

贵州三板溪水库后生浮游动物群落结构的动态变化*

李 钊¹, 李秋华^{1**}, 陈文生¹, 王安平¹, 孙荣国², 张 垒¹, 高永春³, 骆 兰³

(1: 贵州师范大学贵州省山地环境信息系统和生态环境保护重点实验室, 贵阳 550001)

(2: 贵州师范大学化学与材料科学学院, 贵阳 550001)

(3: 贵州省水文水资源局, 贵阳 550002)

摘要: 为探究三板溪水库后生浮游动物的群落结构及动态变化特征, 于2012年11月至2013年8月枯水期、平水期及丰水期对三板溪水库后生浮游动物进行3次调查。结果表明: 三板溪水库共检测到轮虫19种(属), 桡足类3种(属), 枝角类7种(属), 曲腿龟甲轮虫(*Keratella valga*)、螺形龟甲轮虫(*Keratella cochlearis*)、中剑水蚤(*Mesocyclops*)、无节幼体(Nauplius)和长额象鼻溞(*Bosmina longirostris*)是主要的优势种。从季节上看, 3个时期后生浮游动物物种组成相似度均在60.00%以上, 但总丰度出现丰水期(575.03 ind./L)、平水期(541.87 ind./L)、枯水期(373.28 ind./L)逐渐降低的趋势, 从空间上看, 大坝总丰度变化最显著, 为26.62~245.27 ind./L, 加池丰度变化范围为159.80~224.10 ind./L, 南加丰度变化范围为122.56~169.96 ind./L。总体来说, 水库底层浮游动物的丰度相对于表层较低。除枯水期大坝在水深40 m处丰度最高(平均丰度为3.54 ind./L)以及加池在30 m处丰度最高(平均丰度为32.70 ind./L)外, 每个采样点的最高丰度出现在0.5~20 m水层, 平均丰度在19.03~45.31 ind./L之间。利用Shannon-Wiener指数和丰富度指数评价水质状况得到三板溪水库3个采样点在枯水期和丰水期为 β -中污型, 平水期除大坝为 β -中污型外, 南加和加池为轻度污染。

关键词: 后生浮游动物; 群落结构; 动态变化; 三板溪水库

Dynamic changes of metazooplankton community structure in Sanbanxi Reservoir, Guizhou Province

LI Yue¹, LI Qiu-hua^{1**}, CHEN Wensheng¹, WANG Anping¹, SUN Rongguo², ZHANG Lei¹, GAO Yongchun³ & LUO Lan³

(1: Key Laboratory for Information System of Mountainous Area and Protection of Ecological Environment of Guizhou Province, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, P.R.China)

(2: School of Chemistry and Materials Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, P.R.China)

(3: Hydrology and Water Resources Bureau of Guizhou Province, Guiyang 550002, P.R.China)

Abstract: Sanbanxi Reservoir is a representatively deep plateau reservoir located in Guizhou Province. To investigate metazooplankton's community structure and their dynamic changes, the metazooplankton communities were investigated for the period from November 2012 to August 2013. In total, 19 rotifer species, 3 copepoda species and 7 cladocera species were recorded. *Keratella valga*, *Keratella cochlearis*, *Mesocyclops*, Nauplius and *Bosmina longirostris* were the common dominant species. The similarities of metazooplankton species composition between the three seasons were above 60%. The total abundance of metazooplankton appeared highest in wet season (575.03 ind./L), followed by the normal season (541.85 ind./L), and lowest in dry season (373.28 ind./L). In term of spatial pattern, the total abundance presented the greatest variations at dam site (from 26.62 ind./L to 245.27 ind./L), then at Jiachi site (159.80 ind./L to 224.10 ind./L), and the smallest changes at Nanjia site (from 122.56 ind./L to 169.96 ind./L). In general, the abundance in the surface was higher than that in the bottom, although with the exception that the highest abundance of the dam site was in the depth of 40 m and the highest of Jiachi site was in 30 m during dry sea-

* 国家重点基础研究发展计划“973”前期项目(2012CB426506)、贵州省科技厅项目(黔科合人才团队(2013)4024)和贵州省教育厅项目(黔教合KY字[2013]113)联合资助。2014-12-04收稿;2015-08-16收修改稿。李钊(1989~),女,硕士研究生;E-mail:muzifengyue@126.com。

** 通信作者;E-mail:qiu-hua2002@126.com。

son, the highest abundance in each sampling point appeared in the layer of 0.5–20 m with average abundance ranging from 19.03 to 45.31 ind./L in three seasons. The Shannon-Wiener index and Margalef index indicated that the water quality of Sanbanxi reservoir was of moderate pollution except for light pollution at Jiachi site and Nanjia site during level period.

Keywords: Metazooplankton; community structure; dynamic changes; Sanbanxi Reservoir

浮游动物是水生生态系统的初级消费者,是水体生态系统食物链中的一个重要环节,在物质循环和能量流动等生态过程中起着至关重要的作用^[1-2],是许多经济鱼类的重要饵料,其分布和变化可以直接影响渔业资源状况^[3-4]。此外,浮游动物的群落结构与水环境的关系密切,其变化直接或间接地影响同一生态环境中其他水生生物的丰度和分布^[5],不同类群的浮游动物对水环境变化的敏感度和适应能力存在差异,水体环境的变化也会引起浮游动物的群落结构发生一系列变化,因此利用浮游动物群落结构变化和生物多样性来初步评价水体生态环境质量是一种重要手段,目前国内外已有很多相关研究^[5-8]。

