

广州市不同类型水体轮虫群落结构的时空变动及与理化因子间的关系*

梁迪文^{1,2}, 王庆^{1,2}, 魏南^{1,2}, Miloslav Devetter³, 杨宇峰^{1,2**}

(1: 暨南大学水生生物研究所, 广州 510632)

(2: 水体富营养化与赤潮防治广东省教育厅重点实验室, 广州 510632)

(3: Biology Centre, Institute of Soil Biology, Czech Academy of Sciences, Na Sádkách 7, České Budějovice 370 05, Czech Republic)

摘要: 轮虫是水体中重要的浮游生物类群, 对环境变化敏感, 是水生态系统中食物链及微型食物网的关键环节. 于 2015 年夏季 (7 月) 和冬季 (12 月) 对养殖池塘、水库、广州城市湖泊、珠江河口及珠江河段水域的轮虫和理化环境指标进行了调查分析, 共发现轮虫 26 属、76 种, 其中裂痕龟纹轮虫 (*Anuraeopsis fissa*) 在 7 月河流水体占绝对优势, 但 12 月数量明显减少. 冬季珠江河段和河口水体群落多样性指数与均匀度指数较夏季高, 群落结构较夏季稳定. 调查水体轮虫丰度范围为 33~2625 ind./L, 城市湖泊夏季丰度较高, 冬季有所下降, 而养殖池塘轮虫丰度在冬季有所上升. 群落结构相似性分析 (ANOSIM) 分析表明, 不同类型水体之间差异显著, 尤以湖泊与河流差异性最大, 广布多肢轮虫 (*Polyarthra vulgaris*) 在湖泊贡献率最高, 暗小异尾轮虫 (*Trichocerca pusilla*) 其次; 裂痕龟纹轮虫在河流贡献率最高, 优势种丰度差异是造成湖泊与河流群落结构差异的主要原因. 统计分析表明, 轮虫丰度与叶绿素 a 浓度呈正相关. 冗余分析与 ANOSIM 分析发现广布多肢轮虫在流花湖等叶绿素 a 浓度较高的静态水体中易形成优势; 裂痕龟纹轮虫和角突臂尾轮虫 (*Brachionus angularis*) 在珠江河段等总氮和总磷浓度高的富营养化流动水体中易形成优势. 综合轮虫群落结构和水质特征, 广州市水体富营养化严重, 耐污性轮虫种类多, 应加强城市水生态系统保护和管理.

关键词: 轮虫; 群落结构; 广州市; 富营养化

Spatial and temporal variation in rotifer community structure and the response to environmental factors among different water bodies in Guangzhou City

LIANG Diwen^{1,2}, WANG Qing^{1,2}, WEI Nan^{1,2}, Miloslav Devetter³ & YANG Yufeng^{1,2**}

(1: Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632, P.R.China)

(2: Key Laboratory of Eutrophication and Red Tide Control, Guangzhou 510632, P.R.China)

(3: Biology Centre, Institute of Soil Biology, Czech Academy of Sciences, Na Sádkách 7, České Budějovice 370 05, Czech Republic)

Abstract: Rotifers, a kind of essential plankton in aquatic ecosystem, is sensitive to environmental changes and plays an important role in food chain and microbial foodweb. Environmental factors and rotifer samples were collected from five type of water bodies (lake, pond, river, reservoir and estuary) in July and December, 2015, Guangzhou City. A total of 76 species was identified, which belonging to 26 genera. The dominant species were *Anuraeopsis fissa*, in river in July and decreasing in December. The evenness index and the diversity index of river and estuary in winter were much higher than those in summer. Rotifer abundance ranged from 33 to 2625 ind./L. The abundances of rotifer in city lakes in summer were higher than those in winter, while opposite situation for the ponds. Analysis of similarities (ANOSIM) determined that the community structure was significant different among the different water bodies. These differences came from the abundance of dominant species, especially the river and lakes. Owing to

* 国家自然科学基金项目 (41673080, U1301235) 资助. 2016-11-05 收稿; 2016-12-22 收修改稿. 梁迪文 (1990~), 男, 硕士研究生; E-mail: liangdiwen@sina.com.

** 通信作者; E-mail: tyf@jnu.edu.cn.

the largest contribution rate of lakes made by *Polyarthra vulgaris* and that of river made by *Trichocerca pusilla* and *A. fissa*, the community structure of rotifers was significantly different. Statistical analysis showed that there was a positive correlation between chlorophyll-a concentrations and rotifer abundance. Redundancy analysis and ANOSIM analysis represented that *P. vulgaris* was more likely to dominated in lentic water, such as Lake Liuhua which contented of high chlorophyll-a concentration. *A. fissa* and *Brachionus angularis* were dominant in the Guangzhou segment of the Pearl River, the lotic waters with high total nitrogen and total phosphorus concentrations. In summary, the waters in Guangzhou City were eutrophic and measures should be taken to protect urban aquatic ecosystem.

Keywords: Rotifer; community structure; Guangzhou City; eutrophication

轮虫是浮游动物中的重要组成部分,作为初级消费者连接着生产者与次级消费者,是传统食物网和微型食物网连接的关键环节^[1-2]. 轮虫个体小,繁殖速度快,对水质变化反应敏感,在生物监测中作为环境指示生物^[3],通过调查轮虫群落结构种类组成和密度变化,可作为水生态系统健康程度的评价依据^[3-8].

目前,全球发现单巢目轮虫 1570 种,蛭态目轮虫 461 种,广泛分布于淡水各类型水体,在咸淡水中也发现约 100 种^[9]. 对于轮虫的研究集中在北半球,欧洲对轮虫研究起步早且全面深入. 国内研究起步晚,中国科学院水生所王家楫教授 1961 年出版《中国淡水轮虫志》^[10],记录了 252 种淡水轮虫,随后开始轮虫生态学研究. 无论是轮虫分类学还是生态学、毒理学与欧洲国家相比是十分不足的^[11].

