

武汉东湖夏冬两季浮游动物物种多样性及群落结构研究

王雨路 袁丹妮 袁国庆 冯伟松 龚迎春

SPECIES DIVERSITY AND COMMUNITY STRUCTURE OF ZOOPLANKTON IN SUMMER AND WINTER IN THE EAST LAKE, WUHAN

WANG Yu-Lu, YUAN Dan-Ni, YUAN Guo-Qing, FENG Wei-Song, GONG Ying-Chun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7541/2020.105>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

安庆西江浮游动物群落结构及江豚生存状况评估

COMMUNITY STRUCTURE OF ZOOPLANKTON AND ITS RELATIONSHIP WITH SURVIVABILITY OF THE YANGTZE FINLESS PORPOISE IN XIJIANG OXBOW, ANQING CITY

水生生物学报. 2018, 42(2): 392–399 <https://doi.org/10.7541/2018.050>

渭河流域浮游动物群落结构及其水质评价

ZOOPLANKTON COMMUNITY STRUCTURE AND THE WATER QUALITY IN THE WEI RIVER BASIN

水生生物学报. 2019, 43(6): 1333–1345 <https://doi.org/10.7541/2019.157>

沙颍河流域浮游动物群落结构空间变化特征与水质评价

THE CHARACTERISTICS OF ZOOPLANKTON COMMUNITY AND WATER QUALITY IN THE SHAYING RIVER BASIN

水生生物学报. 2018, 42(2): 373–381 <https://doi.org/10.7541/2018.048>

珠三角高产养殖池塘浮游动物群落结构及水质评价

COMMUNITY CHARACTERISTICS OF ZOOPLANKTON AND ASSESSMENT OF WATER QUALITY IN AQUACULTURE PONDS OF THE PEARL RIVER DELTA

水生生物学报. 2017, 41(5): 1071–1079 <https://doi.org/10.7541/2017.134>

长江中游干流浮游动物空间分布

SPATIAL DISTRIBUTION OF ZOOPLANKTON IN THE MAIN STEM OF THE MIDDLE YANGTZE RIVER

水生生物学报. 2019, 43(S1): 3–8 <https://doi.org/10.7541/2019.161>

浙江饮用水源地浮游动物体积多样性及水质响应

A PRELIMINARY STUDY ON SIZE DIVERSITY OF ZOOPLANKTON AND THEIR ASSOCIATION WITH TROPHIC LEVEL IN THE DRINKING WATER SOURCES, ZHEJIANG PROVINCE

水生生物学报. 2017, 41(2): 407–413 <https://doi.org/10.7541/2017.50>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

doi: 10.7541/2020.105

## 武汉东湖夏冬两季浮游动物物种多样性及群落结构研究

王雨路<sup>1</sup> 袁丹妮<sup>2</sup> 袁国庆<sup>3</sup> 冯伟松<sup>2</sup> 龚迎春<sup>2</sup>

(1. 武汉大学生命科学学院, 武汉 430072; 2. 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072;  
3. 武汉生物工程学院, 武汉 430415)

**摘要:** 2018年7月、8月、12月及2019年1月,对武汉东湖沿岸带的浮游动物群落分夏冬两季进行了调查研究。共鉴定出浮游动物35属50种,其中轮虫22属37种、枝角类10属10种、桡足类3属3种。夏季优势物种为跨立小剑水蚤(*Microcyclops varicans*)、裂足臂尾轮虫(*Brachionus diversicornis*)和微型裸腹溞(*Moina micrura*);冬季优势物种为长肢多肢轮虫(*Polyarthra dolichoptera*)、疣毛轮虫(*Synchaeta* spp.)、角突臂尾轮虫(*Brachionus angularis*)和犀轮虫(*Rhinoglena* sp.)。将观察到的浮游动物进行了图像信息采集,并确定了部分物种SSU rRNA序列,为淡水浮游动物的研究提供了参考资料。参考武汉东湖浮游动物研究的历史文献数据,东湖数十年来浮游动物物种数逐渐下降,轮虫优势物种由寡污型转为 $\beta$ -中污型甚至 $\alpha$ -中污型。夏冬两季东湖浮游动物群落结构具有明显差异,夏季轮虫平均密度(56.2 ind./L)和生物量(0.22 mg/L)低于冬季(476.3 ind./L、0.44 mg/L),而甲壳类密度(137.8 ind./L)和生物量(2.88 mg/L)高于冬季(53.1 ind./L、1.12 mg/L)。夏季浮游动物群落Margalef丰富度指数、Shannon-Wiener多样性指数和Simpson多样性指数均高于冬季,夏冬两季Pielou均匀度指数差异不大,水质评价表明东湖夏季(中污染)优于冬季(重污染)。夏冬两季温度、溶解氧、pH、盐度和ORP五种环境因子均存在极显著差异,RDA分析表明,其中温度对浮游动物群落结构的影响最大。

**关键词:** 东湖; 浮游动物; 物种多样性; 群落结构

**中图分类号:** Q145      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-3207(2020)04-0877-18

浮游动物在自然水体中具有极为重要的生态功能。作为初级消费者,浮游动物以浮游植物、细菌及残渣碎屑为能量来源,自身可被滤食性鱼类和虾蟹摄食,在能量流动和物质循环的生态过程中具有承上启下的作用<sup>[1]</sup>。浮游动物个体小、寿命短、对环境变化敏感、抗逆性相对较差,所以种群数量和群落结构往往随环境变动发生较大变化<sup>[2]</sup>。因此,根据浮游动物群落结构反映当前水体环境状况,成为水质检测的重要手段<sup>[1]</sup>。

武汉东湖(30°33'N, 114°23'E)是一个位于长江中下游的中型浅水湖泊,总面积约为32 km<sup>2</sup>,全湖平均深度约为2.5 m,年均水温18.6°C<sup>[3]</sup>。东湖为我国第二大城中湖,在观光、养殖、农灌以及调节净化生态环境等方面发挥重要作用<sup>[4]</sup>。20世纪以来,由于经济的快速发展以及人类高强度的生产生活

等使东湖水体受到严重污染,水体环境遭到极大程度的破坏,成为富营养型湖泊<sup>[5,6]</sup>。近年来,在湖北省政府的高度重视下,东湖水质污染情况已有所改善<sup>[7]</sup>。虽然东湖水质已由劣V类转为IV类,但是仍为富营养型湖泊。因此,关注东湖水体及浮游生物组成特征依然至关重要。

由于武汉东湖所处位置的重要性及特殊性,从20世纪50年代开始,人们着手研究东湖水生生物生境状况,积累了许多有价值的资料<sup>[5]</sup>。之前的研究报道多关注于东湖渔业资源或水质变化与浮游动物群落结构之间的相关性<sup>[6,8-12]</sup>,根据一些经典的著作进行物种鉴定进而阐述浮游动物丰度与生物量的变化情况<sup>[13-16]</sup>,而缺乏对浮游动物重要特征的图像记录以及物种分子序列信息的确定,降低了物种鉴定信息的可参考性,增加了不同水体间各浮游

**收稿日期:** 2019-05-24; **修订日期:** 2020-01-10

**基金项目:** 中国科学院大学生创新实践训练计划资助 [Supported by the Innovation Practice Training Program for College Students of Chinese Academy of Sciences]

**作者简介:** 王雨路(1998—),男,本科生; E-mail: yuluwang@whu.edu.cn

**通信作者:** 龚迎春,女,副研究员;主要从事浮游动物分类与生态学研究。E-mail: springgong@ihb.ac.cn

动物物种信息交流的阻碍强度,也增大了对浮游动物生态学鉴定的难度。

本论文将以东湖主湖郭郑湖及水果湖的沿岸带为研究主体,通过对夏冬两季(7月、8月、12月、1月)水体中浮游动物组成与群落结构特征的分析与研究,结合环境因子调查,总结东湖在夏冬两季浮游动物群落结构的变化规律及群落结构对环境因子变化的响应,提供东湖水体中的浮游动物图像信息和分子序列信息(18S rRNA)。望以此为东湖水体环境监测与水质保护提供科学依据,并为自然水体中浮游动物的鉴定与研究提供具体、形象的参考资料。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样点设置及环境因子测定

于2018年7月、8月、12月和2019年1月对东湖浮游动物物种组成及群落结构特征进行调查,采样点设置在东湖主湖郭郑湖及水果湖湾沿岸带,共设置4个采样点: S1(30°32'13"N, 114°22'20"E)、S2(30°32'52"N, 114°23'55"E)、S3(30°34'17"N, 114°23'10"E)、S4(30°32'54"N, 114°21'4"E),采样点具体信息如图1。每次采样时间在上午8:00—12:00,每周进行一次生物样品采集。用水质分析仪(YSI Professional Plus, 美国)现场测定水温、pH、盐度、溶解氧和ORP(氧化还原电位)。

### 1.2 浮游动物样品采集与处理

浮游动物定性样品以25号浮游生物网(孔径64 μm)在表层水面下抛网收集,“Z”字形拖拽,将滤取的样品收集至50 mL采样瓶中,4 °C保存。同时采集采样点周围岩石上的附着物,并添加一定量原位水保存,以作为浮游动物物种定性分析的补充。浮游动物定量样品的采集方法因生物个体大小的不同而有所差异。其中,轮虫定量样品以25号浮

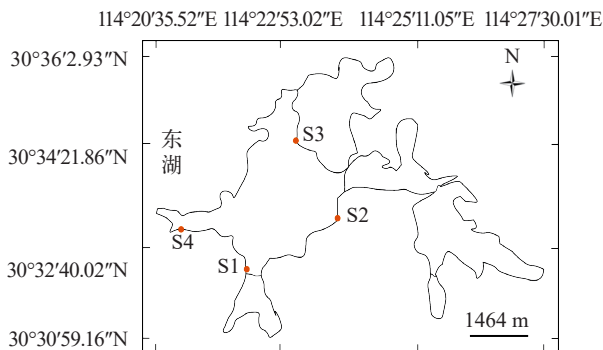


图1 武汉东湖浮游动物采样点分布示意图

Fig. 1 The diagram of zooplankton sampling stations in the East Lake in Wuhan

游生物网过滤2 L水样,浓缩至50 mL采样瓶中,现场用甲醛溶液固定保存(终浓度为4%)<sup>[17]</sup>;甲壳类定量样品以13号浮游生物网过滤10 L水样,浓缩至50 mL采样瓶中,现场用甲醛溶液固定保存(终浓度为4%)<sup>[18]</sup>。

### 1.3 浮游动物的鉴定

在解剖显微镜(OLYMPUS SZX7, 日本)或倒置显微镜(OLYMPUS CKX41, 日本)下挑取活体样品中浮游动物的纯物种个体,并利用正置荧光显微镜(OLYMPUS BX53, 日本)进行物种图片采集,轮虫主要参照《Rotatoria》<sup>[13]</sup>和《中国淡水轮虫志》<sup>[14]</sup>,枝角类和桡足类主要参考《中国动物志(淡水枝角类)》<sup>[15]</sup>和《中国动物志(淡水桡足类)》<sup>[16]</sup>等相关资料描述进行物种鉴定。对于东湖水体中浮游动物常见物种,在解剖显微镜下挑取一定数量(大约20只)的纯物种个体于1.5 mL 灭菌EP管中,-20 °C保存,以便后续DNA提取及序列测定。

