

鲢鳙占优势的千岛湖浮游动物群落结构特征 及其与环境因子的相关性

杨丽丽^{1,3}, 何光喜², 胡忠军¹, 史文¹, 刘其根^{1*},
陈来生², 王金鹏², 杨卫明³

(1. 上海海洋大学农业部水产种质资源与利用重点开放实验室, 上海 201306;

2. 浙江杭州千岛湖发展有限公司, 浙江 杭州 311700;

3. 海盐县水产技术推广站, 浙江 海盐 314300)

摘要: 为了解以鲢鳙占优势的千岛湖中浮游动物群落结构特征以及与水温、溶解氧等环境因子的关系, 采用方差分析、典范对应分析等方法, 对千岛湖河流区、过渡区、湖泊区 3 个地区的浮游动物种类、数量以及环境因子的月变化特征进行了调查。结果表明: 2007—2008 年, 共鉴定出浮游动物 115 种, 其中原生动物 16 种、轮虫 51 种、枝角类 23 种、桡足类 25 种。浮游动物密度在春季 (2007 年: 840.9/L, 2008 年: 850.5/L) 形成高峰; 生物量在春季 (2007 年: 1.89 mg/L, 2008 年: 0.837 mg/L) 和秋季 (2007 年: 1.63 mg/L, 2008 年: 0.802 mg/L) 形成双高峰; 现存量从河流区至湖泊区依次递减。河流区和过渡区的浮游动物密度均于 4 m 水层达最大值, 湖泊区于 8 m 水层达到最大值。各位点 4~12 m 水层的大型浮游甲壳动物优势种透明溞、蚤状溞、球状许水蚤等和小型浮游甲壳动物优势种长额象鼻溞、颈沟基合溞、台湾温剑水蚤等的生物量较高。原生动物、桡足类生物量与溶解氧显著正相关; 轮虫、枝角类生物量与总氮、硝态氮、浮游植物生物量极显著正相关。典范对应分析 (CCA) 表明, 溶解氧、温度、总氮、总磷、硝态氮是影响浮游动物时空分布的主要因子。透明溞在 2—6 月份主要受到以浮游植物为食物的上行效应的影响较大, 而其他月份主要受水温的影响较大。

关键词: 浮游动物; 垂直分布; 鲢鳙; 透明溞; 环境因子

中图分类号: Q 178.1; S 917

文献标志码: A

国内对湖泊浮游动物已开展了几十年的调查研究, 以湖泊尤其是浅水湖泊为主, 对水库的研究相对较少。千岛湖是长江中下游地区一个特大型水库 (人工深水湖泊), 具有温跃层等深水湖泊的特点, 致使浮游生物产生特定的群落结构。自 1998 年、1999 年爆发水华后, 在千岛湖实施了保水渔业实践, 大规模放养鲢鳙, 导致鲢鳙在水层食物网中占据主导地位。经典生物操纵理论的核心思想为利用浮游动物控制藻类; 非经典生物操纵理论的核心思想为利用鲢鳙直接摄食浮游植物, 从而控制水华爆发。在鲢鳙占优势的千岛湖, 是

适合经典生物操纵理论还是非经典生物操纵理论, 其浮游动物群落结构的变化是一个重要的参照。学者们普遍认为, 鲢鳙放养会导致大型枝角类 (溞属) 下降^[1]、浮游动物小型化^[2]; 在我国热带或亚热带的浅水湖泊中, 放养鲢鳙, 会导致大型枝角类密度下降, 初级生产力增加^[3]。鲢鳙对浮游动物的这种影响格局是否在深水湖泊中同样存在, 值得探讨。千岛湖作为典型的藻型深水湖泊, 浮游植物是初级生产力最主要来源, 浮游动物作为第二营养级, 它主要受上行效应的影响, 还是主要受下行效应 (鱼类摄食) 的影响, 也是一个非常

收稿日期: 2011-11-18 修回日期: 2012-05-07

资助项目: 国家自然科学基金项目 (31072218)

通信作者: 刘其根, E-mail: qgliu@shou.edu.cn

值得关注的生态学问题。

曾有学者对 1999 年水华爆发时的千岛湖浮游动物进行了较为系统和全面的调查^[4-6],盖建军等^[7]于 2004 年对千岛湖浮游甲壳动物群落结构进行了初步的研究,但均未对鲢鳙放养对浮游动物的影响进行分析。千岛湖是一个大型的深水湖泊,放养鲢鳙鱼是否降低浮游动物(溞属)的数量,值得进一步研究。实验通过调查千岛湖浮游动物物种组成、数量及其时空分布特征,讨论鲢鳙鱼对浮游动物的影响,以期为千岛湖水环境监测提供背景资料并为湖泊生态环境保护提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

千岛湖(29°22'~29°50'N,118°34'~119°15'E)原名新安江水库,位于浙江省淳安县境内,是 1960 年为建造新安江水电站而筑坝蓄水形成的大型人工深水水库,湖中大小岛屿星罗棋布,面积大于 2 500 m² 以上的岛屿 1 078 个,故又名千岛湖。全湖水面积在达到设计水位 108 m 时可达 573 km²,平均水深 34 m,蓄水量 178 亿 m³^[4]。千岛湖是一个典型藻型深水湖泊,水草稀少,浮游植物是水体中最主要的初级生产者,尤以硅藻、绿藻和蓝藻的种类和现存量较多。