贵州省作为喀斯特地貌发育区之一,其大多高原深水水库接纳来自喀斯特河流带来的大量溶解无机碳和营养盐,具有独特的温度、光照等水文特征,近年来关于贵州省高原深水水库浮游动物的研究报道越来越多^[9-11]。三板溪水库位于贵州省黔东南州锦屏县境内,沅江上游清水江干流,该水库是由国家“西电东送”项目三板溪电站于2003年截流而成,属于多年调节型水库,淹没范围涉及贵州省台江、剑河、锦屏、黎平4个县的部分乡镇,其水质变化直接影响着周边居民的饮水安全和旅游经济的发展。目前已有三板溪水库浮游植物和鱼类资源等水生生物的调查^[12-14],而关于该水库浮游动物的详细研究未见报道。因此,本文对三板溪水库后生浮游动物群落结构季节变化和空间分布进行初步调查分析,并利用后生浮游动物的多样性指数对三板溪水库水体进行生物评价,为三板溪水库水质评价及后期浮游动物群落结构的研究提供一定的理论基础,为三板溪水库生态系统的保护和环境污染的治理提供科学数据支撑。

1 材料与方法

1.1 采样地点和时间

三板溪水库是一座深水型水库,坝址以上流域面积为 $1.10 \times 10^4 \text{ km}^2$,正常蓄水位为475 m,库容 $2.93 \times 10^9 \text{ m}^3$,多年平均流量为 $239 \text{ m}^3/\text{s}$,年径流量约为 $7.54 \times 10^9 \text{ m}^3$,处于中亚热带湿润季风气候区,降雨丰富,多年平均降水量为1226.4 mm,降雨主要集中在4—8月,各水期水位变化明显^[15-16]。根据贵州省的气候、水库水文动态变化特征,分别于2012年12月(枯水期)、2013年4月(平水期)和2013年8月(丰水期)对三板溪水库的南加($26^\circ 33' 20'' \text{N}$, $108^\circ 52' 44'' \text{E}$)、加池($26^\circ 34' 34'' \text{N}$, $108^\circ 57' 36'' \text{E}$)、大坝($26^\circ 36' 57'' \text{N}$, $109^\circ 2' 59'' \text{E}$)分层采样(图1)。

1.2 样品采集和分析方法

定性样品用25 μ 浮游生物网于水平及垂直方向0.5 m拖取,轮虫的种类鉴定参照《中国淡水轮虫志》^[17],枝角类和桡足类参照文献^[18-19]进行鉴定。定量样品用5 L采水器采集0.5、5、10、20、30、40、50 m处水样,每层采20 L水样用25 μ 浮游动物生物网现场过滤装入塑料瓶中,加入5%福尔马林溶液(甲醛)固定。充分摇匀浓缩水样后取1 ml至浮游生物计数框内镜检计数,每个样品重复2次以上,取平均值以推算原始丰度。用DZB-718型便携式水质多参数测定仪原位现场测定每层水样的水温(T)、pH值、电导率、溶解氧;用塞氏盘现场测定透明度(SD);每层水样的总氮(TN)浓度采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定;总磷(TP)浓度采用钼酸铵分光光度法测定;高锰酸盐指数(COD_{Mn})采用高锰酸钾酸式滴定法测定;叶绿素a(Chl. a)浓度采用改良的反复冻融、丙酮浸提测定^[20],浮游植物数据来自文献^[16]。

1.3 数据分析

1.3.1 优势种 浮游动物优势种根据每个种的优势度值(Y)来确定^[21]:

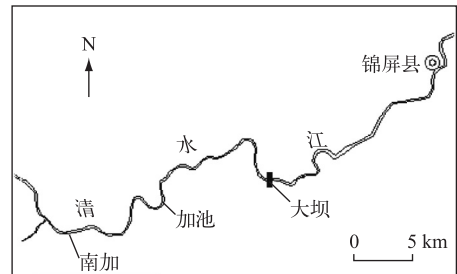


图1 三板溪水库采样点位置

Fig.1 Distribution of sampling sites in Sanbanxi Reservoir

$$Y = (n_i/N)f_i \quad (1)$$

式中, n_i 为第 i 种的个体数, N 为所有种类总个体数, f_i 为出现频率, Y 值 > 0.02 的种类视为优势种.

1.3.2 Czekanowski 相似系数 (Sc)^[22] Sc 计算公式为:

$$Sc = 2C/(A+B) \times 100\% \quad (2)$$

式中, A 、 B 分别为水体 A 和 B 的种类数, C 为 2 种水体共有的种类数.

1.3.3 生物多样性分析 运用 Shannon-Wiener 指数 (H') 和 Margalef 指数 (d) 来计数浮游动物群落的多样性, 公式分别为:

$$H' = - \sum \left(\frac{n_i}{N} \right) \left(\log_2 \frac{n_i}{N} \right) \quad (3)$$

$$d = (S-1)/\ln N \quad (4)$$

式中, N 为某样点浮游动物总个体数, n_i 为第 i 种的个体数, S 为物种总数. H' 值处于 $0 \sim 1$ 之间表示水质严重污染, $1 \sim 2$ 之间表示水质为 α -中污型, $2 \sim 3$ 表示水质为 β -中污型, > 3 表示水体清洁^[23]. d 值越高, 表示污染越轻; d 值越低, 表示污染越严重. d 值处于 $0 \sim 1$ 之间表示水质状况为多污型, $1 \sim 2$ 之间表示水质为 α -中污型, $2 \sim 3$ 表示水质为 β -中污型, $3 \sim 4$ 为寡污型, > 4 表示水质清洁^[24].

1.3.4 数据处理方法 采用 SPSS 统计软件分析浮游动物丰度与理化因子的 Pearson 相关性. 利用 Surfer 软件 (Golden software surfer 8.0) 绘制浮游动物丰度的深度分布等值图, 其他数据作图采用 Microsoft Excel 和 Origin 8.0 软件.

