2015-06-25 DOI: 10.3724/SP.J.1145.2015.01015 http://www.cibj.com/
应用与环境生物学报 *Chin J Appl Environ Biol* 2015, **21** (3): 499-504

珠海市调水水库水力滞留时间对轮虫群落结构的影响*

乔 磊 林秋奇** 韩博平
暨南大学水生生物研究所 广州 510632

摘 要 水力滞留时间是反映水体水动力过程的重要参数, 能直接或间接影响水体生物群落结构与动态. 以珠海市6座调水水库为研究对象, 于2013年1月和11月进行浮游动物样品采集, 同时测定水体的理化因子, 分析水力滞留时间对轮虫群落结构的影响. 6座水库水力滞留时间为9-585 d, 根据其水力滞留时间的长短可将6座水库分为3类, 即直流型、中等水力滞留时间型和长水力滞留时间型. 共检出浮游轮虫34种, 其中臂尾轮科和异尾轮科占所检出种数的53%. 6座水库轮虫种类基本一致, 以热带龟甲轮虫(*Keratella tropica*)、螺形龟甲轮虫(*K. cochlearis*)和广布多肢轮虫(*Polyarthra trigla*)为优势种类. 水库之间以及同一水库两次采样期间轮虫群落结构差异较大, Bray-Curtis相异系数为0.15-0.83. 中等水力滞留时间水库两次采样期间轮虫群落的相异系数显著高于直流型水库(ANOVA, $P = 0.041$)和长水力滞留时间水库(ANOVA, $P = 0.019$), 直流型水库和长水力滞留时间水库间差异不显著(ANOVA, $P = 0.435$). 由此说明, 水力滞留时间是影响水库之间轮虫群落差异的重要因素, 而营养水平则是影响轮虫群落动态变异的重要因素. 图7 表2 参30

关键词 轮虫; 群落结构; 水力滞留时间; 水库
CLC Q178.1

The influence of water retention time on rotifer community structure of pumped-storage reservoirs in Zhuhai City*

QIAO Lei, LIN Qiuqi** & HAN Boping
Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632, China

Abstract This study aimed to investigate the influence of water retention time on the structure and dynamics of rotifer communities in six pumped-storage reservoirs in Zhuhai City, Guangdong Province. We took zooplankton samples and determined the nutrient concentration in January and November 2013 in six reservoirs. The samples were identified and counted with microscope and anatomical lens; R program was used to analyze the data. All together thirty four species of rotifer were observed, among which 53% species belonged to Brachionidae and Trichocereidae. Rotifer species are similar in all the six studied reservoirs, with *Keratella tropica, Keratella cochlearis,* and *Polyarthra trigla* as the dominant species. However, there were great differences in rotifer community structure between reservoirs and two sampling periods in each reservoir, with Bray-Curtis dissimilarity ranging from 0.15 to 0.83. The dissimilarity of rotifer community in the reservoir with an intermediate retention time was significantly higher than through flowing reservoir (ANOVA, $P = 0.041$), and long retention time reservoir (ANOVA, $P = 0.019$), but there was no significant difference between the through flowing reservoir and long retention reservoir (ANOVA, $P = 0.435$). The results indicated that the water retention time is the main variable explaining the difference of rotifer community structure, and the nutrient level is the main factor influencing the temporal variation of rotifer communities.

Keywords rotifer; community structure; water retention time; reservoir

轮虫是浮游动物的主要类群之一, 具有个体小、世代短、大多数是r-选择型等特点[1]. 轮虫种类组成及分布与水体的水质情况有着密切关系[2]. 对于一个具体的水体而言, 影响轮虫群落结构的因素分为生物因素和非生物因素, 生物因素包括食物、捕食和竞争等, 非生物因素主要是温度、pH和水动力过程等[3-4]. 温度可以直接影响浮游生物的发育和生长速率[5]. 营养盐直接影响水体的初级生产力, 随着营养水平的上升, 轮虫的种类组成逐渐发生变化[6-7]. 水力滞留时间是反映水动力过程的重要参数, 不仅可以反映水体交换的快慢, 同时也可以反映浮游生物平流损失率[8]. 对于繁殖率低和运动能力差的种类来说, 短水力滞留时间显著地影响种群大小[9]. 但在不同的水库中, 对于浮游动物的影响程度是不同的. Bledzki和Ellison调查3座河流型水

收稿日期 Received: 2015-01-06 接受日期 Accepted: 2015-04-01
*国家自然科学基金项目(31170437)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (31170437)
**通讯作者 Corresponding author (E-mail: tlinqq@jnu.edu.cn)

库(水力滞留时间均不超过20 d)时发现浮游动物与生物量与滞留时间呈显著的正相关关系[10]; 而在Parakrana Samudra水库(斯里兰卡), 滞留时间虽然不足10 d, 但是因为轮虫的种群周转率高达1.85 d^{-1}, 所以轮虫的种群密度维持在较高水平[11]. 林秋奇等通过对3座不同水力滞留时间水库的调查分析, 表明不同的滞留时间对轮虫的分布会产生影响[12].

