

引水和疏浚工程支配下杭州西湖浮游动物的群落变化

李共国¹, 吴芝瑛², 虞左明³

(1. 浙江万里学院生物技术研究所, 宁波 315100; 2. 杭州西湖水域管理处, 杭州 310002; 3. 杭州市环境保护科学研究院, 杭州 310014)

摘要:研究了引水和疏浚工程支配下浅水、富营养化杭州西湖浮游动物群落的长期变化, 包括浮游动物的优势种类组成、密度及生物量与水环境因子的相关分析。疏浚后的 2003 年调查中, 西湖 3 个采样站的定量样品中共发现 69 种浮游动物, 其中原生动物 26 种, 轮虫 27 种, 枝角类和桡足类各 8 种。站浮游动物年平均生物量从 1990 年的 0.186mg/L 上升到 2003 年的 0.705mg/L, 站和站分别从 0.665mg/L 和 0.740mg/L 上升到 1.399mg/L 和 1.195mg/L。浮游动物数量组成中原生动物和轮虫平均占 99%, 并占 78% 的生物量。在 1980~2003 年期间, 一些优势种类如砂壳纤毛虫 (*Tintinninea*)、针簇多肢轮虫 (*Polyarthra trigla*) 和长额象鼻溞 (*Bosmina longirostris*) 等显著增加了它们的丰度和优势度; 暗小异尾轮虫 (*Trichocerca pusilla*) 的优势度在引水后的 1990~1995 年增加了, 但在疏浚后的 2003 年下降了; 而 20 世纪 80 年代的一些优势种如毛板壳虫 (*Coleps hirtus*)、螺形龟甲轮虫 (*Keratella cochelearis*) 和短尾秀体溞 (*Diaphanosoma brachyurum*) 等在 3 个采样站中失去优势种地位或消失。原生动物和轮虫生物量在营养水平较高的 ~ 站明显高于营养水平较低的站; 长肢秀体溞 (*Diaphanosoma leuchtenbergianum*)、长额象鼻溞、颈沟基合溞 (*Bosminopsis deitersi*) 和汤匙华哲水蚤 (*Sinocalanus dorrii*) 在营养水平较低的站具有较大的密度和生物量, 而微型裸腹溞 (*Moina micrura*) 和粗壮温剑水蚤 (*Thermocyclops dybowskii*) 则在营养水平较高的 ~ 站具有较大的密度和生物量。西湖各类浮游动物在不同湖区形成不同的分布格局主要由引水水流和水体营养状态差异造成。1990~2003 年期间, 在采样站变异下, 浮游动物中轮虫年平均生物量与水体年平均 pH 值和叶绿素 *a* 含量之间分别有极显著和显著的正相关关系, 与水体透明度之间有极显著的负相关关系。引水后的 1995 年, 与轮虫生物量最密切的生态因子是叶绿素 *a* 含量, 而疏浚后水体碱性环境是影响轮虫生物量最密切的生态因子。

关键词:西湖; 引水; 疏浚; 浮游动物组成; 丰度和生物量变化

文章编号: 1000-0933(2006)10-3508-08 中图分类号: Q143, Q178 文献标识码: A

Changes in the structure of zooplankton community in Lake Xihu (West Lake), Hangzhou after water pumping and dredging treatments

LI Gong-Guo¹, WU Zhi-Ying², YU Zuo-Ming³ (1. Institute of Biotechnology, Zhejiang Wanli University, Ningbo 315100, China; 2. Management of Water Area of the West Lake, Hangzhou 310002, China; 3. Institute of Environmental Protection Science, Hangzhou 310014, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(10): 3508~3515.