2 结果与分析

2.1 后生浮游动物的种类组成

本次调查共鉴定后生浮游动物 29 种 (属), 其中轮虫 19 种 (属), 占后生浮游动物总物种数的 66.70%; 桡足类 3 种 (属), 占 10.00%; 枝角类 7 种 (属), 占 23.30% (表 1). 总体来说, 轮虫是三板溪水库后生浮游动物的主要组成部分, 枝角类和桡足类的种类较少. 从季节上看, 8 月份 (丰水期) 出现的后生浮游动物物种数最多, 为 24 种 (属), 4 月份 (平水期) 和 11 月份 (枯水期) 后生浮游动物物种数分别为 17 种 (属) 和 19 种 (属), 但 3 个时期出现的物种差异不大, 平水期和枯水期的种类相似度为 68.60%, 而平水期和丰水期的种类相似度为 65.00%, 丰水期与枯水期的种类相似度达到 69.77%.

2.2 后生浮游动物优势种

曲腿龟甲轮虫、螺形龟甲轮虫、中剑水蚤、无节幼体和长额象鼻溇在 3 个季节均是优势种, 但在不同的采样点优势种丰度存在差异, 大坝曲腿龟甲轮虫、螺形龟甲轮虫和无节幼体丰度在平水期较高, 在枯水期和丰水期较低, 而中剑水蚤和长额象鼻溇丰度在丰水期时达到最高, 枯水期最低. 加池和南加出现相似趋势, 曲腿龟甲轮虫、螺形龟甲轮虫的丰度在 3 个时期都低, 无节幼体、中剑水蚤和长额象鼻溇的丰度在枯水期均最多 (图 2). 此外, 水库枯水期时出现荡镖水蚤和网纹溇 2 种优势种; 平水期时, 增加裂足臂尾轮虫、罗氏同尾轮虫、对棘同尾轮虫、多肢轮虫、聚花轮虫和溇属. 剪形臂尾轮虫在丰水期丰度贡献最大, 平均丰度达到 52.23 ind./L, 成为显著优势种, 导致丰水期总丰度大增.

2.3 后生浮游动物群落结构变化

后生浮游动物总丰度在丰水期最高 (575.03 ind./L)、平水期次之 (541.86 ind./L)、枯水期最低 (373.28 ind./L). 3 个主要类群 (轮虫类、枝角类和桡足类) 也发生明显的季节变化, 轮虫类在平水期和丰水期为主要组成部分, 分别占 67.06% 和 57.01%, 枯水期只检测到 9 种, 丰度较低, 仅占 7.08%; 相反桡足类在枯水期大量出现, 丰度比例达到 65.53%, 其次是丰水期 34.13%; 枝角类在平水期和枯水期的丰度差异不大, 分别占总丰度的 20.20% 和 27.39%, 而在丰水期只占 8.86% (图 3).

从三板溪水库的上游到下游, 南加、加池、大坝后生浮游动物群落结构存在一定差异. 丰水期大坝总丰度大于加池和南加, 为 245.27 ind./L, 加池和南加分别为 159.80、169.96 ind./L; 3 个采样点平水期的丰度相对于丰水期变化不大, 大坝、加池和南加丰度分别为 243.17、163.12 和 135.59 ind./L; 与前 2 个季节相比, 枯水期大坝后生浮游动物的总丰度最低, 仅为 26.62 ind./L, 加池最高为 224.10 ind./L (桡足类达到 157.02

表1 三板溪水库不同季节后生浮游动物种类组成及其优势值

Tab.1 Composition of metazooplankton and dominance index in different seasons in Sanbanxi Reservoir

类群	种类	优势值			
		枯水期	平水期	丰水期	
轮虫类	曲腿龟甲轮虫(<i>Keratella valga</i>)	0.0457	0.0361	0.0249	
	螺形龟甲轮虫(<i>Keratella cochlearis</i>)	0.0010	0.1117	0.0177	
	裂痕龟纹轮虫(<i>Anuraeopsis fissa</i>)	0.0003	—	0.0081	
	萼花臂尾轮虫(<i>Brachionus calyciflorus</i>)	—	—	0.0317	
	裂足臂尾轮虫(<i>Brachionus diversicornis</i>)	0.0056	0.0561	0.0995	
	尾突臂尾轮虫(<i>Brachionus caudatus</i>)	—	—	0.0025	
	矩形臂尾轮虫(<i>Brachionus leydigi</i>)	—	—	0.0005	
	剪形臂尾轮虫(<i>Brachionus forficula</i>)	0.0008	—	0.2725	
	对棘同尾轮虫(<i>Diurella stylata</i>)	0.0010	0.1333	0.0525	
	罗氏同尾轮虫(<i>Diurella rousseleti</i>)	—	0.0571	0.0018	
	刺盖异尾轮虫(<i>Trichocerca capucina</i>)	—	0.0054	0.0240	
	前节晶囊轮虫(<i>Asplanchna priodonta</i>)	—	0.0108	0.0055	
	月形腔轮虫(<i>Lecane luna</i>)	0.0070	—	—	
	多肢轮虫(<i>Polyarthra</i> sp.)	0.0002	0.1150	0.0006	
	长三肢轮虫(<i>Filinia longiseta</i>)	—	—	0.0002	
	沟痕泡轮虫(<i>Pompholyx sulcata</i>)	0.0002	—	0.0002	
	疣毛轮虫(<i>Synchaeta</i> sp.)	—	—	0.0100	
	聚花轮虫(<i>Conochilus</i> sp.)	—	0.1058	—	
	枝角类	长额象鼻溞(<i>Bosmina longirostris</i>)	0.2418	0.1009	0.0726
		网纹溞(<i>Ceriodaphnia</i> sp.)	0.0115	0.0003	—
尖额溞(<i>Alona</i> sp.)		0.0041	—	—	
溞属(<i>Daphnia</i> sp.)		0.0004	0.0695	—	
小栉溞(<i>Daphnia cristata</i>)		0.0016	0.0039	—	
秀体溞(<i>Diaphanosoma</i> sp.)		0.0024	—	0.0107	
裸腹溞(<i>Moina</i> sp.)		0.0005	—	—	
桡足类		中剑水蚤(<i>Mesocyclops</i>)	0.3108	0.0565	0.1643
镖水蚤(<i>Diaptomidae</i>)	0.2002	0.0091	0.0007		
无节幼体(<i>Nauplius</i>)	0.1443	0.0618	0.1750		

