

上海饮用水源地青草沙水库轮虫群落结构的特征及其环境影响因子

王少坤^① 王绍祥^② 顾静^② 张家路^① 陈立婧^{①*}

^① 上海海洋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 201306;

^② 上海城投原水有限公司青草沙水库管理分公司 上海 201913

摘要: 青草沙水库是位于长江河口的一座江心水库,是现今上海最大的水源地,作为一个半自然半人工水体,其生态系统具有特殊性,既会受到来水影响,又有自身独特性,轮虫作为最有效的水质监测生物之一,能很好地反应水库的水体状况,为水库管理提供生物学参考依据。于2014~2015年对青草沙水库轮虫群落结构的特征进行了研究,依据水库轮虫水平分布和时间分布特征,分析了该水库轮虫的种类组成、优势种、污染指示种、数量分布。结合多样性指数运用聚类分析方法分析轮虫群落结构特征,采用冗余分析方法研究轮虫和环境因子的关系。两年共发现轮虫32种,2014年为20种,优势种7种;2015年为26种,优势种2种。其中针簇多肢轮虫(*Polyarthra trigla*)为两年共有优势种。寡污型种类共鉴定出8种。2014年年均生物密度比2015年低,分别为 (156.37 ± 119.48) ind/L和 (237.12 ± 252.86) ind/L。2014年年均生物量比2015年高,分别为 (0.1316 ± 0.1146) mg/L和 (0.1229 ± 0.1371) mg/L。聚类分析表明,轮虫的水平分布与水库的形状、地理特征水文情况有着很大关系。冗余分析(RDA)表明,水温、溶氧、总氮、总磷、浮游植物生物密度为主要影响因子。

关键词: 青草沙水库; 轮虫; 群落结构; 环境因子

中图分类号: Q958 文献标识码: A 文章编号: 0250-3263 (2017) 06-1023-14

The Characteristics of Community Structure of Rotifer and Its Environmental Factors in Qingcaosha Reservoir, Shanghai

WANG Shao-Kun^① WANG Shao-Xiang^② GU Jing^② ZHANG Jia-Lu^① CHEN Li-Jing^{①*}

^① Ministry of Education Key Laboratory of Exploration and Utilization of Aquatic Genetic Resources, Shanghai Ocean University, Shanghai

201306; ^② Qingcaosha Reservoir Management Branch, Shanghai SMI Raw Water Co. Ltd, Shanghai 201913, China

Abstract: Qingcaosha Reservoir, a reservoir located at the Yangtze River Estuary, is the largest water source of Shanghai. As a semi natural semi artificial reservoir, its ecosystem is affected by source water, but also

基金项目 上海市教委水产动物遗传育种中心上海市协同创新中心项目(No. ZF1206),上海城投原水有限公司项目(No. D-8006-14-0055, D-8006-15-0040 和 D-8006-16-0082);

* 通讯作者, E-mail: ljchen@shou.edu.cn;

第一作者介绍 王少坤,男,硕士;研究方向:浮游动物生态学;E-mail: 1563853565@qq.com。

收稿日期: 2017-03-24, 修回日期: 2017-05-13 DOI: 10.13859/j.cjz.201706012

influence by its own unique temperament. Rotifers are one of the most effective organism group as monitors for water quality. It can well reflect the current status of water in reservoirs, such as the eutrophication timely and provide the biological reference for reservoir management. The community structure of rotifer was investigated from 2014 to 2015 according to the characteristics of rotifers horizontal distribution and temporal distribution. We took the data on the species composition, dominant species, quantitative distribution and community characteristics of rotifer and used cluster analysis to analyze the diversity index of Rotifer Community Structure. Redundancy analysis was used to illustrate the relationship between rotifers and environmental factors. Total of 32 species of rotifers were identified in two year period. Of which 20 species were recorded in the year 2014 with 7 dominant species; twenty six species with 2 dominant species were collected in 2015 (Table 2, 3, Fig. 5). The *Polyarthra trigla* was the only one species dominantly in the two years. Among those 8 species belonged to oligo group with a lower density (156.37 ± 119.48 ind/L) in 2014 than that in 2015 (237.12 ± 252.86 ind/L), respectively. The annual biomass of rotifers was higher with the number are 0.1316 ± 0.1146 mg/L in 2014 than that 0.1229 ± 0.1371 mg/L in 2015 (Fig. 2), respectively. The seasonal variation and horizontal distribution of Rotifers was showed in Fig. 3 and Fig. 4. Cluster analysis was performed based on Rotifer biomass, biomass and diversity index (Table 4, Fig. 6), the results indicated that the horizontal distribution of rotifers had a great relationship with the shape and geographical characteristics of the reservoir. Redundancy analysis (RDA) showed that water temperature, dissolved oxygen, total nitrogen, total phosphorus and density of phytoplankton were the main environmental factors which influenced the density of Phytoplankton in the reservoir (Table 5, Fig. 7).

Key words: Qingcaosha Reservoir; Rotifers; Community structure; Environmental factors

在水库水体生态环境中, 轮虫作为初级消费者, 林秋奇等 (2005) 曾报道过: 寡营养指示种主要以微藻为食, 富营养指示种以微藻和水体中有机碎屑等为食, 介于富营养和寡营养间的指示种则以较大颗粒物为食, 如藻类, 根据水体营养状态不同其存在的轮虫可利用的食物大小、性质不同, 从而影响水体中轮虫种类和数量。轮虫在整个水体生态系统中起着重要的作用, 其存在受生产者影响, 同时又直接或间接地影响着水体中其他水生生物多样性 (陈立婧等 2011, 孙陆宇等 2013)。轮虫作为一种常用的水质监测生物 (Jeppesen et al. 1999, Scheffer 1999, 李共国等 2003, 陈立婧等 2011), 其种类多样性及分布和水体的水质之间有着密不可分的关系 (杨宇峰等 2000, Segers 2008), 由于个体小, 繁殖速度快, 其大多是 r-对策型 (Twombly 1983), 对于水环境的变化可以快速在种群和数量上显示出明显的变化

(温新利等 2004, 钱方平等 2007)。

青草沙水库为坐落于长江口长兴岛西北部的大型江心水库, 隶属于上海市崇明县辖区, 自建立之初就备受人们关注, 被称为百年战略水源地 (顾玉亮等 2008), 随着这几年的科学管理和不断发展完善, 青草沙水库已成为上海最大的水源地。青草沙水库大堤总长 48.79 km, 总容水量 5.24 亿 m^3 , 作为上海现在最大水源地, 日供水量为 719 万 m^3 (周超等 2012), 超过上海市水源供应的一半 (陆晓如 2014)。

随着青草沙水库运营时间的增长, 对作为水库次级生产力之一的轮虫的监测工作十分重要, 但是目前仅见王云龙等 (2005)、刘歆璞等 (2013) 和孙陆宇等 (2013) 对该水域浮游动物的研究, 尚未见青草沙水库轮虫的专门报道。本研究旨在通过对上海水源地轮虫群落结构的研究, 为青草沙水体营养状况的判定及富营养化防治提供重要依据, 为青草沙水库的供水安