### 1.4 DNA提取与SSU rRNA基因测序

针对常见浮游动物类群,尽量获得其SSU rRNA基因序列信息。浮游动物DNA提取和PCR产物回收等操作分别参照DNeasy Blood&Tissue Kit试剂盒(Qiagen, 德国)、OMEGA Gel Extraction Kit试剂盒(Omega, 美国)的说明进行。以挑取的浮游动物基因组DNA为模板,采用真核生物通用引物SSU rRNA-F(5'-AACCTGGTTGATCCTGCCAGT-3')和SSU rRNA-R(5'-TGATCCTTCTGCAGGTTACC TAC-3')进行PCR扩增<sup>[19]</sup>。PCR反应扩增体积为20 μL,其中2×GoTaq Green Master Mix(Promega, 美国)10 μL, DMSO 1 μL, 每种引物(10 μmol/L)0.5 μL, 模板DNA 8 μL。PCR反应条件为:94 °C预变性10min, 94 °C变性30s, 48 °C退火1min 30s, 72 °C延伸2min 30s, 进行5个循环,然后94 °C变性30s, 48 °C退火1min 30s, 72 °C延伸2min 30s, 进行30个循环,最后再72 °C延伸10min。将扩增获得的DNA保守片段与pGEM-T vector(Promega, 美国)连接并转化入感受态大肠杆菌(DH5α)中,并进行蓝白斑检验,挑选阳性克隆的菌落,选用M13通用引物(M13-F: 5'-TTCCCAAGGAAAACCCT-3'; M13-R: 5'-CAG GAAACAGCTATGAC-3')<sup>[20]</sup>进行菌落PCR,最后将阳性菌液送往武汉天一辉远公司进行序列测定。获得的基因序列上传至GenBank。

### 1.5 浮游动物群落结构特征分析

在OLYMPUS正置显微镜(CX-31)下,用1 mL和5 mL的浮游生物计数框分别进行轮虫和甲壳类的定量计数工作,每个样品计数两次,其浮游动物最终丰度由以下公式确定:

$$N = \frac{N_1 + N_2}{2 \times V_j} \quad (1)$$

式中,  $N$ 指1 mL水中浮游动物个体数(ind./mL),  $N_1$ 与 $N_2$ 分别为两次计数个体数,  $V_j$ 为计数框体积(mL)。

利用优势度 $Y$ 指示浮游动物的出现频率和种群数量, 以确定优势种, 并且当 $Y \geq 0.02$ 时确定为优势种:

$$Y = \frac{n_i}{N} f_i \quad (2)$$

式中,  $n_i$ 为浮游动物第 $i$ 种的密度,  $N$ 为物种总丰度值,  $f_i$ 为第 $i$ 种的出现频率。

群落的丰富度采用Margalef指数( $d$ )表示, 按公式(3)计算:

$$d = (S - 1) / \ln N \quad (3)$$

式中,  $S$ 为浮游动物物种总数,  $N$ 为浮游动物总丰度值。

群落的多样性用Shannon-Weiner指数( $H'$ )和Simpson多样性指数( $D$ )表示, 分别按公式(4)和(5)计算:

$$H' = - \sum_{i=1}^S n_i \ln n_i \quad (4)$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S \left( \frac{n_i}{N} \right)^2 \quad (5)$$

式中,  $S$ 代表浮游动物物种总数;  $n_i$ 代表第 $i$ 种的密度;  $N$ 为浮游动物总丰度值。

群落的均匀度用Pielou指数( $J$ )表示, 计算按公式(6):

$$J = H' / \ln S \quad (6)$$

式中,  $H'$ 为Shannon-weiner指数;  $S$ 为浮游动物物种总数。

## 1.6 数据分析

物种丰度数据展示采用Origin8.5软件进行作图。利用Canoco5.0软件对各采样点水质数据(水温、pH、含氧量、盐度、ORP)与浮游动物群落结构进行冗余分析(Redundancy analysis, RDA)。

## 2 结果

### 2.1 浮游动物种类组成及优势种变化

通过定性样品观察, 共发现浮游动物50种, 其中轮虫22属37种、枝角类10属10种、桡足类3属3种(表1), 并对大部分物种进行了图片展示(图版I—IV)以及部分物种的SSU rRNA序列确定(表2)。夏季共鉴定物种为43种, 冬季物种数为24种。S1、S2、S3、S4四站点之间物种种类组成差异不显著。

夏冬两季的优势种( $Y \geq 0.02$ )组成之间存在差异(表3)。夏季浮游动物优势物种为跨立小剑水蚤(*Microcyclops varicans*,  $Y=0.612$ , 图版IV-12—15)、裂足臂尾轮虫(*Brachionus diversicornis*,  $Y=0.048$ , 图版I-7—8)和微型裸腹溞(*Moina micrura*,  $Y=0.024$ , 图版III-14—17), 冬季出现的优势种为长肢多肢轮虫(*Polyarthra dolichoptera*,  $Y=0.407$ , 图版III-1—3)、疣毛轮虫(*Synchaeta* spp.,  $Y=0.219$ , 图版II-20—22)、角突臂尾轮虫(*Brachionus angularis*,  $Y=0.024$ , 图版I-13—14)和犀轮虫(*Rhinoglena* sp.,  $Y=0.021$ , 图版II-4—7)。夏冬两季之间不存在共有优势物种。

对于犀轮属, 《中国淡水轮虫志》记载了2种(前额犀轮虫*Rhinoglena frontalis*和东京犀轮虫*Rhinoglena tokioensis*), 2008年Willem等<sup>[21]</sup>报道了一个在南极洲发现的新种*Rhinoglena kutikovae*。然而这些物种的描述与在东湖发现的优势物种犀轮虫均存在一定的差异。

观察到的犀轮虫体长约为280—510  $\mu\text{m}$ , 宽度约为80—110  $\mu\text{m}$ 。体呈长圆锥形, 透明。头冠上具有一较长的吻, 吻上有纤毛。眼点一对, 红色, 很明显, 在吻顶端的两旁。头冠下紧缩形成一“颈”, 躯干部前端完全伸展时膨大(图版II-5, 与前额犀轮虫类似)。具有槌型咀嚼器, 槌钩每侧具6—7个齿(图版II-6, 与前额犀轮虫不符, 而与东京犀轮虫描述相同)。足短, 与体的分界不明显。趾融合为一个, 很小(图版II-7, 与前额犀轮虫不符, 而与东京犀轮虫描述相同)。卵胎生, 体内常有多个正在发育中的卵。该物种在夏季没有观察到, 而在冬季成为优势种之一(分布特点与前额犀轮虫类似, 与东京犀轮虫不同; 形态和分布上与*Rhinoglena kutikovae*均有较大差异)。确定东湖发现的犀轮虫种类还需要进一步研究。

### 2.2 东湖浮游动物群落结构特征

夏冬两季四个站点浮游动物各类群的平均密度和生物量之间存在较大差异, 冬季轮虫丰度约为夏季的8.5倍, 而夏季甲壳类生物量高于冬季(图2)。夏季, 东湖轮虫平均密度和生物量分别为56.2 ind./L、0.22 mg/L; 枝角类平均密度和生物量分别为8.8 ind./L、0.35 mg/L; 桡足类平均密度和生物量分别为129 ind./L、2.53 mg/L; 各采样点浮游动物密度为67.5—403.9 ind./L, 总生物量为0.56—7.69 mg/L。冬季, 东湖轮虫平均密度和生物量分别为476.3 ind./L、0.44 mg/L; 枝角类平均密度和生物量分别为1.0 ind./L、0.01 mg/L; 桡足类平均密度和生物量分别为52.1 ind./L、1.11 mg/L; 各采样点浮游动物密度范

围为275.0—683.3 ind./L, 总生物量范围为0.68—3.49 mg/L。定量计数统计的物种数夏季略高于冬季(图3)。总体上, 夏季轮虫丰度和生物量较冬季低, 但甲壳类密度和生物量较冬季高。

### 2.3 东湖浮游动物多样性分析

基于公式(3)—(6), 计算夏冬两季东湖各样点

浮游动物Margalef丰富度指数( $d_M$ )、Pielou均匀度指数、Shannon-Wiener多样性指数( $H'$ )和Simpson多样性指数(表4)。

夏季东湖浮游动物Margalef丰富度指数( $d_M$ )变化是1.189—1.860, 均值为1.452; Pielou均匀度指数( $J$ )变化范围为0.498—0.804, 平均值为0.665; Shan-

表1 东湖冬夏两季浮游动物的物种组成

Tab. 1 Species composition of zooplankton in the East Lake in summer and winter

类群 Groups	属名 Genus	物种 Species	夏季 Summer	冬季 Winter	类群 Groups	属名 Genus	物种 Species	夏季 Summer	冬季 Winter	
Rotifera	轮虫属	转轮虫 <i>Rotaria rotatoria</i>	√				圆盖柱头轮虫 <i>Eosphora thoa</i>	√		
	龟纹轮属	裂痕龟纹轮虫 <i>Anuraeopsis fissa</i>	√			椎轮属	椎轮虫 <i>Notommata</i> sp.	√		
	臂尾轮属	矩形臂尾轮虫 <i>Brachionus leydigi</i>	√	√		巨头轮属	巨头轮虫 <i>Cephalodella</i> spp.	√	√	
		方形臂尾轮虫 <i>Brachionus quadridentatus</i>	√			高躄轮属	高躄轮虫 <i>Scardium longicaudum</i>	√		
		壶状臂尾轮虫 <i>Brachionus urceus</i>	√	√		异尾轮属	暗小异尾轮虫 <i>Trichocerca pusilla</i>	√		
		角突臂尾轮虫 <i>Brachionus angularis</i>	√	√			等棘异尾轮虫 <i>Trichocerca stylata</i>	√		
		萼花臂尾轮虫 <i>Brachionus calyciflorus</i>	√	√		疣毛轮属	疣毛轮虫 <i>Synchaeta</i> spp.	√	√	
		裂足臂尾轮虫 <i>Brachionus diversicornis</i>	√			多肢轮属	长肢多肢轮虫 <i>Polyarthra dolichoptera</i>	√	√	
		蒲达臂尾轮虫 <i>Brachionus budapestinensis</i>	√			三肢轮属	角三肢轮虫 <i>Filinia cornuta</i>	√		
		尾突臂尾轮虫 <i>Brachionus caudatus</i>	√				端生三肢轮虫 <i>Filinia maior</i>	√	√	
		剪形臂尾轮虫 <i>Brachionus forficula</i>	√			六腕轮属	奇异六腕轮虫 <i>Hexarthra mira</i>	√		
	龟甲轮属	螺形龟甲轮虫 <i>Keratella cochlearis</i>		√		胶鞘轮属	敞水胶鞘轮虫 <i>Conochilus unicornis</i>	√	√	
		曲腿龟甲轮虫 <i>Keratella valga</i>	√	√		枝角类 Cladocera	薄皮溞属	透明薄皮溞 <i>Leptodora Lilljeborg</i>		√
	鞍甲轮属	尖尾鞍甲轮虫 <i>Lepadella ovalis</i>	√				仙达溞属	晶莹仙达溞 <i>Sida crystallina</i>		√
		盘状鞍甲轮虫 <i>Lepadella patella</i>	√				秀体溞属	短尾秀体溞 <i>Diaphanosoma brachyurum</i>	√	
	须足轮属	竖琴须足轮虫 <i>Euchlamis lyra</i>	√				船卵溞属	壳纹船卵溞 <i>Scapholeberis kingi</i>	√	√
		大肚须足轮虫 <i>Euchlamis dilalata</i>	√	√			象鼻溞属	长额象鼻溞 <i>Bosmina longirostris</i>		√
	多突轮属	微型多突轮虫 <i>Liliferotrocha subtilis</i>	√				泥溞属	底栖泥溞 <i>Ilyocryptus sordidus</i>	√	
	犀轮属	犀轮虫 <i>Rhinoglena</i> sp.		√			尖额溞属	矩形尖额溞 <i>Alona rectangula</i>	√	√
	腔轮属	蹄形腔轮虫 <i>Lecane unguolata</i>	√				异尖额溞属	吻状异尖额溞 <i>Disparalona rostrata</i>		√
单趾轮属	囊形单趾轮虫 <i>Monostyla bulla</i>	√			盘肠溞属		圆形盘肠溞 <i>Chydorus sphaericus</i>		√	
囊足轮属	多突囊足轮虫 <i>Asplanchnopus multiceps</i>	√			裸腹溞属		微型裸腹溞 <i>Moina micrura</i>	√		
晶囊轮属	前节晶囊轮虫 <i>Asplanchna priodonta</i>	√			桡足类 Copepoda	许水蚤属	球状许水蚤 <i>Schmackeria forbesi</i>	√	√	
	卜氏晶囊轮虫 <i>Asplanchna brightwelli</i>	√				剑水蚤属	近邻剑水蚤 <i>Cyclops vicinus</i>	√	√	
柱头轮属	眼镜柱头轮虫 <i>Eoophora najas</i>	√	√			小剑水蚤属	跨立小剑水蚤 <i>Microcyclops varicans</i>	√	√	
合计	35属	50种	43种	24种						

non-Wiener多样性指数( $H'$ )变化为0.954—1.699, 平均值为1.316; Simpson多样性指数( $D$ )变化范围为0.446—0.720, 平均值为0.605。冬季东湖浮游动物Margalef丰富度指数( $d_M$ )变化范围是0.381—1.035, 平均值为0.762; Pielou均匀度指数( $J$ )变化范围为0.479—0.746, 平均值为0.630; Shannon-Wiener多样性指数( $H'$ )变化为0.694—1.347, 平均值为0.949; Simpson多样性指数( $D$ )变化为0.421—0.698, 平均值为0.529。

