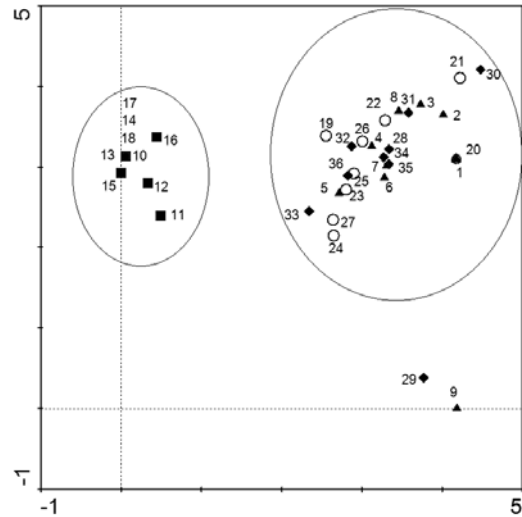
2.5 多样性特征值

调查水域浮游动物 Shannon-Weiner 指数(*H'*)和 Pielou 均匀度指数 (*J*) 年均值分别为 0.55 和 0.38, 其中季节特征表现为: *H'* 秋季最高, 为 0.65, 夏季最低, 为 0.40, 夏季 *H'* 显著低于春季和秋季' ( $P < 0.05$ ); 4 个季节 *J* 存在显著差异 ( $F = 6.232$ ,  $P = 0.001$ ), 夏季 *J* 最高, 为 0.53, 显著高于其他 3 个季节; 空间上, 各水域间 *H'* 和 *J* 不存在显著差异, 其中 *H'* 和 *J* 最小值均出现在中汉水域, 分别为 0.37 和 0.33, 最大值均出现在南汉, 分别为 0.59 和 0.43, 其余水域相差较小 (图 6)。

2.6 主要环境影响因子分析

按照相对密度 > 1% 或出现频率 > 25% 标准对新

洲水域浮游动物物种进行筛选<sup>[17]</sup>, 最终选出 22 种并对其进行 DCA 分析, 结果显示, 排序轴梯度长度 (LGA) 最大值为 4.479, 故选择 CCA 进行典型对应分析。



▲ 表春季样品, ■ 代表夏季样品, ○ 代表秋季样品, ◆ 代表冬季样品; 1-9 春季 9 个断面样品, 10-18 夏季 9 个断面样品, 19-27 秋季 9 个断面样品, 28-36 冬季 9 个断面样品。下同

▲ spring samples, ■ summer samples, ○ autumn samples, ◆ winter samples; 1-9 spring samples, 10-18 summer samples, 19-27 autumn samples, 28-36 winter samples. The same below

图 7 基于物种密度的 DCA 排序图

Figure 7 DCA ordination of the species abundance

CCA 分析结果显示, 前两轴特征值分别为 0.472 和 0.103, 且这两轴累计值占特征值总和的 88.60%, 表明这两轴集中了绝大部分环境因子对浮游动物分布格局的影响信息。在 12 个环境因子中, TN、T、COD<sub>Mn</sub> 和 Tur 是与调查水域浮游动物群落结构相关性较强的环境因子 ( $P < 0.05$ ), 其中相关性最强的环境因子为 TN ( $P = 0.002$ )。本研究中 DCA 和 CCA 排序图显示, 新洲水域 4 个季节 9 个调查

