动物学杂志 *Chinese Journal of Zoology* 2008,43(3):7～16

滆湖轮虫群落结构与水质生态学评价

陈立婧① 顾 静① 彭自然② 孔优佳③ 花少鹏③ 王 武①*

(①上海水产大学 省部共建水产种质资源发掘与利用教育部重点实验室 上海 200090;
②上海水产大学 农业部水产种质资源与养殖生态重点开放实验室 上海 200090;
③江苏省滆湖渔业管理委员会 常州 213161)

摘要:研究了浅水湖泊——滆湖的轮虫群落结构,并用轮虫污染指示种类、E/O 值、$Q_{B/T}$值和生物多样性指数评价滆湖的水质和营养状况。在两周年的研究中,共发现轮虫 69 种,污染指示轮虫 39 种。优势种为萼花臂尾轮虫(*Brachionus calyciflorus*)、前节晶囊轮虫(*Asplanchna priodonta*)、针簇多肢轮虫(*Polyarthra trigla*)、长三肢轮虫(*Filinia longiseta*)和裂足臂尾轮虫(*B. diversicornis*)。轮虫密度年平均值为 1 584 ind./L,生物量年平均值为 5.982 1 mg/L。密度秋季最高,生物量夏季较高。轮虫物种多样性较低,多样性指数与其密度及生物量正相关。滆湖三个生态功能区轮虫的种类相似;湖区北部与中部的轮虫现存量差异不显著,与南部的差异显著,中部与南部间差异极显著。根据指示生物法、生物指数法和多样性指数法评价滆湖水质及营养类型,滆湖为富营养型。

关键词:滆湖;轮虫;群落结构;生态学评价

中图分类号:Q958 **文献标识码**:A **文章编号**:0250-3263(2008)03-07-10

The Community Structure of Rotifer and Ecological Assessment of Water Quality of Lake Gehu

CHEN Li-Jing① GU Jing① PENG Zi-Ran② KONG You-Jia③ HUA Shao-Peng③ WANG Wu①*

(① *Key Laboratory of Exploration and Utilization of Aquatic Genetic Resources, Shanghai Fisheries University, Ministry of Education, Shanghai* 200090; ② *Key Laboratory of Aquatic Genetic Resources and Aquaculture Ecology Certificated by the Ministry of Agriculture, Shanghai Fisheries University, Shanghai* 200090;
③ *Fisheries Management Commission of Lake Gehu, Changzhou* 213216, *China*)

Abstract: The community structure of rotifer and ecological assessment of water quality, including E/O, $Q_{B/T}$ index and the biodiversity index, were studied in Lake Gehu, Jiangsu Province. After two-year monitoring in situ, 69 species of rotifer were identified, 39 species were pollution indicator species. The dominant species were *Brachionus calyciflorus*, *Asplanchna priodonta*, *Polyarthra trigla*, *Filinia longiseta* and *B. diversicornis*. The average annual density was 1 584 ind./L and the average annual biomass was 5.982 1 mg/L. The total density reached the maximum in autumn and biomass was highest in summer. The species biodiversity was positively related to the density and biomass. Rotifer species were similar in three zones of Lake Gehu. There were no significant differences between the north area and the middle area, but there were significant differences between the north and the south area. Biological assessment of water pollution and trophic condition were evaluated by species indicators, biotic index of E/O, $Q_{B/T}$ and species biodiversity

基金项目 上海市教委一般项目(No. 05KZ06),上海市教委水产养殖重点学科基金项目(No. Y1101),江苏海洋与渔业局科学研究基金项目(No. 04-46),上海水产大学跟踪培养优秀青年基金项目(No. 6690106043)联合资助;

*通讯作者,E-mail:wwang@shfu.edu.cn;

第一作者介绍 陈立婧,女,副教授,博士研究生;研究方向:水生生物生态学;E-mail:ljchen@shfu.edu.cn。

收稿日期:2007-12-01,**修回日期**:2008-03-10

index. The trophic type of Lake Gehu could be regarded as eutrophic.

Key words: Lake Gehu; Rotifer; Community structure; Ecological assessment

江苏滆湖(119°48′E,31°35′N)地处我国经济发达的长江三角洲地带,面积 146.5 km^2,常年水位 1.2 m,是苏南地区仅次于太湖的第二大湖泊。在水资源供应、灌溉、航运、旅游、防洪和水产增养殖等多方面发挥着重要作用。

轮虫是淡水浮游生物的重要组成部分之一,是许多鱼类的重要食物,它本身主要以真核藻类、细菌和原生动物为食,在水生态系统结构、功能及生物生产力中具有重要意义[1,2]。有报道表明,湖泊轮虫的物种多样性与水体富营养化有关[3,4]。由于轮虫对环境的敏感性,轮虫群落的生态特征可作为水质评价的依据。国内外对轮虫在生物监测中的指示作用进行了一些研究[5~10]。但有关同一水系不同营养类型湖泊或同一湖泊不同富营养水平湖区轮虫群落特征差异的研究较少[11~13]。本文根据近年对轮虫的定点调查监测结果,对滆湖水环境质量进行生态学评价,为滆湖的清理整治提供生物学方面的基础资料。

1 材料与方法

1.1 采样方法 共设置 13 个采样点(图 1),包括北部网围区的 1~5 采样点、中部常年繁保区和增殖区的 6~9 采样点、南部水草区的 10~13 采样点。2004 年 4 月至 2006 年 1 月每季度采样,采样和计数按《湖泊生态调查观测与分析》的方法[14]进行。定性样品用 25 号筛绢制成的浮游生物网拖捞获取。定量样品用 5 L 采水器于 0.5 m 和接近底面水深处各取 5 L,充分混匀。取 1 L 水样现场用鲁哥氏液固定,然后带回实验室经 48 h 沉淀后浓缩至 30 ml 加 4%的福尔马林溶液保存以备镜检。轮虫的种类鉴定按 Koste 分类系统[15],轮虫生物量采用体积法[14]统计。用柱状采水器采集湖水1 000 ml,回实验室后分析水化指标(TN,TP)和叶绿素 a[14]。