全、生态保护等提供一定的基础数据。

1 材料与方法

1.1 采样时间及样点设置

在 2014~2015 年，每月下旬采样，结合水库的地理形态特征、水文特征以及渔业资源状况，结合样点设置规范（陈伟民等 2005），共设置 11 个采样点。根据水库的形状及水文状况将采样点分为上游（S1、S10、S11）、中游（S2、S3、S4、S8、S9）、下游（S5、S6、S7）三个区域（图 1）。

1.2 样品的采集及样品处理、鉴定方法

样品的采集和处理按《湖泊生态调查观测与分析》的方法（黄祥飞 1999）进行。水深在 3 m 以内用 2.5 L 的不锈钢柱状采水器取表层 0.5 m 深的水样，水深 3~10 m 时，取表层 0.5 m 和底层上 0.5 m 水样，水深超过 10 m 时，取表层、中层、底层水样混合均匀后，量取 1 L 水样同时加 5% 的甲醛溶液 10 ml 及 15 ml 的鲁哥氏碘液固定，回实验室后倒入梨形分液漏斗中，静置沉淀 48 h 后收集浓缩至 50 ml，盛放于血

清瓶中待镜检。轮虫的种类鉴定按 Koste 等（1978）分类系统和《中国淡水轮虫志》（王家楫 1961），轮虫生物量采用体积法（黄祥飞 1999）统计。污染指示种鉴定参考《内陆水域渔业自然资源调查手册》（张觉民等 1991）。

样品理化因子的测定：总氮、总磷、高锰酸盐指数用哈希 DR3900 分光光度计测定（哈希公司），水温、溶氧、电导率、pH 指数用 HQd 系列便携式仪表测定（哈希公司），透明度用萨氏盘测定（中科器材），水深用 Hondex 声纳测深仪（普力特仪器）测定。

1.3 数据处理方法

种类优势度（Y）： $Y = (N_i/N) f_i$ ，式中 N_i 为第 i 种的个体数， N 为总个体数， S 为总物种数， f_i 为第 i 种的出现率。 $Y > 0.02$ 为优势种（徐兆礼等 1995）。

Jaccard（1912）相似性指数 $S_j = c / (a + b - c)$ ， a 为一个地区物种种类数， b 为另一个地区物种种类数， c 为两地区共有物种种类数。当 S_j 值在 0~0.25 时为极不相似，0.25~0.5 时为中等不相似，0.5~0.75 时为中等相似，0.75~

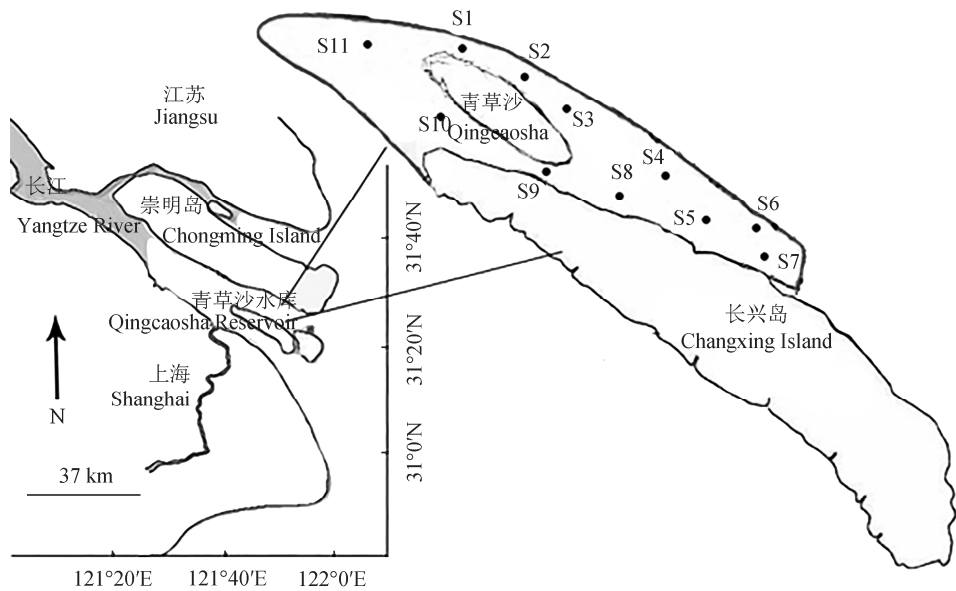


图 1 青草沙水库轮虫调查样点图

Fig. 1 Sampling sites of rotifer in Qingcaosha reservoir

1 时为极相似。

香农威尔指数 (H') 是种类和种类中个体分配均匀性的综合指标, 反映群落结构复杂程度和稳定性, $H' = -\sum (N_i/N) \ln (N_i/N)$ (Krebs 1978), 式中 N_i 为第 i 种的个体数, N 为总个体数。物种丰富度指数 (D) 采用 Margalef (1968) 的计算公式: $D = (S - 1) / \ln N$, N 为总个体数, S 为总物种数。该值的高低表明种类多样性的丰富与贫乏, 由此可反映水质的优劣程度。一般, D 值越大表示水质越清洁。

均匀度指数 (J) 采用 Pielou (1975) 的计算公式: $J = H' / \ln S$, 其中, H' 为香农威尔指数, S 为总物种数。

环境因子与物种数据采用 SPSS18.0 进行单因素方差分析、双变量分析和聚类分析, CANOCO for Windows 4.5 进行去趋势对应分析 (detrended correspondence analysis, DCA) 及冗余分析 (redundancy analysis, RDA)。

2 结果

2.1 青草沙水库理化因子

水库两年的理化因子年均值见表 1, 2015 年理化因子与 2014 年相比, 水深 (D)、水温 (WT)、溶氧 (DO)、总氮 (TN)、总磷 (TP) 值有所升高, 透明度 (SD)、pH 值变化不明显, 电导率 (EC)、高锰酸盐指数 (COD_{Mn}) 有所

降低。双变量分析表明各项指标两年间均无明显差异 ($P > 0.05$)。

2.2 青草沙水库的轮虫种类组成及污染指示种

2014、2015 两年间共鉴定出 32 种轮虫。2014 年鉴定出轮虫 20 种 (表 2), 隶属于 8 科 12 属。臂尾轮科种类数最多 (6 种), 占总种类的 30.0%。其中 α -寡污性种类有 3 种, 占总种类 15.0%, α - β 中污种类有 5 种 (25.0%), β -中污种类有 4 种 (20.0%), β - α 中污种类有 2 种 (10.0%), α -中污种类有 1 种 (5.0%)。2015 年鉴定出 26 种轮虫, 隶属于 11 科 17 属。臂尾轮科种类数最多 (9 种), 占总种类的 34.6%。污染指示种 24 种, 其中 α -寡污、 α - β 中污、 β -中污、 β - α 中污、 α -中污种分别占 26.9%、15.4%、30.8%、15.4%、3.8%。青草沙水库两年共鉴定出 α -寡污性种类 8 种。

从水库不同区域的物种组成看: 2014 年, 上游和中游极相似 ($S_j = 0.79$), 上游和下游 ($S_j = 0.55$) 及中游和下游 ($S_j = 0.72$) 中等相似。2015 年, 上游和中游 ($S_j = 0.50$) 及上游和下游 ($S_j = 0.61$) 为中等相似, 中游和下游极相似 ($S_j = 0.80$)。根据 2014 年与 2015 年上、中、下游轮虫物种相似性指数的对比发现, 中、下游轮虫种类组成越来越趋同。

