

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

赵帅营, 韩博平*

(暨南大学水生生物研究所, 广州 510632)

摘要:星湖是一个位于热带北缘的浅水湖泊。于2002年和2003年对该湖的后生浮游动物进行了采样,并以体重作为个体大小变量研究了浮游动物的个体大小组成结构。星湖后生浮游动物的体长范围为50~1300 μm ,所有优势种的体长均小于1mm。轮虫优势种中,体长最小的是剪形臂尾轮虫、角突臂尾轮虫和广布多肢轮虫等,它们的平均体长均小于100 μm 。前节晶囊轮虫是个体最长的轮虫。枝角类的优势种及次优势种为长额象鼻溞、颈沟基合溞、短尾秀体溞和微型裸腹溞等中小型种类,平均体长介于220~430 μm 之间。桡足类优势种为台湾温剑水蚤和温中剑水蚤,平均体长介于680~730 μm 之间,此外,无节幼体和剑水蚤幼体在数量和生物量上也比较高。后生浮游动物的个体体重范围为0.034~70.24 μg ,绝大部分种类都分布在3个体重等级以上,其中前节晶囊轮虫的分布范围最宽,为0.548~70.24 μg 。后生浮游动物的种类和数量均是以小个体为主,并且随着体重增大逐渐减少,而生物量则在4.39~8.78 μg 这一中等个体体重的位置上出现峰值。根据对两个子湖——波海湖和青莲湖2002年和2003年生物量分布的分析与比较,2003年生物量均有所下降,在生物量分布的每个体重等级上轮虫基本上都是第一优势类群,其次是桡足类。星湖后生浮游动物的个体大小范围和出现生物量峰值的位置均小于温带湖泊,其个体大小结构特征与位于赤道附近的热带湖泊相似。除了与营养水平较高有关外,鱼类的下行效应和水温可能是影响该湖后生浮游动物的大小结构而产生与温带湖泊差异的重要因素。因此,进一步研究该湖中浮游动物和鱼类的关系将有助于在热带湖泊中利用生物操纵来改善水质。

关键词:后生浮游动物;个体体重;大小结构;热带湖泊

文章编号:1000-0933(2006)08-2646-09 中图分类号:S811 文献标识码:A

Size structure of the metazoan zooplankton community in a tropical lake: Xinghu Lake, South China

ZHAO Shuai-Ying, HAN Bo-Ping* (Institute of Hydrobiology, Ji'nan University, Guangzhou 510632, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2646~2654.

Abstract: Xinghu Lake, a shallow tropical lake consisting of five basins was examined for its metazoan zooplankton in 2002 and 2003. The size structure of the metazoan zooplankton was analyzed by taking body mass as the size variable. Body length varied from 50 μm and 1300 μm , with all dominant species less than 1mm long. The smallest dominant species were the Rotifera *Brachionus forficula*, *Brachionus angularis* and *Polyarthra vulgaris*, with an average length less than 100 μm . *Asplanchna priodonta* was the largest rotifer. The main cladocerans, *Diaphanosoma brachyurum*, *Moina micrura*, *Bosminopsis deitersi* and *Bosmina longirostris*, had an average size between 220 and 430 μm . In copepod, *Thermocyclops taihokuensis* and *Mesocyclops thermocyclopoides* were dominant, and their average lengths were 730 μm and 680 μm , respectively. Nauplii and cyclopoid copepodites also had high abundance and biomass.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(39900022)

收稿日期:2005-09-12; **修订日期:**2006-06-01

作者简介:赵帅营(1978~),男,河南漯河人,博士生,主要从事水域生态学研究. E-mail: zhaoshuaiying78@163.com

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

Foundation item: The project was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 39900022)

Received date: 2005-09-12; **Accepted date:** 2006-06-01

Biography: ZHAO Shuai-Ying, Ph. D. candidate, mainly engaged in aquatic ecology. E-mail: zhaoshuaiying78@163.com

The body mass of the metazoan zooplankton ranged from 0.034 μg to 70.24 μg , and included more than two size classes for almost every species examined. *Asplanchna priodonta* had the largest range of body mass, 0.548 ~ 70.24 μg . Both species number and abundance of the metazoan zooplankton were dominated by the small-sized species, and decreased with body mass, while biomass distribution had a peak in the medium size class, 4.39 μg to 8.78 μg . In two basins, Bohai and Qinglian, Rotifera contributed most to biomass in almost each size class, followed by copepod. Both the size range of the zooplankton and the body size at which peak biomass occurred were lower than in temperature lakes. Although Xinghu Lake is located far from the Equator, the size structure of its zooplankton is that of a typical equatorial lake. Besides the eutrophic status, predation by planktivorous fish and temperature appear to be the main factors controlling this size structure. The fact that the zooplankton community was dominated by small-sized animals suggests that predation effects need to be taken into account in the application of biomanipulation to the lake.

Key words: metazoan zooplankton; body mass; size structure; tropical lake

为理解生态系统的结构及其功能,人们常常把一个生物群落分割成若干个不连续的且相对独立的类群作为生态系统的研究单元。由 Lindeman^[1]提出的营养动力学定量地描述了生态系统中这些单元间的关系,是现代生态学的重要基础理论,这个理论把每种生物都划分为一个固定的营养级。在水域生态系统内,水生生物在生活史中因食性改变常常变换营养位置,营养级的关系就变得更为复杂^[2-5],因此如何有效地定量表达水生生物群落的结构就受到广泛关注,这首先需要确定进行定量研究的基本变量。在众多变量中,生物个体大小(Body size)是最易获得的变量之一,可以体长(L)、体重(W)等表示,它与生物的个体代谢率存在稳定关系: $Y = aW^{0.75}$,也称为 3/4 定律^[6]。正是基于生物的个体代谢率对个体大小依赖关系的认识,早在 1927 年 Elton 就意识到可利用动物的个体大小分布来研究动物群落的物质和能量流动^[3]。在水域生态系统内,食物传递的每一个环节都与被滤食或捕食对象的个体大小密切相关,例如浮游动物只能滤食比它自身个体小得多的浮游植物,食浮游动物的鱼类总是优先捕食浮游动物群落中的大个体等等,因此个体大小在水域生态学研究中就显得尤为重要。Sheldon 等^[7]通过对大西洋和太平洋浮游生物群落结构的研究,第一次报道了生物量按照生物个体大小分布的规律性。他们把生物个体划分成不同的大小等级,并计算各等级内的生物量,然后以生物量对个体大小作图,这些图被称为个体大小频率分布图(Size frequency distribution),也叫生物量谱(Biomass size spectrum)。他们的研究表明海洋敞水区的浮游生物量谱谱形随纬度改变会发生较大变化,但在热带和亚热带水域,生物量谱谱形趋于平缓,即随着个体大小增大,浮游生物的生物量基本上没有变化,这些发现引起了生态学界的广泛讨论。从个体大小组成的谱来分析群落结构的方法也被应用于淡水浮游生物群落^[8-11]和底栖群落^[12,13]的研究中。为了使个体大小和生物量范围不同的群落之间能够进行比较,Platt 和 Denman^[14]提出了标准生物量谱(Normalized biomass size spectrum)的概念,Han 和 Straškraba^[15]则分析了不同个体大小间隔和单位的选择对生物量谱谱形的影响,并给出了它们之间的转换关系。

