

淮北采煤塌陷区小型湖泊轮虫群落结构的季节变化*

邓道贵, 金显文, 葛 茜, 丁建华, 陈丽娜, 邵元启

(淮北师范大学生命科学院; 资源植物生物学安徽省重点实验室, 淮北 235000)

摘 要: 2005年3月至2007年2月对淮北采煤塌陷区两个小型湖泊(南湖和乾隆湖)轮虫的群落结构进行了连续两年的调查. 南湖共检测到轮虫9属14种, 乾隆湖共计15属27种. 乾隆湖轮虫年平均密度为1916 ind./L, 约为南湖(198.4 ind./L)的近10倍. 乾隆湖和南湖轮虫的最大密度分别为6915和1185 ind./L. 在南湖和乾隆湖轮虫的季节动态中, 冬、春季以前额犀轮虫为主, 夏、秋季以多肢轮虫、异尾轮虫为主. 在南湖, 长肢多肢轮虫、暗小异尾轮虫和小链巨头轮虫分别占年平均密度的24.4%、24.0%和23.0%. 在乾隆湖, 暗小异尾轮虫、长肢多肢轮虫和裂痕龟纹轮虫分别占年平均密度的31.5%、27.2%和7.3%. 南湖和乾隆湖轮虫的Shannon-Wiener指数范围分别为0~2.06和1.28~2.68, 平均值分别为0.67和1.99. 水温、营养盐和浮游植物生物量对淮北采煤塌陷区小型湖泊轮虫的群落结构具有重要影响.

关键词: 采煤塌陷区; 南湖; 乾隆湖; 轮虫; 群落结构

Seasonal variations on community structures of rotifers in small lakes of an excavating coal subsidence region in Huaibei

DENG Daogui, JIN Xianwen, GE Qian, DING Jianhua, CHEN Lina & SHAO Yuanqi

(School of Life Science, Huaibei Normal University, Anhui Key Laboratory of Resource and Plant Biology, Huaibei 235000, P. R. China)

Abstract: The community structures of rotifers and their seasonal variations in small lakes (Lake Nanhu and Lake Qianlong,) in an excavating coal subsidence region in Huaibei city have been investigated from March 2005 to February 2007. A total of fourteen species have been recorded, belonging to nine genera in Lake Nanhu, and twenty-seven species belonging to fifteen genera in Lake Qianlong. Average density of rotifers in Lake Qianlong (1916 ind./L) is about 10 times higher than that in Lake Nanhu (198.4 ind./L). Maximum density of rotifers is 6915 ind./L in Lake Qianlong and 1185 ind./L in Lake Nanhu. *Rhinoglena frontalis* is dominant species in winter and spring, while *Polyarthra* spp. and *Trichocerca* spp. are dominant species in summer and autumn. Among annual average density of rotifers in Lake Nanhu, *Polyarthra dolichoptera*, *Trichocerca pusilla* and *Cephalodella catellina* are 24.4%, 24.0% and 23.0%, respectively. Among annual average density of rotifers in Lake Qianlong, *Trichocerca pusilla*, *Polyarthra dolichoptera* and *Anuraeopsis fissa* are 31.5%, 27.2% and 7.3%, respectively. The ranges of Shannon-Wiener indices in Lake Nanhu and Lake Qianlong are 0~2.06 and 1.28~2.68, with average values of 0.67 and 1.99, respectively. The community structures of rotifers in the small lakes of an excavating coal subsidence region in Huaibei city are influenced by water temperature, nutrients and phytoplankton biomass.

Keywords: Excavating coal subsidence region; Lake Nanhu; Lake Qianlong; rotifer; community structures

安徽省淮北市是我国著名的能源基地, 年产原煤 1800×10^4 t. 淮北煤矿始建于1958年, 1960s初出现塌陷, 至1998年底, 全市因煤矿坍塌形成湿地面积约80 km², 其中, 永久性人工湖泊30 km²[1]. 塌陷区水面相对比较集中, 面积约0.1~2.0 km², 多呈封闭型小型水体. 塌陷区的水源复杂, 既是地表径流和浅层地下水的汇集地, 又是居民生活用水和矿井水的纳污水体. 随着煤矿塌陷区的不断扩展和矿区生态环境的持续恶化, 一些塌陷湖泊出现了富营养化或严重污染.