水库是河流上筑坝形成的半人工半自然的水体, 有别于湖泊与河流这两种水体[13]. Straskraba等根据滞留时间的长短将水库分为直流型(< 15 d)、中等滞留时间(15-365 d)和长滞留时间(> 365 d)水库3种类型[8]. 与湖泊相比, 水库的水力滞留时间更短, 且季节变化也较大, 是轮虫分布和种群动态变化的重要影响因素之一[12]. 在我国华南沿海地区, 一些水库由于集水面积小, 自产水量难以满足用水需求, 需要从临近河流调水补充. 这种依赖调水来补充库容的水库称为调水水库[14]. 大量的抽调其它流域河水入库, 改变了原有的水动力学特征, 水力滞留时间缩短, 同时也把江河的营养盐和浮游生物带入库, 从而对库中原本形成的浮游生物群落产生影响. 本研究以珠海市6座调水水库为例, 以水力滞留时间为变量, 利用Bray-curtis距离系数计算群落相异度和R程序进行NMDS排序, 比较分析同一类型水库在不同月份之间轮虫群落结构的差异, 探讨水力滞留时间对轮虫群落结构的影响, 以期为调水水库的生态学研究和管理提供基础数据.

1 材料与方法

1.1 水库概况

本研究选取的6座水库(凤凰山水库、大镜山水库、南屏水库、竹仙洞水库、银坑水库和蛇地坑水库)均是珠海市供水系统的重要组成部分(图1和表1). 6座水库都位于珠海市香洲区, 且两两相连通. 调水时, 调入的河水经大镜山水库进入凤凰山水库, 蛇地坑水库进入银坑水库、南屏水库进入竹仙洞水库. 6座水库的调水水源地均为西江的磨刀门水道. 磨刀门水道氮、磷等营养盐浓度明显高于水库自产水的营养盐浓度, 调入河水对水库营养盐浓度的影响程度取决于调入量. 南屏水库和竹仙洞水库为小型水库, 自产水量非常小, 每个月都要从西江调水; 蛇地坑水库和银坑水库也是小型水库, 主要作为备用水源用以抵抗枯水期的咸潮, 平时并不供水, 每年只在10月调水入库备用. 大镜山水库和凤凰山水库是中型水库: 自产水量相对比较多, 调水情况主要由水库的用水量和当年流域自产水量决定, 具有一定的随机性, 如2013年是丰水年, 丰水期降水量相对往年高, 枯水期从西江调水量低于2012年枯水期.

1.2 样品采集和实验方法

2013年1月和11月对6座水库进行采样. 按国家标准GB/T3838-2002测定总磷的浓度[15]. 浮游动物定量样品采用40 μm孔径的浮游生物网由底部至水面进行垂直拖网, 过滤体积根据深度拖网计算, 浮游动物样品用5%福尔马林固定. 在显微镜和解剖镜下对所有样品进行种类鉴定和计数, 轮虫种类按Koste分类系统进行鉴定[16].

对轮虫的丰度、水库的水力滞留时间等实验数据用R语言进行ANOVA、相关性进行分析. 水力滞留时间根据当月的库容和出库水量计算, 数据由水库管理部门提供.

在R语言系统中, 以丰度为变量, 以Bray-curtis距离计算群落相异度, 同时对群落进行了NMDS分析. 在NMDS分析结果中, 以Stress = 0.20为临界值[17].

表1 水库基本情况

Table 1 Description of the six investigated reservoirs

水库 Reservoir	库容(V/10^4 m^3) Reservoir capacity	1月水温(θ/℃) Water temperature in Jan.	11月水温(θ/℃) Water temperature in Nov.
凤凰山水库 (FHS) Fenghuangshan Reservoir	1072	16.2	23.6
大镜山水库 (DJS) Dajingshan Reservoir	853	16.8	23.9
南屏水库 (NP) Nanping Reservoir	501	18.6	24.2
竹仙洞水库 (ZXD) Zhuxiandong Reservoir	195	15.9	23.5
银坑水库 (YK) Yinkeng Reservoir	117	17.6	23.2
蛇地坑水库 (SDK) Shedikeng Reservoir	127	17.7	23.6



图1 6座调查水库在珠海的位置. 1: 凤凰山水库; 2: 大镜山水库; 3: 竹仙洞水库; 4: 南屏水库; 5:蛇地坑水库; 6: 银坑水库.

Fig. 1 Location of the six investigated reservoirs. 1: Fenghuangshan Reservoir; 2: Dajingshan Reservoir; 3: Zhuxiandong Reservoir; 4: Nanping Reservoir; 5: Shedikeng Reservoir; 6: Yinkeng Reservoir.

