

# 新疆石河子市蘑菇湖水库浮游动物的群落特征及营养状态评价

高岩<sup>①</sup> 张映东<sup>②</sup> 胡文革<sup>①\*</sup> 贾文平<sup>③</sup> 林旭元<sup>④</sup> 马得草<sup>①</sup>  
尤洋<sup>②</sup> 杨扬<sup>①</sup> 兰鸿珠<sup>①</sup> 张秀荣<sup>②</sup>

① 石河子大学生命科学学院 石河子 832003; ② 新疆石河子玛纳斯河流域管理处 石河子 832003; ③ 天津市水产研究所 天津 300000; ④ 新疆兵团水产技术推广总站 五家渠 831300

**摘要:** 2016年4月至2016年11月针对新疆石河子蘑菇湖水库不同库区水量状况时期(4月份丰水期, 7月份平水期, 11月份枯水期)进行了3次采样调查, 共检出浮游动物36种, 其中原生动物7种, 轮虫18种, 枝角类4种, 桡足类7种; 3次采样浮游动物群落结构均主要以轮虫和桡足类为主。浮游动物年平均密度为3 574 ind/L, 各采样点密度变化范围为284 ~ 5 162 ind/L; 年生物量为3.79 mg/L, 各采样点生物量变化范围为0.84 ~ 6.56 mg/L。3次采样浮游动物密度和生物量均在7月份达到最大值, 不同时期密度和生物量差异均显著 ( $P < 0.05$ )。根据浮游动物密度对蘑菇湖水库进行营养化评级, 水库营养状况在一年中随着时间的变化是以中营养化水平向富营养化转化的状态。浮游动物群落结构和环境因子的冗余分析(RDA)表明, 水温、硝态氮、溶解氧、酸碱度、化学需氧量能够在4月份(丰水期)影响浮游动物群落结构; 水温、溶解氧、总磷、化学需氧量能够在7月份(平水期)共同影响浮游动物群落结构; 水温、酸碱度、溶解氧在11月份(枯水期)能够影响浮游动物群落结构。其中, 水温和溶解氧在3个不同时期是主要影响浮游动物群落结构的环境因子。

**关键词:** 蘑菇湖水库; 浮游动物; 物种多样性; 水质; 营养类型

中图分类号: Q958 文献标识码: A 文章编号: 0250-3263 (2018) 06-890-09

## Zooplankton Community and Trophical Status of Moguhu Reservoir Xinjiang

GAO Yan<sup>①</sup> ZHANG Ying-Dong<sup>②</sup> HU Wen-Ge<sup>①\*</sup> JIA Wen-Ping<sup>③</sup> LIN Xu-Yuan<sup>④</sup> MA De-Cao<sup>①</sup>  
YOU Yang<sup>②</sup> YANG Yang<sup>①</sup> LAN Hong-Zhu<sup>①</sup> ZHANG Xiu-Rong<sup>②</sup>

① *College of Life Science, Shihezi University, Shihezi 832003*; ② *The Manas River Basin Management Office, Shihezi 832003*; ③ *Institute of Aquatic Products in Tianjing, Tianjing 300000*; ④ *Xinjiang Provincial Corps Aquatic Technology Promotion Terminus, Wujiaqu 831300, China*

**基金项目** 新疆兵团科技攻关与成果转化计划项目 (No. 2015AC010) ;

\* 通讯作者, E-mail: hwg-t@163.com;

**第一作者介绍** 高岩, 男, 硕士研究生; 研究方向: 水生生物的遗传多样性与繁育; E-mail: 732678157@qq.com.

收稿日期: 2018-03-26, 修回日期: 2018-06-22 DOI: 10.13859/j.cjz.201806007

**Abstract:** In order to study the relationship between the zooplankton community structure and the water environmental factors in the Moguhu Reservoir, we conducted three detailed investigations in April, July and November in 2016. We used the Margalef's richness index and redundancy analysis method to analyze the density, biomass and dominance of zooplankton in different months, as well as the relationship between the structure of zooplankton community and the environment, the degree of nutrition of the reservoir. A total of 36 species of zooplankton were detected, including 7 species of protozoa, 18 species of rotifer, 4 species of Cladocera, and 7 species of Copepods (Table 4). The community structure of zooplankton was mainly dominated by rotifers and copepods in the three sampling. The average annual density of zooplankton was 3 574 ind/L, and the density variation range of each sampling point was 284 - 5 162 ind/L (Fig. 2); The annual biomass was 3.79 mg/L, and the range of biomass of each sampling point was 0.84 - 6.56 mg/L (Fig. 3). The density and biomass of zooplankton in three samplings reached the maximum in July, and the differences in density and biomass were significant at different periods ( $P < 0.01$ ). Three surveys identified eight dominant zooplankton species (degree of dominance  $\geq 0.2$ ), including 5 species of rotifer, 2 species of Cladocera and 1 species of copepods (Table 5). The zooplankton community composition and environmental factors in the Mushroom Lake Reservoir were subjected to trend correspondence analysis (DCA) (Fig. 4), and the first axis gradient was tested, because the gradient of the three periods was less than 3, so the final selection redundancy analysis (RDA) was selected for the constrained sequencing. The test results show that water temperature, nitrate nitrogen, dissolved oxygen, pH, and chemical oxygen demand can affect the zooplankton community structure in April (wet season); Water temperature, dissolved oxygen, total phosphorus, chemical oxygen demand, and can affect the structure of zooplankton community in July (normal season). Water temperature, pH, and dissolved oxygen can affect zooplankton community structure in November (dry season). Water temperature and dissolved oxygen were the environmental factors that mainly affected the zooplankton community structure in three different periods.