* 安徽省教育厅自然科学基金项目(KJ2010A300、KJ2010B183)和安徽淮北市科技计划项目(0635)联合资助. 2011-02-11收稿; 2011-05-04收修改稿. 邓道贵, 男, 1969年生, 博士, 教授; E-mail: dengdg@263.net.

淮北采煤塌陷湖泊属温带半湿润季风气候区,碱性大、硬度高、形成时间短、封闭性好是该塌陷区湖泊的典型特点.国内对采煤塌陷水体的浮游动物调查已有一些报道^[2-6],研究表明不同采煤塌陷水体浮游动物的种类和多样性存在明显的差异.王振红等^[2]观察到,采煤塌陷水体浮游生物的群落演替不同于一般的水库和湖泊.Walia等^[7]发现,粉煤灰能够影响湖泊浮游动物的群落结构和多样性,降低轮虫的密度.因此,广泛开展煤矿塌陷湖泊轮虫的群落结构特征研究,对阐明这一特定水体中生态系统的结构与功能具有重要的科学价值.本文选择南湖和乾隆湖两个不同营养水平的塌陷湖泊作为对象,研究淮北煤矿塌陷湖泊轮虫群落结构的季节动态,以期对淮北煤矿塌陷湖泊的生态保护和水生生物资源的可持续利用提供参考.该研究结果将对深入探讨煤炭及其废弃物(如粉煤灰和煤矸石)对水体生态系统结构与功能的影响提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究地点

南湖(33°54'3"N,116°48'37"E)和乾隆湖(33°54'25"N,116°46'35"E)均为淮北采煤塌陷而成的小型封闭型湖泊,水生植被较少,属温带半湿润季风气候区.前者为国家城市湿地公园,水域面积约为2.1 km²,是淮北市城市供水的重要水源地,兼有渔业养殖、旅游开发的功能,处于中-富营养水平.采样期间,位于南湖附近的杨庄煤矿仍在开采.后者水域面积约0.7 km²,目前主要功能是渔业养殖,处于富营养水平^[6].

自2005年3月至2007年2月,每月从南湖湖心和沿岸带各设1个采样点采集样品,乾隆湖在湖心采集样品.采样期间仅在冬季湖岸边出现积冰,南湖在8月出现稀薄的蓝藻(主要是铜绿微囊藻)水华,而乾隆湖未见蓝藻水华发生.

1.2 理化指标的测定

水温和透明度在采样时用温度计、Secchi透明度盘测得.总氮(TN)和总磷(TP)的测定方法参考文献[8].

1.3 浮游植物和浮游甲壳动物的样品采集与处理

用2.5 L改良的Patalas'有机玻璃采水器从表层至底层每隔1 m采集水样混合.用鲁哥试剂固定的1 L浮游植物水样带回实验室,沉淀48 h后,小心吸取上清液,浓缩至50 ml,并加数滴福尔马林保存.

用5 L改良的Patalas'有机玻璃采水器采集浮游甲壳动物.每隔1 m采集水样混合,每个采样点采集水样20~30 L.水样通过64 μm的浮游生物网过滤收集浮游甲壳动物,并用4%的福尔马林固定.

轮虫的采集和样品处理方法同浮游植物,并加少量福尔马林保存.

浮游植物和浮游动物的观察计数及生物量的估算参照章宗涉等的研究方法^[9].

1.4 轮虫的生物多样性指数

用Shannon-Wiener指数(H')估算南湖和乾隆湖轮虫的生物多样性: $H' = - \sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i$,式中, S 代表轮虫种类数, P_i 代表第*i*种密度占总密度的比例.

1.5 主成份分析

用Statistic 6.0统计软件对南湖和乾隆湖的轮虫与环境因子之间的关系进行主成份分析.

