

太湖不同富营养水平湖区轮虫季节变化的比较*

杨桂军^{1,2}, 潘宏凯³, 刘正文^{1**}, 王卫民⁴, 秦伯强¹

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

(2: 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(3: 上海立信会计学院, 上海 201620)

(4: 华中农业大学水产学院, 武汉 430070)

摘要: 2003年10月-2004年9月对太湖不同富营养水平湖区(太湖大太湖湖区、梅梁湾和五里湖)轮虫的季节变化进行了研究. 五里湖营养水平最高, 太湖大太湖湖区最低; 轮虫的种类数、数量和生物量都是五里湖最高, 太湖大太湖湖区最低. 回归分析表明, 轮虫数量与总氮和叶绿素 a 浓度呈显著正相关; 轮虫生物量与叶绿素 a 浓度呈极显著正相关. 结果表明, 太湖三个湖区轮虫群落结构显著不同, 同时表明太湖水体富营养化对轮虫的群落结构有明显的影

关键词: 太湖; 轮虫; 季节变化

Comparative study on seasonal variations in rotifers of the waters with different trophic states in Lake Taihu

YANG Guijun^{1,2}, PAN Hongkai³, LIU Zhengwen^{1**}, WANG Weimin⁴ & QIN Boqiang¹

(1: Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China)

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

(3: Shanghai Lixin University of Commerce, Shanghai 201620, P. R. China)

(4: Fisheries College, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, P. R. China)

Abstract: Seasonal variations in rotifers of the waters with different eutrophication states (the open water area, Meiliang Bay, Lake Wulihu) in Lake Taihu were studied during Oct. 2003-Sep. 2004. The concentration of nutrients was the highest in Lake Wulihu and lowest in the open water area. The species number and biomass of rotifers were the highest in Lake Wulihu and lowest in the open water area. Regression analysis suggested that there was a significant positive correlation between the number of rotifers and the concentration of TN and Chl. a; and the biomass of rotifers was also significantly correlated to the concentration of Chl. a. The study indicated that the structure of rotifer was significantly different among the three areas in Lake Taihu. It also suggested that eutrophication had significant effect on the structure of rotifer community in Lake Taihu.

Keywords: Lake Taihu; rotifer; seasonal variation

轮虫是浮游动物群落的重要组成部分, 它不仅是许多鱼类^[1,2]的重要食物, 而且还是水质的重要指示种群^[3]. 轮虫主要以真核藻类^[4]、细菌^[5]和原生动物^[6,7]作为食物; 一些轮虫种类(如莲花臂尾轮虫)甚至能利用原核藻类(如蓝藻)作为一种食物补充^[8]. 轮虫种类和数量的分布与水体营养水平有很大关系^[9,10], 武汉东湖的研究发现轮虫的种类随水体富营养化程度的加剧而减少, 轮虫数量和生物量随水体富营养化程度的加剧而增加^[11,12]; 国外的一些研究也得到相似的结果^[13,14].

太湖是我国五大淡水湖之一, 从 20 世纪 70 年代末、80 年代初开始, 富营养化日趋严重. 五里湖是位于

* 国家自然科学基金项目(40371103)和中国科学院知识创新重大项目(KZCX1-SW-12)联合资助. 2006-11-03 收稿; 2007-05-09 收修改稿. 杨桂军, 男, 1979 年生, 博士研究生; E-mail: yanggj1979@163.com.

** 通讯作者; E-mail: zliu@niglas.ac.cn.

太湖东北部的湖湾,几乎成为无锡市的一个城市湖泊,受到的污染严重,是太湖中营养水平最高的水域;梅梁湾是太湖北部一个较大的湖湾,富营养化水平仅次于五里湖;太湖大太湖湖区营养水平比梅梁湾要低,处于中富营养水平. 太湖富营养化对轮虫群落结构的影响如何,以及轮虫对太湖水体富营养化又如何响应?有关太湖轮虫的研究,虽然一些学者进行过报道^[15-17],但这些研究主要涉及轮虫的种类组成和生物监测,并且在过去几年里太湖的水环境进一步恶化和富营养化程度加剧,轮虫的群落结构也会随之变化. 本文通过对太湖大太湖湖区、梅梁湾以及五里湖轮虫的种类组成、数量分布进行了一周年的研究,旨在了解太湖富营养化对轮虫群落结构的影响,以探讨太湖生态系统对富营养化的响应.