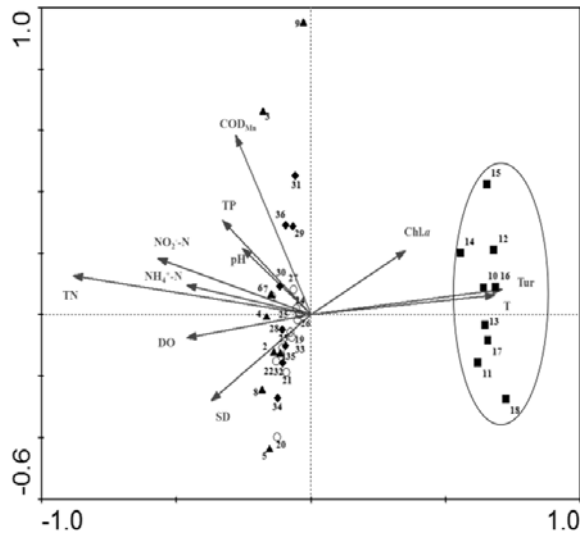
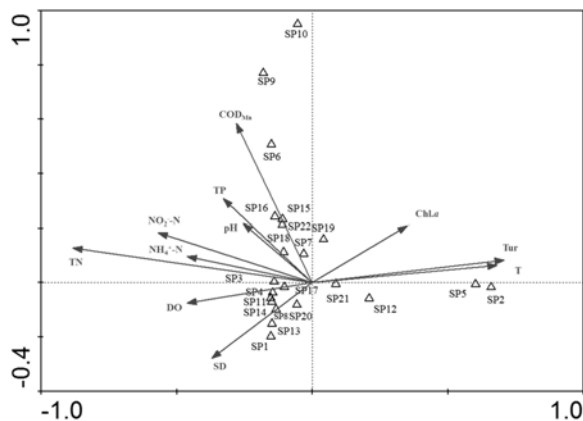


图 8 样方-环境相关关系的 CCA 排序图

Figure 8 CCA of the species-environment relationships



SP1.纤毛虫 SP2:淡水麻铃虫; SP3.侠盗虫; SP4.梨形四膜虫; SP5.江苏似铃壳虫; SP6.管形似铃壳虫; SP7.王氏似铃壳虫; SP8.前节晶囊轮虫; SP9.萼花臂尾轮虫; SP10.臂尾轮虫; SP11.螺形龟甲轮虫; SP12.曲腿龟甲轮虫; SP13.针簇多肢轮虫; SP14.梳状疣毛轮虫; SP15.圆筒异尾轮虫; SP16.透明溞; SP17.桡足幼体; SP18.无节幼体; SP19.如愿真剑水蚤; SP20.跨立小剑水蚤; SP21.球状许水蚤; SP22.汤匙华哲水蚤

SP1. *Ciliate sp.*; SP2. *Leprotintinnus fluviatile*; SP3. *Strobilidium sp.*; SP4. *Tetrahymena pyriformis*; SP5. *Tintinnopsis kiangsuisensis*; SP6. *Tintinnopsis tutuformis*; SP7. *Tintinnopsis wangi*; SP8. *Asplachna priodonta*; SP9. *Brachionus calyciflorus*; SP10. *Brachionus sp.*; SP11. *Keratella cochlearis*; SP12. *Keratella valaa*; SP13. *Polyarthra trigla*; SP14. *Synchaeta ectindta*; SP15. *richocerca cylindrical*; SP16. *Daphnia hyalina*; SP17. *Copepodid*; SP18. *Copepod nauplii*; SP19. *Eucyclops speratus*; SP20. *Microcyclops varicans*; SP21. *Schmackeria forbest*; SP22. *Sinocalanus dorrii*

图 9 物种与环境相互关系的 CCA 排序图

Figure 9 CCA of the species-environment relationships

断面的 36 个样方被分为 2 组, 其中夏季的 9 个样方被分为一组, 春季、秋季和冬季被分为另一组。其中夏季浮游动物分布于第一和第四象限, 主要受 T

和 Tur 的影响, 且与二者呈正相关, 与 TN、TP、COD<sub>Mn</sub> 和 SD 等呈负相关 (图 7 和图 8)。

物种与环境因子的 CCA 排序图显示, 淡水麻铃虫 (*Leprotintinnus fluviatile*)、江苏似铃壳虫 (*Tintinnopsis kiangsuisensis*)、曲腿龟甲轮虫 (*Keratella valaa*) 和球状许水蚤 (*Schmackeria forbest*) 在夏季密度和出现频率较高, 主要受 T 和 Tur 的影响, 呈正相关。管形似铃壳虫 (*Tintinnopsis tutuformis*)、前节晶囊轮虫 (*Asplachna priodonta*) 和萼花臂尾轮虫 (*Brachionus calyciflorus*) 主要受 COD<sub>Mn</sub>、Chl a 和 SD 影响, 与 COD<sub>Mn</sub> 和 Chl a 浓度呈正相关, 与 SD 呈负相关; 其余物种分布在原点附近, 与各个环境因子的相关性类似 (图 9)。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 调查水域浮游动物群落结构特征