广州是水资源丰富的城市,水体类型多样,既有湖泊、池塘、水库、河流等淡水水体,还包括咸淡水交汇的珠江口部分海域. 珠江是我国三大江河之一,径流量居全国第二位,典型的亚热带季风气候区,高温多雨,4—9 月是珠江汛期^[12]. 天河公园、流花湖等为广州城市景观湖泊,平均水面面积 10 hm²,平均水深 2~3 m^[13]. 关于广州市辖水体轮虫群落结构研究较少,仅有珠江广州河段^[14-16]及广州城市湖泊的初步研究^[12]. 目前关于轮虫群落结构的研究对某单一水体的周期变化研究较多,缺乏多种不同类型水体的比较研究. 在 Silesian upland 矿业湖研究中发现水体电导率是影响轮虫丰度与多样性的重要因素^[17]; Loch Leven 湖的长期研究中发现总磷浓度是影响轮虫群落结构变化的重要因素^[18]; Kaw River 研究中发现,丰水期与枯水期变化是轮虫群落结构变异的重要因素^[19];洞庭湖研究中发现水流速度是影响轮虫群落结构差异的重要因素,水文环境决定了轮虫种类组成与分布规律^[20]. 我们在研究轮虫群落结构往往忽略了不同生态系统下的比较,不同类型水体轮虫群落结构的环境限制因子不同. 本研究对养殖池塘、水库、河口、城市湖泊和珠江广州河段多类型水体开展了初步的调查,并对夏季和冬季轮虫群落结构进行比较研究,旨在一方面丰富国内关于轮虫生物多样性研究以及探讨广州不同类型水体轮虫群落结构与理化因子的关系,另一方面为广州水生态系统结构功能研究和水环境保护提供基础数据.

1 材料与方法

1.1 采样时间与采样点设置

于 2015 年 7 月和 12 月,选取广州市的 15 个采样点,分属于 5 种不同水体(城市湖泊、珠江河段、养殖池塘、水库和河口水域)作为调查对象. 具体样点分别为: 3 个城市湖泊样点,海珠湖(L1)、流花湖(L2)和天河公园湖泊(L3); 4 个珠江广州河段样点,白鹅潭(R1)、新洲码头(R2)、大学城南亭(R3)和大学城北亭(R4); 3 个养殖池塘样点,南沙龙穴岛鱼塘(P1)、龙穴岛虾塘(P2)和钓鱼岛饭店虾塘(P3); 3 个水库样点,上坑水库(RE1)、大金钟水库(RE2)以及和龙水库(RE3); 2 个河口样点,鬼洲大桥(E1)和虎门大桥(E2),具体采样位置见图 1.

1.2 样品采集与分析

轮虫定量样品: 采用 20 μm 浮游生物网过滤浓缩 2 L 水样后,于 50 ml 聚乙烯瓶保存,加入甲醛溶液至终浓度为 4% 固定保存. 轮虫定性样品: 采用 40 μm 浮游生物网垂直和水平拖取,加入甲醛溶液至终浓度为 4% 固定保存. 样品鉴定依据 Koste 分类系统^[21]以及《中国淡水轮虫志》^[10]. 轮虫丰度计数: 将定量样品浓缩至 10 ml,摇匀后吸取 1 ml 于计数框在显微镜下计数,每个样品计数 2 片取平均值. 水温、盐度和 pH 使用 YSI-Plus 多参数水质分析仪现场测定. 总氮和总磷浓度按国家水质标准 GB 3838—2002^[22]测定;叶绿素 a 浓度用丙酮分光光度法测定.

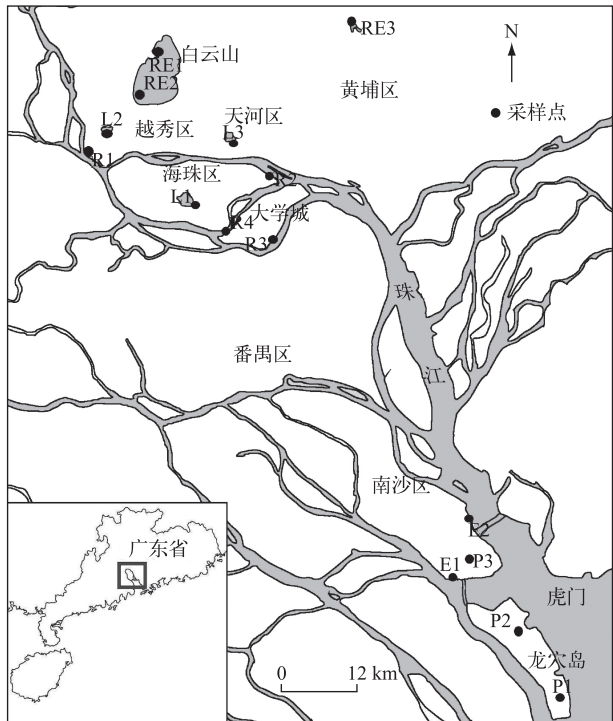


图1 广州城市水体采样点分布
Fig.1 Distributions of the sampling sites in Guangzhou City

1.3 数据处理

用 Excel 软件计算 Shannon-Wiener 多样性指数和均匀度指数^[3,23]后,使用 Origin 9.0 软件进行作图. 使用 SPSS 16.0 软件进行轮虫丰度与环境因子相关性分析,对多样性及均匀度指数进行差异性分析. 使用 PRIMER 软件分析不同轮虫对群落结构间差异的贡献率.

Shannon-Wiener 多样性指数(H'):

$$H' = - \sum_{i=1}^S (n_i/N) \log_2(n_i/N) \tag{1}$$

Pielou 均匀度指数(J):

$$J = H' / \log_2 S \tag{2}$$

式中, S 为种数; n_i 为第 i 种的个体数; N 为浮游动物总个体数.

环境因子与轮虫优势种关系、优势种与不同水体的关系使用 CANOCO 4.5 进行分析. 环境因子数据作对数处理后,对数据进行降维对应分析(DCA),如果长度梯度最大值超过 4,属于单峰型模型,使用典范对应分析(CCA);如果小于 3,属于线性模型,使用冗余分析(RDA)^[14,24].

2 结果

2.1 广州不同类型水体理化环境特征

广州不同类型水体夏季采样点水温在 29.0~32.3℃之间,冬季水温在 17.5~21.2℃之间;夏季水温明显高于冬季. 珠江口广州海域与南沙养殖池塘盐度较高,夏季 P3 盐度达到 4.74‰,冬季 E2 盐度 3.42‰,其余盐度均在 1‰以下. 不同类型水体 pH 在 6~9 之间,偏碱性. 夏季总氮浓度最高值出现在 RE1 高达 10.76 mg/L,总磷浓度最高值出现在 L2,达到 0.24 mg/L;冬季 R1 总氮和总磷浓度最高,分别为 8.26 和 0.37 mg/L. 夏季各样点总氮和总磷平均浓度分别为 2.13 和 0.15 mg/L;冬季分别为 3.16 和 0.20 mg/L. 冬季总氮和总磷浓度与夏季均无显著差异($P>0.05$). 夏季 L2 叶绿素 a 浓度最高,达到 205.38 μg/L,冬季 P1 叶绿素 a 浓度达到

140.99 $\mu\text{g/L}$ (图 2). 根据地表水质量标准^[20], 总磷浓度大部分处于 II 或 III 类水标准; 总氮浓度除冬季珠江河段和夏季上坑水库处于劣 V 类水标准外, 其余优于 IV 类水标准.