**Key words:** Moguhu Reservoir; Zooplankton; Species diversity; Water quality; Type of nutrition

在水体环境的检测中，由于浮游动物具有对水生态系统敏感的特征，浮游动物群落的组成和分布很容易受到水生态系统的温度（temperature, WT）、透明度（transparency, SD）、酸碱度（pH）、溶解氧（dissolved oxygen, DO）、磷（phosphorus, TP）等水体环境理化因子有关，甚至很多浮游动物可以作为环境污染的指示生物（董艳珍等 2017）。近些年来，我国水库富营养化问题日益严重，浮游动物在水生态环境中的群落变化特性已经被大量的应用于湖泊水库水体生态环境的监测中（林秋奇等 2003）。

蘑菇湖水库（44°25' ~ 44°29'N, 85°52' ~ 85°58'E）位于我国新疆维吾尔自治区石河子市

境内，是利用沙湾河和玛纳斯河两河洪积扇间洼地修筑起来的人工湖泊，其主要水源为两河水及泉水和井水，以及石河子市城市工业废水和生活污水（刘建江等 2003，景一峰等 2016）。近些年来，由于大量工业废水和生活污水的排入，蘑菇湖水库水体呈现富营养化状况，水质状况不容乐观，大量鱼类、野鸭等依水生活的动物死亡，底栖动物几乎灭绝（吴心蓉等 2006）。国内对于蘑菇湖水库的研究主要是水质的检测与防治，卞玮（2006）对蘑菇湖水库富营养化成因及防治对策进行了研究，付树卿（2010）进行了富营养化评价，靳晟（2010）对水质检测与污染防治提出了方案，而对蘑菇湖水库浮游生物的研究仅限于浮游植物（李扬

旗 1991), 对浮游动物的研究尚未见报道。本研究在蘑菇湖水库丰水期(4月)、平水期(7月)、枯水期(11月)三个典型的水环境状态下进行采样分析, 对浮游动物的群落组成(community structure)、优势度(ecological dominance)、密度(abundance)、生物量(biomass)、物种多样性(species diversity)特征, 以及浮游动物群落结构组成与水环境因子(environmental factors)的关联性进行分析, 并对目前的水环境状况进行了评价, 为蘑菇湖水库环境监测、保护、水质与渔业养殖管理提供相关的科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样点设置

根据蘑菇湖水库水体面积及库区构型设置5个采样点(表1)。

表1 采样点地理坐标

Table 1 Geographical coordinates of sampling points

采样点 Sample point	地理坐标 Geographical coordinates
出水口 Water outlet	44°29'12"N, 85°55'56"E
库中心西侧 West of reservoir center	44°27'37"N, 85°54'15"E
库中心东侧 East of reservoir center	44°28'17"N, 85°57'22"E
库湾 Bends in reservoir	44°26'48"N, 85°54'16"E
入水口 Water inlet	44°26'37"N, 85°56'20"E

### 1.2 样品的采集与处理

分别于2016年4月(丰水期)、2016年7月(平水期)、2016年11月(枯水期)在蘑菇湖水库调查采样。水体理化参数现场采集水样并测定, 不能在现场测定的理化指标, 按照待测水样处理标准初步处理水样, 将处理后的水样装入带有冰袋的冰盒中, 低温(4℃)保存带回实验室, 并置于冰箱中4℃保存。水体采样方法以及理化参数参照《水和废水检测分析方法》(国家环境保护总局 2002)采集和测定。上述采集的所有水样在24h内测量完毕, 透明

度用SD20型塞氏盘(北京普利特仪器有限公司)测定, 水温用WT型水温计(北京普利特仪器有限公司)分别测量水体表层、中层、底层温度。pH用PHSJ-3F型PH测定仪(北京宏昌信科技有限公司)进行测量。