对比可知, 夏季Margalef丰富度指数和Shannon-Wiener多样性指数显著高于冬季; 夏季Simpson多样性指数略高于冬季; 而两季的Pielou均匀度指数之间相差较小。

#### 2.4 浮游动物群落结构与环境因子相关关系

根据统计性检验, 夏冬两季间五个环境因子均存在极显著差异(\*\* $P < 0.01$ )。夏季平均水温(32.1°C)、pH(7.85)高于冬季(分别为5.0°C, 6.69); 而夏季平均含氧量(4.99 mg/L)、盐度(0.17)和ORP(116.69 mV)均低于冬季(分别为11.88 mg/L, 0.20, 201.525 mV)。

对夏冬季出现的7种优势物种以及5种环境因子进行冗余分析(RDA, 图4)。RDA排序轴一与排序轴二的特征值分别为0.5389和0.0270, 共解释了56.59%的浮游动物变化情况。水温、含氧量、盐度、pH、ORP五种环境因子共解释了物种组成总变异的58.9%, 其中温度的解释度达52.3%。环境因子的变异可将夏冬两季样点较好地分为两个组。根据RDA分析, 东湖水体中所出现的优势物种裂足臂尾轮虫、微型裸腹溞、跨立小剑水蚤与温度呈正相关, 而长肢多肢轮虫、疣毛轮虫、犀轮虫与温

度呈负相关。同时, 跨立小剑水蚤与pH之间表现为更显著的正相关。由图4可知, 轮虫总丰度与溶解氧之间呈现正相关关系, 枝角类总丰度与温度之间呈现正相关, 而桡足类总丰度与各环境因子之间相关性均不大。

### 3 讨论

#### 3.1 浮游动物的鉴定

在生态学的研究中, 往往会涉及基本的物种鉴定工作<sup>[22]</sup>, 利用的传统手段主要是通过形态学观察, 并参考分类书籍进行物种鉴定。然而当前浮游动物形态学的鉴定方法面临一些问题, 例如在参考一些经典著作如《中国淡水轮虫志》、《中国动物志(淡水枝角类)》等时, 对于近年更新的分类体系或物种分布的新变化, 可能会存在一些出入; 另外, 浮游动物的形态学特征有时细微难察, 要通过形态学观察来鉴定物种通常需要研究人员具有丰富的经验, 否则很容易出错<sup>[23]</sup>。

而利用近年来发展迅速的分子鉴定手段就可以规避这些问题。一方面, 利用分子鉴定不需要物种的形态完整, 对成体、幼体甚至卵都适用; 另一方面, 分子手段可以在形态学鉴定上难以区分时, 辅助发现一些门类的隐种和新种<sup>[24]</sup>; 最后, 分子鉴定方法简单、方便、不易出错, 且降低了对研究者的经验要求<sup>[23]</sup>。然而, 当前浮游动物(尤其是淡水浮游动物)的分子序列数据库还不完善, 很多常见物种的序列信息仍然缺乏。

因此, 提供常见浮游动物的图像信息及分子序列信息对于生态学和分类学的发展有重要价值。

表2 东湖水体中优势浮游动物种类的SSU rRNA序列信息

Tab. 2 SSU rRNA gene sequence information of dominant zooplankton in the East Lake

物种Species	拉丁名Scientific name	Genbank登录号Sequence ID	序列长度Sequence length (bp)	比对序列Alignment sequence	比对物种Alignment species	相似度Similarity (%)	首次上传The first time to submit
角突臂尾轮虫	<i>Brachionus angularis</i>	MK564749	1809	KF141790	<i>Brachionus calyciflorus</i>	98.89	+
萼花臂尾轮虫	<i>Brachionus calyciflorus</i>	MK271750	1809	KF141790	<i>Brachionus calyciflorus</i>	99.72	—
裂足臂尾轮虫	<i>Brachionus diversicornis</i>	MK106113	1812	KF141790	<i>Brachionus calyciflorus</i>	98.90	+
卜氏晶囊轮虫	<i>Asplanchna brightwelli</i>	MK106105	1806	KY859765	<i>Lecane inermis</i>	98.34	+
疣毛轮虫	<i>Synchaeta</i> sp.	MK644612	1807	MH481727	<i>Synchaeta oblonga</i>	99.77	—
端生三肢轮虫	<i>Filinia terminalis</i>	MK352482	1818	DQ079914	<i>Filinia longiseta</i>	97.85	+
圆形盘肠溞	<i>Chydorus sphaericus</i>	MK568074	2121	AM490277	<i>Chydorus sphaericus</i>	98.21	—
跨立小剑水蚤	<i>Mesocyclops varicans</i>	MK106114	1806	KR048728	<i>Mesocyclops pehpeiensis</i>	98.54	+

注: \*比对序列为Genbank上相似度最高的序列; \*\*SSU rRNA全长序列是否首次上传

Note: The alignment sequence is the most similar sequence in Genbank. Whether to submit the full-length sequence of SSU rRNA for the first time

本文为在东湖中发现的浮游动物提供了图像信息(图版I—IV),并对优势物种的重要鉴定特征提供了具体的图像;同时为一部分常见物种在GenBank上传了SSU rRNA序列信息,其中五条SSU rRNA全长序列为对应物种的首次报道(角突臂尾轮虫*Brachionus angularis*、裂足臂尾轮虫*Brachionus diversicornis*、卜氏晶囊轮虫*Asplanchna brightwelli*、端

生三肢轮虫*Filinia terminalis*和跨立小剑水蚤*Microcyclops varicans*),为未来浮游动物鉴定研究提供了参考资料。

### 3.2 东湖浮游动物物种组成

浮游动物群落结构易随环境变化产生变动,因而依据浮游动物群落结构的特点,可以推测当前环境条件的特点,并按照趋势预测未来环境条件变化

表3 东湖夏冬两季各采样点浮游动物的最大丰度和优势度

Tab. 3 The highest density and the dominance index of zooplankton detected in the East Lake in summer and winter from four different sampling sites (S1—S4)

物种Species	夏季最大丰度(ind./L)及优势度 The maximum abundance and dominance in summer					冬季最大丰度(ind./L)及优势度 The maximum abundance and dominance in winter				
	S1	S2	S3	S4	Y	S1	S2	S3	S4	Y
转轮虫 <i>Rotaria rotatoria</i>	2.5	2.5	2.5	7.5	0.001	0	0	0	0	0
裂痕龟纹轮虫 <i>Anuraeopsis fissa</i>	5	5	5	7.5	0.001	0	0	0	0	0
矩形臂尾轮虫 <i>Brachionus leydigi</i>	0	0	0	2.5	<0.001	0	0	0	0	0
方形臂尾轮虫 <i>Brachionus quadridentatus</i>	0	2.5	0	2.5	<0.001	0	0	0	0	0
壶状臂尾轮虫 <i>Brachionus urceus</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	10	<0.001
角突臂尾轮虫 <i>Brachionus angularis</i>	2.5	2.5	17.5	30	0.01	125	7.5	27.5	5	0.024
萼花臂尾轮虫 <i>Brachionus calyciflorus</i>	2.5	20	2.5	25	0.009	2.5	0	0	0	<0.001
裂足臂尾轮虫 <i>Brachionus diversicornis</i>	7.5	32.5	37.5	45	0.048	0	0	0	0	0
蒲达臂尾轮虫 <i>Brachionus budapestinensis</i>	0	0	5	2.5	<0.001	0	0	0	0	0
尾突臂尾轮虫 <i>Brachionus caudatus</i>	0	2.5	2.5	10	<0.001	0	0	0	0	0
剪形臂尾轮虫 <i>Brachionus forficula</i>	2.5	2.5	5	0	<0.001	0	0	0	0	0
螺形龟甲轮虫 <i>Keratella cochlearis</i>	0	0	0	0	0	22.5	10	2.5	0	0.002
曲腿龟甲轮虫 <i>Keratella valga</i>	0	0	0	0	0	2.5	5	2.5	0	<0.001
大肚须足轮虫 <i>Euchlanis dilatata</i>	15	12.5	2.5	12.5	0.011	2.5	2.5	0	0	<0.001
犀轮虫 <i>Rhinoglena</i> sp.	0	0	0	0	0	197.5	2.5	0	7.5	0.021
蹄形腔轮虫 <i>Lecane unguolata</i>	5	10	15	20	0.01	0	0	0	0	0
囊形单趾轮虫 <i>Monostyla bulla</i>	0	0	2.5	2.5	<0.001	0	0	0	0	0
晶囊轮虫 <i>Asplanchna</i> spp.	10	2.5	5	17.5	0.009	0	0	0	0	0
暗小异尾轮虫 <i>Trichocerca pusilla</i>	20	5	12.5	7.5	0.016	0	0	0	0	0
疣毛轮虫 <i>Synchaeta</i> spp.	0	0	0	0	0	237.5	142.5	295	97.5	0.219
长肢多肢轮虫 <i>Polyarthra dolichoptera</i>	10	2.5	5	15	0.008	352.5	305	472.5	480	0.407
角三肢轮虫 <i>Filinia cornuta</i>	0	0	12.5	0	<0.001	0	0	0	0	0
端生三肢轮虫 <i>Filinia terminalis</i>	0	0	2.5	0	<0.001	0	0	0	0	0
奇异六腕轮虫 <i>Hexarthra mira</i>	0	2.5	2.5	0	<0.001	0	0	0	0	0
休眠卵 Eggs	32.5	17.5	27.5	25	0.067	127.5	30	177.5	247.5	0.162
矩形尖额溞 <i>Alona rectangula</i>	2.5	2.5	2.5	17.5	0.003	0	0	0	7.5	<0.001
圆形盘肠溞 <i>Chydorus sphaericus</i>	0	0	0	0	0	0	0	5	0	<0.001
微型裸腹溞 <i>Moina micrura</i>	2.5	5	47.5	22.5	0.024	0	0	0	0	0
近邻剑水蚤 <i>Cyclops vicinus</i>	0	0	0	0	0	7.5	2.5	0	57.5	0.006
跨立小剑水蚤 <i>Microcyclops varicans</i>	97.5	52.5	1262.5	190	0.612	2.5	0	0	7.5	<0.001
球状许水蚤 <i>Schmackeria forbesi</i>	0	0	2.5	0	<0.001	0	2.5	0	0	<0.001
无节幼体 Nauplius	22.5	7.5	45	17.5	0.047	82.5	40	107.5	72.5	0.084