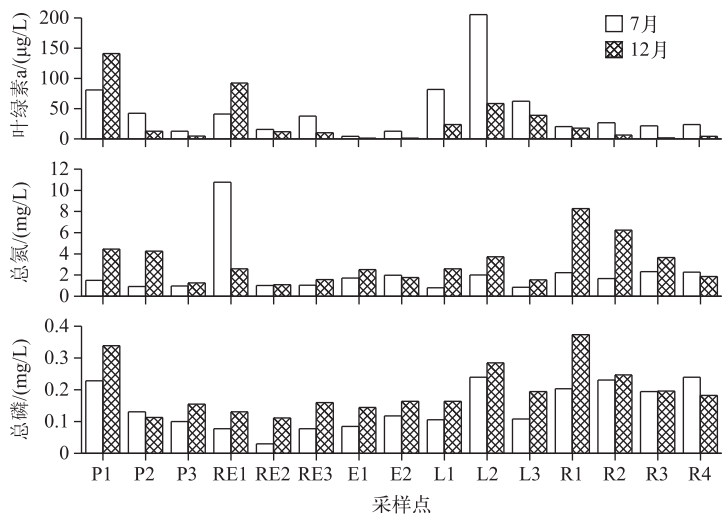


图 2 广州不同类型水体总氮、总磷和叶绿素 a 浓度

Fig.2 The concentration of total nitrogen, total phosphorus and chlorophyll-a in different water bodies in Guangzhou City

2.2 轮虫种类组成和丰度

广州 5 类典型水体共发现轮虫 26 属, 76 种, 臂尾轮属种类较多, 有 14 种, 异尾轮属发现 10 种. 从水体类型来说, 湖泊类水体轮虫种类最多, 共发现 44 种; 水库水体发现 42 种; 河流水体发现 39 种, 而河口与养殖池塘种类较少, 均仅发现 20 种. 从单一水体来说, 珠江白鹅潭 (R1) 种类最多, 达 38 种; 流花湖其次, 为 32 种. 广州市轮虫种类名录见表 1. 裂痕龟纹轮虫在河流水体占绝对优势. 广布多肢轮虫在除 P3 外其他水体均有出现, 在养殖池塘、湖泊占优势. 微型多突轮虫和暗小异尾轮虫广泛分布于各类型水体且在湖泊中比例最高. 角突臂尾轮虫在珠江河段及河口水体所占比例较其他水体高 (图 3).

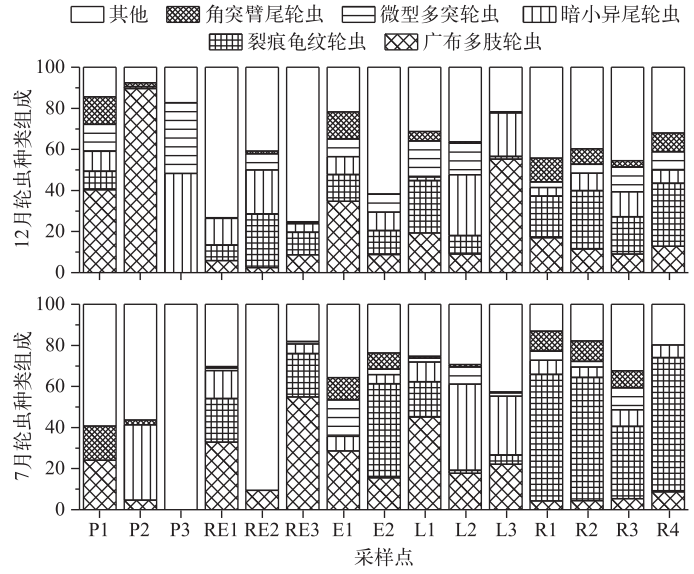


图 3 广州不同类型水体轮虫优势种组成比较

Fig.3 Comparison of the dominant rotifer in the different water bodies in Guangzhou City

表 1 广州不同类型水体轮虫种类组成
Tab.1 The composition of rotifer species in different water bodies in Guangzhou City

