

太湖典型入湖河流莲花荡浮游动物群落 的季节演替及其环境指示意义初步研究

袁雅琴^{①②④} 周春丽^③ 高海燕^① 史宏艺^① 成小英^{①②④*}

① 江南大学环境与土木工程学院 无锡 214122; ② 江苏省水处理技术与材料协同创新中心 苏州 215000; ③ 江苏绿色大地环境
修复有限公司 南京 210000; ④ 江苏省厌氧生物技术重点实验室 无锡 214122

摘要: 2015 年对宜兴莲花荡水系四个季节浮游动物调查, 共鉴定出浮游动物 136 种, 其中, 原生动物 72 种、轮虫 39 种、枝角类 13 种、桡足类 9 种、其他幼虫及卵 3 种。群落结构以原生动物和轮虫小型浮游动物为主。浮游动物的年平均密度为 14 664 ind/L, 年平均生物量为 4.903 mg/L, 生物多样性指数 H' 年平均值为 2.26。浮游动物密度以及生物量随季节变化比较明显。对浮游动物密度、生物量、多样性指数与水质指标进行 Pearson 相关性分析, 发现总氮 (TN)、氨氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) 以及溶解氧 (DO) 是影响浮游动物密度的主要因素。结合生物多样性指数评价方法以及优势种情况, 判定莲花荡水系整体处于中污型。

关键词: 莲花荡水系; 浮游动物; 水质; 生物多样性指数; 群落结构

中图分类号: Q958 文献标识码: A 文章编号: 0250-3263 (2017) 05-812-12

A Preliminary Study on Seasonal Change of Zooplankton Community and Its Environmental Indication in Lianhuadang River System

YUAN Ya-Qin^{①②④} ZHOU Chun-Li^③ GAO Hai-Yan^① SHI Hong-Yi^① CHENG Xiao-Ying^{①②④*}

① *School of Environment and Civil Engineering of Jiangnan University, Wuxi 214122*; ② *Water Treatment Technology and Material Collaborative Innovation Center in Jiangsu Province, Suzhou 215000*; ③ *Jiangsu Green Earth Environment Restoration Co., Ltd, Nanjing 210000*; ④ *Jiangsu Key Laboratory of Anaerobic Biotechnology, Wuxi 214122, China*

Abstract: Investigation on the zooplankton of Lianhuadang River System which feeding into the Taihu Lake in Yixing in four seasons within a year were carried out in 2015. Total of 136 species of zooplankton were identified including 72 species of Protozoa, 39 species of Rotifer, 13 species of Cladocera, 9 species of Copepoda and 3 unknown species by the larvae. Community structure was mainly made up of small zooplankton, including Protozoa and Rotifer. The annual average density, biomass and biodiversity index were 14 664 ind/L (Table 4), 4.903 mg/L (Table 5) and 2.26 (Fig. 4) respectively. Annual average density and biomass reached to

基金项目 水体污染控制与治理科技重大专项 (No. 2014ZX07305003);

* 通讯作者, E-mail: 439174716@qq.com;

第一作者介绍 袁雅琴, 女, 硕士研究生; 研究方向: 湖泊生态与环境; E-mail: 798227718@qq.com。

收稿日期: 2016-11-07, 修回日期: 2017-02-23 DOI: 10.13859/j.cjz.201705010

the largest at sampling site H (32 909 ind/L) and site 9 (12.176 mg/L) (Fig. 2, Fig. 3) respectively. The density and biological amount of zooplankton varied obviously with seasons. The quantity of species found in autumn was 65 species which is the highest in the four seasons (Table 2). Total of 20 species was recognized as dominance species in the samples collected in one or more than one seasons, however, none of them appeared in the samples through out the whole year. The main dominant species were *Tintinnopsis* sp., *Diffugia* sp., *Euplotes* sp., *Keratella* sp., *Brachionus* sp., *Polyarthra* spp., *Bosmina* sp., *Sinocalanus dorrii* and *Mesocyclops* sp. (Table 3). The total nitrogen, ammonia nitrogen and dissolved oxygen were the significant factors on zooplankton density (Table 6). The evaluation based on the biological diversity index and dominant species indicated clearly that the water quality of Lianhuadang River System was moderately polluted and meso-eutrophic.

Key words: Lianhuadang River System; Zooplankton; Water quality; Biodiversity index; Community structure

太湖是我国重点治理的“三河三湖”之一, 其入湖河流的水质日益受到重视。莲花荡水系位于宜兴市丁蜀镇东部。宜兴地处江苏省最南端、太湖西岸, 属于北亚热带南部季风气候, 四季分明, 温和湿润, 雨水充沛, 年平均降雨量为 1 197 mm, 年平均气温为 15.6℃。冬季西北风占主导地位, 气候寒冷且干燥; 夏季则东南风占主导, 气候炎热且湿润; 长年主导风向为东南风(杨一帆 2015)。莲花荡水系包括莲花荡和乌溪港, 整个水域面积约为 2 km², 主河总长为 5.1 km, 西起莲花荡, 东经乌溪港流入太湖, 是太湖西部的主要入湖河流之一(孙雯等 2014)。莲花荡水系水深最高 2.5 m, 最低 1.8 m。鱼类主要有鲤鱼 (*Cyprinus carpio*)、鲢鱼 (*Hypophthalmichthys molitrix*)、鲫鱼 (*Carassius auratus*) 以及白鱼 (*Anabarilius*) 等。水生植物有人工种植的风眼莲 (*Eichhornia crassipes*), 个别采样点发现有穗花狐尾藻 (*Myriophyllum spicatum*)。底栖动物主要包括水丝蚓 (*Limnodrilus hoffmeisteri*) 和摇蚊 (*Chironomidae*) 等类。无锡市统计年鉴表明, 乌溪港和莲花荡 2010 年至 2012 年水质为 V 类或劣 V 类水平, 氮磷含量超标(马智波等 2014)。

浮游动物是水生态系统重要的组成部分, 包括原生动物、轮虫、枝角类、桡足类以及其他幼虫及卵(吴利等 2015)。浮游动物作为食物链中重要的一环, 与温度、酸碱度、溶解氧

