

## 竞争捕食作用对千岛湖浮游动物群落结构的影响\*

胡梦红<sup>1,2</sup>, 杨丽丽<sup>1,2</sup>, 刘其根<sup>1,2\*\*</sup>

(1: 上海海洋大学水产与生命学院, 农业部水产种质资源与利用重点开放实验室, 上海 201306)

(2: 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306)

**摘要:** 竞争与捕食作用是调节湖泊和池塘等淡水生态系统结构的主要动力, 并且影响着浮游动物的群落结构和种群动态变化。为了阐明生物因素对千岛湖浮游动物群落结构的影响, 于 2009—2010 年对千岛湖浮游动物群落结构变化规律进行调查。利用 Pearson 相关性分析和多元逐步回归法分析生物因素对千岛湖中浮游动物群落结构的影响。对千岛湖 1999、2004、2007—2010 年的鲢鳙鱼生物量和浮游动物生物量的统计分析表明, 1999 年鲢鳙鱼的生物量约为 2004、2007—2010 年年平均生物量的 1/5, 而轮虫和桡足类生物量变化不大, 枝角类中盩形蚤密度下降。鲢鳙鱼放养后浮游植物密度下降, 而大型浮游动物(如盩形蚤)的密度变化趋势与浮游植物相一致, 因此推断鲢鳙鱼的放养将对千岛湖浮游动物群落结构产生影响。

**关键词:** 浮游动物; 竞争; 捕食; 群落结构; 鲢鱼; 鳙鱼; 千岛湖

## Effects of predation and competition on zooplankton community structure in Lake Qiandao

HU Menghong<sup>1,2</sup>, YANG Lili<sup>1,2</sup> & LIU Qigen<sup>1,2</sup>

(1: Key Laboratory of Aquatic Genetic Resources and Utilization, Ministry of Agriculture, College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, P. R. China)

(2: College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, P. R. China)

**Abstract:** Predation and competition are the main factors regulating population dynamic of freshwater organisms and also the most important structuring forces in freshwater ecosystems. Lake Qiandao is a large deep reservoir where pelagic community is dominated by silver carp *Hypophthalmichthys molitrix* and bighead carp *Aristichthys nobilis*. In order to understand the effects of biological factors affecting zooplankton community structure in the upper, middle, and lower reaches of Lake Qiandao, a two-year study was conducted monthly from 2009 to 2010. Pearson correlation analysis and stepwise multiple regression were applied to identify the major biological factors influencing zooplankton community variations. Comparing the data to the previous studies, the present study revealed that the biomass of silver carp and bighead carp in 1999 was one fifth of the average in 2004 and in the period from 2007 to 2010, and the biomass of rotifer and copepod almost kept constant, while *Daphnia hyaline* biomass decreased substantially which was caused by the decrease of phytoplankton biomass. Hence, we suggest the bighead carp might affect the zooplankton community structure significantly in Lake Qiandao.

**Keywords:** Zooplankton; competition; predation; community structure; silver carp; bighead carp; Lake Qiandao

共存的物种在利用共同资源如食物和空间时存在着竞争行为, 共存的物种之间还存在捕食行为, 其中对浮游动物而言, 捕食行为主要分为植食性浮游动物对浮游植物的捕食以及肉食性桡足类剑水蚤、轮虫、透明薄皮蚤等对小型浮游动物的捕食<sup>[1]</sup>。竞争与捕食作用是调节淡水生态系统中浮游动物群落结构的主要动力<sup>[1]</sup>。

千岛湖(29°22' ~ 29°50'N, 118°34' ~ 119°15'E)是以鲢鳙鱼占主导作用的大型水库, 近年来通过放养鲢

\* 国家自然科学基金项目(31072218)、农业部农业公益性行业科研专项项目(201303056)、上海市教育委员会科技创新项目(13YZ093)和上海高校青年教师培养资助计划项目(ZZhy12001)联合资助。2013-08-10 收稿; 2014-01-14 收修改稿。胡梦红(1982~), 女, 博士, 讲师; E-mail: mhhu@shou.edu.cn。

