

四明湖水库浮游动物群落演替

杨文^① 万莉^① 朱津永^① 陆开宏^{①*} 徐镇^① 王乃光^②

① 宁波大学海洋学院 教育部应用海洋生物技术重点实验室 宁波 315211; ② 余姚市四明湖水库管理局 宁波 315430

摘要: 于 2012 年 8 月至 2013 年 7 月对四明湖水库水体理化特性以及浮游动物的种类、数量和生物量进行逐月采样调查, 分析了水库的浮游动物群落特征及其影响因子。调查期间共检测到浮游动物 150 种, 丰度 198.0 ~ 7 258.0 ind/L, 年平均 3 795.2 ind/L, 生物量 0.28 ~ 5.64 mg/L, 年均值为 1.11 mg/L, 浮游动物丰度和生物量空间差异不显著, 但季节变化明显。对应分析 (CA) 和后续拟合表明, 水温、叶绿素 a、总磷、真光层深度、氨氮以及水位是驱动浮游动物结构变化的主要环境因子, 各点的影响因子间存在空间差异性。对比 24 年前历史资料, 发现四明湖水库浮游动物数量和生物量均减少, 浮游动物出现小型化, 推测认为是鱼类捕食的下行效应、蓝藻密度增加及蓝藻产生藻毒素增加影响浮游动物繁殖力所致。水质评价结果表明, 四明湖水库目前处于中营养水平, 但有向富营养型发展的趋势。

关键词: 四明湖水库; 浮游动物; 群落特征; 演替变化

中图分类号: Q179 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263 (2015) 05-780-10

Community Succession of Zooplankton in Siminghu Reservoir

YANG Wen^① WAN Li^① ZHU Jin-Yong^① LU Kai-Hong^{①*} XU Zhen^① WANG Nai-Guang^②

① *Key Laboratory of Applied Marine Biotechnology, Ministry of Education, School of Marine Science, Ningbo University,*

Ningbo 315211; ② Siminghu Reservoir Authority, Ningbo 315430, China

Abstract: In order to analyze the community structure of zooplankton and its influence factors in Siminghu Reservoir, the species and abundance of zooplankton and the physical-chemical factors were tracked monthly from August 2012 to July 2013. Total of 150 zooplankton species were identified in Siminghu reservoirs with the ranges of cell abundance and biomass 198.0 - 7 258.0 ind/L and 0.28 - 5.64 mg/L, respectively. Both of the abundance and biomass had a significant seasonal variation but no spatial difference (Fig. 1, 2). Correspondence analysis was used to demonstrate the relationship between the zooplankton community and the physical-chemical factors. The results showed that water temperature, chlorophyll a, total phosphorus, euphotic layer, ammonia nitrogen and water level were the dominant factors affecting zooplankton community structure (Table 2, Fig. 4). Spatial differences existed in the dominant factors between the sample points. A decrease were found in the abundance and biomass and miniaturization in the size of zooplankton

基金项目 国家教育部高等学校博士学科点专项科研项目 (No. 20123305110001), 宁波市海洋与渔业专项资金项目 (No. HK2012000116);

* 通讯作者, E-mail: lukaihong@nbu.edu.cn;

第一作者介绍 杨文, 女, 硕士; 研究方向: 水域生态学; E-mail: waithiei@126.com.

收稿日期: 2014-10-29, 修回日期: 2015-04-10 DOI: 10.13859/j.cjz.201505015

comparing with the date collected 24 years ago, which possibly resulting from top-down effect by fish predation and zooplankton fertility decline caused by the increase of cyanobacteria density and microcystin. The result of water quality evaluation indicates that the water in the reservoir is at a mesotrophic stage now, but possibly has the trend toward to eutrophic stage.

Key words: Siminghu Reservoir; Zooplankton; Community structure; Succession principles

浮游动物作为水库生态系统中的初级消费者,它以微型藻类、细菌和有机碎屑为食,是许多经济鱼类的主要饵料,在水体营养结构中占有重要地位(Baird et al. 2003)。另一方面,浮游动物的种类组成及分布易受温度、透明度、pH 等水环境因子的影响,许多种类可作为环境污染和水体富营养化的指示生物,是评价水库生态环境质量的重要指标之一(Swadling et al. 2000, Wen et al. 2011, Tasevska et al. 2012)。因此,研究浮游动物群落特征对了解水库生态状况、维护生态平衡起着至关重要的作用。

四明湖水库(29°55'~29°57'N, 121°02'~121°04'E)地处四明山北麓,位于浙江余姚市梁弄镇境内。水库库容 1.235 4 亿 m³,集雨面积 103.1 km²,养殖面积 973 hm²,平均水深 7.3 m,是一座集防洪、供水、灌溉、发电、养殖等综合利用的大(二)型水库,属于国家一级饮用水水源地,对余姚市的经济发展和生态保护影响重大。本文通过对四明湖水库的环境指标和浮游动物群落动态进行周年调查研究,旨在了解四明湖水库浮游动物群落特征及其对环境因子变化的响应,探明四明湖水库生态发展趋势。

1 材料与方 法

1.1 采样时间和地点

根据四明湖水库库区特征,选取了 4 个采样点,其中,1#点位于梁弄大溪入库口(29°55'45.8" N, 121°04'28" E)、2#点位于横岙大溪入库口(29°55'54.5" N, 121°03'27.1" E)、3#位于库中心(29°56'16.0" N, 121°03'28.4" E)、4#点位于大坝前(29°56'49.9" N, 121°03'08.2" E)。自 2012 年 8 月至 2013 年 7 月,除 2013 年 1