属名	种名	拉丁名	采样点															
			P1	P2	P3	L1	L2	L3	RE1	RE2	RE3	E1	E2	R1	R2	R3	R4	
臂尾轮属	萼花臂尾轮虫	<i>Brachionus calyciflorus</i>	+	+		+	+				+	+	+	+	+	+	+	
	壶状臂尾轮虫	<i>B. urceus</i>	+	+													+	
	角突臂尾轮虫	<i>B. angularis</i>	+	+		+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	褶皱臂尾轮虫	<i>B. plicatilis</i>	+	+											+			
	尾突臂尾轮虫	<i>B. caudatus</i>				+	+	+		+	+		+	+	+	+		
	镰形臂尾轮虫	<i>B. falcatus</i>	+			+	+					+	+	+	+	+		
	方形臂尾轮虫	<i>B. quadridentatus</i>						+				+	+	+	+	+	+	
	双叉异棘臂尾轮虫	<i>B. donneri</i>									+							
	裂足臂尾轮虫	<i>B. diversicornis</i>				+	+	+	+		+			+	+			
	十指臂尾轮虫	<i>B. patulus</i>												+	+			
	剪形臂尾轮虫	<i>B. forficula</i>				+	+		+	+								
	双棘臂尾轮虫	<i>B. bidentatus</i>			+													
	蒲达臂尾轮虫	<i>B. budapestinensis</i>						+		+				+	+	+	+	
		<i>B. austrogenitus</i> ^[25]													+	+	+	
多肢轮属	长肢多肢轮虫	<i>Polyarthra dolichoptera</i>				+	+				+	+	+	+	+			
	广布多肢轮虫	<i>P. vulgaris</i>	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	红多肢轮虫	<i>P. remata</i>					+		+									
三肢轮属	长三肢轮虫	<i>Filinia longiseta</i>					+		+			+		+	+			
	跃进三肢轮虫	<i>F. passa</i>				+												
	西氏三肢轮虫	<i>F. novaezealandiae</i>	+		+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	
	迈氏三肢轮虫	<i>F. maior</i>					+							+				
	臂三肢轮虫	<i>F. brachiata</i>				+	+	+						+				
	脾状三肢轮虫	<i>F. opoliensis</i>					+							+				
狭甲轮属	爱德里亚狭甲轮虫	<i>Colurella adriatica</i>								+								
晶囊轮属	前节晶囊轮虫	<i>Asplachna priodonta</i>				+	+		+	+	+					+	+	
	卜氏晶囊轮虫	<i>A. brightwellii</i>				+	+		+	+	+					+	+	
龟纹轮属	裂痕龟纹轮虫	<i>Anuraeopsis fissa</i>	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
龟甲轮属	螺形龟甲轮虫	<i>Keratella cochlearis</i>	+	+	+	+	+	+				+	+	+		+	+	
		<i>K. tecta</i> ^[26]				+		+	+					+		+		
	矩形龟甲轮虫	<i>K. quadrata</i>								+								
腔轮属	热带龟甲轮虫	<i>K. tropica</i>				+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	
	囊形腔轮虫	<i>Lecane bulla</i>				+			+	+	+			+	+	+		
	尖趾腔轮虫	<i>L. closterocerca</i>									+							
	叉爪腔轮虫	<i>L. furcata</i>						+										
	凹顶腔轮虫	<i>L. papuana</i>							+					+				
	棘腔轮虫	<i>L. stichaea</i>								+								
	蹄形腔轮虫	<i>L. ungulata</i>					+											
	史氏腔轮虫	<i>L. stenroosi</i>							+									
	尖角腔轮虫	<i>L. hamata</i>								+								
	月形腔轮虫	<i>Lecane luna</i>								+	+			+		+		
	多突轮属	微型多突轮虫	<i>Liliferotrocha subtilis</i>	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	水轮属	粗足水轮虫	<i>Epiphanes macrourus</i>					+						+	+	+	+	+
椎尾水轮虫		<i>E. senla</i>												+				
一种水轮虫		<i>Epiphanes</i> sp.			+									+	+	+	+	

续表 1

属名	种名	拉丁名	采样点																
			P1	P2	P3	L1	L2	L3	RE1	RE2	RE3	E1	E2	R1	R2	R3	R4		
六腕轮属	奇异六腕轮虫	<i>Hexarthra mira</i>	+		+	+					+			+	+	+	+	+	
胶鞘轮属	一种胶鞘轮虫	<i>Collotheca</i> sp.						+			+			+	+	+	+	+	
异尾轮属	暗小异尾轮虫	<i>Trichocerca pusilla</i>	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	
	棘异尾轮虫	<i>T. stylata</i>	+			+	+	+	+		+	+			+	+	+	+	
	圆筒异尾轮虫	<i>T. cylindrica</i>					+	+	+	+	+								
	纵长异尾轮虫	<i>T. elongata</i>					+												
	罗氏异尾轮虫	<i>T. rousseoeti</i>							+										
	冠饰异尾轮虫	<i>T. lophoessa</i>						+											
	等棘异尾轮虫	<i>T. similis</i>	+			+	+	+	+	+	+	+			+	+	+	+	
	田奈异尾轮虫	<i>T. dixon-nuttalli</i>						+	+						+				
	鼠异尾轮虫	<i>T. rattus</i>						+	+	+	+								
	刺盖异尾轮虫	<i>T. capucina</i>					+	+	+	+	+								
	镜轮属	微凸镜轮虫	<i>Testudinella mucronata</i>									+							
		裙切镜轮虫	<i>T. emarginula</i>									+							
		盘镜轮虫	<i>T. patina</i>									+							
腹尾轮属	柱足腹尾轮属	<i>Gastropus stylifer</i>															+	+	
	腹足腹尾轮虫	<i>G. hyplopus</i>															+	+	
无柄轮属	无柄轮虫	<i>Ascomorpha</i> sp.										+							
疣毛轮属	尖尾疣毛轮虫	<i>Synchaeta stylata</i>			+				+	+			+						
	长圆疣毛轮虫	<i>S. oblonga</i>			+						+								
枝胃轮属	水生枝胃轮虫	<i>Enteroplea lacustris</i>															+		
哈林轮虫属	一种哈林轮虫	<i>Harringia</i> sp.													+	+			
狭甲轮属	钩状狭甲轮虫	<i>Coleurella uncinata</i>					+	+											
皱甲轮属	截头皱甲轮虫	<i>Ploesomatr uncatum</i>			+						+			+					
鞍甲轮属	盘状鞍甲轮虫	<i>Lepadella patella</i>					+			+	+	+	+	+					
须足轮虫属	大肚须足轮虫	<i>Euchlanus dilatata</i>											+			+	+		
轮虫属	长足轮虫	<i>Rotaria neptunia</i>														+	+	+	
巨头轮属	一种巨头轮虫	<i>Cephalodella</i> sp.													+	+			
高跷轮属	高跷轮虫	<i>Scaridium longicaudum</i>																+	
中吻轮属	一种狼中吻轮属	<i>Encentrum</i> sp.					+		+	+							+	+	

夏季流花湖(L2)轮虫丰度最高,达到 2625 ind./L,其次是冬季 P1 鱼塘,达到 2005 ind./L,而夏季虾塘(P3)最低,只有 32 ind./L. 珠江流域 R3、R4 夏季和冬季轮虫密度变化不大,养殖池塘冬季轮虫丰度较夏季有明显上升,而城市湖泊在冬季有所下降. 河口地区盐度较高,轮虫丰度较其他水体低. 7 月裂痕龟纹轮虫 R1 丰度高达 435 ind./L,但 12 月数量明显减少,约为夏季数量的一半(217 ind./L). 湖泊水体 7 月平均丰度最高,达到 1741±778 ind./L,河口水体 12 月最低,只有 71±19 ind./L(图 4).