\*\* 通信作者; E-mail: qgliu@shou.edu.cn。

鳙控制蓝藻水华来减轻水体富营养化是学者们关注与争论的焦点问题<sup>[2-3]</sup>. 有些学者支持 Shapiro 在水域生态学研究领域最先提出的经典生物操纵理论, 认为应该减少水体中滤食鱼类或者增加肉食性鱼类的数量, 这可以导致浮游动物数量的增加和种类组成的大型化, 进而提高浮游动物对浮游植物的摄食效率, 降低浮游植物的现存量<sup>[4]</sup>. 也有些学者认为浮游动物只能控制小型藻类, 对于丝状藻和大型藻类如微囊藻水华则是无能为力的<sup>[5]</sup>. 因此, 与经典生物操纵理论提出的利用浮游动物控制浮游植物的观点相反, 有些学者提出非经典生物操纵理论, 即利用放养滤食性鱼类直接控制浮游植物数量<sup>[6-7]</sup>. 然而在非经典生物操作理论的具体运用中, 作为治理富营养化水体的工具种鲢鳙鱼, 其大量放养条件下水体中浮游动物群落变化的情况报道不多. 千岛湖自 2000 年起大量放养鲢鳙鱼来控制水华<sup>[2]</sup>、净化水质, 但是最近有学者提出鲢鳙鱼会摄食千岛湖中的浮游动物, 致使浮游动物数量较少而引起水华, 以及鲢鳙鱼的摄食会导致千岛湖浮游动物小型化<sup>[2,5]</sup>. 千岛湖浮游动物的种类、现存量已开展过很多研究<sup>[8-10]</sup>, 但是关于浮游动物自身的竞争与捕食对浮游动物群落动态变化的影响, 还需要进行深入的调查和分析. 本研究旨在通过了解千岛湖中浮游动物之间的竞争和捕食关系及竞争、捕食之后产生的结果, 具体分析鲢鳙鱼对千岛湖浮游动物群落结构的影响.

## 1 研究区域与研究方法

### 1.1 研究区域概况

于 2009 年 1 月至 2010 年 12 月, 根据千岛湖的水体形态、水流特征等特点, 于千岛湖的河流区(S1<sup>#</sup>)、过渡区(S2<sup>#</sup>)、湖心区(S3<sup>#</sup>)共设置 3 个采样点, 然后根据各采样点的水文特征及其水体深度, 对水样进行分层采集. 其中 S1<sup>#</sup>点设定 7 个水层(0.5、4、8、12、16、20、25 m), S2<sup>#</sup>点设定 8 个水层(0.5、4、8、12、16、20、25、30 m), S3<sup>#</sup>点设定 12 个水层(0.5、4、8、12、16、20、25、30、35、40、45、50 m). 于 2009 年 1 月至 2010 年 12 月逐月进行采样, 每次采样于每月中旬上午 8 点至 11 点完成.

### 1.2 采样方法

参考《淡水浮游生物研究方法》进行<sup>[11]</sup>采样. 浮游动物定性样品采集: 用 25<sup>#</sup>浮游生物网(孔径 64 μm)在水面下 0~0.5 m 水层做“∞”形拖取 5 min, 经 4% 福尔马林固定后镜检观察. 轮虫定量样品采集: 用 5 L 有机玻璃采水器在各水层处采 1 L 水样, 鲁哥试剂固定, 静置 24 h 后浓缩至 30 ml, 移取 1 ml 浓缩匀液至 1 ml 计数框, 20×10 倍显微镜下全片计数轮虫数量(平行 3 次). 枝角类与桡足类定量样品采集: 用 5 L 有机玻璃采水器在各水层采 10 L 水样, 经 13<sup>#</sup>浮游动物过滤网(孔径 86 μm)过滤后, 4% 福尔马林固定<sup>[12]</sup>, 浓缩后在 10×10 倍显微镜下全部计数. 浮游动物种类鉴定参考文献[13-16]. 浮游动物生物量换算参考《内陆水域渔业自然资源调查手册》中的方法进行<sup>[17]</sup>.

本文提及的 1999<sup>[8]</sup>、2004<sup>[9]</sup>、2007 和 2008 年<sup>[10]</sup>千岛湖浮游动物群落采样和计数的步骤均按照《淡水浮游生物研究方法》<sup>[11]</sup>进行, 与本研究具有参考对比性.

### 1.3 数据处理

优势度计算公式为:

$$Y = \frac{n_i}{N} f_i \quad (1)$$

式中,  $Y$  为优势度,  $n_i$  为第  $i$  种的个体数,  $N$  为样点所有浮游动物种类的总个体数,  $f_i$  为第  $i$  种在各样点出现的频率. 当优势度  $Y \geq 0.02$  时, 该种类为优势种<sup>[18]</sup>. 浮游动物生物量与环境因子的关系分别采用 SPSS 和 EXCEL 软件进行 Pearson 相关性分析和多元逐步回归分析.

## 2 结果与分析

### 2.1 浮游植物对浮游动物的影响

2.1.1 植食性浮游动物生物量与浮游植物各门类生物量的相关性 通过对植食性浮游动物生物量与浮游植物各门类生物量的相关性分析得出, 枝角类生物量与绿藻门、金藻门呈显著正相关( $P < 0.05$ ); 无节幼体与蓝藻门、裸藻门呈显著正相关( $P < 0.05$ ); 轮虫与硅藻门、甲藻门均呈极显著正相关( $P < 0.01$ ); 哲水蚤与蓝

藻门呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),与绿藻门呈显著正相关( $P < 0.05$ )(表1).

