

# 南四湖浮游动物群落结构特征及其与环境因子的关系

陈磊 高东泉 舒凤月 张洪海\*

曲阜师范大学生命科学学院, 山东省高校南四湖湿地生态与环境保护重点实验室 曲阜 273165

**摘要:** 为探讨南四湖浮游动物多样性特征及其与水质的相关性, 于 2012 年夏季 (7 月) 和冬季 (12 月) 对南四湖浮游动物的群落结构进行了系统研究, 结合历史数据, 分析了南四湖浮游动物群落的多样性特征和时间变化。共采集到浮游动物 163 种, 其中, 轮虫 78 种, 原生动物 65 种, 枝角类 17 种, 桡足类 3 种。夏季记录浮游动物种类数 (141 种) 高于冬季 (105 种)。从四个湖区来看, 微山湖浮游动物种数最多 (102 种), 其次是南阳湖 (95 种) 和昭阳湖 (80 种), 独山湖 (73 种) 较少。南四湖浮游动物全年平均密度为 2 192 ind/L, 平均生物量为 2.27 mg/L。除原生动物外, 其他三类浮游动物夏季的平均密度和生物量都高于冬季。采用丰富度指数、Shannon-Wiener 指数和均匀度指数对浮游动物多样性进行了评价, 结果均显示, 南四湖浮游动物多样性夏季高于冬季。通过回归分析发现, 总氮是影响浮游动物密度的主要因素, 总氮和水温是影响浮游动物生物量的主要因素, pH 和电导率是影响浮游动物多样性的主要因素。

**关键词:** 南四湖; 浮游动物; 群落多样性

**中图分类号:** Q958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263 (2016) 01-113-08

## Zooplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Nansi Lake

CHEN Lei GAO Dong-Quan SHU Feng-Yue ZHANG Hong-Hai\*

*Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment Conservation of Nansi Lake, College of Life Science, Qufu Normal University, Qufu 273165, China*

**Abstract:** Investigations were conducted in July (summer) and December (winter), 2012 to evaluate the characteristics of zooplankton community and its relationship to environmental factors in Nansi Lake (Table 1). Combined with historical data, the temporal and spatial characteristics of zooplankton community were described. 163 zooplankton species, including 78 Rotifera, 65 Protozoa, 17 Cladocera and 3 Copepoda (Table

**基金项目** 国家林业局引进国际先进林业科学技术项目 (No. 2012-4-73), 山东省科技攻关计划项目 (No. 2013GSF11707), 山东省高等学校科技计划项目 (No. J14LE16);

\* 通讯作者, E-mail: zhanghonghai67@126.com;

**第一作者介绍** 陈磊, 男, 副教授; 研究方向: 动物生态学; E-mail: leisurechen@163.com。

收稿日期: 2015-05-26, 修回日期: 2015-10-20 DOI: 10.13859/j.cjz.201601013

2), were identified in Nansi Lake. Seasonally, species number of zooplankton in summer (141) was higher than that in winter (105). In term of four lake regions, the majority of zooplankton species were found in the Weishan Lake, followed by Nanyang Lake, while less in Zhaoyang Lake and Dushan Lake (Table 3, Table 4). The average density and biomass of zooplankton species in Nansi Lake were 2 192 ind/L and 2.27 mg/L respectively. Most of the zooplankton species have higher density and biomass in summer than in winter except the Protozoa (Table 5). Diversity of zooplankton community in Nansi Lake was assessed using richness indexes, Shannon-Wiener indexes and evenness indexes. Results indicated that the zooplankton diversity in summer was higher than that in winter in Nansi Lake. Stepwise regression analysis on the density, mass and diversity indexes of zooplankton with the environmental factors indicated that total nitrogen is the significant factor on zooplankton density; total nitrogen and water temperature are most important factors on zooplankton mass, whereas pH and conductivity had the strongest direct effects on zooplankton diversity (Table 6).

