

南京市 5 座中型水库浮游动物群落结构及其与环境因子的关系*

王文侠^{1,2}, 陈非洲^{1**}, 谷孝鸿¹

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

(2: 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 于 2010 年 5 月—2011 年 2 月, 对南京市 5 座中型湖泊型水库浮游动物群落结构进行每季度一次的调查采样, 同时测定总氮、总磷、透明度等理化因子及浮游植物等生物因子。共鉴定到浮游动物 17 科 28 属, 优势种为盃形溞 (*Daphnia galeata*)、象鼻溞 (*Bosmina* spp.)、汤匙华哲水蚤 (*Sinocalanus dorrii*)、多肢轮虫 (*Trichocerca* spp.)、异尾轮虫 (*Polyarthra* spp.) 等。5 座水库浮游动物年均密度变化范围为 72~1401 ind./L, 其中河王水库密度显著大于其他水库, 而 4 个季节间浮游动物密度无显著差异。5 座水库浮游动物年均生物量变化范围为 102~339 $\mu\text{g/L}$, 季节间、水库间浮游动物生物量均无显著性差异。浮游动物群落结构与环境因子的典范对应分析表明, 影响 5 座水库浮游动物群落结构的环境因子主要为营养盐、水温、透明度和浮游植物密度。

关键词: 南京; 中型湖泊型水库; 浮游动物群落; 环境因子

Community structures of zooplankton and its relation to environmental factors in five medium reservoirs in Nanjing City

WANG Wenxia^{1,2}, CHEN Feizhou^{1**} & GU Xiaohong¹

(1: State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R. China)

(2: University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R. China)

Abstract: We quarterly investigated zooplankton community in five medium-lake shaped reservoirs in Nanjing during 2010–2011 and analyzed their relations to environmental factors. Totally 28 genera of zooplankton belonging to 17 families were recorded. The dominant species were *Daphnia galeata*, *Bosmina* spp., *Sinocalanus dorrii*, *Trichocerca* spp. and *Polyarthra* spp.. The annual average abundance of zooplankton in five reservoirs ranged from 72 ind./L to 1401 ind./L. Zooplankton abundance was significantly higher in Hewang Reservoir than in other reservoirs while there was no significant difference among four seasons. The annual average biomass of the zooplankton in five reservoirs ranged from 102 $\mu\text{g/L}$ to 339 $\mu\text{g/L}$ and there was no significant differences in both five reservoirs and in four seasons. The structures of zooplankton community were analyzed in relation to environmental parameters by canonical correspondence analysis. The results showed that the nutrient level, water temperature, water transparency and phytoplankton abundance strongly regulated the zooplankton communities in five reservoirs in Nanjing City.

Keywords: Nanjing City; medium-lake shaped reservoirs; zooplankton community; environmental factors

淡水生态系统中, 浮游动物处于食物链的中间环节, 不仅能摄食浮游植物^[1], 而且是鱼类等的重要生物饵料^[2], 对淡水生态系统物质循环和能量流动有重要的作用, 其群落结构能为解释湖泊富营养化进程提供重要依据^[3]。经典的生物操纵即依靠放养食鱼性鱼类减少食浮游动物鱼类的数量, 靠浮游动物的摄食来遏制藻类的生长。

浮游动物在不同生境下会产生不同的响应, 造成其种类、密度等的差异, 因此对水环境具有一定程度的

* 国家自然科学基金项目(41271523)和江苏省科技支撑项目(BE2011820)联合资助。2015-12-08 收稿; 2016-04-02 收修改稿。王文侠(1989~), 女, 博士研究生; E-mail: wangwenxia00@163.com.

** 通信作者; E-mail: feizhch@niglas.ac.cn.

指示作用^[4]. 影响浮游动物群落结构的因素包括非生物因素和生物因素,非生物因素主要包括营养盐、光照、温度、透明度等^[5],生物因素包括寄生、捕食与竞争等^[6]. 由于空间环境的特异性以及生物之间相互作用的复杂性,影响浮游动物群落的主导因子在不同水体中存在差异^[7]. 对浮游动物群落结构进行分析有助于对水质状况作出评价,是理化监测的有力补充.

长期以来,我国对水库浮游动物群落的研究主要集中在热带,如对广东省^[8-9]、海南省^[10]多座大中型水库的研究表明,浮游动物对不同营养水平水库有不同响应,但是关于亚热带水库浮游动物的研究却较少. 虽然亚热带湖泊浮游动物有相关的研究^[11],但由于水库结构和水动力学特征与湖泊有明显的区别,浮游动物群落结构会有所差异.