1 材料与方法

1.1 采样站的设置

2003年10月23日至2004年9月20日,在太湖大太湖湖区、梅梁湾和五里湖共布设9个站位,进行轮虫和理化因子的现场调查. S1、S2、S3 站位于太湖大太湖湖区,S4、S5、S6 站位于梅梁湾,S7、S8、S9 站位于五里湖内(图1). 站位定点采用 Garmin 公司生产的 GPS12 型全球卫星定位系统.

1.2 样品的采集与处理

样品每月采集一次,用长2m的柱状采水器取5L湖水,然后用25号浮游生物网过滤,并将浮游动物装入50ml的方形塑料瓶中. 取2次,第1次作定性分析,保存活体. 第2次作定量分析,立即加入4%的甲醛,并摇匀. 用柱状采水器采集湖水500ml,回实验室后分析理化指标(TN, TP)和叶绿素a^[18].

1.3 数量计数

轮虫根据文献^[19,20]在显微镜下进行分类、计数. 在种群密度很高时,用分小样的方法抽样计数. 其具体步骤是:把采得的样品50ml充分摇匀后用宽口吸管吸取5ml,注入浮游动物计数框中,计数3次取其平均值,然后乘以稀释的倍数以获得单位体积中的数量.

1.4 生物量的计算方法

轮虫的生物量先求其体积,然后按 1 g/cm^3 进行换算,具体计算公式见《淡水浮游生物研究方法》^[21]. 本文中的生物量为湿重.

2 结果

2.1 太湖三个湖区的营养状况

太湖三个湖区,一周年的理化参数(TN, TP, Chl. a)表明,水体营养水平五里湖最高,梅梁湾次之,太湖大太湖湖区最低(表1).

2.2 轮虫种类组成

大太湖湖区、梅梁湾和五里湖轮虫种类数分别为19,20和23(表2). 三个湖区轮虫种类主要有: 萼花臂尾轮虫(*Brachionus calyciflorus*); 角突臂尾轮虫(*Brachionus angularis*); 矩形龟甲轮虫(*Keratellaquadata*); 曲腿龟甲轮虫(*Keratella valga*); 长三支轮虫(*Filinia longiseta*); 针簇多肢轮虫(*Polyarthra trigla*); 卜氏晶囊轮虫(*Asplanchna brightwellii*).

表1 太湖三个湖区理化参数平均值和范围(2003年10月-2004年9月)

Tab. 1 Mean and range of physical-chemical parameters in Lake Taihu during Oct. 2003 - Sep. 2004

参数	五里湖	梅梁湾	太湖大太湖湖区
总磷(mg/L)	0.174(0.020 - 0.874)	0.132(0.015 - 0.338)	0.106(0.013 - 0.250)
总氮(mg/L)	9.333(2.698 - 14.347)	6.637(1.845 - 12.171)	5.264(1.344 - 12.061)
叶绿素 a($\mu\text{g/L}$)	39.021(11.946 - 80.240)	23.838(11.705 - 56.773)	18.601(10.462 - 36.921)