2.3 轮虫群落结构差异

PRIMER ANOSIM (One-way) 检验轮虫群落结构发现,广州水体夏、冬季总体差异性不显著 ($P>0.05$),而不同水体类型之间差异显著 (Global $R=0.268, P<0.01$). PRIMER ANOSIM 分析 5 种类型水体差异性发现,池塘与湖泊($r=0.161, 0.01<P<0.05$)、池塘与河流($r=0.255, 0.01<P<0.05$)、水库与湖泊($r=0.219, 0.01<P<0.05$)、水库与河流($r=0.421, P<0.01$)、河口与湖泊($r=0.508, 0.01<P<0.05$)和湖泊与河流($r=0.543, P<0.01$)之间差异显著. 不同水体之间的差异多由不同物种在不同水体间的丰度差异造成. 差异性最大的是湖泊与河流,其差异主要来自优势种丰度差异. 轮虫平均丰度取对数处理后进行 SIMPER 分析,结果表明广布多肢轮虫在造成湖泊与河流水体群落结构差异中贡献率最高,暗小异尾轮虫其次,上述 2 种轮虫在湖泊水体占优势,但河流水体优势地位被裂痕龟纹轮虫取代(表 2).

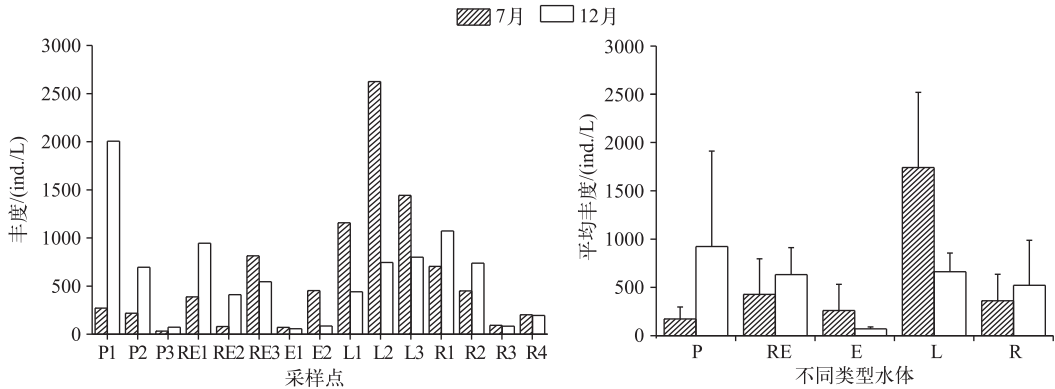


图4 广州各水体7月和12月轮虫丰度和不同类型水体平均丰度
Fig.4 Rotifer abundance in July and December and average abundance of rotifer in different water bodies in Guangzhou City

2.4 轮虫群落结构多样性

Paired-samples *T*-test 显示,广州不同类型水体冬季与夏季多样性指数和均匀度指数均无显著差异 ($P>0.05$);而冬季珠江河段和河口水体群落多样性指数与均匀度指数均较夏季高 ($P<0.05$). 多样性指数和均匀度指数反映珠江河段和河口水域轮虫群落结构在冬季较夏季稳定;而养殖池塘均匀度指数冬季较夏季低,P2 池塘冬季群落结构趋向单一,生态系统不稳定(图5).

2.5 轮虫群落结构与环境因子的相关性

SPSS 统计分析表明:轮虫丰度与叶绿素 a 浓度呈极显著正相关($r=0.85$, $P<0.001$). 臂尾轮属丰度与叶绿素 a 浓度呈显著正相关 ($P<0.05$);多肢轮属丰度与叶绿素 a 浓度呈极显著正相关 ($P<0.001$),而裂痕龟纹轮虫丰度与其没有相关性 ($P>0.05$).

使用 CANOCO 4.5 对广州典型水体轮虫主要种类进行排序分析. DCA 分析显示,排序轴最大梯度长度为 1.955,表明轮虫群落对生态梯度响应为线性模型,因此利用线性模型的 RDA 排序方法分析环境因子对轮虫群落结构的影响是比较合适的^[24]. RDA 冗余分析是在环境因子特征变量构成的空间上,对轮虫种类进行排序作图,实现轮虫种类和环境因子的对应排序^[13]. 使用 Monte Carlo method 筛选出影响较大的 4 种环境因子,作轮虫种类、环境因子与采样点关系图(图6),RDA 统计信息见表3和表4.

RDA 排序的全部特征值解释了轮虫群落变异程度的 57%,前两轴共解释了轮虫变异程度的 51.3%. 其中,RDA 对叶绿素 a 浓度的解释度最高. 叶绿素 a 和总磷浓度是影响轮虫时空分布的最主要因素;总磷浓度与水温对轮虫分布也有一定影响. 从轮虫分布来看(图6),尾突臂尾轮虫和裂痕龟纹轮虫受总氮浓度的影响较大,与叶绿素 a 浓度没有相关性,RDA 分析结果与 SPSS 评价结果一致. 角突臂尾轮虫和萼花臂尾轮虫受总磷浓度影响较大;暗小异尾轮虫和广布多肢轮虫受叶绿素 a 浓度的影响较其他因素大;裂痕龟纹轮虫分布与水温影响较大.

通过分析轮虫种类与采样点之间的关系发现,裂痕龟纹轮虫多度值在 R1 最大,且在珠江河段(R2、R3

表2 构成湖泊水体与河流水体之间轮虫群落结构差异的主要物种及其贡献率

Tab.2 Dominant species and its contribution rate of the difference between water bodies of lakes and rivers

物种	平均丰度*		贡献率/%
	湖泊水体	河流水体	
广布多肢轮虫	16.80	4.02	13.07
暗小异尾轮虫	15.76	4.65	10.48
裂痕龟纹轮虫	8.42	10.11	6.21
棘异尾轮虫	7.00	0	6.12
微型多突轮虫	7.74	3.78	4.66
刺盖异尾轮虫	5.02	0.79	4.45
圆筒异尾轮虫	3.61	0	3.63
角突臂尾轮虫	3.54	4.31	3.44
裂足臂尾轮虫	4.04	0.54	3.36
萼花臂尾轮虫	3.93	2.35	2.74
田奈异尾轮虫	2.86	0.40	2.60

* 平均丰度数据经过对数处理.