2.3 青草沙水库轮虫生物密度和生物量

2.3.1 生物密度的季节变化

2014 年轮虫的年均

表 1 青草沙水库 2014 和 2015 年主要理化因子

Table 1 Main physicochemical factors of Qingcaosha Reservoir in 2014 and 2015

参数 Parameters	2014		2015	
	平均值 \pm 标准差 Mean \pm SD	范围 Range	平均值 \pm 标准差 Mean \pm SD	范围 Range
水深 Depth, D (m)	7.9 \pm 0.8	1.7 ~ 13.5	8.4 \pm 0.9	2.7 ~ 16.7
透明度 Transparency, SD (cm)	64 \pm 12	26 ~ 115	65 \pm 15	20 ~ 180
水温 Water temperature, WT ($^{\circ}$ C)	18.6 \pm 7.8	7.3 ~ 30.5	19.1 \pm 8.2	7.6 ~ 33.1
溶氧 Dissolved oxygen, DO (mg/L)	9.18 \pm 1.53	5.50 ~ 13.06	9.62 \pm 2.09	4.16 ~ 13.61
酸碱度 Potential of hydrogen, pH	8.4 \pm 0.4	7.2 ~ 9.7	8.5 \pm 0.2	7.4 ~ 9.5
电导率 Conductivity, Ec (μ S/cm)	302 \pm 89	220 ~ 610	227 \pm 34	169 ~ 339
总氮 Total nitrogen, TN (mg/L)	1.78 \pm 0.31	1.23 ~ 2.24	1.89 \pm 0.37	1.32 ~ 2.35
总磷 Total phosphorus, TP (mg/L)	0.09 \pm 0.22	0.04 ~ 0.11	0.11 \pm 0.21	0.08 ~ 0.36
高锰酸盐指数 Permanganate index, COD_{Mn} (mg/L)	2.7 \pm 1.4	1.5 ~ 3.9	2.6 \pm 0.7	1.5 ~ 3.6

表 2 青草沙水库轮虫种类组成及分布
Table 2 Species composition and distribution of rotifer in Qingcaosha Reservoir

轮虫种类	污染指示等级	2014				2015			
		春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter
旋轮科 Philodinidae									
尖刺间盘轮虫 <i>Dissotrocha aculeata</i>	β								BC
狭甲轮科 Colurella									
盘状鞍甲轮虫 <i>Lepadella patella</i>	o-β						B		
臂尾轮科 Brachionida									
角突臂尾轮虫 <i>B. angularis</i>	β-α	AB	ABC	ABC		B	ABC	ABC	
萼花臂尾轮虫 <i>B. calyciflorus</i>	β-α	ABC	ABC		ABC	ABC	ABC	BC	
镰状臂尾轮虫 <i>B. falcatus</i>	β						B	C	
裂足臂尾轮虫 <i>B. diversicornis</i>	β	C	ABC	B				ABC	
裂痕龟纹轮虫 <i>Anuraeopsis fissa</i>	o					ABC	A		BC
螺形龟甲轮虫 <i>Keratella cochleari</i>	β	ABC	AC	ABC	A	ABC	ABC	ABC	ABC
曲腿龟甲轮虫 <i>K. valga</i>	o-β	BC		ABC	A			ABC	C
矩形龟甲轮虫 <i>K. quadrata</i>	o-β		ABC	ABC	ABC	B	ABC	AC	AB
唇形叶轮虫 <i>Notholca labis</i>	β						A		AC
水轮科 Epiphanidae									
棒状水轮虫 <i>Epiphanes clavulatas</i>		C							
腔轮科 Lecanidae									
尖趾单趾轮虫 <i>Monostyla closterocerca</i>	β			BC		B			
晶囊轮科 Asplanchnidae									
盖氏晶囊轮虫 <i>Asplanchna girodi</i>	o-β		AB	B	BC				
前节晶囊轮虫 <i>A. priodonta</i>	β	AB						A	
卜氏晶囊轮虫 <i>A. brightwelli</i>	o-β							A	

续表 2

轮虫种类	污染指示等级	2014				2015					
		春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter		
腹尾轮科 Gastropodidae											
舞跃无柄轮虫 <i>Ascomorpha saltans</i>	o					BC					
没尾无柄轮虫 <i>A. ecaudis</i>	o					A					
鼠轮科 Trichocercidae											
纤巧同尾轮虫 <i>Diurella tenuior</i>			AB								
暗小异尾轮虫 <i>Trichocerca pusilla</i>	o		B	C				ABC			
圆筒异尾轮虫 <i>T. cylindrica</i>	o-β		ABC								
纵长异尾轮虫 <i>T. elongata</i>	o		B	AB			ABC	ABC	B		
刺盖异尾轮虫 <i>T. capucina</i>	o			A							
疣毛轮科 Synchaetidae											
针簇多肢轮虫 <i>Polyarthra trigla</i>	β-α	ABC	ABC	ABC	ABC	ABC		ABC	ABC		ABC
真翅多肢轮虫 <i>P. euryptera</i>	β-α	ABC	ABC	ABC			ABC	ABC	C		
颤动疣毛轮虫 <i>Synchaeta tremula</i>										A	
尖尾疣毛轮虫 <i>S. stylata</i>						B		C			
郝氏皱甲轮虫 <i>Ploesoma hudsoni</i>	o-β	B	B	AB	B						
截头皱甲轮虫 <i>P. truncatum</i>	o						B	AC	B		
六腕轮科 Hexarthridae											
奇异巨腕轮虫 <i>Pedalia wira</i>	β	BC	ABC	AB			ABC	ABC			
三肢轮科 Filiniidae											
长三肢轮虫 <i>Filinia longiseta</i>	α	B				BC	B	B			
聚花轮科 Conochilidae											
独角聚花轮虫 <i>Conochilus unicornis</i>	o					ABC				C	

A、B、C 分别表示上中下游各区域。营养水平由低到高种类：o、寡污型指示种；o-β、中污型指示种；β、中污型指示种；β-α、中污型指示种；α、中污型指示种。

A、B、C 分别表示上游、中游和下游。From low to high trophic level species: o is oligo saprobic; o-β is meso saprobic; β is meso saprobic; β-α is meso saprobic; α is meso saprobic.