月,逐月采集水样,采样时间均在当月中下旬天气晴朗日期的 9:00 ~ 12:00 时之间,共采样 11 次。

1.2 浮游动物的采集、鉴定和生物量测定

原生动物和轮虫定性样品用 25#浮游生物网(网孔 64 μm)在水中 进行拖拽采集,甲壳类定性样品用 13#浮游生物网(网孔 114 μm)在水中水平拖拽采集,所采集样本装入白色塑料瓶中,所有样本于现场加 4%的福尔马林固定,带回实验室镜检。定量样本采集则根据各位点水深情况采集,分别取表层、中层、底层水样 5 L,并用 25#浮游生物网(网孔 64 μm)过滤取样,于现场加 4%的福尔马林固定,带回实验室静置沉淀浓缩至 30 ml。浮游动物鉴定及数据计算参照文献(金相灿等 1990,韩茂森等 1995)进行。

1.3 环境因子的测定

使用多功能水质检测仪(YSI 6600, USA)现场测定水温、pH、溶解氧,Secchi 盘现场测定透明度,真光层深度取透明度的 2.7 倍(Bovo-Scomparin et al. 2008, Becker et al. 2009)。采集表层、中层、底层混合水样,带回实验室,检测总氮、总磷、总溶解氮、总溶解磷、氨氮、亚硝氮、硝氮、正磷酸盐和高锰酸钾指数。国标法测定总氮、总磷总溶解氮、总溶解磷和高锰酸钾指数,自动分光光度计(Smart-Chem 200 Discrete Analyzer, Westco Scientific Instruments, Brookfield, USA)测定氨氮、硝氮、亚硝氮和正磷酸盐。测定方法参照《湖泊富营养化调查规范》(金相灿等 1990)。叶绿素 a 测定采用热乙醇-超声波萃取法(陈宇炜等 2000)。

1.4 数据处理

种类优势度 $Y = (N_i/N) f_i$, $Y > 0.02$ 时为优势种, Shannon 多样性指数 $H' = -\sum (N_i/N) \ln (N_i/N)$, Margalef 丰富度指数 $D = (S - 1) \ln N$, Pielou 均匀度指数 $J = H' / \ln S$, 式中, N_i 为第 i 种的个体数, N 为所有种类的总个体数, f_i 为第 i 种在各站中出现的频度, S 为浮游动物种类数 (Shannon et al. 1949)。

综合营养状态指数是以叶绿素 a (chlorophyll a, Chl-a) 的状态指数 $TSI_{(Chl-a)}$ 为基准, 同时选取总氮 (total nitrogen, TN)、总磷 (total phosphorus, TP)、透明度 (transparency, SD) 和高锰酸钾指数 (themiluminescence detection of permanganate index, COD) 的状态指数进行加权平均。 $TSI_{(Chl-a)}$ 指数计算公式为 $I_{TS}(\sum) = \sum (W_j \cdot I_{TS(j)})$, 式中, $I_{TS}(\sum)$ 为综合营养状态指数, W_j 为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重, $I_{TS(j)}$ 为第 j 种参数的营养状态指数。

浮游动物生物多样性指数水质评价标准参照杨亮杰等 (2014) 文献。

筛选出相对生物量至少在一个样本大于 1% 的浮游动物种类, 采用 R-3.0.2 软件中的 Vegen 包对浮游动物群落结构进行对应分析 (correspondence analysis, CA), 并用 envfit 函数来解释浮游动物群落结构与环境因子之间的关系 (Oksanen et al. 2010)。为使浮游动物生物量数据趋于正态分布, 将浮游动物生物量进行 $\lg(x + 1)$ 转换, 各环境因子也进行 $\lg(x + 1)$ 转换。

文中差异显著性检验均采用 SPSS 13.0 中的单因素方差分析 (one-way ANOVA)。

2 结果

2.1 环境因子及综合营养状态指数

四明湖水库环境因子的季节变化见表 1, 其中水温、真光层深度、叶绿素 a、总氮、总

表 1 环境因子随时间的变化

Table 1 The monthly variation of environment factors

	月份 Month										
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
WT (°C)	9.68	13.55	17.42	25.94	29.84	31.36	31.79	25.11	22.34	14.39	12.67
pH	8.13	7.88	7.52	7.58	7.93	7.42	9.63	8.41	7.97	7.63	7.31
Zeu (m)	4.14	8.08	7.11	5.59	5.64	5.05	3.25	3.14	3.47	2.64	3.51
DO (mg/L)	9.96	9.59	11.80	9.98	9.78	10.00	4.57	7.11	7.62	6.83	8.35
TP (mg/L)	0.028	0.033	0.019	0.028	0.024	0.023	0.034	0.036	0.041	0.058	0.057
TN (mg/L)	1.18	1.39	1.39	1.39	1.25	1.17	1.46	1.20	1.00	0.89	1.02
COD (mg/L)	2.11	1.10	1.82	1.81	2.05	2.22	2.95	2.21	1.58	2.08	1.72
NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	0.032	0.090	0.102	0.024	0.057	0.026	0.027	0.055	0.042	0.061	0.055
NO ₂ ⁻ -N (mg/L)	0.006	0.012	0.030	0.015	0.012	0.008	0.019	0.023	0.032	0.024	0.027
NO ₃ ⁻ -N (mg/L)	0.72	0.89	0.82	0.79	0.69	0.50	0.53	0.65	0.43	0.50	0.60
PO ₄ ³⁻ -P (mg/L)	0.016	0.012	0.019	0.011	0.006	0.000	0.011	0.019	0.028	0.004	0.005
TDN/TDP	116.32	52.63	166.67	125.21	93.63	46.46	68.90	42.96	76.76	55.70	55.37
Chl-a (µg/L)	9.35	5.25	4.42	10.90	11.90	12.00	21.21	22.81	19.53	22.54	11.67
TSI	46.5	38.6	39.2	45.8	46.1	45.7	51.7	51.5	48.3	52.3	48.5

Chl-a. 叶绿素 a; COD. 高锰酸钾指数; DO. 溶解氧; NH₄⁺-N. 氨氮; NO₂⁻-N. 亚硝氮; NO₃⁻-N. 硝氮; PO₄³⁻-P. 活性磷; TDN. 总溶解氮; TDP. 总溶解磷; TN. 总氮; TP. 总磷; WT. 水温; Zeu. 真光层。

Chl-a. Chlorophyll a; COD. Chemiluminescence detection of permanganate index; DO. Dissolved oxygen; NH₄⁺-N. Ammonium; NO₂⁻-N. Nitrite N; NO₃⁻-N. Nitrate N; PO₄³⁻-P. Labile phosphorus; TDN. Total dissolved nitrogen; TDP. Total dissolved phosphorus; TN. Total nitrogen; TP. Total phosphorus; WT. Water temperature; Zeu. Euphotic zone.