**Key words:** Nansi Lake; Zooplankton; Community diversity

南四湖是我国华北地区最大的淡水湖泊,也是南水北调东线工程的重要调蓄枢纽。浮游动物是湖泊生态系统的重要组成部分,浮游动物多样性是评价湖泊生态系统功能的重要指标。早期对淡水浮游动物的研究主要以分类和形态描述为主。随着湖泊富营养化的不断加剧,浮游动物的研究也越来越多结合环境因子(吴利等 2008, 邱小琮等 2012, 李共国等 2013, 林青等 2014, 张冬融等 2014)。巩俊霞等(2011)对南水北调东线工程调水前南四湖浮游动物的组成进行了分析,保留了调水前浮游动物多样性的原始数据。随着南水北调东线工程的实施,对南四湖流域的治理已见成效。而输水工程调水后南四湖浮游动物的多样性情况未见研究报道,同时未见有关南四湖浮游动物多样性与环境因子关系的研究报道。作者于 2012 年夏季(7 月)和冬季(12 月)对南四湖浮游动物的群落结构进行了系统研究,分析了南四湖浮游动物多样性的季节变化;结合对采样点环境因子的监测,对浮游动物多样性与环境因子的关系进行了探讨,从而为南四湖水生生态系统的研究和保护提供参考资料。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样点设置

在南四湖河口区和敞水区共设置 20 个采样点,其中微山湖 6 个(1# ~ 6#),独山湖 4 个(7#、11#、12#、13#),昭阳湖 4 个(8#、9#、10#、14#),南阳湖 6 个(15# ~ 20#)(图 1)。

### 1.2 样品的采集与处理

样品采集时间为 2012 年 7 月(夏季)和 12 月(冬季)。

**1.2.1 定性标本** 采用 25 号浮游生物网采集(网孔 0.064 mm),于水面下以“∞”状拖网浮游动物网数次,将浓缩于网头的水样收集于 50 ml 的标本瓶,用 4% 甲醛溶液现场固定,以待镜检鉴定。种类鉴定参照《淡水微型生物图谱》(周凤霞等 2010)。原生动物的鉴定参考《原生动物学》(沈韞芬 1999)、《中国淡水生物图谱》(韩茂森等 1995),轮虫的鉴定参考《中国淡水轮虫志》(王家楫 1961),枝角类和桡足类参考《中国动物志》(蒋燮治 1979, 沈嘉瑞 1979)。

**1.2.2 定量标本** 用 5 L 采水器分别于水面以下 0.5 m 处和 1.5 m 处采集水样,混合均匀后置于 1 L 塑料采样瓶中,加入鲁哥氏液现场固定,各样点均重复 3 次。实验室静置 24 h 后,浓缩至 200 ml,再次静置 24 h,浓缩至 50 ml 保存。定量计数前将沉淀样品充分摇匀,然后吸取

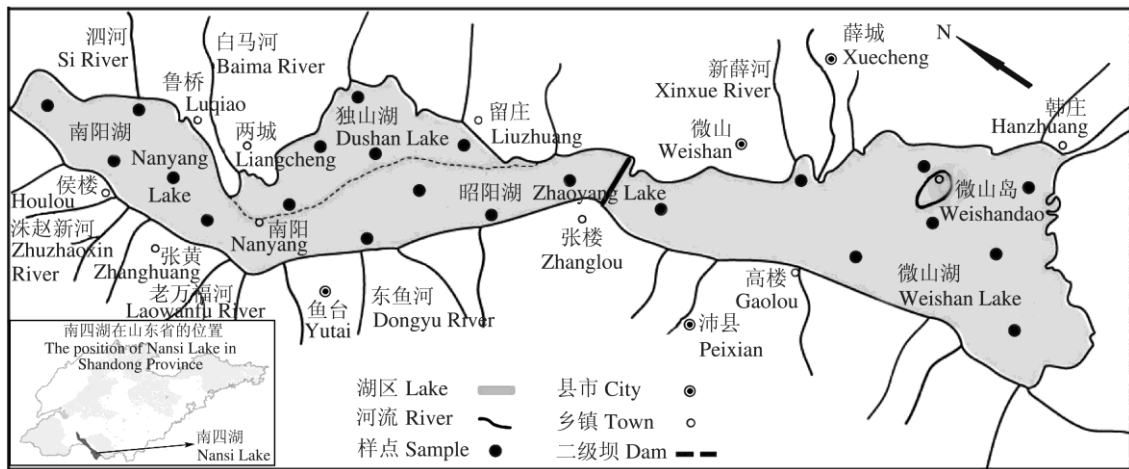


图 1 南四湖采样点分布示意图

Fig. 1 The sampling map of zooplankton in Nansi Lake

1 ml 注入 1 ml 计数框内, 在  $10 \times 10$  倍的光镜下全片计数。每个标本重复计数 3~5 次, 取其平均值 (林青等 2014)。