生物密度、生物量分别为 (156.37 ± 119.48) ind/L 和 (0.1316 ± 0.1146) mg/L，2015 年年均生物密度、生物量分别为 (237.12 ± 252.86) ind/L 和 (0.1229 ± 0.1371) mg/L。2014 年个体大、湿重大的轮虫占总轮虫比例高于 2015 年，2015 年轮虫个体更趋向于小型化。2014 年生物密度有 3 个高峰，分别出现在 3 月、7 月和 9 月（图 2）。2015 年轮虫生物密度同样呈三峰型，分别在 5 月、7 月和 10 月达到峰值（图 2），最大值为 729 ind/L。2014 年和 2015 年轮虫生物密度在春、夏、秋季分别出现了一次小高峰。2014

年生物量在 2 月最小，为 0.039 1 mg/L，7 月最大 0.296 8 mg/L；2015 年生物量在 12 月最小，为 0.003 6 mg/L，9 月最大 0.355 5 mg/L。

冬季生物密度和生物量均为最低，夏秋季达到最高（图 3）。通过 LSD 两两比较，轮虫生物密度在 2014 年冬季与春季、夏季、秋季有极显著差异（ $P < 0.01$ ），春夏秋 3 季之间不存在显著性差异。2015 年冬季与春季、夏季与秋季之间不存在显著性差异（ $P > 0.05$ ），冬季与夏季、秋季之间存在极显著差异（ $P < 0.01$ ），春季与夏季、秋季存在显著性差异（ $P < 0.05$ ）。

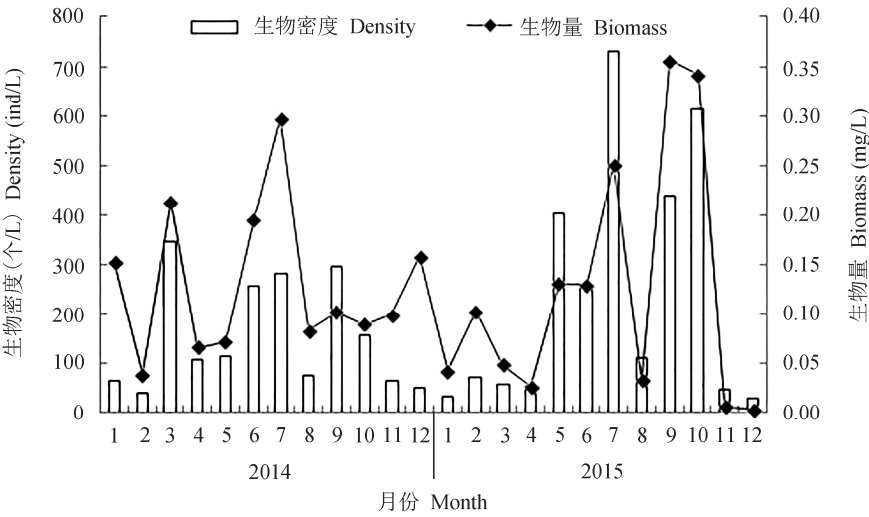


图 2 青草沙水库轮虫生物密度和生物量的周年变化（2014~2015）

Fig. 2 Annual variation of density and biomass in Qingcaosha reservoir (2014 - 2015)

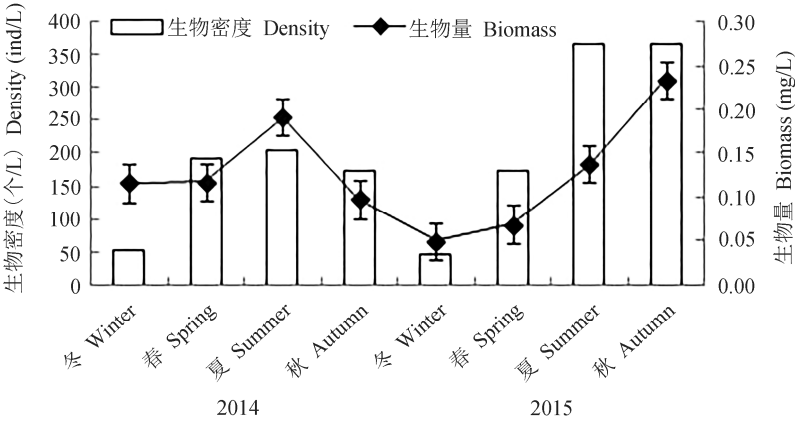


图 3 2014~2015 年青草沙水库轮虫密度和生物量的季节变化

Fig. 3 Seasonal change of density and biomass of rotifer in Qingcaosha Reservoir (2014 - 2015)

2014 年夏、秋季间生物密度差异小(图 3),而生物量差异较大的主要原因是,2014 年夏季臂尾轮科的角突臂尾轮虫(*Brachionus angularis*) 在 6 月、7 月两月中为优势种,并且在 8 月份萼花臂尾轮虫(*B. calyciflorus*)成为优势种。角突臂尾轮虫和萼花臂尾轮虫具有个体大、单个湿重大的特点。但是在秋季的 3 个月中,臂尾轮科较大种类未成为优势种,所以造成了这种生物密度高生物量低的情况。

2.3.2 生物密度的水平分布 2014 年轮虫密度上游(107.5 ind/L)低于下游(170.7 ind/L)低于中游(176.3 ind/L)。2015 年,上游(147.8 ind/L)低于下游(232.2 ind/L)低于中游(293.7 ind/L)。但是 2014 年轮虫年均生物量与生物密度的空间分布不尽相同,下游(0.099 mg/L)小于上游(0.108 mg/L)小于中游(0.165 mg/L)。2015 年轮虫年均生物量与生物密度的空间分布一致,上游(0.052 mg/L)小于下游(0.130 mg/L)小于中游(0.162 mg/L)。2014 年上、中、下游平均生物密度占总生物密度的比例范围分别为:1.96%~38.04%、19.36%~55.93%、18.64%~70.97%;2015 年上、中、下游平均生物密度占总生物密度的比例范围分别为:4.62%~

37.40%、14.38%~58.99%、21.11%~77.06%(图 4)。中游的生物密度、生物量比上游和下游高,且中游生物密度和上游差异显著($P < 0.05$),但上游与下游生物密度不存在显著差异($P > 0.05$)。中游与下游差异不明显($P > 0.05$)。

2.4 优势种

2014 年的年度优势种 7 种,为针簇多肢轮虫(*Polyarthra trigla*)、真翅多肢轮虫(*P. trigla*)、矩形龟甲轮虫(*Keratella quadrata*)、螺形龟甲轮虫(*K. cochleari*)、角突臂尾轮虫、萼花臂尾轮虫、奇异巨腕轮虫(*Pedalia wira*)。2015 年的年度优势种 2 种,为螺形龟甲轮虫(*K. cochleari*)和针簇多肢轮虫(*P. trigla*)。Pearson 相关性分析显示,两年的年度优势种针簇多肢轮虫生物密度与轮虫总生物密度月变化均呈极显著正相关关系(2014 年: $r = 0.788$, $P = 0.002$; 2015 年: $r = 0.840$, $P = 0.001$)。

2014 和 2015 两年季节优势种共有 10 种,从表 3 中可以看出,两年中出现频率较大的优势种为针簇多肢轮虫、螺形龟甲轮虫,且针簇多肢轮虫为两年的全年优势种。2014 年真翅多肢轮虫、角突臂尾轮虫为春、夏、秋 3 季优势种,矩形龟甲轮虫为夏、秋、冬 3 季优势种,