### 1.3 浮游动物定性与定量

浮游动物的种类鉴定参考《中国淡水轮虫志》(王家楫 1978)、《中国动物志: 节肢动物门 甲壳纲 淡水枝角类》(蒋燮治等 1979)、《中国动物志: 节肢动物门 甲壳纲 淡水桡足类》(中国科学院中国动物志委员会 1999)、《淡水微型生物与底栖动物图谱》(周凤霞等 2011)和《滇池、洱海浮游动植物环境图谱》(杨苏文 2015)。浮游动物密度和生物量的测定参考《淡水浮游生物研究方法》(章宗涉等 1991)。

### 1.4 数据分析

优势度采用Mcnaughton(1967)的计算公式, 优势度 $Y = (N_i/N) f_i$ ,  $Y \geq 0.02$ 即为优势种; Shannon-Wiener指数 $H' = -\sum P_i \ln P_i$ ,  $P_i = N_i/N$ ; Margalef丰富度指数 $D = (S - 1) / \ln N$ ; 均匀度指数 $J = H' / \ln S$ 。各公式中,  $N_i$ 为第*i*种的个体数,  $N$ 为所有种类的总个体数,  $f_i$ 为第*i*种在各站中出现的频度,  $S$ 为浮游动物种类数。理化性质数据进行对数转换以使数据最终呈正态分布, 运用趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA), 确定第一轴梯度来选择DCA分析或冗余分析(redundancy analysis, RDA), DCA分析和RDA分析在软件CANOCO 4.5中完成。

## 2 结果

### 2.1 蘑菇湖水库水质特点

蘑菇湖水库3个采样期环境理化因子特征见表2。各环境因子在不同时期变化具有差异性, 只有透明度在4月份(丰水期)与11月份(枯水期)差异不显著, 其他环境因子在各时期均差异显著( $P < 0.05$ )。

### 2.2 浮游动物群落组成

3次采样调查共鉴定浮游动物36种(表3),

表 2 蘑菇湖水库理化因子特征

Table 2 Characteristics of environmental factors in Moguhu Reservoir

环境因子 Environmental factors	4 月 April	7 月 July	11 月 November
水温 Water temperature (°C)	16.22 ± 1.27 <sup>a</sup>	25.01 ± 2.00 <sup>b</sup>	6.01 ± 0.75 <sup>c</sup>
pH	8.29 ± 0.13 <sup>a</sup>	8.58 ± 0.16 <sup>b</sup>	8.13 ± 0.10 <sup>c</sup>
透明度 Transparency (cm)	45.87 ± 11.47 <sup>a</sup>	29.13 ± 18.31 <sup>b</sup>	45.53 ± 19.32 <sup>a</sup>
水深 Water depth (m)	3.47 ± 3.39 <sup>a</sup>	5.88 ± 2.79 <sup>b</sup>	4.30 ± 3.06 <sup>c</sup>
溶解氧 Dissolved oxygen (mg/L)	18.57 ± 5.52 <sup>a</sup>	8.52 ± 1.96 <sup>b</sup>	15.88 ± 1.89 <sup>c</sup>
化学需氧量 Chemical oxygen demand (mg/L)	21.90 ± 10.47 <sup>a</sup>	43.26 ± 8.98 <sup>b</sup>	59.12 ± 7.24 <sup>c</sup>
氨态氮 Ammonia NH <sub>4</sub> (mg/L)	2.17 ± 0.46 <sup>a</sup>	3.13 ± 0.66 <sup>b</sup>	9.53 ± 2.99 <sup>c</sup>
硝态氮 Nitrate NO <sub>3</sub> (mg/L)	0.59 ± 0.03 <sup>a</sup>	0.27 ± 0.02 <sup>b</sup>	0.32 ± 0.16 <sup>c</sup>
总磷 Total phosphorus (mg/L)	0.28 ± 0.14 <sup>a</sup>	0.39 ± 0.18 <sup>b</sup>	0.21 ± 0.12 <sup>c</sup>
亚硝态氮 Nitrite nitrogen (mg/L)	0.14 ± 0.08 <sup>a</sup>	0.66 ± 0.14 <sup>b</sup>	0.26 ± 0.04 <sup>c</sup>

表中数据为平均值 ± 标准差 (n = 3); 同行不同字母表示不同时期在 0.05 水平存在显著差异。

Data in the table are Means ± SD (n = 3); The different lower case letters in the same row indicate significant difference among period at 0.05 level.