2 结果与分析

2.1 环境因子

6座水库的水力滞留时间在1月的变化范围是9-585 d, 11月则是13-383 d. 其中1月水力滞留时间最短的是竹仙洞水库, 最长的是银坑水库; 11月水力滞留时间最短的是南屏水库, 最长的是蛇地坑水库(图2). 根据水力滞留时间可以将6座水库分为3类: 南屏水库和竹仙洞水库为直流型水库, 大镜山水库和凤凰山水库属于中等水力滞留时间型水库, 银坑水库和蛇地坑水库则是长滞留时间型水库. 两座直流型水库水力滞留时间在时间上的变幅相对比较小, 但在11月份水力滞留时间均长于1月份; 中等水力滞留时间和长水力滞留时间水库在时间上的变幅相对比较大, 它们在11月份的水力滞留时间却短于1月份. 6座水库1月平均表层温度为17 ℃, 11月为24 ℃.

总磷浓度1月的变化范围是10-54 μg/L, 11月的变化范围是7-53 μg/L(图3). 两座长水力滞留时间水库的两个调查月份总磷浓度差别较小; 而中等水力滞留时间和直流型水库总磷浓度差别相对

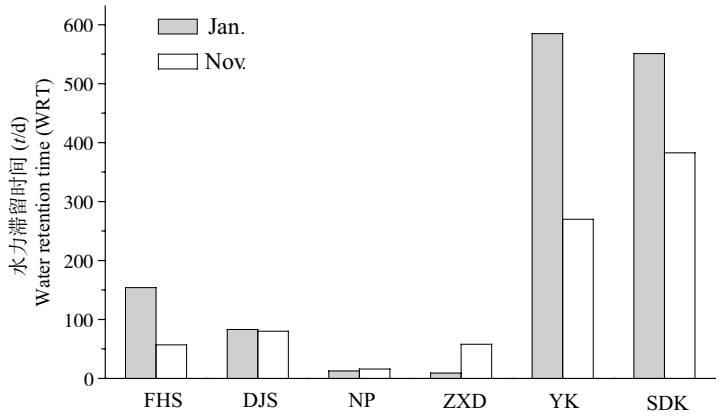


图2 采样时期水库的水力滞留时间.
Fig. 2 Water retention time (WRT) of six investigated reservoirs in two sampling periods.

比较大, 尤其是凤凰山水库, 11月总磷浓度远低于1月份. 长水力滞留时间水库营养水平低于中等水力滞留时间和直流型水库.

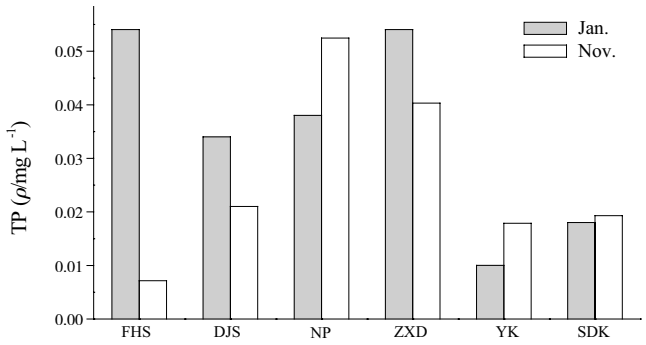


图3 采样时期水库的总磷浓度.
Fig. 3 Total phosphorus concentration (TP) of six investigated reservoirs in two sampling periods.

2.2 轮虫群落结构

两次采样共检测到轮虫34种, 两次采样都检测到的种类是14种, 占两次采样鉴定到总种类数的45%. 轮虫种类主要由臂尾轮科(Brachionida)臂尾轮属(*Brachionus*, 6种)、龟甲轮属(*Keratella*, 3种)和异尾轮科(Trichocereidae)异尾轮属(*Trichocerca*, 9种)组成, 这两个科种类数占检测到总数的53%. 轮虫种类均为热带、亚热带水体的常见种类: 热带龟甲轮虫(*Keratella tropica*)、螺形龟甲轮虫(*K. cochlearis*)、裂足臂尾轮虫(*Brachionus diversicornis*)、萼花臂轮虫(*B. calyciflorus*)、卡顿异尾轮虫(*Trichocerca chattoni*)和圆筒异尾轮虫(*T. cylindrica*)等. 其中, 热带龟甲轮虫和螺形龟甲轮虫出现频次最高, 在各水库中均有分布.

6座水库轮虫丰度范围在1月是0.3-12.4 ind./L, 11月为2.0-281.3 ind./L, 各水库轮虫丰度均在11月份高于1月份, 尤其是两座直流型水库(图4). 在属的水平, 两座中等水力滞留时间水库在两个调查季度均以龟甲轮属为优势类群; 两座直流型水库在1月份以龟甲轮属为优势类群, 但在11月份演替为多肢轮属(*Polyarthra*)或疣毛轮属为优势类群; 两座长水力滞留时间在1月份以龟甲轮属或异尾轮属为优势类群, 但在11月份均以龟甲轮属为优势类群(图5).