**1.2.3 理化因子测定** 水体理化因子采用现场测定和实验室分析的方法。其中温度、pH、溶解氧等应用 WTW Multi 350i 手提式多参数水质分析仪现场测定, 透明度用塞氏盘测定, 总氮、总磷、叶绿素带回实验室参照《湖泊富营养化调查规范》(金相灿等 1990) 进行测定分析。

### 1.3 优势度及多样性指数计算

优势种根据物种的出现频率及个体数量确定, 用优势度表示。优势度  $Y = (N_i/N) f_i$ , 式中,  $Y$  是优势度,  $f_i$  是第  $i$  物种的出现频率, 当  $Y > 0.02$  时, 确定为优势种。

采用 Margalef 丰富度指数  $D = (S-1)/\ln N$ , Shannon-Wiener 指数  $H' = -\sum (N_i/N) \ln (N_i/N)$  和均匀度  $J = H'/\ln S$  评价浮游动物多样性, 式中,  $N_i$  为第  $i$  种的个体数,  $N$  为所有种类的总个体数,  $S$  为浮游动物种类数。

### 1.4 浮游动物与环境因子的回归分析

运用单样本 K-S 检验对自变量环境因子和 3 个因变量 (浮游动物密度、生物量及多样性指数) 进行正态分布检验, 发现所有因子均符合正态分布 ( $P > 0.05$ )。进一步对自变量进行多重共线性诊断,  $\lambda_{\max} / \lambda_{\min}$  的值远大于 100,

最大条件指数为 1 192.918, 远大于 30, 且自变量的方差比例有的较高, 说明自变量间存在严重的多重共线性。为了消除多重共线性的影响, 本文采用逐步回归的方法, 运用 SPSS 18.0 软件进行多元逐步回归分析, 分别建立最优回归方程, 筛选出对浮游动物密度、生物量和多样性变化影响显著的环境因子 (柳丽等 1994, 何晓群 1998, 王冬等 2010, 林青等 2014)。

## 2 结果

### 2.1 环境因子分析

南四湖为典型温带大陆型气候, 环境因子冬夏季节差异明显 (表 1)。

### 2.2 浮游动物种类组成的季节变化

在南四湖共发现浮游动物 163 种, 其中, 轮虫 78 种 (47.9%), 原生动物 65 种 (39.9%), 枝角类 17 种 (10.4%), 桡足类 3 种 (1.8%)。

南四湖中的微山湖浮游动物种数最多 (102 种), 其次是南阳湖 (95 种)、昭阳湖 (80 种) 和独山湖 (73 种)。各湖区浮游动物的种类分布基本一致, 物种数量最大的都是轮虫, 其次为原生动物、枝角类和桡足类。夏季四个湖区共记录浮游动物 141 种, 种类数量高于冬季 (105 种) (表 2)。

### 2.3 浮游动物优势种的季节变化

表 1 南四湖夏冬季节环境因子监测结果 (平均值 ± 标准差)

Table 1 Physicochemical indexes of Nansi Lake in summer and winter (Mean ± SD)

环境因子 Environmental factors	夏季 Summer	冬季 Winter
气温 Temperature (°C)	29.4 ± 2.41	10.8 ± 2.19
水温 Water temperature (°C)	25.4 ± 0.84	7.7 ± 0.47
泥温 Soil temperature (°C)	23.5 ± 0.94	9.3 ± 0.66
透明度 Transparency (cm)	40.5 ± 14.89	51.0 ± 19.17
水深 Water depth (cm)	157.0 ± 64.02	165.1 ± 46.07
溶解氧 Dissolved oxygen (mg/L)	9.1 ± 0.14	10.6 ± 0.80
酸碱度 pH (25°C)	7.9 ± 0.38	8.2 ± 0.17
电导率 Conductivity (µS/cm)	1 217.0 ± 275.90	1 402.0 ± 164.16
酸碱度 (CaCO <sub>3</sub> ) pH CaCO <sub>3</sub> (mg/L)	196.5 ± 21.76	194.5 ± 25.94
总氮 Total nitrogen (mg/L)	2.7 ± 0.99	2.8 ± 1.72
总磷 Total phosphorus (mg/L)	0.13 ± 0.13	0.06 ± 0.03
叶绿素 a Chlorophyll a (µg/L)	22.2 ± 16.05	28.3 ± 12.76
化学需氧量 Chemical oxygen demand (mg/L)	85.3 ± 38.57	225.3 ± 66.16