水域生态系统生物量谱的建立,是对包含有许多营养级并且由众多种类组成的复杂生物群落的简化,它提供了水域生态系统结构与生态学变化的基本特征,如群落结构^[5,7,12,16],不同营养级水平上的生产量^[8,17,18]和浮游生物对环境的响应^[19]等。尽管生物量谱在海洋和北半球温带地区的一些湖泊中得到了广泛应用,但在热带亚热带淡水水域的研究比较少见。浮游动物作为水域生态系统内食物链的中间环节,在物质和营养循环中具有十分重要的作用,本文以浮游动物的个体大小作为变量来研究热带湖泊——星湖后生浮游动物的群落结构,目的是了解热带淡水水域浮游动物的个体大小结构和生物量分布特征,这将有助于认识该区域后生浮游动物不同类群的生态功能,同时可以了解在该地区应用生物操纵改善水质的可行性。

1 材料与方法

1.1 星湖概况

星湖位于广东省肇庆市七星岩风景区内(北纬 23°6',东经 112°23'附近)。星湖为一统称,由 5 个子湖即仙女湖、里湖、中心湖、波海湖和青莲湖组成,湖泊总面积 6.24 km^2 ,平均水深 2.1m,最大水深 6m,水力滞留时间

约为 300d。根据调查^[20],星湖叶绿素 a 的年平均浓度达 $15.8\text{mg}/\text{m}^3$,因此已处于富营养水平,其中波海湖富营养化程度最高。

1.2 采样时间和方法

于 2002 年 3 月、7 月、8 月、10 月和 12 月,2003 年 6 月、9 月和 12 月进行了采样,在仙女湖、中心湖、青莲湖和波海湖的中心位置各设一个采样点。里湖由于水太浅,船无法进入而未进行采样,2002 年 7 月和 10 月,波海湖因施工也未能采样。轮虫定量样品自表层每隔 1m 采水 5L,采水 20~50L 并混合均匀,取水 1L。甲壳类定量样品自表层每隔 1m 采水 5L,采水量为 20~50L,当场用 25 号浮游生物网(网孔为 $64\mu\text{m}$)过滤。轮虫和甲壳类定性样品分别用 25 号浮游生物网和 13 号浮游生物网(网孔为 $112\mu\text{m}$)在垂直方向上拖取。所有样品均固定至最终浓度为 5% 的福尔马林溶液中,定量样品需在实验室浓缩,并在显微镜和解剖镜下鉴定种类和计数。

1.3 浮游动物个体大小和生物量的测定

根据浮游动物体积的近似计算公式^[21,22],测定轮虫、枝角类和桡足类的体长、体宽或直径等以计算每个个体体积,并认为浮游动物的密度与水(密度为 $1\text{g}/\text{ml}$)相同,从而得出每个个体的体重,最后可计算浮游动物的生物量。为了减小误差,每个样品计数和测量个体都在 400 个以上。

1.4 种类、数量及生物量的个体体重分布图的绘制

以最小个体为起点,按照个体体重(Body mass)把后生浮游动物划分为 $W_{\min} \sim 2W_{\min}, 2W_{\min} \sim 4W_{\min}, \dots$ 这样的体重等级(Size class),然后计算每个等级内的生物量,并以每个等级的下限为横坐标,所在等级对应的生物量为纵坐标作图,即为生物量—个体体重分布图。种类和数量的分布图与生物量分布图绘制方法相似。

2 结果与分析

2.1 后生浮游动物体长(几何大小)特点

由于浮游动物的体长、体宽等特征参数能直观地反映个体大小,因此常用体长来表示浮游动物的个体大小。根据测定,星湖浮游动物的体长范围为 $50 \sim 1300\mu\text{m}$,具有最小体长的是剪形臂尾轮虫(*Brachionus forficula*)、角突臂尾轮虫(*Brachionus angularis*)和广布多肢轮虫(*Polyarthra vulgaris*)等种类,具有最大体长的是钩指复镖水蚤(*Allodiaptomus speciliodactylus*)。图 1 是星湖后生浮游动物各类群优势种及次优势种的特征参数,从它们的体长范围来看,三大类的最长个体均不超过 1mm。轮虫中螺形龟甲轮虫(*Keratella cochlearis*)、热带龟甲轮虫(*Keratella tropica*)、剪形臂尾轮虫、角突臂尾轮虫、广布多肢轮虫和胶鞘轮虫(*Collotheca* sp.)的平均体长均小于 $100\mu\text{m}$,体长最大的个体为前节晶囊轮虫(*Asplanchna priodonta*),平均体长约为 $300\mu\text{m}$;枝角类中长额象鼻蚤(*Bosmina longirostris*)和颈沟基合蚤(*Bosminopsis deitersi*)属于小型种类,平均体长分别只有 $240\mu\text{m}$ 和 $220\mu\text{m}$,短尾秀体蚤(*Diaphanosoma brachyurum*)和微型裸腹蚤(*Moina micrura*)为中型种类,平均体长分别达 $430\mu\text{m}$ 和 $350\mu\text{m}$;桡足类则以无节幼体和剑水蚤幼体为主,平均体长分别为 $150\mu\text{m}$ 和 $420\mu\text{m}$,成体优势种与次优势种为台湾温剑水蚤(*Thermocyclops taihokuensis*)和温中剑水蚤(*Mesocyclops thermocyclopoides*),平均体长分别为 $730\mu\text{m}$ 和 $680\mu\text{m}$ 。所有这些种类在数量和生物量上均构成后生浮游动物在各体重等级的优势种或次优势种。比较图 1 与表 1、表 2 可以发现,短尾秀体蚤、台湾