1.2 采样点设置与采样方法

新安江为千岛湖最主要的河流,也是该湖营养盐的主要源头,新安江大坝是千岛湖水流出口。水库生态系统通常从入水口至大坝可依次分为河流区、过渡区和湖泊区。根据千岛湖的水体形态、水流特征,于 2007—2008 年在河流区(1 号点)、过渡区(4 号点)和湖泊区(9 号点)各设置 1 个采样点(图 1),各采样点平均水深分别为 25、30 和 50 m,2007—2008 年 4—11 月,千岛湖形成明显的温跃层,3 个采样点温跃层均发生在 8~20 m 的水层^[8]。逐月分层采集浮游动物,其中 1 号点设置 7 个水层(0.5、4、8、12、16、20 和 25 m)、4 号点设置 8 个水层(0.5、4、8、12、16、20、25 和 30 m)、9 号点设置 12 个水层(0.5、4、8、12、16、20、25、30、35、40、45 和 50 m)。浮游动物采样及种类鉴定参考文献[9-14]的方法。浮游动物各大类生物量换算参考文献[15]的方法进行。

环境因子的水样采集与浮游动物样品采集同

步进行,采集水样约 1 500 mL,装入 3 L 塑料水壶中,水样带回实验室进行水化学指标测定。采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB 111894-1989)和过硫酸钾消解钼酸铵分光光度法(GB 111893-1989)对总磷(TP)和总氮(TN)进行测定,硝酸盐氮(NO₃-N)、亚硝酸盐氮(NO₂-N)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})分别采用紫外分光光度法、N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法、高锰酸钾酸性法进行测定^[16]。透明度(SD)测定使用 Secchi 盘进行,温度(T)和溶解氧(DO)测定使用 YSI58 型溶氧仪现场测定。

1.3 数据处理

利用优势度 Y 判定优势种^[17], $Y = \frac{n_i}{N} \times f_i$, 式

中: n_i 为第 i 种的数量, N 为测站所有种类总数量, f_i 为第 i 种在各站点出现的频率,当 $Y > 0.02$ 时,该种为优势种。用 Canoco for windows 4.5 软件对浮游动物优势种物种与环境因子进行典范对应(CCA)分析,浮游动物生物量与环境因子的关系分析采用 SPSS 软件进行相关性分析。

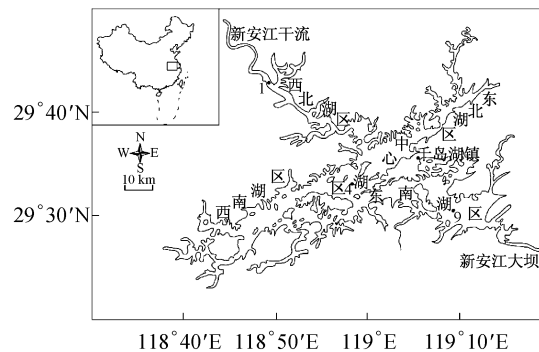


图 1 千岛湖采样位点

Fig. 1 Location of sampling site in Qiandao Lake

2 结果

2.1 千岛湖浮游动物种类组成及优势种

在千岛湖共调查到浮游动物 115 种,其中原生动物 6 属 16 种、轮虫 23 属 51 种、枝角类 12 属 23 种、桡足类 15 属 25 种。将优势种列于表 1,从表 1 可以看出,原生动物优势种有 7 种,均为肉足纲;轮虫优势种有 10 种,龟甲轮虫属和异尾轮虫属较多;枝角类优势种有 6 种,溞属和象鼻溞属的种类较多;桡足类优势种有 8 种,温剑水蚤和镖水蚤的种类较多。

表 1 千岛湖 2007—2008 年浮游动物优势种及优势度
Tab. 1 Dominance of dominant species of zooplankton in 2007—2008 in Qiandao Lake

种类 species	优势度 dominance	种类 species	优势度 dominance
原生动 物 Protozoa		独角聚花轮虫 <i>Conochilus unicornis</i>	0.029
冠砂壳虫 <i>Difflugia corona</i>	0.079	枝角类 Cladocera	
恩茨筒壳虫 <i>Tintinnidium entzii</i>	0.243	短尾秀体溞 <i>Diaphansoma brachyurum</i>	0.207
淡水筒壳虫 <i>T. fluviatile</i>	0.285	透明溞 <i>Daphnia hyalina</i>	0.359
小筒壳虫 <i>T. pusillum</i>	0.093	蚤状溞 <i>D. pulex</i>	0.033
似铃壳虫 <i>Tintinnopsis sp.</i>	0.181	筒弧象鼻溞 <i>Bosmina coregoni</i>	0.027
锥形似铃壳虫 <i>T. conicus</i>	0.031	长额象鼻溞 <i>B. longirostris</i>	0.177
轮虫 Rotifer		颈沟基合溞 <i>Bosminopsis deitersi</i>	0.157
缘板龟甲轮虫 <i>Keratella ticinensis</i>	0.025	桡足类 Copepod	
螺形龟甲轮虫 <i>K. cochlearis</i>	0.193	中华窄腹剑水蚤 <i>Limnoithona sinensis</i>	0.279
卵形彩胃轮虫 <i>Chromogaster ovalis</i>	0.022	广布中剑水蚤 <i>Mesocyclops leuckarti</i>	0.326
真足哈林轮虫 <i>Harringia eupoda</i>	0.034	粗壮温剑水蚤 <i>Thermocyclops dybowskii</i>	0.056
罗氏异尾轮虫 <i>Trichocerca rousseleti</i>	0.021	台湾温剑水蚤 <i>T. taihokuensis</i>	0.050
暗小异尾轮虫 <i>T. pusilla</i> (Lauterborn)	0.031	微小近剑水蚤 <i>Tropocyclops parvus</i>	0.024
等刺异尾轮虫 <i>T. similis</i>	0.034	球状许水蚤 <i>Schmackeria forbesi</i>	0.057
针簇多肢轮虫 <i>Polyarthra Trigla</i>	0.318	特异荡镖水蚤 <i>Neurodiaptomus incongruens</i>	0.021
奇异六腕轮虫 <i>Hexarthra mira</i>	0.057	右突新镖水蚤 <i>Neodiaptomus schmackeri</i>	0.062