金牛水库、河王水库及山湖水库是分布在南京市六合区的中型水库(库容为 $0.1 \times 10^8 \sim 1.0 \times 10^8 \text{ m}^3$). 由于南京市六合区北部为低山丘陵,地势高亢,远离江河,水资源短缺,因而金牛水库、河王水库、山湖水库被划分为饮用水源地,承担六合区北部的主要供水任务. 中山水库位于南京溧水上游东南低山丘陵区,秦淮河上游. 方便水库位于溧水县东南、秦淮河支流溧水二干河上游的低山丘陵区. 除防洪、灌溉功能外,中山水库与方便水库还承担着联合供水的任务. 这5座水库作为重要的供水水源地,其水质的好坏直接影响着供水区域内居民的生活质量和身体健康. 于忠华等^[12]、陈文权等^[13]曾对这些水库水体理化因子进行过调查,但关于其浮游动物却缺乏研究. 本文通过对这5座中型水库浮游动物进行调查,分析浮游动物群落组成及其与环境因子的关系,为南京水库水质监测、评价和管理提供参考.

1 材料与方法

分别于2010年5月(春季)、8月(夏季)、11月(秋季)和2011年2月(冬季)对位于南京市六合区的山湖水库($32^{\circ}28'48'' \sim 32^{\circ}30'0''\text{N}$, $118^{\circ}45'0'' \sim 118^{\circ}47'24''\text{E}$)、河王水库($32^{\circ}31'12'' \sim 32^{\circ}32'60''\text{N}$, $118^{\circ}48'36'' \sim 118^{\circ}50'60''\text{E}$)、金牛水库($32^{\circ}27'36'' \sim 32^{\circ}31'12''\text{N}$, $118^{\circ}57'36'' \sim 119^{\circ}1'48''\text{E}$)和溧水区的方便水库($31^{\circ}39'36'' \sim 31^{\circ}42'36''\text{N}$, $119^{\circ}7'12'' \sim 119^{\circ}9'0''\text{E}$)、中山水库($31^{\circ}37'12'' \sim 31^{\circ}38'60''\text{N}$, $119^{\circ}3'36'' \sim 119^{\circ}5'24''\text{E}$)进行4次定点采样(图1). 每个水库依据水库面积和水文地理特征选择3个采样点.

采样水层根据采样点的深度按照《湖泊生态调查观测与分析》^[14]确定,采集的混合水一部分用于室内化学指标的测定,一部分用于浮游植物和轮虫的分析. 将水样用1%鲁哥试剂固定,然后沉淀浓缩定容至50 ml,用于鉴定浮游植物和轮虫. 直接将不同层的水样用 13^{μ}m 浮游生物网过滤浓缩至50 ml塑料瓶中,加4%甲醛固定,用于鉴定浮游甲壳动物.

水温(T)、pH、电导率(COND)和溶解氧(DO)浓度使用YSI 6600水质测定仪现场测量. 透明度(SD)用透明度盘测量. 室内分析指标包括总氮(TN)、总溶解氮(TDN)、总磷(TP)、总溶解磷(TDP)、硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)、亚硝态氮($\text{NO}_2\text{-N}$)、铵态氮($\text{NH}_4\text{-N}$)、正磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)、叶绿素a(Chl.a)和总悬浮质(TSS),其中TN、TDN、TP、TDP用消解法测定, $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 用Skala分析仪测定,Chl.a浓度用丙酮法测定,总悬浮质用Whatman GF/C膜过滤后烘干称重. 测定方法均参照《湖泊富营养化调查规范》^[15].

浮游植物在显微镜下用0.1 ml计数板计数,然后换算成密度(PHY),生物量根据藻的体积计算. 轮虫和浮游甲壳动物在显微镜下用分别用1和5 ml计数板计数,然后换算成密度,生物量根据虫体体积计算^[14]. 浮游植物鉴定参考文献[16],轮虫和浮游甲壳动物的鉴定参考文献[17-19].

优势种根据物种的出现频率及个体数量来确定,用优势度来表示,计算公式为:

$$Y = f_i \cdot P_i \quad (1)$$

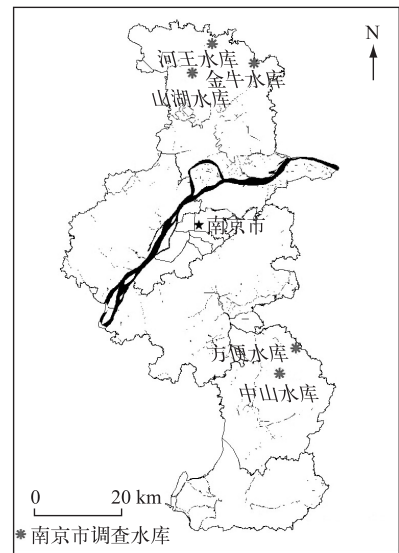


图1 南京市采样水库的位置
Fig.1 Location of the investigated reservoirs in Nanjing City

式中, Y 是优势度, f_i 是第 i 物种的出现频率, P_i 是第 i 物种个体数量占总个体数量的比例, 当 $Y > 0.02$ 时, 确定为优势种.