表1 浮游动物生物量与浮游植物各门类生物量的相关性

Tab. 1 Correlation between annual average biomass of zooplankton and phytoplankton

浮游动物	参数	蓝藻门	绿藻门	硅藻门	甲藻门	金藻门	隐藻门	黄藻门	裸藻门
枝角类	相关系数	0.058	0.254 *	-0.040	0.065	0.270 *	0.101	-0.194	0.023
	P	0.628	0.031	0.738	0.585	0.022	0.399	0.103	0.848
	N	72	72	72	72	72	72	72	72
无节幼体	相关系数	0.296 *	0.223	0.049	0.051	-0.064	0.137	-0.056	0.274 *
	P	0.012	0.060	0.682	0.668	0.596	0.250	0.638	0.020
	N	72	72	72	72	72	72	72	72
轮虫	相关系数	0.033	0.015	0.362 **	0.750 **	-0.048	0.080	-0.098	-0.016
	P	0.784	0.898	0.002	<0.001	0.690	0.502	0.413	0.897
	N	72	72	72	72	72	72	72	72
哲水蚤	相关系数	0.440 **	0.261 *	0.036	0.055	-0.091	0.079	-0.166	-0.058
	P	0	0.027	0.767	0.648	0.446	0.508	0.162	0.630
	N	72	72	72	72	72	72	72	72

\*表示显著相关, $P < 0.05$ ; \*\*表示极显著相关, $P < 0.01$ .

2.1.2 盃形蚤与浮游植物的关系 没有放养鲢鳙鱼之前,千岛湖1999年的浮游植物年平均密度为 $269.5 \times 10^4$  cells/L,2007-2010年的年平均密度范围为 $153.7 \times 10^4 \sim 161.0 \times 10^4$  cells/L,放养鲢鳙鱼之后,浮游植物密度约减少了40.5%(图1).盃形蚤的密度变化趋势与浮游植物密度一致,从1999年的12.8 ind./L下降到2010年的2.25 ind./L,盃形蚤密度大约下降了82%.通过对盃形蚤生物量与浮游植物各大门类生物量的相关性分析得出,盃形蚤生物量与金藻门生物量呈极显著正相关( $P < 0.01$ )(表2),说明鲢鳙鱼对浮游植物群落结构的影响间接导致盃形蚤生物量的下降.

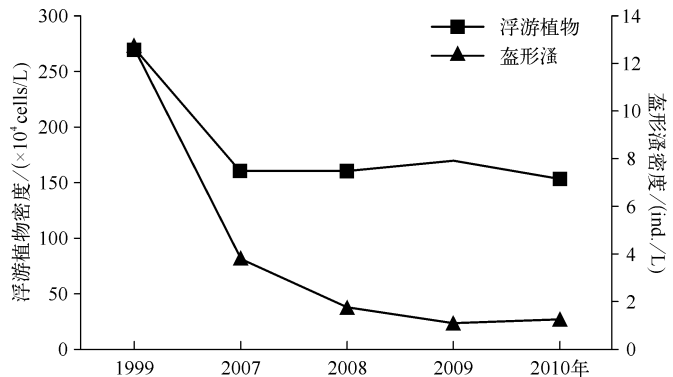


图1 历年盃形蚤密度与浮游植物密度的关系

Fig. 1 The relationship between densities of *Daphnia hyalina* and phytoplankton

表2 盃形蚤生物量与浮游植物各大门类生物量的相关性分析

Tab. 2 The correlation between biomass of *Daphnia hyalina* and main phyla of phytoplankton

参数	蓝藻门	绿藻门	硅藻门	甲藻门	金藻门	隐藻门	黄藻门	裸藻门
相关系数	-0.107	-0.047	-0.064	-0.090	0.353 **	0.028	-0.130	-0.024
P	0.369	0.696	0.595	0.451	0.002	0.818	0.277	0.842
N	72	72	72	72	72	72	72	72

\*表示显著相关, $P < 0.05$ ; \*\*表示极显著相关, $P < 0.01$ .