1.2 数据处理 采用 $Y=(N_i/N)f_i$ 计算种类优势度。其中 N_i 为第 i 种的个体数,N 为样品中所有种类的总个体数,f_i 为第 i 种的出现频率。$Y>0.02$ 为优势种[16]。采用 Shannon-Wiener 物种多样性指数 $H'=-\sum(N_i/N)\ln(N_i/N)$,Margalef 物种丰富度指数 $D=(S-1)/\ln N$,Pielou 物种均匀度指数 $J=H'/\ln S$ 进行群落种类组成的多样性分析。其中,N 为样品中所有种类的总个体数,S 为样品中种类总数,N_i 为第 i 种的个体数[17]。

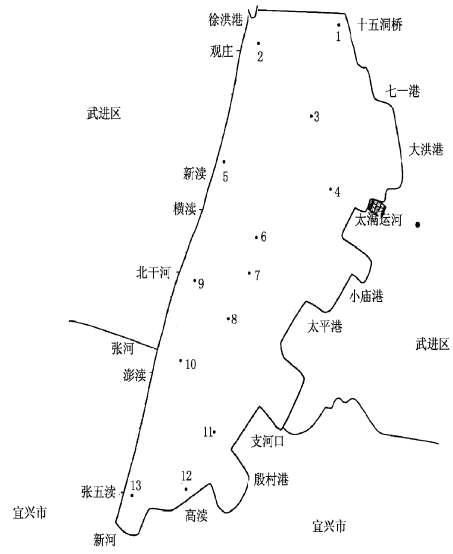

图 1 滆湖及采样点位置图

Fig. 1 Map of Lake Gehu and sampling stations

E/O 指数:按 E/O = E(富营养型指示种数)/O(贫营养型指示种数)计算[18]。$Q_{B/T}$指数:按 $Q_{B/T}$ = B(臂尾轮虫属的种数)/T(异尾轮虫属的种数)计算[18]。其中,E/O 指数在 1.5~5.0 为富营养型。$Q_{B/T}$指数大于 2 划为富营养[7]。

不同级别污染指示物种的划分方式及定义见 Sladecek[7]、温新利[4]、李共国[9]等的文献。

2 结 果

2.1 滆湖 3 个湖区的营养状况 滆湖 3 个湖区,两周年的理化参数(TN、TP、叶绿素 a)表明,水体营养水平北部网围区最高,中部常年繁保

表 1　滇湖 3 个湖区理化参数平均值和范围(2004 年 4 月至 2006 年 1 月)

Table 1　Mean and range of physical-chemical parameters in Lake Gehu during Apr. 2004 - Jan. 2006

参数 Parameters	湖区北部 The north area of Lake Gehu	湖区中部 The middle area of Lake Gehu	湖区南部 The south area of Lake Gehu
总氮 Total nitrogen (mg/L)	1.505 (0.310～3.992)	1.023 (0.161～3.384)	1.081 (0.139～2.639)
总磷 Total phosphorus (mg/L)	0.273 (0.083～0.698)	0.257 (0.093～0.627)	0.140 (0.010～0.278)
叶绿素 a Chl-a concentration (μg/L)	40.62 (5.80～79.68)	37.69 (2.85～71.28)	30.37 (1.31～62.58)

区和增殖区次之,南部水草区最低(表 1)。

2.2　滇湖轮虫的种类组成、污染指示及优势种

两年在滇湖 13 个采样点共发现轮虫 69 种,隶属于 16 科 28 属。轮虫污染指示种共 39 种,其中寡污性为 10 种,占 25.6 %;o-β 中污性为 10 种,占 25.6 %;β-α 中污性为 6 种,占 15.4 %;β-中污性为 11 种,占 28.2 %;α-中污性为 2 种,占 5.1 %。从不同污染等级的轮虫种类占总数的比例来看,滇湖水体受到一定的污染。

优势种共有 5 种:萼花臂尾轮虫(*Brachionus calyciflorus*)、前节晶囊轮虫(*Asplanchna priodonta*)、针簇多肢轮虫(*Polyarthra trigla*)、长三肢轮虫(*Filinia longiseta*)和裂足臂尾轮虫(*B. diversicornis*),年平均优势度分别为 0.305、0.103、0.037、0.032 和 0.029。萼花臂尾轮虫、前节晶囊轮虫和针簇多肢轮虫在 4 个季度均为优势种,长三肢轮虫是春、夏、秋三季的优势种,裂足臂尾轮虫是夏、秋季的优势种。