2 结果

2.1 南湖和乾隆湖的理化指标

南湖和乾隆湖的年平均水温分别为17.6℃和18.2℃,最高水温均出现在8月(分别为31.0℃和32.0℃),而最低水温均出现在1月(分别约为3.1℃和3.9℃).南湖的透明度(0.94 m)和水深(5.47 m)明显高于乾隆湖的透明度(0.54 m)和水深(2.66 m).

乾隆湖湖水的TN和TP常年较南湖高,且两湖季节性变动差异较大.南湖和乾隆湖的TN平均值分别是0.56和0.98 mg/L,TP平均值分别是0.06和0.15 mg/L.

2.2 浮游植物和浮游甲壳动物的季节动态

在南湖,冬季和春季以小型绿藻小球藻属(*Chlorella* sp.)、栅藻属(*Scenedemus* sp.)为优势种类,夏季以群体蓝藻铜绿微囊藻(*M. aeruginosa*)和群体绿藻美丽胶网藻(*Dictyosphaerium pulchellum* Wood)等大型种类为主,秋季以丝状蓝藻颤藻属(*Oscillatoria* sp.)、小席藻(*Phormidium tenue* Gom.)替代群体微囊藻占优势.并

在夏秋季形成稀薄的表面水华. 南湖浮游植物生物量的变动范围是 0.37 ~ 5.04 mg/L, 其平均值为 1.99 mg/L. 生物量的最大值(5.04 mg/L) 出现在 2006 年 7 月份.

在乾隆湖, 冬春季以圆筒锥囊藻(*Dinobryon cylindricum* Imh.) 为优势种, 其最大值(0.97 mg/L) 出现在 2006 年 3 月; 夏秋季节以梅尼小环藻(*Cyclotella meneghiniana* Kütz.)、十字藻属(*Crucigenia* sp.)、胶网藻属(*Dictyosphaerium* sp.)、小席藻(*P. tenue*) 等为优势种. 乾隆湖浮游植物生物量的变动范围为 0.60 ~ 17.99 mg/L, 其平均值为 4.20 mg/L. 生物量的最大值(17.99 mg/L) 出现在 2005 年 8 月.

南湖浮游甲壳动物优势种为象鼻溞(*Bosmina* sp.) 和汤匙华哲水蚤(*Sinocalanus dorrii* Brehm). 浮游甲壳动物密度的最大值(60.6 ind./L) 出现在 2005 年 10 月. 乾隆湖浮游甲壳动物优势种为短尾秀体溞(*Diaphanosoma brachyurum* Liéven)、象鼻溞和广布中剑水蚤(*Mesocyclops leuckarti* Claus). 浮游甲壳动物密度最大值(31.7 ind./L) 出现在 2006 年 10 月.

2.3 南湖和乾隆湖轮虫的物种多样性及密度

研究期间, 南湖轮虫共计 9 属 14 种, 乾隆湖轮虫共计 15 属 27 种. 在南湖, 长肢多肢轮虫(*Polyarthra dolichoptera*)、暗小异尾轮虫(*Trichocerca pusilla*) 和小链巨头轮虫(*Cephalodella catellina*) 的年平均密度分别为 48.3、47.6 和 45.5 ind./L. 在乾隆湖, 长肢多肢轮虫、暗小异尾轮虫、裂痕龟纹轮虫(*Anuraeopsis fissa*) 和前额犀轮虫(*Rhinoglena frontalis*) 年平均密度分别是 520、601、139 和 116 ind./L.

南湖轮虫在每年的 8 月和 9 月具有较高的密度, 在其它月份密度均较低. 年平均密度为 198.4 ind./L; 最大密度 1185 ind./L 出现在 2005 年 9 月. 乾隆湖轮虫总密度明显高于南湖, 且夏秋季节较高, 冬春季较低. 年平均密度为 1916 ind./L; 最大密度 6915 ind./L 出现在 2005 年 8 月(图 1).