河流与湖泊等水环境不同, 河流为具有单一流向的线型生境, 其水体流速、泥沙含量、岸线类型等均影响水体浮游动物的生存。研究认为, 水的流速和浮游动物的数量呈反比, 且泥沙含量的增加也会导致浮游动物数量减少<sup>[18-20]</sup>。新洲位于长江安庆段, 将长江主江分为南北两汉, 为长江典型的江心洲, 主江分汊后江面变窄、自然泥沙岸线增多, 水文状况发生改变等, 这些都可能会使得该水域分布的浮游动物具有独特的群落结构。本研究结果表明, 新洲水域共采集浮游动物 46 种, 年均密度为 192.53 ind·L<sup>-1</sup>, 年均生物量为 0.15 mg·L<sup>-1</sup>, 调查水域浮游动物物种数和现存量均低于分布在其附近的菜子湖 (88 种)、嬉子湖 (64 种) 和升金湖 (88 种)<sup>[21-23]</sup> 等湖泊, 这可能是由二者水文条件及水体营养状况的差异造成<sup>[24]</sup>, 特别是浮游动物现存量, 附近及长江中下游湖泊均远远高于研究水域<sup>[25-26]</sup>, 长江水体流速较大, 许多浮游动物均无法生存, 受水流的影响, 作为浮游动物饵料生物的浮游植物也会因此难以生存而减少<sup>[3]</sup>, 进而影响浮游动物的数量, 另外研究水域泥沙含量较高, 一方面易堵塞滤食性器官, 直接影响滤食性大型浮游动物<sup>[27]</sup>, 另一方面泥沙在水流作用下的碰撞摩擦也可能导致浮游动物数量减少。同长江下游干流的江苏段及镇江段相比<sup>[20,28]</sup>, 研究水域物种数低于二者, 现存量则略高, 这可能与江心洲有关, 江心洲洲头水域, 江面宽阔, 水流较缓, 且其南岸分布了大面积的水生植被, 洲尾有江心洲的庇护, 也存在有水生植物覆盖的水流较缓的水域, 这些水域均可为部分浮游动物物种的生长及繁殖提供庇护场所。在浮游动物现存量中, 浮游

动物总密度主要由轮虫和原生动物密度决定,且轮虫为浮游动物生物量主体,这与国内河流浮游动物的研究结果类似,小型浮游动物繁殖速度快,且具有更强的适应能力,甲壳类数量一般较少<sup>[29-31]</sup>。

### 3.2 调查水域浮游动物群落结构时空特征

本研究中,不同季节研究水域浮游动物的物种数、现存量及多样性指数存在差异,其中夏季显著低于春季、秋季和冬季,这一结果同位于安庆的长江故道西江浮游动物的研究结果相反,西江浮游动物物种数、现存量均在夏季最高<sup>[7]</sup>,一般认为夏季水体营养更丰富,且水温升高更有利于浮游动物的生长与繁殖<sup>[32]</sup>,但长江干流同相对封闭的水体不同,其水体不断更新,水文状况及水体营养状态均受上游来水及本江段区域降雨影响,本研究夏季浮游动物的采集时间为2017年8月,为2017年“长江第1号洪水”之后,受上游降雨及三峡放水影响,研究水域水体流速增加,沙洲沿岸土坡受水流的冲击增大,进入长江的泥沙增加,水体浊度上升(较春季上升54.48%),这些均会严重影响浮游动物的生存,进而造成浮游动物迅速减少。空间上,浮游动物物种数上游干流最高,南汊和下游干流其次,北汊最低。河流中浮游动物一般来源于与河流相通的湖泊、河流中的回水区、缓水区及河岸有水草覆盖的水域<sup>[33]</sup>,上游干流的断面1位于皖河口下游,断面3位于南北汊及中汊的分叉口,水面宽阔,水流较缓,且其南岸有较大面积的水草覆盖区,这些均可能是上游干流浮游动物物种较丰富的原因。各水域浮游动物现存量上则表现为北汊最高,上、下游干流次之,南汊和中汊较低,北汊为主航道,水流量远高于南汊和中汊,此外北汊的断面5位于鹅毛洲的洲尾,该区域有水流较缓的浅滩,对部分浮游动物的生长繁殖有利,研究结果发现梳状疣毛轮虫在该水域密度较高为75.23个·L<sup>-1</sup>,占断面4浮游动物总密度的32.12%,且为春季、秋季和冬季的优势物种。