等非生物因子以及捕食、竞争、大型水生植物的生长状况等生物因子有着极其密切的关系(Aoyagui et al. 2004)。随着水体富营养化的不断加剧, 对浮游动物与环境因子相互关系的研究逐步增多, 如对贵阳市红枫湖水库浮游生物群落进行的调查与分析, 表明温度、氨氮、电导率、pH 是影响浮游动物群落结构的主要因子(夏品华等 2011); 对梁塘河水生态环境的调查, 表明浮游动物的 Shannon-Wiener 多样性指数与透明度、叶绿素 a 均呈显著负相关(李芸等 2015); 利用浮游动物群落结构的各种指标, 包括群落组成差异、生物密度大小、生物量分布以及多样性指数的增减, 可以检测评价水质及其变化趋势(刘歆璞等 2013)。因此, 浮游动物在水生态、水质监测和水污染治理方面的重要作用日益受到人们的广泛重视(孙刚等 2006)。

本研究在莲花荡水系采集样本, 分析其浮游动物的群落组成、生物密度、生物量、物种多样性及其与环境因子的相关性, 通过生物多样性指数以及优势种类来评价水质, 为其水质修复提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 采样点设置

在莲花荡水系共设置 19 个采样点, 采样点的分布位置见图 1, 采样点的坐标见表 1。

1.2 样品的采集及处理、鉴定

在 2015 年 3、6、9、12 月的 25 号前后，选择晴好天气的上午采样，作为 4 个季节的样本。浮游动物定性标本采用 25 号浮游生物网采集，于水面下作“∞”状拖动，将浓缩于网头的水样收集于 50 ml 的标本瓶内，用 4% 的甲醛溶液固定；定量标本则用 5 L 采水器分别于水面以下 0.5 m 处和 1.5 m 处采集水样，混合均匀后，取 1 L 水样置于采样瓶内，加入 15 ml 1.5% 鲁哥氏液固定，浓缩至 50 ml，加 4% 甲醛保存（周晓梅 2010），用 1 ml 计数框显微镜分属计数，3 次取其均值（林青等 2014）。按照《水库渔业资源调查规范》SL 167-2014（中华人民共和国水利部 2014）第 9 章“浮游植物和浮游动物调查”进行定性定量及生物量的分析。

分类鉴定参考文献：《微型生物监测新技术》

（沈韞芬等 1990）、《中国淡水轮虫志》（王家楫 1961）、《中国动物志》（蒋燮治等 1979）、《淡水微型生物图谱》（周凤霞等 2010）、《淡水浮游生物研究方法》（章宗涉等 1991）。

1.3 多样性指数及优势度的计算

1.3.1 生物多样性指数 Shannon-Wiener 指数
浮游动物的生物多样性采用 Shannon-Wiener 指数来表征， $H' = -\sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i$ ， $P_i = \frac{n_i}{N}$ ，式中，

H' 为 Shannon-Wiener 多样性指数， n_i 代表群落中第 i 个物种的个体数量， N 为群落中所有个体总数量， S 代表群落中所有物种总数。 H' 处于 0~1 时，指示该水体处于重污染；处于 1~2 时，指示该水体处于 α -中污型；处于 2~3 时，指示该水体处于 β -中污型； $H' > 3$ 时，指示该水体处于轻污染或无污染（蔡立哲等 2002）。

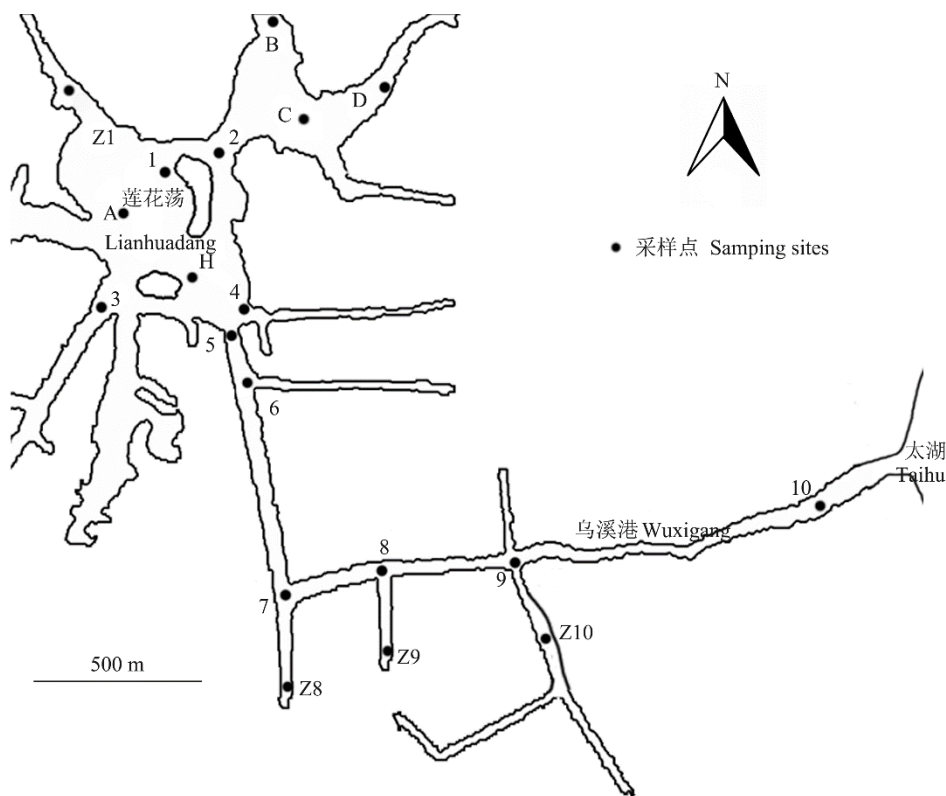


图 1 莲花荡水系浮游动物采样点分布图

Fig. 1 Sampling sites of zooplankton in Lianhuadang River System

表 1 莲花荡水系浮游动物采样点坐标

Table 1 Coordinates of the sampling site of zooplankton in Lianhuadang River System

采样点 Sampling sites	纬度 Longitude	经度 Latitude	采样点 Sampling sites	纬度 Longitude	经度 Latitude
1	31°14'31"N	119°51'46"E	A	31°14'22"N	119°51'43"E
2	31°14'31"N	119°52'03"E	B	31°14'53"N	119°52'06"E
3	31°14'11"N	119°51'51"E	C	31°14'39"N	119°52'10"E
4	31°14'11"N	119°52'03"E	D	31°14'36"N	119°52'21"E
5	31°14'08"N	119°52'03"E	Z1	31°14'22"N	119°51'35"E
6	31°14'01"N	119°52'05"E	Z8	31°13'22"N	119°52'11"E
7	31°13'33"N	119°52'11"E	Z9	31°13'27"N	119°52'25"E
8	31°13'34"N	119°52'21"E	Z10	31°13'29"N	119°52'50"E
9	31°13'36"N	119°52'46"E	H	31°14'20"N	119°52'00"E
10	31°13'39"N	119°53'16"E			