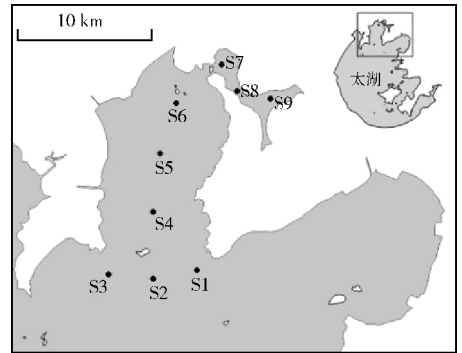


图1 调查站位的分布

Fig. 1 The map of sampling stations

2.3 轮虫密度和生物量的季节变化

太湖三个湖区轮虫年平均密度差异非常明显,太湖大太湖湖区轮虫的年平均密度最低,只有 46 ind./L,梅梁湾其次,为 95 ind./L,五里湖轮虫的年平均密度最高,达 296 ind./L。即三个湖区轮虫的年平均密度呈现一个随水体营养盐浓度提高而增加的变化趋势。太湖三个湖区轮虫的季节分布差异很大:太湖大太湖湖区轮虫密度夏季最高,平均为 82 ind./L,春季最低,只有 13 ind./L;梅梁湾最高密度出现在冬季,为 189 ind./L,最低密度也出现在春季为 29 ind./L;与太湖大太湖湖区和梅梁湾不同,五里湖轮虫密度在春季最高,达 426 ind./L,最低密度出现在夏季,为 142 ind./L。三个湖区轮虫最高密度出现的月份也不一样,太湖大太湖湖区最高密度出现在夏季的 7 月,密度为 163 ind./L;而梅梁湾最高密度出现在冬季的 1 月,为 323 ind./L;五里湖的轮虫密度在春季的 3 月达到最高,达 1020 ind./L(图 2)。

表 2 太湖三个湖区轮虫种类列表(2003 年 10 月-2004 年 9 月)

Tab. 2 List of rotifers in Lake Taihu during Oct. 2003 - Sep. 2004

轮虫	太湖大太湖湖区	梅梁湾	五里湖
卜氏晶囊轮虫(<i>Asplanchna brightwellii</i>)	+	+	+
西氏晶囊轮虫(<i>A. sieboldi</i>)			+
前节晶囊轮虫(<i>A. priodonta</i>)			+
花篮臂尾轮虫(<i>Brachionus capsuliflorus</i>)		+	+
角突臂尾轮虫(<i>B. angularis</i>)	+	+	+
萼花臂尾轮虫(<i>B. calysiflorus</i>)	+	+	+
裂足臂尾轮虫(<i>B. diversicornis</i>)	+	+	+
剪形臂尾轮虫(<i>B. farficula</i>)	+	+	+
镰形臂尾轮虫(<i>B. falcatus</i>)	+	+	+
蒲达臂尾轮虫(<i>B. budapestiensis</i>)			+
壶状臂尾轮虫(<i>B. urceus</i>)	+	+	+
螺旋龟甲轮虫(<i>Keratella cochlearis</i>)	+	+	+
矩形龟甲轮虫(<i>K. quadrata</i>)	+	+	+
曲腿龟甲轮虫(<i>K. valga</i>)	+	+	+
长三肢轮虫(<i>Filinia longiseta</i>)	+	+	+
梳状疣毛轮虫(<i>Synchaeta pectinata</i>)	+	+	+
多突囊足轮虫(<i>Asplanchnopus multiceps</i>)	+	+	+
前额犀轮虫(<i>Rhinoglena frontalis</i>)	+	+	+
细异尾轮虫(<i>Trichocerca gracilis</i>)	+	+	+
针簇多肢轮虫(<i>Polyarthra trigla</i>)	+	+	+
三翼须足轮虫(<i>Euchlanis triquetra</i>)	+	+	+
囊形单趾轮虫(<i>Monostyla bulla</i>)	+	+	+
叉角聚花轮虫(<i>Conochilus dossuarius</i>)	+	+	+

三个湖区轮虫年平均生物量变化趋势同年平均密度一样,太湖大太湖湖区轮虫的年平均生物量最低,只有 0.23 mg/L;梅梁湾其次,为 0.33 mg/L;五里湖轮虫的年平均生物量最高,达 0.69 mg/L。太湖三个湖区轮虫生物量的季节变化不同:三个湖区最高生物量都出现在冬季,其值分别为太湖大太湖湖区 0.51 mg/L,梅梁湾 0.75 mg/L,五里湖 0.98 mg/L;而三个湖区最低生物量出现的季节不同,太湖大太湖湖区最低生物量出现在秋季,为 0.07 mg/L,梅梁湾和五里湖最低生物量都出现在夏季,分别为 0.18 mg/L 和 0.31 mg/L。三个湖区轮虫最高生物量出现的月份与最高密度出现的月份不同,太湖大太湖湖区的最高生物量出现在 1