2.2 浮游动物时空分布特点

对千岛湖浮游动物密度进行的三因素(水深、月份、站点)方差分析(表 2)表明,浮游动物密

度存在极显著的水平(站点, $P < 0.001$)和垂直(水深, $P = 0.006$)空间分布差异及季节($P < 0.001$)变化。

表 2 千岛湖浮游动物密度与水深、月份、位点的三因素方差分析
Tab. 2 Three-way ANOVA of water depth, months, sampling site for density of zooplankton in Qiandao Lake

源 source	Ⅲ型平方和 type III sum of squares	df	均方 mean square	F	sig.
校准模型 corrected model	83 258 832.7	323	257 767.3	1.18	0.071
水深 water depth	5 883 905.1	11	534 900.5	2.44	0.006
月份 month	11 964 545.1	11	1 087 686	4.97	0.000
位点 sampling site	13 845 758.2	2	6 922 879	31.6	0.000
水深 * 月份 water depth * month	12 802 900.9	121	105 809.1	0.48	1
水深 * 位点 water depth * sampling site	3 706 502.4	13	285 115.5	1.3	0.209
月份 * 位点 month * sampling site	7 320 040.9	22	332 729.1	1.52	0.065
水深 * 月份 * 位点 waterdepth * month * sampling site	18 784 312.7	143	131 358.8	0.6	1
误差 error	70 702 921	323	218 894.5		
总计 total	205 159 856	647			
校准总计 corrected total	153 961 754	646			

浮游动物密度在冬季会形成一个小高峰,即 2007 年 2 月(密度为 693.9/L)和 2008 年 1 月(204.6/L);在春季时形成大高峰,即 2007 年 5

月(840.9/L)和 2008 年 6 月(850.5/L);夏季密度也较高,2007 年 7 月为 586.0/L,2008 年 8 月为 502.7/L。浮游动物生物量季节变化规律比较

明显,每年 5 月(2007、2008 年分别为 1.89 和 1.63 mg/L)和 9 月(0.837 和 0.802 mg/L)全年形成 2 个大小高峰(图 2)。

浮游动物的水平空间分布见图 3,可以看出浮游动物的密度和生物量从河流区、过渡区、湖泊区依次递减,河流区密度(574.3/L)和生物量(0.926 mg/L)最高,湖泊区密度(157.4/L)和生物量最低(0.797 mg/L)。

从垂直空间分布来看,河流区浮游动物密度在水深为 4 m 时达到最大值,为 830.0/L;多重比较(Duncan 检验)显示,4 m 水层的浮游动物密度显著高于 25 m 水层,其它各水层两两间无显著差异(图 4-a)。过渡区浮游动物密度也在 4 m 水层达到最大值(349.0/L);多重比较表明,4 m 和 8 m 水层密度显著高于 30 m 水层,其它水层两两间均无显著差异(图 4-b)。湖泊区浮游动物密度在 8 m 水层达到最大值(335.9/L);多重比较显示,8 m 水层密度显著高于 0.5、12、16、25、30、35、40、45 和 50 m 水层,4 m 水层显著高于 50 m 水层,其它水层两两间无显著差异(图 4-c)。

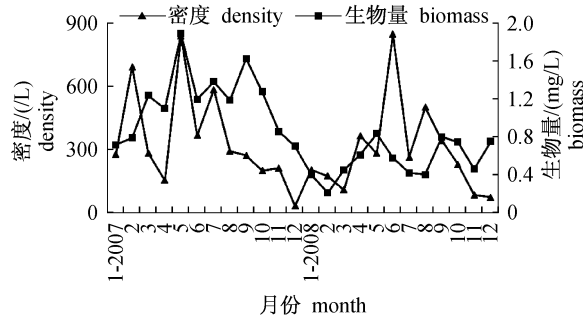


图 2 千岛湖浮游动物密度和生物量的时间变化
Fig. 2 Monthly variation in density and biomass of zooplankton in Qiandao Lake

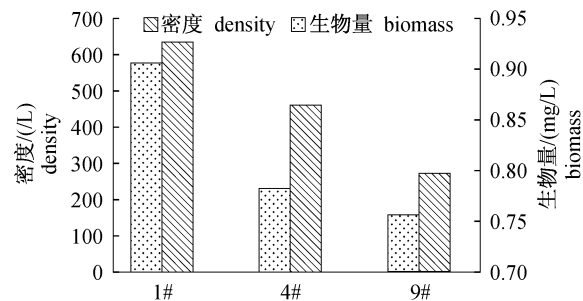


图 3 千岛湖浮游动物密度和生物量的水平变化
Fig. 3 Spatial variation in density and biomass of zooplankton in Qiandao Lake