1.3.2 优势度及优势种的确定 群落优势种选用 McNaughton 优势度指数 (Y) 来确定 (McNaughton 1967): $Y = (n_i/N)f_i$, 式中, N 为样品中浮游动物总个体数, n_i 表示第 i 种的个体数, f_i 为第 i 种在各样点出现的频率。本研究以优势度指数 $Y > 0.02$ 确定优势种。

1.4 数据的处理与分析

运用 SPSS 软件对莲花荡浮游动物群落结构变化的数据进行统计分析, 通过 Pearson 相关性分析和 one-way ANOVA 分析浮游动物密度、生物量以及多样性指数与水质之间的相关性和差异性。

2 结果与分析

2.1 莲花荡浮游动物群落组成

对莲花荡的浮游动物进行分析鉴定, 莲花荡的浮游动物群落包括原生动物、轮虫、枝角类、桡足类和其他幼虫及卵。本次调查共鉴定出浮游动物 136 种 (附录), 其中原生动物 72 种, 占浮游动物总种类数的 52.94%; 轮虫 39 种, 占 28.68%; 枝角类 13 种, 占 9.56%; 桡足类 9 种, 占 6.61%; 其他幼虫及卵 3 种, 占 2.21%。原生动物和轮虫是莲花荡水系浮游动物的主要组成部分, 枝角类和桡足类组成较少, 生物种类整体趋向小型化。鉴定出的种类主要以原生动物中的似铃壳虫 (*Tintinnopsis* sp.)、砂壳虫

(*Diffugia* sp.)、游仆虫 (*Euplotes* sp.); 轮虫中的龟甲轮虫 (*Keratella* sp.)、臂尾轮虫 (*Brachionus* sp.)、多肢轮虫 (*Polyarthra* spp.); 枝角类中的象鼻溞 (*Bosmina* sp.) 为优势种。这些优势种大多为富营养化指示种类。

浮游动物种类组成的季节变化较大, 秋季出现的种类最多, 为 65 种, 其次是春季、冬季, 分别为 52 种和 49 种, 夏季出现得最少, 为 39 种 (表 2)。轮虫在春季、夏季占优势, 分别有 27、17 种, 所占比例为 51.92% 和 43.58%。轮虫类常见种为曲腿龟甲轮虫 (*K. valga*)、螺形龟甲轮虫 (*K. cochlearis*) 等, 三肢轮虫 (*Filinia* sp.) 在春季较常见; 异尾轮虫 (*Trichocerca* sp.) 和晶囊轮虫 (*Asplanchna* sp.) 在冬季占据优势。原生动物在秋季、冬季占优势, 分别有 39、36 种, 占 60% 和 73.4%。春季以钟虫 (*Vorticella* sp.)、似铃壳虫为优势; 夏季以似铃壳虫和砂壳虫为优势; 秋季纤毛虫 (*Ciliata*) 和变形虫 (*Amoeba* sp.) 数量上升, 占据优势; 冬季则筒壳虫 (*Tintinnidium* sp.) 和游仆虫为优势种。枝角类和桡足类在四个季节所占比例较小。轮虫卵在春季较多, 个别采样点轮虫卵在生物量上占据优势, 在夏、秋、冬季却少有发现。桡足幼体在冬季较常见, 无节幼体全年常见。

2.2 浮游动物优势种

莲花荡浮游动物优势种组成并不复杂, 春

表 2 莲花荡水系不同季节浮游动物的种类数

Table 2 The species number of zooplankton in different seasons in Lianhuadang River System

季节 Seasons	原生动物 Protozoa	轮虫 Rotifer	枝角类 Cladocera	桡足类 Copepoda	其他幼虫及卵 Other larvae	总计 Total
春季 Spring	13	27	4	5	3	52
夏季 Summer	13	17	6	3	0	39
秋季 Autumn	39	15	6	5	0	65
冬季 Winter	36	6	3	4	0	49

季有 7 种优势种,且以钟虫的优势最为明显(表 3)。夏季同春季一样,也有 7 种优势种,但似铃壳虫为第一优势种。秋季的优势种最多,有 10 种,砂壳虫以及王氏似铃壳虫(*Tintinnopsis wangi*)的优势较为明显。冬季优势种只有游仆虫和筒壳虫 2 种。

全年共有 20 种优势种,但没有 1 种同时出现在四个季节中,似铃壳虫是春、夏、冬 3 个季节的优势种,王氏似铃壳虫、砂壳虫、筒壳虫和纤毛虫为夏、秋 2 个季节的优势种,其他种类则仅为 1 个季节的优势种,反映出莲花荡水系浮游动物的优势种类受季节影响较为显著。

在本研究中,原生动物的优势种以砂壳虫和似铃壳虫以及王氏似铃壳虫为主,它们是贫营养水体的指示种;轮虫的优势种则以臂尾轮虫、长三支轮虫、多肢轮虫以及龟甲轮虫为主,枝角类的优势种为象鼻溞,它们是富营养水体的指示种。因此莲花荡水系应属于中营养水体。

2.3 浮游动物密度与生物量的时空变化

2.3.1 浮游动物密度时空变化 莲花荡浮游动物年平均密度为 14 664 ind/L,其中各种类所占的比例明显不同。原生动物的年平均密度占浮游动物年平均密度的比例高达 84.08%;其次是轮虫类,年平均密度所占比例为 9.26%;枝角类、桡足类的年平均密度所占比例分别为 2.98%, 3.61%;其他幼虫及卵的年平均密度所占比例为 0.07%。莲花荡水系浮游动物数量以原生动物占明显优势。莲花荡浮游动物密度在秋季达到最大,为 33 670 ind/L;其次是夏季和冬季,密度分别为 12 343 ind/L 和 11 551 ind/L;春季最小,只有 1 092 ind/L(表 4)。在不同