表 2　滇湖轮虫种类组成及其分布

Table 2　Species of rotifer occurring in different sampling stations of Lake Gehu

种类 Species	分布站点 Sampling stations	季节 Season	污染指示等级 Saprobic degree
旋轮科 Philodinidae			
红眼旋轮虫 *Philodina erythrophthalma*	1,9	春、秋	
尖刺间盘轮虫 *Dissotrocha aculeata*	4	冬	
臂尾轮科 Brachionidae			
萼花臂尾轮虫 *Brachionus calyciflorus*	1～13	春、夏、秋、冬	β-α
矩形臂尾轮虫 *B. leydigi*	1～3,5～6,9	春、秋	β
蒲达臂尾轮虫 *B. budapestiensis*	1～3,5～9,11～13	春、夏、秋、冬	
镰状臂尾轮虫 *B. falcatus*	1～2,4,7～8,10～11	春、夏	β
角突臂尾轮虫 *B. angularis*	1～13	春、夏、秋、冬	β-α
方形臂尾轮虫 *B. quadridentatus*	1	春、夏	β-α
剪形臂尾轮虫 *B. forficula*	1,4,9,11	夏、秋、冬	β
壶状臂尾轮虫 *B. urceolaris*	1～12,9～13	春、夏、秋、冬	β-α
尾突臂尾轮虫 *B. caudatus*	2～4,6～7,9～11	夏、秋	
可变臂尾轮虫 *B. variabilis*	2～4,6,9～11	春、夏、冬	
肛突臂尾轮虫 *B. bennini*	10～11	冬	
皱褶臂尾轮虫 *B. plicatilis*	2,6,8,12	夏、冬	
裂足臂尾轮虫 *B. diversicornis*	1～13	春、夏、秋、冬	o-β
唇形叶轮虫 *Notholca labis*	2	冬	β
鳞状叶轮虫 *N. squamula*	3,10	春、夏、秋	
尖削叶轮虫 *N. acuminata*	6,11	夏	
叶状帆叶轮虫 *Argonotholca foliacea*	5,9	夏	
螺形龟甲轮虫 *Keratella cochlearis*	1～2,9～13	春、夏、秋、冬	o-β
矩形龟甲轮虫 *K. quadrata*	2～3,6,10,12～13	春、夏	o-β

续表 2

种类 Species	分布站点 Sampling stations	季节 Season	污染指示等级 Saprobic degree
龟形龟甲轮虫 *K. testudo*	10 ,13	秋、冬	
曲腿龟甲轮虫 *K. valga*	1～3 ,9～12	春、秋、冬	o-β
缘板龟甲轮虫 *K. ticinensis*	9～10 ,13	春、秋	
四角平甲轮虫 *Platyias quadricornis*	12	春、秋	α
水轮科 Epiphanidae			
椎尾水轮虫 *Epiphanes senta*	13	秋	
臂尾水轮虫 *E. brachionus*	3～5	夏、冬	
狭甲轮科 Colurellidae			
钝角狭甲轮虫 *Colurella obtusa*	3 ,5～6	春、夏	o
钩状狭甲轮虫 *C. uncinata*	1 ,6 ,11～12	夏、秋	
卵形鞍甲轮虫 *Lepadella ovalis*	12	春	β
尖尾鞍甲轮虫 *L. acuminata*	1～2 ,12	春、夏	o
盘状鞍甲轮虫 *L. patella*	2 ,4 ,6	夏	o-β
覆瓦鞍甲轮虫 *L. imbricata*	7	夏	
须足轮科 Euchlanidae			
小须足轮虫 *Euchlanis parva*	3 ,10	春、夏	
大肚须足轮虫 *E. dilatata*	2 ,12	夏	o-β
晶囊轮科 Asplanchnidae			
前节晶囊轮虫 *Asplanchna priodonta*	1～13	夏、秋、冬	β
盖氏晶囊轮虫 *A. girodi*	1～6 ,8 ,10	夏、秋、冬	o-β
多突囊足轮虫 *Asplanchnopus multiceps*	3 ,11	夏、冬	o
腔轮科 Lecanidae			
蹄形腔轮虫 *Lecane ungulata*	1 ,10 ,12	春、夏、秋	o-β
月形单趾轮虫 *Monostyla lunaris*	5	秋	
尖趾单趾轮虫 *M. dosterocerca*	2 ,4～6 ,10 ,13	春、夏、秋	β
精致单趾轮虫 *M. elachis*	5 ,7 ,10～11 ,13	春、夏、秋	
囊形单趾轮虫 *M. bulla*	4	秋	o-β
椎轮科 Notommatidae			
耳叉椎轮虫 *Notemmata curita*	10	春	
弯趾椎轮虫 *N. cyrtopus*	9	冬	
细长肢轮虫 *Monommata longiseta*	1～9 ,11	春、夏、秋、冬	o
凸背巨头轮虫 *Cephalodella gibba*	2	夏	β
疣毛轮科 Synchaetidae			
广布多肢轮虫 *Polyarthra vulgaris*	6	秋	
长肢多肢轮虫 *P. dolichoptera*	1 ,3～7 ,9 ,12～13	春、夏、秋	
针簇多肢轮虫 *P. trigla*	1～13	春、夏、秋、冬	β-α
红多肢轮虫 *P. remata*	1 ,11	春、夏	
小多肢轮虫 *P. minor*	1～13	夏、秋、冬	
梳状疣毛轮虫 *Synchaeta pectinata*	5	秋	o
尖尾疣毛轮虫 *S. stylata*	4 ,6 ,8 ,12	冬	
郝氏皱甲轮虫 *Ploesoma hudsoni*	6～7	夏、冬	o-β
镜轮科 Testudinellidae			
微凸镜轮虫 *Testudinella mucronata*	8	春	
三肢轮科 Filiniidae			
较大三肢轮虫 *Filinia major*	1 ,3 ,4～11	春、夏、秋、冬	β
跃进三肢轮虫 *F. passa*	1 ,4～7 ,9 ,12	春、夏、秋	β-α
长三肢轮虫 *F. longiseta*	1～13	春、夏、秋、冬	α
聚花轮科 Conochilidae			

