

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.01.012

# 淮北采煤塌陷区两个小型湖泊轮虫的群落结构特征

杨 威<sup>1</sup>, 张婷婷<sup>2</sup>, 孙雨琛<sup>2</sup>, 刘 琪<sup>2</sup>, 邓道贵<sup>2</sup>, 金显文<sup>2</sup>

(1. 淮北师范大学信息学院, 安徽 淮北 235000; 2. 淮北师范大学生命科学学院, 安徽 淮北 235000)

**摘要:**于2017年4月、7月、10月和2018年1月对淮北采煤塌陷区东湖和刘桥湖两个小型湖泊进行采样调查,探讨轮虫群落结构的季节变化及其与环境因子的关系。东湖共记录轮虫13科15属32种,刘桥湖共记录10科12属25种。东湖轮虫的年平均密度和生物量(2722个/L和3.04 mg/L)明显高于刘桥湖(1311个/L和1.30 mg/L);东湖主要优势种为刺盖异尾轮虫、暗小异尾轮虫、长肢多肢轮虫、长三肢轮虫、广布多肢轮虫和螺形龟甲轮虫,刘桥湖主要优势种为暗小异尾轮虫、长肢多肢轮虫、小链巨头轮虫、广布多肢轮虫、螺形龟甲轮虫和迈氏三肢轮虫;东湖和刘桥湖水体呈中度富营养状态;水温、总氮、总磷和叶绿素a质量浓度是影响两湖轮虫群落结构变化的重要因素,鲢、鳙鱼的捕食压力间接影响了两湖轮虫群落结构的变化。

**关键词:**轮虫;群落结构;采煤塌陷区;小型湖泊;东湖;刘桥湖

中图分类号:Q178.1<sup>1+1</sup>; TV213.3 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2020)01-0082-07

**Community structure of rotifer in two small lakes of Huabei excavating coal subsidence region // YANG Wei<sup>1</sup>, ZHANG Tingting<sup>2</sup>, SUN Yuchen<sup>2</sup>, LIU Qi<sup>2</sup>, DENG Daogui<sup>2</sup>, JIN Xianwen<sup>2</sup> (1. Information College, Huabei Normal University, Huabei 235000, China; 2. School of Life Science, Huabei Normal University, Huabei 235000, China)**

**Abstract:** Sampling surveys were conducted in April, July, October 2017 and January 2018 in two small lakes (Donghu Lake and Liuqiao Lake) of Huabei excavating coal subsidence region to explore the seasonal variation of Rotifer community structure and its relationship with environmental factors. A total of 32 species belonging to 15 Genera and 13 families of rotifers were recorded in Donghu Lake, and 25 species belonging to 12 Genera and 10 families were recorded in Liuqiao Lake. The annual average density and biomass of rotifer in Donghu Lake (2722 ind./L and 3.04 mg/L) were significantly higher than that in Liuqiao Lake (1311 ind./L and 1.30 mg/L). The dominant species in Donghu Lake are *Trichocerca capucina*, *Trichocerca pusilla*, *Filinia longisetata*, *Polyarthra dolichoptera*, *Polyarthra vulgaris* and *Keratella cochlearis*, whereas *T. pusilla*, *P. dolichoptera*, *Cephalodella exigna*, *P. vulgaris*, *K. cochlearis* and *Filinia maio* dominated in Liuqiao Lake. The Lake Donghu and Lake Liuqiao were moderate eutrophication status. Water temperature, total nitrogen, total phosphorus and chlorophyll-a concentration are the important factors affecting the change of the community structure of rotifers in the two lakes. The predation pressure of *Hypophthalmichthys molitrix* and *Aristichthys nobilis* indirectly affected the community structure of rotifers in the two lakes.

**Key words:** rotifer; community structure; excavating coal subsidence region; small lake; Donghu Lake; Liuqiao Lake

淮北市位于安徽省北部,属于典型的暖温带半湿润季风气候区,年平均气温14.8℃,年均降水量约800 mm,年蒸发量1700~1900 mm<sup>[1]</sup>。淮北市煤炭资源丰富,累计探明储量80.47亿t<sup>[2]</sup>。随着煤炭资源的大量开采,造成了大面积采煤塌陷区,2015年淮北煤矿塌陷面积为167 km<sup>2</sup>,其中形成的湖泊面

积约40 km<sup>2</sup><sup>[3]</sup>。大面积的塌陷,不仅改变了地貌,而且使生态系统结构和功能发生根本性改变,对局部区域生态环境也产生了较大的影响<sup>[1,4]</sup>。目前,煤矿塌陷湖泊作为水源保护地、渔业活动区和湿地生态恢复区,营养状况差异较大<sup>[5]</sup>。随着采煤塌陷区的不断扩展和矿区生态环境的持续恶化,一些塌陷

基金项目:安徽省高校优秀青年人才支持计划(gxyq2019169);安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2017A842);安徽高校科研平台创新团队项目(KJ2015TD001);安徽省大学生创新创业项目(201813620010)

作者简介:杨威(1985—),男,讲师,硕士,主要从事浮游生物生态学研究。E-mail: yangwei851025@163.com

通信作者:金显文,副教授。E-mail: jinxianwen@126.com

湖泊出现了富营养化或严重污染<sup>[6]</sup>。

轮虫是浮游动物的重要组成部分,处于食物网的中间环节,主要以浮游植物、原生动物和细菌等为食,而轮虫又是鱼类的重要食物来源,因此轮虫在水生态系统的物质循环和能量流动中具有重要的作用<sup>[7]</sup>。轮虫分布广、个体小、发育快,对环境反应灵敏,是良好的水环境指示生物,其种类组成能较好地反映水体富营养水平、理化特征和生境多样性<sup>[8]</sup>。