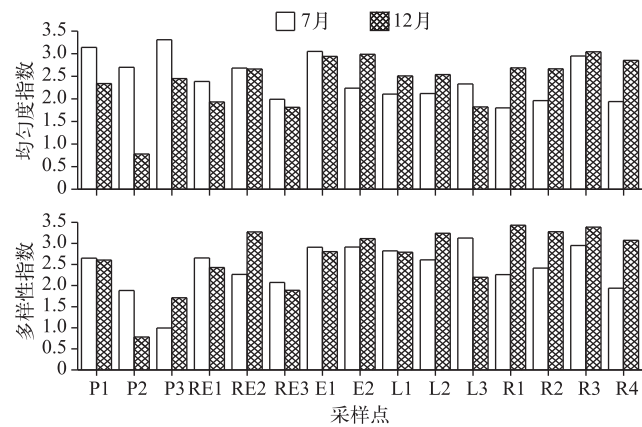


图 5 广州不同类型水体轮虫 Shannon-Wiener 多样性指数及 Pielou 均匀度指数

Fig.5 Shannon-Wiener diversity index and Pielou evenness index of rotifer community structure in different water bodies in Guangzhou City

表 3 广州不同类型水体轮虫群落结构特征 RDA 分析统计信息

Tab.3 Statistical information of RDA between species and environmental factors in different water bodies in Guangzhou City

统计	轴 1	轴 2	轴 3	轴 4
特征值	0.437	0.076	0.047	0.010
种类和环境因子相关性	0.905	0.782	0.901	0.342
种类数据累计百分比/%	43.7	51.3	56.0	57.0
种类与环境因子相关性累计百分比/%	76.8	90.1	98.3	100.0
全部特征值总和	1			
全部典范特征值总和	0.57			

表 4 前两排序轴与环境因子的相关系数

Tab.4 Correlation coefficient between environmental factors and the first two ordination axes

环境因子	SPEC AX1	SPEC AX2	ENVI AX1	ENVI AX2
叶绿素 a 浓度	0.8341 **	0.0638 **	0.9217 **	0.0816 **
总氮浓度	0.0021	0.0638	0.0023	0.6735 **
总磷浓度	0.3850 *	0.0638 **	0.4254 *	0.8155 **
水温	0.1509	0.0638	0.1667	-0.7898 **

* 表示 $P<0.05$; ** 表示 $P<0.01$.

和 R4)的多度值远大于养殖池塘和水库类水体. 广布多肢轮虫和暗小异尾轮虫多度均都在南沙鱼塘(P1)最大,流花湖(L2)次之. 从采样点之间距离值来看,珠江河流水体轮虫群落组成相似;L2 与 P1 叶绿素 a 浓度较高的静态水体群落结构组成相似;水库类水体与养殖池塘、城市湖泊水体群落组成较为相似;河口生境较为特殊,群落结构较为特殊.

3 讨论

3.1 广州市不同类型水体水质状况

已有研究表明,氮磷营养盐输入过度是引起水体富营养化的主要原因,湖泊富营养化往往导致蓝藻过度繁殖形成水华^[27]. 从化学指标角度评价,广州水体皆处于不同程度富营养化状态. 根据水体富营养化调查规范,总磷浓度高于 0.1 mg/L,总氮浓度高于 1.5 mg/L 属于中度富营养化水平^[15]. 珠江河段、城市湖泊和养殖池塘总氮和总磷浓度冬季已达到富营养化水平;叶绿素 a 浓度除河口外均高于 10 $\mu\text{g/L}$,达到富营养化水平,流花湖更高达 205.382 $\mu\text{g/L}$,处于极度富营养化. 15 个采样点中,仅有大金钟水库(RE2)处于中营养水平,其余水体皆达

到富营养化水平. 虽然与 2005—2010 年广州城市河段和湖泊数据^[13,15,23]相比水质状况有所改善,但整体水质仍处于富营养化状态. 轮虫是连接生产者与次级消费者的重要桥梁,也是微型食物网的重要组成部分. 它对环境变化敏感,被作为水生态系统中的环境指示性生物^[3]. 轮虫可划分为寡污型、中污型、重污型等指示种. 关于轮虫指示种,不同学者持不同观点,但是对于某些富营养指示种看法趋于一致^[14]. 广州珠江河段水体中优势种类裂痕龟纹轮虫、暗小异尾轮虫、微型多突轮虫和臂尾轮属一种均属于富营养化种类,反映广州

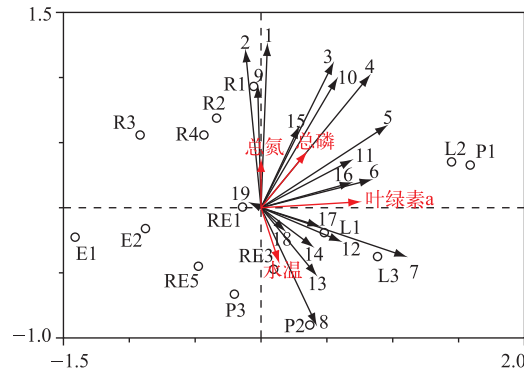


图6 广州水体轮虫种类与环境因子、采样点间的 RDA 排序图(1: 裂痕龟纹轮虫, 2: 尾突臂尾轮虫, 3: 西式三肢轮虫, 4: 蓼花臂尾轮虫, 5: 微型多突轮虫, 6: 暗小异尾轮虫, 7: 广布多肢轮虫, 8: 田奈异尾轮虫, 9: 热带龟甲轮虫, 10: 角突臂尾轮虫, 11: 棘异尾轮虫, 12: 裂足臂尾轮虫, 13: 刺盖异尾轮虫, 14: 等棘异尾轮虫, 15: 褶皱臂尾轮虫, 16: 剪形臂尾轮虫, 17: 前节晶囊轮虫, 18: 圆筒异尾轮虫, 19: 螺形龟甲轮虫)

Fig.6 RDA ordination among species, environmental factors and sites in water bodies in Guangzhou City

水体富营养化严重。2004—2005 年间广州珠江河段轮虫群落结构初步研究发现轮虫 65 种, 优势种有裂痕龟纹轮虫、角突臂尾轮虫、暗小异尾轮虫和微型多突轮虫等富营养化种类^[15]; 2010—2013 年期间在珠江广州河段发现轮虫 48 种, 优势种裂痕龟纹轮虫、微型多突轮虫和暗小异尾轮虫为富营养化种类^[23], 与本次研究的优势种结果一致。生物角度评价结果与化学指标分析结果共同表明, 从 2004 年至今广州市不同类型水体始终处于富营养化状态, 政府相关部门应采取相关措施, 继续加强珠江及城市水体生态系统保护和管理工作。