6座水库轮虫主要有热带龟甲轮虫、螺形龟甲轮虫、广布多肢轮虫、真翅多肢轮虫(*Polyarthra euryptera*), 此外还有郝氏皱甲轮虫(*Ploesoma hudsoni*)、萼花臂尾轮虫、圆筒异尾轮虫、尖尾疣毛轮虫(*Syncheta stylata*)和*Keratella tecta*等(表2). 在水库之间以及在不同时期, 水库中的具体优势种类和相对丰度有一定的差别. 在1月, 以热带龟甲轮虫、螺形龟甲轮虫和广布多肢轮虫为主要优势种, 在11月则以螺形龟甲轮虫为主要优势种.

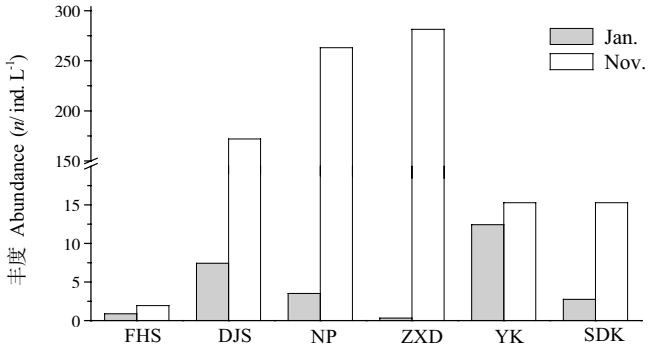


图4 采样时期水库的轮虫丰度.
Fig. 4 Rotifer abundance of six investigated reservoirs in two sampling periods.

在种类的丰度组成上, 轮虫群落结构差异性比较大, Bray-Curtis相异系数在1月份变幅为0.29-0.83, 平均为0.52, 11月份变幅为0.15-0.52, 平均为0.35, 而且1月份相异系数显著高于11月份(图6, ANOVA, $P = 0.002$), 即11月份水库间轮虫群落结构相似程度明显高于1月份. 在NMDS排序图上, 11月份, 由于轮虫群落结构相异程度相对比较低, 6座水库明显聚在一起, 而多数轮虫种类, 如螺形龟甲轮虫、*K. tecta*、广布多肢轮虫(*Polyarthra vulgaris*)、卵形无柄轮虫(*Ascomorpha ovalis*)、独角聚花轮虫(*Conochilus unicornis*)、胶鞘轮虫(*Collotheca* sp.)等种类的丰度高于1月份; 在1月份, 由于轮虫群落结构相异程度相对较大, 6座水库比较分散, 并没有聚在一起, 两座直流型水库间轮虫群落结构相异程度相对低于长水力滞留时间水库或中等水力滞留时间水库(图7).

从水库轮虫群落结构在时间上的变化看, 中等水力滞留时

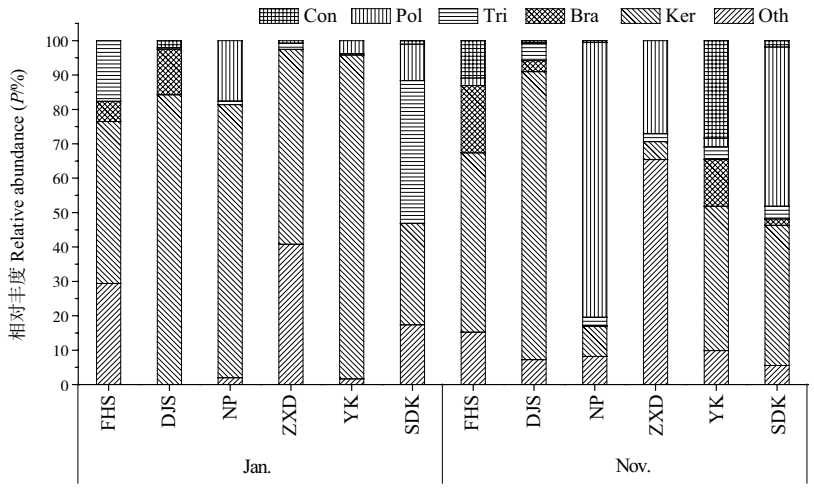


图5 采样期间6座水库轮虫相对丰度百分比组成. Con: 聚花轮属; Pol: 多肢轮属; Tri: 异尾轮属; Bra: 臂尾轮属; Ker: 龟甲轮属; Oth: 其他.
Fig. 5 Relative composition of rotifer abundance in six investigated reservoirs in two sampling periods. Con: *Conochilus*; Pol: *Polyarthra*; Tri: *Trichocerca*; Bra: *Brachionus*; Ker: *Keratella*; Oth: Other.