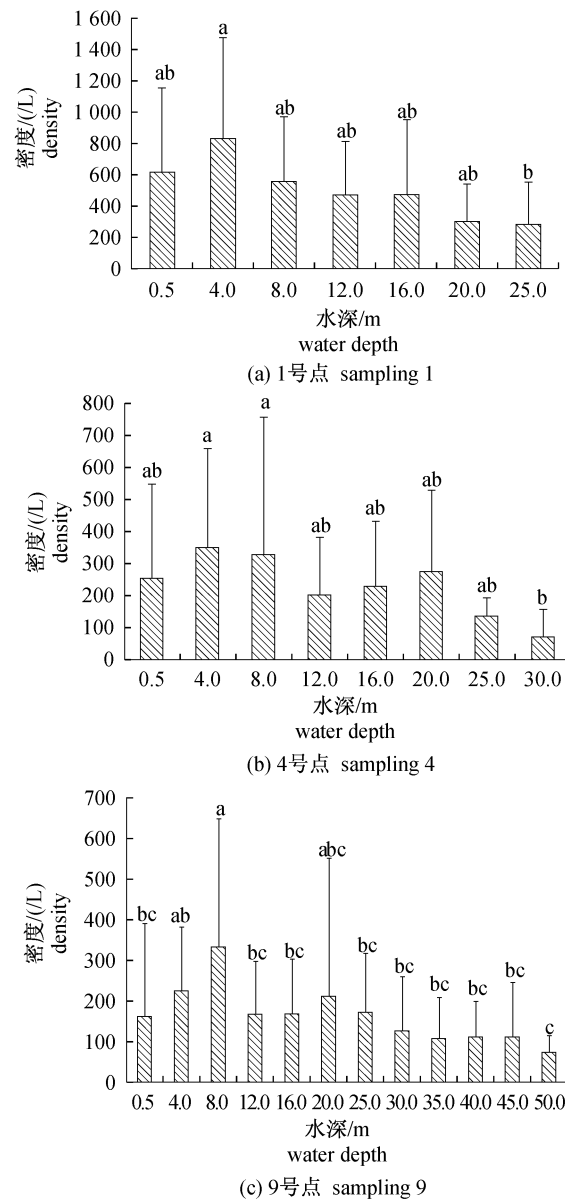


图 4 千岛湖浮游动物密度的垂直分布
Fig. 4 Vertical variation in density of zooplankton in Qiandao Lake

2.3 浮游甲壳动物优势种生物量的垂直分布

大型浮游甲壳动物优势种(个体大小在 0.8 mm 以上)包括透明溞、蚤状溞、球状许水蚤、特异荡镖水蚤、右突新镖水蚤、短尾秀体溞、广布中剑水蚤,小型优势种(个体大小为 0.8 mm 以下)包括长额象鼻溞、筒弧象鼻溞、颈沟基合溞、中华窄腹剑水蚤、粗壮温剑水蚤、台湾温剑水蚤、微小近剑水蚤。大型-小型浮游甲壳动物优势种生物量在各个水层均有分布,河流区大部分大型优势种的生物量在 4 和 8 m 水层较高,小型种类中的枝角类分布不明显,而剑水蚤属的生物量在各水层

分布比较均匀。过渡区大型枝角类蚤状溞随水深的增加而增加,25 m 水层达最大值,随后下降;桡足类的球状许水蚤生物量在各水层分布比较均匀,其余大型甲壳动物在 4、8 和 12 m 水层生物量较大。小型的枝角类在各个水层生物量都比较低,而剑水蚤中除了粗壮温剑水蚤在 16 m 水层具有较高的生物量外,其余各种类的生物量在各个水层都比较平缓且生物量都很低。湖泊区蚤状溞

也随水深的增加而增加,在 25 m 水层达最大值,然后逐渐减少。其余大型甲壳动物生物量在 8 m 或 12 m 水层达到最大值,然后随水深的增加而逐渐递减。小型甲壳动物中的长额象鼻溞和中华窄腹剑水蚤生物量在各个水层都比较平缓,且数值较大,其余各种类的数值均较小且在深于 35 m 的水层中更小。