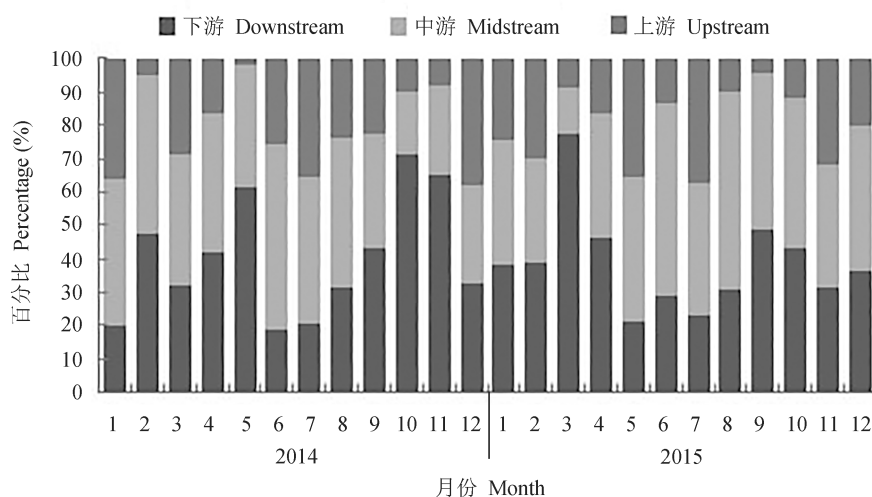


图 4 青草沙水库不同区域轮虫所占比例周年变化

Fig. 4 Annual variation of percentage of rotifer in different regions of Qingcaosha Reservoir

螺形龟甲轮虫为冬、夏季优势种。2015 年螺形龟甲轮虫 4 季均成为优势种。2014 年春夏两季的优势种类较多，尤以春季最多，达到 7 种，2015 年则是以秋季最多，但也只有 4 种。上、中、下游在种类组成上虽有一定的差异，但是在优势种的组成上基本没有差异。

针簇多肢轮虫 2014、2015 年的年均生物密度分别是：69.7 ind/L 和 105.3 ind/L。螺形龟甲轮虫的年均生物密度分别为：17.0 ind/L 和 72.4 ind/L。两种主要优势种的生物密度均是 2015 年大于 2014 年。2014 年针簇多肢轮虫的生物密度小高峰出现在 3 月、6 月和 9 月，2015 年出现在 7 月和 10 月；2014 年螺形龟甲轮虫的生物密度小高峰出现在 4 月和 9 月，2015 年出现在 5 月和 7 月（图 5）。

2.5 聚类分析和冗余分析

根据各站点的轮虫生物密度、生物量以及轮虫生物多样性指数（表 4）对青草沙水库库区各站点做系统聚类分析（图 6）。S7 自成一类，S4、S9、S10、S11 成一类，S3 为一类，S1、S2 为一类，S5、S6、S8 为一类。这种情况与青草沙的地貌特征相吻合，S7 为输水区，是水

源地取水之处；S4、S9、S10、S11 处于青草沙库心沙洲南岸和上游地区，一般水流较急，水深较浅，是透明度较低的地区；S1、S2 中虽然 S1 处于上游，但其又与 S2 共位于库心沙洲的北侧，水流相对平稳，两者的轮虫生物群落结构特征差异不大；S5、S6 处于深水区域，S8 在库心沙洲的东南，水流相对平稳，各种理化因子变化不大，轮虫群落结构特征相对一致。

通过对青草沙水库轮虫物种和环境因子数据进行去趋势对应分析（DCA），得到两年的排序轴中梯度最大值分别为 2.571 和 2.968，均小于 3，所以对两年的数据均进行线性模型 RDA 分析，得到环境因子与前两个排序轴的相关系数（表 5）。

轮虫物种与环境相关性 2014 年轴 1 和轴 2 分别为 0.998、0.978，物种环境相关性累计百分比分别为 39.6 和 57.1；2015 年轴 1 和轴 2 分别为 0.973、0.999，物种环境相关性累计百分比分别为 35.8 和 54.0。RDA 分析结果表明，物种与环境因子的相互关系具有可信性。2014 年大部分轮虫与水温、电导率、化学需氧量以及浮游植物生物密度成正相关关系，水温是其

表 3 不同季节青草沙水库轮虫的优势种及优势度
Table 3 The dominant species and dominance of rotifer in different seasons in Qingcaosha Reservoir

物种 Species	2014				2015			
	冬 Winter	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn
角突臂尾轮虫 <i>Brachionus angularis</i>		0.05	0.03				0.04	
萼花臂尾轮虫 <i>B. calyciflorus</i>		0.07		0.31				0.16
裂痕龟纹轮虫 <i>Anuraeopsis fissa</i>					0.05			0.03
螺形龟甲轮虫 <i>Keratella cochleari</i>	0.11		0.12		0.23	0.24	0.37	0.14
曲腿龟甲轮虫 <i>K. valga</i>			0.03					
矩形龟甲轮虫 <i>K. quadrata</i>		0.02	0.05	0.17				
圆筒异尾轮虫 <i>Trichocerca cylindrica</i>		0.03						
针簇多肢轮虫 <i>Polyarthra trigla</i>	0.14	0.26	0.34	0.22	0.21	0.50	0.32	0.25
真翅多肢轮虫 <i>P. trigla</i>	0.04	0.09	0.02			0.03		
奇异巨腕轮虫 <i>Pedalia wira</i>	0.04	0.14						

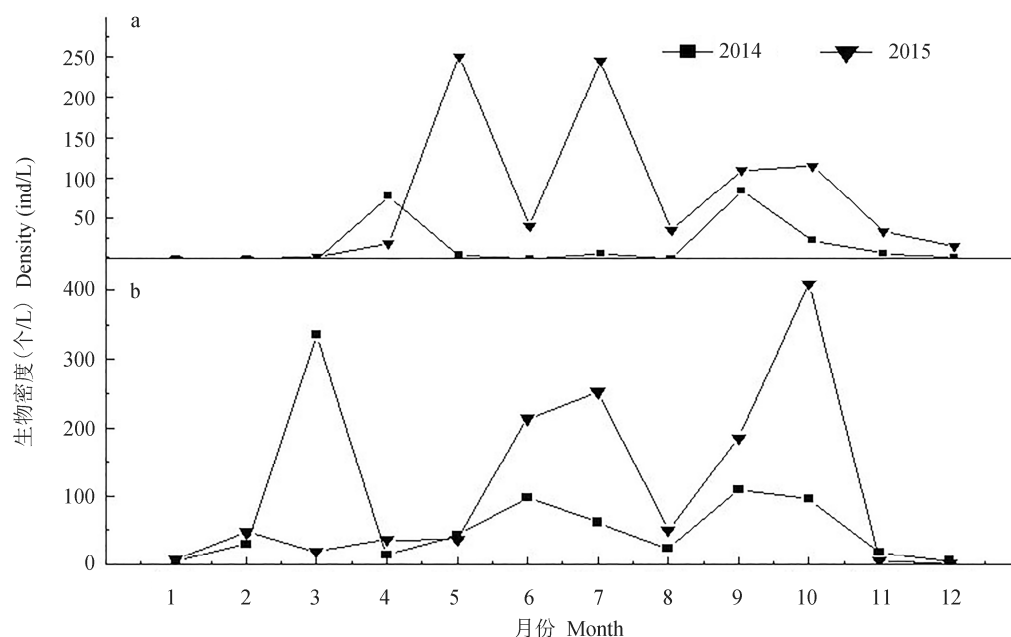


图5 青草沙水库两种主要优势种的生物密度周年变化

Fig. 5 Annual variation of density of two main dominant species in Qingcaosha Reservoir

a. 螺形龟甲轮虫; b. 针簇多肢轮虫。a. *Keratella cochleari*; b. *Polyarthra trigla*.