## 2.2 浮游动物间的捕食行为对其群落的影响

2.2.1 剑水蚤常见属生物量与小型浮游动物常见属生物量的相关性 剑水蚤常见属有中剑水蚤属、温剑水蚤属、近剑水蚤属、小剑水蚤属, 轮虫的常见属有臂尾轮虫属、彩胃轮虫属、多肢轮虫属、龟甲轮虫属、晶囊轮虫属、六腕轮虫属、泡轮虫属、三肢轮虫属、同尾轮虫属、异尾轮虫属、疣毛轮虫属, 小型枝角类的常见属有象鼻溞属、基合溞属、秀体溞属、裸腹溞属. 剑水蚤 4 种常见属生物量与轮虫 11 种常见属、枝角类 4 种小型常见属、无节幼体生物量的相关性分析表明(表 3), 中剑水蚤属、近剑水蚤属生物量均与龟甲轮属生物量呈极显

表 3 主要剑水蚤属生物量与主要轮虫属、枝角类属、无节幼体生物量的相关性分析

Tab. 3 The correlation between biomass of main genera cyclops and rotifer, small cladocera, nauplius

种类	参数	中剑水蚤属	温剑水蚤属	近剑水蚤属	小剑水蚤属
臂尾轮虫属	相关系数	-0.140	-0.188	-0.142	-0.139
	<i>P</i>	0.415	0.271	0.409	0.420
	<i>N</i>	36	36	36	36
彩胃轮虫属	相关系数	-0.069	-0.210	-0.069	-0.098
	<i>P</i>	0.689	0.220	0.690	0.570
	<i>N</i>	36	36	36	36
多肢轮虫属	相关系数	-0.141	-0.253	-0.004	-0.126
	<i>P</i>	0.414	0.137	0.983	0.463
	<i>N</i>	36	36	36	36
龟甲轮虫属	相关系数	0.535	0.059	0.464	0.417 *
	<i>P</i>	0.001	0.734	0.004	0.011
	<i>N</i>	36	36	36	36
晶囊轮虫属	相关系数	-0.161	-0.174	-0.192	-0.150
	<i>P</i>	0.348	0.309	0.262	0.382
	<i>N</i>	36	36	36	36
六腕轮虫属	相关系数	0.107	-0.206	0.410 *	0.228
	<i>P</i>	0.533	0.229	0.013	0.180
	<i>N</i>	36	36	36	36
泡轮虫属	相关系数	-0.085	-0.225	-0.192	-0.087
	<i>P</i>	0.623	0.188	0.262	0.612
	<i>N</i>	36	36	36	36
三肢轮虫属	相关系数	-0.152	-0.157	-0.122	-0.137
	<i>P</i>	0.377	0.360	0.477	0.426
	<i>N</i>	36	36	36	36
同尾轮虫属	相关系数	0.284	-0.145	0.443 **	0.265
	<i>P</i>	0.093	0.398	0.007	0.118
	<i>N</i>	36	36	36	36
异尾轮虫属	相关系数	0.245	-0.153	0.337 *	0.196
	<i>P</i>	0.150	0.373	0.044	0.251
	<i>N</i>	36	36	36	36
疣毛轮虫属	相关系数	-0.189	-0.162	-0.164	-0.190
	<i>P</i>	0.271	0.345	0.339	0.267
	<i>N</i>	36	36	36	36
象鼻溞属	相关系数	-0.055	0.129	-0.235	-0.039
	<i>P</i>	0.749	0.454	0.173	0.823
	<i>N</i>	36	36	35	36
秀体溞属	相关系数	0.419 *	0.551 **	0.063	0.336 *
	<i>P</i>	0.011	0	0.717	0.045
	<i>N</i>	36	36	36	36
基合溞属	相关系数	-0.273	-0.235	-0.102	-0.232
	<i>P</i>	0.112	0.173	0.560	0.180
	<i>N</i>	36	36	36	36
裸腹溞属	相关系数	-0.099	0.097	-0.180	-0.040
	<i>P</i>	0.565	0.573	0.294	0.819
	<i>N</i>	36	36	36	36
无节幼体	相关系数	0.777 **	0.788 **	0.213	0.844 **
	<i>P</i>	0	0	0.213	0
	<i>N</i>	36	36	36	36

\* 表示显著相关,  $P < 0.05$ ; \*\* 表示极显著相关,  $P < 0.01$ .

著正相关( $P=0.001$ 、 $P=0.004$ ),小剑水蚤属生物量与龟甲轮属生物量呈显著正相关( $P=0.011$ );近剑水蚤属生物量与六腕轮虫属生物量呈显著正相关( $P=0.013$ ),与同尾轮虫属生物量呈极显著正相关( $P=0.007$ ),与异尾轮虫属生物量呈显著正相关( $P=0.044$ );近剑水蚤属生物量与秀体溞属生物量呈极显著正相关( $P<0.001$ ),中剑水蚤属、小剑水蚤属生物量均与秀体溞属生物量呈显著正相关( $P=0.011$ 、 $P=0.045$ ),中剑水蚤属、温剑水蚤属、小剑水蚤属生物量均与无节幼体生物量呈极显著正相关( $P<0.001$ ).