与淮南、淮北煤矿塌陷湖泊相比,淮南焦岗湖轮虫有51种,明显高于淮南迪沟湖的38种、淮北南湖的14种和淮北乾隆湖的27种;就优势种而言,焦岗湖主要优势种为前节晶囊轮虫、螺形龟甲轮虫和针簇多枝轮虫,而迪沟湖为萼花臂尾轮虫、角突臂尾轮虫和曲腿龟甲轮虫,南湖和乾隆湖为长肢多肢轮虫、暗小异尾轮虫和裂痕龟纹轮虫<sup>[6,9-10]</sup>。煤矿塌陷湖泊浮游生物演替不同于一般的湖泊,随着水体富营养化的加剧,浮游动物种类减少,而粉煤灰污染明显降低了轮虫的种群密度<sup>[11-12]</sup>。可见,深入开展煤矿塌陷湖泊轮虫的群落结构特征研究具有重要的科学价值,为此本文通过对淮北采煤塌陷区两个小型湖泊东湖和刘桥湖轮虫的群落结构调查,探讨轮虫群落结构的变化及其与环境因子的关系,以期为煤矿塌陷湖泊渔业资源的可持续利用、水质监测、水生态系统的科学管理提供参考。

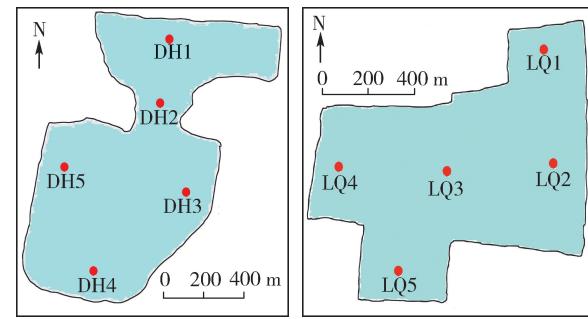
## 1 材料与方法

### 1.1 采样区和采样时间

东湖和刘桥湖是淮北矿区采煤塌陷形成的两个小型封闭型湖泊。东湖(33°59'N, 116°51'E)位于淮北市杜集区,塌陷时间约20 a,集水面积1.9 km<sup>2</sup><sup>[13]</sup>,水生植被较为丰富。刘桥湖(33°54'N, 116°39'E)位于淮北市刘桥镇,塌陷时间约15 a,集水面积2.78 km<sup>2</sup><sup>[14]</sup>,2012年刘桥湖水质达到轻度-中度富营养化状态<sup>[15]</sup>。根据两湖的形态特征,每个湖泊设置5个采样点(图1),分别于2017年4月、7月、10月和2018年1月进行采样调查。

### 1.2 样品的采集、处理及理化指标的测定

采集轮虫定性样品时,将25号浮游生物网(64 μm)在水面下约0.5 m处呈“∞”形缓慢拖行3~5 min,将定性样品放入50 mL小塑料瓶中,用4%的甲醛溶液固定。采集轮虫定量样品时,根据采样点的水深,用5 L有机玻璃采水器分3层(表层、中层和底层)进行采集,每层取5 L水样,混合后取1 L水样,现场用Lugol氏液固定,带回实验室沉淀48 h后,移去上清液,浓缩至50 mL。



(a) 东湖  
(b) 刘桥湖

Fig. 1 The location of sampling sites in Donghu Lake and Liuqiao Lake

水温和pH值用pH计(Hach,美国)现场测定,透明度(SD)使用透明盘现场测定。总氮(TN)用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定,总磷(TP)用过硫酸钾消解紫外分光光度法测定,叶绿素a(Chl-a)质量浓度参照章宗涉等<sup>[16]</sup>的研究方法测定。

### 1.3 样品分析与鉴定

定性样品在实验室通过镜检鉴定其种类。轮虫定量样品用1 mL浮游生物计数框在显微镜下全部计数,每个样品计数2片,取平均值,种群密度以“个/L”表示。轮虫的种类主要参照《中国淡水轮虫志》<sup>[17]</sup>鉴定,轮虫生物量参照章宗涉等<sup>[16]</sup>的研究方法估算。

### 1.4 轮虫的物种多样性和数据分析方法

轮虫的物种多样性采用Shannon指数 $H'$ <sup>[18]</sup>和Margalef指数 $D$ 表示,优势种采用优势度指数 $Y$ 表示,计算公式分别为

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

$$D = (S - 1) / \ln \rho \quad (2)$$

$$Y = \rho f_i / \rho \quad (3)$$

式中: $S$ 为种类总数; $p_i$ 为第*i*种轮虫密度占轮虫总密度的比例; $\rho$ 为第*i*种轮虫的密度; $f_i$ 为第*i*种轮虫出现的频率; $\rho$ 为所有轮虫的总密度。其中 $0 \leq H' < 1$ 为重度污染, $1 \leq H' < 2$ 为中度污染, $2 \leq H' < 3$ 为轻度污染, $H' \geq 3$ 为无污染<sup>[19]</sup>; $0 \leq D < 1$ 为重度污染, $1 \leq D < 2$ 为中度污染, $2 \leq D < 3$ 为轻度污染, $D \geq 3$ 为无污染<sup>[4,20]</sup>; $Y \geq 0.02$ 的种类确定为优势种<sup>[21]</sup>。

采用修正的卡尔森营养状态指数 $T_M$ 评价东湖和刘桥湖营养化类型。 $T_M$ 采用0~100的连续数值对湖泊营养状态分级,其中 $T_M \leq 30$ 为贫营养, $30 < T_M \leq 50$ 为中营养, $50 < T_M \leq 100$ 为富营养<sup>[22-23]</sup>。计算公式为

$$T_M(\text{Chl-a}) = 10 \left[ 2.46 + \frac{\ln \rho(\text{Chl-a})}{\ln 2.5} \right] \quad (4)$$

$$T_M(\text{SD}) = 10 \left( 2.46 + \frac{3.69 - 1.53 \ln t_{\text{SD}}}{\ln 2.5} \right) \quad (5)$$

$$T_M(\text{TP}) = 10 \left[ 2.46 + \frac{6.71 + 1.15 \ln \rho(\text{TP})}{\ln 2.5} \right] \quad (6)$$

$$T_M = 0.54 T_M(\text{Chl-a}) + 0.297 T_M(\text{SD}) + 0.163 T_M(\text{TP}) \quad (7)$$