表4 青草沙水库轮虫的多样性指数

Table 4 The diversity index of rotifer of Qingcaosha Reservoir

年度 Year	指数 Index	站点 Site										
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11
2014	H'	0.72	0.77	0.77	0.87	0.79	0.65	0.61	0.83	0.84	0.68	0.27
	J	0.69	0.63	0.63	0.73	0.58	0.63	0.52	0.68	0.72	0.53	0.31
	D	0.33	0.35	0.37	0.41	0.38	0.29	0.29	0.41	0.43	0.32	0.11
2015	H'	0.43	0.76	0.72	0.73	0.70	0.66	0.53	0.70	0.88	0.48	0.25
	J	0.43	0.68	0.66	0.61	0.50	0.64	0.59	0.80	0.79	0.58	0.31
	D	0.21	0.37	0.36	0.37	0.38	0.33	0.22	0.32	0.45	0.22	0.10

 H' . 香农威尔指数; J . 均匀度指数; D . 丰富度指数。 H' . Shannon-Wiener diversity index; J . Pielou uniformity index; D . Margalef richness index.

主要相关因素,与溶氧、水深和总磷呈负相关关系(图7)。2015年大部分轮虫物种生物密度与水温、总氮总磷、生物因子及透明度成正相关关系,与水深、pH、溶氧成负相关关系。其中全年优势种针簇多肢轮虫和优势度较大的螺形龟甲轮虫、角突臂尾轮虫与水温呈明显的正

相关关系(图7)。

3 讨论

3.1 种类组成

青草沙位于河口附近,在涨潮期间水库会关闭闸口防止海水倒灌入库。由于浮游生物物

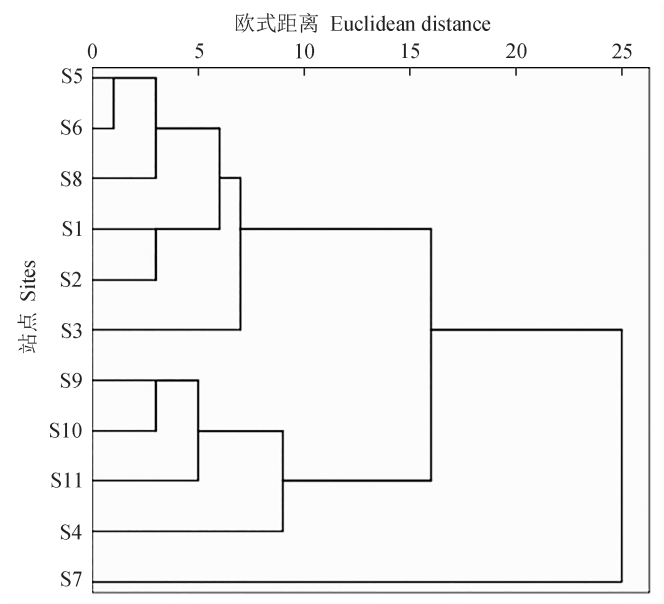


图 6 青草沙水库各站点轮虫群落结构系统聚类分析树形图

Fig. 6 Cluster dendrogram of rotifers community at all sampling sites of Qingcaosha Reservoir

表 5 冗余分析（RDA）环境因子与主排序轴的关系

指标 The index	2014		2015	
	轴 1 Axis 1	轴 2 Axis 2	轴 1 Axis 1	轴 2 Axis 2
水深 Depth	0.4255	0.3829	- 0.4254	- 0.4635
透明度 Transparency	0.1621	- 0.3630	- 0.5170	0.1648
水温 Water temperature	- 0.5757	0.1805	0.5161	0.4056
溶解氧 Dissolved oxygen	0.4813	- 0.7272	- 0.5010	- 0.5561
酸碱度 Potential of hydrogen	0.0495	0.0243	- 0.1854	- 0.6555
电导率 Conductivity	- 0.3840	0.1360	- 0.3518	- 0.5748
总磷 Total phosphorus	0.1543	0.1362	- 0.3612	0.0678
总氮 Total nitrogen	- 0.1335	0.2859	- 0.6243	0.0873
浮游植物 Phytoplankton	- 0.3300	0.0768	0.0325	0.2741
高锰酸盐指数 Permanganate index	- .03248	- 0.1536		

种丰富，水库在换水期间就会随着长江物种变化而改变（刘歆璞等 2013）。轮虫种类组成、优势种、生物密度和生物量都与水体状况息息相关（Reynolds 2000）。轮虫生长与水环境因子有着密不可分的关系，但很多学者认为轮虫季

节演替的决定性因素是水温（Arora et al. 2003，李共国等 2003，温新利等 2004）。有学者根据轮虫对温度的响应把轮虫分为三类（黄祥飞等 1985）：冷水性、广温性、暖水性种类。可见水温对轮虫的影响很大，并且对轮虫的生长发育

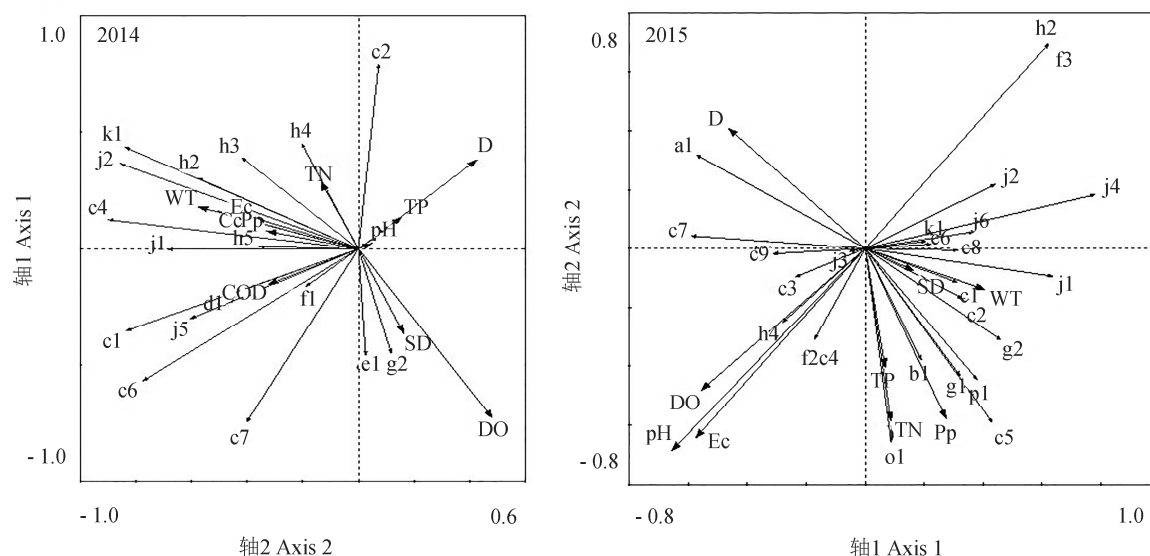


图7 青草沙水库轮虫物种与环境因子的 RDA 排序图

Fig. 7 RDA ordination diagram between rotifers species and environmental factors in Qingcaosha Reservoir