表 2 南四湖各湖区夏冬季节浮游动物物种数量统计

Table 2 Numbers of zooplankton species in four lake regions of Nansi Lake

	各湖区统计 Numbers in four lake regions				夏季 Summer	冬季 Winter	合计 Summation
	微山湖 Weishan Lake	独山湖 Dushan Lake	昭阳湖 Zhaoyang Lake	南阳湖 Nanyang Lake			
	原生动物 Protozoa	34	31	33			
轮虫 Rotifera	54	35	38	42	72	47	78
枝角类 Cladocera	11	5	6	11	14	13	17
桡足类 Copepoda	3	2	3	2	3	3	3
总计 Total	102	73	80	95	141	105	163

以优势度  $\geq 0.02$  为优势种, 南四湖记录到优势种 9 种, 绝大多数种类为轮虫。优势度、密度和出现频率最大的都是针簇多肢轮虫 (*Polyarthra trigla*) (表 3)。夏季优势种 10 种, 冬季 3 种 (表 3)。两季节的共优种为针簇多肢轮虫, 其优势度季节差异不大。

各湖区优势种都以轮虫为主。其中, 微山湖 9 种、独山湖 9 种、昭阳湖 9 种、南阳湖 3 种, 共优种为针簇多肢轮虫和角突臂尾轮虫 (*Brachionus angularis*) (表 4)。

#### 2.4 浮游动物密度、生物量的季节变化

南四湖浮游动物全年平均密度为 2 192 ind/L,

其中, 原生动物的平均密度为 470 ind/L, 占总密度的 22%; 轮虫为 1 648 ind/L, 占 78%; 枝角类为 2 ind/L, 桡足类为 4 ind/L, 枝角类和桡足类的密度比例之和不足总密度的 1%。

南四湖浮游动物全年平均生物量为 2.27 mg/L, 其中, 原生动物为 0.02 mg/L, 占总量的 1%; 轮虫为 1.98 mg/L, 占 98%; 枝角类为 0.04 mg/L, 占 2%; 桡足类为 0.03 mg/L, 占 1% (表 5)。

南四湖浮游动物夏季平均密度为 2 302 ind/L (变化范围 451 ~ 4 055 ind/L), 平均生物量为 2.77 mg/L (0.55 ~ 4.76 mg/L)。夏季平均密度和生物量的最高点都出现在 9# 采样点, 最低点

表 3 南四湖浮游动物优势种及其优势度

Table 3 Dominant species of zooplankton in Nansi Lake

季节 Season	优势种 Dominant species	密度 (ind/L) Density	密度比例 (%) Density percentage	出现频率 (%) Emergence percentage	优势度 Dominant degree
冬夏两季 Winter and Summer	王氏似铃壳虫 <i>Tintinnopsis wangi</i>	2 330	0.042	0.783	0.038
	裂痕龟纹轮虫 <i>Anuraeopsis fissa</i>	2 560	0.050	0.783	0.032
	角突臂尾轮虫 <i>Brachionus angularis</i>	3 230	0.056	0.870	0.062
	长三支轮虫 <i>Filinia longiseta</i>	1 980	0.038	0.913	0.028
	曲腿龟甲轮虫 <i>Keratella valaa</i>	2 160	0.036	0.783	0.102
	针簇多肢轮虫 <i>Polyarthra trigla</i>	13 800	0.292	0.957	0.291
	暗小异尾轮虫 <i>Trichocerca pusilla</i>	2 830	0.042	0.800	0.066
	膜袋虫 <i>Cyclidium</i> sp.	2 860	0.068	0.700	0.042
夏季 Summer	螺形龟甲轮虫 <i>Keratella cochlearis</i>	6 680	0.182	0.800	0.083
	王氏似铃壳虫 <i>T. wangi</i>	2 550	0.049	0.826	0.041
	裂痕龟纹轮虫 <i>A. fissa</i>	2 820	0.054	0.783	0.043
	角突臂尾轮虫 <i>B. angularis</i>	3 450	0.067	0.957	0.064
	萼花臂尾轮虫 <i>B. calyciflorus</i>	1 260	0.023	0.957	0.023
	剪形臂尾轮虫 <i>B. forficula</i>	1 380	0.027	0.826	0.022
	裂足臂尾轮虫 <i>B. schizocerca</i>	1 230	0.024	0.913	0.022
	长三支轮虫 <i>F. longiseta</i>	2 160	0.042	0.913	0.038
冬季 Winter	曲腿龟甲轮虫 <i>K. valaa</i>	2 280	0.044	0.783	0.114
	针簇多肢轮虫 <i>P. trigla</i>	14 700	0.284	0.957	0.271
	暗小异尾轮虫 <i>T. pusilla</i>	3 600	0.059	0.870	0.060
	膜袋虫 <i>Cyclidium</i> sp.	3 240	0.078	0.600	0.048
	螺形龟甲轮虫 <i>K. cochlearis</i>	7 770	0.191	0.957	0.091
	针簇多肢轮虫 <i>P. trigla</i>	10 860	0.273	0.957	0.267