### 3.3 调查水域浮游动物群落结构的环境影响因子

在相对封闭的水体中,其浮游动物群落结构季节变化与水温和水体营养状态密切相关<sup>[6, 34]</sup>。本研究中,DCA和CCA分析结果表明,夏季与春季、秋季和冬季浮游动物群落结构存在显著差异,此外分析结果显示,对浮游动物群落影响较大的环境因子有TN、COD<sub>Mn</sub>、T和Tur,其中夏季浮游动物与T和Tur呈正相关,与TN和COD<sub>Mn</sub>等呈负相关,此外环境因子间相关关系表现为,水体营养盐、COD<sub>Mn</sub>、DO、pH和SD等均与Tur和T呈反比。

夏季研究水域受上游来水和本地降雨的影响水位上升,水体流速增加,泥沙含量增加,Tur上升,SD下降,其他指标浓度在一定程度上被稀释,长江水体中浮游动物生活方式为随波逐流,水体流速和浊度的上升不利于其生存与繁殖<sup>[31, 35]</sup>,适应性差的物种被淘汰,本研究中夏季浮游动物93.54%由原生动物组成,轮虫和甲壳类数量下降显著,特别是轮虫,但在春季、秋季和冬季轮虫密度占比变幅为63.85-64.46%,其对浮游动物密度的贡献均高于原生动物,本研究推测,原生动物对于水流大、泥沙含量高的水体环境较其他三个门类有更强的适应性。数量占比较高的物种中,淡水麻铃虫、江苏似铃壳虫在夏季密度和出现频率较高,与浊度和水温呈正相关,其余绝大部分均与水体浊度呈负相关,萼花臂尾轮虫(*Brachionus calyciflorus*)和臂尾轮虫(*Brachionus sp.*)表现出与透明度和溶氧呈负相关。

综上所述,长江安庆新洲水域为河流生境,其浮游动物物种数和现存量均较低,且现存量主要由小型浮游动物决定。时间上,研究水域夏季与春季、秋季和冬季浮游动物群落结构存在显著差异,受上游来水和本区域本江段区域降雨影响,夏季浮游动物现存量显著低于其余3个季节。空间上,浮游动物现存量表现为北汊最高,上、下游干流次之,南汊和中汊较低。CCA分析表明,总氮、高锰酸钾盐指数、温度和浊度是影响浮游动物群落结构的关键环境因子( $P<0.05$ )。

### 参考文献:

- [1] 张敏莹,徐东坡,刘凯,等. 长江安庆江段鱼类调查及物种多样性初步研究[J]. 湖泊科学, 2006, 18(6): 670-676.
- [2] 张晓可,于道平,王慧丽,等. 长江安庆段江豚主要栖息地鱼类群落结构[J]. 生态学报, 2016, 36(7): 1832-1839.
- [3] 刘明典,李鹏飞,曾泽国,等. 长江干流安庆段浮游植物群落结构特征[J]. 淡水渔业, 2017, 47(4): 29-36.
- [4] 冯世敏,吴明珠,熊莲,等. 太平湖浮游动物动态演替与环境因子的相关性研究[J]. 水生生物学报, 2017, 41(3): 700-711.
- [5] ECHANIZ S A, VIGNATTI A M, DE PAGGI S J, et al. Zooplankton seasonal abundance of South American saline shallow lakes[J]. Int Rev Hydrobiol. 2006, 91(1): 86-100.
- [6] 吴利,冯伟松,张堂林,等. 湖北省西凉湖浮游动物群落周年动态变化及其与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2011, 23(4): 619-625.
- [7] 张晓可,刘凯,万安,等. 安庆西江浮游动物群落结构及江豚生存状况评估[J]. 水生生物学报, 2018, 42(2): 392-399.
- [8] 赵文. 水生生物学[M]. 2版. 北京: 中国农业出版社,