表2 珠海市6座水库的主要优势种和相对丰度
Table 2 Relative abundance of main dominant rotifers in six reservoirs

水库 Reservoir	1月 Jan.		11月 Nov.	
	优势种 Dominant species	相对丰度(*P*/%) Relative abundance	优势种 Dominant species	相对丰度(*P*/%) Relative abundance
凤凰山水库 FHS	热带龟甲轮虫 *Keratella tropica*	44.1	螺形龟甲轮虫 *Keratella cochlearis*	45.7
	郝氏皱甲轮虫 *Ploesoma hudsoni*	14.7	剪形臂尾轮虫 *Brachionus forficula*	19.6
大镜山水库 DJS	热带龟甲轮虫 *Keratella tropica*	77	螺形龟甲轮虫 *Keratella cochlearis*	69.2
	萼花臂尾轮虫 *Brachionus calyciforus*	22.2	裂痕龟纹轮虫 *Anuraeopsis fissa*	6.1
南屏水库 NP	热带龟甲轮虫 *Keratella tropica*	62.6	广布多肢轮虫 *Polyarthra trigla*	69.4
	广布多肢轮虫 *Polyarthra trigla*	17.6	真翅多肢轮虫 *Polyarthra euryptera*	10.5
竹仙洞水库 ZXD	热带龟甲轮虫 *Keratella tropica*	51.2	尖尾疣毛轮虫 *Syncheta stylata*	34.6
	前节晶囊轮虫 *Asplanch priodonta*	33.9	广布多肢轮虫 *Polyarthra trigla*	27
银坑水库 YK	螺形龟甲轮虫 *Keratella cochlearis*	92.7	*Keratella tecta*	28.4
	广布多肢轮虫 *Polyarthra trigla*	3.4	独角聚花轮虫 *Conochilus unicornis*	28.4
蛇地坑水库 SDK	螺形龟甲轮虫 *Keratella cochlearis*	28.9	真翅多肢轮虫 *Polyarthra euryptera*	38.9
	圆筒异尾轮虫 *Trichocerca capucina*	25.3	螺形龟甲轮虫 *Keratella cochlearis*	35.2

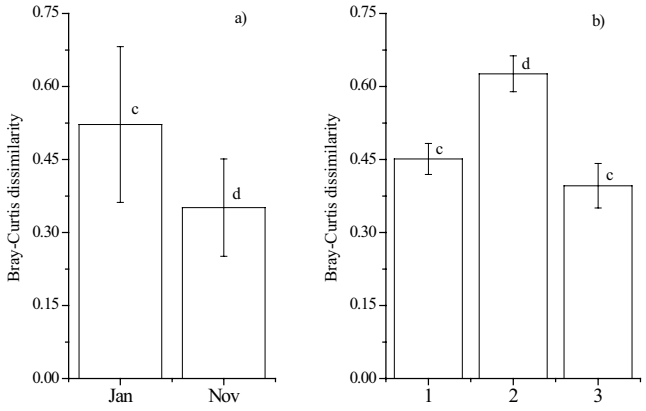


图6 6座水库Bray-Curtis相异系数的时间变化(a)和3个类型水库两次采样期间的Bray-Curtis相异系数(b). "1"表示直流型水库, "2"表示中等水力滞留时间水库, "3"表示长滞留时间水库; 图上字母(c和d)相同表示差异不显著, 字母不相同表示差异显著.
Fig. 6 Temporal variation in Bray-Curtis dissimilarity among the six reservoirs (a) and Bray-Curtis dissimilarity between two sampling periods (b). 1: Through flowing reservoirs, 2: Reservoirs with intermediate retention time, 3: Reservoirs with long retention time. Different lowercase letters above thebars indicate significant difference ($P < 0.05$, Tukey test).

间水库在两次采样期间轮虫群落的相异系数显著高于直流型水库(ANOVA, $P = 0.041$)和长水力滞留时间水库(ANOVA, $P = 0.019$), 但直流型水库和长水力滞留时间水库间差异不显著(ANOVA, $P = 0.435$, 图6). 因此, 中等水力滞留时间水库轮虫群落结构在时间上的变异程度显著高于长水力滞留时间型和直流型水库.

3 讨论

本研究所调查的6座水库由于调水时间与频率不同, 营养水平及其动态差别比较大. 两座直流型水库基本上依赖于河流调水, 营养水平维持在富营养水平上; 两座长水力滞留时间水库对调水依赖程度小于直流型水库, 但由于两次采样均发生在调水之后, 营养水平维持在中营养水平; 两座中等水力滞留时间水库调水则具有一定的随机性, 2013年下半年调水量低于2012年下半年, 导致水库营养水平波动比较大, 2013年1月处于富营养水平, 11月则处于中营养水平.