南湖轮虫的 Shannon-Wiener 指数明显小于乾隆湖, 且均在夏秋季节相对较高. 南湖轮虫的 Shannon-Wiener 指数范围为 0 ~ 2.06, 平均为 0.67. 乾隆湖轮虫的 Shannon-Wiener 指数范围为 1.28 ~ 2.68, 平均为 1.99(图 2).

2.4 南湖和乾隆湖轮虫优势种的季节动态

南湖轮虫优势类群为多肢轮虫属(*Polyarthra* sp.)、异尾轮虫属(*Trichocerca* sp.)、小链巨头轮虫, 且都在 6-9 月间形成较高的密度(图 3), 其最高密度分别为 428、435 和 465 ind./L, 分别出现在 2005 年的 8 月或 9 月. 长肢多肢轮虫、暗小异尾轮虫和小链巨头轮虫分别占年平均密度的 24.4%、24.0% 和 23.0%.

乾隆湖轮虫优势类群为多肢轮虫属、异尾轮虫属、臂尾轮虫属(*Brachionus* sp.)、前节晶囊轮虫(*Asplanchna priodonta*)、裂痕龟纹轮虫和小链巨头轮虫, 且都在 5-10 月形成较高的密度(图 3), 其最高密度分别为 1920、4065、240、255、660、555 ind./L, 分别出现在 2005 年的 8 月、8 月、2006 年的 8 月、9 月、6 月、10 月. 长肢多肢轮虫、暗小异尾轮虫和裂痕龟纹轮虫分别占年平均密度的 27.2%、31.5% 和 7.3%.

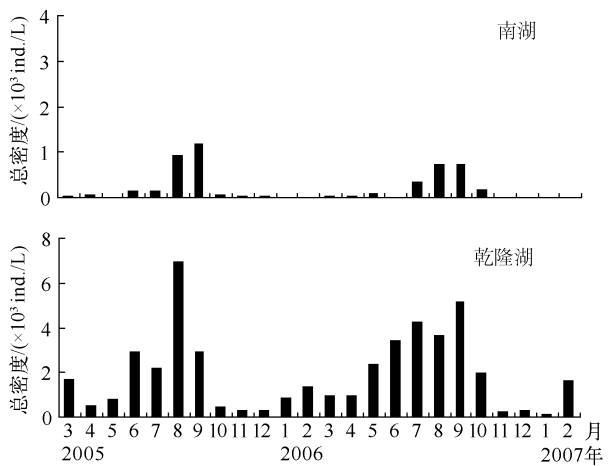


图 1 南湖和乾隆湖轮虫总密度的季节变化

Fig. 1 Seasonal variations of total rotifer density in Lake Nanhu and Lake Qianlong

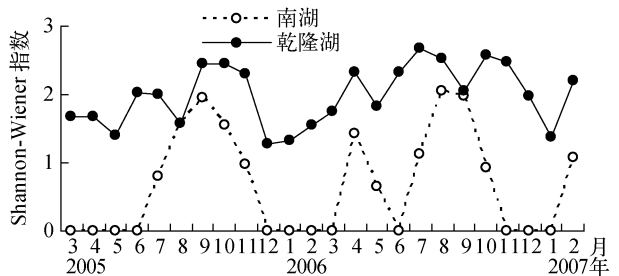


图 2 南湖和乾隆湖轮虫 Shannon-Wiener 指数的季节变化

Fig. 2 Seasonal variations of Shannon-Wiener index in Lake Nanhu and Lake Qianlong