续表 2

种类 Species	分布站点 Sampling stations	季节 Season	污染指示等级 Saprobic degree
团状聚花轮虫 *Conochilus hippocrepis*	4	秋	o
异尾轮科 Trichocercidae			
刺盖异尾轮虫 *Trichocerca capucina*	1～12	春、夏、秋	o
纵长异尾轮虫 *T. elongata*	3 ,5～7 ,9 ,11	春、秋	o
暗小异尾轮虫 *T. pusilla*	4 ,6～9 ,11～12	春、夏、秋	β
韦氏异尾轮虫 *T. weberi*	4	秋	
罗氏异尾轮虫 *T. rousseleti*	8	秋	o
瓷甲同尾轮虫 *Diurella porcellus*	7	夏	
前翼轮科 Proalidae			
暧昧前翼轮虫 *Proales fallaciosa*	5 ,8	秋	β
腹尾轮科 Gastropodidae			
舞跃无柄轮虫 *Ascomorpha saltans*	1～8 ,10	夏、秋	o
六腕轮科 Hexarthridae			
奇异六腕轮虫 *Hexarthra mira*	2 ,7	夏	

o:寡污; o-β:寡污-β中污; β:β-中污; β-α:β-α中污; α:α-中污。

o:oligosaprobity; o-β:oligo-β-mesosaprobity; β:β-mesosaprobity; β-α:β-α-mesosaprobity; α:α-mesosaprobity.

表 3　2004～2006 年各站点轮虫密度 D (ind./L) 和生物量 B (mg/L)

Table 3　Density and biomass of rotifer of different stations in each season, 2004 - 2006

站点 Sampling station		时间 Time (年-月 Year-Month)								平均值 ±标准差 Mean ±SD
		2004-04	2004-07	2004-10	2005-01	2005-04	2005-07	2005-10	2006-01	
1	D	1 375	3 400	4 475	925	1 425	3 725	625	125	2 009 ±1 619
	B	3.160 0	12.283 1	15.224 2	8.366 0	6.164 4	31.234 5	1.272 4	0.096 0	9.725 1 ±10.150 5
2	D	400	1 425	1 600	1 025	525	750	1 675	1 125	1 066 ±482
	B	1.000 0	8.474 5	6.378 0	10.548 5	0.834 3	1.875 8	8.237 5	6.966 0	5.539 3 ±3.777 6
3	D	1 350	6 350	-	575	775	3 300	1 975	650	2 139 ±2 092
	B	2.961 3	27.900 5	-	4.964 5	2.903 9	10.564 7	7.693 0	2.536 0	8.503 4 ±9.049 5
4	D	1 250	2 650	3 275	2 000	1 250	1 800	1 500	1 975	1 963 ±702
	B	2.607 5	10.392 5	8.496 8	6.954 0	3.108 3	10.091 5	9.401 9	9.963 4	7.627 0 ±3.143 1
5	D	300	2 250	1 875	500	1 200	2 825	1 500	425	1 359 ±925
	B	0.692 5	9.923 5	4.780 8	1.539 5	2.684 3	13.513 0	7.110 8	0.292 3	5.067 1 ±4.769 5
6	D	1 150	1 250	4 200	1 550	2 100	2 725	2 375	1 675	2 128 ±998
	B	2.483 2	3.422 0	12.114 8	13.861 0	5.426 5	12.288 1	10.244 2	5.463 8	8.163 0 ±4.455 2
7	D	1 350	75	4 850	1 050	1 825	4 425	200	525	1 788 ±1 856
	B	2.552 3	0.017 5	9.478 9	17.157 0	7.360 8	26.870 8	0.476 0	0.834 3	8.093 5 ±9.590 5
8	D	950	2 275	4 825	1 650	-	200	3 100	1 425	2 061 ±1 529
	B	2.031 0	6.359 5	8.992 3	31.261 0	-	0.983 2	11.447 8	7.483 8	9.794 1 ±10.159 0
9	D	275	2 100	6 400	200	1 600	300	6 275	450	2 200 ±2 646
	B	0.631 0	6.367 5	11.500 8	1.518 0	4.526 4	0.240 8	12.800 9	0.685 8	4.783 9 ±5.032 9
10	D	400	1 725	1 300	250	1 425	50	2 500	625	1 034 ±845
	B	0.734 0	5.628 5	2.652 7	0.827 0	4.596 9	0.068 5	5.149 7	1.801 8	2.682 4 ±2.180 4
11	D	1 200	2 850	1 375	1 325	1 350	1 350	525	1 350	1 281 ±768
	B	2.459 5	6.715 2	3.478 5	9.332 5	1.331 7	6.336 3	1.636 0	1.331 3	4.077 6 ±3.016 5
12	D	100	2 650	1 025	1 000	1 225	150	1 500	575	1 028 ±822
	B	0.195 0	6.256 2	1.406 8	6.465 0	3.257 7	0.055 8	3.764 9	2.628 0	3.003 7 ±2.463 3
13	D	0	350	600	200	575	50	725	650	394 ±284
	B	0	1.424 0	1.128 0	1.380 5	1.200 9	0.027 5	5.991 8	2.053 2	1.650 7 ±1.888 6

-表示样品缺失。- Show the sample have been lost.

2.3 滈湖轮虫现存量的时空分布 由表 3 可知,中部常年繁保区和增殖区的 9 号站点北干河口的年均密度最高;南部水草区的 13 号站点张五渎口最低。年均密度最高和最低的数量相差 5.48 倍。由于不同种类的轮虫个体鲜重有较大差异,生物量的高低与密度的大小不完全一致,生物量最高的是中部繁保增殖区的 8 号站点,最低值仍出现在 13 号站点。从年均值来看:轮虫密度湖区中部(2 038 ind./L) > 北部(1 724 ind./L) > 南部(968 ind./L)。轮虫生物量中部(7.582 9 mg/L) > 北部(7.297 8 mg/L) > 南部(2.853 6 mg/L)。湖区北部与中部的轮虫密度及生物量差异不显著,北部与南部间差异显著($P = 0.024$),中部与南部间差异极显著($P = 0.002$)。

