

南方某水库轮虫群落特征及其对环境因子的响应

王 庆¹, 刘丽君², 杨宇峰^{1,*}

(1. 暨南大学水生生物研究所, 广州 510632; 2. 深圳市水务集团, 深圳 518031)

摘要: 于 2006 年 8 月至 2007 年 8 月, 对广东省某水库 4 个站点轮虫群落的周年变化进行了调查分析, 同时测定了浑浊度、叶绿素、总氮、总磷等理化因子。调查期间, 共记录轮虫 41 种, 以臂尾轮属和异尾轮属种类居多, 全年以广布多肢轮虫 (*Polyarthra vulgaris*) 和尖尾疣毛轮虫 (*Synchaeta stylata*) 为主要优势种; 轮虫丰度范围为 6—1966 ind./L, 以库心和大坝处的轮虫丰度较高, 高峰期出现在夏秋季。相关分析显示叶绿素浓度对轮虫群落有重要影响。典范对应分析 (CCA) 表明, 采样站点具有明显的空间异质性。CCA 分析还表明浑浊度和透明度是影响轮虫空间分布的重要因子, 水温和叶绿素浓度是影响轮虫群落结构季节变化的主要因子。CCA 排序可将轮虫分为 3 个类群, 优势种广布多肢轮虫位于 CCA 坐标轴的原点附近, 表明其所受环境因子影响较小。根据相关加权营养状态指数 (TLI), 该水库处于中营养型。

关键词: 轮虫; 时空分布; 浑浊度; 典范对应分析; 营养评价

Response of rotifer community characteristics to environmental factors in a reservoir, Southern China

WANG Qing¹, LIU Lijun², YANG Yufeng^{1,*}

1 Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632, China

2 Shenzhen Water Group, Shenzhen 518032, China

Abstract: A survey of rotifers was carried out at four sites in a reservoir in Guangdong Province, from August 2006 to August 2007. Turbidity, Chlorophyll a (Chl a), Total Nitrogen (TN), Total Phosphorus (TP) were measured. Forty-one species of rotifers were recorded during the survey. The dominant species were *Polyarthra vulgaris* and *Synchaeta stylata*. The rotifer densities ranged from 6 to 1966 ind./L. There was a significant positive correlation between rotifer densities and chlorophyll a concentrations. Canonical correspondence analysis (CCA) was applied to explore the relationship between rotifer species and environmental parameters. The result of CCA showed that turbidity, transparency, temperature and chlorophyll a concentration were the most important factors regulating the composition and temporal-spatial dynamics of the rotifers community. Trophic state indexes (TLI) based on data of TN, TP, COD_{MN} and chlorophyll a concentration ranged from 30 to 40, indicated the reservoir was in the meso-trophic level.

Key Words: rotifer; spatio-temporal distribution; turbidity; canonical correspondence analysis; nutrition evaluation

轮虫是浮游动物群落中的重要组成部分, 是水库生态系统中微食物网的重要环节, 它们对保持水库生态平衡、调节水库的自净能力起着重要作用^[1-3]。轮虫个体较小, 繁殖快, 对水质变化反应敏感, 调查轮虫群落的种类组成和丰度变化, 可以快速获知水质的变化情况和水体的营养状况^[4-6], 轮虫群落种类组成是水体营养水平、理化特征及生境多样性的表征^[7]。轮虫对浮游动物群落的贡献随着水体富营养化水平而增加^[6]。影响轮虫群落组成与动态的因素有水温、浑浊度、营养盐等理化因子以及食物竞争、捕食等生物因素^[1,8-9]。

基金项目: 建设部水专项 (2009ZX07423-003)

收稿日期: 2009-05-14; **修订日期:** 2009-09-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tyf@jnu.edu.cn

热带地区水温较高,淡水水体与温带地区相比,浮游动物种类少、丰度低,并且以小型个体为主,轮虫在数量上占较大优势^[10]。

广东省地处热带-亚热带地区,水库是主要的供水水源。近 20a 来随着经济的迅速发展,污废水排放量大幅度增长,部分水库水质日趋下降,富营养化趋势明显,而轮虫作为反映营养状态的重要类群,研究其在水库中的物种多样性和动态变化对了解水库生态系统健康评估和水质监测具有重要意义^[5]。为了掌握南方某水库轮虫群落的周年动态变化和水质状况,2006 年 8 月至 2007 年 8 月进行了每月 1 次的调查,以探讨水库的轮虫群落变化及其与水体营养状况的关系,为实现水库可持续利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样时间与采样点布置

2006 年 8 月至 2007 年 8 月,根据水库(N22°34'—22°36', E114°08'—114°10')的地形和水质状况,分别在水库的东江入水口、硝化池出口、库心和取水口(图 1)进行每月 1 次的调查和采样。

1.2 样品的采集与分析

透明度(SD)用萨氏盘测定。叶绿素 a 用丙酮分光光度法测定^[11]。其它理化指标(如总氮、总磷、溶解氧、pH、浑浊度等)由深水集团环境监测中心提供。轮虫定量样品通过 20 μm 浮游生物网过滤浓缩 2L 混合水样,收集至 100mL 聚乙烯瓶中,甲醛溶液固定(最终浓度约 4%)。定性样品分固定样品和活体样品,用 35 μm 的浮游生物网垂直和水平拖取,活体样品便于实验室鉴定软体类轮虫,固定样品用甲醛溶液固定。定量样品带回实验室沉淀浓缩,显微镜下鉴定种类并计数^[12]。定性样品分类参照文献鉴定^[13-15]。

1.3 综合营养状态指数计算公式

综合营养状态指数采用卡尔森指数方法^[16],计算公式如下:

$$TLI(\sum) = \sum_{j=1}^m W_j \cdot TLI(j)$$

式中, $TLI(\sum)$ 为综合营养状态指数; W_j 为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重; $TLI(j)$ 为代表第 j 种参数的营养状态指数。

以 Chl a 作为基准参数,则第 j 种参数的归一化的相关权重计算公式为:

$$W_j = \frac{r_{ij}^2}{\sum_{j=1}^m r_{ij}^2}$$

式中, r_{ij} 为第 j 种参数与基准参数 Chl a 的相关系数; m 为评价参数的个数。

1.4 数据分析

典范对应分析(Canonical Correspondence analysis, CCA)是一种非线性多元直接梯度分析方法,它把对应分析与多元回归结合起来,可以结合多个环境因子,包含的信息量大,结果直观明显,能更好地反映群落与环境的关系^[17-18],被广泛应用于生物群落与环境因子间复杂关系的研究^[19]。用于 CCA 排序的物种需满足 2 个条件:该物种在各站点出现的频度 ≥ 6 ;该物种在至少一个站点的相对丰度 $\geq 1\%$ 。采用轮虫丰度指标来反