### 2.2.2 鲢鳙鱼对浮游动物的摄食 1999

年千岛湖鲢鳙鱼的生物量最低,为 $0.991\text{ g/m}^2$ ,而2004—2010年的鲢鳙鱼生物量在 $5.502\sim 6.687\text{ g/m}^2$ 之间,变化幅度不大(表4).1999—2010年浮游动物中轮虫生物量的变化幅度不大,范围为 $0.050\sim 0.077\text{ mg/L}$ ,1999年的生物量为 $0.069\text{ mg/L}$ .1999—2010年枝角类的生物量总体呈下降趋势,1999年的生物量为 $1.433\text{ mg/L}$ ,而在2010年下降至 $0.106\text{ mg/L}$ ,下降幅度较大,这可能与鲢鳙鱼对其饵料浮游植物的牧食作用有关.桡足类的生物量在1999年最低,为 $0.124\text{ mg/L}$ ,2007年最高,为 $0.620\text{ mg/L}$ .

表4 千岛湖历年的鲢鳙鱼年平均生物量与浮游动物年平均生物量

Tab.4 Variation history of annual biomass of sliver carp, bighead carp and zooplankton

时间	鲢鳙鱼生物量/ ( $\text{g/m}^2$ )	轮虫/ ( $\text{mg/L}$ )	枝角类/ ( $\text{mg/L}$ )	桡足类/ ( $\text{mg/L}$ )
1999年 <sup>[8]</sup>	0.991	0.069	1.433	0.124
2004年 <sup>[9]</sup>	6.339	—	0.420	0.130
2007年 <sup>[10]</sup>	5.502	0.077	0.460	0.620
2008年 <sup>[10]</sup>	5.595	0.050	0.189	0.307
2009年	6.607	0.074	0.067	0.190
2010年	6.687	0.062	0.106	0.192

## 3 讨论

### 3.1 千岛湖浮游动物的捕食与竞争机制

浮游动物之间存在着竞争与捕食的关系<sup>[19-20]</sup>,共存的种类经常会有基础生态位的重叠(如食物、营养盐、或者栖息地等),因此这些物种在利用这些共同资源时存在着竞争<sup>[21]</sup>.轮虫的主要食物是藻类、原生动物和细菌<sup>[22]</sup>,枝角类除了透明薄皮溞是肉食性的以外,其他大部分枝角类都以浮游植物为食,无节幼体、哲水蚤也以浮游植物为食,所以轮虫、枝角类、无节幼体和哲水蚤之间存在着竞争.浮游动物的捕食作用可分为浮游动物对浮游植物的捕食以及肉食性浮游动物对其他浮游动物的捕食,主要是指剑水蚤成体、少数枝角类和轮虫对小型浮游动物(如轮虫、小型枝角类、无节幼体)的捕食<sup>[23]</sup>.

湖泊中影响轮虫种群动态的生物因素是其他浮游动物对其的捕食和竞争作用,本研究显示轮虫与浮游植物呈显著正相关关系,说明千岛湖中的浮游植物对轮虫来说是比较丰富的.轮虫生物量与枝角类生物量(除了4月份)呈负相关关系,与无节幼体有时间上的分化,同时与捕食者剑水蚤生物量也呈正相关关系,可能是由于牧食性的枝角类能够摄取的食物颗粒范围为 $0.5\sim 30\text{ }\mu\text{m}$ ,不仅涵盖了轮虫能够摄食的食物颗粒大小范围,而且范围比轮虫宽得多.也就是说,枝角类和轮虫的食物生态位几乎完全重叠,竞争激烈,在4月份时,食物浓度较低,而小个体生物的食物阈值浓度更低,在资源有限的情况下比大个体生物更适宜生存<sup>[24]</sup>.

千岛湖中枝角类绝大部分是牧食性的,分为大型枝角类(体长都在 $1\text{ mm}$ 以上)和小型枝角类(体长在 $1\text{ mm}$ 以下),影响大型枝角类在千岛湖分布的主要生物因素是鱼类对其的捕食和对食物的竞争,而影响小型枝角类分布的主要生物因素是大型浮游动物对其的捕食和对食物的竞争,浮游动物中主要是剑水蚤对小型枝角类的捕食<sup>[25]</sup>.本研究显示枝角类生物量与浮游植物生物量无显著相关性,但与绿藻门生物量有显著正相关关系,枝角类与轮虫(除了4月份)在季节变化上呈负相关关系,与哲水蚤、无节幼体生物量在9月份之前呈正相关关系,在9月份之后呈负相关关系.春季,枝角类中盍形溞密度较大,5、6月份时小型枝角类象鼻溞属生物量达到高峰,受到硅藻上行效应的影响,同时受到哲水蚤竞争作用的影响,只形成一个小高峰;到夏季时,枝角类的竞争能力比较强且有丰富的食物——绿藻门,哲水蚤和无节幼体生物量较小,对枝角类的竞争不大,剑水蚤对小型枝角类的捕食作用对小型枝角类的生长没有影响,导致枝角类在夏季形成高峰.秀体溞在7、8月份生物量较高,可能是由于温度能够加快秀体溞的胚后发育速率,提高秀体溞的繁殖速率