由图 2 可知:轮虫秋季的生物密度高于春、夏、冬三季。在 2005～2006 年度,春季轮虫密度较前一年春季增加了 63.84 %,而夏、秋、冬三季分别降低了 35.62 %、58.42 %和 5.84 %。最高值为 2 983 ind./L (2004 年 10 月),最低值为 777 ind./L (2004 年 4 月)。2004～2005 年度生物量呈现两个高峰,出现在夏季(8.089 6 mg/L)和冬季(8.782 7 mg/L)。2005～2006 年度生物量最高值出现在夏季(8.780 8 mg/L)。因为

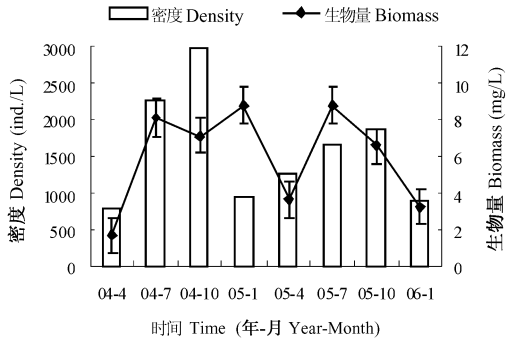

图 2 2004～2006 年轮虫密度和生物量的季节变化

Fig. 2 Seasonal change of density and biomass of rotifer in Lake Gehu (2004 - 2006)

生物量不仅与轮虫数量有关,还与种类组成密切相关,如大型的晶囊轮虫,个体重达 0.016～0.026 mg/ind.,生物量高峰的形成正是因为晶囊轮虫较多的缘故。季度间的差异极显著($P < 0.01$)。

2.4 滈湖轮虫的物种多样性 物种多样性指数 H 值波动在 0.29～2.31,物种丰富度指数 D 值波动在 0.25～1.91,均匀度指数 J 值波动在 0.37～1.00 (表 4)。3 种指数在站点间的差异不显著。H 值、物种丰富度和均匀度指数季度间差异均达极显著水平($F = 5.849$, $F = 5.342$, $F = 4.624$, $P < 0.01$)。

表 4 滈湖轮虫的物种多样性、丰富度及均匀度指数

Table 4 The distribution of Shannon-Wiener, species richness and evenness indices of rotifer in Lake Gehu from 2004,4 to 2006,1

时间 Time (年-月 Year-Month)		站号 Sampling station												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
2004-04	H'	0.31	-	0.77	0.47	0.29	0.66	1.06	0.76	0.31	1.25	0.71	0.56	-
	J	0.44	-	0.37	0.68	0.41	0.37	0.59	0.43	0.44	0.70	0.51	0.81	-
	D	0.14	-	0.97	0.14	0.18	0.71	0.69	0.73	0.18	0.84	0.42	0.22	-
2004-07	H'	1.49	1.04	1.35	1.38	1.57	0.69	0.64	1.22	1.49	1.25	1.54	1.88	1.13
	J	0.60	0.65	0.56	0.67	0.81	0.50	0.92	0.76	0.68	0.78	0.58	0.79	0.70
	D	1.35	0.55	1.14	0.89	0.78	0.42	0.23	0.52	1.05	0.54	1.63	1.27	0.68
2004-10	H'	1.35	1.63	-	2.09	1.91	1.88	1.84	1.72	1.93	1.36	1.63	1.61	1.89
	J	0.59	0.84	-	0.84	0.83	0.79	0.80	0.75	0.78	0.70	0.91	0.78	0.91
	D	1.07	0.81	-	1.36	1.19	1.20	1.06	1.06	1.26	0.84	0.69	1.01	1.09
2005-01	H'	1.33	1.02	1.35	1.75	1.33	1.28	1.32	1.09	0.52	1.23	1.24	1.05	0.67
	J	0.74	0.57	0.84	0.84	0.83	0.72	0.68	0.68	0.76	0.76	0.77	0.96	0.97
	D	0.73	0.72	0.63	0.92	0.64	0.68	0.80	0.50	0.38	0.72	0.56	0.29	0.21
2005-04	H'	1.69	1.30	1.48	1.81	1.62	1.77	1.71	-	2.16	2.20	1.93	2.22	2.08

续表 4

时间 Time (年-月 Year-Month)		站号 Sampling station 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
2005-07	*J*	0.74	0.81	0.71	0.87	0.74	0.77	0.88	-	0.90	0.84	0.84	0.86	0.90
	D	1.24	0.64	1.05	0.98	1.13	1.18	0.68	-	1.36	1.79	1.25	1.69	1.42
	H′	1.95	2.13	2.23	2.02	2.09	1.97	2.31	1.56	1.79	0.69	1.98	1.56	0.69
2005-10	*J*	0.76	0.89	0.86	0.82	0.84	0.77	0.81	0.97	1.00	1.00	0.86	0.97	1.00
	D	1.46	1.66	1.60	1.47	1.38	1.52	1.91	0.75	0.88	0.26	1.25	0.80	0.26
	H′	1.88	1.87	2.01	1.86	1.89	2.04	0.97	1.48	1.94	1.91	1.78	1.73	1.17
2006-01	*J*	0.90	0.81	0.87	0.85	0.86	0.85	0.89	0.64	0.81	0.75	0.92	0.83	0.85
	D	1.09	1.21	1.19	1.09	1.09	1.29	0.38	1.12	1.14	1.53	0.96	0.96	0.46
	H′	1.33	1.76	1.19	1.74	1.01	1.59	1.19	1.68	1.04	0.84	1.36	1.97	0.99
	J	0.96	0.80	0.86	0.90	0.73	0.89	0.86	0.94	0.58	0.76	0.62	0.95	0.62
	D	0.62	1.14	0.46	0.79	0.50	0.67	0.48	0.69	0.82	0.31	1.11	1.10	0.62