“—”表示不存在。

ind./L),南加为 122.56 ind./L.可见大坝的季节变化较为明显,丰度从最高的 245.27 ind./L 骤降到 26.62 ind./L(图 4),南加和加池的季节变化不显著。

从垂直分布上看,南加、加池和大坝在 3 个水情期,后生浮游动物丰度都呈无规则变化,但总体来说,水库底层浮游动物的丰度相对于表层较低(图 4)。除枯水期大坝在水深 40 m 处丰度最高(平均丰度为 3.54 ind./L)及加池在 30 m 处丰度最高(平均丰度为 32.7 ind./L,桡足类在水深处大量出现)外,每个采样点的最高丰度出现在 0.5~20 m 水层,平均丰度为 19.03~45.31 ind./L,这可能与不同类群喜欢生活在不同的水层和不同点的水质有关。

2.4 后生浮游动物丰度与环境因子的相关分析

2.4.1 环境因子 三板溪水库枯水期水温变化为 19.80~20.60℃,3 个采样点平均值均在 20.00℃左右;平水期为 12.80~19.20℃,大坝最低(15.16℃),加池最高(16.32℃);丰水期 22.90~30.10℃,采样点平均值均在 26.50℃左右。pH 值变化范围枯水期为 7.68~7.85,呈中性状态,平水期为 7.62~9.60,丰水期为 7.28~9.40,平水期和丰水期呈中性偏弱碱性状态,反映出三板溪水库高 pH 值的特征。水库透明度和叶绿素 a 浓度的季节变化最明显,3 个采样点的透明度枯水期最高,南加为 6.30 m,加池和大坝均为 8.5 m,平水

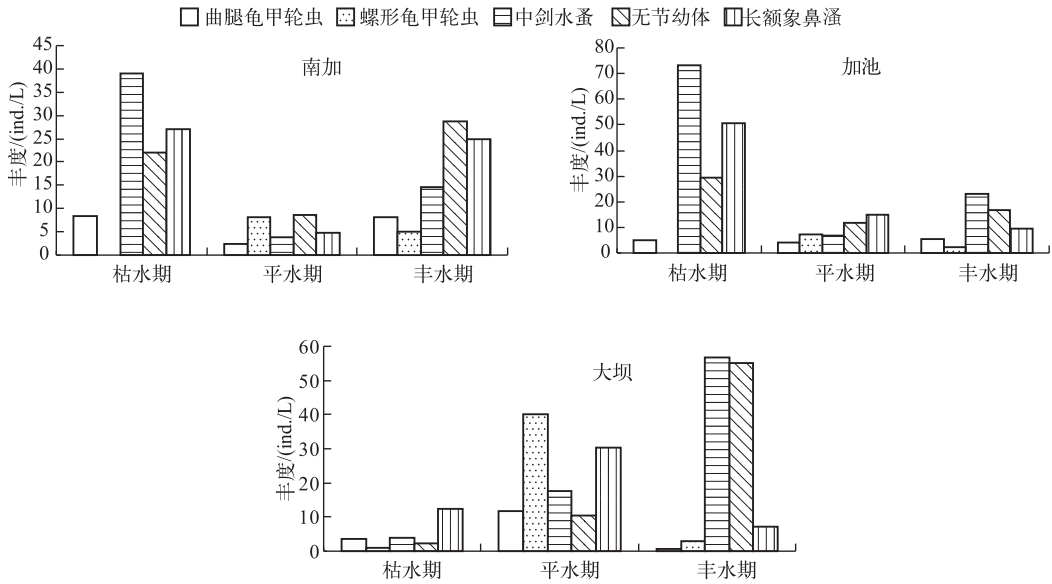


图 2 三板溪水库常见后生浮游动物优势种丰度动态变化

Fig.2 Dynamic changes of several common main dominant metazooplankton in Sanbanxi Reservoir