表 3 蘑菇湖水库 5 个采样点和 3 个采样月份浮游动物物种数

Table 3 Species richness of zooplankton species in five sampling sites of Mushroom lake reservoir

	原生动物 Protozoa	轮虫 Rotifer	枝角类 Cladocera	桡足类 Copepoda	总计 Total
出水口 Water outlet	6	17	4	6	33 <sup>a</sup>
库中心西侧 West of reservoir center	7	15	4	6	32 <sup>a</sup>
库中心东侧 East of reservoir center	7	16	3	7	33 <sup>a</sup>
库湾 Bends in reservoir	5	12	2	5	24 <sup>b</sup>
入水口 water inlet	4	15	3	3	25 <sup>b</sup>
4 月 April	3	16	4	7	30 <sup>a</sup>
7 月 July	7	17	4	7	35 <sup>b</sup>
11 月 November	4	12	2	7	25 <sup>c</sup>

表中数据为平均值 ± 标准差 (n = 3); 同列不同字母表示在 0.05 水平存在显著差异。

Data in the table are Means ± SD (n = 3); The different lower case letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level.

其中原生动物 7 种, 轮虫 18 种, 枝角类 4 种, 桡足类 7 种。浮游动物种类数 7 月份 (平水期 35 种) 最多, 4 月份 (丰水期 30 种) 次之, 11 月份 (枯水期 25 种) 最少, 不同时期浮游动物的组成差异均显著 ( $P < 0.05$ )。

在蘑菇湖水库 5 个采样点中, 浮游动物种类由多到少排序是出水口和库中心东侧最多, 都是 33 种, 其次库中心西侧 (32 种)、入水口 (25 种)、库湾 (24 种)。出水口、库中心西侧、

库中心东侧 3 个采样点浮游动物种类数差异不显著, 但均与库湾和出水口差异显著 ( $P < 0.05$ ), 库湾和入水口差异不显著。

### 2.3 浮游动物优势度在不同时期的变化

3 次采样调查浮游动物优势种 8 种 (表 4), 其中轮虫 5 种, 分别为萼花臂尾轮虫 (*Brachionus calyciflorus*)、剪形臂尾轮虫 (*B. forficula*)、囊形单趾轮虫 (*Monostyla bulla*)、螺形龟甲轮虫 (*Keratella cochlearis*)、长三肢

表 4 蘑菇湖水库浮游动物优势物种的优势度

Table 4 Zooplankton dominance in Moguhu Reservoir

优势种 Dominant species	4 月 April	7 月 July	11 月 November
萼花臂尾轮虫 <i>Brachionus calyciflorus</i>	0.103	0.213	0.174
剪形臂尾轮虫 <i>B. forficula</i>		0.031	
囊形单趾轮虫 <i>Monostyla bulla</i>	0.023		
僧帽溞 <i>Daphnia cucullata</i>		0.031	
长额象鼻溞 <i>Bosmina longirostris</i>	0.081	0.138	0.103
长三肢轮虫 <i>Filinia longiseta</i>		0.032	0.023
螺形龟甲轮虫 <i>Keratella cochlearis</i>	0.021	0.033	
广布中剑水蚤 <i>Microcyclops leuckarti</i>	0.121	0.105	0.086

轮虫 (*Filinia longiseta*)；枝角类僧帽溞 (*Daphnia cucullata*) 和长额象鼻溞 (*Bosmina longirostris*) 2 种；桡足类仅广布中剑水蚤 (*Microcyclops leuckarti*) 1 种。7 月份优势种最多，有 7 种，优势度介于 0.031 ~ 0.213；11 月份优势种最少，只有 4 种，优势度介于 0.023 ~ 0.174。3 次采样轮虫和枝角类均占据主要优势地位，在 7 月份时萼花臂尾轮虫和长额象鼻溞占据了主要的优势地位。在 4 月份时，桡足类开始占据主要优势地位。

#### 2.4 不同时期浮游动物密度和生物量的变化

3 次采样浮游动物密度变化 (图 1) 和生物量变化 (图 2) 较大。浮游动物 3 次采样平均密度为 3 574 ind/L，各采样点密度变化范围为 284 ~ 5 162 ind/L。轮虫的平均密度为 1 662 ind/L，占总密度的 44.38%，桡足类的平均密度为 796 ind/L，占总密度的 28.38%，枝角类的平均密度为 795 ind/L，占总密度的 22.04%，原生动物的平均密度为 78 ind/L，占总密度的 2.35%。浮游动物平均密度最大值在 7 月份 (平水期，4 861 ind/L)，最低值在 4 月份 (丰水期，2 294 ind/L)，11 月份 (枯水期，3 567 ind/L) 居中。浮游动物密度不同时期差异均显著 ( $P < 0.05$ )。

蘑菇湖水库浮游动物年均生物量为 3.79 mg/L，各采样点生物量变化范围为 0.84 ~ 6.56 mg/L。其中，轮虫的平均生物量为 0.94 mg/L，占总生物