表 3 莲花荡水系浮游动物优势种的年际变化

Table 3 The dominant species change by seasons in Lianhuadang River System

季节 Seasons	优势种 Dominant species	优势度 Dominant degree
春季 Spring	似铃壳虫 <i>Tintinnopsis</i> sp.	0.04
	钟虫 <i>Vorticella</i> sp.	0.20
	角突臂尾轮虫 <i>Brachionus angularis</i>	0.03
	尾三支轮虫 <i>Filinia major</i>	0.06
	长三支轮虫 <i>F. longiseta</i>	0.05
	多肢轮虫 <i>Polyarthra</i> sp.	0.02
	轮虫卵 <i>Rotifer</i> eggs	0.12
夏季 Summer	砂壳虫 <i>Diffugia</i> sp.	0.07
	褐砂壳虫 <i>Diffugia avellana</i>	0.03
	纤毛虫 <i>Ciliata</i>	0.02
	似铃壳虫 <i>Tintinnopsis</i> sp.	0.08
	筒壳虫 <i>Tintinnidium</i> sp.	0.05
	曲腿龟甲轮虫 <i>Keratella valga</i>	0.07
王氏似铃壳虫 <i>Tintinnopsis wangi</i>	0.02	
秋季 Autumn	砂表壳虫 <i>Arcella arenaria</i>	0.03
	法帽虫 <i>Phryganella</i> sp.	0.04
	砂壳虫 <i>Diffugia</i> sp.	0.07
	球形砂壳虫 <i>D. globulosa</i>	0.06
	纤毛虫 <i>Ciliata</i>	0.02
	变形虫 <i>Amoeba</i> sp.	0.02
	似铃壳虫 <i>Tintinnopsis</i> sp.	0.04
	王氏似铃壳虫 <i>T. wangi</i>	0.07
	螺形龟甲轮虫 <i>Keratella cochlearis</i>	0.03
	象鼻溞 <i>Bosmina</i> sp.	0.02
冬季 Winter	游仆虫 <i>Euplotes</i> sp.	0.05
	筒壳虫 <i>Tintinnidium</i> sp.	0.04

季节，浮游动物密度存在显著差异 (ANOVA, $F=7.809, P<0.01$)。年平均生物密度在 H 采样点达到最大值 32 909 ind/L (图 2)，但各采样点之间不存在显著差异性。水质的 one-way ANOVA 分析显示，莲花荡水质在不同季节之间存在显著差异 (ANOVA, $F=3.112, P<0.05$)，但同一季节各采样点之间不存在显著差异。

2.3.2 浮游动物生物量时空变化 莲花荡浮游动物年平均生物量为 4.903 mg/L，在秋季达到最大，为 17.002 mg/L；其次是春季、夏季，分

别为 0.968 mg/L、1.050 mg/L；冬季生物量最小，为 0.591 mg/L。其中，桡足类年平均生物量占整个浮游动物年平均生物量的 57.84%；其次是枝角类及原生动物，年平均生物量分别占 26.86%、12.38% (表 5)。产生这种现象主要是因为桡足类的个体比较大，湿重比较重，所以生物量大，所占比例大，而轮虫类虽然在数量上比桡足类多，但是其湿重较小，所以生物量较小。生物量随季节的变化与生物密度结果相似，都是在秋季达到最大值，其次是春季、

表 4 莲花荡水系浮游动物密度季节变化 (ind/L)

Table 4 Seasonal variation of the zooplankton density in Lianhuadang River System

季节 Seasons	原生动物 Protozoa	轮虫 Rotifer	枝角类 Cladocera	桡足类 Copepoda	其他幼虫及卵 Other larvae
春季 Spring	543	452	19	35	43
夏季 Summer	10 715	1 583	19	26	0
秋季 Autumn	26 676	3 242	1 708	2 044	0
冬季 Winter	11 385	154	2	10	0
平均 Average	12 330	1 357	437	528	11

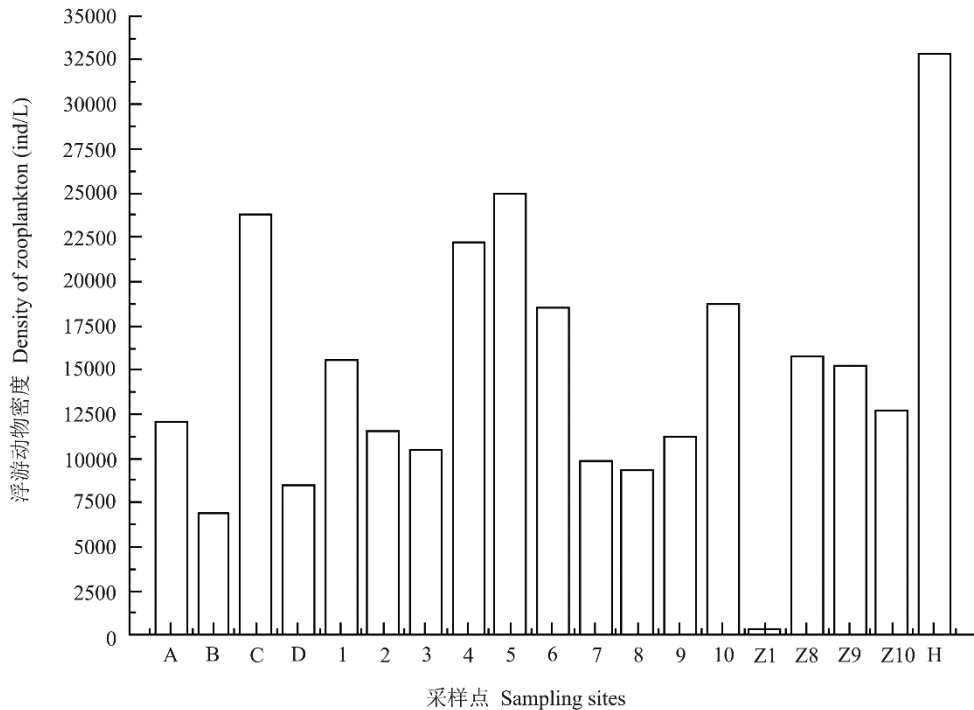


图 2 莲花荡水系浮游动物密度空间变化

Fig. 2 Spatial variation of the zooplankton density in Lianhuadang River System

夏季，最小是冬季，不同季节之间存在显著性差异 (ANOVA, $F=3.094$, $P<0.05$)。9 号采样点年平均生物量最高, 为 12.176 mg/L (图 3), 主要原因是 9 号点大型浮游动物桡足类比较多, 所以生物量比较大。不同采样点之间不存在显著的差异性, 与生物密度以及水质的 ANOVA 分析结果一致。其原因可能是莲花荡水系两岸相对比较均质, 都是农田以及农户, 外界环境差别较小。

2.4 浮游动物多样性指数及水质评价

Shannon-Wiener 多样性指数 H' 年平均值为 2.26, 在秋季达到最大值 (3.22), 夏季最小值 (1.37), 春季和冬季分别为 2.59、1.84。不同采样点的多样性指数 H' 年平均值变化在 0.95 ~ 3.19 之间 (图 4)。最小值在夏季的 10 号采样点达到, 最大值在春季 8 号采样点, 根据多样性指数评价等级可知, 莲花荡的水质在夏季、冬季处于 α -中污型状态, 而春季处于 β -中污型