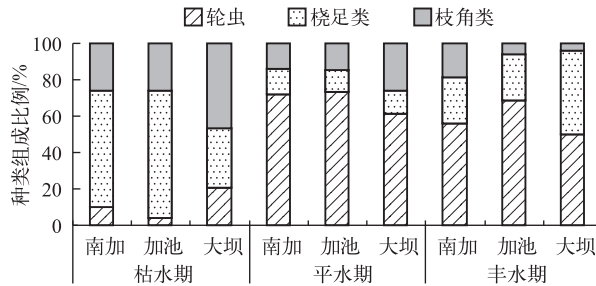


图 3 三板溪水库后生浮游动物种类组成

Fig.3 Species composition of metazooplankton in Sanbanxi Reservoir

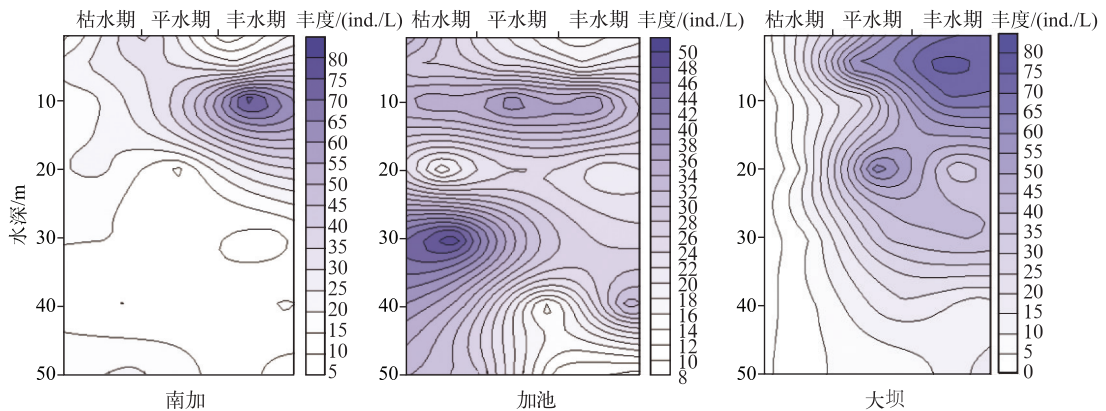


图 4 三板溪水库加池、南加和大坝采样点各季节后生浮游动物丰度垂向分布变化

Fig.4 Profile variation of total metazooplankton abundance in three seasons at different sites of Sanbanxi Reservoir

期均在 1.50 m 上下浮动,丰水期最低,南加、加池和大坝分别为 1.00、0.70 和 1.20 m。叶绿素 a 浓度枯水期采样点平均值为 1.46 $\mu\text{g/L}$,平水期平均值为 19.70 $\mu\text{g/L}$,丰水期平均值为 21.45 $\mu\text{g/L}$ 。TN 和 TP 浓度的季节变化不明显,TN 浓度枯水期变化范围为 1.22~1.58 mg/L,平水期为 0.98~1.76 mg/L,丰水期为 0.71~2.08 mg/L。而 TP 浓度较低,枯水期变化范围为 0.28~0.35 mg/L,平水期为 0.39~0.58 mg/L,丰水期为 0.10~0.39 mg/L。COD_{Mn}从丰水期到枯水期出现逐渐降低的趋势,每个时期采样点相差不明显,丰水期平均值为 2.10 mg/L,平水期为 1.72 mg/L,枯水期为 1.15 mg/L。三板溪水库各采样点水体理化指标平均值见表 2。

表 2 三板溪水库水体理化指标季节变化

Tab.2 Seasonal variations of water physico-chemical parameters in Sanbanxi Reservoir

水情期	温度/ ℃	pH 值	透明度/ m	TN/ (mg/L)	TP/ (mg/L)	COD _{Mn} / (mg/L)	叶绿素 a/ ($\mu\text{g/L}$)	浮游植物丰度/ (cells/L)
枯水期	20.43	7.74	7.77	1.37	0.32	1.15	1.46	0.36 $\times 10^4$
平水期	15.92	8.41	1.46	1.42	0.49	1.72	19.70	90.51 $\times 10^4$
丰水期	26.58	8.25	0.97	1.46	0.20	2.10	21.45	558.82 $\times 10^4$

2.4.2 后生浮游动物丰度与环境因子之间的相关性 后生浮游动物丰度与环境因子的相关分析(表 3)表明,后生浮游动物总丰度除了与 TP 浓度和透明度呈负相关外,与其他指标呈正相关,特别与 COD_{Mn}呈显著相关,这说明浮游动物的丰度变化与生活环境中有机物质的含量存在明显相关性,小型浮游动物轮虫类与透明度呈负相关,与其他指标呈正相关,相反大型浮游动物枝角类和桡足类与透明度和温度均呈正相关,与其他各个指标均呈负相关。

表 3 后生浮游动物丰度与水质因子相关分析

Tab.3 The correlative analysis of chemical and physical parameters and abundance of metazooplankton

后生浮游动物丰度	TN	TP	COD _{Mn}	叶绿素 a	温度	pH 值	透明度	浮游植物丰度
轮虫类	0.881	0.114	0.890	0.995	0.072	0.975	-0.997	0.611
枝角类和桡足类	-0.584	-0.593	-0.599	-0.852	0.374	-0.973	0.859	-0.201
总丰度	0.996	-0.289	0.998*	0.952	0.461	0.808	-0.948	0.875

* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

2.5 后生浮游动物多样性分析及季节变化

平水期后生浮游动物的 H' 值最大,每个采样点在 3~4 之间,大坝和加池最高,均为 3.04。丰水期和枯水期的 H' 均在 2~3 之间,其中枯水期大坝 H' 最低,为 1.88;丰水期上层的 H' 大于底层,从上层到下层呈下降的趋势(图 5)。

平水期 3 个采样点的 H' 相近,南加为 3.01,加池为 3.04,大坝为 3.04,明显大于枯水期和丰水期;南加和大坝枯水期的丰富度指数大于其他 2 个时期,分别为 3.33、2.44,而加池平水期的丰富度指数最高,达到 3.14(图 6)。从 2 个多样性指数的水质生物学评价来看,水库不同水情期不同采样点的评价结果完全不一样, H' 评价枯水期大坝点为 α -中污型,加池和南加为 β -中污型,平水期各个采样点水体清洁,丰水期 3 个采样点均为 β -中污型;Margalef 多样性指数评价枯水期大坝为 β -中污型,加池为 α -中污,南加为寡污染,平水期大坝为 β -中污型,其他 2 个点为寡污型,丰水期大坝为 α -中污型,加池和南加均为 β -中污型。综合 2 种多样性评价指标可以大致得到三板溪水库 3 个采样点在枯水期和丰水期均为 β -中污型,平水期除大坝水质为 β -中污型外,另外 2 个采样点为轻度污染。