溶解氮和硝氮随时间变化差异明显($P < 0.05$)。库区属亚热带季风气候, 调查期间, 水库水温随气温变化明显, 最高水温出现在 8 月, 最低水温出现在 2 月。四明湖水库真光层深度与叶绿素 a 含量随时间的变化趋势之间存在显著相关($r = 0.852$, $P < 0.01$)。水库的氮营养盐浓度随时间波动明显, 特别是总氮、总溶解氮和硝氮。而磷营养盐浓度随时间波动不显著($P > 0.05$)。其他环境因子在调查期间的季节性差异也不显著($P > 0.05$)。方差分析显示, 4 个采样点的环境因子之间没有显著差异。

采用 I_{TS} 指数评价水库水体营养状态(表 1)。四明湖水库的综合营养状态指数变化范围为 38.6~52.3, 在 11 月份营养程度最高, 3 月最低。四明湖水库水质目前处于中-富营养水平, 并有向富营养水平发展的趋势。

2.2 浮游动物种类组成及现存量

2.2.1 种类组成

采样期间, 四明湖水库共检出浮游动物 150 种, 其中, 原生动物 82 种, 轮虫 51 种, 枝角类 12 种, 桡足类 5 种, 分别占浮游动物总种数的 54.7%、34%、8.0% 和 3.3%。

2.2.2 丰度和生物量

四明湖水库浮游动物丰度变化见图 1, 其变化范围为 198~7 258 ind/L, 全年平均值为 3 795.2 ind/L。原生动物丰度为

2 501.0 ind/L, 而轮虫丰度为 1 244.8 ind/L, 枝角类和桡足类丰度所占比例相对较少, 分别为总丰度的 0.3% 和 1.0%。从水平空间看, 1~4# 采样点的平均丰度分别为 4 268.3 ind/L、4 055.7 ind/L、3 388.0 ind/L 和 3 468.7 ind/L, 从河流区至湖泊区呈逐渐下降趋势, 但各点之间无显著差异($P > 0.05$); 从时间水平上看, 浮游动物丰度全年形成了 2 次高峰, 分别在 2 月和 6 月, 次高峰形成于秋季(8~10 月), 各月之间浮游动物丰度具有显著差异($P < 0.05$)。

四明湖水库浮游动物生物量变化见图 2, 其变化范围为 0.28~5.64 mg/L, 全年平均值为 1.11 mg/L。本次调查中, 枝角类所占比例最大, 为总生物量的 48.3%, 其次是轮虫, 为 36.0%, 桡足类和原生动物分别为 6.6% 和 9.1%。水平空间分布显示: 1~4# 采样点的浮游动物生物量平均值分别为 1.06 mg/L、1.00 mg/L、1.13 mg/L 和 1.25 mg/L, 方差分析显示各点之间无显著差异($P > 0.05$); 季节变动显示, 3 月生物量达到峰值, 而其中枝角类所占比例最高, 达到 86.1%, 冬季 12 月的生物量最小, 仅有 0.38 mg/L, 各月之间生物量差异显著($P < 0.001$), 特别是 3 月的生物量与其他各月生物

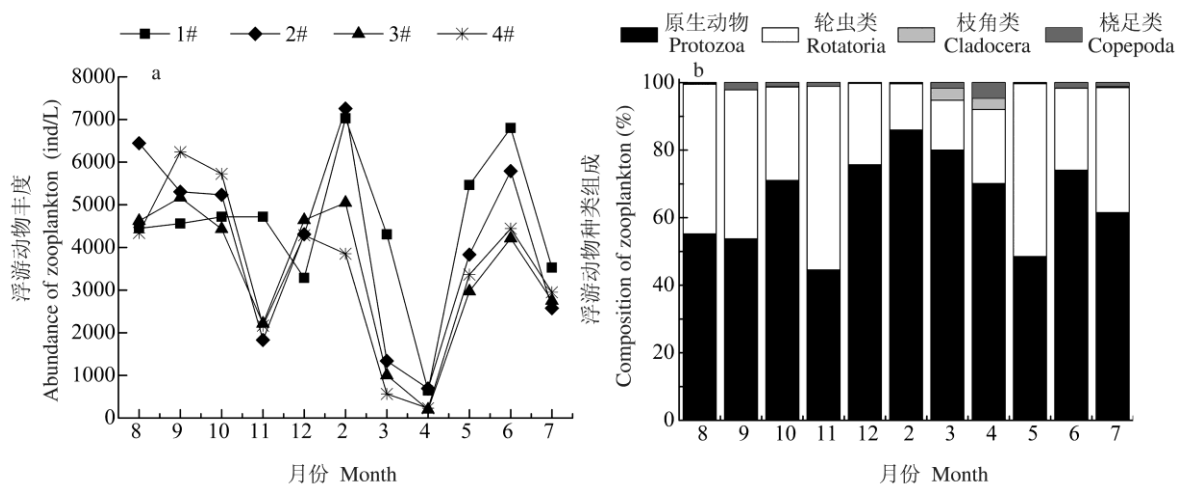


图 1 浮游动物丰度变化 (a) 及丰度组成 (b)