和每胎怀卵数量,并且秀体溞的寿命不因温度升高而缩短<sup>[24]</sup>;到秋季时,受到哲水蚤竞争的影响,生物量下降。

千岛湖中哲水蚤都在 1 mm 以上,属于大型浮游动物,和溞属一样,会受到鱼类捕食作用和牧食性浮游动物竞争作用的影响,本研究显示哲水蚤密度与浮游植物呈显著正相关,哲水蚤生物量与蓝藻门、绿藻门生物量均呈显著正相关。桡足类个体较大,所偏爱的食物粒径比较大<sup>[26-27]</sup>,虽然春季硅藻较多,硅藻分泌的代谢产物也常常会降低桡足类的生殖力、产卵率及卵的孵化率<sup>[28]</sup>,从绿藻与哲水蚤的关系看出,哲水蚤受到绿藻的影响较大,可能是由于绿藻的个体较大,比较适合桡足类摄食。一般来说,桡足类所偏爱的食物粒径大于枝角类,桡足类和枝角类的食物生态位重叠度相对较低,所以枝角类对桡足类的竞争作用不大。

### 3.2 影响千岛湖盔形溞密度的因素

盔形溞一直以来是千岛湖的优势种,但 1999 年至今盔形溞的密度下降较多,从 1999 年的平均密度 12.8 ind./L 下降至 2010 年的 2.25 ind./L,致使有些学者提出导致盔形溞密度下降的原因是千岛湖鲢鳙鱼的大量放养。有研究指出溞类对捕食者释放的信息素产生表型可塑性效应,并且溞属被认为是一类很好的浮游动物中表型可塑性效应的模式生物<sup>[29]</sup>。鱼类释放的信息素可导致溞类初次繁殖年龄减小<sup>[30-31]</sup>以及种群内禀增长率上升<sup>[32]</sup>。Sakwińska 发现盔形溞在鱼类信息素的作用下会提前一个龄期达到性成熟,从而导致性成熟时间的缩短<sup>[33]</sup>。大部分研究也表明鱼类信息素会导致溞类的怀卵量和繁殖率上升<sup>[30-33]</sup>。在食物不丰富的时期,通过摄食补充的能量不足以弥补运动时能量的消耗,会导致大型种类消失<sup>[34]</sup>。本研究得出千岛湖浮游植物密度在 1999 年达到  $269.5 \times 10^4$  cells/L,但 2010 年浮游植物密度为  $153.75 \times 10^4$  cells/L,浮游植物密度总体下降了 40.5%。

### 3.3 浮游动物种属之间的竞争与捕食机制

捕食总是有选择性的,捕食者绝不会随意进行捕食。每种捕食者都有自己的捕食范围和偏好的猎物。本文中剑水蚤目的中剑水蚤属、近剑水蚤属和小剑水蚤属生物量均与龟甲轮虫属生物量呈显著正相关,近剑水蚤属生物量与异尾轮虫属、同尾轮虫属生物量均呈显著正相关,与其他轮虫生物量呈负相关,但是显著性不高,可以看出,剑水蚤喜食除龟甲轮虫属、同尾轮虫属、异尾轮虫属的轮虫,这可能与背甲较坚硬、棘刺较长的轮虫比身体柔软的轮虫更能抵御捕食作用有关<sup>[35]</sup>,千岛湖中的桡足类,特别是剑水蚤的密度很高,对轮虫的捕食压力较大,造成了水库中的轮虫以这些能够抵御较大捕食压力的轮虫为主。中剑水蚤属、温剑水蚤属、小剑水蚤属与秀体溞属均呈显著正相关,这可能与秀体溞在水体中以发达的第一触角进行划水<sup>[36]</sup>,不会产生较大的水流,也不利于被利用水流信息进行捕食的无脊椎捕食者发现<sup>[24]</sup>有关,因此千岛湖中秀体溞呈优势种。中剑水蚤属、温剑水蚤属、小剑水蚤属均与无节幼体呈极显著正相关,当浮游动物严重饥饿时,就会出现同类相食现象<sup>[37]</sup>,可见千岛湖的浮游动物食物比较丰富,不太会出现同类相食的现象。