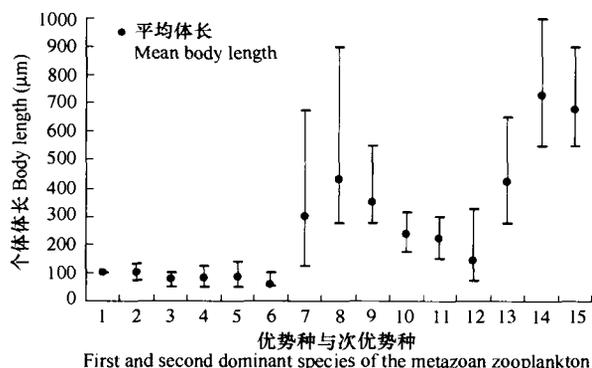


图 1 星湖后生浮游动物优势种及次优势种的体长

Fig. 1 Body length of first and second dominant species of the metazoan zooplankton in Xinghu Lake

1. 螺形龟甲轮虫 * *Keratella cochlearis*; 2. 热带龟甲轮虫 *Keratella tropica*; 3. 剪形臂尾轮虫 * *Brachionus forficula*; 4. 角突臂尾轮虫 * *Brachionus angularis*; 5. 广布多肢轮虫 *Polyarthra vulgaris*; 6. 胶鞘轮虫 *Collotheca* sp.; 7. 前节晶囊轮虫 * *Asplanchna priodonta*; 8. 短尾秀体蚤 * *Diaphanosoma brachyurum*; 9. 微型裸腹蚤 *Moina micrura*; 10. 长额象鼻蚤 * *Bosmina longirostris*; 11. 颈沟基合蚤 * *Bosminopsis deitersi*; 12. 无节幼体 Nauplii; 13. 剑水蚤幼体 * Cyclopoid copepodites; 14. 台湾温剑水蚤 * *Thermocyclops taihokuensis*; 15. 温中剑水蚤 *Mesocyclops thermocyclopoides*; 标 * 的为优势种,其余为次优势种 the species with * were dominant species, the others were secondarily dominant ones

温剑水蚤和温中剑水蚤的最大个体的体长均大于前节晶囊轮虫,但它们的湿重却小于前节晶囊轮虫,由此可以看出,由于体形存在差异,过去常用的以体长表示浮游动物个体大小的方法存在明显的缺陷。

表 1 星湖中轮虫的个体体重分布

Table 1 Body mass distribution of the Rotifera species in Xinghu Lake

轮虫种类 Rotifera species	个体体重 Body mass(μg)										
	0.034 ~ 0.068	0.068 ~ 0.137	0.137 ~ 0.274	0.274 ~ 0.548	0.548 ~ 1.097	1.097 ~ 2.195	2.195 ~ 4.39	4.39 ~ 8.78	8.78 ~ 17.56	17.56 ~ 35.12	35.12 ~ 70.24
裂足臂尾轮虫 <i>Brachionus diversicornis</i>			+	+	+						
剪形臂尾轮虫 <i>Brachionus forficula</i>	+	+	+								
角突臂尾轮虫 <i>Brachionus angularis</i>	+	+	+								
尾突臂尾轮虫 <i>Brachionus caudatus</i>			+	+							
镰形臂尾轮虫 <i>Brachionus falcatus</i>		+	+	+							
蓴花臂尾轮虫 <i>Brachionus calyciflorus</i>			+	+	+	+	+				
螺形龟甲轮虫 <i>Keratella cochlearis</i>		+									
热带龟甲轮虫 <i>Keratella tropica</i>		+	+								
暗小异尾轮虫 <i>Trichocerca pusilla</i>	+	+	+	+							
刺盖异尾轮虫 <i>Trichocerca capucina</i>			+	+	+						
圆筒异尾轮虫 <i>Trichocerca cylindrica</i>		+	+	+							
罗氏异尾轮虫 <i>Trichocerca rousseleti</i>		+	+	+							
对棘异尾轮虫 <i>Trichocerca stylata</i>		+	+								
尖尾疣毛轮虫 <i>Synchaeta stylata</i>			+	+	+						
长圆疣毛轮虫 <i>Synchaeta pectinata</i>				+	+						
没尾无柄轮虫 <i>Ascomorpha ecaudis</i>			+								
无柄轮虫 <i>Ascomorpha</i> sp.		+									
长三肢轮虫 <i>Filinia longiseta</i>	+	+	+								
广布多肢轮虫 <i>Polyarthra vulgaris</i>		+	+	+	+						
胶鞘轮虫 <i>Collotheca</i> sp.	+	+	+								
奇异六腕轮虫 <i>Hexarthra mira</i>	+	+	+	+							
柱足腹尾轮虫 <i>Gastropus stylifer</i>			+	+							
独角聚花轮虫 <i>Conochilus unicornis</i>	+	+									
轮虫 <i>Rotifera</i> sp.			+	+	+	+					
前节晶囊轮虫 <i>Asplanchna priodonta</i>					+	+	+	+	+	+	+

表 2 星湖中浮游甲壳动物的个体体重分布

Table 2 Body mass distribution of the crustacean species in Xinghu Lake

浮游甲壳动物种类 Crustacean species	个体体重 Body mass(μg)										
	0.034 ~ 0.068	0.068 ~ 0.137	0.137 ~ 0.274	0.274 ~ 0.548	0.548 ~ 1.097	1.097 ~ 2.195	2.195 ~ 4.39	4.39 ~ 8.78	8.78 ~ 17.56	17.56 ~ 35.12	35.12 ~ 70.24
无节幼体 Nauplii	+	+	+	+	+	+					
剑水蚤幼体 Cyclopoid copepodites					+	+	+	+			
哲水蚤幼体 Calanoid copepodites						+					
微小近剑水蚤 <i>Tropocyclops parvus</i>						+	+				
台湾温剑水蚤 <i>Thermocyclops taihokuensis</i>								+	+	+	
温中剑水蚤 <i>Mesocyclops thermocyclopoides</i>								+	+	+	
蒙古温剑水蚤 <i>Thermocyclops mongolicus</i>									+		
钩指复镖水蚤 <i>Allodiaptomus specillo-dactylus</i>											+
颈沟基台溞 <i>Bosminopsis deitersi</i>						+	+	+			
长额象鼻溞 <i>Bosmina longirostris</i>						+	+	+			
角突网纹溞 <i>Ceriodaphnia cornuta</i>						+	+				
微型裸腹溞 <i>Moina micrura</i>							+	+	+		
纤毛大尾溞 <i>Leydigia ciliata</i>								+	+	+	
短尾秀体溞 <i>Diaphanosoma brachyurum</i>								+	+	+	