Fig. 1 The variation of abundance (a) and composition (b) of zooplankton

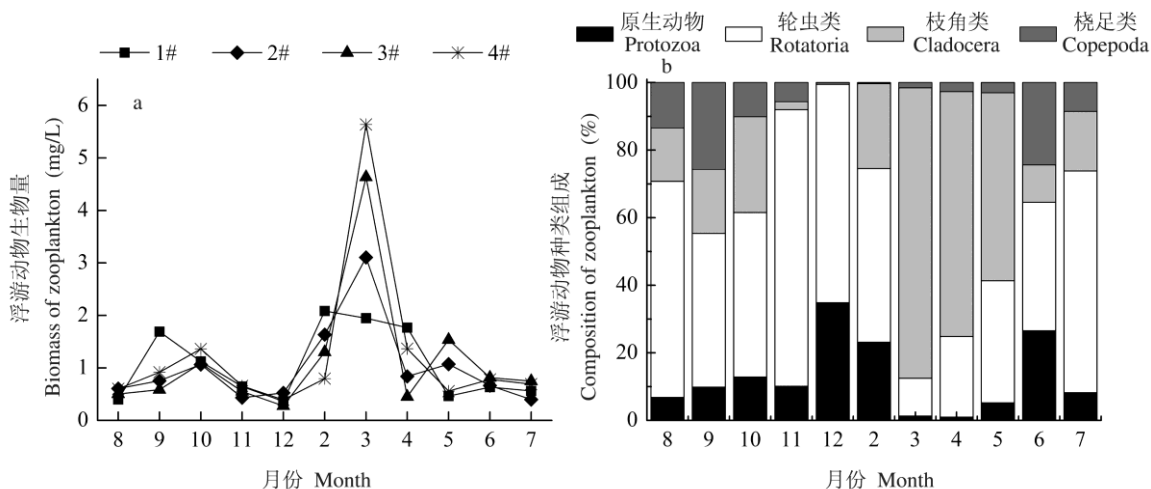


图 2 浮游动物生物量变化 (a) 及种类组成 (b)

Fig. 2 The variation of biomass (a) and composition (b) of zooplankton

量均具有显著差异 ($P < 0.05$)。

2.2.3 优势种 四明湖水库浮游动物全年丰度优势种为小筒壳虫 (*Tintinnidium pusillum*) 和王似铃壳虫 (*Tintinnopsis wangi*)，随着季节变化，优势种也有所变化，夏秋季优势种主要集中在似铃壳虫属 (*Tintinnopsis*)，而冬春季则以筒壳虫属 (*Tintinnidium*) 为主，其中主要有王氏似铃壳虫、湖沼似铃壳虫 (*Tintinnopsis lacutris*)、杯状似铃壳虫 (*T. cratera*)、淡水筒壳虫 (*Tintinnidium fluviatile*)、小筒壳虫 (*T. pusillum*)、恩茨筒壳虫 (*T. entzii*)，轮虫主要有针簇多肢轮虫 (*Polyarthra trigla*)、裂痕龟纹轮虫 (*Anuraeopsis fissa*)、螺形龟甲轮虫 (*Keratella cochlearis*) 以及臂尾水轮虫 (*Epiphanes brachionus*)。

浮游动物生物量优势种与数量优势种不同，生物量优势种主要集中于透明溞 (*Daphnia hyalina*)、筒弧象鼻溞 (*Bosmina coregoni*)、长肢秀体溞 (*Diaphanosoma leuchtenbergi*)、剑水蚤属 (*Thermocyclops*)、晶囊轮虫属 (*Asplanchna*) 等大型浮游动物以及针簇多肢轮虫、臂尾水轮虫等数量较多的轮虫。春季，枝角类占据了绝对优势，特别是透明溞，而在其他季节优势种主要为针簇多肢轮虫、卜氏晶囊轮虫 (*A. brightwelli*) 和臂尾水轮虫。

2.3 多样性指数

四明湖水库浮游动物的 Shannon 多样性指数 (H') 2.09 ~ 3.30, Margalef 丰富度指数 (D) 3.52 ~ 6.49, Pielou 均匀度指数 (J) 0.63 ~ 0.84, 全年的平均值分别为 2.75、4.97 及 0.75 (图 3)。

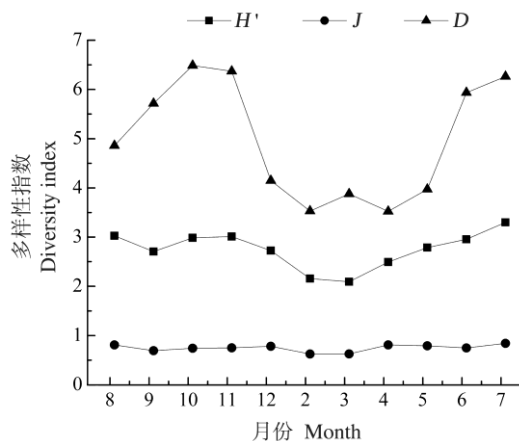


图 3 四明湖水库浮游动物多样性指数月变化

Fig. 3 The monthly diversity index of zooplankton in Siminghu reservoir

时间水平上，三个指数均表现出明显的季节变化规律，且变化趋势一致，冬春季的多样性指数小于夏秋季节，多样性指数和均匀度指数在 7 月达到最大，3 月最小，丰富度指数在 10 月最大，4 月最小，各月之间多样性指数存在差

异（方差分析， $P < 0.05$ ）；空间水平上，4 个采样点的 Shannon 多样性指数平均值分别为 3.90、3.92、3.89 和 4.02，Margalef 丰富度指数平均值分别为 4.92、5.03、4.84 和 5.09，Pielou 均匀度指数平均值分别为 0.74、0.74、0.75、0.75，各样点之间无显著差异（ $P > 0.05$ ）。

根据 Shannon 多样性指数（ H' ）判断，水库属于 β 中度污染型水体；根据 Margalef 丰富度指数（ D ）判断，水库处于轻度污染。由此可知，四明湖水库目前处于轻-中度污染水平。

2.4 浮游动物群落结构与环境因子间的关系

选取在 4 个采样点浮游动物出现频率大于 1 且相对生物量大于 1% 的物种与环境因子进行 CA 分析，4 个采样点分别选取了 45、42、32、35 种浮游动物。4 个点浮游动物 CA 分析的前 2 个轴对物种分布的解释量分别为