月,而不是最高密度的7月;同样梅梁湾轮虫的最高生物量出现在10月,而不是最高密度的1月;五里湖变化稍微小些,最高生物量在2月,而最高密度在3月份(图2)。

2.4 轮虫优势种

太湖三个湖区轮虫优势种及其年平均密度差异很大。太湖大太湖湖区轮虫优势种为矩形龟甲轮虫,其年平均密度为 12 ind./L,最高密度(93 ind./L)出现在7月;梅梁湾轮虫优势种为萼花臂尾轮虫,其年平均密度为 31 ind./L,最高密度(140 ind./L)则出现在1月;五里湖同梅梁湾一样,优势种也为萼花臂尾轮虫,其年平均密度为 80 ind./L,最高密度(261 ind./L)出现在3月(图3)。

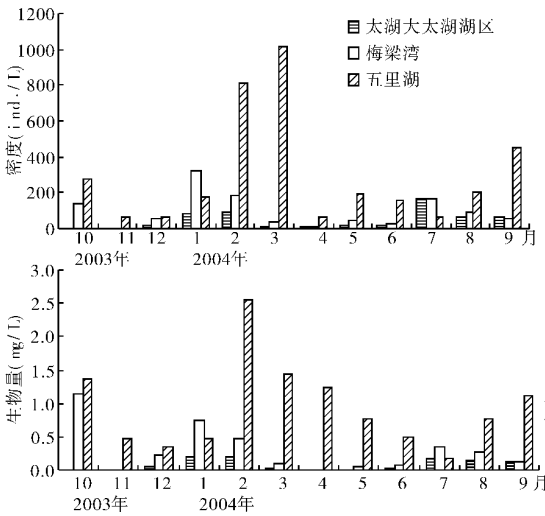


图2 太湖三个湖区轮虫密度和生物量的季节变化(2003年10月-2004年9月)

Fig.2 The seasonal variation of the density, biomass of rotifers in Lake Taihu during Oct. 2003 - Sep. 2004

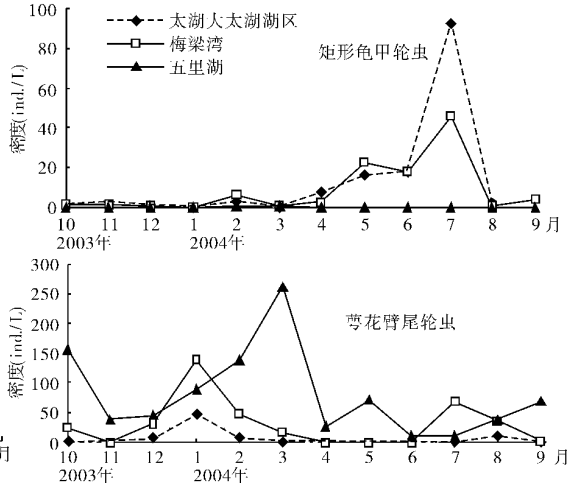


图3 太湖三个湖区轮虫优势种数量的季节变化
Fig.3 The seasonal number variation of dominant species of rotifers in Lake Taihu during Oct. 2003 - Sep. 2004

2.5 轮虫密度、生物量与总氮、总磷和叶绿素 a 的回归分析

回归分析表明,轮虫数量与总氮、叶绿素 a 浓度显著相关,而与总磷相关不显著;轮虫生物量与叶绿素 a 极显著相关,而与总氮、总磷相关不显著(表3)。

表3 轮虫密度、生物量和总氮、总磷、叶绿素 a 的回归分析

Tab.3 Regression analysis between rotifer density, biomass and TN, TP, and Chl. a