2.2 后生浮游动物的个体体重和种类分布

鉴于体长在表示浮游动物个体大小方面的缺陷,在生物量谱的绘制中,往往采用体重、体积和等效球形直径(Equivalent spherical diameter,简称 ESD)等作为个体大小的变量。本文选取个体体重作为大小的变量。根据计算,星湖后生浮游动物的最小个体体重为 0.034 μg ,最小等级的间隔即为 0.034 ~ 0.068 μg ,以此类推,可将星

湖后生浮游动物的个体体重划分为 11 个等级,其范围为 0.034 ~ 70.24 μg 。由表 1 和表 2 可以看出,在体重为 0.034 ~ 1.097 μg 范围内,后生浮游动物为臂尾轮虫、疣毛轮虫、龟甲轮虫和轮虫等,无节幼体在这一范围内的每个等级均有分布。在体重为 1.097 ~ 70.24 μg 范围内,后生浮游动物主要是桡足类和枝角类,桡足类为剑水蚤幼体、温中剑水蚤、蒙古温剑水蚤和台湾温剑水蚤等中型种类,枝角类则是短尾秀体溞、微型裸腹溞、长额象鼻溞、颈沟基合溞等中型和小型种类,此外,前节晶囊轮虫在这一范围内的每个等级均有分布。从浮游动物分布的体重等级来看,基本上都在 3 个等级以上,其中,无节幼体和前节晶囊轮虫分布的范围最宽,分别跨 6 和 7 个等级。在星湖检测到的最大个体的后生浮游动物是前节晶囊轮虫和钩指复镖水蚤,它们的最大体重分别为 63.4 μg (体长 675 μm ,体宽 425 μm)和 61.8 μg (体长 1300 μm)。由图 2 可以看出,在体重为 0.068 ~ 0.137 μg 和 0.137 ~ 0.274 μg 两个等级内,各个子湖分布的后生浮游动物种类数均最多,整个星湖平均分别都是 9 种。随着个体体重增大,出现在各等级内的种类数减少,到 0.548 ~ 1.097 μg 这一等级,浮游动物平均只有 3 种。在最大等级内,许多样品中缺失大个体,浮游动物种类最少。

2.3 后生浮游动物的数量和生物量分布

星湖的后生浮游动物主要由轮虫构成,占浮游动物总数的 32.8% ~ 99.4%,其次是桡足类,占 0.6% ~ 60.2%,枝角类数量最低。在后生浮游动物的数量——个体体重分布上,星湖各子湖基本上都呈递减趋势,其中渤海湖浮游动物的数量在每个等级上都明显高于另外 3 个子湖(0.034 ~ 0.068 μg 范围除外,图 3)。各体重等级间的浮游动物数量差异较大,在 0.034 ~ 0.068 μg 内,整个星湖的平均数量为 164.7 ind./L,随着个体体重增大,各等级内分布的浮游动物数量逐渐减少,到 1.097 ~ 2.195 μg 这一等级,平均数量仅为 11.9 ind./L,在最大等级 35.12 ~ 70.24 μg 达到最小值 0.03 ind./L。对应于浮游动物的种类分布,在 0.034 ~ 1.097 μg 范围内,浮游动物主要为较小的轮虫和无节幼体;在 1.097 ~ 70.12 μg 范围内,浮游动物主要是枝角类、剑水蚤幼体、桡足类成体以及前节晶囊轮虫。

构成星湖后生浮游动物生物量的第一优势类群为轮虫,占总生物量的 15.2% ~ 98.2%,其次是桡足类,占 1.5% ~ 84.8%,枝角类所占比例最低,这与后生浮游动物三大类数量的比例一致。由于浮游动物的种类和数量随时间与空间发生变化,浮游动物生物量的分布也随着群落结构的改变呈现相应的特征。各子湖间以及每个子湖的不同季节,各体重等级内生物量的变化幅度均比较大,尤其是在 4.39 ~ 8.78 μg 和 8.78 ~ 17.56 μg 两个等级内,不同子湖之间的差异最为明显。将星湖 2002 年和 2003 年浮游动物的生物量进行平均,可获得星湖的平均生物量分布(图 4),它反映的是后生浮游动物群落生物量组成的整体结构特征。就平均生物量分布而言,各等级间生物量的变化范围为 1.38 ~ 41.38 μg ,在 4.39 ~ 8.78 μg 内浮游动物的生物量出现最大值(41.38 μg),主要由前节晶囊轮虫构成。在最大的两个等级内,浮游动物生物量较低,分别为 4.17 μg 和 1.38 μg ,

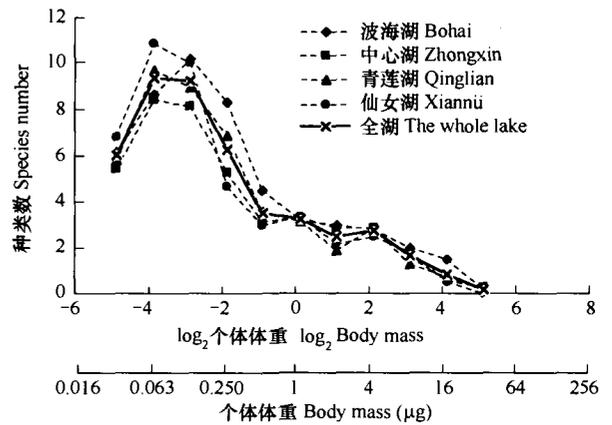


图 2 星湖后生浮游动物的平均种类数-个体体重分布
Fig. 2 Average species number-body mass distribution of the metazoan zooplankton in Xinghu Lake

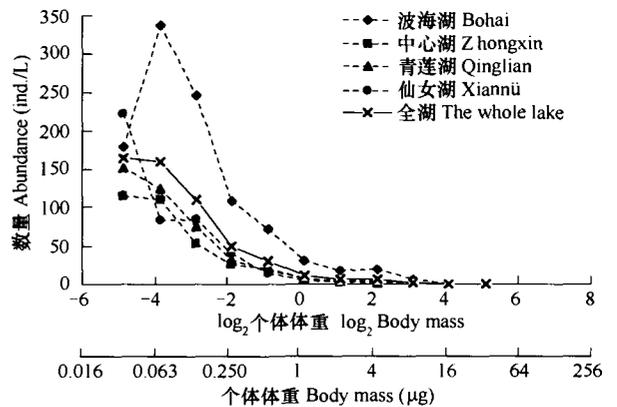


图 3 星湖后生浮游动物的平均数量-个体体重分布
Fig. 3 Average abundance-body mass distribution of the metazoan zooplankton in Xinghu Lake