表 4 南四湖各湖区浮游动物优势种

Table 4 Dominant species of zooplankton in four lake regions of Nansi Lake

优势种 Dominant species	微山湖 Weishan Lake	独山湖 Dushan Lake	昭阳湖 Zhaoyang Lake	南阳湖 Nanyang Lake
王氏似铃壳虫 <i>Tintinnopsis wangi</i>	+	+		+
裂痕龟纹轮虫 <i>Anuraeopsis fissa</i>	+	+	+	
角突臂尾轮虫 <i>Brachionus angularis</i>	+	+	+	+
萼花臂尾轮虫 <i>B. calyciflorus</i>		+	+	
剪形臂尾轮虫 <i>B. forficula</i>	+	+	+	
裂足臂尾轮虫 <i>B. schizocerca</i>			+	
长三支轮虫 <i>Filinia longiseta</i>	+	+	+	
曲腿龟甲轮虫 <i>Keratella valaa</i>	+			
针簇多肢轮虫 <i>Polyarthra trigla</i>	+	+	+	+
暗小异尾轮虫 <i>Trichocerca pusilla</i>	+		+	
等刺异尾轮虫 <i>T. similis</i>	+			
猪吻轮虫 <i>Dicranophorus</i> sp.		+	+	
冠饰异尾轮虫 <i>T. lophoessa</i>		+		

“+”表示在该湖为优势种。Species with the marker “+” are dominant species in this region of Nansi Lake.

表 5 南四湖各湖区浮游动物密度、生物量及其季节变化 (密度 ind/L, 生物量 mg/L)

Table 5 Density (ind/L) and biomass (mg/L) of zooplankton in different seasons in Nansi Lake

		各湖区统计 Statistics of four lake regions				南四湖各季节统计 Statistics of different seasons of Nansi Lake		
		微山湖 Weishan Lake	独山湖 Dushan Lake	昭阳湖 Zhaoyang Lake	南阳湖 Nanyang Lake	夏季 Summer	冬季 Winter	夏冬平均 Average
原生动物 Protozoa	密度 Density	635.0	603.8	363.8	287.5	216.0	724.5	470.3
	生物量 Mass	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.04	0.02
轮虫 Rotifera	密度 Density	1 417.5	1 751.3	1 342.5	2 015.0	2 001.0	1 296.0	1 648.5
	生物量 Mass	1.70	2.10	1.61	2.42	2.40	1.56	1.98
枝角类 Cladocera	密度 Density	2.3	1.1	0.8	2.2	2.0	1.5	1.8
	生物量 Mass	0.05	0.02	0.02	0.04	0.04	0.03	0.04
桡足类 Copepoda	密度 Density	6.8	3.8	3.6	2.3	5.0	3.5	4.2
	生物量 Mass	0.05	0.03	0.03	0.02	0.04	0.02	0.03
合计 Total	密度 Density	2 184.5	2 379.1	1 734.5	2 379.9	2 351.6	2 032.5	2 192.0
	生物量 Mass	2.20	2.24	1.74	2.71	2.87	1.67	2.27

都出现在 14# 采样点; 冬季平均密度为 2 032 ind/L (122 ~ 5 316 ind/L), 平均生物量为 1.67 mg/L (0.09 ~ 5.68 mg/L)。冬季平均密度和生物量的最高点都出现在 20# 采样点, 最低点都出现在 17# 采样点。除 18# 采样点和 20# 采样点外, 其他各点夏季生物量都要高于冬季。不同季节的调查发现, 除原生动物外, 其他三类浮游动物夏季的平均密度和生物量都要高于冬季 (表 5)。