本文多样性指数包括 Shannon-Wiener 多样性指数 (H')、均匀度指数 (E) 和 Simpson 优势集中性指数 (C), 各指数计算公式为:

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \ln p_i \quad (2)$$

$$E = H' / H'_{\max} \quad (3)$$

$$C = \sum_{i=1}^S \left(\frac{n_i}{N} \right)^2 \quad (4)$$

式中, $p_i = F_i / F$, 是群落中第 i 个物种的个体数占群落中总个体数的比例. F_i 为第 i 个物种的个体数量, F 为群落个体总数, S 是群落中总物种数; H'_{\max} 为 H' 的最大理论值, 即假设群落内各个物种均以相同比例同时存在时的 H' 值; n_i 为第 i 个优势种在群落中的重要值, N 为群落的总重要值.

图形用 Origin 软件绘制, 各水库间理化因子及生物指标差异性分析用 t 检验, 数据统计分析用 SPSS 13.0 软件完成. 应用 Canoco for Windows 4.5 对浮游动物群落与环境因子进行去趋势对应分析 (DCA) 和典范对应分析 (CCA).

2 结果与分析

2.1 5 座水库环境指标

5 座水库主要环境因子如表 1 所示. t 检验表明, 5 座水库间的年平均 T、pH、COND、DO、TDN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TP、TDP 和 Chl.a 浓度均无显著差异 ($P > 0.05$), TN、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 TSS 浓度在 5 座水库之间存在显著差异 ($P < 0.05$).

表 1 南京 5 座水库主要环境因子变化 (平均值 \pm 标准差)
Tab.1 The environmental factor values in 5 reservoirs of Nanjing City

指标	金牛水库	河王水库	山湖水库	中山水库	方便水库
T/°C	17.05 \pm 9.89	17.20 \pm 9.60	17.54 \pm 10.21	17.83 \pm 9.95	18.09 \pm 9.86
SD/m	2.70 \pm 1.25	1.21 \pm 0.75	1.90 \pm 0.77	2.11 \pm 0.91	1.77 \pm 0.31
pH	8.44 \pm 0.35	8.56 \pm 0.30	8.67 \pm 0.17	8.68 \pm 0.15	8.62 \pm 0.15
DO/(mg/L)	9.68 \pm 1.87	9.84 \pm 1.55	10.15 \pm 1.15	9.87 \pm 1.66	9.66 \pm 1.65
TN/(mg/L)	0.67 \pm 0.35	0.95 \pm 0.12	0.59 \pm 0.10	0.70 \pm 0.08	1.17 \pm 0.91
TDN/(mg/L)	0.56 \pm 0.28	0.79 \pm 0.12	0.47 \pm 0.08	0.59 \pm 0.13	0.95 \pm 0.80
TP/(mg/L)	0.06 \pm 0.04	0.08 \pm 0.03	0.06 \pm 0.03	0.07 \pm 0.04	0.10 \pm 0.08
TDP/(mg/L)	0.05 \pm 0.04	0.05 \pm 0.04	0.04 \pm 0.03	0.05 \pm 0.03	0.06 \pm 0.03
TSS/(mg/L)	0.87 \pm 0.30	3.34 \pm 1.47	2.06 \pm 0.79	2.00 \pm 1.28	1.87 \pm 1.10
Chl.a/($\mu\text{g/L}$)	10.43 \pm 8.56	22.78 \pm 17.77	19.46 \pm 10.26	15.63 \pm 7.52	11.44 \pm 8.98
PHY/($\times 10^6$ cells/L)	0.55 \pm 0.13	2.73 \pm 1.02	2.67 \pm 1.15	0.99 \pm 0.16	0.38 \pm 0.08

2.2 浮游动物群落特征

5 座水库共鉴定到浮游动物 17 科 28 属, 其中种类数最多的为山湖水库, 共 30 种, 其中枝角类 9 种, 桡足类 11 种, 轮虫 10 种. 其余 4 座水库共鉴定到浮游动物种类 19~22 种. 各浮游动物类群优势种 ($Y > 0.02$) 见表 2.

浮游动物中轮虫的年均密度最大 (390 ind./L), 其次为桡足类 (18.4 ind./L), 枝角类最小 (7.8 ind./L). 5 座水库浮游动物年均密度变化范围为 72~1401 ind./L, 年均生物量变化范围为 102~339 $\mu\text{g/L}$. t 检验表明, 5 座水库间浮游动物密度有显著差异, 其中河王水库总密度显著大于金牛水库、中山水库、方便水库和金牛水库. 其余水库浮游动物总密度无显著差异. 5 座水库间浮游动物生物量均无显著性差异. 生物量与密度的季节变化均不显著 (图 2).