45.39%、51.17%、49.96% 和 49.64%，这说明 CA 图能较好地反映四明湖浮游动物的物种变化情况。从各环境因子与 CA 排序轴的相关系数和显著性看（表 2），影响采样点 1# 和 3# 浮游动物群落结构的环境因素仅有水温（ $P < 0.001$ ），而影响采样点 2# 的环境因子有水温、总磷和水深（ $P < 0.05$ ），影响采样点 4# 的有水温、叶绿素 a、真光层和氨氮（ $P < 0.05$ ）。从 4 个采样点环境因子排序图（图 4）可以看出，水温向量与第一排序轴相关性很高，从 1# 到 4# 采样点分别为 -0.99、-0.99、-0.97、-0.98，说明第一排序轴反映了温度的变化，排序轴从左至右，温度逐渐降低；与第二排序轴相关的主要是总磷、总氮、硝氮、氨氮以及叶绿素 a 等环境因素，说明第二排序轴反映的是营养盐以及浮游动物生物量的变化情况，排

表 2 四明湖水库各环境因子与浮游动物 CA 分析前两个轴的相关系数（ r^2 ）和显著性

Table 2 Correlation coefficient and significant of environment factors with the first two axes of CA performed on zooplankton at Siminghu reservoir

因子 Factor	1#		2#		3#		4#	
	r^2	P	r^2	P	r^2	P	r^2	P
WT	0.91	0.001	0.94	0.001	0.87	0.001	0.87	0.001
DO	0.13	0.558	0.29	0.231	0.36	0.152	0.20	0.380
pH	0.25	0.302	0.20	0.404	0.21	0.351	0.32	0.145
Zeu	0.11	0.582	0.38	0.122	0.20	0.355	0.58	0.017
TP	0.18	0.373	0.76	0.007	0.33	0.169	0.36	0.111
TN	0.01	0.950	0.15	0.476	0.02	0.905	0.17	0.386
COD	0.28	0.254	0.22	0.355	0.28	0.261	0.34	0.137
Chl-a	0.21	0.348	0.48	0.061	0.30	0.195	0.81	0.001
NH ₄ ⁺ -N	0.39	0.125	0.13	0.524	0.17	0.416	0.61	0.021
NO ₂ ⁻ -N	0.27	0.276	0.33	0.174	0.004	0.976	0.34	0.124
NO ₃ ⁻ -N	0.03	0.858	0.09	0.642	0.03	0.866	0.01	0.927
PO ₄ ³⁻ -P	0.09	0.694	0.44	0.094	0.04	0.831	0.20	0.338
TDN/TDP	0.04	0.879	0.04	0.818	0.04	0.834	0.18	0.395
W-level	0.04	0.845	0.58	0.027	0.12	0.575	0.29	0.176

Chl-a. 叶绿素 a; COD. 高锰酸钾指数; DO. 溶解氧; NH₄⁺-N. 氨氮; NO₂⁻-N. 亚硝氮; NO₃⁻-N. 硝氮; PO₄³⁻-P. 活性磷; TDN. 总溶解氮; TDP. 总溶解磷; TN. 总氮; TP. 总磷; W-level. 水深; WT. 水温; Zeu. 真光层。

Chl-a. Chlorophyll a; COD. Chemiluminescence detection of permanganate index; DO. Dissolved oxygen; NH₄⁺-N. Ammonium; NO₂⁻-N. Nitrite N; NO₃⁻-N. Nitrate N; PO₄³⁻-P. Labile phosphorus; TDN. Total dissolved nitrogen; TDP. Total dissolved phosphorus; TN. Total nitrogen; TP. Total phosphorus; W-level. Water level; WT. Water temperature; Zeu. Euphotic zone.