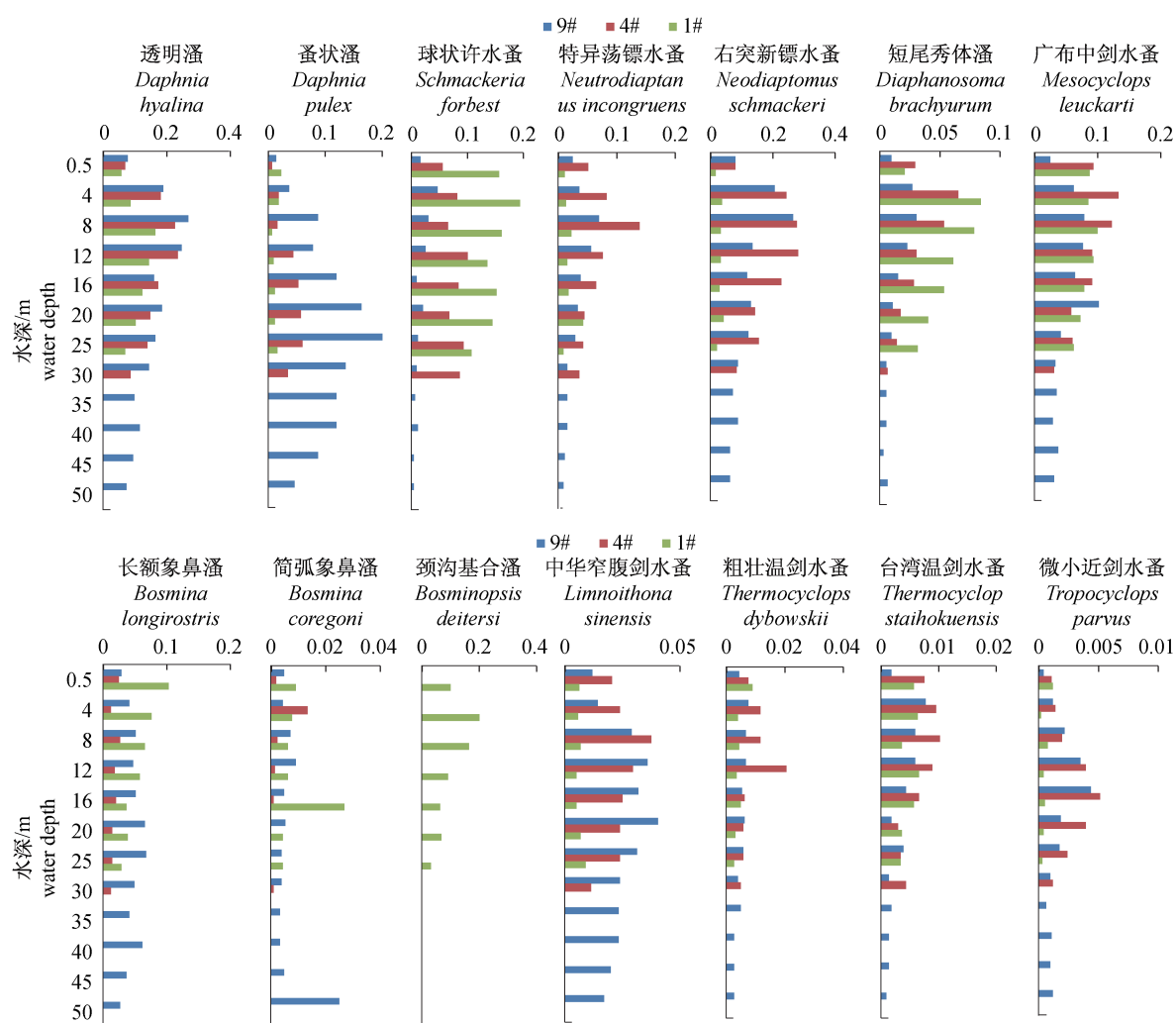


图5 2007—2008年千岛湖浮游甲壳动物优势种生物量的垂直分布

Fig. 5 Vertical Variation of dominant species of crustacean plankton biomass in 2007—2008 in Qiandao Lake

2.4 浮游动物现存量与环境因子的关系

浮游动物各大类与环境因子的相关性分析结果见表3。原生动物生物量与溶解氧显著正相关,轮虫生物量与总氮、硝酸盐氮、浮游植物

呈极显著的正相关关系;与亚硝酸氮、总磷显著正相关;枝角类生物量与总氮、硝酸氮、浮游植物生物量极显著正相关;桡足类生物量与溶解氧、水温显著正相关,而与化学需氧量极显著负相关。

表 3 千岛湖浮游动物生物量与环境因子的相关性分析
Tab.3 Correlative analysis between zooplankton biomass and environmental factor in Qiandao Lake

环境因子 environment factor	原生动物 Protozoa	轮虫 Rotifer	枝角类 Cladocera	桡足类 Copepod
溶解氧 DO	0.370*	-0.026	0.125	0.404*
水温 T	-0.276	0.104	-0.054	0.619*
化学需氧量 COD _{Mn}	0.334	0.131	0.15	-0.474**
总氮 TN	-0.202	0.501**	0.467**	-0.055
硝酸盐 NO ₃ ⁻	0.019	0.514**	0.466**	-0.114
亚硝酸盐氮 NO ₂ -N	-0.036	0.366*	0.297	-0.420
总磷 TP	0.032	0.355*	0.281	-0.120
浮游植物生物量 biomass of phytoplankton	0.260	0.579**	0.537**	-0.108

浮游动物优势种与环境因子的 CCA 排序

千岛湖浮游动物优势种物种和环境因子的排序结果见图 6,图 6 中前两个排序轴的特征值分别是 0.341 和 0.287,种类和环境因子排序轴的相关系数高达 0.870 和 0.833,说明这 2 个排序轴的排序图能够反映千岛湖浮游动物优势种物种与环境因子间的关系。从图 6 中可以看出溶解氧 (DO)、温度(T)、叶绿素 a (Chl. a)与第一轴的相关系数分别为 0.86、-0.93、-0.52,总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH₃-N)、硝酸氮(NO₃⁻)与第二轴的相关系数分别为 0.76、0.61、0.42、0.62。大部分原生动物优势种恩茨筒壳虫 (*Tintinnidium entzii*)、淡水筒壳虫 (*T. fluviatile*)、小筒壳虫 (*T. pusillum*)、似铃壳虫 (*Tintinnopsis* sp.), 轮虫中的暗小异尾轮虫 (*T. pusilla*), 浮游甲壳类的透明溞 (*Daphnia hyalina*)、蚤状溞 (*D. pulex*)、中华窄腹剑水蚤 (*Limnoithona sinensis*) 与溶解氧 (DO) 呈正相关性, 与水温呈负相关性; 缘板龟甲轮虫 (*Keratella tcinensis*)、针簇多肢轮虫 (*Polyarthra trigla*)、独角聚花轮虫 (*Conochilus unicornis*)、真足哈林轮虫 (*Harringia eupoda*), 枝角类的筒弧象鼻溞 (*Bosmina coregoni*)、长额象鼻溞 (*B. longirostris*)、颈沟基合溞 (*Bosminopsis deitersi*) 和桡足类的球状许水蚤 (*Schmackeria forbesi*) 与总氮、总磷、氨氮、硝酸氮呈正相关性; 奇异六腕轮虫 (*Hexarthra mira*)、锥形似铃壳虫 (*T. conicus*)、罗氏异尾轮虫 (*Trichocerca russeleti*)、等刺异尾轮虫 (*T. smilis*)、短尾秀体溞 (*Diaphansoma brachyurum*) 与叶绿素 a 呈正相关性; 螺形龟甲轮虫 (*K. cochlearis*)、卵形彩胃轮虫 (*Chromogaster oalis*); 广布中剑水蚤 (*Mesocyclops leuckarti*)、粗

壮温剑水蚤 (*Thermocyclops dybowskii*)、台湾温剑水蚤 (*T. Taihokuensis*)、微小近剑水蚤 (*Tropocyclops parvus*)、特异荡镖水蚤 (*Neodiaptomus incongruens*); 右突新镖水蚤 (*Neodiaptomus schmackeri*) 与水温呈正相关性。

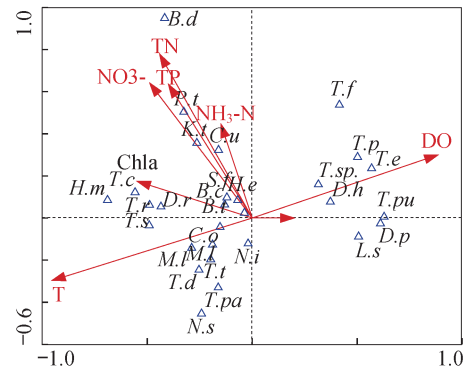


图 6 千岛湖浮游动物优势种物种和环境因子的 CCA 二维排序图

Fig. 6 CCA biplot of species-environment of dominant species of zooplankton community in Qiandao lake