在热带亚热带地区水体中, 腔轮属(*Lecane*)、异尾轮属和臂尾轮属是轮虫种类的主要组成部分[18]. 而本文所调查的6座水库中异尾轮属和臂尾轮属的多样性最高, 体现出了热带亚热

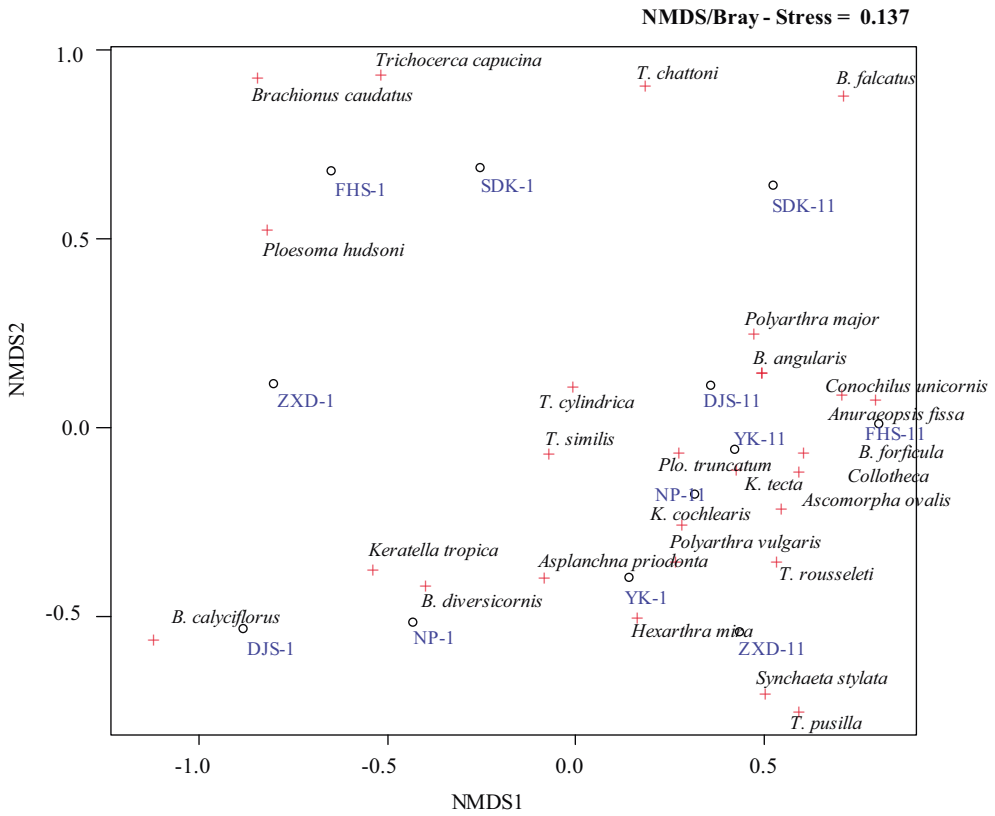


图7 采样点和轮虫种类NMDS排序. 蓝色字体表示采样点, 黑色字体表示轮虫种类.
Fig. 7 NMDS biplot of a Bray-Curtis dissimilarity matrix of the rotifer abundance. Blue words denote sampling site; black words denote rotifer species.

带轮虫组成的特征. 在臂尾轮属中除异棘臂尾轮虫(*Brachionus donneri*)为热带种, 其他的都属于广布性种. 臂尾轮虫的食物阈浓度较高, 一般只能在高营养水平才能取得竞争优势, 对于中等滞留时间和长滞留时间的4座水库而言, 由于营养水平的限制, 所以导致虽然有较多种类出现, 但丰度较低. 在检到的9种异尾轮虫中, 卡顿异尾轮虫是暖水性种, 圆筒异尾轮虫和罗氏异尾轮虫(*Trichocerca rousseleti*)为冷水性种, 其他6种均为广布性种. 异尾轮属被认为起源于劳亚古陆[19], 热带亚热带地区种类虽然较多, 但是没有特有种, 特有种主要集中在北温带. 我国华南地区属于东洋区, 是劳亚古陆的一部分, 而珠海市又位于热带与亚热带过度区域, 变温幅度较大, 这些都可能导致圆筒异尾轮虫在该地区的分布.

水力滞留时间和温度是影响浮游动物动态变化的主要非生物因素; 食物和捕食则是影浮游动物动态的主要生物因素[20-21]. 对于直流型水库来讲, 调水稀释和平流损失对浮游动物丰度的影响比食物和捕食重要得多, 浮游动物通常以轮虫作为优势类群[22]. 同样, 本研究两座直流型水库表现出高营养水平、低浮游动物丰度、轮虫占优势的特征. 在澳大利亚的Solomon水库中, 当水力滞留时间不到10 d时, 水流的稀释和平流损失导致各类型的浮游动物均出现年度最低丰度[23]. 在1月份, 尽管营养水平高于其它两种类型水库, 但较高的平流损失率导致轮虫丰度与水库营养水平并不相符, 与其它两种类型水库差别不显著; 在11月份, 相对较长的水力滞留时间和较高的水温使得轮虫丰度有所增加. 但是在同一月份内, 温度差只有1-2.7 ℃, 由于每种轮虫对温度均有一定的耐受范围, 所以每个月的温度差不是引起水库轮虫结构差异的因素[24]. 轮虫丰度与水力滞留时间相关性分析也表明两者呈显著的正相关(R = 0.694, P = 0.018). 对于长水力滞留时间和中等水力滞留时间水库来讲, 水流平流稀释和平流损失率对轮虫丰度的影响可以忽略不计, 轮虫丰度主要受捕食等生物因素和温度的影响. 和直流型水库一样, 长水力滞留时间和中等水力滞留时间水库呈现出低轮虫丰度特征. 但是, 这两种类型水库枝角类或剑水蚤丰度明显高于两座直流水库(尚未发表数据). 对于枝角类和轮虫来说, 它们之间存在掠夺性竞争[25], 而且枝角类比轮虫有竞争优势[26]; 对于轮虫和桡足类来说, 它们之间既存在食物竞争的关系, 又是猎物和捕食者的关系, 轮虫的丰度在一定程度可以受剑水蚤调控[27]. 在1月份, 中等水力滞留时间的大镜山水库和长水力滞留时间的蛇地坑水库枝角类丰度分别达到110和75 ind. L^{-1}, 是浮游动物的优势类群, 而在11月份, 分别只有4和1 ind. L^{-1}, 枝角类食物竞争压力的差异可能是导致两个季度轮虫丰度差异的因素之一. 在中等水力滞留时间的凤凰山水库, 虽然水库营养水平在两次采样期间的差异比较大, 但轮虫丰度维持在2 ind. L^{-1}左右. 桡足类是水库的优势浮游动物类群, 来自桡足类的捕食压力以及食物竞争对轮虫也可能存在一定的调控作用.