因此生物量是在个体为中等体重的位置上出现峰值,这与种类和数量的变化趋势不同。

星湖各子湖后生浮游动物生物量的分布差异较大,以下对两个代表性的子湖波海湖和青莲湖进行分析。2002 年波海湖后生浮游动物的个体体重范围为 0.034 ~ 17.56 μg ,2003 年体重范围则为 0.034 ~ 35.12 μg (图 5a,b)。从后生浮游动物各体重等级的生物量来看,2002 年和 2003 年最大值均出现在 4.39 ~ 8.78 μg 范围内,并且均主要由前节晶囊轮虫构成。在个体的最小和最大等级上,后生浮游动物的生物量均比较低。从构成各体重等级生物量的比例来看,轮虫是第一优势类群,2002 年占各等级生物量的比例在 54.8% 以上,2003 年为 63.6% ~ 99.7%;桡足类为第二优势类群,在小于 1.09 μg 范围内,主要是无节幼体,大于 1.09 μg 的个体则主要为剑水蚤幼体、温中剑水蚤和台湾温剑水蚤。枝角类所占比例最低,但个体都大于 1.09 μg ,主要是短尾秀体蚤、微型裸腹蚤、长额象鼻蚤和颈沟基合蚤。

在青莲湖,2002 年后生浮游动物的体重范围为 0.034 ~ 70.24 μg ,2003 年体重范围则为 0.034 ~ 35.12 μg (图 5c,d)。从各体重等级的生物量来看,2002 年在 0.137 ~ 0.274 μg 和 1.097 ~ 2.195 μg 内,后生浮游动物生物量较高,在最小等级和较大等级 17.56 ~ 35.12 μg 内,生物量均比较低。2003 年在 0.548 ~ 1.097 μg 和 4.39 ~ 8.78 μg 内,后生浮游动物生物量较高,在体重最大的等级,生物量较低。整体来看,构成青莲湖各体重等级生物量的第一类群仍为轮虫,其次是桡足类,枝角类所占比例最低。与波海湖相比,在 0.068 ~ 8.78 μg 范围内,桡足类对青莲湖各等级内生物量的贡献增加,轮虫所占比例下降。青莲湖的优势种与波海湖基本相同,但前节晶囊轮虫的优势地位相比波海湖下降。

从以上两个子湖的数据可以发现,2002 年和 2003 年各子湖后生浮游动物的个体体重范围和生物量分布均有所差异,与 2002 年相比,2003 年的平均生物量均有所下降,个体体重范围相差一个等级。在每个子湖个体的最大等级,后生浮游动物生物量都比较低。虽然各个子湖以及不同子湖之间后生浮游动物生物量分布存在差异,但构成各大小等级生物量的第一类群都是轮虫,其次是桡足类,最后是枝角类。

3 讨论

星湖地处热带北缘,气温、水温等水文条件具有热带湖泊的特征。尽管星湖为浅水湖泊,但从组成后生浮游动物的主要种类来看,基本上是浮游性种类,因此后生浮游动物的大小结构及其生物量分布几乎不受底栖群落的影响,这种分布就代表了星湖敞水区后生浮游动物的群落分布。Lewis^[23]认为,在热带湖泊中,枝角类和桡足类中比较常见的种类通常小于 1mm。星湖常见的枝角类是短尾秀体蚤、微型裸腹蚤、长额象鼻蚤和颈沟基合蚤,它们的最大个体体长分别为 0.9mm,0.55mm,0.3mm 和 0.3mm,桡足类常见种类为台湾温剑水蚤和温中剑水蚤,它们的最大个体体长分别为 1mm 和 0.9mm。由此看来,星湖后生浮游动物的个体大小比较符合热带湖泊浮游动物的特征。

星湖后生浮游动物的数量随着个体体重增大逐渐减少,这与许多海洋和温带淡水生态系统中包含有更多生物类群的大小谱的变化规律相似^[24-27]。但与巴西 Parana 河平原上的热带湖泊不同,在这些湖中,浮游动物的数量随着个体大小增大逐渐增加,他们认为这是由于湖中同时缺乏鱼类对浮游动物大个体和无脊椎动物对浮游动物小个体的选择性捕食造成的^[28]。由于动物的新陈代谢比率随个体增大逐渐减小^[6],轮虫个体较小则新陈代谢比率较高,因此只有在食物比较充足情况下才能维持其生存^[29]。此外,轮虫的食性具有较强的可塑

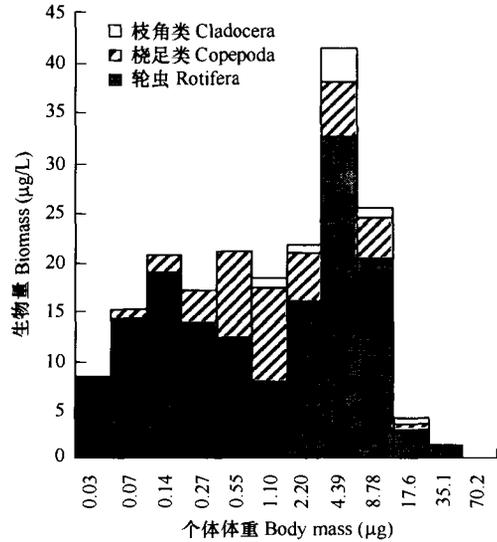


图 4 星湖后生浮游动物的平均生物量-个体体重分布
Fig. 4 Average biomass-body mass distribution of the metazoan zooplankton in Xinghu Lake