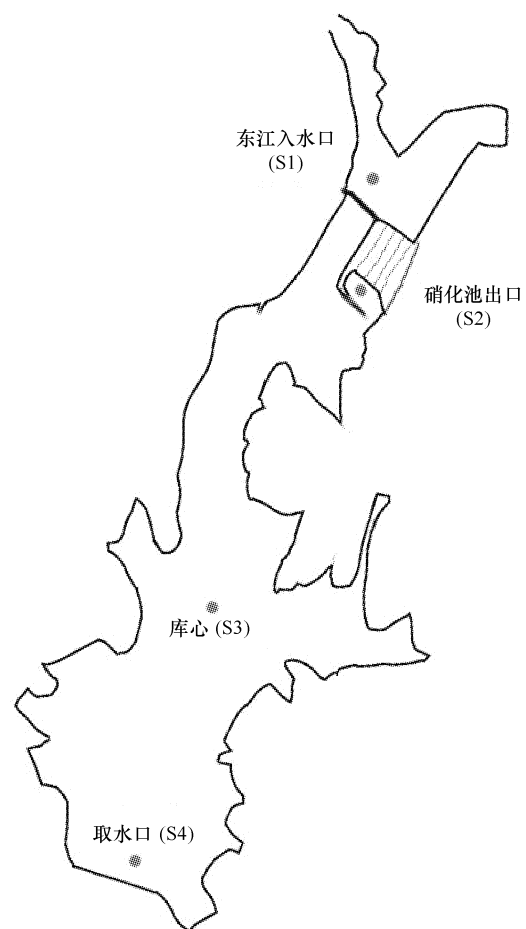


图 1 水库采样站位图

Fig. 1 The map of sampling sites in the reservoir

映轮虫种类与环境的关系,将轮虫丰度值和环境数据进行 $\log_{10}(x + 1)$ 转换处理,应用 Canoco 4.5 软件分析并作出物种与环境因子的双序图。

2 结果

2.1 理化因子的周年变化

广东省位于热带-亚热带地区,水库全年最低水温 15°C ,最高水温 32°C ,多数月份水温高于 20°C ,平均温度 24.8°C (图 2)。水库的叶绿素 a 处于 $1.04\text{--}38.86\text{ }\mu\text{g/L}$ 之间,全年的叶绿素 a 浓度 11 月份最低,为硝化池出口的 $1.04\text{ }\mu\text{g/L}$,最高为 4 月份库心的 $38.86\text{ }\mu\text{g/L}$ 。东江进水口与硝化池出口的泥沙含量大,浑浊度高,不利于浮游植物的生长,叶绿素 a 浓度全年都较低,平均值分别为 $4.5\text{ }\mu\text{g/L}$ 和 $3.4\text{ }\mu\text{g/L}$;库心和取水口的平均值分别为 $17.9\text{ }\mu\text{g/L}$ 和 $15.4\text{ }\mu\text{g/L}$ (图 2)。

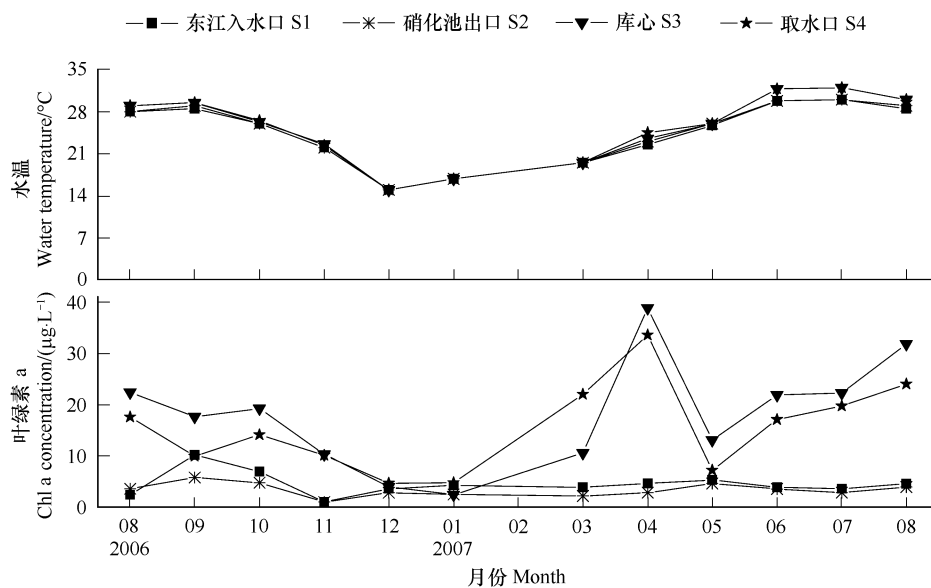


图 2 水温与叶绿素 a 浓度的周年变化

Fig. 2 Annual changes in water temperature and chlorophyll a concentrations

东江入水口和硝化池出口流速较高,悬浮物沉积相对缓慢,透明度相对较低,一般位于 0.4m 以下,最低至 0.15m ;而库心和取水口由于大部分悬浮物已沉积,因此透明度相对较高,一般位于 0.6m 以上,最高达 0.95m (图 3)。东江进水口及硝化池出口的浑浊度较高。一般大于 20 NTU ,最高达到 76 NTU ,库区和取水口的浑浊度较低,一般低于 10 NTU (图 3)。透明度与浑浊度呈显著负相关(偏相关 t 检验, $R = -0.82$, $P < 0.0001$)。

水库的总氮最大值出现在 2007 年 5 月份的硝化池出口,最高值达 3.06 mg/L ;全年平均 1.47 mg/L (图 4)。总氮与水温 and 浑浊度呈显著负相关($P < 0.05$)。水库的库心和取水口的总磷全年一般低于 0.1 mg/L ;东江进水口和硝化池出口的浑浊度较高,悬浮物较多,总磷含量高于库心和取水口 (图 4)。

2.2 轮虫群落结构特征

2.2.1 种类组成

调查期间,共发现轮虫 41 种,主要为营浮游生活的种类,但也出现了一些附着性和底栖种类,如轮虫属和腔轮属的种类。轮虫种类主要为广温性种类,如广布多肢轮虫 (*Polyarthra vulgaris*),部分种类为暖温性种类,如裂痕龟纹轮虫 (*Anuraeopsis fissa*)、西式三肢轮虫 (*Filinia novaezealandiae*)。大多数种类在 4 个站点同时出现,库心和取水口的种类差别不大(表 1)。