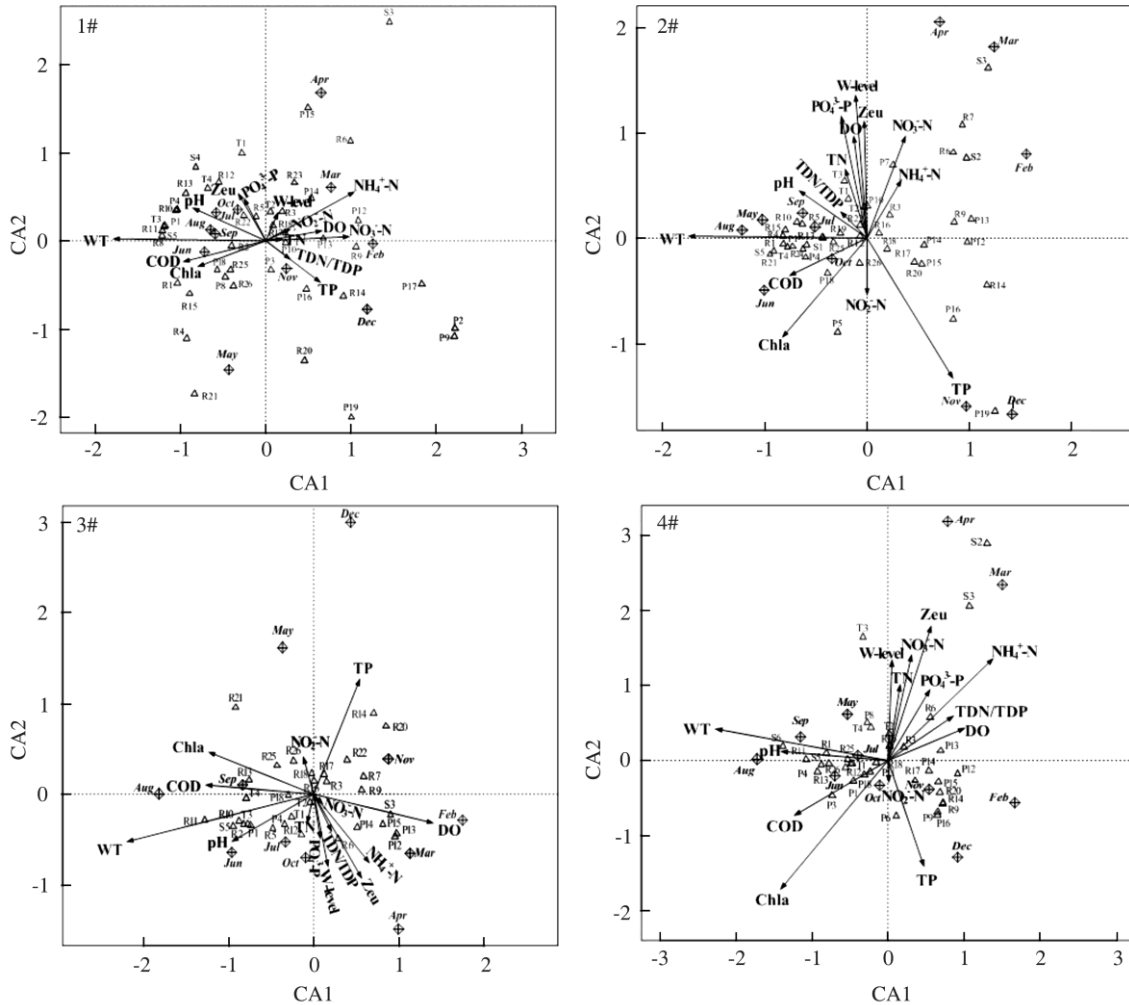


图 4 四明湖水库 4 个采样点浮游动物与环境因子 CA 排序
 Fig. 4 The CA ordination of about zooplankton and environmental factors at four sampling sites in siminghu reservoir

Chl-a. 叶绿素 a; COD. 高锰酸钾指数; DO. 溶解氧; NH_4^+ -N. 氨氮; NO_2^- -N. 亚硝氮; NO_3^- -N. 硝氮; P1. 杂葫芦虫; P2. 单环栉毛虫; P3. 双环栉毛虫; P4. 冠砂壳虫; P5. 片口砂壳虫; P6. 园钵砂壳虫; P7. 长颈虫 sp.; P8. 瓶累枝虫; P9. 前口虫 sp.; P10. 裸口虫 sp.; P11. 小旋口虫; P12. 恩茨筒壳虫; P13. 淡水筒壳虫; P14. 小筒壳虫; P15. 杯状似铃壳虫; P16. 湖沼似铃壳虫; P17. 中华似铃壳虫; P18. 王氏似铃壳虫; P19. 沟钟虫; PO_4^{3-} -P. 活性磷; R1. 裂痕龟纹轮虫; R2. 叶状帆叶轮虫; R3. 没尾无柄轮虫; R4. 卵形无柄轮虫; R5. 舞跃无柄轮虫; R6. 卜氏晶囊轮虫; R7. 前节晶囊轮虫; R8. 角突臂尾轮虫; R9. 萼花臂尾轮虫; R10. 裂足臂尾轮虫; R11. 剪形臂尾轮虫; R12. 壶状臂尾轮虫; R13. 胶鞘轮虫; R14. 臂尾水轮虫; R15. 椎尾水轮虫; R16. 螺形龟甲轮虫; R17. 曲腿龟甲轮虫; R18. 针簇多肢轮虫; R19. 广布多肢轮虫; R20. 疣毛轮虫; R21. 二突异尾轮虫; R22. 纵长异尾轮虫; R23. 长刺异尾轮虫; R24. 暗小异尾轮虫; R25. 罗氏异尾轮虫; R26. 等刺异尾轮虫; S1. 长额象鼻溞; S2. 筒弧象鼻溞; S3. 透明溞; S4. 短尾秀体溞; S5. 长肢秀体溞; S6. 微型裸腹溞; T1. 猛水蚤; T2. 无节幼体; T3. 哲水蚤; T4. 剑水蚤; TDN. 总溶解氮; TDP. 总溶解磷; TN. 总氮; TP. 总磷; W-level. 水深; WT. 水温; Zeu. 真光层。

Chl-a. Chlorophyll a; COD. Cumuluminence detection of permanganate index; DO. Dissolved oxygen; NH_4^+ -N. Ammonium; NO_2^- -N. Nitrite N; NO_3^- -N. Nitrate N; P1. *Cucurbitella mespiliformis*; P2. *Didinium balbianii*; P3. *D. nasutum*; P4. *Diffugia corona*; P5. *D. lobostoma*; P6. *D. urceolata*; P7. *Dileptus* sp.; P8. *Epistylis urceolata*; P9. *Frontonia* sp.; P10. *Holophrya* sp.; P11. *Spirostomum minus*; P12. *Tintinnidium entzii*; P13. *Tintinnidium fluviatile*; P14. *Tintinnidium pusillum*; P15. *Tintinnopsis cratera*; P16. *Tintinnopsis lacutris*; P17. *Tintinnopsis sinensis*; P18. *Tintinnopsis wangi*; P19. *Vorticella convallaria*; PO_4^{3-} -P. Labile phosphorus; R1. *Anuraeopsis fissa*; R2. *Argonotholca foliacea*; R3. *Ascomorpha ecaudis*; R4. *A. ovalis*; R5. *A. saltans*; R6. *Asplanchna brightwelli*; R7. *A. priodonta*; R8. *Brachionus angularis*; R9. *B. calyciflorus*; R10. *B. diversicornis*; R11. *B. forficula*; R12. *B. urceus*; R13. *Collotheca* sp.; R14. *Epiphanes brachionus*; R15. *E. senla*; R16. *Keratella cochlearis*; R17. *K. valga*; R18. *Polyarthra trigla*; R19. *P. vulgaris*; R20. *Synchaeta* sp.; R21. *Trichocerca bicristata*; R22. *T. elongate*; R23. *T. longiseta*; R24. *T. pusilla*; R25. *T. rousseleti*; R26. *T. similis*; S1. *Bomina longirostris*; S2. *B. coregoni*; S3. *Daphnia hyaline*; S4. *Diaphanosoma brachyurum*; S5. *D. leuchtenbergianum*; S6. *Moina micrura*; T1. *Limnocletodes*; T2. *Nauplius*; T3. *Sinocalanus*; T4. *Thermocyclops*; TDN. Total dissolved nitrogen; TDP. Total dissolved phosphorus; TN. Total nitrogen; TP. Total phosphorus; W-level. Water level; WT. Water temperature; Zeu. Euphotic zone.