	总氮	总磷	叶绿素 a
轮虫密度	0.325 *	0.038	0.328 *
轮虫生物量	0.213	0.034	0.450 **

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

3 讨论

太湖三个湖区,水体营养水平五里湖最高,梅梁湾次之,太湖大太湖湖区最低(表1);三个湖区轮虫的种类、数量和生物量都是五里湖最高,梅梁湾次之,太湖大太湖湖区最低(图2),即随着水体营养的增加轮虫的种类、数量和生物量也增加。回归分析表明,轮虫的数量和总氮浓度显著正相关(Pearson 相关系数 $r = 0.325$, $p < 0.05$),而轮虫的数量和总磷浓度相关不显著(Pearson 相关系数 $r = 0.038$, $p > 0.05$)(表3)。与

以前太湖有关轮虫的资料相比,太湖轮虫的种类数减少了,如1951年有51种^[15],1995年为39种^[22],本研究中五里湖种类最多也只有23种。由于以前的文献中缺乏有关轮虫的数量和生物量资料或者实验方法不一样,所以无法进行比较。武汉东湖研究发现,轮虫的种类数随水体富营养化的加剧而减少,轮虫数量和生物量随水体富营养化的加剧而增加^[11,12];国外的研究也得到相似的结果^[13,14]。本研究中太湖三个湖区轮虫群落结构的不同可能有以下两种原因。

研究表明,轮虫主要以真核藻类^[4]、细菌^[5]和原生动物^[6,7]作为食物;一些轮虫(如萼花臂尾轮虫)甚至能利用原核藻类(如蓝藻)作为一种食物补充^[8]。本研究中,三个湖区叶绿素a浓度五里湖最高,梅梁湾次之,太湖大太湖湖区最低(表1);回归分析表明,轮虫的数量、生物量和叶绿素a浓度显著正相关(Pearson相关系数分别为 $r=0.328$, $p<0.05$; $r=0.450$, $p<0.01$)(表3);有研究表明,细菌的数量、生物量和生产力,梅梁湾比太湖大太湖湖区要高^[22];在每年的夏秋季节蓝藻爆发时期,蓝藻死亡后繁殖的大量细菌也能作为轮虫的重要食物来源。因此,水体营养的增加相应引起轮虫食物的增加,是太湖三个湖区轮虫群落结构不同的重要原因之一。

影响轮虫群落结构的因素还有很多,其中重要的包括大型浮游甲壳动物对轮虫的抑制作用。大型浮游甲壳动物对轮虫的抑制有两种形式:一是通过食物竞争,Daphnia对食物的滤食能力比轮虫高,轮虫在竞争中处于劣势;其次是通过机械损伤,当轮虫进入Daphnia的胸肢之间后会受到损伤,有些桡足类甚至会直接摄食轮虫^[23]。研究表明,在大型(≥ 1.2 mm)Daphnia和桡足类存在的情况下,既使食物资源很丰富,通常轮虫不会在淡水浮游动物群落中占优势^[24-27]。本研究中,太湖大太湖湖区(172 ind./L)和梅梁湾(215 ind./L)的浮游甲壳动物的年平均密度都要明显高于五里湖(125 ind./L)浮游甲壳动物的年平均密度,因此,在五里湖轮虫受到大型浮游甲壳动物的抑制最小。所以,大型浮游甲壳动物对轮虫的抑制作用可能也是太湖三个湖区轮虫群落结构不同的重要原因之一。

致谢:本研究在野外和实验室实验中得到了黄沛生、宋晓兰、王洪君、卢金伟、叶佳林、章永鹏的大力帮助,在此对他们表示衷心的感谢!