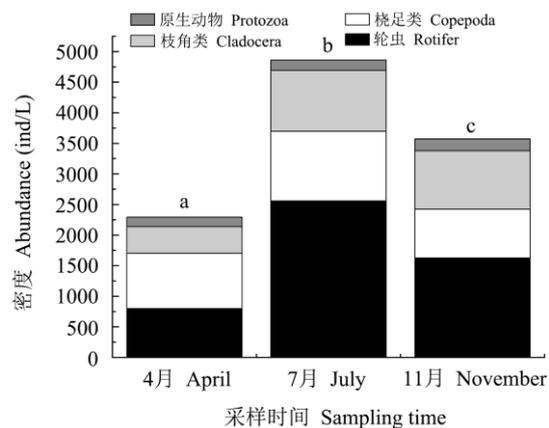


图 1 蘑菇湖水库浮游动物密度变化

Fig. 1 The abundance of zooplankton in different periods of Moguhu Reservoir

图中不同字母表示浮游动物总密度不同时期在 0.05 水平存在显著差异 ( $n = 3$ )。

Different letters in the figure indicate significant difference in the total zooplankton density at the 0.05 level ( $n = 3$ ).

量的 25.02%，桡足类的平均生物量为 1.62 mg/L，占 42.0%，枝角类的平均生物量为 1.11 mg/L，占 30.24%，原生动物的平均生物量为 0.12 mg/L，占 2.67%。浮游动物生物量平均值最大值在 7 月份，为 5.29 mg/L，最低值在 4 月份，为 2.74 mg/L，11 月份居中，为 3.34 mg/L，不同时期浮游动物的生物量差异均显著 ( $P < 0.05$ )。

蘑菇湖水库浮游动物 4 月份 (丰水期) 平均密度为 574 ~ 3 638 ind/L，平均生物量为 0.63

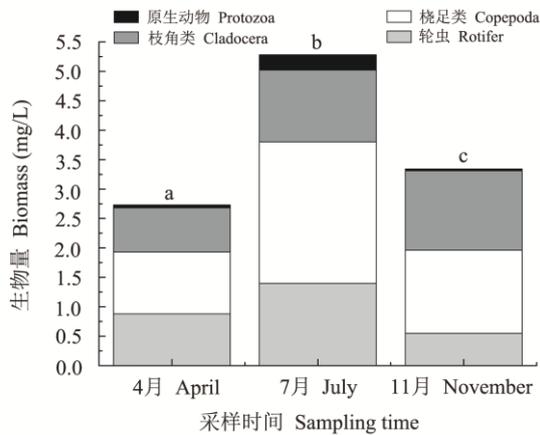


图2 蘑菇湖水库浮游动物生物量变化

Fig. 2 Biomass of zooplankton in different periods of Moguhu Reservoir

图中不同字母表示浮游动物总密度不同时期在 0.05 水平存在显著差异 ( $n=3$ )。

Different letters in the figure indicate significant difference in the total zooplankton density at the 0.05 level ( $n=3$ ).

~ 4.22 mg/L, 平均密度和生物量的最大值均出现在库中心西侧, 最低值均出现在入水口。7 月份(平水期)平均密度为 2 482 ~ 7 241 ind/L, 平均生物量为 2.26 ~ 8.01 mg/L, 平均密度和生物量最大值均出现在出水口, 最低值均出现在入水口。11 月份(枯水期)平均密度为 384 ~ 5 131 ind, 生物量平均值为 1.09 ~ 5.88 mg/L, 密度和生物量的最大值均出现在出水口, 最低值出现在库湾。5 个采样点的密度和生物量均是 7 月份(平水期)最高, 11 月份(枯水期)次之, 4 月份(丰水期)最低。

### 2.5 浮游动物多样性指数在不同时期的变化

蘑菇湖水库 Margalef 丰富度指数 4 月份(丰水期)平均值为 3.67 (变化范围 1.68 ~ 4.53), 最低值出现在入水口, 最高值出现在出水口。7 月份(平水期)平均值为 3.96 (2.42 ~ 4.96), 最低值出现在入水口, 最高值出现在库中心西侧。11 月份(枯水期)平均值为 3.10 (1.95 ~ 4.75), 最高值出现在出水口, 最低值出现在入水口。Shannon-wiener 指数 4 月份(丰水期)平均值为 1.09 (0.05 ~ 1.33), 最高值出

现在出水口, 最低值出现在入水口。7 月份(平水期)平均值为 1.15 (0.07 ~ 1.61), 最高值出现在库中心东侧, 最低值出现在入水口。11 月份(枯水期)平均值为 0.81 (0.04 ~ 1.21), 最高值出现在库中心西侧, 最低值出现在入水口。