### 2.5 浮游动物多样性的季节变化

南四湖丰富度指数夏季平均值为 3.52 (变化范围 2.57 ~ 4.76), 最低值出现在南阳湖 (16#), 最高值出现在昭阳湖 (14#); 冬季平均值为 2.52 (1.49 ~ 3.52), 最低值出现在南阳湖 (19#), 最高值出现在微山湖 (1#)。Shannon-Wiener 指数夏季平均值为 3.96 (2.95 ~ 5.08), 最低值出现在南阳湖 (18#), 最高值出现在微山湖 (6#); 冬季平均值为 3.48 (1.88 ~ 4.42), 最低值出现在南阳湖 (15#), 最高值出现在昭阳湖 (13#)。均匀度指数夏季平均值为 0.57 (0.39 ~ 0.77), 最低值出现在南阳湖 (18#), 最高值出现在微山湖 (6#); 冬季平均值为 0.52 (0.19 ~ 0.68), 最低值出现在南阳湖 (15#), 最高值出现在昭阳湖 (13#)。

### 2.6 南四湖浮游动物多样性与环境因子逐步回归分析结果

分别对浮游动物密度、生物量以及多样性指数与 13 个理化指标 (气温、水温、泥温、透明度、水深、溶解氧、pH、电导率、酸碱度、总氮、总磷、叶绿素和化学需氧量) 进行逐步回归分析。总氮含量是影响浮游动物密度的主要因素, 回归方程方差达到极显著水平 ( $F = 9.183, P < 0.01$ ), 逐步回归分析决定系数  $R^2 = 0.195$ ; 总氮含量和水温是影响浮游动物生物量的主要因素, 回归方程方差达到极显著水平 ( $F = 10.421, P < 0.01$ ), 决定系数  $R^2 = 0.360$ ; pH 和电导率是影响浮游动物多样性 ( $H'$ ) 的主要因素, 回归方程方差达到极显著水平 ( $F = 13.419, P < 0.01$ ), 决定系数  $R^2 = 0.420$  (表 6)。

## 3 讨论

### 3.1 南四湖浮游动物群落结构特征

郑小燕等 (2009) 对淀山湖浮游动物群落的研究发现, 浮游动物数量在 3 ~ 5 月较高, 而生物量则在 4 ~ 8 月高, 生物量高峰期晚于密度高峰期约 1 个月, 认为这是由于相对轮虫和原生动物来说, 个体大的枝角类和桡足类在夏季

表 6 浮游动物与环境因子的多元逐步回归方程

Table 6 Stepwise multiple regression among zooplankton and environmental factors

多元逐步回归方程 Stepwise multiple regression equation	$R^2$	$F$	$P$
浮游动物密度 $Density = 1\ 325.947 \times \text{总氮 Total nitrogen} + 295.794$	0.195	9.183	0.004
浮游动物生物量 $Mass = 0.094 \times \text{总氮 Total nitrogen} + 0.400 \times \text{水温 Water temperature} + 0.057$	0.360	10.421	0.005
浮游动物多样性指数 $H' = -12.095 \times \text{pH} + 2.013 \times \text{电导率 Conductivity} - 0.001$	0.420	13.419	<0.001

数量急剧上升, 在生物量上的贡献比个体小的轮虫和原生动物表现出明显的优势。与上述研究有所不同, 本次对南四湖浮游动物的研究发现, 轮虫对全年平均生物量的贡献达到了 98%, 这与轮虫的高密度有直接关系。原生动物的最适生长温度是 10~25℃, 最适生长季节是春秋两季。本次研究未采集春秋季节的数据, 但发现冬季原生动物的密度和生物量都明显高于夏季, 与其他三类浮游动物不同, 其原因还需要补充调查, 并结合更多环境数据进行阐释。