4 参考文献

- [1] Lee W J, Park Y S, Park Y T *et al.* Studies on the availability of marine bacteria and the environmental factors for the mass culture of the high quality of Rotifera and Artemia: 1. Change of fatty acid and amino acid composition during cultivation and rotifer, *Brachionus plicatilis* by marine bacteria *Erythrobacter* sp. S pi-I. *Journal of the Korean Fisheries Society*, 1997, **30**: 319 - 328.
- [2] Lim L C, Wong C C. Use of the rotifer, *Brachionus calyciflorus* Pallas, in freshwater ornamental fish larviculture. *Hydrobiologia*, 1997, **358**: 269 - 273.
- [3] 周淑婵, 黄祥飞, 唐 涛等. 香溪水库湾轮虫现状及水质评价初探. *水生生物学报*, 2006, **30**(1): 52 - 57.
- [4] Flores-Burgos J, Sarma S S S, Nandini S. Effect of single species or mixed algal (*Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus acutus*) diets on the life table demography of *Brachionus calyciflorus* and *Brachionus patulus* (Rotifera: Brachionidae). *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*, 2005, **33** (6): 614 - 621.
- [5] Kim H W, Hwang S J, Joo G J. Zooplankton grazing on bacteria and phytoplankton in a regulated large river (Nakdong River, Korea). *Journal of Plankton Research*, 2000, **22**(8): 1559 - 1577.
- [6] Jürgens K, Wickham S A, Rothhaupt K O *et al.* Feeding rates of macro- and micro- zooplankton on heterotrophic nanoflagellates. *Limnology & Oceanography*, 1996, **41**(8): 1833 - 1839.
- [7] Modenutti B, Queimálníos C, Balseiro E *et al.* Impact of different zooplankton structures on the microbial food web of a South Andean oligotrophic lake. *Acta Oecologica*, 2003, **24**: 289 - 298.
- [8] Rothhaupt K O. The influence of toxic and filamentous blue-green algae on feeding and population growth of the rotifer *Brachionus rubens*. *Int Revue Ges Hydrobiol*, 1991, **76**: 67 - 72.
- [9] 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**: 195 – 206.
- [10] 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.
- [11] 杨宇峰, 黄祥飞. 武汉东湖浮游动物群落结构的研究. *应用生态学报*, 1994, **5** (3): 319 – 324.
- [12] 刘建康. 东湖生态学研究. 北京: 科学出版社, 1990.
- [13] Pace M L. An empirical analysis of zooplankton community size structure across lake trophic gradients. *Limnology & Oceanography*, 1986, **31** (1): 45 – 55.
- [14] Yoshida T, Urabe J, Elser J J. Assessment of ‘top-down’ and ‘bottom-up’ forces as determinants of rotifer distribution among lakes in Ontario, Canada. *Ecological Research*, 2003, **18**: 639 – 650.
- [15] 白国栋. 五里湖 1951 年湖泊学调查——4: 浮游动物. *水生生物学集刊*, 1962, **2** (1): 93 – 100.
- [16] 鲍建成. 太湖的浮游生物. *淡水渔业*, 1983, **6**: 33 – 38.
- [17] 陈伟民, 秦伯强. 太湖梅梁湾冬末春初浮游动物时空变化及其环境意义. *湖泊科学*, 1998, **10** (4): 10 – 17.
- [18] 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: 6.
- [19] 王家辑. 中国淡水轮虫志. 北京: 科学出版社, 1961.
- [20] 诸葛燕. 中国典型地带轮虫的研究[学位论文]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 1997.
- [21] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991.
- [22] 秦伯强, 胡维平, 陈伟民等. 太湖水环境演化过程与机理. 北京: 科学出版社, 2004.
- [23] Couch K M, Burns C W, Gilbert J J. Contribution of rotifers to the diet and fitness of *Boeckella* (Copepoda: Calanoida). *Freshwater Biology*, 1999, **41**: 107 – 118.
- [24] Lair N. Effects of invertebrate predation on the seasonal succession of a zooplankton community: A two year study in Lake Aydat, France. *Hydrobiologia*, 1990, **198**: 1 – 12.
- [25] Macisaac H J, Gilbert J J. Discrimination between exploitative and interference competition between cladocera and *Keratella cochlearis*. *Ecology*, 1991, **72** (3): 924 – 937.
- [26] Pace M L, Cole J J, and Carpenter S R. Trophic cascades and compensation: differential responses of microzooplankton in whole-lake experiments. *Ecology*, 1998, **79** (1): 138 – 152.
- [27] Yoshida T, Ban S, Takenouchi T *et al.* Top down control of population dynamics of the dominant rotifers in two mesotrophic lakes in Hokkaido, Japan. *Archiv für Hydrobiologie*, 2000, **148**: 481 – 498.