均匀度指数 4 月份(丰水期)平均值为 0.31 (0.17 ~ 0.56), 最高值出现在库中心西侧, 最低值出现在入水口。7 月份(平水期)平均值为 0.32 (0.12 ~ 0.68), 最高值出现在库中心东侧, 最低值出现在入水口。11 月份(枯水期)平均值为 0.31 (0.09 ~ 0.57), 最大值出现在库中心东侧, 最低值出现在入水口。

### 2.6 浮游动物群落结构与环境因子的关系

将蘑菇湖水库浮游动物群落组成与环境因子进行趋势对应分析(DCA)(图 3), 检验其第一轴梯度, 3 个时期均小于 3, 因此最终选择冗余分析(RDA)进行约束性排序。检验结果显示, 水温(WT)、硝态氮( $\text{NO}_3^-$ )、溶解氧(DO)、酸碱度(pH)、化学需氧量(COD)能够在 4 月份(丰水期)影响浮游动物群落结构; 水温(WT)、溶解氧(DO)、总磷(TP)、化学需氧量(COD)能够在 7 月份(平水期)共同影响浮游动物群落结构; 水温(WT)、酸碱度(pH)、溶解氧(DO)在 11 月份(枯水期)能够影响浮游动物群落结构。其中, 水温(WT)、溶解氧(DO)在 3 个不同时期是主要影响浮游动物群落结构的环境因子。在不同时期浮游动物群落结构中浮游动物对环境因子变化的响应不同, 在 4 月份(丰水期), 主要优势种中萼花臂尾轮虫和长额象鼻溞与水深(Wd)、总磷(TP)、溶解氧(DO)、硝态氮( $\text{NO}_3^-$ )呈正相关, 而广布中剑水蚤与水温(WT)呈明显的正相关性; 7 月份(平水期)主要优势种萼花臂尾轮虫和长额象鼻溞与溶解氧(DO)和总磷(TP)呈正相关性, 而广布中剑水蚤与溶解氧(DO)呈明显正相关性; 11 月份(枯水期)主要优势种萼花臂尾轮虫和广布中剑水蚤与水温(WT)呈明显的正相关性, 长额象鼻溞与水温(WT)和 pH 都呈正相关性,