### 3.4 鲢鳙鱼对千岛湖浮游动物的影响

千岛湖自 2000 年起实施保水渔业,利用滤食性鱼类来控制水华、净化水质。大量研究指出用鲢鱼控制浮游植物,特别是蓝藻,是一项非常有希望的生物操纵试验,然而鲢鱼控制浮游生物群落仍然存在很大的争议<sup>[38]</sup>。有学者指出放养滤食性鱼类会摄食浮游动物,降低浮游动物数量<sup>[39]</sup>,如大量放养鲢鳙鱼能有效地抑制枝角类和桡足类的数量,会使浮游动物小型化<sup>[40-42]</sup>。Geiger 认为浮游动物组成与鱼类捕食强度有关,捕食强度小,小型浮游动物数量下降,大型浮游动物如桡足类占优势;捕食强度大,则桡足类等数量大大下降,小型浮游动物占优势<sup>[43]</sup>。千岛湖在大量放养鲢鳙鱼前后,轮虫的生物量变化幅度不大,桡足类的生物量反而在放养鲢鳙鱼之后升高。只有枝角类的生物量大幅度下降,其中在 1999 年枝角类优势种中的盔形溞生物量占浮游动物的 75.8%。尽管千岛湖浮游动物优势种依旧是属于大型浮游动物的盔形溞、特异荡镖水蚤、球状许水蚤、右突新镖水蚤,但是鲢鳙鱼对浮游植物牧食的同时也影响浮游动物的群落结构。

## 4 参考文献

- [1] Kerfoot WC. Combat between predatory copepods and their prey: *Cyclops*, *Espischura* and *Bosmina*. *Limnology and Oceanography*, 1978, 23(6): 1089-1102.
- [2] Liu QG, Chen M, Tong H et al. Study on the possible cause of water blooming and the bloom-prevention technology in

- Lake Qiandaohu. *Agricultural Sciences in China*, 2004, **3**: 627-633.
- [ 3 ] Liu QG, Chen Y, Li JL *et al.* The food web structure and ecosystem properties of a filter-feeding carps dominated deep reservoir ecosystem. *Ecological Modeling*, 2007, **203**: 279-289.
- [ 4 ] Hansson L, Annadotter H, Bergman E. Biomanipulation as an application of food chain theory constraints, synthesis, and recommendations for temperate lakes. *Ecosystems*, 1998, **1**(6): 56-64.
- [ 5 ] 刘建康,谢平.用鲢鳙直接控制微囊藻水华的围隔试验和湖泊实践.生态科学,2003,**22**: 193-196.
- [ 6 ] 刘建康,谢平.揭开武汉东湖蓝藻水华消失之谜.长江流域资源与环境,1999,**8**:312-319.
- [ 7 ] Xie P, Liu JK. Practical success of biomanipulation using filter-feeding fish to control cyanobacteria blooms: a synthesis of decades of research and application in a sub-tropical hyper eutrophic lake. *The Scientific World Journal*, 2001, **1**: 337-356.
- [ 8 ] 李共国,虞左明.千岛湖浮游动物的群落结构.生态学报,2002,**22**: 156-162.
- [ 9 ] 王先云,王丽卿,盖建军.千岛湖浮游甲壳动物垂直分布与昼夜垂直移动.动物学杂志,2010,**45**: 118-127.
- [ 10 ] 史文.千岛湖浮游动物群落结构的时空变化及其与影响因子的相关性研究[学位论文].上海:上海海洋大学,2010.
- [ 11 ] 章宗涉,黄祥飞.淡水浮游动物志.北京:科学出版社,1991.
- [ 12 ] Paterson M. The distribution of micro-crustacea in the littoral zone of a freshwater lake. *Hydrobiologia*, 1993, **263**: 173-183.
- [ 13 ] 王家楫.中国淡水轮虫志.北京:科学出版社,1961.
- [ 14 ] 蒋燮治,堵南山.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,1979.
- [ 15 ] Koste W. Rotatoria; Auflage. Berlin: Gebrüder Borntraegers, 1978.
- [ 16 ] 张觉民,何志辉.内陆水域渔业自然资源调查手册.北京:农业出版社,1991.
- [ 17 ] Bottrell HH, Duncan A, Gliwicz ZM *et al.* A review of some problems in zooplankton production studies. *Norway Journal of Zoology*, 1976, **24**: 419-456.
- [ 18 ] Dufrene M, Legendre P. Species assemblages and indicator species: The need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological Monographs*, 1997, **67**: 345-366.
- [ 19 ] Williamson CE. Invertebrate predation on planktonic rotifer. *Hydrobiologia*, 1983, **104**: 385-396.
- [ 20 ] Gilbert JJ. Suppression of rotifer populations by *Daphnia*: a review of the evidence, the mechanisms, and the effects on zooplankton community structure. *Limnology and Oceanography*, 1988, **33**: 1286-1303.
- [ 21 ] Broenmark C, Hansson LA. The biology of lake and ponds. Oxford: Oxford University Press, 2005.
- [ 22 ] Amdt H. Rotifers as predators on components of the microbial web (bacteria, heterotrophic flagellates, ciliates)—a review. *Hydrobiologia*, 1993, **26**: 255-256.
- [ 23 ] Dodson SI. Zooplankton competition and predation: an experimental test of the size-efficiency hypothesis. *Ecology*, 1974, **55**: 605-613.
- [ 24 ] 望甜.捕食与竞争——流溪河水库浮游动物群落的种间关系研究[学位论文].广州:暨南大学,2010.
- [ 25 ] 任晶晶,林秋奇,韩博平.热带水库敞水区轮虫种类组成与数量结构——基于海南7座典型水库的分析.湖泊科学,2010,**22**: 272-280.
- [ 26 ] Sommer U, Sommer E. Cladocerans versus copepods: the cause of contrasting top-down controls on freshwater and marine phytoplankton. *Oecologia*, 2006, **147**: 183-194.
- [ 27 ] Sommer U, Sommer F, Santer B. *Daphnia* versus copepod impact on summer phytoplankton: functional compensation at both trophic levels. *Oecologia*, 2003, **135**: 639-647.
- [ 28 ] 李捷,李超伦,张展等.桡足类与硅藻相互作用的研究进展.生态学杂志,2005,**24**: 1085-1089.
- [ 29 ] Lass S, Spaak P. Temperature effects on chemical signaling in a predator-prey system. *Freshwater Biology*, 2003, **48**: 669-677.
- [ 30 ] Reede T. Effects of neonate size and food concentration on the life history responses of a clone of the hybrid *Daphnia hyaline* × *galeata* to fish kairomones. *Freshwater Biology*, 1997, **37**: 389-396.
- [ 31 ] Castro BB, Consciência S, Gonçalves F. Life history responses of *Daphnia longispina* to mosquitofish (*Gambusia holbrooki*) and pumpkinseed (*Lepomis gibbosus*) kairomones. *Hydrobiologia*, 2007, **594**: 165-174.
- [ 32 ] Dzialowski AR, Lennon JT, O'Brien WJ. Predator-induced phenotypic plasticity in the exotic cladoceran *Daphnia*