注:若优势度 $\geq 0.02$ ,即为优势种

Note: If the dominance is  $\geq 0.02$ , it is the dominant species



情况<sup>[1]</sup>。

根据历史文献资料, 东湖浮游动物物种组成有较大变化(表 5), 与东湖的水质变化也存在一定的联系。20 世纪 60 年代, 东湖发现轮虫 56—82 种, 枝角类中仅盘肠蚤科就发现 13 属 24 种, 桡足类发现 7—14 种, 出现的优势物种主要为螺形龟甲轮虫、暗小异尾轮虫、对棘同尾轮虫、特异同尾轮虫、二突异尾轮虫、鼠异尾轮虫、尖尾疣毛轮虫、针簇多肢轮虫、透明蚤、隆线蚤、近邻剑水蚤、广布中剑水蚤、长江新镖水蚤、特异荡镖水蚤<sup>[25—29]</sup>; 20 世纪 80 年代, 东湖发现轮虫 57 种, 桡足类 10 种, 优势物种为针簇多肢轮虫、螺形龟甲轮虫、暗小异尾轮虫、角突臂尾轮虫、对棘同尾轮虫、矩形龟甲轮虫、前节晶囊轮虫、矩形臂尾轮虫、萼花臂尾轮虫、透明蚤、透明薄皮蚤、特异荡镖水蚤、广布中剑水蚤、球状许水蚤和近邻剑水蚤<sup>[26, 29—31]</sup>; 20 世纪 90 年代, 东湖发现轮虫 23—59 种, 枝角类 18 种, 桡足类 7—10 种, 优势物种为暗小异尾轮虫、针簇多肢轮虫、螺形龟甲轮虫、多须拟前翼轮虫、六腕轮虫、短尾秀体蚤、微型裸腹蚤、近邻剑水蚤、广布中剑水蚤、近邻剑水蚤、台湾温剑水蚤<sup>[8, 10, 12, 31—33]</sup>。2006 年, 颜庆云等<sup>[3]</sup>在东湖发现轮虫 39 种; 在本次调查中, 东湖共发现轮虫 21 属 37 种、枝角类 10 属 10 种、桡足类 3 属 3 种, 优势物种为裂足臂尾轮虫、角突臂尾轮虫、犀轮虫、疣毛轮虫、长肢多肢轮虫、微型裸腹蚤和跨立小剑水蚤。

从物种数的变化来看, 自 20 世纪 60 年代以来, 东湖浮游动物物种数一直处于逐渐减少的趋势, 分析可能的原因如下: 一方面, 20 世纪以来东湖周边经济迅速发展, 大量污水或废水排入东湖导致水体受污染情况严重, 环境条件的迅速改变可能造成部分物种无法及时适应而消失, 这种现象与淮河流域的报道类似<sup>[34]</sup>; 另一方面, 由于近年来人为对东湖的改造, 包括围湖造田、修建东湖隧道等, 东湖水域面积大大减小、浮游动物生存环境短期发生较大变化, 这对东湖浮游动物群落也产生了一定的影响<sup>[35]</sup>。

在优势物种方面, 几十年前东湖出现的主要优势物种如螺形龟甲轮虫、等棘异尾轮虫、暗小异尾轮虫等均为寡污型, 针簇多肢轮虫为  $\beta$ -中污型, 而近年出现优势物种如裂足臂尾轮虫、犀轮虫、疣毛轮虫等均为  $\beta$ -中污型, 角突臂尾轮虫、萼花臂尾轮虫为  $\beta$ -中污型或  $\alpha$ -中污型, 可见东湖轮虫逐渐从寡污型转变为  $\beta$ -中污型或  $\alpha$ -中污型<sup>[36]</sup>; 优势甲壳类浮游动物主要表现为逐渐趋向小型化。东湖浮

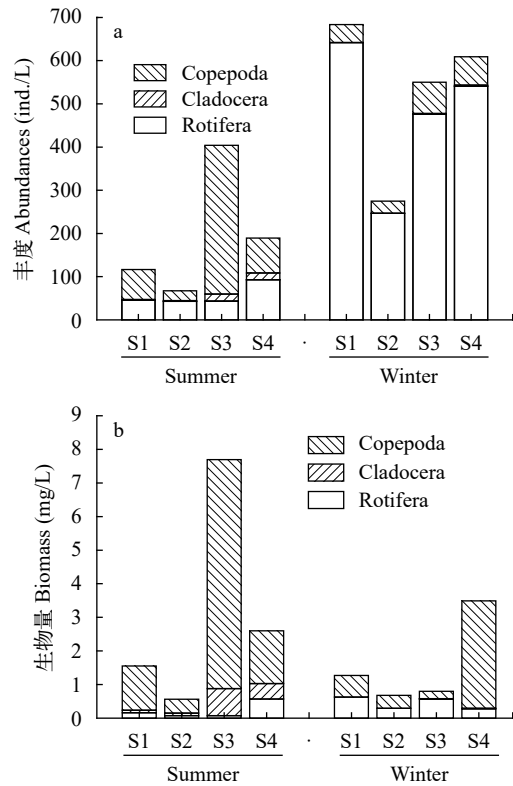


图 2 夏冬两季东湖各点浮游动物丰度及生物量  
Fig. 2 The abundance and biomass of zooplankton during summer and winter in the East Lake

a. 浮游动物丰度比较; b. 浮游动物生物量比较

a. Comparison of zooplankton abundance; b. Comparison of zooplankton biomass

游动物物种组成发生改变的原因在于, 一是由于东湖的污染, 水体逐渐富营养化, 适应于富营养型水体的种群得到发展, 并逐渐取代喜贫营养型水体的种群; 二是受到东湖鲢鳙摄食的影响, 大型甲壳类个体在鲢鳙密度高的水体中不占优势, 从而促使甲壳类浮游动物向小型化发展<sup>[8]</sup>。

需要指出的是, 考虑到轮虫的大小一般为 50—2000  $\mu\text{m}$ <sup>[37]</sup>, 本研究中利用 25 号浮游生物网(孔径为 64  $\mu\text{m}$ )过滤 2 L 原位水对轮虫进行定量采集<sup>[17]</sup>, 与传统沉淀法比较其最大优点在于可以最大可能获得稀有或丰度较低的物种。但是该方法可能会造成小个体轮虫的生物量偏低。另外, 考虑到沿岸带光照、氧气充足、营养条件良好, 并生长有高等植物, 可以为浮游动物提供更加复杂、多样、优质的生存环境, 单位空间内物种丰富程度可能更高<sup>[38]</sup>, 为了更好地获取东湖浮游动物多样性的数据, 本研究主要选择沿岸带作为采样点, 从而有别于前人对东湖研究中在敞水区的样点设置<sup>[6, 8, 25]</sup>。因此, 本次研究所新发现的优势物种很有可能与沿岸带样点的生境特征有关。例如新发现的优势物种跨立小剑水蚤, 据

文献报道<sup>[16]</sup>, 该物种主要生活于小型水域和流速缓慢的河流中, 在湖泊沿岸带的水草丛中数量较多。因此, 本研究所报道的优势物种是否在东湖敞水区也能形成优势群体值得进一步的验证研究。

### 3.3 浮游动物群落结构特征

在本次调查中, 东湖夏冬两季浮游动物群落结构的丰富度、均匀度、多样性指数, 以及各类群的丰度、生物量等方面均存在一定差异。

在本文中, 东湖夏季浮游动物丰富度和多样性指数高于冬季, 均匀度与冬季接近。根据许晴等<sup>[39]</sup>

的研究, 认为对均匀度接近、丰富度差别较大的群落进行比较时, 应该利用Shannon-Wiener指数进行水质状况分析。在本次调查中, 发现夏冬两季浮游动物均匀度指数相差较小(0.665和0.630), 而丰富度相对差别较大(1.452和0.762), 故利用Shannon-Wiener指数进行东湖水质分析。东湖夏季Shannon-Wiener指数和Margalef指数均处于1—2, 根据水质评价标准(表6)<sup>[40]</sup>, 东湖水质为中污染; 东湖冬季Shannon-Wiener指数和Margalef指数均小于1, 水质为重污染。

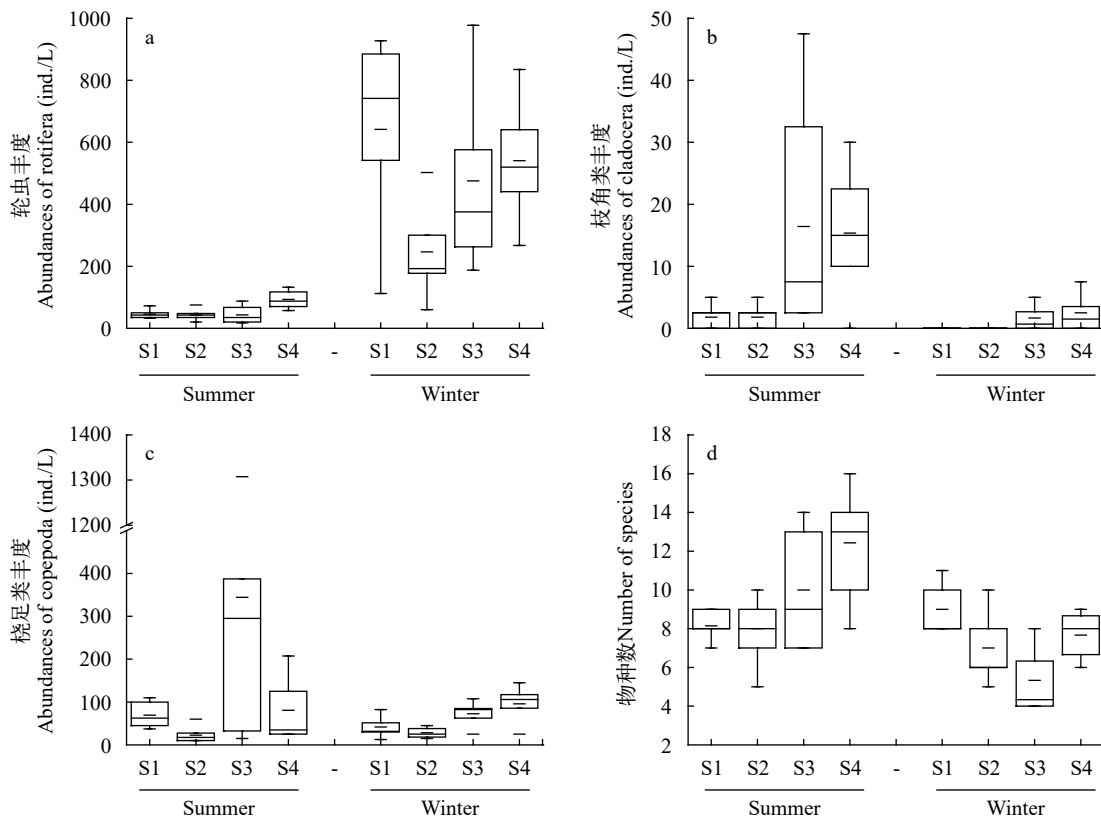


图3 夏冬两季东湖各点浮游动物类群丰度和物种数比较

Fig. 3 The comparison of the abundance and species number of zooplankton groups in summer and winter in the East Lake

a. 轮虫丰度比较; b. 枝角类丰度比较; c. 桡足类丰度比较; d. 定量统计物种数比较

a. comparison of rotifer abundance; b. comparison of cladocera abundance; c. comparison of copepods abundance; d. comparison of the total zooplankton species number

表4 冬夏两季东湖浮游动物的多样性指数

Tab. 4 Environmental factors for four stations in the East Lake in summer and winter

采样点 Sample sites	夏季 Summer				冬季 Winter			
	Margalef 丰富度指数	Pielou 均匀度指数	Shannon-wiener 多样性指数	Simpson 多样性指数	Margalef 丰富度指数	Pielou 均匀度指数	Shannon-wiener 多样性指数	Simpson 多样性指数
S1	1.189	0.620	1.138	0.536	1.035	0.703	1.347	0.698
S2	1.410	0.804	1.473	0.720	0.820	0.593	0.924	0.542
S3	1.350	0.498	0.954	0.446	0.381	0.746	0.694	0.456
S4	1.860	0.737	1.699	0.719	0.809	0.479	0.830	0.421
平均值 Mean	1.452	0.665	1.316	0.605	0.762	0.630	0.949	0.529

东湖夏季轮虫丰度和生物量低于冬季, 而甲壳类丰度和生物量高于冬季(图 2)。轮虫为喜富营养型种类, 水体营养状态的提升有利于轮虫种类丰度的提高, 枝角类喜还原性的中营养或贫营养的清洁水体, 而桡足类受环境因子的影响较小<sup>[41]</sup>。东湖浮游动物群落组成差异也反映了夏季水质优于冬季, 冬季水体富营养化程度更高。