式中;  $\rho(\text{Chl-a})$  为叶绿素 a 的质量浓度,  $\mu\text{g/L}$ ;  $t_{\text{SD}}$  为透明度,  $\text{m}$ ;  $\rho(\text{TP})$  为总磷质量浓度,  $\text{mg/L}$ 。

采用 SPSS 17.0 统计软件分析两湖轮虫密度和环境因子的相关性, 用 One-way ANOVA 分析轮虫密度、生物量、水体理化因子和生物多样性指数的季节差异。用统计软件 CANOCO 4.5 进行冗余分析, 以揭示轮虫密度和环境因子的关系, 所有数据均进行  $\ln(x+1)$  转换。

## 2 结果与分析

### 2.1 理化因子

刘桥湖和东湖的总氮和总磷质量浓度均在冬春季较低、夏秋季较高, 并具有显著的季节差异 ( $P < 0.05$ )。东湖总氮和总磷的平均质量浓度分别为  $1.52 \text{ mg/L}$  和  $0.14 \text{ mg/L}$ , 刘桥湖总氮和总磷的平均质量浓度分别为  $1.35 \text{ mg/L}$  和  $0.13 \text{ mg/L}$ 。东湖的透明度和 pH 值均高于刘桥湖, 两湖的水温在夏季最高, 冬季最低。东湖叶绿素 a 质量浓度在秋季最高, 年平均值为  $55.8 \mu\text{g/L}$ , 刘桥湖叶绿素 a 质量浓度在夏季最高, 年平均值为  $59.0 \mu\text{g/L}$ 。

### 2.2 轮虫种类组成及优势种的季节变化

两湖共记录轮虫 13 科 16 属 33 种, 其中东湖 13 科 15 属 32 种, 刘桥湖 10 科 12 属 25 种(表 1)。东湖夏季和秋季主要优势种为刺盖异尾轮虫、暗小异尾轮虫、长肢多肢轮虫和长三肢轮虫, 冬季和春季为长肢多肢轮虫、广布多肢轮虫和螺形龟甲轮虫; 刘桥湖夏季和秋季主要优势种为暗小异尾轮虫、长肢多肢轮虫和小链巨头轮虫, 冬季和春季为长肢多肢轮虫、广布多肢轮虫、螺形龟甲轮虫和迈氏三肢轮虫。

东湖暗小异尾轮虫和长肢多肢轮虫的年平均密度分别为 790 个/L 和 590 个/L, 分别占轮虫总密度的 29% 和 22%; 暗小异尾轮虫的最大密度 (1935 个/L) 出现在夏季, 长肢多肢轮虫的最大密度 (1220 个/L) 出现在秋季。刘桥湖暗小异尾轮虫、长肢多肢轮虫和小链巨头轮虫的年平均密度分别为 361 个/L、300 个/L 和 138 个/L, 分别占轮虫总密度的 28%、23% 和 11%; 暗小异尾轮虫和长肢多肢轮虫的最大密度 (1315 个/L 和 595 个/L) 均出现在夏季(图 2)。

表 1 东湖和刘桥湖轮虫种类组成和优势种

Table 1 Species composition and dominant species of rotifer in Donghu Lake and Liuqiao Lake

种名	东湖				刘桥湖			
	春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季
刺盖异尾轮虫 (Tc)	++	++	++		++	+		
韦氏异尾轮虫	+		+		+	+		
等刺异尾轮虫	+	+	+		+			
暗小异尾轮虫 (Tp)	++	++	++		++	++	+	
前额犀尾轮虫 (Rf)	+					+	++	
长肢多肢轮虫 (Pd)	++	++	++	++	++	++	++	
广布多肢轮虫 (Pv)	++	+	++		++	+	++	++
红多肢轮虫 (Pr)	+	++				+	+	
小多肢轮虫 (Pm)	+	+	++		+	++	++	
螺形龟甲轮虫 (Kc)			+	++	++	+		++
曲腿龟甲轮虫	+	+						+
矩形龟甲轮虫			+	+				
萼花臂尾轮虫 (Bc)	+	++	+	+	++	+	+	
壶状臂尾轮虫 (Bu)	++	+	++		++	+	+	
剪形臂尾轮虫 (Bf)	++							
裂足臂尾轮虫 (Bd)	+	+	+	+	++	+	+	
角突臂尾轮虫 (Ba)	+	+	++		++			
长三肢轮虫 (Fl)	+	++	++	+	+	+	+	+
小三肢轮虫 (Fm)	++							+
臂三肢轮虫 (Fb)	+	+					+	++
迈氏三肢轮虫 (Fa)	+				++	+		
沟痕泡轮虫	+							
扁平泡轮虫 (Pc)	++							
奇异六腕轮虫	+	+						+
单趾轮虫 (Ma)	+	++						
月形腔轮虫	+		+					+
卜氏晶囊轮虫	+	+	+	+	+	+	+	
前节晶囊轮虫 (Ap)	++	+	++	+	+	+	++	
长足轮虫	+	+	+	+				
舞跃无柄轮虫	+							
颤动疣毛轮虫 (St)	++							
椎轮虫	+		+					+
小链巨头轮虫 (Ce)	+	+	+		++	++	++	

注: + 为常见种; ++ 为优势种。

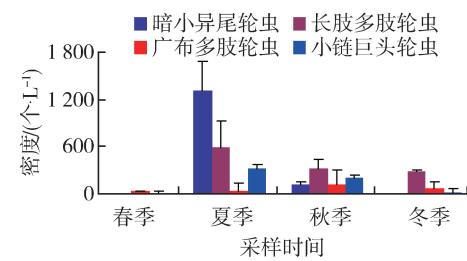
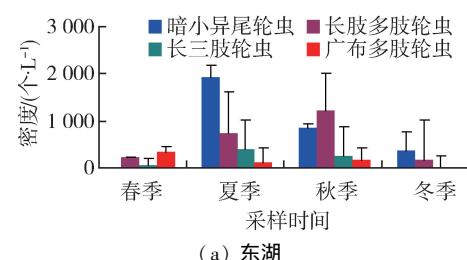