- lumholtzi. *Freshwater Biology*, 2003, **48**: 1593-1602.
- [33] Sakwińska O. Response to fish kairomones in *Daphnia galeata* life history traits relies on shift to earlier instar at maturation. *Oecologia*, 2002, **131**: 409-417.
- [34] 黄祥飞. 温度对盃形溞和隆线溞一亚种发育及生长的影响. 水生生物学集刊, 1984, **8**: 207-224.
- [35] Whillmon CE. Predator-prey interactions between omnivorous diaptomid copepods and rotifers: The role of prey morphology and behavior. *Limnology and Oceanography*, 1987, **32**: 167-177.
- [36] Bollens SM, Frost BW. Diel vertical migration in zooplankton: rapid individual response to predators. *Journal of Plankton Research*, 1991, **13**: 1359-1365.
- [37] Balcer MD, Korda NL, Dodson SI. Zooplankton of the Great Lakes— a guide to the identification and ecology of the common crustacean species. Wisconsin: University of Wisconsin Press, 1984.
- [38] Domaizon I, Dévaux J. Impact of moderate silver carp biomass gradient on zooplankton communities in a eutrophic reservoir. Consequences for the use of silver carp in biomanipulation. *Académie des Sciences*, 1999, **322**: 621-628.
- [39] Northcote TG. Fish in the structure and function of freshwater ecosystems: A top down review. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1988, **45**: 361-379.
- [40] 刘建康. 武汉动物生态学研究. 北京: 科学出版社, 1995.
- [41] Shapiro J. Lake restoration by biomanipulation: Round Lake, Minnesota, the first two years. *Freshwater Biology*, 1984, **14**: 371-383.
- [42] Starling FLRM, Rocha AJA. Experimental study of the impacts of planktivorous fishes on plankton community and eutrophication of a tropical Brazilian reservoir. *Hydrobiology*, 1990, **200**: 581-589.
- [43] Geiger JG. A review of pond zooplankton production and fertilization for the culture of larval and fingerling striped bass. *Aquaculture*, 1983, **35**: 353-369.