轮虫的物种多样性指数和丰富度指数与其现存量有明显的相关性,都随轮虫密度和生物量的增加而极显著提高。密度和生物量与均匀度指数的负相关未达显著水平(表 5)。

表 5　轮虫多样性的指数与密度、生物量的相关性分析

Table 5　Regression analysis of density, biomass with Shannon-Wiener, species richness and evenness

参数 Parameter	香农威尔指数 Shannon index	丰富度指数 Species richness index	均匀度指数 Evenness index
密度 Density	0.435**	0.512**	-0.145
生物量 Biomass	0.318**	0.370**	-0.119

** $P < 0.01$。表中数字为相关系数。The figures in the table: correlation coefficient.

2.5　轮虫 E/O 指数和 $Q_{B/T}$ 指数值　滆湖轮虫 E/O 值变幅为 2.0～4.0,平均 2.8。滆湖轮虫 $Q_{B/T}$ 值变幅为 2.0～9.0,平均 4.6。轮虫的 E/O 值和 $Q_{B/T}$ 与水中总无机氮之间有显著的正相关关系。两者的相关公式符合三次曲线方程:

$$Y_1 = -0.148 + 0.495X + 0.0001X^2 - 0.008X^3$$
$$(R^2 = 0.376,\ F = 3.028,\ P = 0.094)$$
$$Y_2 = -2.163 + 2.065X - 0.414X^2 + 0.026X^3$$
$$(R^2 = 0.676,\ F = 6.256,\ P = 0.014)$$

其中,Y_1 表示 E/O 值,Y_2 表示 $Q_{B/T}$ 值,X 表示总无机氮。

由表 6 可知,滆湖所有站点的 E/O 值都大于 1.5,并且滆湖所有站点的 $Q_{B/T}$ 指数均在 2 以上,因此均为富营养型。1 号站点十五洞桥口和 2 号站点嘉泽港的 $Q_{B/T}$ 指数甚至达到 9,这两个站点周边人口稠密、工厂较多,说明人类活动对滆湖水质的影响较大。

表 6　13 个采样站的 E/O 值和 $Q_{B/T}$ 值

Table 6　E/O value and $Q_{B/T}$ value at 13 sampling stations in Lake Gehu

站号 Sampling station	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
E/O	3.7	4.0	2.8	2.0	3.0	2.2	2.0	2.0	2.5	2.0	2.8	4.0	3.0
$Q_{B/T}$	9.0	9.0	4.0	2.7	6.0	3.0	2.3	2.0	3.0	8.0	3.3	3.0	5.0

2.6　理化参数、浮游植物与轮虫物群落因素的关系　表 7 显示了多项理化参数和浮游植物与轮虫的密度、生物量、生物多样性指数的关系。水温与轮虫的密度、Shannon-Wiener 指数、丰富度有显著的正相关性。pH、高锰酸盐指数与几种多样性指数都有显著相关性。总磷只与生物量呈显著正相关。轮虫密度随着浮游植物的密度和生物量的增加而显著提高,浮游植物密度

表 7 理化参数与轮虫密度、生物量和多样性指数的相关性分析

Table 7 Regression analysis of physicochemical parameters with density, biomass and Shannon-Wiener, species richness and evenness

参数 Parameter	密度 Density	生物量 Biomass	香农威尔指数 Shannon index	丰富度指数 Species richness index	均匀度指数 Evenness index
水温 Water temperature (℃)	0.295**	0.137	0.279**	0.374**	0.064
pH Potential of hydrogen	0.046	0.151	-0.267*	-0.312**	-0.199
高锰酸盐指数 Permanganate index (mg/L)	-0.086	0.018	0.360**	0.343**	0.324**
总磷 Total phosphorus (mg/L)	-0.010	0.231*	0.042	-0.093	0.118
浮游植物密度 (10^4ind./L) Density of phytoplankton	0.518**	0.230*			
浮游植物生物量(mg/L) Biomass of phytoplankton	0.241*	0.035			

** $P < 0.01$, * $P < 0.05$。表中数字为相关系数。The figures in the table: correlation coefficient.

与轮虫生物量的正相关也达到显著水平。

利用逐步回归的方法,得出轮虫密度(D_{rot})和生物量(B_{rot})与理化参数的回归方程:

$$D_{rot} = -11\,021.000 + 1\,470.581\,\text{pH} + 56.452\,\text{水温}$$

$$(R^2 = 0.233,\ F = 9.128,\ P = 0.000)$$

$$B_{rot} = -32.034 + 0.243\,\text{水温} + 4.195\,\text{pH}$$

$$(R^2 = 0.162,\ F = 5.795,\ P = 0.005)$$

3 讨 论

3.1 影响轮虫密度的环境因子 尽管诸多理化因子均与轮虫的发生及其季节变化密切相关,但多数学者都认为决定轮虫种类季节演替的主要因子是水温[4,19,20]。Herzig[2]根据不同种类轮虫的发生对温度的选择情况将轮虫归纳为广温性种类、冬春季种类及夏秋季种类。国内王家楫等[21]也曾讨论了水温对轮虫的季节分布的影响。黄祥飞等[22]曾研究了温度对轮虫卵发育的影响,并据不同温度下出现的种类,把轮虫分成 3 种类型:冷水性种类、广温性种类和暖水性种类。可见,温度对轮虫的繁殖、生长发育及时空分布起着关键性作用。漏湖 69 种轮虫,绝大多数为广温性种类,少数为冷水性种类和暖水性种类。如臂尾轮虫、螺形龟甲轮虫、广生多肢轮虫、三肢轮虫、晶囊轮虫、疣毛轮虫等都是广温性种类,而异尾轮虫多属暖水性种类(适宜温度约为 25～29 ℃),故漏湖轮虫在夏、秋季出现数量高峰是可以理解的。