表 5 莲花荡水系浮游动物生物量季节变化 (mg/L)

Table 5 Seasonal variation of the zooplankton biomass in Lianhuadang River System

季节 Seasons	原生动物 Protozoa	轮虫 Rotifer	枝角类 Cladocera	桡足类 Copepoda	其他幼虫及卵 Other larvae
春季 Spring	0.027	0.089	0.376	0.473	0.004
夏季 Summer	0.506	0.188	0.229	0.127	0.000
秋季 Autumn	1.351	0.289	4.646	10.716	0.000
冬季 Winter	0.544	0.001	0.017	0.028	0.000
平均 Average	0.607	0.142	1.317	2.836	0.001

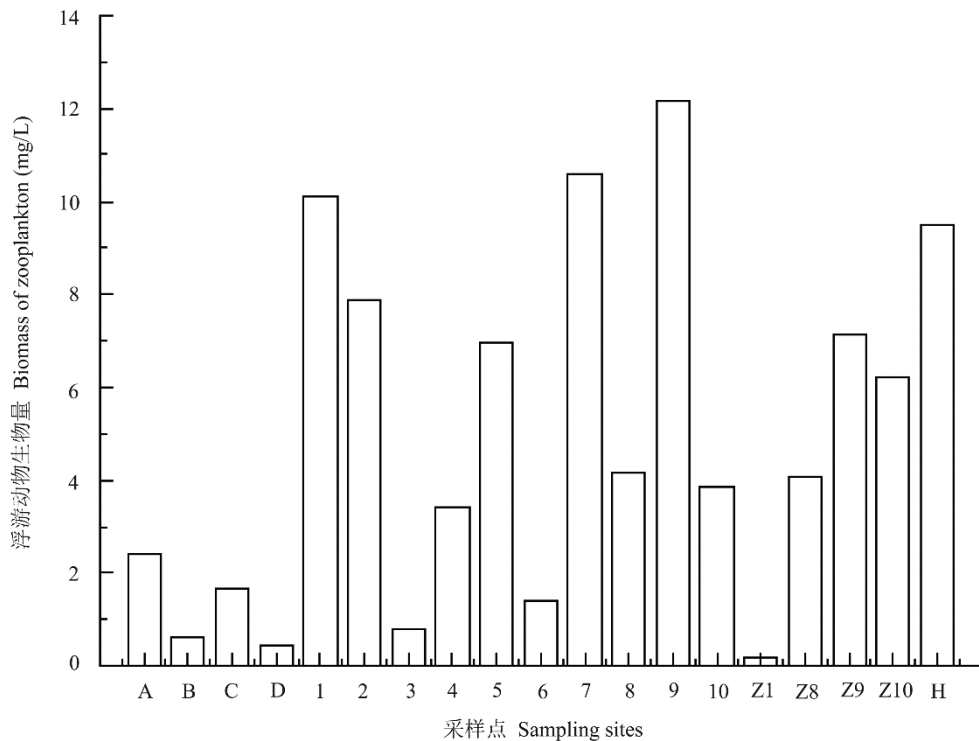


图 3 莲花荡水系浮游动物生物量空间变化

Fig. 3 Spatial variation of the zooplankton biomass in Lianhuadang River System

状态，秋季则处于轻污染状态。由表 3 优势种的年际变化可知，优势种主要为臂尾轮虫、象鼻溞等富营养化指示种类，所以，综合 Shannon-Wiener 多样性指数 H' 以及优势种类，莲花荡水系的水质应处于中污型状态。

2.5 浮游动物密度、生物量以及多样性指数与环境因子的相关性分析

Pearson 相关性分析表明，浮游动物密度与溶解氧、总氮以及氨氮成显著负相关 ($P < 0.05$)，相关系数分别为 -0.465、-0.445 和 -0.451，与总磷及高锰酸盐指数相关性不显著 ($P > 0.05$)。生物多样性指数 H' 则与溶解氧、总氮、总磷、氨氮以及高锰酸盐指数的相关性均不显著 ($P > 0.05$)。生物量与溶解氧、总氮、总磷、氨氮以及高锰酸盐指数的相关性同样不显著 ($P > 0.05$) (表 6)。莲花荡 2015 年 (梁荣胜 2016) 春季的总氮和氨氮相对于其他季节来说比较大，而春季的生物密度是最小的；溶解

氧在春季和冬季达到最大且相差甚小，春季与冬季跟夏秋季节相比，生物密度要小一些；与 Pearson 相关性分析得出的浮游动物密度与总氮、氨氮和溶解氧呈负相关的结果一致。浮游植物的生长需要营养，其中氮、磷最为重要，这两种营养盐类往往决定着浮游植物产量的高低，也就间接决定着浮游动物数量的多寡。

3 结论与讨论

在莲花荡水系，浮游动物的组成种类主要为小型浮游动物，包括原生动、轮虫，它们的密度和种类数所占的比例相当高，而大型浮游动物，例如枝角类、桡足类，密度和种类数所占的比例较少。这与以往的研究者所调查的江河、湖泊中浮游动物各个种类所占的比例情况比较相似 (杨宇峰等 1994, 谢进金等 2005, 姜作发等 2006)。出现以上现象的原因可能是莲花荡水系中鱼类密度比较高，个体大的枝角