表2 南京5座水库浮游动物优势种
Tab.2 The dominant species of zooplankton in 5 reservoirs of Nanjing City

优势种	金牛水库	河王水库	山湖水库	中山水库	方便水库	指示类型
枝角类 (Cladocera)						
盃形溞 (<i>Daphnia galeata</i>)	+		+	+	+	贫、贫-中营养
秀体溞 (<i>Diaphanosoma</i> spp.)					+	
象鼻溞 (<i>Bosmina</i> spp.)		+	+	+		
桡足类 (Copepoda)						
中华窄腹剑水蚤 (<i>Limnithona sinensis</i>)	+		+			贫营养
汤匙华哲水蚤 (<i>Sinocalanus dorrii</i>)		+		+	+	
轮虫 (Rotifer)						
多肢轮虫 (<i>Polyarthra</i> spp.)		+	+	+		贫-中营养
螺形龟甲轮虫 (<i>Keratella cochlearis</i>)		+				富营养
异尾轮虫 (<i>Trichocerca</i> spp.)	+			+		贫营养
泡轮虫 (<i>Pompholyx</i> sp.)						

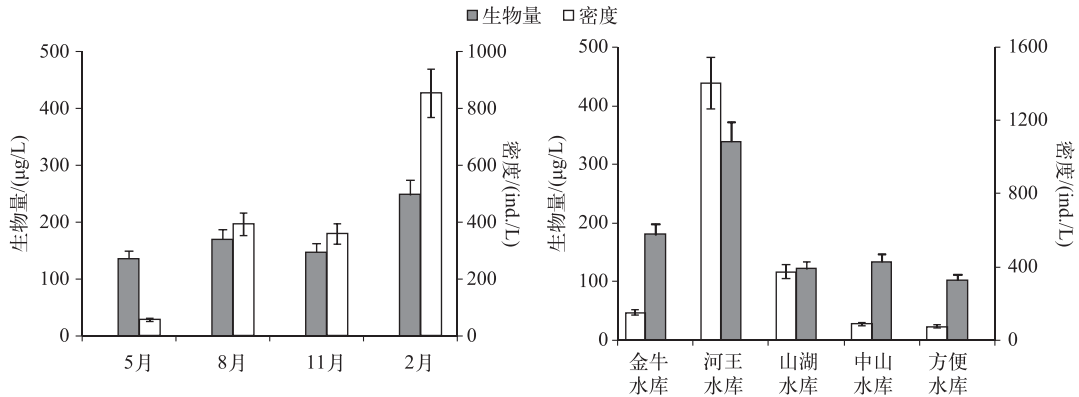


图2 不同季节与水库间浮游动物平均密度与生物量

Fig.2 Abundance and biomass of the zooplankton among four seasons and five reservoirs

对5座水库浮游动物多样性指数、均匀性指数和优势集中性指数进行计算可知,河王水库多样性指数和均匀度指数最低,优势集中指数最高. 其余4座水库多样性指数大小依次为金牛水库>山湖水库>方便水库>中山水库(表3).

2.3 浮游动物群落结构与环境因子的关系

首先对水库浮游动物群落种类进行DCA分析,结果显示排序轴最大梯度的长度为3.599. 因而使用CCA来分析浮游动物群落与环境因子的关系.

通过前选法和蒙特卡罗检验,排除贡献小的因子,发现TDP、T、SD和PHY是与南京市5座水库浮游动物群落结构相关性较强的环境因子($P < 0.05$)

(图3),前2个排序轴的特征值分别是0.476和0.251,种类与环境因子排序轴的相关系数为0.898和0.922. 前2轴可以解释75.3%的种类-环境关系.

表3 5座水库浮游动物多样性指数、均匀度指数和优势集中指数

Tab.3 Shannon-Wiener diversity index, Berger-Parker index and Simpson index of zooplankton in five reservoirs

水库	H'	E	C
金牛水库	1.52	0.52	0.15
河王水库	1.22	0.40	0.35
山湖水库	1.45	0.48	0.17
中山水库	1.35	0.46	0.12
方便水库	1.44	0.47	0.13

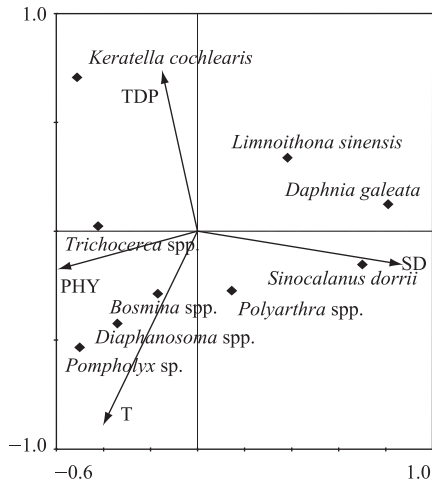


图 3 5 座水库浮游动物与环境因子的 CCA 排序图

Fig.3 Biplot of the CCA for environmental factors associated with zooplankton of the five reservoirs

3 讨论

3.1 南京水库浮游动物群落特征

结果显示,调查的水库 TN 浓度处于中营养水平(0.6~1.5 mg/L),与前人研究相比,金牛水库、中山水库、方便水库的水质均呈现不同程度的下降趋势^[20]. 通常来讲,对多样性指数的评价标准为:0~1 为多污型,1~2 为 α -中污型,2~3 为 β -中污型,3~4 为寡污型,>4 为清洁水体. 本次调查的 5 座水库 Shannon-Wiener 指数为 1.22~1.55,可见其水质存在一定程度的污染,结合均匀性指数和优势集中性指数可知河王水库的水质较其他 4 座水库更差,需引起有关部门的重视.