水温、溶解氧和 pH 是影响轮虫密度的主要非生物因素[23]。Herzig[2]提出,在许多水体分层的富营养化湖泊中,溶解氧的不足可以限制轮虫的发生。由于漏湖是一个浅水湖泊,水体无分层现象,溶解氧及 pH 差别不大,水温应该是影响漏湖轮虫密度的最主要非生物因素。本研究结果表明,水温对全年轮虫总密度的影响最大,从而进一步证实水温是控制轮虫密度的主要生态因子,这与 Galkovskaja[24]及温新利[4]的研究结果也是一致的。

尽管水温对漏湖轮虫密度的影响最大,但食物也是不容忽视的重要因素。藻类、自养型鞭毛虫、小型纤毛虫、细菌及腐殖质均可作为轮虫的食物资源,不同种类的轮虫首选的食物也不相同[25]。现今漏湖占优势的微型生物和大量的碎屑正是轮虫的适宜饵料。因此,充足的食物为轮虫数量的增长提供了条件。

随温度上升,轮虫卵的发育时间缩短,在丰富的食物供给条件下,使种群周转加快,导致种群密度迅速增加,因此轮虫总数的高峰一般出现在 20 ℃以上[26]。夏、秋季水体中的藻类、动物尸体等在细菌的作用下,很快形成碎屑[27]。一些以碎屑为主要食物的轮虫因有丰富的食物而大量繁殖;同时,另一些以藻类、碎屑为主要食物的种类也得到相应的增长。因此,漏湖轮虫的密度高峰出现在夏、秋季。这与香溪河库湾、鄱阳湖等的变动规律基本一致[5,28]。

3.2　滇湖三个湖区的比较　国内外许多学者的研究[11～13,29,30]发现,轮虫密度和生物量随水体富营养化的加剧而增加。有学者认为轮虫总密度上升可能与"下行效应"和"上行效应"有一定的关系[31]。本研究中滇湖三个湖区轮虫群落结构的不同可能有以下一些原因:湖区北部和中部富营养化程度高于南部,在较多的营养输入的情况下,浮游植物的现存量增大,为轮虫提供了更多的食物,使得北部和中部轮虫的现存量明显高于南部。另一方面,大型浮游甲壳动物对轮虫有抑制作用:一是通过食物竞争,二是通过机械损伤。本研究中,滇湖湖区南部的浮游甲壳动物的年平均密度(13.5 ind./L)明显高于湖区中部(11.8 ind./L)和北部(5.4 ind./L)。湖区北部的富营养化程度虽高于湖区中部,但轮虫的现存量却稍低,可能是因为湖区北部是滇湖的入水口,承接了较多的城市污水和工农业废水,甚至有些乡镇企业的有毒废水未经妥善处理就排入湖中,影响了轮虫的生长。

3.3　滇湖水质评价　轮虫发育时间快,生命周期短,能较为迅速地反映环境的变化,被认为是很好的指示生物,一般可根据湖泊中的轮虫种类演替来推测湖泊营养型的变化。有关轮虫的指示种,虽然不同的学者有不同的观点[32,33],但对多数轮虫指示种类的看法是一致的。一般认为,富营养湖泊典型指示种是:臂尾轮属、裂痕龟纹轮虫(*Anuroeopsis fissa*)、沟痕泡轮虫(*Pompholyx sulcata*)、圆筒异尾轮虫(*T. cylindrica*)、长三肢轮虫、暗小异尾轮虫、螺形龟甲轮虫、矩形龟甲轮虫、真翅多肢轮虫(*P. euryptera*)[32]。滇湖仅臂尾轮属就出现了13种,而且长三肢轮虫、暗小异尾轮虫、螺形龟甲轮虫、矩形龟甲轮虫也都是滇湖的常见种,这足以为滇湖是一富营养型湖泊提供了一个有力的证明。

与其他浅水湖泊相比[28,34],滇湖轮虫的密度和$Q_{B/T}$值均偏高,种类数差不多,但多为耐污染种类,物种丰富度较低,显示了滇湖极差的生态环境。

用轮虫E/O值、$Q_{B/T}$值、Shannon-Wiener指数、Margalef多样性指数值来评价滇湖的水质状况,与理化指标[35]基本相符。因此笔者认为,轮虫可作为滇湖的一种较理想的生物监测指标。许多学者认为,轮虫可作为有效的水体污染指示生物,并能更直接、真实地反映水体质量优劣对生物群落本身的影响程度[36]。但有些学者认为污染等级不能单纯以轮虫的种类及数量为准,还必须同浮游植物的数量及水质理化分析等结合起来综合分析[4,9]。

参　考　文　献

[1] Lim L C, Wong C C. Use of the rotifer, *Brachionus calyciflorus* Pallas, in freshwater ornamental fish larviculture. *Hydrobiologia*, 1997, **358**: 269～273.

[2] Herzig A. The analysis of planktonic rotifer populations: A plea for long-term investigations. *Hydrobiologia*, 1987, **147**: 163～180.

[3] 谢平,诸葛燕,戴荣. 水体富营养化对浮游生物群落多样性的影响. 水生生物学报, 1996, **20**(增刊): 30～37.

[4] 温新利,席贻龙,张雷等. 青弋江芜湖段轮虫群落结构和物种多样性的初步研究. 生物多样性, 2004, **12**(4): 387～395.