a1. 尖刺间盘轮虫; b1. 盘状鞍甲轮虫; c1. 角突臂尾轮虫; c2. 萼花臂尾轮虫; c3. 镰状臂尾轮虫; c4. 裂足臂尾轮虫; c5. 裂痕龟纹轮虫; c6. 螺旋龟甲轮虫; c7. 曲腿龟甲轮虫; c8. 矩形龟甲轮虫; c9. 唇形叶轮虫; d1. 棒状水轮虫; e1. 尖趾单趾轮虫; f1. 盖氏晶囊轮虫; f2. 前节晶囊轮虫; f3. 卜氏晶囊轮虫; g1. 舞跃无柄轮虫; g2. 没尾无柄轮虫; h1. 纤巧同尾轮虫; h2. 暗小异尾轮虫; h3. 圆筒异尾轮虫; h4. 纵长异尾轮虫; h5. 刺盖异尾轮虫; j1. 针簇多肢轮虫; j2. 真翅多肢轮虫; j3. 颤动疣毛轮虫; j4. 尖尾疣毛轮虫; j5. 郝氏皱甲轮虫; j6. 截头皱甲轮虫; k1. 奇异巨腕轮虫; o1. 长三肢轮虫; p1. 独角聚花轮虫; COD. 高锰酸盐指数; D. 水深; DO. 溶解氧; Ec. 电导率; pH. 酸碱度; Pp. 浮游植物; SD. 透明度; TN. 总氮; TP. 总磷; WT. 水温。

a1. *Dissotrocha aculeata*; b1. *Lepadella patella*; c1. *Brachionus angularis*; c2. *Brachionus calyciflorus*; c3. *Brachionus falcatus*; c4. *Brachionus diversicornis*; c5. *Anuraeopsis fissa*; c6. *Keratella cochleari*; c7. *Keratella valga*; c8. *Keratella quadrata*; c9. *Notholca labis*; d1. *Epiphanes clavulatas*; e1. *Monostyla closteroerca*; f1. *Asplanchna girodi*; f2. *Asplanchna priodonta*; f3. *Asplanchna brightwelli*; g1. *Ascomorpha saltans*; g2. *Ascomorpha ecaudis*; h1. *Diurella tenuior*; h2. *Trichocerca pusilla*; h3. *Trichocerca cylindrica*; h4. *Trichocerca elongata*; h5. *Trichocerca capucina*; j1. *Polyarthra trigla*; j2. *Polyarthra euryptera*; j3. *Synchaeta tremula*; j4. *Synchaeta stylata*; j5. *Ploesoma hudsoni*; j6. *Ploesoma truncatum*; k1. *Pedalia wira*; o1. *Fillinia longiseta*; p1. *Conochilus unicornis*; COD. Permanganate index; D. Depth; DO. Dissolved oxygen; Ec. Conductivity; pH. Potential of hydrogen; Pp. Phytoplankton; SD. Transparency; TN. Total nitrogen; TP. Total phosphorus; WT. Water temperature.

和分布起着至关重要的作用。青草沙水库出现的 32 种轮虫大部分属于广温性种类。

有研究表明, 水流动力对浮游生物群落结构有显著影响, 水流越大, 浮游生物的生物密度越低(陈伟民等 2000)。青草沙水库库心沙洲南北两条支流的流速明显不同, 南支水流速度快, 不适宜轮虫的大量生长繁殖, 相对来说北支水流较缓慢, 更适宜轮虫的生长繁殖。在本研究对各站点进行聚类分析统计时也同样表明, 处于南支的 S9、S10 归为一类, 处于北支

的 S1、S2 归为一类, 在相似的地理位置, 因为水流的不同在生物系统聚类分析中有了一定的区别。

3.2 空间差异

青草沙水库根据其地理水文状况分为上游、中游和下游 3 个区域, 能够很好地将水库复杂的生态面貌进行分割简化, 更有利于青草沙水质监测, 对其进行合理化的分析和管理的。青草沙由于西北上游闸口从长江江心引入江水, 具有泥沙含量大、流速快的特点, 随着江

水进入库区, 流速降低, 泥沙开始沉降(曹杰等 2016)。根据国内学者对三峡库区的研究(黄海强 2008), 随着水中泥沙含量的沉降, 浮游动物的生物密度不断增加, 这与本研究的水库上游泥沙含量大, 轮虫生物密度低的特征相一致。青草沙水库的水文泥沙特征为, 入水闸口至下游出水闸口的整体趋势为悬沙颗粒直径越来越小(曹杰等 2016), 中游水流渐渐变缓, 泥沙经过沉积, 水体透明度提高(年均 62.87 cm)、深度较深(平均 7.6 m), 由于水流变缓极大地改善了浮游生物的生活环境, 导致浮游生物的生物密度升高。青草沙水库下游是水库最重要的环节, 从下游闸口取水经过加工处理供市民饮用, 此处水流流速最慢, 粒径更小的颗粒物进一步沉淀, 水质尤为清澈, 可见度在 1 m 及以上(最大 1.6 m)、深度很大(平均 12.8 m), 由于营养盐在中游被细小的悬浮物大量吸附沉积到水库底部, 浮游植物生长受限, 从而导致轮虫的生物密度比中游低。

3.3 群落结构的影响因子

随着温度的上升轮虫生长发育速度加快, 周期变短, 同时由于夏秋季节的藻类繁殖迅速, 轮虫的生物饵料增多, 轮虫得以迅速生长。其平均生物密度不断升高。青草沙轮虫生物密度夏秋季高的趋势与漏湖(陈立婧等 2008)和青山水库(刘成士等 2015)的轮虫季节变化相一致。青草沙水库 2014 年浮游藻类生物密度 502.11×10^4 cell/L, 2015 年为 $1\,441.52 \times 10^4$ cell/L, 呈现出 2015 年比 2014 年生物密度高的趋势。由于轮虫作为初级消费者, 主要以浮游藻类为食, 所以轮虫的整体生物密度往往与浮游藻类的生物密度成正相关关系(吴艳芳 2012, 郑艳琳 2014)。

通过典型对应分析(RDA)发现, 主要优势种针簇多肢轮虫和螺形龟甲轮虫均与水深呈现负相关关系, 在青草沙水库随着水深的加大, 这两种主要优势种的生物密度更低, 不利于优势种的大量繁殖生长。大部分的轮虫生物密度与水深存在着负相关关系, 同时浮游植物的生

物密度与水深也存在着负相关关系, 说明在一定的范围内, 随着水深的增大, 浮游植物生物密度降低, 因为浮游植物作为轮虫的部分食物来源, 其生物密度的降低, 将导致轮虫生物密度降低。