图 2 东湖和刘桥湖轮虫主要优势种密度的季节变化

Fig. 2 Seasonal variations of the main dominant species density of rotifer in Donghu Lake and Liuqiao Lake

## 2.3 轮虫密度和生物量的季节动态

东湖和刘桥湖轮虫密度和生物量的季节差异均显著( $P < 0.05$ )。东湖轮虫的年平均密度和生物量(2722个/L和3.04 mg/L)明显高于刘桥湖(1311个/L和1.30 mg/L)。东湖最大密度和生物量(4873个/L和6.28 mg/L)分别出现在夏季和秋季,最小值(1100个/L和0.67 mg/L)分别出现在春季和冬季。刘桥湖最大密度和生物量(3060个/L和2.54 mg/L)分别出现在夏季和秋季,最小值(430个/L和0.16 mg/L)分别出现在春季和冬季(图3)。

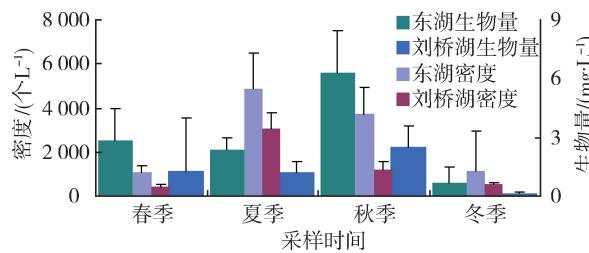


图3 东湖和刘桥湖轮虫密度和生物量的季节变化

Fig.3 Seasonal variations of the density and biomass of rotifer in Donghu Lake and Liuqiao Lake

Pearson 相关分析表明,东湖轮虫的密度与总磷( $P < 0.01$ )、水温( $P < 0.01$ )和叶绿素a质量浓度( $P < 0.01$ )均呈极显著正相关关系,与总氮( $P < 0.05$ )显著正相关;刘桥湖轮虫的密度与总氮( $P < 0.001$ )和叶绿素a质量浓度( $P < 0.001$ )呈极显著正相关关系,与水温( $P < 0.05$ )显著正相关,与总磷无相关性。

表2 东湖和刘桥湖轮虫多样性指数和 $T_M$ 值的季节变化

Table 2 Seasonal variations of diversity index and  $T_M$  of rotifer in Donghu Lake and Liuqiao Lake

季节	$H'$		$D$		$T_M$	
	东湖	刘桥湖	东湖	刘桥湖	东湖	刘桥湖
春季	1.68 ± 0.33	1.27 ± 0.19	0.94 ± 0.26	0.50 ± 0.12	57.3 ± 1.0	65.4 ± 1.8
夏季	1.99 ± 0.11	1.68 ± 0.14	1.58 ± 0.24	1.10 ± 0.13	75.3 ± 0.9	77.3 ± 0.7
秋季	2.00 ± 0.36	2.09 ± 0.16	1.68 ± 0.24	1.51 ± 0.12	76.6 ± 1.3	77.0 ± 2.4
冬季	1.06 ± 0.45	1.48 ± 0.23	0.61 ± 0.37	0.92 ± 0.14	59.6 ± 1.3	64.0 ± 0.5
均值	1.68 ± 0.44	1.63 ± 0.35	1.21 ± 0.52	1.01 ± 0.42	67.2 ± 10.2	70.9 ± 7.2

表3 东湖和刘桥湖轮虫密度和环境因子的冗余分析

Table 3 Redundancy analysis between rotifer density and environmental factors in Donghu Lake and Liuqiao Lake

湖泊	排序轴	特征值	物种-环境 相关系数	累积变异百分比/%		全部特征值 总和	全部典范特征值 总和
				物种	物种-环境		
东 湖	1	0.422	0.968	42.2	58.0	1.00	0.727
	2	0.166	0.946	58.8	80.8		
	3	0.109	0.972	69.8	95.9		
	4	0.022	0.740	72.0	98.9		
刘桥湖	1	0.447	0.937	44.7	66.3	1.00	0.674
	2	0.140	0.936	58.7	87.1		
	3	0.069	0.904	65.6	97.3		
	4	0.012	0.531	66.8	99.0		

## 2.4 轮虫群落多样性指数及其与水体营养水平的关系

由表2可见,东湖轮虫的 $H'$ 值(1.68)高于刘桥湖(1.63),东湖和刘桥湖的最大 $H'$ 值(2.00和2.09)均出现在秋季,最小 $H'$ 值(1.06和1.27)分别出现在冬季和春季,两湖的 $H'$ 值季节差异均显著( $P < 0.05$ )。东湖轮虫的 $D$ 值(1.21)高于刘桥湖(1.01),东湖和刘桥湖的最大 $D$ 值(1.68和1.51)均出现在秋季,最小 $D$ 值(0.61和0.50)分别出现在冬季和春季,两湖的 $D$ 值季节差异均显著( $P < 0.01$ )。东湖和刘桥湖的 $T_M$ 值季节差异显著( $P < 0.01$ ),年平均值分别为67.2和70.9。根据 $T_M$ 值的评价标准,两湖水体均达到中度富营养状态。

Pearson 相关分析表明,东湖轮虫的密度与总磷( $P < 0.01$ )、水温( $P < 0.01$ )和叶绿素a质量浓度( $P < 0.01$ )均呈极显著正相关关系,与总氮( $P < 0.05$ )显著正相关;刘桥湖轮虫的密度与总氮( $P < 0.001$ )和叶绿素a质量浓度( $P < 0.001$ )呈极显著正相关关系,与水温( $P < 0.05$ )显著正相关,与总磷无相关性。

## 2.5 轮虫群落与环境因子的冗余分析

东湖和刘桥湖分别选取17和15种优势种类用于典型对应分析(CCA),去趋势对应分析(DCA)显示,东湖和刘桥湖的第1轴梯度长分别为3.31和3.74。因此,选择冗余分析(RDA)进行约束性排序。冗余分析显示(表3),东湖的第1轴和第2轴