浮游动物的季节差异与水环境变化密切相关, 温度是影响浮游动物多样性的重要环境因子(王明翠等 2002), 夏季温度较高, 浮游动物新陈代谢的速度快, 生长速率快, 群落结构丰富。同时, 夏季湖泊浮游植物数量丰富, 为浮游动物提供了充足的食物资源, 秋末冬初, 水草开始大量枯萎死亡, 易造成水体污染, 不利于浮游动物的繁殖。冬季湖泊水流较慢, 水体有机物不断沉淀积累, 浮游动物的生存受到影响(孙志强等 2013)。南四湖夏季记录浮游动物 141 种, 冬季 105 种; 夏季记录优势种 10 种, 冬季 3 种; 夏季浮游动物平均密度、生物量、丰富度指数、Shannon-Wiener 指数和均匀度指数都高于冬季, 展示了南四湖夏季浮游动物较高的多样性特征。

南四湖浮游动物夏季平均密度和生物量的最高点都出现在 9# 采样点, 冬季平均密度和生物量的最高点都出现在 20# 采样点。丰富度指数夏季最高值出现在 14#, 冬季最高值出现在 1#。Shannon-Wiener 指数夏季最高值出现在 6#, 冬季最高值出现在 13#。均匀度指数夏季最高值出现在 6#, 冬季最高值出现在 13#。这些样

点多位于河流湖泊交汇处, 暗示着群落交错区浮游动物密度和多样性增加的趋势。

### 3.2 浮游动物密度、指示生物和生物多样性指数对水质指示作用

根据浮游动物密度小于 1 000 ind/L 为贫营养, 1 000~3 000 ind/L 为中营养, 大于 3 000 ind/L 为富营养的生物指标评价标准, 南四湖浮游动物全年平均密度为 2 192 ind/L, 夏季平均密度为 2 302 ind/L, 冬季平均密度 2 032 ind/L, 可知南四湖水体的营养状况基本处于中营养状态。其优势种组成中, 角突臂尾轮虫、萼花臂尾轮虫、针簇多肢轮虫、长三肢轮虫、曲腿龟甲轮虫是富营养水体的指示种类(龚循矩等 1990, 沈韞芬等 1990, 王凤娟等 2006)。

依据沈韞芬等(1990)提出的生物多样性指数越大水质越好的评价标准, 南四湖丰富度指数、Shannon-Wiener 指数和均匀度指数最低值都出现在南阳湖, 最高值多出现在微山湖和昭阳湖, 可以大致认为, 四个湖区中, 微山湖和昭阳湖的水质要好于南阳湖。然而, 谢进金等(2005)在研究中发现, 多样性指数  $H'$  未能较好地反映晋江流域水质的现状及其变化趋势, 对利用浮游动物群落多样性指数评价水体营养水平问题提出质疑。因此, 单纯从生态学角度分析及反映水域环境状况仍然不够全面。

### 3.3 南四湖浮游动物群落演替

1983 年济宁市科委对南四湖浮游动物进行了初步研究, 2007 年和 2008 年, 巩俊霞等(2011)对南四湖浮游动物的进行了采集研究。结合本研究数据, 我们对不同时期南四湖浮游动物的组成变化进行了比较, 从物种数量来看, 与 1983 年相比, 南四湖的浮游动物种类数在

2008 年减少了近 10 倍。本次调查中发现的物种数达到了 1983 年的数量的 62%，说明南四湖的整体水质正在逐步好转。从物种组成来看，与 1983 年相比，2012 年南四湖原生动物种类数增加，轮虫、枝角类、桡足类数量减少，浮游动物整体呈现小型化趋势。

本次调查在南四湖发现浮游动物 163 种，群落结构同样呈现小型浮游动物所占比例较高、大型浮游动物比例较低的特点。其中，轮虫数量最多，原生动物次之，枝角类和桡足类较少，轮虫的丰度在夏季达到最大。Nogueira (2001) 认为，轮虫的丰度高与春夏季节浮游植物的大量繁殖有关。捕食者的捕食压力是影响浮游动物群落结构和决定浮游动物群落演替方向的重要生物因子。根据体积效率假说，鱼类对浮游动物的捕食在同等能耗的情况下会优先选择个体较大的种类。南四湖湖面有大量围栏养殖鱼塘，由于鱼类对浮游动物的选择性捕食，个体较大的枝角类和桡足类数量下降，减少了与体型较小的轮虫之间的种间竞争（赵帅营 2006，郑小燕等 2009，杨亮杰等 2014），也是轮虫得以大量出现的原因。