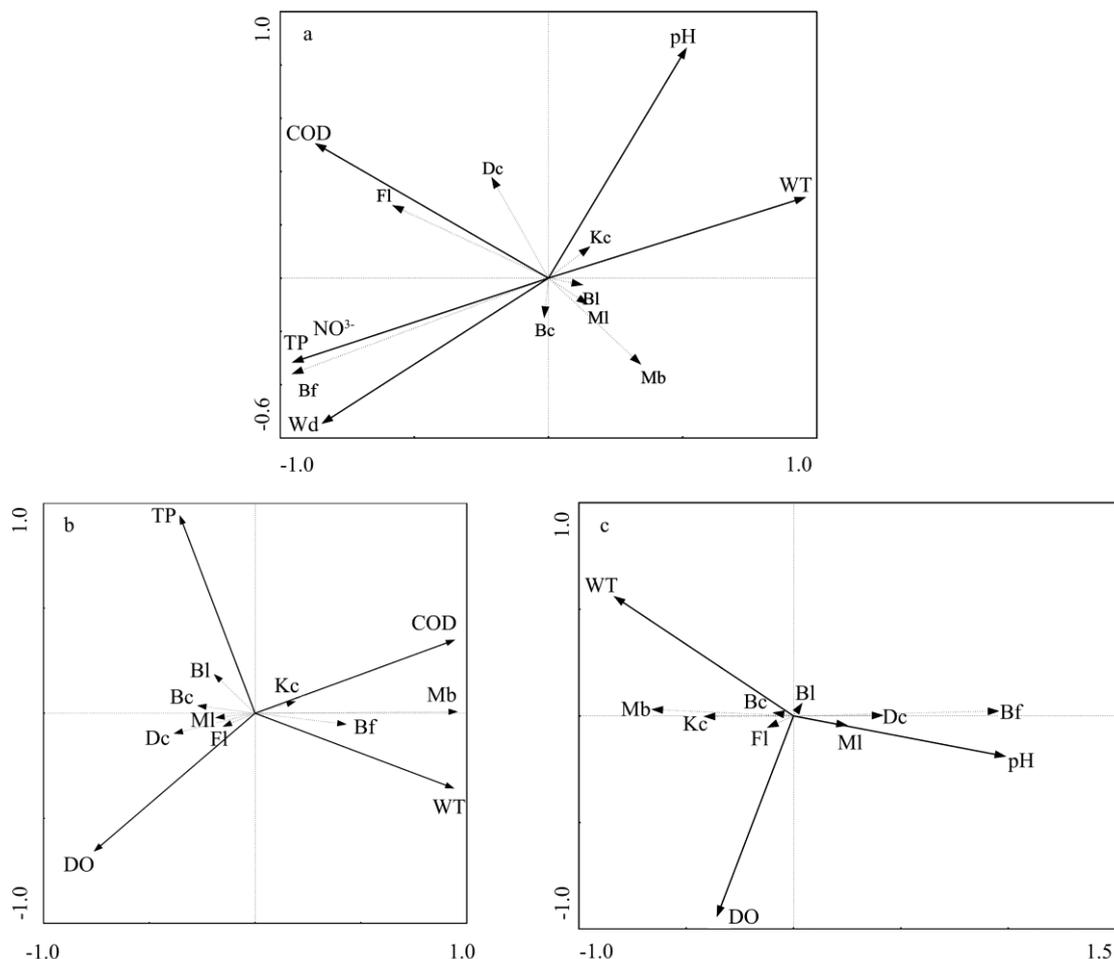


图 3 物种-环境相互关系冗余分析 (RDA) 排序图

Fig. 3 Redundancy analysis (RDA) of the species-environment relationships

a. 4 月份; b. 7 月份; c. 11 月份。a. April; b. July; c. November.

Bc. 萼花臂尾轮虫; Bf. 剪形臂尾轮虫; Bl. 长额象鼻溞; COD. 化学需氧量; Dc. 僧帽溞; Do. 溶解氧; Fl. 长三肢轮虫; Kc. 螺形龟甲轮虫; Mb. 囊形单趾轮虫; MI. 广布中剑水蚤; NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. 硝态氮; TP. 总磷; Wd. 水深; WT. 水温。

Bc. *Brachionus calyciflorus*; Bf. *Br. forficula*; Bl. *Bosmina longirostris*; COD. Chemical oxygen demand; Dc. *Daphnia cucullata*; Do. Dissolved oxygen; Fl. *Filinia longiseta*; Kc. *Keratella cochlearis*; Mb. *Monostyla bulla*; MI. *Microcyclops leuckarti*; NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Nitrate NO<sub>3</sub>; TP. Total phosphorus; Wd. Water depth; WT. Water temperature.

长三肢轮虫与化学需氧量 (COD) 呈明显正相关性。

### 3 讨论

本次调查结果显示, 3 个不同时期的蘑菇湖水库浮游动物群落结构组成种类变化不大, 但是群落结构内部优势种更替明显。4 月份 (丰水期) 轮虫和桡足类占据了主要的优势地位; 7

月份 (平水期) 轮虫和枝角类占据了主要优势地位; 11 月份 (枯水期) 轮虫和桡足类占据主要的优势地位。在 3 个不同时期占据主要优势地位的浮游动物大多是水体富营养化指示种, 表明蘑菇湖水库水体富营养化比较严重。一般而言, 浮游动物适宜在净水水体生活, 湖泊浮游动物物种数和密度高于河流 (吴利等 2017)。本次调查结果显示, 7 月份 (平水期) 的浮游

动物生物量和密度要高于其他月份，而蘑菇湖 7 月份处于洪水期，水流流速加快，本应不适宜浮游动物生存，但是调查发现，该时期浮游动物种数、密度和生物量均高于其他时期，主要原因可能是 7 月份蘑菇湖水库氮类物质大量升高，水温和光照强度等环境因子促进了浮游植物的生长，从而引起了浮游植物的疯长，为浮游动物提供了大量的食物，同时包括水温在内的适宜生存环境，使得适宜浮游动物生存的有利因素大于不利因素，这一类似情况在国内也有相关报道（杨亮杰等 2014）。

本次调查研究发现，浮游动物的物种数、密度和生物量在样点间存在差异，按照从大到小顺序排列为出水口、库中心东侧、库中心西侧、库湾、入水口。蘑菇湖总体水域面积并不大，产生这种差异的原因可能是因为蘑菇湖水库内的浮游动物大多为喜欢生活在营养化环境中的物种，如萼花臂尾轮虫、剪形臂尾轮虫、长额象鼻溞等均为富营养化水体的指示生物。而据从水库工作者那里了解到：库中心东侧附近恰好是生活污水和工厂污水的排污口，因此推测这两处的排污口为出水口、库中心西侧和库中心东侧 3 个样点提供了充足的营养化环境；入水口是玛纳斯河河水的进水口，玛纳斯河水是清洁水源，因此喜欢生存在营养化水体的物种不适宜在此生存，入水口调查到的是在较清洁水体下生存的浮游动物和营养化不严重的物种。

环境因子对浮游动物群落结构在不同时期的影响程度不同，蘑菇湖水库不同时期主要的浮游动物群落优势种皆为萼花臂尾轮虫、长额象鼻溞和广布中剑水蚤。但是这 3 种浮游动物在 3 个时期对环境因子的正相关性不同，能够影响这 3 种浮游动物的环境因子主要分为 3 种：一是生存空间的改变，即水库水体水深（Wd）的改变；二是外界环境的物理变化，即水体水温（WT）和 pH 的改变；三是浮游动物自身对环境的需要，包括呼吸所用的溶解氧（DO）的改变。另外，本次调查研究发现硝态氮（ $\text{NO}_3^-$ ）