分布在同一地区但理化特征不同的水体, 虽然轮虫的种类组成基本上趋于一致, 但轮虫的群落结构可以随着环境条件的变化逐渐发生变化[28]. 在广东省低营养水平水库中, 轮虫以螺形龟甲轮虫为优势种, 随着水库营养水平上升, 螺形龟甲轮虫优势度逐渐降低, 而异尾轮虫和/或臂尾轮虫优势度逐渐上升, 并在富营养型水库成为绝对优势种[12]. 同样, 本研究所调查的6座水

库尽管营养水平和水力滞留时间等理化特征差别比较大, 但轮虫种类上并没有差别, 而且与广东省其它水库基本一致. 但是, 各水库间以及同一水库两次采样期间轮虫群落结构差异性比较大. 相对来讲, 1月份各水库间轮虫群落结构的差异性显著高于11月份. 林秋奇等发现水力滞留时间是影响不同生活习性轮虫分布的重要因素[29]. 1月份各水库间的营养盐梯度与11月份差别不大, 但11月各水库间水力滞留时间梯度小于1月份. 在11月份, 直流型水库水力滞留时间延长而长水力滞留时间和中等水力滞留时间水库水力滞留时间缩短, 水力滞留时间对两座直流型水库轮虫的影响程度有所减弱, 轮虫丰度也明显上升. 因此, 水力滞留时间梯度变小可能是导致11月份轮虫群落结构相异性小于1月.

Bray-Curtis相异系数计算表明各类型水库轮虫群落结构存在时间上的动态变异, 但是群落结构变异程度与水力滞留时间存在一定的关联. 中等水力滞留时间水库轮虫群落结构的动态变异程度显著大于直流型和长水力滞留时间水库. 一般而言, 轮虫群落结构随着水体营养水平的变化而逐渐发生变化[29]. 在两座中等水力滞留时间水库, 由于调水的随机性, 两次采样期间的调水量差别比较大, 导致同一水库在两次采样期间出现了较大的营养水平变化. 相对而言, 在长水力滞留时间水库和直流型水库营养水平的动态变化幅度较小. 因此, 较大的营养水平变化可能是导致中等水力滞留时间水库轮虫群落结构在时间上的变异程度大于其它两种类型水库.

4 结论

6座水库轮虫的种类主要来自臂尾轮科和异尾轮科, 体现了热带、亚热带地区轮虫种类的特征. 水力滞留时间与水库的调水频率密切相关, 是影响水库之间轮虫群落差异的重要因素; 水力滞留时间的长短直接决定了所调河水对水库营养水平的影响, 从而影响影响轮虫的食物数量和质量, 进而影响单个水库内群落在时间上的变异程度.

参考文献 [References]

1 Twombly S. Seasonal and short term fluctuations in zooplankton abundance in tropical Lake Malawi1 [J]. *Limnol Oceanogr*, 1983, **28** (6): 1214-1224.

2 Segers H. Global diversity of rotifers (Rotifera) in freshwater [J]. *Hydrobiologia*, 2008, **595** (1): 49-59

3 Bērzinš B, Pejler B. Rotifer occurrence in relation to temperature [J]. *Hydrobiologia*, 1989, **175** (3): 223-231

4 林秋奇. 流溪河水库后生浮游动物多样性与群落结构的时空异质性[D]. 广州: 暨南大学, 2007 [Lin QQ. Species diversity and spatial and temporal variations of pelagic metazooplankton in Liuxihe Reservoir [D]. Guangzhou: Jinan University, 2007]