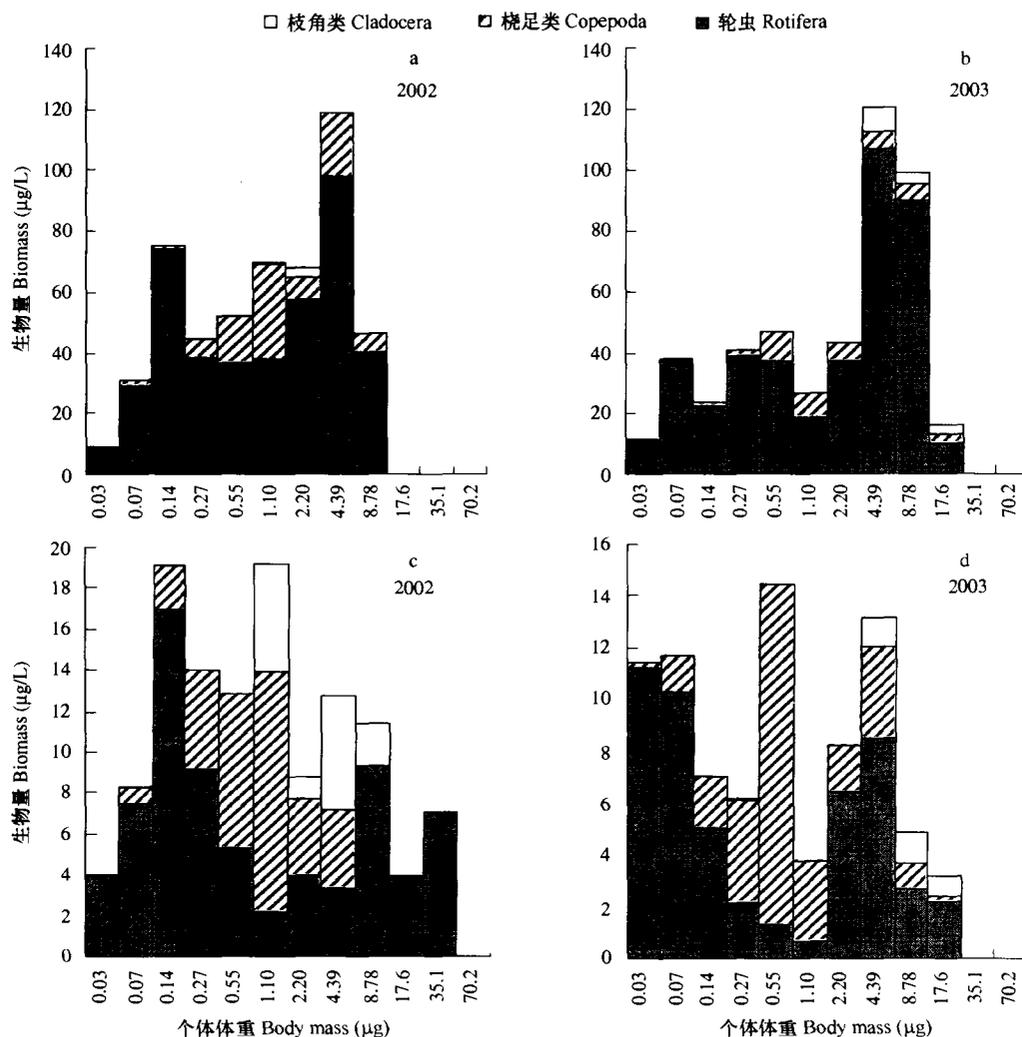


图5 2002年和2003年渤海湖和青莲湖后生浮游动物平均生物量-个体体重分布
Fig.5 Average biomass-body mass distribution of the metazoan zooplankton in the two basins in 2002 and 2003

渤海湖 Bohai(a,b), 青莲湖 Qinglian(c,d)

性,能以小的颗粒物如细菌和有机碎屑等为食,而这些物质在富营养水体中往往很丰富^[30]。星湖处于富营养水平,即使对于食物浓度要求较高的轮虫来讲,食物资源也比较充足,这使轮虫在星湖具有较高的数量。当水体中食浮游生物鱼类密度较高时,以大个体为主的浮游动物群落会变为以个体较小的浮游动物为主,这主要是由鱼类的选择性捕食造成的^[31]。星湖主要放养有滤食性的鲢鱼、鳙鱼和杂食性的罗非鱼等鱼类,且渔业产量逐年上升,如它的子湖之一仙女湖2002年与2003年渔业产量分别达到 $292\text{kg}/\text{hm}^2$ 和 $311\text{kg}/\text{hm}^2$ ^[32]。在这样高的鱼类密度下,浮游动物大个体就承受比较大的捕食压力,轮虫通常个体较小则被捕食压力较小,因此容易成为优势类群。加上星湖为浅水湖泊,水环境的退化使水生高等植物趋于消失,浮游动物缺少可以藏匿的生境。而且星湖水温常年较高(除12月~翌年1月份某些时候略低于 20°C ,其余月份均高于 20°C ,年平均水温 23°C ,而在温带地区,湖水年平均温度约为 $12\sim 15^\circ\text{C}$ ^[23]),有利于鱼类的连续生长和繁殖,这些因素都增加了浮游动物特别是大个体种类被鱼类捕食的压力,这可能是导致星湖浮游动物的大个体数量极低而轮虫数量较高的一个原因。

在星湖后生浮游动物三大类群中,轮虫个体体重的分布范围最广,其次是桡足类,枝角类仅出现在几个等级内,三大类的生物量在生物量——个体体重分布上互相重叠。根据 Gaedke 等^[16,33]对温带地区富营养的浅水 Müggelsee 湖和深水 Constance 湖的研究,在浮游生物平均生物量谱上,浮游甲壳类生物量均大于轮虫,轮虫

和浮游甲壳类的最大生物量都出现在中等大小个体的位置上,其中浮游甲壳类生物量最大值是由于大型枝角类溞属(*Daphnia*)占有优势地位。而星湖作为热带北缘的浅水湖泊,生物量的分布与温带湖泊呈现完全不同的特征,首先表现在轮虫生物量高于浮游甲壳类成为第一优势类群,其次由于星湖中未检测到如溞属这样的大个体,浮游动物的个体大小范围也远小于温带湖泊,且轮虫生物量的最大值不一定出现在个体为中等体重的位置上(图 4,图 5),浮游甲壳类生物量的最大值则位于个体体重较小的位置上,并且主要由桡足类的无节幼体和桡足幼体组成。