5 座水库浮游动物均为亚热带水体常见种类,其中各水库优势类群均为轮虫,相对于大型枝角类和桡足类,轮虫个体较小、发育快、生命周期短,能以较快速度抢占生态系统中空的生态位,在淡水生态系统中常处于优势地位^[21]. 轮虫作为 5 座水库浮游动物优势类群对浮游动物总密度和生物量的影响至关重要. 本次调查中河王水库浮游动物密度显著大于其他水库,原因是河王水库营养水平较高,螺形龟甲轮虫等富营养种类密度大量增加,导致其总密度与生物量显著

高于其他水库. 此外,不同于其他 4 座水库均以盩形蚤、中华窄腹剑水蚤、异尾轮虫等贫或贫-中营养指示种为优势种,中山水库以象鼻蚤、汤匙华哲水蚤、螺形龟甲轮虫等广布性或富营养指示种为优势种.

3.2 南京水库浮游动物群落结构的影响因素分析

由于生态系统的空间差异性,影响浮游动物群落结构的主要环境因子在不同水体是不同的. 通常在水体环境变化较大的湖泊中,浮游动物群落结构主要取决于易变的环境因子,非密度制约型环境因子成为其主要影响因素. 在环境相对稳定的湖泊水体中,浮游动物群落结构主要取决于浮游植物种类及生物量、细菌总数量及纤毛虫生物量等生物因子^[22]. CCA 分析表明,南京 5 座水库浮游动物的群落结构与水体溶解磷、水温、透明度及浮游植物密度等显著相关,表明其受非生物因子和生物因子共同作用.

1) 营养盐、浮游植物等对南京水库浮游动物群落结构有较大影响. 本次研究中营养水平较高的河王水库与金牛水库、山湖水库及中山水库浮游动物群落结构产生差异的原因可能是:氮、磷等营养盐不仅能通过渗透和离子调节机制影响浮游甲壳动物的生理变化,从而直接影响各水库浮游甲壳动物生长繁殖^[23],还能调节浮游植物及微生物尤其是鞭毛虫的生长^[24],从而对各水库浮游动物的食物类型、质量、大小和浓度产生影响. 方便水库虽然有较高的氮、磷浓度,但其浮游动物密度并不高,原因是无论大型浮游动物还是小型浮游动物都需摄食浮游植物,浮游植物与浮游动物的生长繁殖密切相关,而方便水库水体中浮游植物密度过低限制了其生长. 南京市 5 座水库中秀体蚤、象鼻蚤等密度与浮游植物密度呈正相关,表明浮游植物密度较高的水域能为其生长繁殖提供良好的条件^[25-26].

2) 南京水库浮游动物分布受温度影响较大. 虽然 5 座水库浮游动物密度及生物量没有显著的季节差异,但不同季节浮游动物种类分布不同. CCA 分析表明,在一定范围内螺形龟甲轮虫密度与温度呈反比,表明其适宜生长在温度较低的水体中,因而在 2 月份形成密度高峰. 秀体蚤、泡轮虫和象鼻蚤与温度呈正比,可能是由于随着水温的升高,个体发育时间缩短,生殖量增加^[27],因而它们在 8 月占优势.

3.3 不同纬度水库浮游动物群落结构的差异性分析

水库浮游动物分布由营养水平、食物网结构、水体滞留时间等多因素共同决定. 且不同纬度浮游动物群落结构亦有差异,如与本次调查水库相比,新疆红山水库优势类群为轮虫,但浮游甲壳动物占更大组分且种类更丰富,近刺大吉猛水蚤(*Tachidius vicinospinalis*)及绿色近剑水蚤(*Tropocyclops prasinus*)等密度较大^[28].