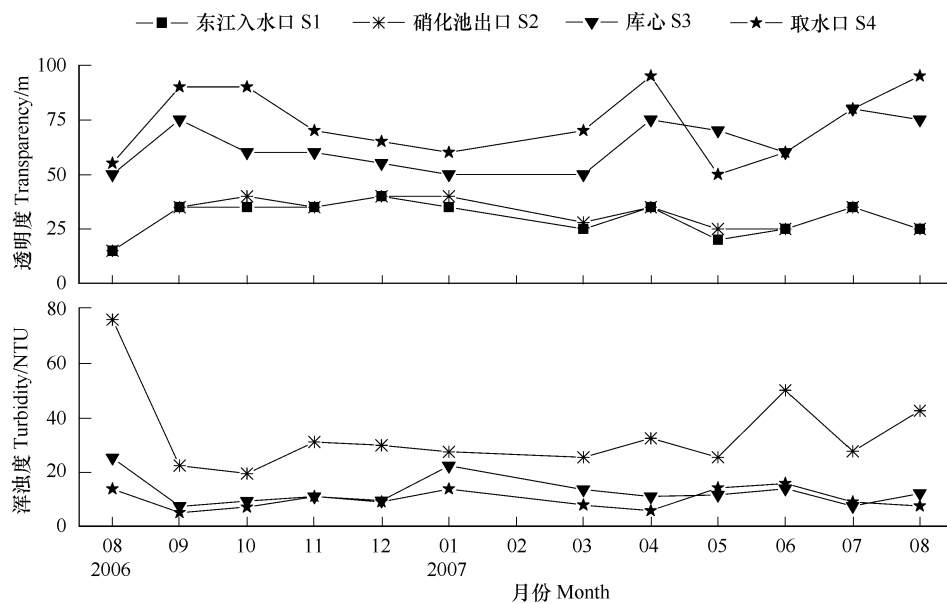


图3 水库透明度与浑浊度的周年变化
Fig. 3 Annual changes in transparency and turbidity

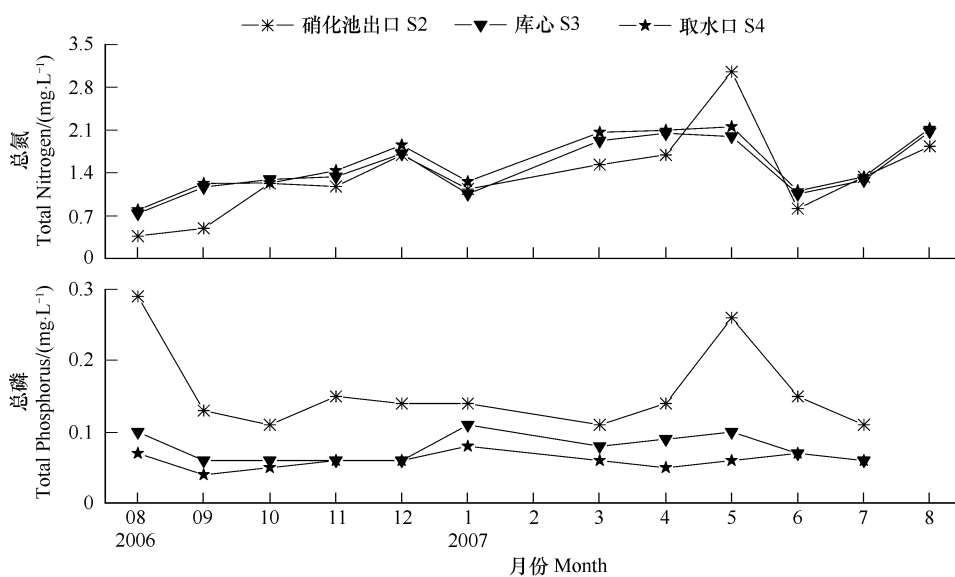


图4 总氮与总磷的周年变化
Fig. 4 Annual changes in Total Nitrogen and Total Phosphorus

表1 水库轮虫的种类组成

Table 1 Species composition of rotifers in the reservoir

属 Genus	种类 Species	东江入水口	硝化池出口	库心	取水口
龟纹轮属	裂痕龟纹轮虫 <i>Anuraeopsis fissa</i>	+	+	+	+
晶囊轮属	卜氏晶囊轮虫 <i>Asplanchna brightwelli</i>	+		+	+
臂尾轮属	角突臂尾轮虫 <i>Brachionus angularis</i>	+	+	+	+
	蒲达臂尾轮虫 <i>Brachionus budapestiensis</i>	+	+		
	萼花臂尾轮虫 <i>Brachionus calyciflorus</i>	+			
	尾突臂尾轮虫 <i>Brachionus caudatus</i>	+	+	+	+

续表					
属 Genus	种类 Species	东江入水口	硝化池出口	库心	取水口
	裂足臂尾轮虫 <i>Brachionus diversicornis</i>	+	+	+	+
	镰形臂尾轮虫 <i>Brachionus falcatus</i>	+	+	+	+
	剪形臂尾轮虫 <i>Brachionus forficula</i>	+	+	+	+
	十指臂尾轮虫 <i>Brachionus patulus</i>		+	+	+
	方形臂尾轮虫 <i>Brachionus quadridentatus</i>	+	+		
	壶状臂尾轮虫 <i>Brachionus urceus</i>		+		
胶鞘轮属	胶鞘轮虫 <i>Collotheca</i> sp.		+		+
狭甲轮属	钩状狭甲轮虫 <i>Colurella uncinata</i>			+	+
聚花轮属	叉角聚花轮虫 <i>Conochilus dossuarius</i>			+	+
水轮属	粗足水轮虫 <i>Epiphanes macrourus</i>	+	+	+	+
三肢轮属	长三肢轮虫 <i>Filinia longiseta</i>	+	+	+	+
	西式三肢轮虫 <i>Filinia novaezealandiae</i>	+		+	+
	脾状三肢轮虫 <i>Filinia opoliensis</i>				+
腹尾轮属	腹足腹尾轮虫 <i>Gastropus hyptopus</i>			+	+
	柱足腹尾轮虫 <i>Gastropus stylifer</i>			+	+
六腕轮属	奇异六腕轮虫 <i>Hexarthra mira</i>			+	+
龟甲轮属	螺形龟甲轮虫 <i>Keratella cochlearis</i>	+	+	+	+
	热带龟甲轮虫 <i>Keratella tropica</i>	+	+	+	+
腔轮属	囊形腔轮虫 <i>Lecane bulla</i>	+			+
	无甲腔轮虫 <i>Lecane inermis</i>	+	+	+	+
	梨形腔轮虫 <i>Lecane pyriformis</i>			+	
鞍甲轮属	盘状鞍甲轮虫 <i>Lepadella patella</i>	+		+	
伪前翼轮属	<i>Proalides subtilis</i>	+	+	+	+
皱甲轮属	郝氏皱甲轮虫 <i>Ploesoma hudsoni</i>			+	+
	截头皱甲轮虫 <i>Ploesoma truncatum</i>	+	+	+	+
多肢轮属	真翅多肢轮虫 <i>Polyarthra euryptera</i>	+			
	广布多肢轮虫 <i>Polyarthra vulgaris</i>	+	+	+	+
疣毛轮属	尖尾疣毛轮虫 <i>Synchaeta stylata</i>	+	+	+	+
异尾轮属	刺盖异尾轮虫 <i>Trichocerca capucina</i>	+		+	+
	圆筒异尾轮虫 <i>Trichocerca cylindrica</i>	+	+	+	+
	暗小异尾轮虫 <i>Trichocerca pusilla</i>	+	+	+	+
	罗氏异尾轮虫 <i>Trichocerca rousseleti</i>	+	+		
	对棘异尾轮虫 <i>Trichocerca stylata</i>	+	+	+	+
旋轮属	<i>Philodina</i> sp.	+	+	+	+
轮虫属	<i>Rotaria</i> sp.	+	+	+	+