D. c.:冠砂壳虫 *Diffugia corona*; *T. e.*:恩茨筒壳虫 *Tintinnidium entzii*; *T. f.*:淡水筒壳虫 *T. fluviatile*; *T. p.*:小筒壳虫 *T. pusillum*; *T. sp.*:似铃壳虫 *Tintinnopsis* sp.; *T. c.*:锥形似铃壳虫 *T. conicus*; *K. t.*:缘板龟甲轮虫 *Keratella tcinensis*; *K. c.*:螺形龟甲轮虫 *K. cochlearis*; *C. o.*:卵形彩胃轮虫 *Chromogaster oalis*; *H. e.*:真足哈林轮虫 *Harringia eupoda*; *T. r.*:罗氏异尾轮虫 *Trichocerca russeleti*; *T. pu.*:暗小异尾轮虫 *T. pusilla*; *T. s.*:等刺异尾轮虫 *T. smilis*; *P. t.*:针簇多肢轮虫 *Polyarthra trigla*; *H. m.*:奇异六腕轮虫 *Hexarthra mira*; *C. u.*:独角聚花轮虫 *Conochilus unicornis*; *D. b.*:短尾秀体溞 *Diaphansoma brachyurum*; *D. h.*:透明溞 *Daphnia hyalina*; *D. p.*:蚤状溞 *D. pulex*; *B. c.*:筒弧象鼻溞 *Bosmina coregoni*; *B. l.*:长额象鼻溞 *B. longirostris*; *B. d.*:颈沟基合溞 *Bosminopsis deitersi*; *L. s.*:中华窄腹剑水蚤 *Limnoithona sinensis*; *M. l.*:广布中剑水蚤 *Mesocyclops leuckarti*; *T. d.*:粗壮温剑水蚤 *Thermocyclops dybowskii*; *T. t.*:台湾温剑水蚤 *T. Taihokuensis*; *T. pa.*:微小近剑水蚤 *Tropocyclops parvus*; *S. f.*:球状许水蚤 *Schmackeria forbesi*; *N. i.*:特异荡镖水蚤 *Neodiaptomus incongruens*; *N. s.*:右突新镖水蚤 *Neodiaptomus schmackeri*。DO:溶解氧 Dissolved oxygen; TP:总磷 Total phosphorus; TN:总氮 Total nitrogen; T:温度 Temperature; NO₃⁻:硝酸氮 nitrate; NH₃-N:氨氮 Ammonia Nitrogen; Chl. a:叶绿素 a Chlorophyll a。

透明溞与水温的关系 透明溞生物量与非生物因素水温的月份变化关系见图 7,从图中可以看出透明溞生物量与水温的变化趋势相反,2007 年和 2008 年的 7—10 月份水温超过 20 ℃,透明溞的生物量降至最低。透明溞与生物因素浮

游植物生物量的关系见图8,从图中可以看出,2月份至6月份透明溞生物量与浮游植物生物量的变化趋势相同,7月份之后透明溞生物量与浮游植物生物量的变化趋势相反。

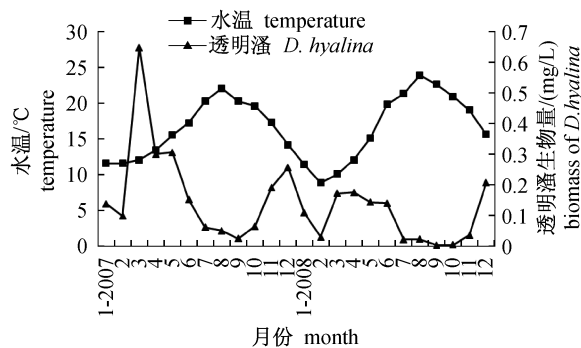


图7 2007—2008年千岛湖透明溞生物量与水温的关系
Fig. 7 The relationship between biomass of *D. hyalina* and water temperature in 2007—2008

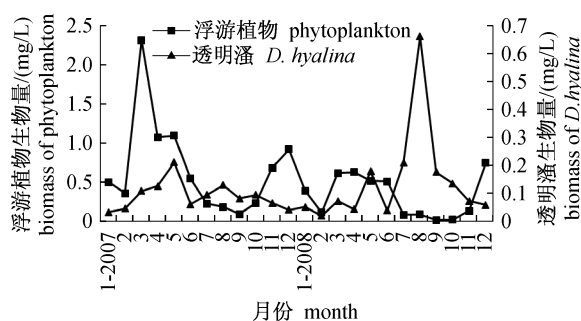


图8 2007—2008年千岛湖溞属生物量与浮游植物生物量的关系
Fig. 8 The relationship between biomass of *D. hyaline* and phytoplankton in 2007—2008

3 讨论

3.1 大型深水湖泊中浮游动物群落结构特点及其主要影响因素

通过对贫中营养型湖泊千岛湖2007—2008年浮游动物的调查得出浮游动物共115种,其中轮虫最多,其次为桡足类、枝角类,最后为原生动物,这与我国很多以轮虫和原生动物为主的中富营养型湖泊有所区别^[18-20]。有专家指出营养水平较低的湖泊中浮游动物基本上以桡足类为优势种群,轮虫以广营养型中营养型或寡中营养型种类为主,种类数目比较少^[21]。这与千岛湖浮游动物种群特征相一致,千岛湖哲水蚤的生物量在两年中分别占总浮游动物生物量的53.1%和