此外, 历史上对东湖比较系统全面的调查研究<sup>[6,8]</sup>主要是在东湖设两个采样站点。一个在湖的西部湾区域(靠近现在的水果湖), 一个在湖中心。沈韞芬和陈受忠<sup>[25]</sup>发现第I站的浮游动物都具有沿岸带种类的共同特点, 多在水浅而有高等植物生长的环境中生长, 而第II站的浮游动物则具有亚沿岸带的特征。我们此次采样点的设置主要分布于II站所在湖区的沿岸带。将我们的数据与历年I站的研究结果<sup>[6, 8, 25]</sup>进行比较(表 7)可以发现, 本次调查中夏季轮虫丰度为历年最低(56 ind./L), 而冬季除了1979年之外, 轮虫的丰度与往年的丰度相当(476 ind./L), 并略高于往年水平。夏季枝角类的丰度和1962年及1974年相当(9 ind./L), 不过远远低于1979年和1980年, 且与1991年全年的平均水平相当; 冬季枝角类偏低(1.0 ind./L)。值得注意的是此次调查中夏季桡足类的丰度是历年最高, 达129 ind./L, 远远高

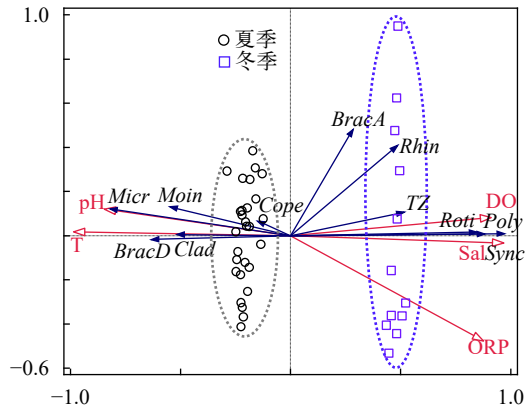


图 4 东湖夏冬两季环境因子与浮游动物种群的冗余分析

Fig. 4 Redundancy analysis of zooplankton species-environmental factors in summer and winter of the East Lake

T. 温度; pH. 酸碱度; DO. 溶解氧; Sal. 盐度; ORP. 氧化还原电位; BracA. 角突臂尾轮虫; BracD. 裂足臂尾轮虫; Rhin. 犀轮虫; Poly. 长肢多肢轮虫; Sync. 疣毛轮虫; Moin. 微型裸腹溞; Micr. 跨立小剑水蚤; Roti. 轮虫总量; Clad. 枝角类总量; Cope. 桡足类总量; TZ. 浮游动物总量

T. temperature; pH. pH value; DO. dissolved oxygen; Sal. salinity; ORP. Oxidation-Reduction Potential; angu. *Brachionus angularis*; dive *Schizocerca diversicornis*; toki. *Rhinoglena* sp.; trig. *Polyarthra dolichoptera*; sync. *Synchaeta* spp.; chan. *Moina chankensis*; vari. *Microcyclops varicans*; Roti. *Rotifera*; Clad. *Cladocera*; Cope. *Copepoda*; TZ. Total zooplankton

于除1979年以外的其他年份, 不过冬季桡足类的丰度(52 ind./L)和历年在一个数量级, 相差不大。将我们的数据与II站比较也可以得到类似的变化规律, 即冬季的轮虫与夏冬两季的桡足类的丰度在历

表 5 东湖浮游动物物种历年组成

Tab. 5 Comparison of the composition of zooplankton species in East Lake over the years

物种 Species	1960s	1980s	1990s	2006	2018
优势物种 Dominant species					
角突臂尾轮虫	—	+	—	—	+
萼花臂尾轮虫	—	+	—	—	—
矩形臂尾轮虫	—	+	—	—	—
裂足臂尾轮虫	—	—	—	—	+
矩形龟甲轮虫	—	+	—	—	—
螺形龟甲轮虫	+	+	+	—	—
暗小异尾轮虫	+	+	+	—	—
对棘同尾轮虫	+	+	—	—	—
特异同尾轮虫	+	—	—	—	—
二突异尾轮虫	+	—	—	—	—
鼠异尾轮虫	+	—	—	—	—
前节晶囊轮虫	—	+	—	—	—
疣毛轮虫	—	—	—	—	+
尖尾疣毛轮虫	+	—	—	—	—
针簇多肢轮虫	+	+	+	—	—
长肢多肢轮虫	—	—	—	—	+
多须拟前翼轮虫	—	—	+	—	—
六腕轮虫	—	—	+	—	—
犀轮虫	—	—	—	—	+
透明薄皮溞	—	+	—	—	—
透明溞	+	+	—	—	—
短尾秀体溞	—	—	+	—	—
微型裸腹溞	—	—	+	—	+
隆线溞	+	—	—	—	—
特异荡镖水蚤	+	+	—	—	—
长江新镖水蚤	+	—	—	—	—
球状许水蚤	—	+	—	—	—
近邻剑水蚤	+	+	+	—	—
台湾温剑水蚤	—	—	+	—	—
广布中剑水蚤	+	+	+	—	—
跨立小剑水蚤	—	—	—	—	+
物种组成 Species composition					
轮虫	56—82 种	57种	23—59种	39种	21属 37种
枝角类	13属 24种*	—	18种	—	10属 10种
桡足类	7—14种	10种	7—10种	—	3属3种
参考文献	[25—29]	[26, 29—31]	[8, 10, 12, 31—33]	[3]	本文
References					

注: \*仅指60年代盘肠溞科

Note: \*Chydoridae of the 1960s only

表6 多样性指数对水质评价的标准<sup>[35]</sup>

Tab. 6 Standards of water quality assessed in terms of diversity index

指数范围Index range	级别Level	评价状态 Evaluation of state	水体污染程度 Pollution level
$H' > 3$	$d_M > 3$	丰富	清洁
$2 < H' \leq 3$	$2 < d_M \leq 3$	较丰富	轻污染
$1 < H' \leq 2$	$1 < d_M \leq 2$	一般	中污染
$0 < H' \leq 1$	$0 < d_M \leq 1$	贫乏	重污染
$H' = 0$	$d_M = 0$	极贫乏	严重污染

表7 东湖历年夏冬两季浮游动物数量

Tab. 7 Comparison of the number of zooplankton (ind./L) in the East Lake over the summer and winter

站点 Station	类群 Group	1962年 <sup>[25]</sup>	1974年 <sup>[6]</sup>	1975年 <sup>[6]</sup>	1979年 <sup>[6]</sup>	1980年 <sup>[6]</sup>	1991年 <sup>[8]</sup>	2018年 本文
I 站 Station I	轮虫(夏)	1476	520	112	2450	175	2613	56
	轮虫(冬)	409	162	394	800	440		476
	枝角类(夏)	11	11	24	204	210	10	9
	枝角类(冬)	29	10	31	0	24		1
	桡足类(夏)	46.1	8	12	120	25	46	129
	桡足类(冬)	27	16	80	40	24		52
II 站 Station II	轮虫(夏)	1127	275	3750	5900	525	1127	56
	轮虫(冬)	132	190	3000	2800	800		476
	枝角类(夏)	10.7	28	28	102	125	11	9
	枝角类(冬)	39	38	22	4	22		1
	桡足类(夏)	58.6	13	28	48	41	59	129
	桡足类(冬)	10	23	30	2	29		52

注: 1962年的数据直接引自相应参考文献; 1974、1975、1979和1980年的数据根据相应文献中对应月份的数据提取而来(夏季取7、8月份数据的平均值; 冬季取12月份与1月份数据的平均值); 1991年的参考文献中由于轮虫、枝角类和桡足类在不同月份的丰度的数据不易提取, 所以直接列出了全年的平均值

Note: The data of 1962 are directly cited from the corresponding references; The data of 1974, 1975, 1979 and 1980 were extracted according to the data of corresponding months in the corresponding references. In summer, the average data of July and August is taken, and the average data of December and January is taken. In the 1991 references, annual averages were listed directly because of the difficulty in extracting data on the abundance of rotifers, clade and copepods in different months

年变化中有增多的趋势, 而枝角类的丰度在夏冬两季中均偏低, 轮虫在冬季的丰度与往年相比也较低。

夏季的水质优于冬季的现象在太平湖的相关研究中也存在类似的报道<sup>[42]</sup>。东湖冬季水质较差的原因可能在于, 东湖冬季水位高于夏季, 这可能导致一部分枯枝败叶或生活垃圾等进入水体, 引起水质下降; 另外, 冬季由于电力需求大, 空气污染较夏季严重, 部分污染物(如固体颗粒物、SO<sub>2</sub>等)随着降雨进入湖泊, 这些都导致冬季东湖水质下降<sup>[43]</sup>。

### 3.4 浮游动物群落结构与环境因子相关分析

水体中环境因子是影响浮游动物密度和多样性的重要因素, 环境因子的变动对不同物种有不同的影响。从东湖夏冬两季的物种组成分析的对比上来看, 温度对夏冬两季浮游动物组成差异上解释度最大为52.3%。所以温度可能是引起夏冬两季浮游动物群落结构变化的最主要因素。有研究表明<sup>[44]</sup>, 浮游动物群落结构的季节动态变化常常与温度的变化有关。Gillooly<sup>[45]</sup>认为温度对浮游动物繁殖时间也有重要影响, 温度越高浮游动物胚的发育时间越短, 从而种群数量越大; 崔福义等<sup>[46]</sup>同样认为温度与剑水蚤各发育阶段的发育时间呈负相关, 温度高则剑水蚤的生长繁殖活跃, 数量增加。从本次调查的结果分析, 夏季出现的优势种裂足臂尾轮虫、微型裸腹蚤、跨立小剑水蚤以及枝角类总量与温度呈现正相关, 而冬季出现的优势物种长肢多肢轮虫、疣毛轮虫、犀轮虫与温度呈现负相关, 这与物种对温度适应的特异性有一定关系<sup>[47]</sup>, 裂足臂尾轮虫是一种喜温性的轮虫, 在夏季会大量出现<sup>[14]</sup>; 微型裸腹蚤也是嗜暖性的种类, 一般在四月到八月繁殖最快<sup>[15]</sup>; 跨立小剑水蚤由于温度对繁殖时间的影响, 温度高时种群数量大; 高温可以促进枝角类的生长, 低温会延缓其生长<sup>[15]</sup>; 而长肢多肢轮虫为狭冷性物种, 适应于在4—10℃的水体中生存, 而水温高于15℃时很难发现<sup>[14]</sup>; 本次调查中未确定到种类的疣毛轮虫和犀轮虫两个类群可能适应于偏冷的水体; 而角突臂尾轮虫属于广生性的种类<sup>[14]</sup>, 对温度的适应范围较宽, 夏冬两季均有出现, 因此水体温度不是决定其分布的主要环境因子。根据黄祥飞等的研究<sup>[25]</sup>, 绝大部分轮虫在15—25℃内, 其发育时间会随着温度的升高而缩短, 轮虫总数高峰一般在20℃以上时出现, 而本文结果显示, 夏季(28.9—35.5℃)轮虫总量低于冬季(4.6—5.6℃), 可能的原因在于温度并不是解释轮虫总丰度分布的最主要环境因子。

通过RDA分析, 发现轮虫总丰度和浮游动物总丰度与溶解氧正相关。Elliott<sup>[48]</sup>的研究发现在溶解氧浓度下降的情况下, 绝大多数轮虫种群密度降低, 仅极少数种类如螺形龟甲轮虫*Keratella cochlea-*

ris和长刺盖氏轮虫*Kellicottia longispina*等对溶解氧浓度适应范围较宽,在低氧情况下也能维持种群密度。浮游动物进行呼吸作用时需要消耗氧气,这也能解释浮游动物总丰度与溶解氧之间的正相关关系。由于夏季东湖溶解氧含量低于冬季,故轮虫及浮游动物总丰度在冬季高于夏季。