特征值分别为 0.422 和 0.166, 前 2 轴共解释了 80.8% 的物种与环境的关系; 刘桥湖第 1 轴和第 2 轴特征值分别为 0.447 和 0.140, 前 2 轴共解释了 87.1% 的物种与环境的关系。两湖轮虫主要优势种密度与总氮、总磷、水温和叶绿素 a 质量浓度密切相关。如图 4 所示, 东湖刺盖异尾轮虫、暗小异尾轮虫、长三肢轮虫、长肢多肢轮虫、前节晶囊轮虫和红多肢轮虫均与总氮、总磷、水温和叶绿素 a 质量浓度呈正相关关系; 刘桥湖刺盖异尾轮虫、暗小异尾轮虫、前节晶囊轮虫、裂足臂尾轮虫、萼花臂尾轮虫和壶状臂尾轮虫均与总氮、总磷、水温和叶绿素 a 质量浓度呈正相关关系。

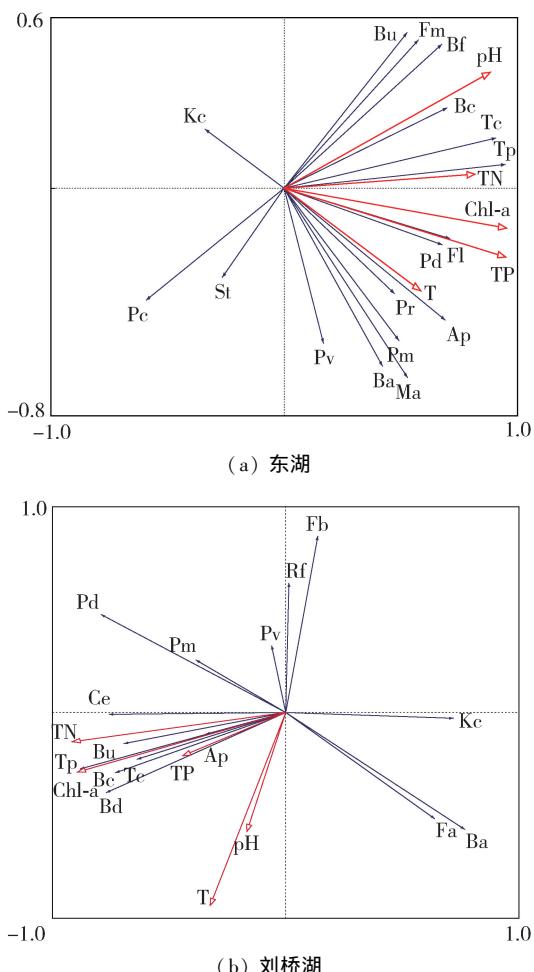


图 4 东湖和刘桥湖轮虫密度与环境因子的冗余分析

Fig. 4 Redundancy analysis between rotifer density and environmental factors in Donghu Lake and Liuqiao Lake

### 3 讨 论

#### 3.1 轮虫的群落结构特征

两湖轮虫密度和种类数变化趋势一致, 夏秋季具有较高的密度和种类数, 冬春季较低, 东湖轮虫年平均密度和种类数分别为 2722 个/L 和 32 种, 高于刘桥湖的 1311 个/L 和 25 种。东湖轮虫密度和种

类数分别占浮游动物(轮虫和浮游甲壳动物)密度和种类数的 99.5% 和 80%, 刘桥湖分别为 99.6% 和 71.4%<sup>[24]</sup>。东湖和刘桥湖轮虫的污染指示种类数分别为 22 种和 16 种, 且两湖主要以  $\beta$  中污型为主, 分别占总种类数的 38% 和 40%。两湖轮虫优势种的差异较小, 且以小型种类为主, 主要优势种是暗小异尾轮虫、长肢多肢轮虫、螺形龟甲轮虫、广布多肢轮虫。与淮北和淮南煤矿塌陷湖泊相比<sup>[6,25]</sup>, 东湖轮虫密度高于淮北南湖、乾隆湖和淮南潘谢潘集站、潘谢顾桥站、潘谢谢桥站的密度, 而刘桥湖的密度高于淮北南湖、低于淮北乾隆湖和淮南潘谢潘集站、潘谢顾桥站、潘谢谢桥站的密度; 两湖主要优势种和淮北南湖、乾隆湖差异较小, 和淮南潘谢潘集站、潘谢顾桥站、潘谢谢桥站的优势种(曲腿龟甲轮虫、罗氏异尾轮虫、前节晶囊轮虫、卜氏晶囊轮虫和针簇多肢轮虫)差异较大。

#### 3.2 轮虫与环境因子的关系

水温、总氮和总磷是影响轮虫密度和群落结构季节动态的重要因素<sup>[25]</sup>。总氮和总磷能促进浮游植物的生长, 为轮虫提供更多的食物来源, 进而促进轮虫的生长繁殖<sup>[26]</sup>。在充足的食物条件下, 随着水温的上升, 轮虫卵的发育时间缩短, 种群周转加快, 导致轮虫种群密度迅速增加<sup>[16]</sup>。两湖轮虫密度和群落结构的季节变化明显, 冗余分析显示, 两湖轮虫主要优势种与水温、总氮和总磷呈正相关关系。因此, 水温、总氮和总磷是影响两湖轮虫密度和群落结构季节变化的重要因素。

透明度是影响轮虫密度和空间分布的重要环境因子, 较低的透明度不利于轮虫的生存和繁殖, 而较高的透明度、相对稳定的水体环境有利于提高轮虫的物种多样性<sup>[27]</sup>。杨桂军等<sup>[28]</sup>研究表明, 轮虫密度与透明度呈显著的正相关关系。东湖的透明度明显高于刘桥湖, 而与之对应的是, 东湖轮虫密度和种类数明显高于刘桥湖。因此, 透明度可能是导致东湖轮虫密度和种类数高于刘桥湖的重要原因。