3.2 不同类型水体轮虫群落结构差异

钱方平等^[28]研究发现, 湖泊处于中等营养水平时生物群落的结构复杂, 物种多样性高; 而在极端的贫营养或者超富营养条件下群落结构简单, 物种多样性低。均匀性的降低可归结于第一优势种优势度的提高, 随着营养水平的升高, 第一优势种比群落中其他种类占有更多的生态位而间接排斥其他种类并可能取得竞争优势, 导致群落结构趋于简单, 均匀性和多样性下降。本研究中冬季珠江河段和河口水体群落多样性指数与均匀度指数较夏季高, 是因为裂痕龟纹轮虫优势度下降造成。不同类型水体轮虫群落结构有显著差异, 这些差异是由优势种的丰度差异造成, 不同类型水体生境差异影响了轮虫的丰度与分布。不同类型水体属于不同生态系统, 特殊的水文条件影响轮虫的分布, 高流速的水体不适宜游泳能力弱的轮虫生活^[20]。在南美洲 Itaipu 水库研究中发现, 轮虫在静态水体中的丰度较水流速度快的支流中高, 但均匀度指数较低。轮虫丰度增加和种类组成的改变与水生植物和悬浮物有关^[29]。湖泊为静态水体, 且叶绿素 a 浓度较高, 使得以浮游植物为食的广布多肢轮虫在群落中占优势; 暗小异尾轮虫有 2 个不相等的趾, 使得其可以附着于水生植物上, 在湖泊水体中获得适宜的生存环境。河流和河口水流速度较快, 裂痕龟纹轮虫与有尾足的浮游性种类角突臂尾轮虫适应该水体环境。一方面, 珠江广州河段氮磷浓度高, 可溶性有机物和细菌为口径较小的裂痕龟纹轮虫提供丰富食物, 使其在该生态系统中占优势; 另一方面, 流动性水体轮虫种类组成与上游静态水体有关^[29], 裂痕龟纹轮虫可能来源于珠江上游富营养化静态水体。池塘受人为养殖活动影响, 轮虫丰度变化大。当养殖高密度鱼虾时, 水体富营养化严重^[30], 轮虫丰度升高, 当收获后无养殖活动时轮虫丰度下降。养殖池塘轮虫种类数远少于湖泊、水库等水体, 可能是由于人类活动破坏池塘生态系统的稳定性。

3.3 环境因子对轮虫丰度与分布的影响

ANOSIM 分析发现轮虫群落结构的差异是由优势种的丰度差异造成, 而不同类型水体环境因子差异影响轮虫丰度与分布。众多研究表明, 叶绿素 a 浓度是影响轮虫丰度变化的重要因素^[27-28]。轮虫个体微小生活史周期短, 属于 r-对策生物, 以浮游植物、细菌、有机碎屑为食^[31]。水体富营养化使得轮虫有充足的食物在短

期内大量繁殖,种群密度增加。轮虫种类对食物性质与大小有偏好,富营养指示种如臂尾轮虫主要以微藻和有机碎屑为食,寡营养指示种如独角聚花轮虫(*Conochilus unicomis*)以微藻为食,因而水体富营养化水平变化改变轮虫种类组成^[32]。本研究中,城市湖泊水体轮虫丰度在冬季有明显下降,而 RE1 轮虫丰度在冬季明显上升,均匀度有所下降,这与叶绿素 a 浓度变化密切相关。城市湖泊、水库水体轮虫群落变化受微藻丰度影响显著,且丰度随着叶绿素 a 浓度减少而下降。Portinho 等^[29]认为与动态水体相比,浮游植物生物量在静态水体中对于轮虫群落结构的影响更为重要。SPSS 分析表明,广布多肢轮虫丰度与叶绿素 a 浓度呈极显著正相关($P < 0.001$),RDA 分析发现广布多肢轮虫丰度在 P1、L2 多度值最大,这 2 个样点水体叶绿素 a 浓度远高于其他水体。广布多肢轮虫以微藻为食,藻类大量繁殖为其提供充足食物来源,在群落中占据优势。SPSS 分析表明,裂痕龟纹轮虫丰度与叶绿素 a 浓度没有相关性,表明其对微藻依赖性不强;与总磷和总氮浓度相关性稍大,可能与其个体长在 70~110 μm 之间,口径较小,主要以细菌、DOM 为食有关。珠江河段总氮和总磷浓度较高,DOM 含量较丰富,为裂痕龟纹轮虫、角突臂尾轮虫等提供充足食物,从而在该水体中占优势。另外,径流量是影响珠江轮虫丰度的主要因素之一。珠江汛期为 4—9 月,高径流量使氮磷浓度下降,同时也稀释了轮虫丰度^[14]。河口为半咸水,淡水与海水交汇盐度变化大,盐度是限制轮虫多样性与密度的重要环境因子^[17]。随着盐度升高,轮虫种类与丰度减少,是导致河口轮虫丰度与种类数低于湖泊水库的重要原因。水流速度也是影响轮虫丰度与分布的环境因子之一,高流速水体不适宜游泳能力弱的轮虫生长繁殖^[20]。

4 参考文献

- [1] Arndt H. Rotifers as predators on components of the microbial web (bacteria, heterotrophic flagellates, ciliates)—A review. *Hydrobiologia*, 1993, **255**(1): 231-246.
- [2] Devetter M, Sed'a J. Rotifer fecundity in relation to components of microbial food web in a eutrophic reservoir. *Hydrobiologia*, 2003, **504**(1/2/3): 167-175.
- [3] 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.]
- [4] Duggan IC, Green JD, Shiel RJ. Distribution of rotifer assemblages in North Island, New Zealand, lakes: relationships to environmental and historical factors. *Freshwater Biology*, 2002, **47**(2): 195-206.
- [5] Gutkowska A, Paturej E, Kowalska E. Rotifer trophic state indices as ecosystem indicators in brackish coastal waters. *Oceanologia*, 2013, **55**(4): 887-899.
- [6] Aboul ezz SM, Abdelaziz NE, Abouzaid MM *et al.* Environmental assessment of El-mex Bay, southeastern mediterranean by using rotifera as a plankton bio-indicator. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, 2014, **40**(1): 43-57.
- [7] El-shabrawy GM, Germoush MO. Seasonal changes and abundance of rotifers in a shallow Manzalah Lake (Egypt). *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2014, **14**(3): 243-252.
- [8] Li Gongguo, Yu Zuoming. Community structure of rotifer and ecological assessment of water quality in Qingdao lake. *J Lake Sci*, 2003, **15**(2): 169-176. DOI:10.18307/2003.0211. [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): 169-176.]
- [9] Segers H. Global diversity of rotifers (Rotifera) in freshwater. *Hydrobiologia*, 2008, **595**(1): 49-59.
- [10] Wang Jiaji ed. Freshwater rotifers of China. Beijing: Science Press, 1961. [王家楫. 中国淡水轮虫志. 北京: 科学出版社, 1961.]
- [11] Wu Qiuting. Species diversity of Lecane, Brachionus and Trichocerca in Hainan Island, China. Guangzhou: Jinan University, 2012. [吴秋婷. 海南岛腔轮属, 臂尾轮属和异尾轮属的种类多样性[学位论文]. 广州: 暨南大学, 2012.]
- [12] Guangzhou Yearbook Press ed. Guangzhou Yearbook. Guangzhou: Guangzhou Yearbook Press, 2014. [广州年鉴社. 广州年鉴. 广州: 广州年鉴社, 2014.]
- [13] Ru Pengling, Wang Qing, Yang Yufeng. Studies on community structure of rotifers in the Guangzhou segment of the River Pearl and the city lakes. *Journal of Jinan University: Natural and Medical Science Edition*, 2007, **28**(5): 524-530, 536. [茹鹏凌, 王庆, 杨宇峰. 广州城市河段和湖泊轮虫群落结构的研究. 暨南大学学报: 自然科学与医学版, 2007, **28**(5): 524-530, 536.]