和总磷（TP）也会对浮游动物群落结构产生影响，但这种影响可能不是直接影响，而是通过改变浮游植物群落的密度，进而影响到作为捕食者的浮游动物的群落结构。

根据浮游动物密度对蘑菇湖水库进行营养化评级，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定标准（陈磊等 2016）。蘑菇湖水库浮游动物全年平均密度为 3 573 ind/L，3 次采样调查只有 4 月份（丰水期）浮游动物平均密度没有超过 3 000 ind/L，达到了中营养化水平，其余两个时期均达到了富营养化水平，且 7 月份密度平均值达到最大值。表明蘑菇湖水库营养状况在一年中随着时间的变化是以中营养化水平向富营养化转化的状态。

根据 Margalef 生物多样性的评价方法，轮虫的生物多样性指数越大，表明水体越清洁。蘑菇湖水库 3 个时期的轮虫多样性指数变化范围为 1.49 ~ 2.35，最大值出现在 4 月份（丰水期），最小值出现在 7 月份（平水期）。这与太湖入湖河流莲花荡水系内浮游动物的多样性变化趋势相同（袁雅琴等 2017）。主要原因可能是，夏季水体中蓝藻群体体积会增大，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）。蘑菇湖水库 7 月份时库区经常会产生水华（algal bloom）现象，并伴随大量的腥臭味。蘑菇湖水库大部分时期整体处于富营养化状态，因此要加强对蘑菇湖水库水质治理与保护，防止其富营养化对库区内渔业养殖造成经济损失和对当地生态环境产生危害。

**致谢** 感谢石河子市玛纳斯河流域管理处的工作人员在本研究过程中提供的大量帮助！

## 参 考 文 献

- 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.
- Mcnaughton S J. 1961. Relationships among Functional Properties of Californian Grassland. *Nature*, 216(5111): 168–169.
- 卞玮. 2006. 石河子蘑菇湖水库富营养化成因及防治对策. *干旱环境监测*, 20(4): 223–226.
- 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.
- 董艳珍, 周淼, 聂细荣, 等. 2017. 长湖圆心湖夏季浮游动物群落结构及水质评价. *凯里学院学报*, 35(3): 112–114.
- 付树卿. 2010. 蘑菇湖水库富营养化评价与对策研究. *水利科技与经济*, 16(9): 989–990.
- 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 2002. 水和废水监测分析方法. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社.
- 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.
- 靳晟. 2010. 蘑菇湖水库水质监测管理系统设计及应用研究. *南水北调与水利科技*, 8(3): 124–127.
- 景一峰, 张风华. 2016. 蘑菇湖水库水体重金属污染情况分析与评价. *科技创新与应用*, (10): 151–152.
- 李扬旗. 1991. 蘑菇湖水库浮游植物与富营养化关系初探. *干旱环境监测*, (2): 103–107.
- 林秋奇, 胡韧, 段舜山, 等. 2003. 广东省大中型供水水库营养现状及浮游生物响应. *生态学报*, 23(6): 1101–1108.
- 刘建江, 陈静, 杨永胜, 等. 2003. 蘑菇湖水库现状水质评价及保护对策研究. *新疆水利*, (5): 32–41.
- 王家楫. 1978. 中国淡水轮虫志. 北京: 科学出版社.
- 吴利, 周明辉, 沈章军, 等. 2017. 巢湖及其支流浮游动物群落结构特征及水质评价. *动物学杂志*, 52(5): 792–811.
- 吴心蓉, 刘焕芳, 张向东. 2006. 蘑菇湖水库水资源的污染现状和保护对策. *石河子大学学报: 自然科学版*, 24(2): 234–237.
- 杨亮杰, 吕光汉, 竺俊全, 等. 2014. 横山水库浮游动物群落结构特征及水质评价. *水生生物学报*, 38(4): 720–728.
- 杨苏文. 2015. 滇池、洱海浮游动植物环境图谱. 北京: 科学出版社.
- 袁雅琴, 周春丽, 高海燕, 等. 2017. 太湖典型入湖河流莲花荡浮游动物群落季节演替及其环境指示意义初步研究. *动物学杂志*, 52(5): 812–823.
- 章宗涉, 黄祥飞. 1991. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社.
- 中国科学院中国动物志委员会. 1999. 中国动物志: 节肢动物门 甲壳纲 淡水桡足类. 北京: 科学出版社.
- 周凤霞. 2011. 淡水微型生物与底栖动物图谱. 北京: 化学工业出版社.