在本文中,pH的变化可以影响跨立小剑水蚤丰度大小,两者之间存在明显的正相关关系(图4)。跨立小剑水蚤对酸碱度的适度范围在pH7.0—9.0<sup>[16]</sup>,偏向于弱碱性水体,本次调查期间pH波动范围为6.69—7.85,故两者之间展现为正相关。pH对轮虫和枝角类丰度变化影响较小的原因在于轮虫常常表现出比较广泛的pH耐受性,绝大多数轮虫的生存pH范围至少有2.0个单位<sup>[49]</sup>;而枝角类各个种对水域pH各有不同的适应性,因此在酸性、中性和微碱性的水域中都有分布<sup>[15]</sup>,所以在不同pH环境下总丰度变化不大。桡足类总量与各环境因子的关系均不大,与张世羊等<sup>[37]</sup>的研究结果类似,说明桡足类对环境的抗逆性强,虽然个别物种会受到环境变动影响,但总量可以保持稳定。

除理化因子外,竞争和捕食也是影响浮游动物群落结构的重要因素。温新利等<sup>[50]</sup>指出,枝角类是与轮虫争夺食物的有力竞争对手,桡足类和鱼类是轮虫的捕食者。东湖夏季枝角类和桡足类丰度较高,可能与轮虫产生了较强的竞争和捕食关系;而冬季枝角类和桡足类受环境因子影响总量下降,对轮虫的限制减少,从而使得轮虫总量增加。此外,浮游动物是很多鱼类特别是我国的四大家鱼之一鳙的主要饵料,东湖鱼类的组成与产量对浮游动物群落结构也有重要的影响。本次调查中发现与往年相比,枝角类的数量下降非常明显(表7)。从该研究结果来看,东湖应该减少鳊鳙的放养密度,以逐步恢复水中的大型枝角类。

## 4 结论

本文通过对武汉东湖夏冬两季进行每周一次的生物样品采集及分析,发现夏冬两季东湖浮游动物群落结构存在明显差异,夏季物种数(43种)高于冬季(25种),夏季轮虫丰度及生物量小于冬季,而甲壳类丰度及生物量高于冬季。夏季发现3种优势物种,冬季发现4种优势物种,夏冬两季之间不存在共同优势物种。通过多样性指数对东湖水质进行评价,发现夏季浮游动物群落Margalef丰富度指数、Shannon-Wiener多样性指数和Simpson多样性指数均高于冬季,而夏冬两季Pielou均匀度指数差异不大,表明东湖夏季水质(中污染)优于冬季(重污

染)。对东湖夏冬两季环境因子变化与浮游动物群落结构之间的相关性进行分析,发现温度是影响浮游动物群落结构变化的最重要的环境因子。本文提供的部分物种图像信息及SSU rRNA序列信息为浮游动物的研究提供了参考资料。

然而需要指出的是,本次调查采样时长及地理位置有较大局限,不能完全反映整个武汉东湖浮游动物全年的分布和动态变化特征,物种图像及分子序列信息的采集工作也不够完整。在今后的研究中,应该增加采样范围,对更多物种提供更加全面的图像及分子序列信息,以期在未来建立一套可以随相关研究工作不断更新的、更具参考价值的浮游动物鉴定体系。

## 参考文献:

- [1] Wang S N, Chen W. A brief analysis of the species composition and ecological functions of freshwater zooplankton [J]. *Bulletin of Biology*, 2012, 47(10): 10-13. [王胜男, 陈卫. 浅析淡水浮游动物的种类组成及其生态功能作用 [J]. *生物学通报*, 2012, 47(10): 10-13.]
- [2] Aoyagui A S M, Bonecker C C. Rotifers in different environments of the Upper Paraná River floodplain (Brazil): richness, abundance and the relationship with connectivity [J]. *Hydrobiologia*, 2004, 522(1): 281-290.
- [3] Yan Q Y. DNA fingerprinting analysis of plankton community and its applications in ecological study [D]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2009: 72-74. [颜庆云. 浮游生物群落DNA指纹分析及其在生态学中的应用 [D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2009: 72-74.]
- [4] Li H Y, Shi Y T, Zeng Q F. Analysis and photocatalytic degradation for East Lake water sample [J]. *Journal of Wuhan Institute of Science and Technology*, 2002, 15(5): 51-53. [李海燕, 施银桃, 曾庆福. 东湖水质分析及光催化氧化降解研究 [J]. *武汉科技学院学报*, 2002, 15(5): 51-53.]
- [5] Rao Q Z, Zhang Z S. Ecology changes of phytoplankton in lake Dong Hu, Wuhan, during 1956-1975 and the eutrophication problem [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1980, 7(1): 1-17. [饶钦止, 章宗涉. 武汉东湖浮游植物的演变(1956-1975年)和富营养化问题 [J]. *水生生物学集刊*, 1980, 7(1): 1-17.]
- [6] Huang X F, Chen X M, Wu C T, et al. Studies on the changes in abundance and biomass of zooplankton in Lake Donghu Wuhan [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1984, 8(3): 345-358. [黄祥飞, 陈雪梅, 伍焯田, 等. 武汉东湖浮游动物数量和生物量变动的研究 [J]. *水生生物学集刊*, 1984, 8(3): 345-358.]
- [7] The provincial government approved a comprehensive pollution control plan for Donghu Lake [J]. *Environmen-*

- tal Science & Technology*, 1980(4): 65. [省政府批准东湖污染综合治理方案 [J]. 湖北环境保护, 1980(4): 65.]
- [8] Yang Y F, Huang X F. Structure of zooplankton community in Donghu Lake of Wuhan [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1994, **5**(3): 319-324. [杨宇峰, 黄祥飞. 武汉东湖浮游动物群落结构的研究 [J]. 应用生态学报, 1994, **5**(3): 319-324.]
- [9] Yang Y F, Huang X F, Liu J K, *et al.* Effects of fish stocking on the zooplankton community structure in a shallow lake in China [J]. *Fisheries Management and Ecology*, 2005, **12**(2): 81-89.
- [10] Yang Y F, Huang X F. Community analysis of crustacean zooplankton in main culture areas of Lake Donghu, Wuhan [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(3): 318-325. [杨宇峰, 黄祥飞. 武汉东湖主要养殖水域的浮游甲壳动物群落分析 [J]. 生态学报, 2002, **22**(3): 318-325.]
- [11] Lu M, Xie P. Comparative study on crustacean zooplankton communities in different areas in Lake Donghu, Wuhan [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2002, **26**(2): 123-129. [鲁敏, 谢平. 武汉东湖后湖区浮游甲壳动物群落结构的研究 [J]. 水生生物学报, 2002, **26**(2): 123-129.]
- [12] Lu M, Xie P. Comparative study on crustacean zooplankton communities in different areas in Lake Donghu, Wuhan [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2002, **33**(2): 174-181. [鲁敏, 谢平. 武汉东湖不同湖区浮游甲壳动物群落结构的比较 [J]. 海洋与湖沼, 2002, **33**(2): 174-181.]
- [13] Koste W. Rotatoria: Die Rädertiere Mitteleuropas [M]. Berlin: Publ. Gebrüder Borntraeger, 1978: 2-673.
- [14] Wang J J. Freshwater Rotifer Fauna in China [M]. Beijing: Science Press, 1961: 288. [王家楫. 中国淡水轮虫志 [M]. 北京: 科学出版社, 1961: 21-288.]
- [15] Jiang X Z, Du N S. Fauna of China (Freshwater Cladocera) [M]. Beijing: Science Press, 1979: 79-273. [蒋燮治, 堵南山. 中国动物志 (淡水枝角类) [M]. 北京: 科学出版社, 1979: 79-273.]
- [16] Crustacean Research Group, Institute of Zoology, Chinese Academy of Science. Fauna of China (Freshwater Copepoda) [M]. Beijing: Science Press, 1979: 53-420. [中国科学院动物研究所甲壳动物研究组. 中国动物志 (淡水桡足类) [M]. 北京: 科学出版社, 1979: 53-420.]
- [17] Fernando C H. The freshwater zooplankton of Sri Lanka, with a discussion of tropical freshwater zooplankton composition [J]. *International Review of Hydrobiology*, 2010, **65**(1): 85-125.
- [18] Huang X F. Quantitative methods of freshwater zooplankton [J]. *Reservoir Fisheries*, 1982(4): 52-59. [黄祥飞. 淡水浮游动物的定量方法 [J]. 水库渔业, 1982(4): 52-59.]
- [19] Medlin L, Elwood H J, Stickel S, *et al.* The characterization of enzymatically amplified eukaryotic 16S-like rRNA-coding regions [J]. *Gene*, 1988, **71**(2): 491-499.
- [20] Mentasti M, Fry N K, Afshar B, *et al.* Application of *Legionella pneumophila*-specific quantitative real-time PCR combined with direct amplification and sequence-based typing in the diagnosis and epidemiological investigation of Legionnaire' disease [J]. *European Journal of Clinical Microbiology & Infectious Diseases*, 2012, **31**(8): 2017-2028.
- [21] Smet W H D, Gibson J A E. *Rhinoglena kutikovaen* sp. (Rotifera: Monogononta: Epiphanidae) from the Bunger Hills, East Antarctica: a probable relict species that survived Quaternary glaciations on the continent [J]. *Polar Biology*, 2008, **31**(5): 595-603.
- [22] Nielsen D L, Shiel R J, Smith F J. Ecology versus taxonomy: is there a middle ground [J]. *Hydrobiologia*, 1998, (388): 451-457.
- [23] Guan S M, Gao B Q. COI sequence, the DNA barcode affecting animal taxonomy and ecology [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, **27**(8): 1406-1412. [关申民, 高邦权. COI序列: 影响动物分类学与生态学的DNA barcode [J]. 生态学杂志, 2008, **27**(8): 1406-1412.]
- [24] Cheng F P. Chinese offshore zooplankton species information platform and primary application [D]. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2013: 1-16. [程方平. 我国近海浮游动物物种信息平台的构建及初步应用 [D]. 中国科学院海洋研究所, 2013: 1-16.]
- [25] Shen Y F, Chen S Z. A preliminary observation on the seasonal variation of zooplanktons in Lake Donghu of Wuchang [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1965, **5**(2): 133-144. [沈韞芬, 陈受忠. 武昌东湖浮游动物数量季节变动的初步观察 [J]. 水生生物学集刊, 1965, **5**(2): 133-144.]
- [26] Huang X F, Hu C Y, Wu Z T. Rotifers in Lake Donghu, Wuhan [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1985, **9**(2): 129-143. [黄祥飞, 胡春英, 伍焯田. 武汉东湖的轮虫 [J]. 水生生物学报, 1985, **9**(2): 129-143.]
- [27] Wang J J, Wu C T, Ge M S. A preliminary observation on the seasonal variation of rotifers in Lake Donghu of Wuchang [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1965, **5**(2): 183-201. [王家楫, 伍焯田, 戈敏生. 武昌东湖轮虫种类与数量季节变动的初步观察 [J]. 水生生物学集刊, 1965, **5**(2): 183-201.]
- [28] Jiang X Z. Observation on species composition and quantity variation of cladocera in Lake Donghu of Wuchang [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1965, **5**(2): 220-239. [蒋燮治. 武昌东湖枝角类种类组成与数量变动的观察 [J]. 水生生物学集刊, 1965, **5**(2): 220-239.]
- [29] Yang Y F, Chen X M. Ecological changes of copepods in Lake Donghu, Wuhan [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1994, **18**(4): 334-340. [杨宇峰, 陈雪梅. 武汉东湖桡足类的生态学演变 [J]. 水生生物学报, 1994, **18**(4): 334-340.]
- [30] Liu J K, Huang X F. Summary of studies on the ecology of Lake Donghu [J]. *Environmental Science*, 1997(1): 51-53. [刘建康, 黄祥飞. 东湖生态学研究概况 [J]. 环境科