**致谢** 合肥师范学院的吴利老师对本研究提供了很大帮助，在此致以衷心感谢！

## 参 考 文 献

- Nogueira M G. 2001. Zooplankton composition, dominance and abundance as indicators of environmental compartmentalization in Jurumirim Reservoir (Parapanema River), São Paulo, Brazil. *Hydrobiologia*, 455(1/3): 1–18.
- 龚循矩, 肖化忠, 沈蕴芬. 1990. 长江三峡地区的原生动物区系研究. *水生生物学报*, 14(4): 289–297.
- 巩俊霞, 段登选, 王志忠, 等. 2011. 南四湖浮游生物调查分析. *长江大学学报: 自然科学版*, 7(1): 39–42, 52.
- 韩茂森, 束蕴芳. 1995. 中国淡水生物图谱. 北京: 海洋出版社.
- 何晓群. 1998. 现代统计分析方法与应用. 北京: 中国人民大学出版社.
- 济宁市科委. 1983. 南四湖自然资源调查及开发利用研究. 济南: 山东科学技术出版社.
- 蒋燮治, 堵南山. 1979. 中国动物志: 节肢动物门 甲壳纲 淡水枝角类. 北京: 科学出版社.
- 金相灿, 屠清瑛. 1990. 湖泊富营养化调查规范. 2 版. 北京: 中国环境科学出版社.
- 李共国, 屠霄霞, 王佩儿, 等. 2013. 杭州湾滩涂湿地浮游生物群落特征及与环境因子的关系. *生态学杂志*, 32(10): 2764–2771.
- 林青, 由文辉, 徐风洁, 等. 2014. 滴水湖浮游动物群落结构及其与环境因子的关系. *生态学报*, 34(23): 6918–6929.
- 柳丽, 魏庆, 赵树安. 1994. 回归分析中多重共线性的诊断与处理. *中国卫生统计*, 11(1): 5–7.
- 邱小琼, 赵红雪, 孙晓雪. 2012. 沙湖浮游动物与水环境因子关系的多元分析. *生态学杂志*, 31(4): 896–901.
- 沈嘉瑞. 1979. 中国动物志: 节肢动物门 甲壳纲 淡水桡足类. 北京: 科学出版社.
- 沈蕴芬. 1999. 原生动物学. 北京: 科学出版社.
- 沈蕴芬, 章宗涉, 龚循矩, 等. 1990. 微型生物监测新技术. 北京: 中国建筑工业出版社.
- 孙志强, 施心路, 徐琳琳, 等. 2013. 景观湿地夏季原生动物群落结构与水质关系. *水生生物学报*, 37(2): 290–299.
- 王冬, 赵铭钦, 张学杰, 等. 2010. 烤烟物理特性与化学成分的相关及逐步回归分析. *中国农业大学学报*, 15(6): 52–58.
- 王凤娟, 胡子全, 汤洁, 等. 2006. 用浮游动物评价巢湖东湖区的水质和营养类型. *生态科学*, 25(6): 550–553.
- 王家楫. 1961. 中国淡水轮虫志. 北京: 科学出版社.
- 王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 2002. 湖泊富营养化评价方法及分级标准. *中国环境监测*, 18(5): 47–49.
- 吴利, 冯伟松, 陈小娟, 等. 2008. 新疆伊犁地区夏季浮游动物群落结构特征. *应用生态学报*, 19(1): 163–172.
- 谢进金, 许友勤, 陈寅山, 等. 2005. 晋江流域水质污染与浮游动物四季群落结构的关系. *动物学杂志*, 40(5): 8–13.
- 杨亮杰, 吕光汉, 竺俊全, 等. 2014. 横山水库浮游动物群落结构特征及水质评价. *水生生物学报*, 38(4): 720–728.
- 张冬融, 徐佳奕, 徐兆礼, 等. 2014. 杭州湾南岸海域春秋季节浮游动物分布特征与主要环境因子的关系. *生态学杂志*, 33(8): 2115–2123.
- 赵帅营, 韩博平. 2006. 基于个体大小的后生浮游动物群落结构分析——以广东星湖为例. *生态学报*, 26(8): 2646–2654.
- 郑小燕, 王丽卿, 盖建军, 等. 2009. 淀山湖浮游动物的群落结构及动态. *动物学杂志*, 44(5): 78–85.
- 周凤霞, 陈剑虹. 2010. 淡水微型生物图谱. 北京: 化学工业出版社.