54.8%,轮虫优势种也是由贫中营养型的卵形采胃轮虫、针簇多肢轮虫等,生物量在两年中分别占总浮游动物生物量的0.86%和2.15%。

千岛湖是个藻型深水湖泊,水生高等植物缺乏,浮游植物是主要的初级生产力;同时2000年实施保水渔业,大量放养滤食性鱼类——鲢鳙,滤食性鱼类通过下行效应能改变浮游动物的群落结构^[22],武汉东湖上个世纪80年代末大型枝角类溞属和哲水蚤的种群数量急剧下降就是由于鲢和鳙滤食的结果^[23]。杨宇峰等^[24]也通过实验证实:在鲢鳙混养的围圈,溞类一直未能建立大的种群;但在无鱼的两个围圈中,溞的数量较多,可以认为这是鲢鳙直接摄食的结果。实验得出在以鲢鳙鱼为主导的千岛湖中,2007年和2008年的2—6月份,透明溞生物量与浮游植物生物量随时间变化相一致,6月份以后,透明溞生物量与浮游植物生物量呈相反的趋势。实验表明透明溞生物量与水温呈负相关性,且在7—10月份(20℃以上)透明溞生物量降至最低,这可能与透明溞龄期、寿命会随温度升高而变短,适合在水温较低的冬春季节生存有关^[25]。千岛湖7—10月份水温达到20℃以上,这可能是导致7—10月份溞属数量急剧下降的原因。因此透明溞在2—6月份主要受上行效应(水体中营养盐和浮游植物^[26])的影响,而其他月份主要受水温的影响。

鱼类的捕食对其食饵个体大小有明显的选择性,在同等能耗下会优先选择个体较大的浮游动物^[27]。鲢鳙白天主要集中在8~10m,夜间主要集中在4~10m的水层^[28],根据鱼类的捕食原则,4~10m水层个体较大的浮游动物生物量应该减少,但是在千岛湖中浮游动物生物量高峰集中于4~8m,其中枝角类中个体较大的透明溞以及桡足类中个体较大的球状许水蚤、特异荡镖水蚤等生物量高峰也都出现在4~12m,说明千岛湖的鲢鳙鱼捕食对浮游动物分布影响不大。同时根据本实验相关性分析指出轮虫、枝角类都与浮游植物呈极显著的正相关性,可以得出千岛湖浮游动物生物量可能受上行效应影响较大。

3.2 千岛湖保水渔业对浮游动物的影响

千岛湖由于1998年、1999年大量爆发了蓝藻水华,自2000年起实施了保水渔业,即利用滤食性鱼类(鲢鳙)摄食藻类来控制藻类生物量。大量的文献指出利用鲢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。然而鲢控制浮游生物群落仍然受很大的争议^[1]。有文献指出放养滤食性鱼类会摄食浮游动物,降低浮游动物数量,使藻类数量增加^[29]。也有文献指出大量放养鲢鳙会使浮游动物小型化^[2,30]。从表 4 中可以看出,原生动物在 2000 年之前与在 2000 年之后,生物量变化不大,轮虫稍微有所下降,从 0.069 0 mg/L 降至 0.049 6 mg/L,枝角类下降幅度最大,从 1.433 0 mg/L 降至 0.189 4 mg/L,而桡足类 2004 年、2007 年、2008 年的生物量与 1999 年相比都有所增加,2007 年的生物量甚至是 1999 年的 5 倍。枝角类生物量的骤降可能是由于透明骚数量的下降(在 1999 年枝角类优势种中的透明

蚤生物量占浮游动物 75.8%,其大量出现可能增加了 1999 年枝角类的生物量)。自 2000 年起,轮虫,原生动物生物量没有大幅度的增加,个体较大的枝角类生物量虽然有所下降,但是桡足类生物量大幅度增加,同时原生动物、轮虫、枝角类、桡足类优势种从 1999 年至 2008 年都有所增加,而且优势种的种类几乎没有变化,大型的甲壳动物如透明蚤、球状许水蚤、特异荡镖水蚤都没有退出优势种地位,并且大型枝角类蚤状蚤在 2007 年和 2008 年形成优势种^[4,7],说明鲢鳙并没有使千岛湖浮游动物小型化。并且自 2000 年起千岛湖并没有爆发大规模的水华,说明鲢鳙鱼在一定程度上改善了千岛湖水质。

表 4 千岛湖鲢鳙鱼捕捞量和浮游动物生物量的历年动态

Tab. 4 Variation history of capture fisheries of silver carp and bighead carp and zooplankton biomass

年份 year	鲢鳙鱼的捕捞量/($\times 10^4$ kg) the catch of silver carp and bighead carp	原生动物/(mg/L) Protozoa	轮虫/(mg/L) Rotifer	枝角类/(mg/L) Cladocera	桡足类/(mg/L) Copepod
1999	28.60	0.011	0.069	1.433	0.124
2004	197.74	-	-	0.420	0.130
2007	173.30	0.010	0.077	0.460	0.620
2008	171.74	0.012	0.050	0.189	0.307

参考文献:

- [1] 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 [J]. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Serie III: Sciences de la Vie, 1999, 322(7): 621 - 628.
- [2] 赵玉宝. 鲤鱼种和鲢鳙对池塘浮游生物的影响 [J]. 生态学报, 1993, 13(4): 348 - 355.
- [3] Ke Z X, Xie P, Guo L G. Impacts of two biomanipulation fishes stocked in a large pen on the plankton abundance and water quality during a period of phytoplankton seasonal succession [J]. Ecological engineering, 2009, 35(11): 1610 - 1618.
- [4] 李共国, 虞左明. 千岛湖浮游动物的群落结构 [J]. 生态学报, 2002, 22(2): 156 - 162.
- [5] 李共国, 虞左明. 浙江千岛湖浮游动物群落多样性研究 [J]. 生物多样性, 2001, 9(2): 115 - 121.
- [6] 李共国, 虞左明. 千岛湖轮虫群落结构及水质生态学评价 [J]. 湖泊科学, 2003, 15(2): 169 - 176.
- [7] 盖建军, 王丽卿, 刘其根, 等. 千岛湖浮游甲壳类群落结构特征初步研究 [J]. 上海水产大学学报, 2007, 16(6): 560 - 565.
- [8] 于员龙. 千岛湖浮游植物群落结构时空分布格局及其与主要环境因子的关系 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2010: 64.
- [9] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游动物研究方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [10] Patterson D J. Free-living freshwater protozoa: a colour guide [M]. Manson Publishing Ltd, 1996: 7 - 221.
- [11] 沈韞芬. 原生动物学 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [12] 王家楫. 中国淡水轮虫志 [M]. 北京: 科学出版社, 1961.
- [13] 蒋燮治, 堵南山. 中国动物志节肢动物门甲壳纲·淡水枝角类 [M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [14] 沈嘉瑞, 戴爱云, 张崇洲. 中国动物志·淡水桡足类 [M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [15] 张觉民, 何志辉. 内陆水域渔业自然资源调查手册 [M]. 北京: 农业出版社, 1991.
- [16] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 254 - 284.
- [17] 徐兆礼, 陈亚瞿. 东黄海秋季浮游动物优势种聚集强度与鲳鱼渔场的关系 [J]. 生态学杂志, 1989, 8(4): 13 - 15.
- [18] 刘静. 密云水库浮游生物与富营养化控制因子研究 [D]. 北京: 首都师范大学, 2009.