- 学, 1997(1): 51-53.]
- [31] Lin W L, Liu X Z. Elementary composition of some dominant zooplankters in Lake Donghu, Wuhan [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1985, **9**(3): 258-263. [林婉莲, 刘鑫洲. 武汉东湖优势浮游动物元素含量分析 [J]. 水生生物学报, 1985, **9**(3): 258-263.]
- [32] Zhu G Y, Huang X F. Species composition of rotifer with reference to some taxonomic aspects in Lake Donghu, Wuhan [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1993, **17**(4): 347-356. [诸葛燕, 黄祥飞. 武汉东湖轮虫种类组成及其分类讨论 [J]. 水生生物学报, 1993, **17**(4): 347-356.]
- [33] Kuang Q J, Xia J Z, Li Z S, *et al.* Comprehensive study on aquatic organisms and functions of water bodies of 4 lakes areas with different trophic states in Lake Donghu, Wuhan [J]. *Journal of Lake Sciences*, 1997, **9**(3): 249-254. [况琪军, 夏宜琤, 李植生, 等. 武汉东湖不同营养型子湖的水生生物与水域功能 [J]. 湖泊科学, 1997, **9**(3): 249-254.]
- [34] Liu P P, Wang L, Wang P, *et al.* The characteristics of zooplankton community and water quality in the Shaying River basin [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2018, **42**(2): 373-381. [刘盼盼, 王龙, 王培, 等. 沙颍河流域浮游动物群落结构空间变化特征与水质评价 [J]. 水生生物学报, 2018, **42**(2): 373-381.]
- [35] Xiao F S, Bi Y H, Li X H, *et al.* The impact of anthropogenic disturbance on bacterioplankton communities during the construction of Donghu tunnel (Wuhan, China) [J]. *Microbial Ecology*, 2018, **77**(2): 277-287.
- [36] Vladimír S. Rotifers as indicators of water quality [J]. *Hydrobiologia*, 1983, **100**(1): 169-201.
- [37] Segers H. Global diversity of rotifers (Rotifera) in freshwater [J]. *Hydrobiologia*, 2008, **595**(1): 49-59.
- [38] Wang Y L, Zhang Q. Species and distribution of zooplankton in Nanhu Lake, Shangqiu city [J]. *Journal of Shangqiu Normal University*, 2018, **34**(6): 40-44. [王玉玲, 张霁. 商丘市南湖浮游动物种类与分布研究 [J]. 商丘师范学院学报, 2018, **34**(6): 40-44.]
- [39] Xu Q, Zhang F, Xu Z Q, *et al.* Some characteristics of Simpson index and the Shannon-Wiener index and their dilution effect [J]. *Prataculatural Science*, 2011, **28**(4): 527-531. [许晴, 张放, 许中旗, 等. Simpson指数和Shannon-Wiener指数若干特征的分析及“稀释效应” [J]. 草业科学, 2011, **28**(4): 527-531.]
- [40] Wang S, Yu M, Liu Q R, *et al.* Phytoplankton species composition and biodiversity in Dongjiang River [J]. *Resources Science*, 2013, **35**(3): 473-480. [王珊, 于明, 刘全儒, 等. 东江干流浮游植物的物种组成及多样性分析 [J]. 资源科学, 2013, **35**(3): 473-480.]
- [41] Zhang S Y, Zhou Q H, Cheng S P, *et al.* Zooplankton species richness and impact factors in a compound aquaculture system [J]. *China Environmental Science*, 2009, **29**(7): 745-750. [张世羊, 周巧红, 成水平, 等. 复合养殖系统中浮游动物种类丰度及其影响因素 [J]. 中国环境科学, 2009, **29**(7): 745-750.]
- [42] Feng S M, Wu M S, Xiong L, *et al.* The research of dynamic succession of zooplankton and its correlation with environmental factors in Taiping Lake [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2017, **41**(3): 700-711. [冯世敏, 吴明姝, 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.]
- [43] Yang D Z, Xu X D, Liu X R, *et al.* The atmospheric-soil-water pollution process in miyun reservoir area is a compound correlation source [J]. *Science in China*, 2005, **35**(A01): 195-205. [杨东贞, 徐祥德, 刘晓端, 等. 密云水库区域大气-土-水污染过程复合相关源 [J]. 中国科学: 地球科学, 2005, **35**(A01): 195-205.]
- [44] Record N R, Pershing A J, Jossi J W. Biodiversity as a dynamic variable in the gulf of maine continuous plankton recorder transect [J]. *Journal of Plankton Research*, 2010, **32**(12): 1675-1684.
- [45] Gillooly J F. Effect of body size and temperature on generation time in zooplankton [J]. *Journal of Plankton Research*, 2000, **22**(2): 241-251.
- [46] Cui F Y, Lin T, Ma F, *et al.* Excess propagation and ecological control of water flea of zooplankton in raw water [J]. *Journal of Harbin Institute of technology*, 2002, **34**(3): 399-403. [崔福义, 林涛, 马放, 等. 水源中水蚤类浮游动物的孳生与生态控制研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2002, **34**(3): 399-403.]
- [47] Herzig A. The analysis of planktonic rotifer populations: A plea for long-term investigations [J]. *Hydrobiologia*, 1987, **147**(1): 163-180.
- [48] Elliott J I. Seasonal changes in the abundance and distribution of planktonic rotifers in Grasmere (English Lake District) [J]. *Freshwater Biology*, 1977, **7**(2): 147-166.
- [49] Bruno B, Pejler B. Rotifer occurrence in relation to pH [J]. *Hydrobiologia*, 1987, **147**(1): 107-116.
- [50] Wen X L, Xi Y L, Zhang L, *et al.* Analysis of community structure of rotifera and ecological assessment of water quality in Lake Jinghu, Wuhu city [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, **30**(2): 152-158. [温新利, 席贻龙, 张雷, 等. 芜湖市镜湖轮虫群落结构分析及水质的生态学评价 [J]. 水生生物学报, 2006, **30**(2): 152-158.]

## SPECIES DIVERSITY AND COMMUNITY STRUCTURE OF ZOOPLANKTON IN SUMMER AND WINTER IN THE EAST LAKE, WUHAN

WANG Yu-Lu<sup>1</sup>, YUAN Dan-Ni<sup>2</sup>, YUAN Guo-Qing<sup>3</sup>, FENG Wei-Song<sup>2</sup> and GONG Ying-Chun<sup>2</sup>

(1. College of Life Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 3. Wuhan University of Bioengineering, Wuhan 430415, China)

**Abstract:** This study investigated the zooplankton community in the East Lake in July, August, December 2018 and January 2019 and identified a total of 50 species of the zooplankton belonged to 35 genera, including 37 Rotifera belonged to 22 genera, 10 Cladocera belonged to 10 genera, and 3 copepoda belonged to 2 genera. The dominant species were *Microcyclops varicans*, *Brachionus diversicornis*, and *Moina micrura* in summer and *Polyarthra dolichoptera*, *Synchaeta* spp., *Brachionus angularis*, and *Rhinoglena* sp. in winter. The image information of all observed zooplankton was collected, and the SSU rRNA gene sequences of dominant species were determined to provide reference data for the identification of freshwater zooplankton. According to the historical data about zooplankton in Wuhan East Lake, the number of zooplankton species in the East Lake has decreased gradually in the past few decades, and the dominant species of rotifers have changed from oligosaprophyte to beta-mesosaprobity or even alpha-mesosaprobity. The zooplankton community structure in East Lake was significantly different in summer and winter. The rotifer density (56.2 ind./L) and biomass (0.2188 mg/L) in summer were lower than those in winter (476.3 ind./L, 0.4415 mg/L), while the crustacean density (137.8 ind./L) and biomass (2.8831 mg/L) were higher than those in winter (53.1 ind./L, 1.1187 mg/L). The Margalef richness index, Shannon-Wiener diversity index and Simpson diversity index of the zooplankton community in summer were higher than those in winter. The Pielou evenness index is not different between summer and winter. The water quality evaluation showed that the water quality in summer (moderately polluted) was better than that in winter (heavily polluted). There were significant differences in temperature, dissolved oxygen, pH, salinity and ORP between summer and winter. Redundancy Analysis (RDA) indicated that temperature had the greatest influence on zooplankton community structure.

**Key words:** the East Lake; Zooplankton; Species diversity; Community structure



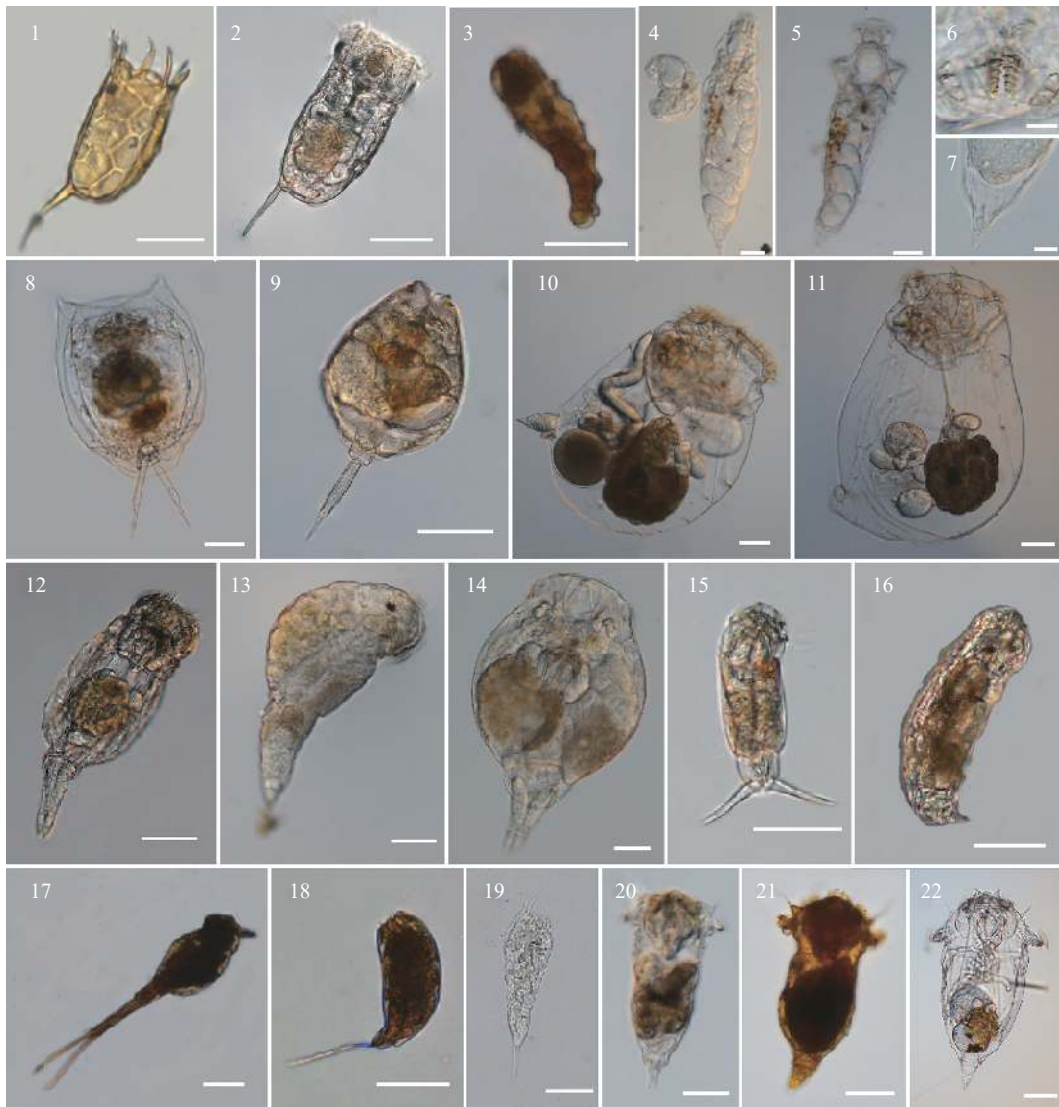


图版 I 东湖水体中分离获得的浮游动物的形态学观察图片(标尺: 1、3—13为50  $\mu\text{m}$ ; 2为20  $\mu\text{m}$ )