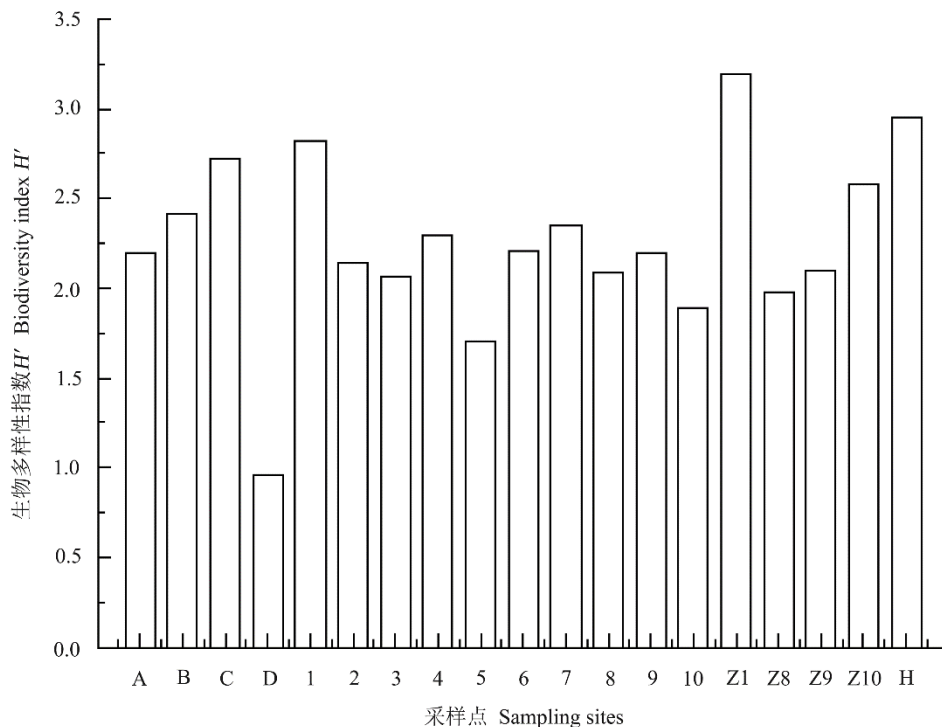


图 4 莲花荡水系生物多样性指数 H' 空间变化

Fig. 4 Spatial variation of biodiversity index H' in Lianhuadang River System

表 6 莲花荡浮游动物密度、多样性指数及生物量与环境因子的 Pearson 相关性分析

Table 6 Results of Pearson's correlation analysis between density, biodiversity index, biomass and environmental factors in Lianhuadang River System

理化参数 The physical and chemical parameters	浮游动物 Zooplankton		
	密度 Density	H'	生物量 Biomass
溶解氧 Dissolved oxygen DO	- 0.465*	0.226	- 0.133
总氮 Total nitrogen TN	- 0.445*	- 0.110	- 0.431
总磷 Total phosphorus TP	0.078	0.251	- 0.152
氨氮 Ammonia nitrogen $\text{NH}_4^+\text{-N}$	- 0.451*	0.108	- 0.322
高锰酸盐指数 Permanganate index COD_{Mn}	0.429	0.138	0.016

水质数据引自梁荣胜 (2016)。* 表示差异显著。

The water quality data is quoted from LIANG Rong-Sheng (2016). * Indicted a significant difference.

类和桡足类都被鱼类捕食, 在一定的程度上减小了轮虫等小型浮游动物的竞争压力, 从而使其密度和种类相对大型浮游动物来说占绝对优势 (Domaizon et al. 1999, Nogueira 2001, Korponai et al. 2003)。梁荣胜 (2016) 研究了莲花荡水系的水质, 得出莲花荡水系不同时期的水质类别, 2015 年春季是劣 V 类, 首要的污染因子为总氮, 夏季也为劣 V 类, 但是首要的污染因子则变成总磷, 秋季水质有所改善, 为 V 类水, 首要污染因子为总氮, 冬季的水质类别仍为劣 V 类, 首要污染因子为总氮, 莲花荡水系的整体水质呈劣 V 类。在莲花荡水系中, 轮虫密度在春季、夏季占优势, Nogueira (2001) 认为轮虫的密度高与春夏季节浮游植物的大量繁殖有关。刘忱等 (2015) 对太湖南部主要入湖河流东苕溪进行了调查, 共采集了浮游动物 41 种, 轮虫有 23 种, 所占比例为 56.09%, 长三肢轮虫、针簇多肢轮虫为优势种; 李娣等 (2014) 对太湖进行浮游动物群落结构调查, 共鉴定出 63 种浮游动物, 其中轮虫类与原生动物占大多数, 且浮游动物密度与多样性均秋季优于春季; 李共国等 (2013) 对杭州湾滩涂湿地进行浮游生物群落调查, 结果表明浮游动物种类丰度与污染指数呈现明显的负相关性, 主要表现浮游动物丰度随氨氮含量升高而显著下

降, 这与莲花荡的情形比较相似。

根据浮游动物密度小于 1 000 ind/L 为贫营养, 1 000 ~ 3 000 ind/L 为中营养, 大于 3 000 ind/L 为富营养的生物指标评价标准 (陈磊等 2016), 莲花荡浮游动物全年平均密度及夏秋冬三个季节的密度除均大于 3 000 ind/L, 仅春季为 1 092 ind/L, 莲花荡水系的水质营养状况基本处于中富营养状态。

根据生物多样性评价方法, 生物多样性指数越大, 说明水体越清洁。莲花荡水系四个季节的 Shannon-Wiener 多样性指数 H' 的变化范围在 1.37 ~ 3.22, 最大值出现在秋季, 最小值出现在夏季。主要原因是, 夏季水体中蓝藻群体的体积会增大, 在一定程度上抑制了浮游动物的摄食作用, 同时部分产毒蓝藻更会抑制浮游动物群落, 导致生物多样性降低 (Infante et al. 1984, Ghadouani et al. 2003)。Shannon-Wiener 生物多样性指数是反映生物种类数和种类间个体数分配均匀性的综合指标 (刘忱等 2015), 依照生物指数判定标准, 除个别采样点处于重污染状态外, 莲花荡水系大多数样点的水环境质量为 β -中污染状态, 结合主要优势种种类以及梁荣胜 (2016) 的水质监测结果, 莲花荡水系的水质情况基本处于中度污染状态, 因此要加强对莲花荡水质的改善与保护, 防止