- 2016.
- [9] PATTERSON D J. Free-living freshwater protozoa: a colour guide[M]. New York: American Society of Microbiology, 2003.
- [10] 蒋燮治, 堵南山. 中国动物志·节肢动物门·甲壳纲·淡水枝角类[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [11] 沈韞芬, 顾曼如, 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.
- [12] 王家楫. 中国淡水轮虫志[M]. 北京: 科学出版社, 1961.
- [13] 中国科学院中国动物志委员会. 中国动物志·节肢动物门·甲壳纲·淡水桡足类[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [14] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- [15] SHANNON C E. A mathematical theory of communication[J]. Bell Labs Tech J, 1948, 27(3): 379-423.
- [16] PIELOU E C. The measurement of diversity in different types of biological collections[J]. J Theor Biol, 1966, 13(1): 131-144.
- [17] 林志, 万阳, 徐梅, 等. 淮南迪沟采煤沉陷区湖泊后生浮游动物群落结构及其影响因子[J]. 湖泊科学, 2018, 30(1): 171-182.
- [18] 林锡芝, 胡美琴. 葛洲坝截流前长江干流的浮游动物[J]. 淡水渔业, 1985(1): 22.
- [19] 沈嘉瑞, 陈瑗, 宋大祥. 青海省的桡足类[J]. 动物学报, 1963, 9(2): 263-272.
- [20] 彭刚, 边文冀, 陈校辉. 长江江苏段浮游动物群落结构调查报告[J]. 水生态学杂志, 2008, 28(4): 109-111.
- [21] 宗梅. 安徽菜子湖浮游动物群落结构研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2009.
- [22] 刘凯, 蒋书伦, 周彦锋, 等. 嬉子湖国家级水产种质资源保护区冬季浮游动物群落特征及影响因子[J]. 上海海洋大学学报, 2015, 24(5): 694-701.
- [23] 徐敏. 安徽升金湖浮游动物群落结构研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2011.
- [24] 陶敏, 王永明, 谢碧文, 等. 沱江浮游生物群落时空分布及相关环境因子分析[J]. 水生生物学报, 2016, 40(2): 301-312.
- [25] 李共国, 虞左明. 千岛湖浮游动物的群落结构[J]. 生态学报, 2002, 22(2): 156-162.
- [26] 郑小燕, 王丽卿, 盖建军, 等. 淀山湖浮游动物的群落结构及动态[J]. 动物学杂志, 2009, 44(5): 78-85.
- [27] MCCABE G D, O'BRIEN W J. The effects of suspended silt on feeding and reproduction of *Daphnia pulex*[J]. Am Midl Nat. 1983, 110(2): 324-337.
- [28] 代梨梨, 龚迎春, 冯伟松, 等. 江苏镇江长江豚类保护区浮游动物群落结构特征及江豚生存状况评估[J]. 水生态学杂志, 2011, 32(5): 30-36.
- [29] 吴利, 冯伟松, 陈小娟, 等. 新疆伊犁地区夏季浮游动物群落结构特征[J]. 应用生态学报, 2008, 19(1): 163-172.
- [30] 吴利, 李源玲, 陈延松. 淮河干流浮游动物群落结构特征[J]. 湖泊科学, 2015, 27(5): 932-940.
- [31] 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, 26(3): 295-305.
- [32] BENIDER A, TIFNOUTI A, POURRIOT R. Growth of *Moina macrocopa* (Straus 1820) (Crustacea, Cladocera): influence of trophic conditions, population density and temperature[J]. Hydrobiologia, 2002, 468(1/2/3): 1-11.
- [33] RZÓSKA J. LIV. Notes on some cladocera from the Upper White Nile[J]. Annals & Magazine of Natural History, 1952, 5(53): 466-474.
- [34] KAGALOU I I, KOSIORI A, LEONARDOS I D. Assessing the zooplankton community and environmental factors in a Mediterranean wetland[J]. Environ Monit Assess. 2010, 170(1/2/3/4): 445.
- [35] 董哲仁. 河流形态多样性与生物群落多样性[J]. 水利学报, 2003, 34(11): 1-6.