Plate I Pictures of zooplankton isolated from the East Lake (Scale bars: 50  $\mu\text{m}$  for 1, 3—13; 20  $\mu\text{m}$  for 2)

1. 转轮虫; 2. (转轮虫)趾; 3. 尖尾鞍甲轮虫; 4. 盘状鞍甲轮虫; 5. 壶状臂尾轮虫; 6. 剪形臂尾轮虫; 7—8. 裂足臂尾轮虫; 9—10. 萼花臂尾轮虫; 11. 矩形臂尾轮虫; 12. 方形臂尾轮虫; 13—14. 角突臂尾轮虫; 15. 竖琴须足轮虫; 16. 大肚须足轮虫; 17. 裂痕龟纹轮虫; 18. 螺旋形龟甲轮虫。其中1、2、5—7、9—12、14—16、18为活体观察, 3、4、8、13、17经鲁哥染色后观察

1. *Rotaria rotatoria*; 2. (*Rotaria rotatoria*) toes; 3. *Lepadella ovalis*; 4. *Lepadella patella*; 5. *Brachionus urceus*; 6. *Brachionus forficula*; 7—8. *Brachionus diversicornis*; 9—10. *Brachionus calyciflorus*; 11. *Brachionus leydigi*; 12. *Brachionus quadridentatus*; 13—14. *Brachionus angularis*; 15. *Euchlanis lyra*; 16. *Euchlanis dilalata*; 17. *Anuraeopsis fissa*; 18. *Keratella cochlearis*. Among them, 1, 2, 5—7, 9—12, 14—16, 18 are observed *in vivo*, 3, 4, 8, 13, 17 are observed after staining with Lug's iodine solution



图版 II 东湖水体中分离获得的浮游动物的形态学观察图片(续)(标尺: 1—5、8—9、11—22为50  $\mu\text{m}$ , 6—7为10  $\mu\text{m}$ , 10为100  $\mu\text{m}$ )

Plate II Pictures of zooplankton isolated from the East Lake (Continued) (Scale bars: 50  $\mu\text{m}$  for 1—5, 8—9, and 11—22; 10  $\mu\text{m}$  for 6—7; 100  $\mu\text{m}$  for 10)

1—2. 曲腿龟甲轮虫; 3. 微型多突轮虫; 4—5. 犀轮虫; 6. (犀轮虫)咀嚼器; 7. (犀轮虫)趾; 8. 蹄形腔轮虫; 9. 囊形单趾轮虫; 10. 多突囊足轮虫; 11. 卜氏晶囊轮虫; 12. 眼镜柱头轮虫; 13. 圆盖柱头轮虫; 14. 椎轮属; 15—16. 巨头轮属; 17. 高蹠轮虫; 18. 暗小异尾轮虫; 19. 等棘异尾轮虫; 20—21. 疣毛轮属; 22. 梳状疣毛轮虫. 其中2、4—16、19、20、22为活体观察, 1、3、17、18、21经鲁哥染色后观察

1—2. *Keratella valga*; 3. *Liliferotrocha subtails*; 4—5. *Rhinoglena* sp.; 6. (*Rhinoglena* sp.) trophus; 7. (*Rhinoglena* sp.) toes; 8. *Lecane ungulata*; 9. *Monostyla bulla*; 10. *Asplanchnopus multiceps*; 11. *Asplanchna brightwelli*; 12. *Eoaphora najas*; 13. *Eosphora thoa*; 14. *Notommata* sp.; 15—16. *Cephalodella* spp.; 17. *Scaridium longicaudum*; 18. *Trichocerca pusilla*; 19. *Trichocerca similis*; 20—21. *Synchaeta* spp.; 22. *Synchaeta pectinata*. Among them, 2, 4—16, 19, 20, 22 are observed *in vivo*, 1, 3, 17, 18, 21 are observed after staining with Lug's iodine solution

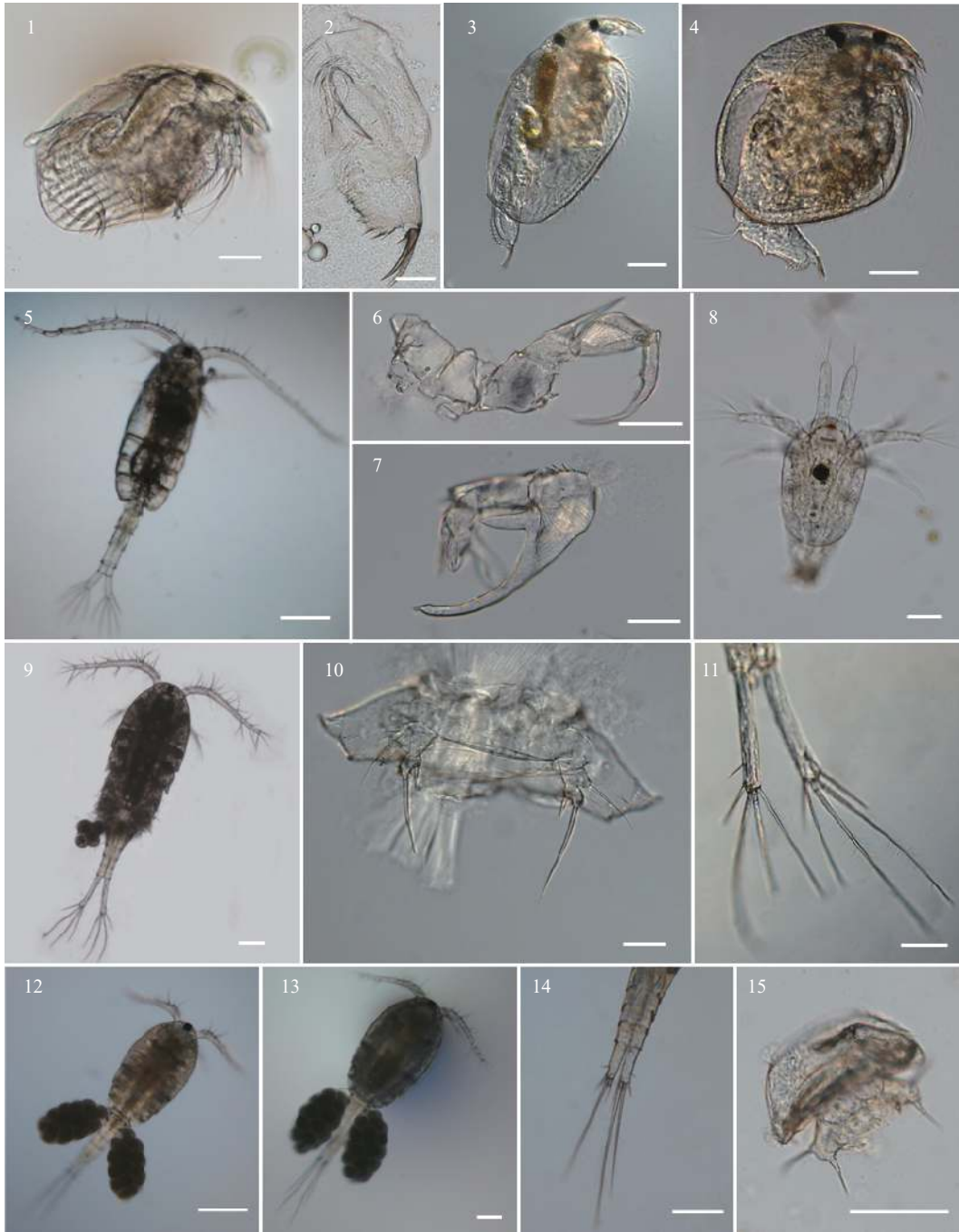


图版 III 东湖水体中分离获得的浮游动物的形态学观察图片(续)(标尺: 2、3、8、11、12、15、16、21为20 μm; 1、4—7、17、19为50 μm; 10、13、14、18为100 μm; 9为200 μm)

Plate III Pictures of zooplankton isolated from the East Lake (Continued) (Scale bars: 20 μm for 2, 3, 8, 11, 12, 15, 16, 21; 50 μm for 1, 4—7, 17, 19; 100 μm for 10, 13, 14, 18; 200 μm for 9)

1. 长肢多肢轮虫; 2. (长肢多肢轮虫)附肢; 3. (长肢多肢轮虫)腹小鳍; 4. 角三肢轮虫; 5. 端生三肢轮虫; 6. 奇异六腕轮虫; 7. 敞水胶鞘轮虫; 8. 休眠卵; 9. 晶莹仙达蚤; 10. 短尾秀体蚤; 11. (短尾秀体蚤)尾爪; 12. (短尾秀体蚤)第一触角; 13. 壳纹船卵蚤; 14. 微型裸腹蚤; 15. (微型裸腹蚤)第一触角; 16. (微型裸腹蚤)尾爪; 17. (微型裸腹蚤)第二触角; 18. 长额象鼻蚤; 19. (长额象鼻蚤)额毛; 20. 底栖泥蚤; 21. (底栖泥蚤)尾爪及肛门; 其中除4为经鲁哥染色后观察外, 其余均为活体观察

1. *Polyarthra dolichoptera*; 2. (*Polyarthra dolichoptera*) appendage; 3. (*Polyarthra dolichoptera*) ventral fin; 4. *Filinia cornuta*; 5. *Filinia terminalis*; 6. *Hexarthra mira*; 7. *Collotheca pelagica*; 8. rotifer resting egg; 9. *Sida crystallina*; 10. *Diaphanosoma brachyurum*; 11. (*Diaphanosoma brachyurum*) post-abdominal claw; 12. (*Diaphanosoma brachyurum*) first tentacles; 13. *Scapholeberis kingi*; 14. *Moina micrura*; 15. (*Moina micrura*) the first tentacles; 16. (*Moina micrura*) post—abdominal claw; 17. (*Moina micrura*) second tentacles; 18. *Bosmina longirostris*; 19. (*Bosmina longirostris*) front hair; 20. *Ilyocryptus sordidus*; 21. (*Ilyocryptus sordidus*) post—abdominal claw and anus. Among them, 1—3, 5—21 are observed in vivo, 4 is observed after staining with Lug's iodine solution



图版 IV 东湖中分离的浮游动物的形态学观察图片(续)(标尺: 1为100  $\mu\text{m}$ ; 2为20  $\mu\text{m}$ ; 3、4、6—8、10、11、14、15为50  $\mu\text{m}$ ; 5、9、12、13为200  $\mu\text{m}$ )

Plate IV Pictures of zooplanktons isolated from the East Lake (Continued) (Scale bars: 100  $\mu\text{m}$  for 1; 20  $\mu\text{m}$  for 2; 50  $\mu\text{m}$  for 3, 4, 6—8, 10, 11, 14, 15; 200  $\mu\text{m}$  for 5, 9, 12, 13)

1. 矩型尖额蚤; 2. (矩型尖额蚤)尾爪; 3. 吻状异尖额蚤; 4. 圆形盘肠蚤; 5. 球状许水蚤; 6—7. (球状许水蚤)第五胸足; 8. 无节幼体; 9. 近邻剑水蚤; 10. (近邻剑水蚤)第五胸足; 11. (近邻剑水蚤)尾刚毛; 12—13. 跨立小剑水蚤; 14. (跨立小剑水蚤)尾刚毛; 15. (跨立小剑水蚤)第五胸足; 其中1—15均为活体观察

1. *Alona rectangula*; 2. (*Alona rectangula*) post-abdominal claw; 3. *Disparalona rostrata*; 4. *Chydorus sphaericus*; 5. *Schmackeria forbesi*; 6—7. (*Schmackeria forbesi*) the fifth thoracic legs; 8. nauplius; 9. *Cyclops vicinus*; 10. (*Cyclops vicinus*) the fifth thoracic legs; 11. (*Cyclops vicinus*) caudal setae; 12—13. *Microcyclops varicans*; 14. (*Microcyclops varicans*) abdominal setae; 15. (*Microcyclops varicans*) the fifth thoracic legs. All of them are observed *in vivo*