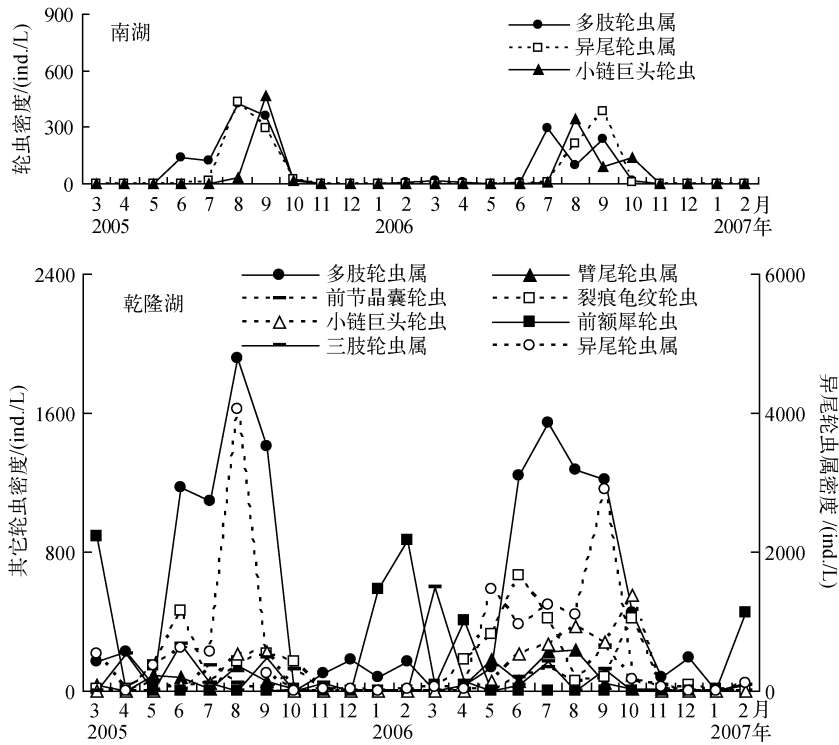


图3 南湖和乾隆湖轮虫优势种密度的季节变化

Fig. 3 Seasonal variations of dominant rotifer density in Lake Nanhu and Lake Qianlong

2.5 南湖和乾隆湖轮虫密度与环境因子之间的关系

在南湖和乾隆湖, 轮虫密度与水温(T)、浮游植物生物量(PP)等环境因子之间密切相关, 枝角类密度、桡足类密度及TP对轮虫密度也有一定的影响. 另外, 透明度(SD)也影响乾隆湖的轮虫密度(图4).

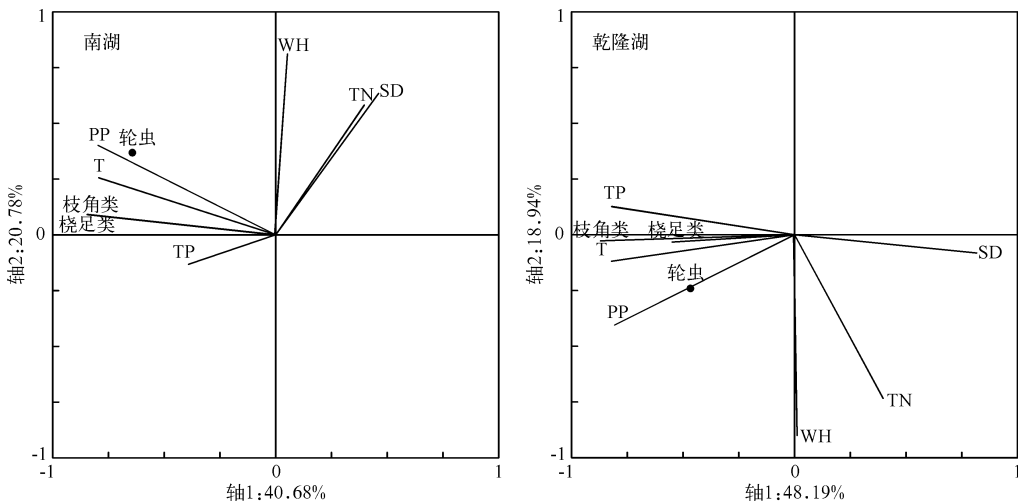


图4 南湖和乾隆湖轮虫密度与环境因子之间的主成份分析

Fig. 4 Principal component and classification analysis between rotifer density and environmental variables in Lake Nanhu and Lake Qianlong

相关性分析也表明,在南湖和乾隆湖,轮虫密度与 $T(P < 0.01)$ 、 $PP(P < 0.01)$ 均呈极显著相关. 轮虫密度和枝角类密度也呈显著相关(南湖: $P < 0.05$; 乾隆湖: $P < 0.01$).