5 Bottrell HH. A review of some problems in zooplankton production studies [J]. *Norw J Zool*, 1976, **24**: 419-456

6 魏鹏, 林秋奇, 胡韧, 韩博平, 林旭钿, 杨浩文, 钟秀英. 高州水库水质与浮游生物动态分析[J]. 应用与环境生物学报, 2002, **8** (2): 165-170 [Wei P, Lin QQ, Hu R, Han BP, Lin XD, Yang HW, Zhong XY. Water quality and plankton fluctuation in Gaozhou Reservoir [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2002, **8** (2): 165-170]

7 Lin QQ, Duan SS, Hu R, Han BP. Zooplankton distribution in tropical reservoirs, South China [J]. *Int Rev Hydrobiol*, 2003, **88** (6): 602-613

8 Straškraba M, Tundisi JG, Duncan A. State-of-the-art of reservoir limnology and water quality management [M]//Comparative reservoir limnology and water quality management. Springer Netherlands, 1993: 213-288

9 Fernández-Rosado MJ, Lucena J. Space-time heterogeneities of the zooplankton distribution in La Concepción reservoir (Istán, Málaga; Spain) [J]. *Hydrobiologia*, 2001, **455** (1-3): 157-170

10 Bledzki LA, Ellison AM. Effects of water retention time on zooplankton of shallow [J]. *Verh internat Verein Limnol*, 2000, **27**: 1-5

11 Duncan A. Assessment of factors influencing the composition, body size and turnover rate of zooplankton in Parakrama Samudra, an irrigation reservoir in Sri Lanka [J]. *Hydrobiologia*, 1984, **113** (1): 201-215

12 林秋奇, 赵帅营, 韩博平. 广东省水库轮虫分布特征[J]. 生态学报2005, **25** (5): 1123-1131 [Lin QQ, Zhao SY, Han BP. Rotifer distribution in tropical reservoirs, Guangdong Province, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2005, **25** (5): 1123-1131]

13 Kimmel BL, Lind OT, Paulson LJ. Reservoir primary production [J]// IN: Reservoir Limnology: Ecological Perspectives. New York: John Wiley & Sons, 1990: 133-193

14 Straskraba M, Tundisi JG. Guidelines of lake management (Vol. 9): Reservoir water quality management [M]. Shiga: International Lake Environment Committee Foundation, 1999

15 GB/T 3838-2002 地表水环境质量标准 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002

16 Koste W. Rotatoria (Vol. 2) [M]. Berlin: GebrÜder Borntraege, 1978

17 R Core Team. R: A language and environment for statistical computing [CP]. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL http: //www. R-project. org/2012

18 Fernando CH. The freshwater zooplankton of Sri Lanka, with a discussion of tropical freshwater zooplankton composition [J]. *Int Rev Gesamten Hydrobiol Hydrogr,* 1980, **65** (1): 85-125

19 Segers H. A biogeographical analysis of rotifers of the genus Trichocerca Lamarck, 1801 (Trichocercidae, Monogononta, Rotifera), with notes on taxonomy [J]. *Hydrobiologia*, 2003, **500** (1-3): 103-114

20 Gulati RD. Zooplankton structure in the Loosdrecht lakes in relation to trophic status and recent restoration measures [J]. *Hydrobiologia*, 1990, **191** (1): 173-188

21 Dumont HJ. Biogeography of rotifers [M]//Biology of Rotifers. Springer Netherlands, 1983: 19-30

22 Threlkeld ST. Water renewal effects on reservoir zooplankton communities [J]. *Can Water Resou J*, 1982, **7** (1): 151-167

23 Hawkins PR. The zooplankton of a small tropical reservoir (Solomon Dam, North Queensland) [J]. *Hydrobiologia*, 1988, **157** (2): 105-118

24 Moore MV, Folt CL, Stemberger RS. Consequences of elevated temperatures for zooplankton assemblages in temperate lakes [J]. *Arch Hydrobiol* , 1996, **135** (3): 289-319

25 Gilbert JJ, Stemberger RS. Control of Keratella populations by interference competition from Daphnia [J]. *Limnol Oceanogr*, 1985, **30** (1): 180-188

26 Gilbert JJ. Competition between rotifers and daphnia [J]. *Ecology*, 1985, **66** (6): 1943-1950

27 Lin Q, Han BP. Diversity and community structure of zooplankton in reservoirs in South China [M]//Tropical and Sub-Tropical Reservoir Limnology in China. Springer Netherlands, 2012: 3-27

28 De Manuel J, Armengol J. Rotifer assemblages: a contribution to the typology of Spanish reservoirs. *Hydrobiologia*, 1993, **255/256**: 421-428

29 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[J]. 生态学杂志, 2006, **25** (3): 270-276 [Lin QQ, Zhao SY, Han BP. Dynamics of rotifer and crustacean zooplankton in a newly constructed reservoir [J]. *Chin J Ecol*, 2006, **25** (3): 270-276]

30 Duggan IC, Green JD, Shiel RJ. Distribution of rotifer assemblages in North Island, New Zealand, lakes: relationships to environmental and historical factors [J]. *Freshw Biol*, 2002, **47** (2): 195-206