黑龙江山口水库优势类群则为浮游甲壳动物,僧帽溞(*Daphnia cucullata*)、象鼻溞等在密度上占优势^[29]。

太平湖水位于安徽省黄山市,根据营养盐浓度、透明度和 Chl.a 浓度等指标,太平湖水处于贫-中营养水平,与本研究5座水库类似,轮虫同样为优势类群,但是其浮游动物种类及多样性高于南京市5座水库,除异尾轮虫及螺形龟甲轮虫外,还有对棘同尾轮虫(*Diurell astylata*)、猛水蚤、晶囊轮虫(*Asplachna* spp.)、胶鞘轮虫(*Collotheca* spp.)及无柄轮虫(*Ascomorpha* spp.)等优势种,Shannon-Wiener 指数更高(1.675±0.651)。原因可能是太平湖水作为深水区(平均水深40 m,最大水深70 m),生境更复杂,可满足更多浮游动物生存条件^[30]。作为同样位于亚热带的重要水库,青草沙水库是上海市重要水源地。且水库为中营养类型,浮游优势种与本次调查的5座水库类似,但是种类数更多,轮虫的 Shannon-Wiener 多样性指数高达2.64~3.77,原因是其作为一座河口水库,与本次调查的5座湖泊型水库相比,既有淡水和海洋种,又有海口所特有的半咸水种,形成一个复杂、多变的生物群落。此外,作为河口水库,其入库口常携带泥沙和悬浮物,导致水体浑浊,透明度和悬浮质对其水库浮游动物有较大影响^[31]。

广东省地处我国热带与亚热带的过渡区,这一地区的水库浮游动物组成以轮虫为主,包括臂尾轮虫、龟甲轮虫等;枝角类溞属数量很少,秀体溞较多;桡足类以中剑水蚤、近剑水蚤和叶镖水蚤为主,但密度较低^[32-35]。海南省是我国典型的热带地区。对海南省多座水库浮游动物的调查表明,其浮游甲壳类种类数更少(平均7种),且以个体较小的脆弱象鼻溞(*Bosmina fatalis*)、颈沟基合溞(*Bosminopsis deitersi*)和温中剑水蚤(*Mesocyclops thermocyclopoides*)等为优势种^[10]。轮虫主要优势种为剪形臂尾轮虫(*Brachionus forficula*)、镰状臂尾轮虫(*Brachionus forcatus*),呈种类少、个体少和丰度低且多有被甲的特点^[36]。

由此可见,不同水库浮游动物群落结构随纬度的变化有所差异,这可能是由直接或间接两方面造成的。首先,纬度的差异直接导致各水库水温的差异,不同浮游动物对温度的适应能力不同,因而会造成其群落结构的差异。如与南京水库相比,热带水库水温常年较高,使浮游动物呈嗜暖性,广东省地处亚热带与热带交界处,浮游动物也有较多热带种类分布。且温度的升高能改变其代谢速率,影响其生长繁殖,使其呈寿命短、繁殖快的特点。其次,根据 Paine 的捕食假说^[37],热带地区捕食者较其他地区更多,热带水库浮游动物通常常年处于较高的捕食压力下,鱼类的选择性捕食造成浮游动物具有小型化的特点。研究表明其浮游甲壳动物优势种通常小于1 mm^[38]。

致谢:感谢李静、赵璧影、戴曦、孙颖、舒婷婷在野外采样中的帮助。

4 参考文献

- [1] Jefferson TT. Zooplankton community grazing impact on a bloom of *Alexandrium fundyense* in the Gulf of Maine. *Harmful Algae*, 2010, **9**(6): 578-589.
- [2] Mitra G, Mukhopadhyay PK, Ayyappan S. Biochemical composition of zooplankton community grown in freshwater earthen ponds: Nutritional implication in nursery rearing of fish larvae and early juveniles. *Aquaculture*, 2007, **272**: 346-360.
- [3] Xie P, Yang Y. Long-term changes of copepoda community(1957-1996) in a subtropical Chinese lake stocked densely with planktivorous filter-feeding silver and bighead carp. *Journal of Plankton Research*, 2000, **22**(9): 1757-1778.
- [4] Chang KH, Sakamoto M, Hanazato T. Impact of pesticide application on zooplankton communities with different densities of invertebrate predators: An experimental analysis using small-scale mesocosms. *Aquatic Toxicology*, 2005, **72**: 373-382.
- [5] Berzins B, Pejler B. Rotifer occurrence in relation to temperature. *Hydrobiologia*, 1989, **175**(3): 223-231.
- [6] An XP, Du ZH, Zhang JH *et al.* Structure of the zooplankton community in Hulun Lake, China. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, **13**: 1099-1109.
- [7] Alcaraz M, Calbet A, Estrada M *et al.* Physical control of zooplankton communities in the Catalan Sea. *Progress in Oceanography*, 2007, **74**: 294-312.
- [8] Lin Qiuqi, Zhao Shuaiying, Han Boping. Rotifer distribution in tropical reservoirs, Guangdong Province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(5): 1123-1131. [林秋奇,赵帅营,韩博平.广东省水库轮虫分布特征.生态学报, 2005, **25**(5): 1123-1131.]
- [9] Chen Mianrun, Zhao Shuaiying, Lin Qiuqi *et al.* Cladoceran distribution in reservoirs of Guangdong Province, South China. *J Lake Sci*, 2007, **19**(1): 77-86. DOI:10.18307/2007.0112. [陈绵润,赵帅营,林秋奇等.广东省水库枝角类组成特征的初步研究.湖泊科学, 2007, **19**(1): 77-86.]