3 讨论

3.1 后生浮游动物群落结构分析

三板溪水库检测到的后生浮游动物绝大多数为广温种类,如异尾轮虫、臂尾轮虫、多肢轮虫、剑水蚤等,

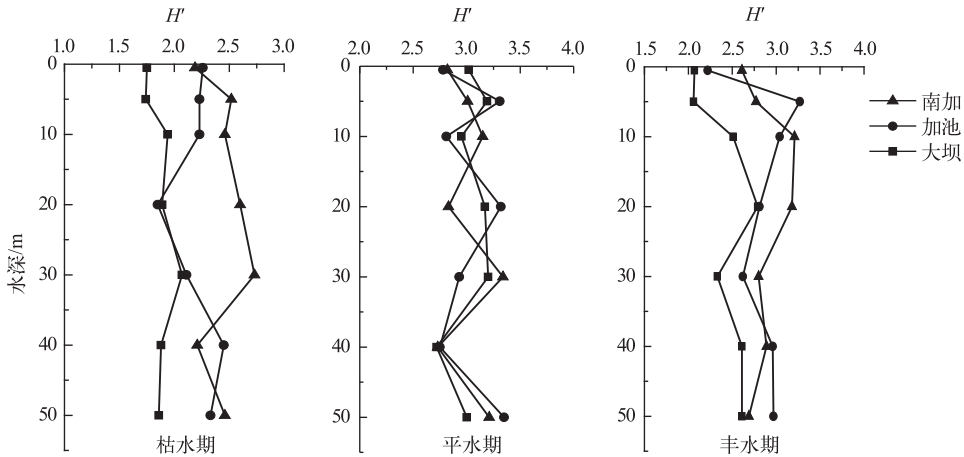


图5 三板溪水库不同时期后生浮游动物 Shannon-Wiener 多样性指数垂直分布
 Fig.5 Profile variations of metazooplankton Shannon-Wiener diversity index in different seasons in Sanbanxi Reservoir

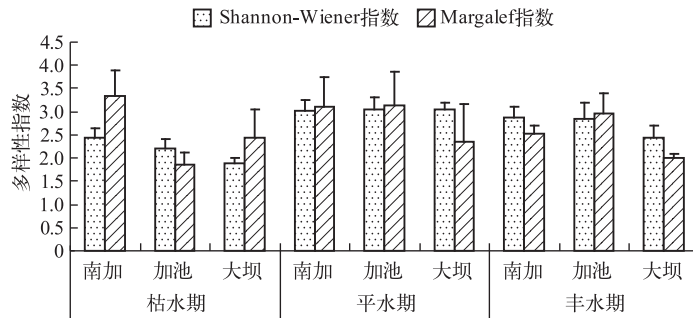


图6 三板溪水库后生浮游动物两种多样性指数季节变化
 Fig.6 Seasonal variations of two diversity indexes of metazooplankton in Sanbanxi Reservoir

其中桡足类种类极少,与贵州省百花湖水库麦西河口后生浮游动物的调查结果一致^[25],究其原因,与后生浮游动物的生活习性和水库营养盐及水温、酸碱度等物理化学条件有关。后生浮游动物的总丰度发生明显的季节变化,呈现丰水期>平水期>枯水期的现象,而且各个时期的后生浮游动物种类组成存在着一定的差异,这些差异可能与当地温度及水库的环境状况有关:其一,水温是影响浮游动物生长、发育、群落组成和丰度变化等重要的环境因子^[26-29],黄加祺等也指出浮游动物的丰度与温度有一定的相关性,在温度较高时,总个体数达到高峰^[30],三板溪水库丰水期正处夏季,温度较高,后生浮游动物丰度最高,而枯水期(冬季)采样前经历过一段低温时期,后生浮游动物的丰度随之降低。此外,有研究表明,轮虫的密度与水温呈现出显著正相关,北京官厅水库轮虫密度夏、秋季最高,冬季最低^[22],同样在位于珠海市的亚热带水库大镜山水库中轮虫丰度在春、夏季较高,秋、冬季节较低^[31],三板溪水库轮虫在平水期和丰水期的丰度相当,远大于枯水期,且在丰水期大量出现剪形臂尾轮虫,这是由于臂尾轮属的种类集中分布于热带和亚热带地区^[26]。大型浮游动物桡足类和枝角类的生命周期相对于轮虫较长,且检测到的轮虫类以广温性种类为主,对温度的变化极为敏感。Gillooly 等对温带和热带水体比较分析得到,当水温超过 20℃ 时,溞属的数量通常很低^[32],故该水库桡足类在枯水期占后生浮游动物总丰度的比例很大,枝角类主要以长额象鼻溞为优势种,其总丰度在枯水期和平水期相近,丰水期相对较低;其二,三板溪水库库区共分布 82 种(亚种)鱼类,其中重要经济鱼类达到 23 种^[12],春季正是鱼类大量繁殖的季节,到枯水期时,水温下降和鱼类的捕获会导致鱼类捕食压力减弱,鱼

类对浮游动物的下行效应减弱有利于较大个体的桡足类和枝角类增加;其三,食物也是影响浮游动物群落结构的重要因子之一^[33],从春季步入夏季水体营养物质会随着温度的升高而增加,以真核藻类、细菌等作为主要食物的轮虫^[34-35]因食物的充沛而增加.水库丰水期浮游植物多以蓝绿藻为优势种,不利于枝角类等大型浮游动物的摄食,进而使小型轮虫成为水体的优势类型,枯水期浮游植物优势种为绿藻和硅藻,后生浮游动物结构组成出现相反的现象.