- [19] 孙刚,郎宇,房岩. 长春南湖水生生态系统中浮游动物群落特征[J]. 吉林大学学报:理学版,2006,44(4):663-667.
- [20] 周亚平,金卫根,陈传红. 洪门水库浮游动物的初步研究[J]. 水利渔业,2007,27(6):74-76.
- [21] 林秋奇,胡韧,段舜山,等. 广东省大中型供水水库营养现状及浮游生物响应[J]. 生态学报,2003,23(6):1101-1108.
- [22] Lu M, Xie P, Tang H, *et al.* Experimental study of trophic cascade effect of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) in a subtropical lake, Lake Donghu: on plankton community and underlying mechanisms of changes of crustacean community [J]. *Hydrobiologia*, 2002, 487(1): 19-31.
- [23] Yang Y F, Huang X F, Liu J K, *et al.* Effects of fish stocking on the zooplankton community structure in a shallow lake in China [J]. *Fisheries Management and Ecology*, 2005, 12(2): 81-89.
- [24] 杨宇峰,黄祥飞. 鲢鳙对浮游动物群落结构的影响[J]. 湖泊科学,1992,4(3):78-86.
- [25] 黄祥飞. 温度对透明溞和隆线溞——亚种发育及生长的影响[J]. 水生生物学集刊,1984,8(2):207-224.
- [26] 杨丽丽,周小玉,刘其根,等. 新疆乌伦古湖浮游甲壳动物的季节演替及与环境因子的关系[J]. 生态学报,2011,31(15):4468-4476.
- [27] Brooks J L. Eutrophication and changes in the composition of the zooplankton. Eutrophication: cause, consequences, correctives [M]. Washington D. C.: National Academy of Science, 1969:236-255.
- [28] 王靖,张超,王丹,等. 清河水库鲢鳙鱼类资源声学评估——回波计数与回波积分法的比较[J]. 南方水产,2010,6(5):50-55.
- [29] Burke J S, Bayne D R, Rea H. Impact of silver and bighead carps on plankton communities of channel catfish ponds [J]. *Aquaculture*, 1986, 55(1): 59-68.
- [30] Yang Y F, Huang X F, Liu J K, *et al.* Effects of fish stocking on the zooplankton community structure in a shallow lake in China [J]. *Fisheries Management and Ecology*, 2005, 12(2): 81-89.

Community structure of zooplankton and its relation to environmental factors in the silver-carp-and-bighead-carp-dominated Qiandao Lake

YANG Lili^{1,3}, HE Guangxi², HU Zhongjun¹, SHI Wen¹, LIU Qigen^{1*},
Chen Laisheng², WANG Jinpeng², YANG Weiming³

(1. Key Laboratory of Aquatic Genetic Resources and Utilization, Ministry of Agriculture,
Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Hangzhou Qiandaohu Development Co., Ltd., Hangzhou 311700, China;

3. Spreading Center of Technology in Aquatic Science of Haiyan City of Zhejiang Province, Haiyan 314300, China)

Abstract: From 2007 to 2008, a monthly investigation was conducted to study the zooplankton community structure and its relations with the major water environmental factors in Qiandao Lake. The horizontal, vertical and temporal distribution characteristics of zooplankton communities were also analyzed. A total of 115 species of zooplankton were identified, and they belonged to Protozoa (16 species), Rotifer (51 species), Cladocera (23 species) and Copepoda (25 species), respectively. Seasonally, the density of zooplankton peaked in spring (840.9 and 850.5/L in 2007 and 2008, respectively), and biomass displayed a bimodal distribution pattern with peak values of 1.89 and 1.63 mg/L in May and secondary maximum of 0.837 and 0.802 mg/L in August of 2007 and 2008. Horizontally, the density and biomass of zooplankton decreased from riverine to lacustrine region. Vertically, zooplankton occurred at every water layer with the biomass maximum at depths of 4 m in river region and transitional zone and at depths of 8 m in lake region. The dominant species had relatively higher biomass at depths of 4 – 12 m. Biomass of Protozoa and Copepod positively correlated with dissolved oxygen (DO), while biomass of Rotifer and Cladocera were positively related to total nitrogen (TN), nitrate nitrogen (NO₃-N) and the biomass of phytoplankton. Canonical correspondence analysis (CCA) showed that DO, water temperature (T), TN, total phosphorus, and NO₃-N were the main ecological factors that could be used to explain the distribution of zooplankton. Meanwhile, the biomass of *Daphnia* was positively correlated with biomass of phytoplankton from February to June, however, negatively correlated with T in the other months.

Key words: zooplankton; vertical distribution; silver carp and bighead carp; *Daphnia hyalina*; environment factor

Corresponding author: LIU Qigen. E-mail: qgliu@shou.edu.cn