Sprules 等^[8]根据对北美温带湖泊的研究,发现浮游生物量谱存在两个峰值,分别对应于浮游植物和浮游动物,其中浮游动物的峰值出现在个体大小为 500 μm (等效球形直径),即 64 μg 处。星湖浮游动物生物量的最大值出现在 4.39~8.78 μg 内,在个体体重的最大等级 35.12~70.24 μg 内,浮游动物生物量较低,因此,生物量出现峰值的个体体重远小于 64 μg ,这主要是由于星湖缺少大个体。与温带湖泊相比,热带湖泊中大个体的浮游动物种类往往比较稀少^[23]。如在温带湖泊,溞属常是构成浮游动物生物量的重要种类,但在热带湖泊却比较少见,即使出现一些种类,个体与温带湖泊的相比也比较小,此外,哲水蚤也是温带湖泊个体最大的浮游动物中比较常见的种类,但在许多热带湖泊则极少或不存在^[34,35]。*Daphnia*在热带和温带水域分布的差异可能与水温有关,如 Burns 和 Rigler^[36]发现 *Daphnia rosea* 的滤食效率随着水温升高而增加,但超过 20 $^{\circ}\text{C}$ 后就急剧下降。Bell 和 Ward^[37]发现当湖水温度超过 20 $^{\circ}\text{C}$ 时,*Daphnia pulex* 就会迁移到较冷的水层中。由 DuMont^[38]对非洲湖泊的研究表明,只有当水温低于 20 $^{\circ}\text{C}$ 时,*Daphnia* 才会出现。根据 Gillooly 和 Dodson^[39]对温带和热带水体的比较,当水体温度超过 20 $^{\circ}\text{C}$ 时,溞属的数量通常很低。而热带湖泊常年水温较高也使鱼类对浮游动物构成较强的捕食压力。如前所述,星湖水温常年较高,即使在某些时候略低于 20 $^{\circ}\text{C}$,但持续时间很短,而此时仍面临鱼类较强的捕食压力。因此,2002 年和 2003 年水样中都未发现溞属,这可能与水温有较大关系,而哲水蚤(主要是钩指复镖水蚤)数量也极低则可能受鱼类摄食的影响。

根据 Stemberger 和 Gilbert^[40]对个体大小不同的轮虫种类的研究,轮虫的个体临界食物浓度随着个体大小增大而增加,因此他们认为个体较大的种类只有在富营养水体才比较常见,如萼花臂尾轮虫(*Brachionus calyciflorus*)和卜氏晶囊轮虫(*Asplanchna brightwelli*)往往只出现在大湖(the Great Lakes)的湖湾与河口等富营养区域。星湖处于富营养水平,其中波海湖富营养化程度最高。前节晶囊轮虫是星湖个体最大的轮虫种类,在每个子湖均有较高的数量,其中波海湖数量最高(最高时达 216ind./L^[41]),这种分布正反映了前节晶囊轮虫对营养水平的上述响应。加上前节晶囊轮虫身体的绝大部分呈无色透明,其被鱼类捕食压力要小于同样体长的桡足类和枝角类,于是成为星湖中的最大个体和对生物量贡献最大的种类。比较数量和生物量的个体体重分布可以发现,虽然在个体较小等级上浮游动物的数量远远高于中等个体等级,但由于它们的个体体重相差 3~4 个数量级,浮游动物的生物量仍在体重为中等个体的位置上出现最大值。

由 Carpenter 等^[42]提出的营养级联反应假设认为,通过对鱼的调控,使浮游动物群落向大个体方向演替,才能有效地控制初级生产力,达到抑止藻类生物量的目的。这一假设是在对温带湖泊研究的基础上提出的。在热带地区,鱼类和浮游动物的关系变得更为复杂。许多鱼类同时摄食浮游植物和浮游动物,因此即是浮游动物的捕食者,又是竞争者^[43]。加上水体温度常年较高,生活在其中的鱼类能连续生长和繁殖,对浮游动物构成较强的捕食压力,导致许多水体中浮游动物大个体的数量极低甚至消失^[44]。因此,在温带地区适用的生物调控并不能直接应用于热带地区,星湖也面临同样的问题,进一步研究该湖中鱼类和浮游动物的关系以及它们对生态系统的影响,将有助于利用生物措施来改善星湖的水质。

通过上述分析可以发现,星湖地处热带北缘,其浮游动物的大小结构具有热带湖泊的特点,与温带湖泊浮游动物的生物量及个体大小组成不同,缺少大个体种类,鱼类捕食可能是形成星湖后生浮游动物群落这种个体大小结构的一个重要因素,同时,水温可能也是导致星湖浮游动物种类组成与温带湖泊存在差异的一个因素。

References:

- [1] Lindeman R L. The trophic-dynamic aspect of ecology. *Ecology*, 1942, 23: 399~417.
- [2] Cousins S H. The trophic continuum in marine ecosystem: structure and equations for a predictive model, In: Ulanowicz R E and Platt T eds. *Ecosystem*