轮虫主要以浮游植物为食, 浮游植物密度的高低与轮虫的生长繁殖密切相关<sup>[27]</sup>, 邓道贵等<sup>[6]</sup>研究表明, 浮游植物生物量对轮虫群落结构具有重要的影响。叶绿素 a 是衡量浮游植物的重要指标, 对轮虫密度和种类的季节变化影响较大<sup>[27]</sup>。东湖和刘桥湖的叶绿素 a 质量浓度均较高, 为轮虫提供了丰富的食物来源, Pearson 相关分析表明, 两湖轮虫密度均与叶绿素 a 质量浓度呈极显著正相关关系, 冗余分析也表明, 两湖轮虫主要优势种与叶绿素 a 质量浓度呈正相关关系。因此, 叶绿素 a 质量浓度也是影响两湖轮虫密度和群落结构的重要因素。这与

吴晓敏等<sup>[29]</sup>研究结果相一致。

滤食性鱼类对浮游动物的捕食具有明显的选择性,在同等条件下优先选择个体较大的种类为食,导致浮游动物群落结构小型化<sup>[30]</sup>。陈光荣等<sup>[31]</sup>研究表明,鱼类的捕食压力使浮游动物以轮虫、小型枝角类和无节幼体为主。鲢、鳙鱼等滤食性鱼类主要以浮游甲壳动物为食<sup>[32]</sup>,鲢、鳙鱼对浮游甲壳动物的捕食压力,导致浮游甲壳动物的密度较低,抑制了浮游甲壳动物对轮虫的食物竞争或捕食压力<sup>[25]</sup>,使轮虫密度增大。此外,鲢、鳙鱼对浮游甲壳动物的大量捕食,为轮虫的发展提供了条件。东湖和刘桥湖主要养殖鲢、鳙鱼,年均鱼产量为25~30 t/km<sup>2</sup>,浮游甲壳动物的年平均密度分别为12.8个/L和4.4个/L<sup>[24]</sup>,而东湖和刘桥湖轮虫的年平均密度分别为2722个/L和1311个/L。因此,鱼类的捕食压力和选择性捕食可能是间接造成两湖轮虫密度较高和群落结构变化的主要原因。

### 3.3 轮虫优势种和多样性指数与水质评价

根据轮虫污染指示种,角突臂尾轮虫、长三肢轮虫、暗小异尾轮虫、螺形龟甲轮虫、对棘异尾轮虫、广布多肢轮虫和卜氏晶囊轮虫是富营养水体的优势种<sup>[33]</sup>。本次调查中,两湖主要以暗小异尾轮虫、长肢多肢轮虫、螺形龟甲轮虫、广布多肢轮虫等为优势种。东湖暗小异尾轮虫和长肢多肢轮虫的年平均密度分别占总密度的29%和22%,而刘桥湖为28%和23%。因此,从优势种的组成来看,两湖水体均达到富营养化状态,这与两湖用 $T_M$ 值的评价结果相一致。而根据Shannon和Margalef指数的评价标准,两湖水体处于中度污染。综合优势种、 $T_M$ 值和多样性指数,两湖水体达到中度污染,营养程度为富营养化状态。

## 4 结 论

a. 东湖共记录轮虫13科15属32种,刘桥湖共记录10科12属25种。东湖轮虫的年平均密度和生物量分别为2722个/L和3.04 mg/L,刘桥湖分别为1311个/L和1.30 mg/L。

b. 东湖和刘桥湖主要优势种为刺盖异尾轮虫、暗小异尾轮虫、长肢多肢轮虫、广布多肢轮虫和螺形龟甲轮虫。

c. 东湖和刘桥湖水体已呈现中度富营养状态,水体富营养化提高了两个湖泊轮虫的密度、种类数及物种多样性。

d. 水温、总氮、总磷、叶绿素a质量浓度和鲢、鳙鱼的捕食压力是影响两湖轮虫群落结构变化的重要因素。

## 参考文献:

- [1] 曲喜杰,易齐涛,胡友彪,等.两淮采煤沉陷积水区水体营养盐时空分布及富营养化进程[J].应用生态学报,2013,24(11):3249-3258.(QU Xijie, YI Qitao, HU Youbiao, et al. Nutrient spatiotemporal distribution and eutrophication process in subsidence waters of Huainan and Huabei mining areas, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(11):3249-3258. (in Chinese))
- [2] 完永钊,马洪康,王素芳.淮北市采煤塌陷区土地综合开发研究[J].地质灾害与环境保护,2007,18(4):52-55.(WAN Yongzhao, MA Hongkang, WANG Sufang. The study on reclamation of subsidence region for excavate coal of Huabei City[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2007, 18 ( 4 ): 52-55. ( in Chinese))
- [3] 李伟.淮北市采煤沉陷区综合利用及规划策略研究[D].合肥:安徽建筑大学,2017.
- [4] 纪磊,李晓明,邓道贵.淮北煤矿区塌陷湖大型底栖动物群落结构及水质生物学评价[J].水生生物学报,2016,40(1):147-156.(JI Lei, LI Xiaoming, DENG Daogui. Community structure of macrozoobenthos and bioassessment of water quality in collapse lake in Huabei mining areas[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2016, 40 (1):147-156. (in Chinese))
- [5] 王婷婷,易齐涛,胡友彪,等.两淮采煤沉陷区水域水体富营养化及氮、磷限制模拟实验[J].湖泊科学,2013,25(6):916-926.(WANG Tingting, YI Qitao, HU Youbiao, et al. Eutrophication and nutrient enrichment bioassays in the waters of the Huainan and Huabei coal mining subsidence areas, Anhui Province[J]. Journal of Lake Sciences, 2013, 25(6):916-926. (in Chinese))
- [6] 邓道贵,金显文,葛茜,等.淮北采煤塌陷区小型湖泊轮虫群落结构的季节变化[J].湖泊科学,2012,24(1):111-116.(DENG Daogui, JIN Xianwen, GE Qian, et al. Seasonal variations on community structures of rotifers in small lakes of an excavating coal subsidence region in Huabei[J]. Journal of Lake Sciences, 2012, 24(1):111-116. (in Chinese))
- [7] OFFEM B O, SAMSONS Y A, OMOMIYI I T, et al. Dynamics of the limnological features and diversity of zooplankton populations of the cross river system SE Nigeria [J]. Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems, 2009, 393(2):1-19.
- [8] 高原,李新辉,赖子尼,等.珠江三角洲河网浮游轮虫的群落结构[J].应用生态学报,2014,25(7):2114-2122.(GAO Yuan, LI Xinhui, LAI Zini, et al. Community structure of planktonic rotifers in the Pearl River Delta [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25 ( 7 ): 2114-2122. ( in Chinese))