东江入水口: Dongjiang Inlet of the reservoir; 硝化池出口: outlet of the nitrification room; 库心: the center of the reservoir; 取水口: the outlet of the reservoir; 龟纹轮属: *Anuraeopsis*; 晶囊轮属: *Asplanchna*; 臂尾轮属: *Brachionus*; 胶鞘轮属: *Collotheca*; 狭甲轮属: *Colurella*; 聚花轮属: *Conochilus*; 水轮属: *Epiphanes*; 三肢轮属: *Filinia*; 腹尾轮属: *Gastropus*; 六腕轮属: *Hexarthra*; 龟甲轮属: *Keratella*; 腔轮属: *Lecane*; 鞍甲轮属: *Lepadella*; 伪前翼轮属: *Proalides*; 皱甲轮属: *Ploesoma*; 多肢轮属: *Polyarthra*; 疣毛轮属: *Synchaeta*; 异尾轮属: *Trichocerca*; 旋轮属: *Philodina*; 轮虫属: *Rotaria*

2.2.2 轮虫的数量变化

水库东江口和硝化池出口的轮虫丰度较低, 全年变化范围分别为 9—100 ind./L 和 6—53 ind./L, 在 9 月至 10 月份达到高峰; 库心和取水口的轮虫丰度较高, 最高丰度达到 1453 ind./L 和 1966 ind./L, 轮虫有 3 个高峰, 分别位于 10 月、4 月份和 8 月份(图 5)。

2.2.3 轮虫优势种的百分比组成

龟甲轮虫是东江入水口和硝化池出口的第一优势类群, 分别占 18.7% 和 18.9%, 该属只发现螺形龟甲轮

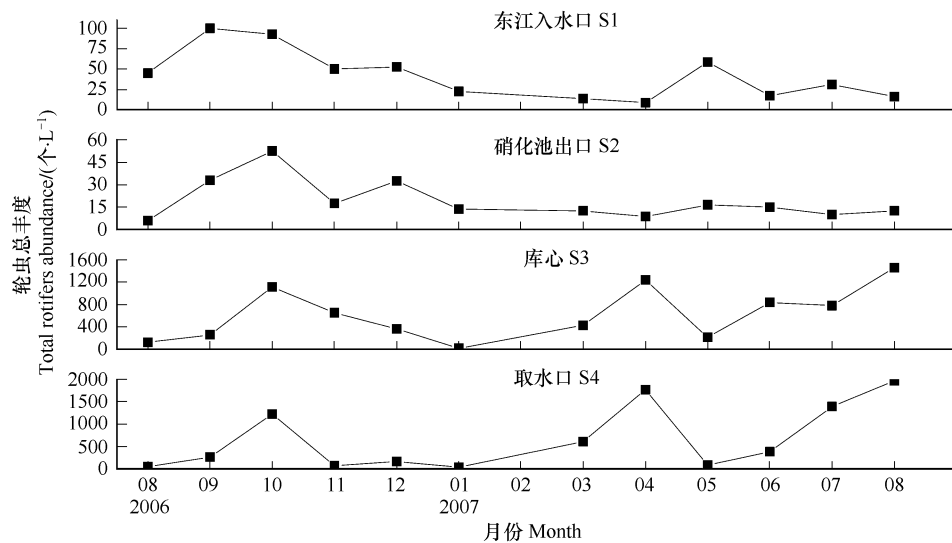


图5 轮虫丰度的周年变化

Fig. 5 Annual changes in rotifers abundance

虫和热带龟甲轮虫,其中螺形龟甲轮虫的丰度占主要部分。东江入水口的第二优势类群为异尾轮虫,占16.3%,主要种类为暗小异尾轮虫、对棘异尾轮虫和圆筒异尾轮虫。硝化池出口的轮虫第二优势类群为臂尾轮虫,占18.9%,其丰度较多的主要种类为角突臂尾轮虫和镰形臂尾轮虫。东江入水口和硝化池出口具有相似的理化环境,因此其优势种和周年变化也较为相似(图6和图7)。

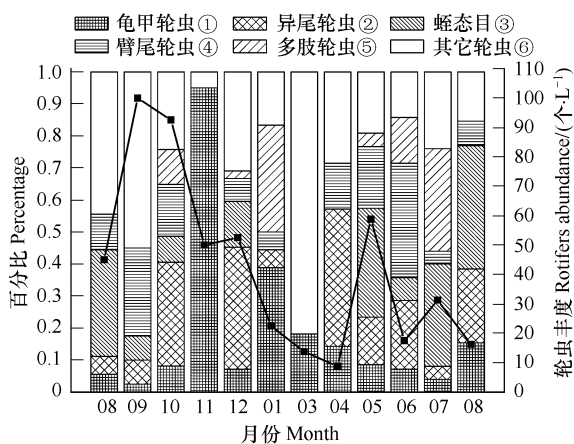


图6 东江口轮虫优势种属的季节变化

Fig. 6 Seasonal changes in the percentage of dominant rotifers in the Dongjiang inlet of the reservoir

① *Keratella* spp.; ② *Trichocerca* spp.; ③ *Bdelloidea* spp.; ④ *Brachionus* spp.; ⑤ *Polyarthra* spp.; ⑥ Other rotifers