三板溪水库于2003年截流而成,属于河道型水库,由于大坝的阻隔使水体深度相应增加,水流速度变缓,使原有流动水体变为半静止或静止水体,这必将对水库后生浮游动物的群落结构产生一定的影响^[12,15].一般情况而言,水库滞留时间丰水期比枯水期短.研究发现,当丰水期水力滞留时间不足10d时,Solomon水库包括轮虫在内的各类型浮游动物均处于年最低丰度^[36].枯水期,飞来峡水库滞留时间比其它时期长,处于营养上升期,轮虫密度比任何时候都高^[37],三板溪水库则刚好相反,从上游到下游南加、加池、大坝,大坝后生浮游动物丰度的季节变化和种类组成变化最显著,这可能从南加到三板溪河段内由于水流量较大,流速较缓,河面较宽^[12],大坝相对于上、中游水体流动性大,且大坝的建立使水库坝区河水无论是物理因子还是化学因子都发生改变,再加上出水口的存在,即使枯水期蓄水,大坝水体的流动明显,使滞留时间变化强烈,所以大坝后生浮游动物的变化较大,但是水体滞留时间对该水库后生浮游动物群落结构的影响程度,及其之间的相关性需要进一步的调查分析.从垂直分布上看,三板溪水质属于深水水库,水体出现分层现象,水库后生浮游动物物种数未出现明显的分层现象,丰度出现分层现象,每个采样点在垂直方向上分布无规律可言,但总体来说,中、上层的丰度相对于底层较高,这与浮游动物的食物分布有关,林雅蓉认为互相依存的食物关系是影响垂直分布的重要因素之一^[38].三板溪水库建成蓄水后,大量肥沃的土地和茂密的植物被水淹没,浸泡在水中而被分解的有机物进入水体,同时被淹的土壤中所浸出的营养物质也进入水体,一些外源性营养物质也被截流于库内,使水体中的营养物质比建库前高,建坝后河水流速变缓,透明度加大,对浮游植物的生长繁殖更有利,三板溪库区中、上层夏季浮游植物密度高,为浮游动物提供充足的食物,后生浮游动物在中、上层的丰度随之增高.光照和水温也是影响浮游动物垂直分布的重要因子,不同的种类对光强的敏感刺激不同,会发生昼夜垂直分布,形成不同的水层^[39].王先云等研究表明,水温会影响千岛湖浮游动物的垂直分布^[40],三板溪水库枯水期为单温跃层结构,表层至50m水层为混合层,50~70m为温跃层,底层70~90m为深水层,曲腿龟甲轮虫在50m内各层均出现,其他种类的轮虫无规则地分布在少数层内,枝角类中只有长额象鼻溞出现在各层,桡足类则在50m内各层大量出现,浮游动物最高丰度在30m以内的水层.平水期和丰水期垂直断面内温度随水深的增加而降低,整体热分层不明显,其中丰水期温度梯度是 $0.10^{\circ}\text{C}/\text{m}$,大于平水期的 $0.07^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ^[16],在这2个水情期中轮虫类和枝角类无规则分布在各层,且最高丰度在0~10m水层,中剑水蚤和无节幼体分布各层,而镖水蚤在平水期少量的分布在10m水层以内,在丰水期只出现在大坝30~40m水层.

3.2 后生浮游动物多样性特征分析

本次共检测到后生浮游动物29种(属),3个时期的种类相似系数均在60%以上,说明该水库的物种种类季节变化不显著,但是冬季(枯水期)种类较少,春季(平水期)、夏季(丰水期)种类多,这不仅与不同物种的生活习性有关,还与该水库的地理环境、气候等有关,刘镇盛等^[41]指出夏季水温高,暖水型种类明显增多,冬季随着水温的下降,浮游动物的生长和代谢速率减缓,导致浮游动物的种类显著减少.在调查中,枝角类和桡足类种类较少,丰度季节变化明显.而轮虫种类较多,以螺形龟甲轮虫、曲腿龟甲轮虫、裂足臂尾轮虫、剪形臂尾轮虫、多肢轮虫常见,这些种类对水体富营养化程度有一定的指示作用.从理论上来说,当水生生态系统群落受到环境胁迫时,种类数和个体数都会减少,导致多样性指数降低^[6],浮游动物群落结构的变动反映出水体环境质量的优劣^[27].从垂直方向看各个时期各个点的Shannon-Wiener多样性指数在每一层出现无规律的变化,这与后生浮游动物的垂直分布有关;在季节变动上,Shannon-Wiener多样性指数在春季较高,冬季较低,Margalef多样性指数也是春季相对于其他2个季节较高(图6),而北京官厅水库2个指数则是夏、秋季节较高,春、冬季较低^[22],说明不同的水库,后生浮游动物的种类组成及分布不同,导致指数的变化趋势也不同.利用生物多样性指数综合评价大坝、加池、南加在枯水期和丰水期水质均为 β -中污型,在平水期大坝仍为 β -中污型,南加和加池水质却好转,属于轻度污染,这可能是从枯水期到丰水期过渡阶段,水库

开始放水,水体发生短时间的变化,所以平水期水质好转.总体来说,三板溪水库受到一定的污染,这可能是由于上游城镇生活和工业污水的排放,使得三板溪水库大部分库区 TP 浓度普遍超高,对三板溪水库进行综合治理非常必要.