由于轮虫生长发育快, 世代周期时间短, 在水环境检测方面得到了广泛的应用, 并且轮虫具有随水环境的改变群落结构特征随之发生改变的特征(Margaritora et al. 2005, 乔磊等 2015, 项贤领等 2105), 最适种类往往能在短时间内大量繁殖, 迅速占据优势地位, 正是由于这种特性, 轮虫被认为是一种很好的水质指示生物, 根据其在不同水体中生物群落的变化, 推测水体的营养类型。有国外研究表明(Duggan et al. 2001), 轮虫的种类组成往往随水体营养状况改变, 大个体的轮虫如蓴花臂尾轮虫、长三肢轮虫在富营养的水体中易生长繁殖成为优势种, 与之相反, 小个体的针簇多肢轮虫等在低营养状况水体中更易生长繁殖成为优势种。在本次调查研究期间, 两年的优势种中针簇多肢轮虫均为全年优势种, 而且青草沙水库鉴定出 α -寡污性种类 8 种, 青山水库只鉴定出 3 种(黄祥飞等 1985), 三峡水库鉴定出 7 种(陈勇 2009)。从优势种和污染指示种两方面都反映了水库的水质情况良好。青草沙水库是一个受人工严格管理的水域, 轮虫作为指示生物之一, 可以及时反映水库水质。

参 考 文 献

- Arora J, Mehra N K. 2003. Seasonal dynamics of rotifers in relation to physical and chemical conditions of the river Yamuna (Delhi), India. *Hydrobiologia*, 491(1/3): 101–109.
- Duggan I C, Green J D, Shiel R J. 2001. Distribution of rotifers in North Island, New Zealand, and their potential use as bioindicators of lake trophic state. *Hydrobiologia*, 446/447(1): 155–164.
- Jaccard P. 1912. The Distribution of the Flora in the Alpine Zone. *New Phytologist*, 11(2): 37–50.
- Jeppesen E, Jensen J P, Søndergaard M, et al. 1999. Trophic dynamics

- in turbid and clearwater lakes with special emphasis on the role of zooplankton for water clarity. *Hydrobiologia*, 408/409: 217–231.
- Koste W, Shiel R J. 1987. Tasmanian Rotifera: Affinities with the Australian Fauna. Rotifer Symposium IV. Netherlands: Springer.
- Krebs C J. 1978. Ecology: the Experimental Analysis of Distribution and Abundance. San Francisco: Harper & Row Limited.
- Margalef R. 1968. Perspective in Ecological Theory. *Journal of Economic Entomology*, 102(4): 1726–1727.
- Margaritora F G, Fumanti B, Alfinito S, et al. 2005. Trophic condition of the volcanic Lake Nemi (Central Italy): environmental factors and planktonic communities in a changing environment. *Journal of Limnology*, 64(2): 119–128.
- Pielou E C. 1975. Ecological Diversity. New York: John Wiley & Sons Inc, 16–51.
- Reynolds C S. 2000. Phytoplankton designer – or how to predict compositional responses to trophic-state change. *Hydrobiologia*, 424(1): 123–132.
- Scheffer M. 1999. The effect of aquatic vegetation on turbidity; how important are the filter feeders? *Hydrobiologia*, 408/409: 307–316.
- Segers H. 2008. Global diversity of rotifers (Phylum Rotifera) in freshwater. *Hydrobiologia*, 595(1): 49–59.
- Twombly S. 1983. Seasonal and Short Term Fluctuations in Zooplankton Abundance in Tropical Lake Malawi. *Limnology & Oceanography*, 28(6): 1214–1224.
- 曹杰, 张国庆, 李为华, 等. 2016. 上海市青草沙水库库区水文泥沙特征现场观测分析. *中国水运月刊*, 16(3): 177–180.
- 陈立婧, 顾静, 彭自然, 等. 2008. 漏湖轮虫群落结构与水质生态学评价. *动物学杂志*, 43(3): 7–16.
- 陈立婧, 刘樵, 彭自然, 等. 2011. 阳澄湖养蟹网围内外轮虫群落结构的变化及分析. *水产学报*, 35(8): 1247–1257.
- 陈伟民, 陈宇炜, 秦伯强, 等. 2000. 模拟水动力对湖泊生物群落演替的实验. *湖泊科学*, 12(4): 343–352.
- 陈伟民, 黄祥飞, 周万平, 等. 2005. 湖泊生态系统观测方法. 北京: 中国环境科学出版社.
- 陈勇. 2009. 三峡库区浮游植物与轮虫的群落结构研究. 重庆: 西南大学硕士学位论文.
- 顾玉亮, 乐勤, 金迪惠. 2008. 青草沙——上海百年战略水源地. *上海建设科技*, (1): 66–69.
- 黄海强. 2008. 三峡库区泥沙沉降对浮游生物的影响研究. 重庆: 西南大学硕士学位论文.
- 黄祥飞. 1999. 湖泊生态调查观测与分析. 北京: 中国标准出版社, 72–791.
- 黄祥飞, 胡春英, 伍焯田. 1985. 武汉东湖的轮虫. *水生生物学报*, 9(2): 129–143.
- 李共国, 虞左明. 2003. 千岛湖轮虫群落结构及水质生态学评价. *湖泊科学*, 15(2): 169–176.
- 林秋奇, 赵帅营, 韩博平. 2005. 广东省水库轮虫分布特征. *生态学学报*, 25(5): 1123–1131.
- 刘成士, 黄燕, 刘瑜, 等. 2015. 青山水库轮虫群落结构特征的时空差异对水质变化的影响. *海洋与湖沼*, 46(3): 694–702.
- 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.
- 陆晓如. 2014. 特大型水库综合运行调度平台建设研究与实践. *净水技术*, (3): 111–114.
- 钱方平, 席贻龙, 温新利, 等. 2007. 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*, 15(4): 344–355.
- 乔磊, 林秋奇, 韩博平. 2015. 珠海市调水水库水力滞留时间对轮虫群落结构的影响. *应用与环境生物学报*, 21(3): 499–504.
- 孙陆宇, 温晓蔓, 禹娜, 等. 2013. 上海青草沙水库后生浮游动物群落结构. *复旦学报: 自然科学版*, 52(1): 119–128.
- 王家楫. 1961. 中国淡水轮虫志. 北京: 科学出版社.
- 王云龙, 袁骥, 沈新强. 2005. 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*, 12(3): 300–306.
- 温新利, 席贻龙, 张雷, 等. 2004. 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*, 12(4): 387–395.
- 吴艳芳. 2012. 上海世博园后滩湿地生态修复后浮游生物群落结构特征的研究. 上海: 上海海洋大学硕士学位论文.
- 项贤领, 陶媛媛, 席贻龙. 2015. 轮虫种群遗传结构及系统地理格局研究进展. *生态学杂志*, 34(7): 2048–2057.
- 徐兆礼, 王云龙, 陈亚瞿, 等. 1995. 长江口最大浑浊带区浮游动物的生态研究. *中国水产科学*, (1): 39–48.
- 杨宇峰, 黄祥飞. 2000. 浮游动物生态学研究进展. *湖泊科学*, 12(1): 81–89.
- 张觉民, 何志辉. 1991. 内陆水域渔业自然资源调查手册. 北京: 农业出版社.
- 郑艳琳. 2014. 浮游动物摄食的非线性动力学模型研究. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文.
- 周超, 高乃云, 赵世赓, 等. 2012. 上海青草沙水库水质调查与评价. *同济大学学报: 自然科学版*, 40(6): 894–899.