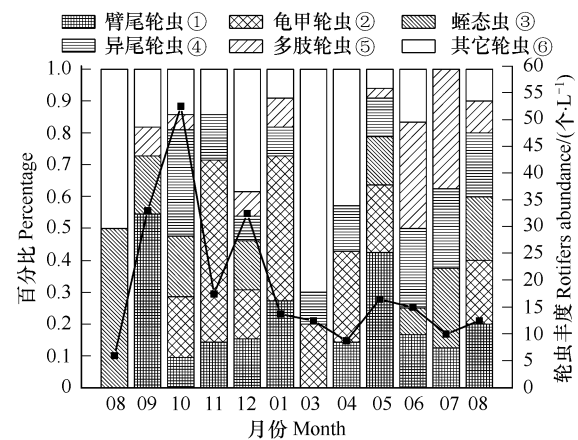


图7 硝化池出口轮虫优势种属的季节变化

Fig. 7 Seasonal changes in the percentage of dominant rotifers in the outlet of the nitration room in the reservoir

① *Brachionus* spp.; ② *Keratella* spp.; ③ *Bdelloidea* spp.; ④ *Trichocerca* spp.; ⑤ *Polyarthra* spp.; ⑥ Other rotifers

库心和取水口的第一优势种类为广布多肢轮虫,分别占39.8%和40.5%。尖尾疣毛轮虫是这两个站点的第二优势类群,分别占13.1%和12.3%。轮虫的第1次高峰出现在2006年的10月,广布多肢轮虫分别占库心和取水口轮虫总数的69%和45%,为第一优势种;轮虫的第2次高峰出现在2007年的4月,尖尾疣毛轮虫分别占库心和取水口轮虫总数的82%和94%,是该月份的绝对优势种(图8,图9)。

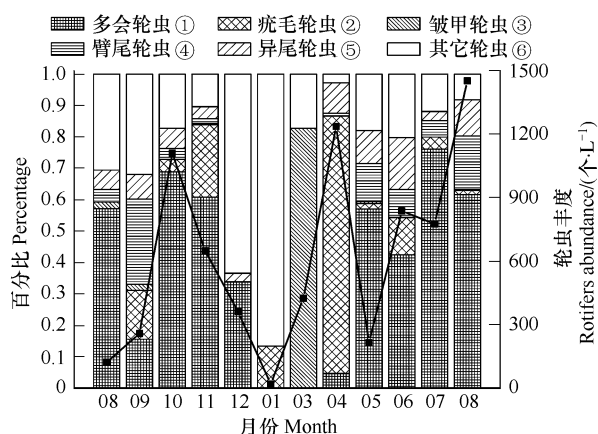


图8 库心轮虫优势种属的季节变化

Fig. 8 Seasonal changes in the percentage of dominant rotifers in the center of the reservoir

① *Polyarthra* spp.; ② *Synchaeta* spp.; ③ *Ploesoma* spp.; ④ *Brachionus* spp.; ⑤ *Trichocerca* spp.; ⑥ Other rotifers

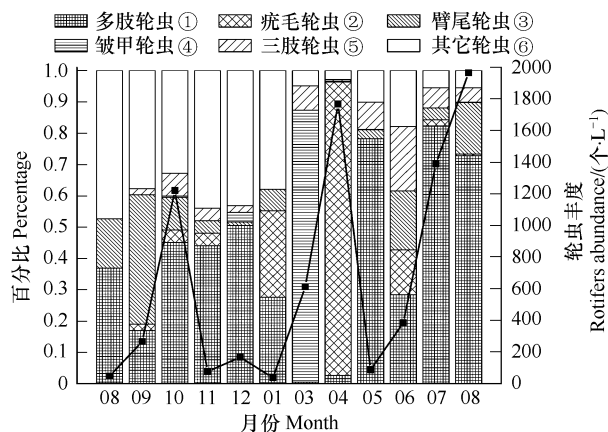


图9 取水口轮虫优势种属的季节变化

Fig. 9 Seasonal changes in the percentage of dominant rotifers in the outlet of the reservoir

① *Polyarthra* spp.; ② *Synchaeta* spp.; ③ *Brachionus* spp.; ④ *Ploesoma* spp.; ⑤ *Filinia* spp.; ⑥ Other rotifers

2.3 轮虫丰度与环境因子的分析

2.3.1 叶绿素 a 浓度与轮虫丰度的关系

叶绿素 a 浓度是反映水体中浮游植物含量的重要指标。叶绿素 a 浓度与轮虫丰度的线性回归分析显示浮游植物是轮虫的主要食物来源,对轮虫群落的发展具有显著性影响($P < 0.01$) (图 10)。

2.3.2 样品的 CCA 排序

全年共采样 12 次,每一采样点有 12 个样品,东江进水口的环境参数数据缺失,未纳入分析中,对硝化池出口、库区和大坝 3 个采样点的样品进行环境因子的 CCA 排序。从图 11 可以看出,硝化池出口站点采集的样品明显区别于库区和大坝两个站点的样品,而库区和大坝两个站点的样品没有明显差别。环境因子排序轴 1 和轴 2 特征值之和占典范总特征值的 62.4%,共解释样品空间分布变异的 25.5%。硝化池出口站点的浑浊度全年都较高,类似于河流的水动力状况明显区别于库心和大坝,该站点的轮虫种类组成和丰度变化与库心和大坝明显不同,样品排序反映了水库的空间异质性。

2.3.3 轮虫种类与环境因子对应关系的 CCA 分析

对水库轮虫种类进行的 DCA 分析显示排序轴最大的梯度长度为 4.20,表明水库的轮虫群落对生态梯度的响应是非线性的,因此利用非线性响应模型 (CCA) 来分析环境因子对轮虫群落的影响是比较适宜的。CCA 分析是在环境因子特征变量构成的空间上,对环境变量和轮虫种类排序作图,实现了轮虫种类与环境因子的对应排序。对主要轮虫种类的丰度在主轴上排序,可以反映这些种类与环境因子之间的对应关系。对种类数据按出现频度和相对丰度进行了筛选,CCA 排序分析的统计信息如(表 3)。

CCA 排序的全部特征值解释了轮虫群落变异程度的 40%,前两轴共解释了轮虫变异程度的 25%。温度、叶绿素 a 和透明度为 CCA 排序轴 1 的重要影响因子,排序轴 2 则以浑浊度为主要驱动因子,这些环境因子是