- Theory for Biological Oceanography. Can. Bull. Fish. Aquat. Sci., 1985, 213: 76 ~ 93.
- [3] Platt T. Structure of the marine ecosystem: its allometry basis. In: Ulanowicz R E and Platt T eds. Ecosystem theory for biological oceanography. Can. Bull. Fish. Aquat. Sci., 1985, 213: 55 ~ 64.
- [4] Polis G A, Winemiller K O. Food Webs: Integration of Patterns & Dynamics. New York: Chapman & Hall, 1996.
- [5] Rodriguez J and Mullin M M. Relation between biomass and body weight of plankton in a steady state oceanic ecosystem. Limnol. Oceanogr., 1986, 31: 361 ~ 370.
- [6] Peters R H. The Ecological Implications of Body Size. Cambridge: Cambridge University Press, 1983.
- [7] Sheldon R W, Prakash A, Sutcliffe W H. The size distribution of particles in the ocean. Limnol. Oceanogr., 1972, 17: 327 ~ 340.
- [8] Sprules W G, Casselman J M, Shuter B J. Size distribution of particles in the lakes. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 1983, 40: 1761 ~ 1769.
- [9] Sprules W G, Brandt S B, Stewart D J, et al. Biomass size spectrum of the lake Michigan pelagic food web. Can. J. Fish. Aquatic. Sci., 1991, 48: 105 ~ 115.
- [10] Ahrens M A, Peters R H. Plankton community respiration: relationships with size distribution and lake trophy. Hydrobiologia, 1991, 224: 77 ~ 87.
- [11] Echevarría F, Rodríguez J. The size structure of plankton during a deep bloom in a stratified reservoir. Hydrobiologia, 1994, 284: 113 ~ 124.
- [12] Schwinghamer P. Characteristic size distribution of integral benthic communities. Can. J. Fish Aquat. Sci., 1981, 38: 1255 ~ 1263.
- [13] Schwinghamer P. Generating ecological hypotheses from biomass spectra using causal analysis, a benthic example. Mar. Ecol. Prog. Ser., 1983, 13: 151 ~ 166.
- [14] Platt T, Denman K. Organization in the pelagic ecosystem. Helgol. Wiss. Meeresunters., 1977, 30: 575 ~ 581.
- [15] Han B P, Straškraba M. Size dependence of biomass spectra and population density I. The effects of size scale and size intervals. J. Theor. Biol., 1998, 191: 259 ~ 265.
- [16] Gaedke U, Seifried A, Adrian R. Biomass size spectra and plankton diversity in a shallow eutrophic lake. Internat. Rev. Hydrobiol., 2004, 89: 1 ~ 20.
- [17] Sheldon R W, Sutcliffe W H, Paranjape A. Structure of pelagic food chain and relationship between plankton and fish production. J. Fish. Res. Board Can., 1977, 34: 2344 ~ 2353.
- [18] Borgmann U. Models on the slope of, and biomass flow up, the biomass size spectra. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 1987, 44 (Supplement II): 136 ~ 140.
- [19] Gasol J M, Guerrero R, Pedros-Alio C. Seasonal variations in size structure and prokaryotic dominance in sulfurous Lake Ciso. Limnol. Oceanogr., 1991, 36: 860 ~ 872.
- [20] Lin S J, Gu J G, Wei P, et al. Comparison of ecological characteristics between Gongping Reservoir and Xinghu Lake, Guangdong Province. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24 (7): 773 ~ 779.
- [21] Chen X M. Measurements of freshwater copepods. Acta Hydrobiologica Sinica, 1981, 7 (3): 397 ~ 408.
- [22] Zhang Z S and Huang X F. Methods for study on freshwater plankton. Beijing: Science Press, 1991.
- [23] Lewis W M. Tropical lakes: how latitude makes a difference. In: Schiemer F and Boland K T eds. Perspectives in Tropical Limnology. Amsterdam: SPB Academic publishing, 1996, 43 ~ 64.
- [24] Sprules W G, Munawar M. Plankton size spectra in relation to ecosystem productivity, size, and perturbation. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 1986, 43: 1789 ~ 1794.
- [25] Rodríguez J, Jiménez F, Bautista B, et al. Planktonic biomass spectra dynamics during a winter production pulse in Mediterranean coastal waters. Journal of Plankton Research, 1987, 9: 1183 ~ 1194.
- [26] Rodríguez J, Echevarría F, Jiménez-Gómez F. Physiological and ecological scalings of body size in an oligotrophic, high mountain lake (La Caldera, Sierra Nevada, Spain). Journal of Plankton Research, 1990, 12: 593 ~ 599.
- [27] Ahrens M A, Peters R H. Patterns and limitations in limnoplankton size spectra. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 1991, 48: 1967 ~ 1978.
- [28] Azevedo F, Bonecker C C. Community size structure of zooplankton assemblages in three lakes on the upper River Paraná floodplain, PR-MS, Brazil. Hydrobiologia, 2003, 505: 147 ~ 158.
- [29] Hall D J, Threlkeld S T. The size-efficiency hypothesis and the size structure of zooplankton communities. Ann. Rev. Ecol. Syst., 1976, 7: 177 ~ 208.
- [30] Nogueira M G. Zooplankton composition, dominance and abundance as indicators of environmental compartmentalization in Jurumirim Reservoir (Parapanema River), São Paulo, Brazil. Hydrobiologia, 2001, 455: 1 ~ 18.
- [31] Brooks J L, Dodson S I. Predation, body size, and composition of plankton. Science, 1965, 150: 28 ~ 35.
- [32] Chen X N, Guo Y J. Succession of aquatic vegetation in Lake Xiannü of Lake Xinghu, Zhaoqing City, Guangdong Province. J. Lake Sci., 2005, 17(4): 334 ~ 339.
- [33] Gaedke U. The size distribution of plankton biomass in a large lake and its seasonal variability. Limnol. Oceanogr., 1992, 37: 1202 ~ 1220.
- [34] Fernando C H. The freshwater zooplankton of Sri Lanka, with a discussion of tropical freshwater zooplankton composition. Int. Revue ges. Hydrobiol., 1980a, 65: 85 ~ 126.
- [35] Fernando C H. The species and size composition of tropical freshwater zooplankton with special reference to the Oriental Region (South East Asia). Int. Revue ges. Hydrobiol., 1980b, 65: 411 ~ 426.
- [36] Burns C W, Rigler F H. Comparison of filtering rates of *Daphnia rosea* in lake water and in suspensions of yeast. Limnol. Oceanogr., 1967, 12: 492 ~ 502.
- [37] Bell R L, Ward F J. Incorporation of organic carbon by *Daphnia pulex*. Limnol. Oceanogr., 1970, 15: 713 ~ 726.
- [38] DuMont H J. On the diversity of the cladocera in the tropics. Hydrobiologia, 1994, 272: 27 ~ 38.
- [39] Gillyool J F, Dodson S I. Latitudinal patterns in the size distribution and seasonal dynamics of new world, freshwater cladocerans. Limnol. Oceanogr., 2000, 45: 22 ~ 30.
- [40] Stemberger R S, Gilbert J J. Body size, food concentration, and population growth in planktonic rotifers. Ecology, 1985, 66: 1151 ~ 1159.
- [41] Zhao S Y, Lin Q Q, Liu Z W, et al. Characteristics of the metazoan zooplankton community in Xinghu Lake—a southern sub-tropical lake. Acta Hydrobiologica Sinica, 2006, in press.
- [42] Carpenter S R, Kitchell J F, Hodgson J R. Cascading trophic interactions and lake productivity. Bioscience, 1985, 35: 634 ~ 639.
- [43] Nilsson J P. Tropical lakes—functional ecology and future development: The need for process orientated approach. Hydrobiologia, 1984, 113: 231 ~ 242.
- [44] Fernando C H. Zooplankton, fish and fisheries in tropical freshwaters. Hydrobiologia, 1994, 272: 105 ~ 123.

参考文献:

- [20] 林少君, 顾继光, 魏鹏, 等. 广东省公平水库与星湖生态特征的对比分析. 生态学杂志, 2005, 24(7): 773 ~ 779.
- [21] 陈雪梅. 淡水桡足类生物量的测算. 水生生物学集刊, 1981, 7(3): 397 ~ 408.
- [22] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究. 北京: 科学出版社, 1991.
- [32] 陈学年, 郭玉娟. 广东肇庆星湖仙女湖区水生植被的演变. 湖泊科学, 2005, 17(4): 334 ~ 339.
- [41] 赵帅营, 林秋奇, 刘正文, 等. 南亚热带湖泊——星湖后生浮游动物群落特征研究. 水生生物学报, 2006.