其富营养化发生。

致谢 江苏绿色大地环境修复有限公司的周春丽博士对本研究中物种鉴定以及计数提供了很大的帮助,在此致以衷心感谢。

参考文献

- Aoyagui A S M, Bonecker C C. 2004. Rotifers in different environments of the Upper Paraná River floodplain (Brazil): richness, abundance and the relationship with connectivity. *Hydrobiologia*, 522(1/3): 281–290.
- Domaizon I, Dévaux J. 1999. Impact of moderate silver carp biomass gradient on zooplankton communities in a eutrophic reservoir. Consequences for the use of silver carp in biomanipulation. *Comptes Rendus De L'Académie Des Sciences Série III Sciences De La Vie*, 322(7): 621–628.
- Ghadouani A, Pinel-Alloul B, Prepas E E. 2003. Effects of experimentally induced cyanobacterial blooms on crustacean zooplankton communities. *Freshwater Biology*, 48(2): 363–381.
- Infante A, Riehl W. 1984. The effect of Cyanophyta upon zooplankton in a eutrophic tropical lake (Lake Valencia, Venezuela). *Hydrobiologia*, 113(1): 293–298.
- Korponai J, Paulovits G, Mátyás K, et al. 2003. Long-term changes of cladoceran community in a shallow hypertrophic reservoir in Hungary. *Hydrobiologia*, 504(1): 193–201.
- McNaughton S J. 1967. Relationships among Functional Properties of Californian Grassland. *Nature*, 216(5111): 168–169.
- Nogueira M G. 2001. Zooplankton composition, dominance and abundance as indicators of environmental compartmentalization in Jurumirim Reservoir (Parapanema River), São Paulo, Brazil. *Hydrobiologia*, 455(1/3): 1–18.
- 蔡立哲, 马丽, 高阳, 等. 2002. 海洋底栖动物多样性指数污染程度评价标准的分析. *厦门大学学报: 自然科学版*, 41(5): 641–646.
- 陈磊, 高东泉, 舒凤月, 等. 2016. 南四湖浮游动物群落结构特征及其与环境因子的关系. *动物学杂志*, 51(1): 113–120.
- 姜作发, 唐富江, 董崇智, 等. 2006. 黑龙江水系主要江河浮游动物种群结构特征. *东北林业大学学报*, 34(4): 64–66.
- 蒋燮治, 堵南山. 1979. 中国动物志: 节肢动物门, 甲壳纲, 淡水枝角类. 北京: 科学出版社.
- 李娣, 李旭文, 牛志春, 等. 2014. 太湖浮游动物群落结构调查. *安徽农业科学*, 42(29): 10173–10179, 10290.
- 李共国, 屠霄霞, 王佩儿, 等. 2013. 杭州湾滩涂湿地浮游生物群落特征及与环境因子的关系. *生态学杂志*, 32(10): 2764–2771.
- 李芸, 石彭灵, 沈宏, 等. 2015. 梁塘河浮游动物的空间分布及其与环境因子的关系. *环境科学研究*, 28(10): 1531–1537.
- 梁荣胜. 2016. 宜兴市莲花荡水环境质量分析和水质改善工程方案研究. 北京: 林业大学硕士学位论文.
- 林青, 由文辉, 徐凤洁, 等. 2014. 滴水湖浮游动物群落结构及其与环境因子的关系. *生态学报*, 34(23): 6918–6929.
- 刘忱, 黄燕, 刘瑜, 等. 2015. 东苕溪夏季浮游动物群落结构及水环境的初步研究. *杭州师范大学学报: 自然科学版*, 14(5): 498–505.
- 刘歆璞, 王丽卿, 张宁, 等. 2013. 青草沙水库后生浮游动物群落结构及其与环境因子的关系. *生态学杂志*, 32(5): 1238–1248.
- 马智波, 潘艺蓉, 董晓静, 等. 2014. 莲花荡水系富营养化状态评价与防治对策研究, 2014 中国城镇水务发展国际研讨会. 中国城市科学研究会&中国城镇供水排水协会, 2014.11.27.
- 沈韞芬, 章宗涉, 龚循矩. 1990. 微型生物监测新技术. 北京: 中国建筑工业出版社, 126–134.
- 孙刚, 郎宇, 房岩. 2006. 长春南湖水生生态系统中浮游动物群落特征. *吉林大学学报: 理学版*, 44(4): 663–667.
- 孙雯, 封莉, 孙德智, 等. 2014. 宜兴市莲花荡水系水环境质量现状及其水质评价. *环境保护前沿*, 4: 60–66.
- 王家楫. 1961. 中国淡水轮虫志. 北京: 科学出版社.
- 吴利, 李源玲, 陈延松. 2015. 淮河干流浮游动物群落结构特征. *湖泊科学*, 27(5): 932–940.
- 夏品华, 马健荣, 李存雄, 等. 2011. 红枫湖水库冬春季浮游生物群落与环境因子的典范对应分析. *环境科学研究*, 24(4): 378–386.
- 谢进金, 许友勤, 陈寅山, 等. 2005. 晋江流域水质污染与浮游动物四季群落结构的关系. *动物学杂志*, 40(5): 8–13.
- 杨一帆. 2015. 基于 HSPF 模型的宜兴平原河网地区非点源污染模拟相关研究. 西安: 西安建筑科技大学硕士学位论文.
- 杨宇峰, 黄祥飞. 1994. 武汉东湖浮游动物群落结构的研究. *应用生态学报*, 5(3): 319–324.
- 章宗涉, 黄祥飞. 1991. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社.
- 中华人民共和国水利部. 2014. 水库渔业资源调查规范. 中国水利水电出版社.
- 周凤霞, 陈剑虹. 2010. 淡水微型生物图谱. 北京: 化学工业出版社.
- 周晓梅. 2000. 滴水湖及其外围水体浮游动物群落结构比较研究. 上海: 上海师范大学硕士学位论文.