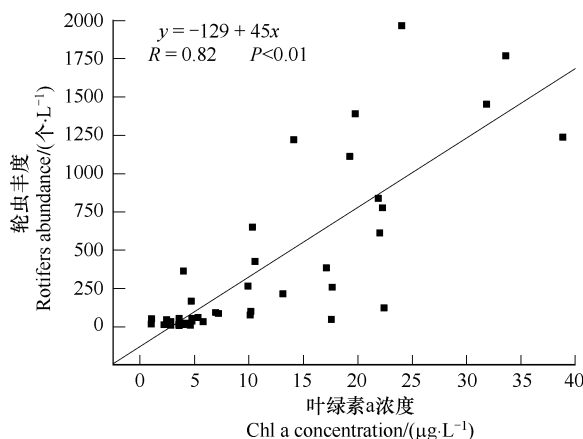


图10 叶绿素 a 浓度与轮虫丰度的线性回归分析

Fig. 10 Linear regression between chlorophyll a concentration and rotifers abundance

影响水库轮虫种类时空分布的主要因素。水体的 9 个环境因子中以温度、叶绿素、透明度、浑浊度对轮虫的分布影响最大;而高锰酸钾指数、总磷和 pH 对其也有一定的影响。从轮虫种类的分布状况看(图 12),CCA 排序把轮虫分为几个明显的组群:体型较大的裂足臂尾轮虫、镰形臂尾轮虫、圆筒异尾轮虫、卜氏晶囊轮虫和叉角聚花轮虫对水温的敏感性明显高于其它种类,其出现频率和相对丰度在夏季较高;对棘异尾轮虫、尖尾疣毛轮虫、西式三肢轮虫和奇异六腕轮虫与叶绿素和透明度密切相关。常年相对丰度都比较高的广布多肢轮虫处于 CCA 坐标轴的原点附近,说明其受环境因子的影响较小;体型相对较小的螺形龟甲轮虫、裂痕龟甲轮虫和腹尾轮虫出现在与温度和有机质密切相关的轴 1 的上方。

2.4 水库的营养评价

关于水体营养水平划分的方法很多,考察的指标一般包括营养盐含量、有机质浓度、浮游植物产量和现存量以及浮游动物丰度等,不同方法划分的结果虽有差异,但总趋势还是一致的。对水库的富营养化程度评

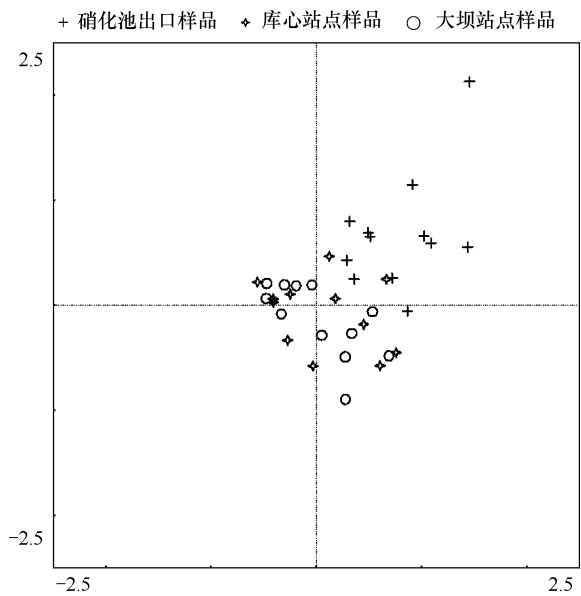


图 11 水库轮虫样品的双轴等级排列
Fig. 11 Ordination biplot of cases in the Reservoir
+:硝化池出口样品;☆:库心站点样品;○:大坝站点样品

表 2 水库轮虫种类和环境因子间 CCA 分析的统计信息

Table 2 Summary statistics for the axes of CCA performed on rotifers in the reservoir

轴 Axes	1	2	3	4
特征值 Eigenvalues	0.209	0.136	0.082	0.053
百分比 Percentage/%	43.54	28.33	17.08	11.04
累积百分比 Cum. Percentage for eigenvalue/%	43.54	71.88	88.96	100.00
种类与环境因子的相关性 Spec.-env. correlations	0.908	0.736	0.744	0.587
全部特征值总和 Sum of all eigenvalues	1.364			
全部典范特征值总和 Sum of all canonical eigenvalues	0.542			

表 3 前 2 个排序轴和环境因子间的相关系数

Table 3 Correlation coefficients of environmental factors with the first two axes of CCA

项目 Item	SPEC AX1	SPEC AX2	ENVI AX1	ENVI AX2
SPEC AX1	1.00			
SPEC AX2	-0.04	1.00		
ENVI AX1	0.92 **	0.00	1.00	
ENVI AX2	0.00	0.73 **	0.00	1.00
叶绿素 a Chl a concentration	-0.59 **	-0.22	-0.65 **	-0.30
透明度 Transparency	-0.61 **	-0.27	-0.66 **	-0.37 *
水温 Water temperature	-0.78 **	0.31	-0.84 **	0.43 **
浑浊度 Turbidity	0.46 **	0.48 **	0.50 **	0.66 **
pH	-0.41 *	-0.10	-0.45 **	-0.14
溶解氧 DO	0.16	-0.20	0.18	-0.27
总氮 Total nitrogen	0.11	-0.26	0.12	-0.36 *
高锰酸钾指数 COD _{Mn}	-0.59 **	0.11	-0.64 **	0.15
总磷 Total phosphorus	0.52 **	0.31	0.57 **	0.42 **

*: $P < 0.05$, **: $P < 0.01$; SPEC AX1: 物种排序轴 1 Species axis 1; SPEC AX2: 物种排序轴 2 Species axis 2; ENVI AX1: 环境因子排序轴 1 Environmental factor axis 1; ENVI AX2: 环境因子排序轴 2 Environmental factor axis 2; COD_{Mn}: Chemiluminescence detection of permanganate index; DO: Dissolved oxygen

价,并没有专门的评价方法和公式,一般借鉴湖泊富营养化评价方法。通过 20 世纪 70 年代对世界上近 200 个湖泊的监测,确认了湖中限定生产力的营养元素量与湖泊营养状态指标之间存在明显的相关关系^[16]。

本文采用修正的 Carlson 营养状态指数(*TLI*)评价水库,包括 Chl a、TN、TP 和 COD_{Mn} 在内的相关加权综合营养状态指数来评价水库的营养状态(表 4)。

大多数月份的(*TLI*)都处于 30—40 之间,表明其水质处于中营养阶段^[16]。参考国内水库的有关资料,将该水库定为中营养型是适宜的。

3 讨论

3.1 轮虫的种类组成和优势种

该水库的轮虫种类既有寡营养型水体中的常见种,也包括富营养型水体的指示种。如寡营养指示种中的赫氏皱甲轮虫,富营养指示种中的角突臂尾轮虫、暗小异尾轮虫、长三肢轮虫、螺形龟甲轮虫、对棘异尾轮虫、卜氏晶囊轮虫和广布多肢轮虫等^[20-21]。