- [ 9 ] 徐梅. 华阳河湖群和焦岗湖的后生浮游动物群落结构研究 [D]. 合肥:安徽大学,2016.
- [10] 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. ( LIN Zhi, WAN Yang, XU Mei, et al. Metazoan zooplankton community structure and environmental drivers of Digou coal mining subsided lakes in Huainan [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30 (1): 171-182. (in Chinese) )
- [11] 王振红,桂和荣,罗专溪,等. 采煤塌陷塘浮游生物对矿区生态变化的响应 [J]. 中国环境科学,2005,25(1): 42-46. ( WANG Zhenhong, GUI Herong, LUO Zhuanxi, et al. The response of plankton in excavating coal subsidence pool to the mining area ecological changes [J]. China Environmental Science, 2005, 25 (1): 42-46. (in Chinese) )
- [12] 薛颖昊,席贻龙,张根. 粉煤灰污染影响萼花臂尾轮虫 (*Brachionus calyciflorus*) 种复合体空间分布的原因 [J]. 湖泊科学,2012,24(1):137-141. ( XUE Yinghao, XI Yilong, ZHANG Gen. Impact on spatial distribution of *Brachionus calyciflorus* species complex by coal ash pollution [J]. Journal of Lake Sciences, 2012, 24(1):137-141. (in Chinese) )
- [13] 李晓明,纪磊,邓道贵. 淮北煤矿区塌陷湖水生昆虫群落结构的季节性变化 [J]. 生态学杂志,2015,34(5): 1359-1366. ( LI Xiaoming, JI Lei, DENG Daogui. Seasonal variation in community structure of aquatic insects in the collapse lakes of Huabei mining area [J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(5):1359-1366. (in Chinese) )
- [14] 李晓明,丁建华. 淮北采煤塌陷湖大型底栖动物群落结构季节动态研究 [J]. 生物学杂志,2016,33(6):57-61. ( LI Xiaoming, DING Jianhua. Community structure and seasonal variation of macrozoobenthos in collapse lakes of Huabei mining areas [J]. Journal of Biology, 2016, 33 (6):57-61. (in Chinese) )
- [15] 裴文明,姚素平,董少春,等. 皖北刘桥矿采煤塌陷区生态环境动态监测 [J]. 煤田地质与勘探,2015,42(5): 67-72. ( PEI Wenming, YAO Suping, DONG Shaochun, et al. Dynamic monitoring of ecological environment of subsidence area of Liuqiao coal mining area in Northern Anhui [J]. Coal Geology and Exploration, 2015, 42 (5): 67-72. (in Chinese) )
- [16] 章宗涉,黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法 [M]. 北京:科学出版社,1991.
- [17] 王家辑. 中国淡水轮虫志 [M]. 北京:科学出版社,1961.
- [18] 许栋,张博曦,及春宁,等. 梯级水库对南渡江干流底栖动物丰枯水期沿程变化的影响 [J]. 水资源保护,2019, 35(2):60-66. ( XU Dong, ZHANG Boxi, JI Chunning, et al. Streamwise variation of zoobenthos along main stream of Nandujiang River in wet and dry seasons under influence of cascade reservoirs [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2):60-66. (in Chinese) )
- [19] 周谐,郑坚,黄书铭,等. 三峡库区重庆段浮游藻类调查及水质评价 [J]. 中国环境监测,2006,22(4):70-73. ( ZHOU Xie, ZHENG Jian, HUAGN Shuming, et al. Investigation and evaluation of pelagic algae and water quality about the three gorges reservoir of Chongqing [J]. Environmental Monitoring in China, 2006, 22(4):70-73. (in Chinese) )
- [20] 巩俊霞,张金路,王新美,等. 采煤塌陷区池塘夏季浮游植物群落结构及环境评价 [J]. 水产学杂志,2016,29(6): 41-46. ( KONG Junxia, ZHANG Jinlu, WANG Xinmei, et al. Phytoplankton community and environmental assessment in coal mining subsidence ponds in summer [J]. Chinese Journal of Fisheries, 2016, 29 (6):41-46. (in Chinese) )
- [21] 徐兆礼,陈亚瞿. 东黄海秋季浮游动物优势种聚集强度与蛤鳍渔场的关系 [J]. 生态学杂志,1989,8(4):13-15. ( XU Zhaoli, CHEN Yaqu. Aggregated intensity of dominant species of zooplankton in Autumn in the East China Sea and Yellow Sea [J]. Chinese Journal of Ecology, 1989, 8(4):13-15. (in Chinese) )
- [22] 杨梅玲,胡忠军,刘其根,等. 利用综合营养状态指数和修正的营养状态指数评价千岛湖水质变化 (2007—2011 年) [J]. 上海海洋大学学报,2013,22(2):240-245. ( YANG Meiling, HU Zhongjun, LIU Qigen, et al. Evaluation of water quality by two trophic state indices in Lake Qiandaohu during 2007-2011 [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2013, 22 (2): 240-245. (in Chinese) )
- [23] 朱苏葛,刘凌,罗娟,等. 里下河地区典型湖泊大型底栖动物与环境因子的相关性分析 [J]. 水资源保护,2016, 32(3):99-104. ( ZHU Suge, LIU Ling, LUO Juan, et al. Correlation analysis between macrozoobenthos and environmental factors in lakes of Lixia River area [J]. Water Resources Protection, 2016, 32 (3): 99-104. (in Chinese) )
- [24] 杨威,张婷婷,孙雨琛,等. 淮北采煤塌陷区两个小型湖泊浮游甲壳动物群落结构及其与环境因子的关系 [J]. 生态学杂志,2019, 38 (1): 188-196. ( YANG Wei, ZHANG Tingting, SUN Yuchen, et al. Community structure of crustacean zooplankton and its relationship with environmental factors in two small lakes of Huabei excavating coal subsidence region [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(1):188-196. (in Chinese) )
- [25] 王晓萌,易齐涛,徐鑫,等. 淮南采煤沉陷区内小型塌陷湖泊轮虫群落结构特征 [J]. 湖泊科学,2015,27(4): 657-666. ( WANG Xiaomeng, YI Qitao, XU Xin, et al. Rotifer communities in the small lakes around Huainan coal mine subsidence areas [J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(4):657-666. (in Chinese) )