附录 莲花荡水系浮游动物种类名录

Appendix The species list of zooplankton in Lianhuadang River System

序号 Number	种类 Species	序号 Number	种类 Species
1	毛变形虫 <i>Trichamoeba</i> sp.	42	刀口虫 <i>Spathidium</i> sp.
2	变形虫 <i>Amoeba</i> sp.	43	栉毛虫 <i>Didinium</i> sp.
3	大变形虫 <i>A. proteus</i>	44	睥睨虫 <i>Askeusia</i> sp.
4	泥生变形虫 <i>Thecamoeba terricola</i>	45	半眉虫 <i>Hemiophrys</i> sp.
5	盘变形虫 <i>Discamoeba</i> sp.	46	肾形虫 <i>Colpoda</i> sp.
6	微小后卓变虫 <i>Metachaos diminutivum</i>	47	单镰虫 <i>Drepanonomas</i> sp.
7	斜板虫 <i>Plagiocampa</i> sp.	48	小胸虫 <i>Microthorax</i> sp.
8	榴弹虫 <i>Coleps</i> sp.	49	斜管虫 <i>Chilodonella</i> sp.
9	裸口虫 <i>Gmnostome</i> sp.	50	球吸管虫 <i>Sphaerophrya</i> sp.
10	异胞虫 <i>Heterophrys</i> sp.	51	豆形虫 <i>Colpidium</i> sp.
11	小单环栉毛虫 <i>Didinium balbiamii</i>	52	黏囊膜虫 <i>Espejoia mucicola</i>
12	砂表壳虫 <i>Arcella arenaria</i>	53	瞬目虫 <i>Glaucoma</i> sp.
13	表壳虫 <i>Arcella</i> sp.	54	前口瞬目虫 <i>G. frontata</i>
14	匣壳虫 <i>Centropyxis</i> sp.	55	双膜虫 <i>Dichilum</i> sp.
15	旋匣壳虫 <i>C. aerophila</i>	56	草履虫 <i>Paramecium</i> sp.
16	圆壳虫 <i>Cyclopyxis</i> sp.	57	膜袋虫 <i>Cyclidium</i> sp.
17	葫芦虫 <i>Cucurbitella</i> sp.	58	钟虫 <i>Vorticella</i> spp.
18	瓶砂壳虫 <i>Diffugia urceolata</i>	59	累枝虫 <i>Epistylis</i> spp.
19	壶形砂壳虫 <i>D. lebes</i>	60	喇叭虫 <i>Stentor</i> sp.
20	冠砂壳虫 <i>D. corona</i>	61	弹跳虫 <i>Hlateria</i> sp.
21	圆钵砂壳虫 <i>D. urceolata</i>	62	急游虫 <i>Strombidium</i> sp.
22	球形砂壳虫 <i>D. globulosa</i>	63	侠盗虫 <i>Strobilidium</i> sp.
23	褐砂壳虫 <i>D. avellana</i>	64	筒壳虫 <i>Tintinnidium</i> sp.
24	弯角长圆砂壳虫 <i>D. oblongia curvicaulis</i>	65	淡水筒壳虫 <i>T. fluviatile</i>
25	砂壳虫 <i>Diffugia</i> sp.	66	似铃壳虫 <i>Tintinnopsis</i> sp.
26	截口虫 <i>Heleopera</i> sp.	67	王氏似铃壳虫 <i>T. wangi</i>
27	方壳虫 <i>Quadrullella</i> sp.	68	中华似铃壳虫 <i>T. sinensis</i>
28	旋扁壳虫 <i>Lesquereusia</i> sp.	69	游仆虫 <i>Euplotes</i> spp.
29	螺旋形扁壳虫 <i>L. spiralis</i>	70	黏游仆虫 <i>Euplotes muscicola</i>
30	法帽虫 <i>Phryganella</i> sp.	71	纤毛虫一种 <i>Ciliata</i>
31	梨壳虫 <i>Nebela</i> sp.	72	腺状介虫 <i>Cypris</i> sp.
32	曲颈虫 <i>Cyphoderia</i> sp.	73	懒轮虫 <i>Rotaria tardigrada</i>
33	磷壳虫 <i>Euglypha</i> sp.	74	狭甲轮虫 <i>Colurella obtusa</i>
34	太阳虫 <i>Actinophrys</i> sp.	75	鞍甲轮虫 <i>Lepadella</i> sp.
35	光球虫 <i>Actinosphaerium</i> sp.	76	粗颈轮虫 <i>Macrotrachela</i> sp.
36	刺日虫 <i>Raphidiophrys</i> sp.	77	臂尾轮虫 <i>Brachionus</i> sp.
37	刺胞虫 <i>Acanthocystis</i> sp.	78	萼花臂尾轮虫 <i>B. Calyciflorus</i>
38	裸口虫 <i>Holophrya</i> sp.	79	镰形臂尾轮虫 <i>B. falcatus</i>
39	斜板虫 <i>Plagiocampa</i> sp.	80	角突臂尾轮虫 <i>B. angularis</i>
40	尾毛虫 <i>Urotricha</i> sp.	81	尾突臂尾轮虫 <i>B. caudatus</i>
41	尖毛虫 <i>Oxytricha</i> sp.	82	肛突臂尾轮虫 <i>B. bennini</i>

续附录

序号 Number	种类 Species	序号 Number	种类 Species
83	可变臂尾轮虫 <i>B. varibilis</i>	110	叶轮虫 <i>Notholca</i> sp.
84	矩形臂尾轮虫 <i>B. leydigi</i>	111	柱头轮虫 <i>Eosphora</i> sp.
85	裂足臂尾轮虫 <i>B. diversicornis</i>	112	尖额蚤 <i>Disparalona</i> sp.
86	鬚足轮虫 <i>Euchlanis</i> sp.	113	裸腹蚤 <i>Moina micrura</i>
87	龟甲轮虫 <i>Keratella</i> sp.	114	仙达蚤 <i>Limnosida</i> sp.
88	曲腿龟甲轮虫 <i>K. valga</i>	115	象鼻蚤 <i>Bosmina</i> sp.
89	螺形龟甲轮虫 <i>K. cochlearis</i>	116	长额象鼻蚤 <i>B. longirostris</i>
90	矩形龟甲轮虫 <i>K. quadrata</i>	117	筒弧象鼻蚤 <i>B. coregoni</i>
91	缘板龟甲轮虫 <i>K. ticinensis</i>	118	脆弱象鼻蚤 <i>B. fatalis</i>
92	狭甲轮虫 <i>Colurella</i> sp.	119	蚤 <i>Daphnia</i> sp.
93	无柄轮虫 <i>Ascomorpha</i> sp.	120	僧帽蚤 <i>Daphnia cucullata</i>
94	单趾轮虫 <i>Monostyla</i> sp.	121	长肢秀体蚤 <i>Diaphanosoma leuchtenbergianum</i>
95	囊形单趾轮虫 <i>M. bulla</i>	122	基合蚤 <i>Bosminopsis</i> sp.
96	月形单趾轮虫 <i>M. lunaris</i>	123	透明蚤 <i>Daphnia hyalina</i>
97	前翼轮虫 <i>Proale</i> sp.	124	盘肠蚤 <i>Chydorus</i> sp.
98	污前翼轮虫 <i>P. sordida</i>	125	广布中剑水蚤 <i>Mesocyclops leuckarti</i>
99	腔轮虫 <i>Lecane</i> sp.	126	中剑水蚤 <i>Mesocyclops</i> sp.
100	微凸镜轮虫 <i>Testudinella mucronata</i>	127	台湾温剑水蚤 <i>Thermocyclops taihokuensis</i>
101	同尾轮虫 <i>Diurella</i> sp.	128	等刺温剑水蚤 <i>T. kawamurai</i>
102	多肢轮虫 <i>Polyarthra</i> spp.	129	剑水蚤 <i>Cyclops</i> sp.
103	针簇多肢轮虫 <i>P. trigla</i>	130	许水蚤 <i>Schmackeria</i> sp.
104	长三肢轮虫 <i>Filinia longiseta</i>	131	哲水蚤 <i>Sinocalanus</i> sp.
105	尾三肢轮虫 <i>F. major</i>	132	汤匙华哲水蚤 <i>Sinocalanus dorrii</i>
106	臂三肢轮虫 <i>F. brachiata</i>	133	镖水蚤 <i>Neurodiaptomus</i> sp.
107	晶囊轮虫 <i>Asplanchna</i> sp.	134	轮虫卵 <i>Rotifera</i> eggs
108	盖氏晶囊轮虫 <i>Asplanchna priodonta</i>	135	无节幼体 <i>Nauplius</i>
109	巨头轮虫 <i>Cephalodella</i> sp.	136	桡足幼体 <i>Copepodite</i>