轮虫主要以广生性的种类为主,例如广布多肢轮虫,臂尾轮虫、龟甲轮虫和三肢轮虫等,这些种类既能以浮游植物为食,也能利用微型生物和微小颗粒物作为主要食物。臂尾轮虫是(亚)热带地区主要轮虫种类,其能以藻类和有机颗粒为食物来源。相对来说,疣毛轮虫食性比较专一,对食物的粒径有一定的选择性^[1],一旦可食性食物丰盛,疣毛轮虫可迅速扩充其种群(图 8 和图 9)。龟甲轮虫的食性较广,为水体中 1—15 μm 有机悬浮颗粒物^[1],因此螺形龟甲轮虫在悬浮物较多的东江入水口和硝化池出口占有优势(图 6 和图 7)。

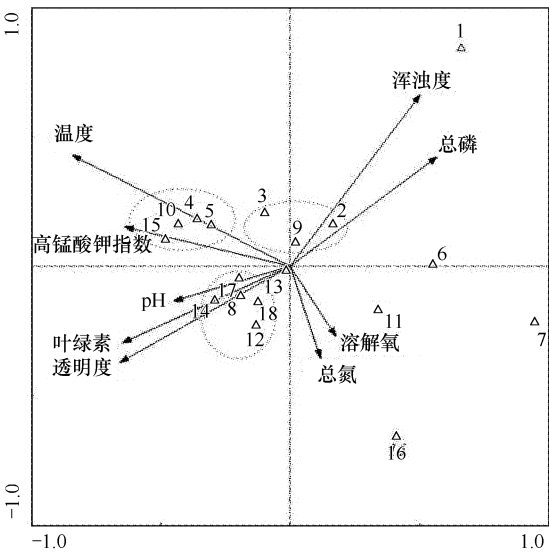


图 12 水库轮虫种类与环境因子之间的 CCA 排序图
Fig. 12 Ordination biplots of species and environmental variables in the reservoir

- 1: 蛭态目, 2: 裂痕龟纹轮虫, 3: 角突臂尾轮虫, 4: 裂足臂尾轮虫, 5: 镰臂臂尾轮虫, 6: 螺形龟甲轮虫, 7: 热带龟甲轮虫, 8: 对棘异尾轮虫, 9: 暗小异尾轮虫, 10: 圆筒异尾轮虫, 11: 腹足腹尾轮虫, 12: 西式三肢轮虫, 13: 广布多肢轮虫, 14: 奇异六腕轮虫, 15: 卜氏晶囊轮虫, 16: 截头皱甲轮虫, 17: 叉角聚花轮虫, 18: 尖尾疣毛轮虫

表 4 水库的营养状态指数计算结果(Chl a, TP, TN, COD_{Mn})

Table 4 Results of Trophic state indexes (*TLI*) in the reservoir (Chl a, TP, TN, COD_{Mn})

年份 Year	月份 Month	硝化池出口 Outlet of the nitrating room	库心 The center of the reservoir	取水口 The outlet of the reservoir	月平均 Monthly average
2006	8	37.73	37.56	35.24	36.84
	9	33.84	34.74	30.57	33.05
	10	35.29	36.41	32.68	34.79
	11	31.50	34.31	33.84	33.22
	12	35.54	32.25	32.39	33.40
2007	1	33.64	31.39	32.42	32.48
	3	34.93	37.62	37.94	36.83
	4	36.13	41.13	37.48	38.24
	5	43.83	37.89	35.61	39.11
	6	35.93	36.68	35.98	36.20
	7	34.34	35.61	35.36	35.10
年平均 Annual average					35.39

3.2 环境因子对轮虫时空分布的影响

研究表明,由于生态系统空间的差异性,导致影响轮虫丰度的主要环境因子在不同区域是不同的^[22]。在

理化环境变化剧烈水体,轮虫丰度主要取决于易变的理化环境因子,非密度制约因子成为轮虫增长的限制因子。在环境相对稳定的水体,轮虫丰度主要取决于食物等生物因子,密度制约因子成为轮虫种群增长的限制因子。样品的 CCA 分析反映出轮虫分布的空间异质性,硝化池出口的浑浊度较高,透明度较低,较多的悬浮物易于堵塞轮虫的滤食器官,制约轮虫的摄食与种群增长。

研究表明透明度是影响轮虫密度的重要因子,并随透明度的增加而增大^[22]。轮虫群落与环境因子关系的 CCA 分析表明透明度和浑浊度是影响水库轮虫空间分布的重要环境因子。水库的东江入水口和硝化池出口的轮虫丰度较低,库心和取水口轮虫丰度较高。东江入水口和硝化池出口受到东江来水的影响,水质浑浊,悬浮物和泥沙含量较高,流速快,不利于轮虫的生存与繁殖;而到库区之后,水文条件逐渐稳定,库心和取水口水域透明度较高,环境相对较稳定,有利于轮虫群落的发展。

水库是一个水力滞留时间相对较短的水体,从入库河流到大坝处存在一个由水动力学过程为主导的生态梯度,因此轮虫的分布几乎在所有水库都具有或高或低程度的异质性^[23]。轮虫个体小,世代时间短,属 r -选择型,在快速多变的环境中,适应环境的能力比较强^[24]。该水库中,这种空间上的分区特别明显,东江口、硝化池出口由于浑浊度较大,与库心和取水口的种类组成和数量有明显差别。

轮虫群落与环境因子关系的 CCA 分析表明温度和叶绿素影响轮虫群落的季节变化。水温是影响轮虫季节分布的主要生态因子,每种轮虫都有一定的最适温度范围^[12]。从轮虫的丰度季节动态来看,轮虫总数的高峰一般出现在 20℃ 以上的水温。水库的轮虫密度高峰分别出现在 4 月、8 月份和 10 月份,水温都高于 20℃。研究表明,温度增加,卵的发育时间缩短,周转加快。广布多肢轮虫在 25℃ 卵的发育时间不足 10℃ 的三分之一^[25]。可见,在一定的温度范围内,温度上升,在丰富的食物供给下,轮虫种群周转加快,能够在短时间内形成轮虫的密度高峰。

叶绿素 a 是衡量浮游植物的主要指标,轮虫主要以浮游植物为食,因此水体中浮游植物数量的高低与轮虫的生长繁殖密切相关。水库轮虫以滤食性种类为主,主要以水体中的藻类为食。轮虫的丰度变化与叶绿素含量显著正相关($P < 0.01$) (图 10)。夏秋季水体中有丰富的藻类,为轮虫夏秋季高峰提供了足够的食物。