- [10] Li Huiming, Chen Hua, Han Xiaoyu *et al.* Characters of community structure of planktonic crustaceans in open water of tropical reservoirs, Hainan Province of China. *J Lake Sci.*, 2011, **23**(2): 251-256. DOI:10.18307/2011.0214. [李慧明, 陈花, 韩小玉等. 海南热带水库敞水区浮游甲壳动物群落结构特征. 湖泊科学, 2011, **23**(2): 251-256.]
- [11] Zhong Chunni, Yang Guijun, Gao Yinghai *et al.* Seasonal variations of macrozooplankton community in Gonghu Bay of Lake Taihu. *Journal of Hydroecology*, 2012, **33**(1): 47-52. [钟春妮, 杨桂军, 高映海等. 太湖贡湖湾大型浮游动物群落结构的季节变化. 水生生态学杂志, 2012, **33**(1): 47-52.]
- [12] Yu Zhonghua, Huang Wenyu, Shu Jinhua. Water environment condition and evolution tendency analysis of the main lakes and reservoirs in Nanjing. *Territory & Natural Resources Study*, 2005, (4): 37-39. [于忠华, 黄文钰, 舒金华. 南京市主要湖库水环境现状与演变趋势分析. 国土与自然资源研究, 2005, (4): 37-39.]
- [13] Chen Wenquan, Zhu Yongjun, Han Bocheng *et al.* Analysis of water quality status and eutrophication of main water supply reservoirs in Liuhe District of Nanjing City. *Water Resources Protection*, 2008, **24**(1): 34-36. [陈文权, 朱永军, 韩伯成等. 南京市六合区主要供水水库水质现状及富营养化分析. 水资源保护, 2008, **24**(1): 34-36.]
- [14] Huang Xiangfei, Sun Honglie, Liu Guangsong eds. Ecological research and analysis of lake. Beijing: Standard Press, 2000. [黄祥飞, 孙鸿烈, 刘光崧. 湖泊生态调查观测与分析. 北京: 中国标准出版社, 2000.]
- [15] Jin Xiangcan, Tu Qingying eds. Specifications for lake eutrophication survey. Beijing: China Environmental Science Press, 1990. [金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.]
- [16] Hu Hongjun, Wei Yinxin eds. The freshwater algae of China—System, taxonomy and ecology. Beijing: Science Press, 2006: 23-903. [胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类——系统、分类及生态. 北京: 科学出版社, 2006: 23-903.]
- [17] Wang Jiayi ed. Freshwater rotifers of China. Beijing: Science Press, 1965. [王家楫. 中国淡水轮虫志. 北京: 科学出版社, 1965.]
- [18] Jiang Xiezhi, Du Nanshan eds. Fauna of China (freshwater Cladocera). Beijing: Science Press, 1979: 1-297. [蒋燮志, 堵南山. 中国动物志(淡水枝角类). 北京: 科学出版社, 1979: 1-297.]
- [19] Shen Jiarui ed. Fauna of China (freshwater Copepoda). Beijing: Science Press, 1979: 1-450. [沈嘉瑞. 中国动物志(淡水桡足类). 北京: 科学出版社, 1979: 1-450.]
- [20] Yu Zhonghua, Liu Haibin, Zhang Zhang. Eco-environmental driving factors analysis and countermeasures in Jiangsu section of Shijiu Lake Basin. *Water Resources Protection*, 2010, **26**(6): 70-74. [于忠华, 刘海滨, 张涨. 石臼湖流域江苏段生态环境驱动因素分析. 水资源保护, 2010, **26**(6): 70-74.]
- [21] Wu Li, Feng Weisong, Zhang Tanglin *et al.* The annual fluctuation of zooplankton community and its relation with environmental factors in Lake Xiliang, Hubei Province. *J Lake Sci.*, 2011, **23**(4): 619-625. DOI: 10.18307/2011.0419. [吴利, 冯伟松, 张堂林等. 湖北省西凉湖浮游动物群落周年动态变化及其与环境因子的关系. 湖泊科学, 2011, **23**(4): 619-625.]
- [22] DeMott WR. The role of competition in zooplankton succession. In: Sommer U ed. *Plankton ecology*. Berlin: Springer-Verlag, 1989: 195-252.
- [23] Morgan CA, Ordell JR, Simenstad CA. Sink or swim? Copepod population maintenance in the Columbia River estuarine turbidity-maxima region. *Marine Biology*, 1997, **129**: 309-317.
- [24] Yilmaz IN, Okus E, Yuksek A. Evidences for influence of a heterotrophic dinoflagellate (*Noctiluca scintillans*) on zooplankton community structure in a highly stratified basin. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, **64**: 475-485.
- [25] Wang Qing, Liu Lijun, Yang Yufeng. Response of rotifer community characteristics to environmental factors in a reservoir, Southern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(13): 3385-3395. [王庆, 刘丽君, 杨宇峰. 南方某水库轮虫群落特征及其对环境因子的响应. 生态学报, 2010, **30**(13): 3385-3395.]
- [26] Han Boping, Li Tie, Lin Xuxi eds. Study on the status of eutrophication and control countermeasures of large and medium sized reservoirs in Guangdong Province. Beijing: Science Press, 2003. [韩博平, 李铁, 林旭钿. 广东省大中型水库富营养化现状与防治对策研究. 北京: 科学出版社, 2003.]
- [27] Wang Xiaoming, Song Xiaomei. Investigation on relevance between zooplankton in GaoTang Lake and water environmental factors in Huainan City. *Journal of Beijing Institute of Education*, 2007, **2**(5): 19-23. [王晓明, 宋晓梅. 淮南市高塘湖浮游动物与水环境因子的相关性研究. 北京教育学院学报(自然科学版), 2007, **2**(5): 19-23.]
- [28] Yuan Lin, Sun Lingshuang, Zhu Xinying *et al.* Ecological features of zooplankton community of Hongshan Reservoir in Xinjiang. *Arid Land Geograph*, 2011, **34**(6): 1002-1009. [袁林, 孙玲霜, 朱新英等. 新疆红山水库浮游动物群落结