3 讨论

南湖和乾隆湖均为淮北采煤塌陷而形成的小型封闭性湖泊. 由于受到长期的煤矿生产影响,煤炭及其废弃物(如粉煤灰和煤矸石)可能对水体环境造成不同程度的污染,进而影响浮游生物的群落结构. 在 Yamuna 河中,粉煤灰污染破坏了浮游动物的群落结构,降低轮虫的种群密度^[7]. 在淮南采煤塌陷区,王振红等通过分析生态环境对塌陷水体的影响及不同时期采煤塌陷水体浮游生物的种类变化后发现,随着水体富营养化程度的加剧,浮游动物种类呈现明显的下降趋势,并认为采煤塌陷区水体浮游生物的季节演替不同于一般的湖泊^[2]. 本研究中,尽管南湖富营养水平明显低于乾隆湖,但乾隆湖轮虫的种类数和 Shannon-Wiener 指数却明显高于南湖. 可以看出,淮北煤矿塌陷水体的轮虫特征与其它富营养化水体(包括淮南采煤塌陷区水体)的轮虫种类和多样性的变化趋势不同^[3,5]. 另外,调查发现,两个湖泊轮虫两年的 Shannon-Wiener 指数具有较一致的变动趋势,且轮虫优势种与先前的调查相一致^[4]. 这说明两个湖泊(尤其是乾隆湖)的轮虫群落结构具有较高的稳定性. 有关煤炭及其废弃物(如粉煤灰和煤矸石)对淮北塌陷区水体轮虫群落结构的影响还有待于进一步研究.

轮虫能够快速对环境变化发生反映,由于其短的世代时间和快的种群重建,轮虫被看作是水质和营养状态良好的指示种^[10]. 通常,富营养化湖泊的轮虫指示种有臂尾轮虫属、裂痕龟纹轮虫、沟痕泡轮虫(*Pompholyx sulcata*)、扁平泡轮虫(*P. complanata*)、圆筒异尾轮虫(*Trichocerca cylindrica*)、暗小异尾轮虫、长三肢轮虫、螺形龟甲轮虫、矩形龟甲轮虫和真翅多肢轮虫(*Polyarthra euryptera*)^[10-13]. 由于其具有移动速度快的特点,多肢轮虫属不仅易于捕食,而且有利于逃避敌害,通常是富营养化水体中常见的种类之一^[14-15]. 本研究中,南湖和乾隆湖轮虫的第一和第二优势类群均为多肢轮虫属和异尾轮虫属,两个湖泊轮虫优势类群均呈现富营养化特征,且乾隆湖轮虫的富营养化特征更明显,这与两湖泊的氮磷等营养盐浓度是相适应的. 已有文献报道,湖泊水体的富营养化进程能够显著提高轮虫总密度和第一优势种的优势度,降低轮虫群落的均匀度和物种多样性指数^[16]. Virro 等^[17]认为,在富营养湖泊 Vörtsjärvi 中,冬季轮虫低的多样性不代表轮虫群落结构的不稳定性,而是暗示适应性轮虫生态位的缺乏.

湖泊浮游植物的数量和质量是影响轮虫群落结构和密度的重要因素^[18-19]. 本研究中,乾隆湖(4.20 mg/L)浮游植物生物量约是南湖(1.99 mg/L)的 2 倍以上,乾隆湖(1916 ind./L)的轮虫平均密度约为南湖(198.4 ind./L)的 10 倍. 两个湖泊轮虫密度均与浮游植物生物量呈极显著正相关($P < 0.01$). 在巢湖,轮虫密度与浮游植物生物量也呈现极显著的正相关^[13].