- [14] Wang Qing, Hou Lei, Cheng Shi *et al.* Community structure of rotifers and ecological assessment of water quality in Modaomen of the Pearl River Estuary. *Ecology and Environmental Science*, 2014, **28**(5): 824-833. [王庆, 侯磊, 陈实等. 珠江口磨刀门轮虫群落结构特征与水质生态学评价. 生态环境学报, 2014, **28**(5): 824-833.]
- [15] Wang Qing, Yang Yufeng. Primary study on rotifer community structure in the Guangzhou segment of the river pearl. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2007, **31**(2): 233-239. [王庆, 杨宇峰. 珠江广州河段轮虫群落结构的初步研究. 水生生物学报, 2007, **31**(2): 233-239.]
- [16] Zhang Honggang, Cui Baoshan, Zhang Zhiming *et al.* Species diversity and distribution for zooplankton in the intertidal wetlands of the Pearl River estuary, China. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, **13**(2): 2383-2393.
- [17] Bielafiska-Grajner I, Gładysz A. Planktonic rotifers in mining lakes in the Silesian Upland: Relationship to environmental parameters. *Limnologia-Ecology and Management of Inland Waters*, 2010, **40**(1): 67-72.
- [18] May L, Spears BM, Dudley BJ *et al.* The response of the rotifer community in Loch Leven, UK, to changes associated with a 60% reduction in phosphorus inputs from the catchment. *International Review of Hydrobiology*, 2014, **99**(1/2): 65-71.
- [19] Rougier C, Pourriot R, Lam-Hoai T *et al.* Ecological patterns of the rotifer communities in the Kaw River estuary (French Guiana). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, **63**(1): 83-91.
- [20] Shao Guosheng. The study on ecological distribution of rotifers in Dongting Lake. *Transaction of Oceanology and Limnology*, 1992, **4**: 41-49. [邵国生. 洞庭湖轮虫生态分布的研究. 海洋湖沼通报, 1992, **4**: 41-49.]
- [21] Koste W. Rotatoria: Die R dertiere Mitteleuropas. Berlin: Gebrüder Borntraeger, 1978.
- [22] Ministry of Environmental Protection. GB 3838-2002 Environmental quality standards for surface water. Beijing: Ministry of Environmental Protection, 2002. [国家环境保护总局. GB 3838-2002. 地表水环境质量标准. 北京: 国家环境保护总局, 2002.]
- [23] Yuan Danni, Wang Qing, Chen Liangdong *et al.* Rotifer communities structure and eutrophication analysis in the low salinity river segment, Guangdong, South China. *Journal of Jinan University: Natural Science and Medicine Edition*, 2014, **35**(1): 8-15. [袁丹妮, 王庆, 陈亮东等. 广州低盐河段轮虫群落结构特征及富营养化状况分析. 暨南大学学报: 自然科学与医学版, 2014, **35**(1): 8-15.]
- [24] Lepš J, Šmilauer P. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [25] Kuczyński D. Rotifers from Reconquista River, Argentina: The genus *Brachionus*, with descriptions of new species. *Hydrobiologia*, 1991, **215**(2): 135-152.
- [26] Gopko M, Telesh IV. Estuarine trophic state assessment: New plankton index based on morphology of Keratella rotifers. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2013, **130**(3): 222-230.
- [27] Zeng Haiyi, Zhong Ping, Zhao Xuefeng *et al.* Response of metazoan zooplankton communities to ecological restoration in a tropical shallow lake. *J Lake Sci*, 2016, **28**(1): 170-177. DOI:10.18307/2016.0120. [曾海逸, 钟萍, 赵雪枫等. 热带浅水湖泊后生浮游动物群落结构对生态修复的响应. 湖泊科学, 2016, **28**(1): 170-177.]
- [28] Qian Fangpin, Xi Yilong, Wen Xinli *et al.* Eutrophication impact on community structure and species diversity of rotifers in five lakes of Anhui. *Biodiversity Science*, 2007, **15**(4): 344-355. [钱方平, 席贻龙, 温新利等. 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, 2007, **15**(4): 344-355.]
- [29] Portinho JL, Perbiche-Neves G, Nogueira MG. Zooplankton community and tributary effects in free-flowing section downstream a large tropical reservoir. *International Review of Hydrobiology*, 2016, **101**(1/2): 48-56.
- [30] Hu Xiaojuan, Li Zhuojia, Cao Yuchang *et al.* Progress in research of phosphorus budgets in aquaculture pond ecosystem and phosphate-solubilizing microorganisms. *Journal of Safety and Environment*, 2010, **10**(1): 7-11. [胡晓娟, 李卓佳, 曹煜成等. 养殖池塘生态系统中磷的收支及解磷微生物的研究进展. 安全与环境学报, 2010, **10**(1): 7-11.]
- [31] Pejler B. Relation to habitat in rotifers. *Hydrobiologia*, 1995, **313-314**(1): 267-278.
- [32] Lin Qiuqi, Zhao Shuaiying, Han Boping. Rotifer distribution in tropical reservoir, 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.]