序轴从上往下，氮含量降低，而磷含量和浮游动物生物量升高。在排序图中，轮虫纲的裂痕龟纹轮虫(*A. fissa*)、剪形臂尾轮虫(*Brachionus forficula*)、裂足臂尾轮虫(*B. diversicornis*)，枝角类的长肢秀体溞以及桡足类的哲水蚤(*Sinocalanus*)和剑水蚤等位于第一轴的左侧，与温度呈正相关，而萼花臂尾轮虫(*B. calyciflorus*)、透明溞以及筒壳虫属、似铃壳虫属等与温度呈负相关；另一方面，从第二排序轴可以看出，臂尾水轮虫、疣毛轮虫(*Synchaeta* sp.)、砂壳虫(*Diffugia* sp.)、沟钟虫(*Vorticella convallaria*)等与总磷和叶绿素 a 等正相关，而卜氏晶囊轮虫、无节幼体、猛水蚤以及透明溞等大型浮游动物则与氮含量正相关。

3 讨论

3.1 浮游动物群落结构的周年变化及其影响因子

本研究发现四明湖水库浮游动物 150 种，其中原生动物种类最多，其次是轮虫，枝角类和桡足类种类偏少。浮游动物丰度变化明显，分别在 2 月和 6 月出现峰值，但其主要受原生动物丰度的支配，其他浮游动物如轮虫则是在夏季最高，之后逐渐下降，春季降至最低。所不同的，枝角类的丰度却是在春季达到最大，冬季最低，这也就造成春季浮游动物生物量的增高，形成峰值，特别是在 3 月透明溞大量增殖时，浮游动物生物量激增。除春季之外，其他季节浮游动物生物量均以轮虫为主要组成。另外，四明湖浮游动物主要优势种为小筒壳虫、淡水筒壳虫、王似铃壳虫、针簇多肢轮虫、螺形龟甲轮虫以及透明溞、长肢秀体溞、晶囊轮虫等，而众多研究认为这些种类为富营养水体的生物指示种(陈绵润等 2007, 孙陆宇等 2013)，因此，通过浮游动物的分布进一步证明了四明湖水库虽然处于中营养水平，但已趋于富营养状态。

不同的生态系统，影响浮游动物群落动态的环境因子不同(胡国成等 2013, 赵超等 2014)。在本研究中，水温是不同采样点浮游动物群落结构的共同影响因素。水温是影响浮

游动物代谢、生长、繁殖的重要因素，不同浮游动物其适宜生长温度不同(吴利等 2011)。四明湖水库处于温带地区，四季分明，全年温度变化明显，因此，水温的变化对浮游动物影响较大。在本次研究中，裂痕龟纹轮虫、剪形臂尾轮虫、长肢秀体溞等的群落分布与水温呈正相关，而透明溞以及筒壳虫属、似铃壳虫属等的群落分布与温度呈负相关，这与同为温带水库的千岛湖研究结果相似(杨丽丽等 2013)。而且，春季四明湖水库中的透明溞快速增殖，造成“清水”平衡期，与 Sommer 等(1986)提出的 PEG 模型相吻合，可见四明湖水库浮游动物动态变化具有温带水库的典型特征。

除水温之外，叶绿素 a、总磷、水位以及氨氮亦对浮游动物结构有显著影响。叶绿素 a 是反映浮游植物生物量的重要指标，浮游动物主要以浮游植物为食，特别是枝角类和桡足类，因此浮游植物能通过上行效应影响浮游动物的结构变化，而总磷、氨氮、水位等环境因素也能通过影响浮游植物群落结构间接影响浮游动物结构。但值得注意的是，在四明湖水库中，与叶绿素 a 相关的浮游动物种类以轮虫为主，并非是枝角类和桡足类。这一方面是因为浮游植物生长旺盛的夏季，温度过高，不利于枝角类等大型浮游动物生长；另一方面，鱼类的下行效应对枝角类、桡足类的生长也有明显作用(陈光荣等 2008)，本研究的 CA 分析并未完全解释所有影响浮游动物群落分布的因素，更证明了这点。研究表明，鱼类的下行效应对其食饵的个体大小有显著影响，在同等能耗下鱼类会优先捕食个体较大的浮游动物(林秋奇等 2006)，而轮虫由于个体小，受鱼类的捕食压力小，同时鱼类对枝角类和桡足类的捕食也在一定程度上减少了轮虫的体外竞争压力(Nogueira 2001)。因此，四明湖水库中与叶绿素 a 变化相关性较高的浮游动物为轮虫，而非枝角类和桡足类。另外，影响四明湖浮游动物结构动态的环境因素还有真光层，王庆等(2010)研究广东省某水库发现，透明度和浑浊度是影响水库轮虫空间分布的重要环境因子，透明度越高，轮虫群落发展越好，但在四明湖中，与真光层相关性较高的种类主要为透