3.3 轮虫与水质营养状况的关系

轮虫由于个体小,受鱼类直接影响不大^[26],且发育时间快,生命周期短,能较为迅速地反映环境的变化,被认为是很好的指示生物^[20-21]。在湖泊中,随着营养水平的上升,轮虫的种类和数量有逐渐增加的趋势。本次调查的该水库轮虫丰度为 6—1966 个/L,显著高于寡营养型水库。由于水库的滞留时间相对于湖泊短得多,水位波动大,轮虫的丰度比同营养水平的湖泊要低得多。一般而言,随着水体营养水平和初级生产力的上升,轮虫生物量及丰度相应增加^[27]。水库轮虫丰度不仅取决于食物,还受摄食者的捕食作用和水库的滞留时间等的控制。

3.4 水库的营养状况

该水库位于市区,是一个以供水为主要用途的水体。改革开放以来,由于周边经济的快速发展,同时上游来水中 N、P 等污染物长期超标,外源负荷造成污染物在底泥中的沉积,引发了日益严重的内源污染。在内外源污染的双重作用下,库区水库的富营养化水平持续升高,水生生态环境恶化,水库水质安全受到极大威胁。相关加权营养状态指数 (TLI) 表明该水库处于中营养型,因此针对这一特点如何在保证饮用水水质标准的前提下,治理点源和面源污染,消减水体营养负荷,把营养物质的输入控制在水体自净能力范围内,抑制水库的富营养化趋势,以实现该水库的可持续利用。

References:

- [1] Arndt H. Rotifers as predators on components of the microbial web (bacteria, heterotrophic flagellates, ciliates) — a review. *Hydrobiologia*, 1993, 255/256(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(1/3): 167-175.

- [3] Bonecker C C, Aoyagui A S M. Relationships between rotifers, phytoplankton and bacterioplankton in the Corumb reservoir, Goiás State, Brazil. *Hydrobiologia*, 2005, 546(1): 415-421.
- [4] Attayde J L, Bozelli R L. Assessing the indicator properties of zooplankton assemblages to disturbance gradients by canonical correspondence analysis. *Canada Journal of Aquatic Science*, 1998, 55(8): 1789-1797.
- [5] Duggan I C, Green J D, Shiel R J. Distribution of rotifers in North Island, New Zealand, and their potential use as bioindicators of lake trophic state. *Hydrobiologia*, 2001, 446/447(1): 155-164.
- [6] Duggan I C, Green J D, Shiel R J. Distribution of rotifer assemblages in North Island, New Zealand lakes: Relationships to environmental and historical factors. *Freshwater Biology*, 2002, 47(2): 195-206.
- [7] Herzig A. The analysis of planktonic rotifer populations: A plea for longterm investigations. *Hydrobiologia*, 1987, 147(1): 163-180.
- [8] Stelzer C P. Population growth in planktonic rotifers. Does temperature shift the competitive advantage for different species? *Hydrobiologia*, 1998, 387/388(0): 349-353.
- [9] Sharma B K. Rotifer communities of floodplain lakes of the Brahmaputra basin of lower Assam (N. E. India): biodiversity, distribution and ecology. *Hydrobiologia*, 2005, 533(1): 209-221.
- [10] Fernando C H. The species and size composition of tropical freshwater zooplankton with special reference to the oriental region (South East Asia). *International Review of Hydrobiology*, 1980, 65(3): 411-426.
- [11] Lorenzen C J. Determination of chlorophyll and phaeo-pigments: spectrophotometric equations. *Limnology and Oceanography*, 1967, 12(2): 343-346.
- [12] Zhang Z S, Huang X F. Method for study on freshwater plankton. Beijing: Science Press, 1991: 252-405.
- [13] Koste W. Rotatoria; Die Rädertiere Mitteleuropas. Berlin: Gebr der Borntraeger, 1978.
- [14] Segers H. Annotated checklist of the rotifers (*Phylum Rotifera*), with notes on nomenclature, taxonomy and distribution. *Zootaxa*, 2007, 1564(8): 1-104.
- [15] Wang J J. Freshwater rotifer fauna in China. Beijing: Science Press, 1961.
- [16] Jin X C, Tu Q Y. Survey Criteria for Eutrophic Lake (2nd ed). Beijing: China Environmental Science Press, 1990: 286-302.
- [17] Ter Braak C J F. Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. *Ecology*, 1986, 67(5): 1167-1179.
- [18] Zhang J T. Quantitative Ecology. Beijing: Science Press, 2004: 171-178.
- [19] Lepš J, Šmilauer P. Multivariate analysis of ecological data using canocoTM. Cambridge: Cambridge University Press, 2003: 168-250.
- [20] Maemets A. Rotifers as indicators of lake types in Estonia. *Hydrobiologia*, 1983, 104(1): 357-361.
- [21] Slideek V. Rotifers as indicators of water quality. *Hydrobiologia*, 1983, 100(1): 169-201.
- [22] Lu Y F, Huang Y C, Zhou L H. Effects of environmental factors on density of the planktonic rotifer in Xinlin Bay Reservoir. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 2002, 11(3): 225-229.
- [23] Bini L M, Tundisi J G, Matsumura-Tundisi T, Matheus C E. Spatial variation of zooplankton groups in a tropical reservoir (Broa Reservoir, São Paulo State Brazil). *Hydrobiologia*, 1997, 357(1/3): 89-98.
- [24] Pejler B. Relation to habitat in rotifers. *Hydrobiologia*, 1995, 313/314(1): 267-278.
- [25] Huang X F, Hu C Y, Wu Z T. Rotifers in lake Donghu, Wuhan. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1985, 9(2): 129-143.
- [26] Stenson J A E. Fish impact on rotifer community structure. *Hydrobiologia*, 1982, 87(1): 57-64.
- [27] Wallace R L, Snell T W, Ricci C. Rotifera: Volume 1 Biology, Ecology and Systematics // Dumont H. J. Guides to the Identification of the Microinvertebrates of the Continental Waters of the World 23 Edited Leiden: Backhuys Publishers, 2006: 1-299.

参考文献:

- [12] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991: 252-405.
- [15] 王家楫. 中国淡水轮虫志. 北京: 科学出版社, 1961.
- [16] 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: 286-302.
- [18] 张金屯. 数量生态学. 北京: 科学出版社, 2004: 171-178.
- [22] 卢亚芳, 黄永春, 周立红. 杏林湾水库环境因子对浮游轮虫密度的影响. *上海水产大学学报*, 2002, 11(3): 225-229.
- [25] 黄祥飞, 胡春英, 伍焯田. 武汉东湖的轮虫. *水生生物学报*, 1985, 9(2): 129-143.