4 参考文献

- [1] 吴 利,冯伟松,陈晓娟等.新疆伊犁地区夏季浮游动物群落结构特征.应用生态学报,2008,19(1):163-172.
- [2] 刘 超,禹 娜,陈立侨等.上海市西南城郊河道春季的浮游生物组成及水质评价.复旦学报:自然科学版,2007,46(6):6-42.
- [3] 陆建建.河口生态学.北京:海洋出版社,2003:63-69.
- [4] 纪焕红,叶属峰.长江口浮游动物生态分布特征及其与环境的关系.海洋科学,2006,30(6):23-30.
- [5] 陈 亮,刘 一等.分水江水库浮游动物群落结构的初步研究及水质评价.华东师范大学学报,2010,11(6):72-81.
- [6] 马徐发,熊邦喜,王卫民等.道观河水库浮游动物的群落结构与物种多样性.华中农业大学学报,2005,24(1):63-67.
- [7] 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):169-175. DOI 10.18307/2003.0211.
- [8] Froneman PW. Zooplankton community structure and biomass in a southern African temporarily open/closed estuary. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2004, 50: 125-132.
- [9] 夏品华,马健荣,李存雄等.红枫湖水库冬春季浮游生物与环境因子的典范对应分析.环境科学研究,2011,24(4):378-386.
- [10] 姚俊杰,褚素兰,沈昆根等.贵阳市花溪河大型浮游动物的初步研究.水生态杂志,2009,2(4):29-34.
- [11] 朱俊华,姚俊杰,谢巧雄等.龙滩水库浮游动物生物量的垂直分布和季节性变化.贵州农业科学,2104,42(1):163-166.
- [12] 辜永河,黎道洪,王承录.清水江三板溪电站水库库区河段内鱼类资源现状及影响分析.贵州师范大学学报:自然科学版,1998,16(1):5-12.
- [13] 王承录,辜永河,黎道洪.清水江三板溪水库浮游植物现状及影响评价.贵州师范大学学报:自然科学版,1997,15(1):39-45.
- [14] 龙胜兴,陈 椽,俞振兴等.贵州黔东南州三板溪水库春季拟多甲藻水华特征.中国环境监测,2012,28(6):27-31.
- [15] 邹习俊,代应贵,韩 雪.三板溪水库夏季水质监测及渔业评价.内陆水产,2008,9:29-31.
- [16] 欧 腾,李秋华,王安平等.贵州高原三板溪水库浮游植物群落动态与环境因子的关系.生态学杂志,2014,33(12):3432-3439.
- [17] 王家楫.中国淡水轮虫志.北京:科学出版社,1961.
- [18] 蒋燮治,堵南山.中国动物志·淡水枝角类.北京:科学出版社,1979.
- [19] 中国科学院动物研究所甲壳动物研究组.中国动物志·淡水桡足类.北京:科学出版社,1979.
- [20] 林少君,贺立静,黄沛生等.浮游植物中叶绿素 a 提取方法的比较和改进.生态科学,2005,24(1):9-11.
- [21] 孙儒泳.动物生态学原理,第2版.北京:北京师范大学出版社,1992:356-357.
- [22] 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. DOI 10.18307/2010.0216.
- [23] Shannon CE, Weaver W. The mathematical theory of communication. Urbana: University of Illinois Press, 1949: 213-216.
- [24] Margalef DR. Inperspectives marine biology (A Buzzati-Traversoed). California: University California Press, 1958: 323-347.
- [25] 李秋华,温远志,杨卫诚等.贵州百花湖麦西河河口后生浮游动物群落结构及与环境因子的关系.湖泊科学,2013,25(4):531-538. DOI 10.18307/2013.0410.
- [26] 陈光荣,钟 萍,张修峰等.惠州西湖浮游动物及其水质的关系.湖泊科学,2008,20(3):351-356. DOI 10.18307/2008.0314.

- [27] 吴 利, 冯伟松, 张堂林等. 春、秋季武湖浮游动物群落特征及其与环境因子的关系. *水生态学杂志*, 2011, **32**(2): 31-36.
- [28] Sommer U. *Plankton Ecology, succession in plankton communities*. Berlin: Springer-Verlag, 1989: 253-296.
- [29] Dussart BH, Fernando CH, Matsumura-Tundisi T *et al.* A review of systematics, distribution and ecology of tropical freshwater zooplankton. *Hydrobiologia*, 1984, **113**: 77-91.
- [30] 黄加祺, 洪幼环, 朱长寿等. 福建南日岛海域浮游动物的分布. *东海海洋*, 1997, **4**: 47-53.
- [31] 王晓辉, 望 天, 林秋奇等. 南亚热带富营养化抽水型水库轮虫的组成与动态. *湖泊科学*, 2009, **21**(1): 101-109. DOI 10.18307/2009.0113.
- [32] Gillooly JF, Dodson SL. Latitudinal patterns in the size distribution and seasonal dynamics of new world, communities. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1976, **7**: 177-208.
- [33] Hessen DO, Faafeng BA, Smith VH *et al.* Extrinsic and intrinsic controls of zooplankton diversity in lakes. *Ecology*, 2006, **87**: 433-443.
- [34] Flores-Burgos J, Sarma SSS, Nandini S. Effect of single species or mixed algal (*Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus acutus*) diets on the life table demography of *Brachionus calyciflorus* and *Brachionus patulus* (Rotifera: Brachionidae). *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*, 2005, **33**(6): 614-621.
- [35] Kim HW, Hwang SJ, Joo GJ. Zooplankton grazing on bacteria and phytoplankton in a regulated larger river(Nakdong River, Korea). *Journal of Plankton Research*, 2000, **22**(8): 1559-1577.
- [36] Hawkins PR. The zooplankton of a small tropical reservoir (Solomon Dam, North Queensland). *Hydrobiologia*, 1988, **157**: 105-118.
- [37] 林秋奇, 赵帅营, 韩博平. 新建水库轮虫和甲壳类浮游动物动态特征. *生态学杂志*, 2006, **25**(3): 270-276.
- [38] 林雅蓉. 东海毛颚动物夏季垂直分布. *生态学报*, 1985, **5**(2): 175-186.
- [39] 吕志均, 戴 曦, 孙 颖等. 紫霞湖浮游动物昼夜垂直迁移及其影响因子分析. *水生态学杂志*, 2011, **32**(3): 43-47.
- [40] 王先云, 王丽卿, 盖建军. 千岛湖浮游甲壳动物垂直分布与昼夜垂直移动. *动物学杂志*, 2010, **45**(5): 95-104.
- [41] 刘镇盛, 王春生, 张志南等. 乐清湾浮游动物的季节变动及摄食率. *生态学报*, 2005, **25**(8): 1853-1862.