- 构特征. 干旱区地理, 2011, **34**(6): 1002-1009.]
- [29] Wang Xinyang, Zhang Zhihua, Kong Lingjie *et al.* Physical and chemical characteristics of water quality and characteristics of plankton of Shankou reservoir. *Heilongjiang Fisheries*, 2008, **127**(5): 39-64. [王昕阳, 张志华, 孔令杰等. 山口水库水质理化特征及浮游生物状况调查, 黑龙江水产, 2008, **127**(5): 39-64.]
- [30] Wu Mingshu. Zooplankton community structure and water quality analysis of Taiping Lake in Anhui province [Dissertation]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2015. [吴明珠. 安徽省太平湖水库浮游动物群落结构及水质评价[学位论文]. 上海: 上海师范大学, 2015.]
- [31] Liu Xinpu, Wang Liqing, Zhang Ningtao *et al.* Community structure of metazoan zooplankton and its relationships with environmental factors in Qingcaosha Reservoir of Shanghai, East China. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, **32**(5): 1238-1248. [刘歆璞, 王丽卿, 张宁陶等. 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, 2013, **32**(5): 1238-1248.]
- [32] Zhao Shuaiying, Han Boping. Structure analysis of zooplankton community in a large deep oligotrophic reservoir-Xinfengjiang Reservoir, South China. *J Lake Sci*, 2007, **19**(3): 305-314. DOI:10.18307/2007.0312. [赵帅营, 韩博平. 大型深水贫营养水库——新丰江水库浮游动物群落分析. 湖泊科学, 2007, **19**(3): 305-314.]
- [33] Chen Mianrun, Ouyang Hao, Zhao Shuaiying. Metazoan zooplankton communities in a tropical eutrophic reservoir: Henggang Reservoir, Guangdong. *Ecologic Science*, 2007, **26**(2): 137-142. [陈绵润, 欧阳昊, 赵帅营等. 横岗水库后生浮游动物群落特征, 生态科学, 2007, **26**(2): 137-142.]
- [34] Li Huiming. Zooplankton Community Structure and Succession in a Large Eutrophic Reservoir: Dashahe Reservoir, South China [Dissertation]. Guangzhou: Jinan University, 2012. [李慧明. 热带大型富营养化水库浮游动物群落结构与演替[学位论文]. 广州: 暨南大学, 2012.]
- [35] Wang Tian. Predation and competition: Interspecies interactions of zooplankton communities in Liuxihe Reservoir [Dissertation]. Guangzhou: Jinan University, 2010. [望甜. 捕食与竞争-流溪河水库浮游动物群落的种间关系研究[学位论文]. 广州: 暨南大学, 2010.]
- [36] Ren Jingjing, Lin Qiuqi, Han Boping. Species diversity and community structure of rotifers in pelagic zones of seven reservoirs, Hainan Province. *J Lake Sci*, 2010, **22**(2): 272-280. DOI: 10.18307/2010.0218. [任晶晶, 林秋奇, 韩博平. 热带水库敞水区轮虫种类组成与数量结构——基于海南7座典型水库的分析. 湖泊科学, 2010, **22**(2): 272-280.]
- [37] Paine RT. Food web complexity and species diversity. *The American Naturalist*, 1966, **100**(910): 65-75.
- [38] Lewis WM. Tropical lakes; How latitude makes a difference. In: Schiemer F, Boland KT eds. *Perspectives in tropical limnology*. Netherlands: Amsterdam SPB Academic Publishing, 1996: 43-64.