明蚤、筒弧象鼻蚤 (*Bosmina coregoni*)、哲水蚤等大型浮游动物,究其原因可能是两座水库所处地理位置和生态特征不同造成的。

3.2 浮游动物群落结构 24 年间的演替

对比 1988 ~ 1989 年间的调查数据(陆开宏 1990)发现,四明湖水库浮游动物的种类数由 128 种增加到 150 种,总丰度和总生物量相比于 24 年前的 8 626.4 ind/L 和 3.67 mg/L 分别下降了 57.0% 和 68.7%,但轮虫的丰度却有所增加,这可能由鱼类的牧食压力增大造成。24 年来,四明湖水库主要放养以滤食浮游生物为食的鲢鱼 (*Hypophthalmichthys molitrix*) 和鳙鱼 (*Aristichthys nobilis*),且多以滤食浮游动物的鳙鱼为主,致使大型浮游动物被大量滤食。杨宇峰等(1992)研究了武汉东湖鲢鳙鱼放养对浮游动物的影响,发现鱼类牧食促进了浮游动物的小型化发展,在鲢鳙混养的围圈中,原生动物和小型轮虫的数量较多,而枝角类等大型浮游动物数量较少。因此,可以认为四明湖浮游动物总丰度和生物量减少主要是鱼类捕食的下行效应所致。除此之外,藻类的上行效应也是导致枝角类数量减少的重要原因。研究表明,当蓝藻生长至某个密度后,蚤属物种会停止生长,繁殖力也会下降,进而导致蚤属种群数量下降(Gliwicz 1990)。另外,蓝藻所产生的藻毒素对浮游动物也有一定影响,可以导致蚤属生物出现小型化(陆开宏等 2008)。近年来四明湖水库营养盐的增加致使蓝藻数量急剧增加,特别是产毒的微囊藻 (*Microcystis*) 和伪鱼腥藻 (*Pseudanabaena*) 等,这一程度影响了四明湖水库浮游动物群落结构的变化。

在优势种方面,对比两次调查结果,数量优势种仍以原生动物为主,且仍是筒壳虫、似铃壳虫等耐污种;生物量优势种也未发生明显变化,仍为大型浮游动物以及数量较多的轮虫。但值得注意的是,虽然枝角类和桡足类的总生物量较高,但其主要集中于春季,其他季节则是被轮虫所替代,所以总体来说相较于 24 年前,枝角类和桡足类的优势种地位有所下降,说明鱼类对四明湖水库浮游动物影响较大。另外,轮虫数量虽增加,但生物量却减少,说明轮虫亦出现小型化。

参 考 文 献

- Baird M E, Walker S J, Wallace B B, et al. 2003. The use of mechanistic descriptions of algal growth and zooplankton grazing in an estuarine eutrophication model. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 56(3): 685–695.
- Becker V, Huszar V L M, Crossetti L O. 2009. Responses of phytoplankton functional groups to the mixing regime in a deep subtropical reservoir. *Hydrobiologia*, 628(1): 137–151.
- Bovo-Scomparin V M, Train S. 2008. Long-term variability of the phytoplankton community in an isolated floodplain lake of the Ivinhema River State Park, Brazil. *Hydrobiologia*, 610(1): 331–344.
- Gliwicz Z M. 1990. Why do cladocerans fail to control algal blooms? *Hydrobiologia*, 200(1): 83–97.
- 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.
- Oksanen J, Blanchet F G, Kindt R, et al. 2010. *Vegan: Community Ecology Package*. R package version 1.17. [CP/OL]. [2014-05-24]. <http://CRAN.R-project.org/package=vegan>.
- Shannon C E, Weaver W. 1949. *The Mathematical Theory of Communication*. Urbana II: University of Illinois Press, 1–45.
- Sommer U, Gliwicz Z M, Lampert W, et al. 1986. The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters. *Archiv für Hydrobiologie*, 106(4): 433–471.
- Swadling K M, Pienitz R, Nogrady T. 2000. Zooplankton community composition of lakes in the Yukon and Northwest Territories (Canada): relationship to physical and chemical limnology. *Hydrobiologia*, 431(2/3): 211–224.
- Tasevska O, Jersabek C D, Kostoski G, et al. 2012. Differences in rotifer communities in two freshwater bodies of different trophic degree (Lake Ohrid and Lake Dojran, Macedonia). *Biologia*, 67(3): 565–572.
- Wen X L, Xi Y L, Qian F P, et al. 2011. Comparative analysis of rotifer community structure in five subtropical shallow lakes in East China: role of physical and chemical conditions. *Hydrobiologia*, 661(1): 303–316.
- 陈光荣, 钟萍, 张修峰, 等. 2008. 惠州西湖浮游动物及其与水质的关系. *湖泊科学*, 20(3): 351–356.
- 陈绵润, 欧阳昊, 赵帅营, 等. 2007. 横岗水库后生浮游动物群落

- 特征. 生态科学, 26(2): 137-142.
- 陈宇炜, 高锡云. 2000. 浮游植物叶绿素 a 含量测定方法的比较测定. 湖泊科学, 12(2): 185-188.
- 韩茂森, 束蕴芳. 1995. 中国淡水生物图谱. 北京: 海洋出版社.
- 胡国成, 姚玲爱, 张丽娟, 等. 2013. 广东长潭水库浮游生物群落结构特征. 动物学杂志, 48(6): 824-833.
- 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.
- 林秋奇, 韩博平. 2006. 流溪河水库湖泊区浮游动物大小分布特征. 生态科学, 25(3): 207-209.
- 陆开宏. 1990. 四明湖水库浮游生物及其渔业利用的初步研究. 浙江水产学院学报, 9(1): 17-26.
- 陆开宏, 朱津永, 王扬才, 等. 2008. 湖南镇水库浮游生物及其影响因子的典范对应分析. 中国水产科学, 15(6): 950-960.
- 孙陆宇, 温晓蔓, 禹娜, 等. 2013. 上海青草沙水库后生浮游动物群落结构. 复旦学报: 自然科学版, 52(1): 119-128.
- 王庆, 刘丽君, 杨宇峰. 2010. 南方某水库轮虫群落特征及其对环境因子的响应. 生态学报, 30(13): 3385-3395.
- 吴利, 冯伟松, 张堂林, 等. 2011. 春、秋季武湖浮游动物群落特征及其与环境因子的关系. 水生态学杂志, 32(2): 31-37.
- 杨丽丽, 何光喜, 胡忠军, 等. 2013. 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. 水产学报, 37(6): 894-903.
- 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.
- 杨宇峰, 黄祥飞. 1992. 鲢鳙对浮游动物群落结构的影响. 湖泊科学, 4(3): 78-86.
- 赵超, 张洪海, 陈磊, 等. 2014. 乌鳢养殖对浮游动物群落结构的影响. 动物学杂志, 49(1): 63-70.