[5] 周淑蝉,黄祥飞,唐涛等. 香溪河库湾轮虫现状及水质评价初探. 水生生物学报, 2006, **30**(1): 52～57.

[6] 宗志祥,许崇任,任久长等. 洋河水库轮虫群落用于水质评价的研究. 环境科学学报, 1993, **13**(1): 101～106.

[7] Sladack V. Rotifers as indicators of water quality. *Hydrobiology*, 1983, **100**: 169～202.

[8] Aare M. Rotifers as indicators of lake types in Estonia. *Hydrobiology*, 1983, **104**: 357～361.

[9] 李共国,虞左明. 千岛湖轮虫群落结构及水质生态学评价. 湖泊科学, 2003, **15**(2): 169～178.

[10] Duggan I C, Green J D, Shiel R J. Distribution of rotifers in North Island, New Zealand and their potential use as bioindicators of lake trophic state. *Hydroblologia*, 2001, **446/447**: 155～164.

[11] 熊金林,梅兴国,胡传林. 湖北四湖泊营养类型与轮虫群落的关系. 动物学杂志, 2003, **38**(6): 8～14.

[12] 杨桂军,潘宏凯,刘正文等. 太湖不同富营养水平湖区轮虫季节变化的比较研究. 湖泊科学, 2007, **19**(6): 652～657.

[13] 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.

[14] 黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析. 北京:中国标准出

版社,1999,72～79.

[15] Koste W. Rotatoria. Die Rädertiere Mitteleuropas begründet von Max Voigt. Ⅱ. Berlin: Gebrüder Borntraeger,1978,1～468.

[16] 王云龙,袁骥,沈新强. 长江口及邻近水域春季浮游植物的生态特征. 中国水产科学,2005,**12**(3):300～306.

[17] 尚玉昌. 普通生态学. 北京:北京大学出版社,2002,1～400.

[18] 张觉民,何志辉. 内陆水域渔业自然资源调查手册. 北京:农业出版社,1991,67～70.

[19] May L. Rotifer occurrence in relation to water temperature in Loeh Leven. Scotland. *Hydrobiologia*,1983,**104**:311～315.

[20] Arora J,Mehra N K. Seasonal dynamics of rotifers in relation to physical and chemical conditions of the river Yamurna (Delhi),India. *Hydrobiologia*,2003,**491**:101～109.

[21] 王家楫. 中国淡水轮虫志. 北京:科学出版社,1961,38～175.

[22] 黄祥飞,胡春英,伍焯田. 武汉东湖的轮虫. 水生生物学报,1985,**9**(2):129～143.

[23] Hofmann W. The influence of a biotic environmental factors on population dynamics in planktonic rotifers. *Arch Hydrobiol Beih Ergebn Limnol*,1977,**8**:77～83.

[24] Galkovskaja G A. Planktonic rotifers and temperature. *Hydrobiologia*,1987,**147**:307～317.

[25] Holst H. Zimmermann H, Kausch H, *et al*. Temporal and spatial dynamics of planktonic rotifers in the Elbe Estury during Spring. *Estuarine Costal and Shelf Science*,1998,**47**:261～273.

[26] 章宗涉,黄祥飞. 淡水浮游生物的研究方法. 北京:科学出版社,1991,1～344.

[27] 林婉莲,刘鑫洲,刘健康. 四种浮游生物的碎屑形成过程. 水生生物学集刊,1984,**8**(2):1～8.

[28] 谢钦铭,李云,李长春. 鄱阳湖轮虫种类组成与现存量季节变动的初步研究. 江西科学,1997,**15**(4):235～241.

[29] 刘建康. 东湖生态学研究(二). 北京:科学出版社,1995,207～234.

[30] Margatritora G F, Fumanti B, Alfinito S, *et al*. Trophic condition of the volcanic Lake Nemi (Central Italy) environmental factors and planktonic communities in a changing environment. *Journal of Limnol*, 2005, **64**: 119～128.

[31] Yoshida T,Urabe J,Elser J J. Assessment of 'top-down' and 'bottom-up' forces as determinants of rotifer distribution among lakes in Ontario,Canada. *Ecological Research*,2003,**18**:639～650.

[32] Gannon J E, Stemberger R S. Zooplankton (especially Crustaceans and rotifers) as indicators of water quality. *Trans Amer Micros*,1978,**97**(1):16～35.

[33] Maemets A. Rotifer as indicators of lake types in Estonia. *Hydrobiology*,1983,**104**:357～361.

[34] 张琦,陈菊芳,杞桑等. 广东肇庆星湖浮游轮虫的调查及其与水质关系的研究. 生态科学,1997,**16**(2):27～31.

[35] 彭自然,陈立婧,江敏等. 滇湖水质调查与富营养状态评价. 上海水产大学学报,2007,**16**(3):252～258.

[36] 林育珍,李玉仙,郭沛涌等. 东平湖轮虫群落与水质评价. 山东师大学报(自然科学版),1998,**13**(1):63～67.

《动物学杂志》第十届编辑委员会

主　编:马　勇

副主编:宋延龄　赵　勇　彭景楩　徐延恭　顾亦农

编　委:(以姓氏笔画为序)

马　勇　马建章　王祖望　王跃招　王德华　方盛国　计　翔　孙青原　孙悦华
刘楩发　许木启　李　宁　李　明　李进华　李枢强　李新正　张正旺　张春光
张树义　张瑾峰　吴孝兵　陈佩惠　宋大祥　宋延龄　宋林生　杨　光　杨增明
孟安明　宛新荣　郑光美　赵　勇　费　梁　钟文勤　桂建芳　夏国良　顾亦农
徐存拴　徐宏发　徐延恭　曹　焯　彭贤锦　彭景楩　蒋志刚　魏辅文

责任编辑:顾亦农　梁　冰