(下转第 96 页)

- Effects of nutrients and herbivores [J]. *Ecology*, 1993, 74 (4): 1264-1280.
- [31] GUASCH H, PAULSSON M, SABATER S. Effect of copper on algal communities from oligotrophic calcareous streams [J]. *Journal of Phycology*, 2002, 38 (2): 241-248.
- [32] LE FAUCHEUR S, BEHRA R, SIGG L. Thiol and metal contents in periphyton exposed to elevated copper and zinc concentrations: a field and microcosm study [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39 (20): 8099-8107.
- [33] 张超兰, 韦必帽, 刘敏, 等. 含镉废水人工湿地处理系统中基质微生物数量和酶活性研究 [J]. *水资源保护*, 2010, 26 (4): 57-6. (ZHANG Chaolan, WEI Bimao, LIU Min, et al. Microorganism population and enzyme activity in substrate of vertical-flow constructed wetland treating Cd wastewater [J]. *Water Resources Protection*, 2010, 26 (4): 57-6.)
- [34] LANG D A, KING R S, SCOTT J T. Divergent responses of biomass and enzyme activities suggest differential nutrient limitation in stream periphyton [J]. *Freshwater Science*, 2012, 31 (4): 1096-1104.
- [35] KLOTZ R. Factors influencing alkaline phosphatase activity of stream epithilona [J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 1992, 7 (2): 233-242.
- [36] PAULSSON M, NYSTRÖM B, BLANCK H. Long-term toxicity of zinc to bacteria and algae in periphyton communities from the river Göt Älv, based on a microcosm study [J]. *Aquatic Toxicology*, 2000, 47 (3/4): 243-257.
- [37] BONET B, CORCOLL N, GUASCH H. Antioxidant enzyme activities as biomarkers of Zn pollution in fluvial biofilms [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, 80: 172-178.

(收稿日期:2019-01-03 编辑:彭桃英)

(上接第 88 页)

- [26] 杨亮杰, 吕光汉, 竺俊全, 等. 横山水库浮游动物群落结构特征及水质评价 [J]. *水生生物学报*, 2014, 38 (4): 720-728. (YANG Liangjie, LYU Guanghan, ZHU Junquan, et al. Characteristics of zooplankton community in Hengshan Reservoir and water quality assessment [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2014, 38 (4): 720-728. (in Chinese))
- [27] 王庆, 刘丽君, 杨宇峰. 南方某水库轮虫群落特征及其对环境因子的响应 [J]. *生态学报*, 2010, 30 (13): 3385-3395. (WANG Qing, LIU Lijun, YANG Yufeng. Response of rotifer community characteristics to environmental factors in a reservoir, Southern China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30 (13): 3385-3395. (in Chinese))
- [28] 杨桂军, 秦伯强, 高光, 等. 太湖不同湖区轮虫群落结构季节变化的比较研究 [J]. *环境科学*, 2008, 29 (10): 2963-2969. (YANG Guijun, QIN Boqiang, GAO Guang, et al. Comparative study on seasonal variations of community structure of rotifer in different lake areas in Lake Taihu [J]. *Environmental Science*, 2008, 29 (10): 2963-2969. (in Chinese))
- [29] 吴晓敏, 郝瑞娟, 潘宏博, 等. 黄浦江浮游动物群落结构及其与环境因子的关系 [J]. *生态环境学报*, 2018, 27 (6): 1128-1137. (WU Xiaomin, HAO Ruijuan, PAN Hongbo, et al. Community structure of zooplankton and its relationship with environmental factors in Huangpu River [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27 (6): 1128-1137. (in Chinese))
- [30] 陈炳辉, 刘正文. 滤食杂食性鱼类放养对浮游动物群落结构的影响 [J]. *生态科学*, 2012, 31 (2): 161-166. (CHEN Binghui, LIU Zhengwen. Effect of filter-feeding omnivorous fish on zooplankton community [J]. *Ecological Science*, 2012, 31 (2): 161-166. (in Chinese))
- [31] 陈光荣, 钟萍, 张修峰, 等. 惠州西湖浮游动物及其与水质的关系 [J]. *湖泊科学*, 2008, 20 (3): 351-356. (CHEN Guangrong, ZHONG Ping, ZHANG Xiufeng, et al. Zooplankton and its relationship with water quality in Huizhou West Lake [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, 20 (3): 351-356. (in Chinese))
- [32] 胡翠林, 王圣瑞, 过龙根, 等. 泸海鲢鳙的食物组成及与太湖新银鱼的食性重叠研究 [J]. *水生生物学报*, 2014, 38 (4): 706-713. (HU Cuilin, WANG Shengrui, GUO Longgen, et al. Food composition of Hypophthalmichthys molitrix and Aristichthys nobilis and the diet overlap with Neosalanx taihuensis in Lake Erhai [J]. *Acta Hydrobiologia Sinica*, 2014, 38 (4): 706-713. (in Chinese))
- [33] SLIDEEK V. Rotifers as indicators of water quality [J]. *Hydrobiologia*, 1983, 100 (1): 169-201.

(收稿日期:2019-01-23 编辑:熊水斌)