通常,枝角类也是影响湖泊轮虫群落结构的重要因素^[20-21]. 有研究表明,大型 *Daphnia* 通常通过机械干扰可以显著地提高热带龟甲轮虫(*Keratella tropica*)和角突臂尾轮虫(*Brachionus angularis*)、萼花臂尾轮虫(*Brachionus calyciflorus*)后代的致死率,从而严重限制小型轮虫的丰度^[20]. 杨桂军等^[21]发现,食物的不同以及大型浮游甲壳动物的抑制作用,可能是产生太湖不同湖区轮虫群落结构不同的主要原因,轮虫密度与枝角类的密度呈极显著的负相关. 所不同的是, Geng 等^[13]观察到,巢湖轮虫密度与浮游甲壳动物密度无显著相关性,并认为这可能是由于大型浮游甲壳动物的缺乏造成的. 本研究中,南湖和乾隆湖的浮游甲壳动物均以小型种类为主,且密度均较低. 南湖和乾隆湖轮虫密度与枝角类密度呈显著正相关(南湖: $P < 0.05$; 乾隆湖: $P < 0.01$). 因此,湖泊中枝角类与轮虫的关系很复杂,淮北采煤塌陷区小型湖泊枝角类与轮虫的竞争关系较弱.

4 参考文献

- [1] 施葵初. 安徽湿地. 合肥:合肥工业大学出版社,2003.
- [2] 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. 中国环境科学,2005,25(1):42-46.
- [3] 何春桂. 采煤塌陷区水域浮游动物群落特征研究——以淮南谢二矿塌陷塘为例[学位论文]. 淮南:安徽理工大学,2006.
- [4] 金显文,杨文展,邓道贵. 淮北煤矿塌陷区水域轮虫的初步研究. 生物学杂志,2007,24(5):50-51.

- [5] 周晓燕. 采煤塌陷塘浮游动物群落结构研究. 安徽理工大学学报: 自然科学版, 2009, **29**(4): 9-12.
- [6] 邓道贵, 邢荣龙, 马 睿等. 淮北采煤塌陷区小型湖泊浮游甲壳动物群落结构的季节变化. 湖泊科学, 2010, **22**(4): 591-597.
- [7] Walia A, Mehra NK. A seasonal assessment of the impact of coal fly ash disposal on the river Yamuna, Delhi, II. biology. *Water Air and Soil Pollution*, 1998, **103**: 315-339.
- [8] 黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [9] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991.
- [10] Sládeček V. Rotifers as indicators of water quality. *Hydrobiologia*, 1983, **100**: 169-201.
- [11] Gannon JE, Stemberger RS. Zooplankton (especially crustaceans and rotifers) as indicators of water quality. *Transactions of the American Microscopical Society*, 1978, **97**(1): 16-35.
- [12] Hacerman J. Zooplankton of Lake Vortsjarv. *Limnologica*, 1998, **28**(1): 49-65.
- [13] Geng H, Xie P, Deng DG *et al.* The rotifer assemblage in a shallow, eutrophic Chinese lake and its relationships with cyanobacterial blooms and crustacean zooplankton. *Journal of Freshwater Ecology*, 2003, **20**(1): 93-100.
- [14] 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. 湖泊科学, 2008, **20**(3): 351-356.
- [15] 郭 凯, 赵 文, 殷守仁等. 北京官厅水库轮虫群落结构与水体富营养化状况. 湖泊科学, 2010, **22**(2): 256-264.
- [16] 钱方平, 席贻龙, 温新利等. 湖泊富营养化对轮虫群落结构及物种多样性的影响. 生物多样性, 2007, **15**(4): 344-355.
- [17] Virro T, Haberman J, Haldna M *et al.* Diversity and structure of the winter rotifer assemblage in a shallow eutrophic northern temperate Lake Vörtsjärv. *Aquatic Ecology*, 2009, **43**: 755-764.
- [18] Sarma SSS, Araiza MAF, Nandini S. Competition between *Brachionus calyciflorus* Pallas and *Brachionus patulus* (Müller) (Rotifera) in relation to algal food concentration and initial population density. *Aquatic Ecology*, 1999, **33**: 339-345.
- [19] 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. 水生生物学报, 2006, **30**(2): 153-158.
- [20] Diéguez MC, Gilbert JJ. *Daphnia*-rotifer interactions in Patagonian communities. *Hydrobiologia*, 2011, **662**: 189-195.
- [21] 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. 环境科学, 2008, **29**(10): 2963-2969.