Abstract: The long-term changes of zooplankton, including in species composition, abundance and regression analysis between biomass and water environment have been studied at three sampling stations (from to) of Lake Xihu (West Lake), Hangzhou, a shallow eutrophic lake treated by water pumping and dredging. Station is located in the Xiaonanhu (drawing region), the bay of Lake Xihu, Station and are in the central lake and north-end of the lake (discharge region), respectively. Quantitative sampling of each group of zooplankton were taken monthly from each station in 1990, 1995 and 2003. The main purposes of this paper are to describe long-term changes in zooplankton communities of Lake Xihu, and to discuss the possible mechanisms of the change.

During the survey of 2003, 69 species of zooplankton were identified, among them 26 species were Protozoa, 27 Rotifera, 8

基金项目:国家自然科学基金资助项目 (39170169)

收稿日期: 2005-07-30; **修订日期:** 2006-02-04

作者简介: 李共国 (1964~), 男, 浙江鄞州人, 教授, 主要从事淡水浮游动物生态研究. E-mail: ligongguo@tom.com

Foundation item: The project was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 39170169)

Received date: 2005-07-30; **Accepted date:** 2006-02-04

Biography: LI Gong-Guo, Professor, mainly engaged in fresh water zooplankton ecology. E-mail: ligongguo@tom.com

Cladocera and 8 Copepoda. From 1990 to 2003, the annual average density of zooplankton at Station 1 from 1270 ind./L increased to 1583 ind./L, from 3229 ind./L to 11022 ind./L at Station 2 and from 3161 ind./L to 7390 ind./L at Station 3, the annual average biomass at Station 1 from 0.186 mg/L increased to 0.705 mg/L, from 0.665 mg/L to 1.399 mg/L at Station 2 and from 0.740 mg/L to 1.195 mg/L at Station 3. 99 % of abundance and 78.0 % of biomass of zooplankton were protozoans and rotifers.

During 1990—2003, some of the dominant species of zooplankton, such as Tintinninea, *Polyarthra Trigla* and *Bosmina longirostris* increased their percentage in abundance remarkably, whilst the proportion of *Diaphanosoma leuchtenbergianum* was decreased at three stations, the proportion of *Trichocerca pusilla* was increased during 1990—1995 after water pumping treatment and declined in 2003 after dredging, *Coleps hirtus*, *Keratella cochlearis* and *Diaphanosoma brachyurum*, which were dominated in 1980s, have been disappeared from three stations in recent years.

The abundance of Protozoa and Rotifera at Stations 1 and 2 were higher than that at Station 3 for their higher trophic level. *Diaphanosoma leuchtenbergianum*, *Bosmina longirostris*, *Bosminopsis deitersi* and *Sinocalanus dorrii* were more common at Station 1 for its lower trophic level, whereas *Moina micrura* and *Thermocyclops dybowskii* were more popular at Stations 2 and 3. After dredging treatment, Protozoa biomass only at Station 1 was positively correlated with Chlorophyll-a concentration and COD_{Mn} . There was a significant positive relationship between Rotifera biomass and Chlorophyll-a concentration at three stations, biomass of Cladocera at each station was positively correlated with Chlorophyll-a concentration and COD_{Mn} , and biomass of Copepoda at Stations 1 and 2 was positively correlated with Chlorophyll-a concentration and COD_{Mn} .

During 1990—2003, the biomass of Rotifera had positive linear relationships with pH value and chlorophyll-a concentration, and a negative relationship with transparency in Lake Xihu. The most significant ecological factor affected on rotifers biomass was chlorophyll-a concentration after pumping water from Qiantang River in 1995, and the ecological factor was the pH value of Lake water after dredging in 2003.

The differences in water current and trophic level are responsible for the heterogeneous distribution of each part of zooplankton in Lake Xihu. The abundance of Protozoa and Rotifera has been increased rapidly, following the eutrophic process of the lake water.

Key words: Lake Xihu; water pumping treatment; dredging treatment; zooplankton composition; change of abundance and biomass

杭州西湖(120°16'E, 30°15'N)是闻名中外的风景旅游湖泊,水面积 5.66km²,平均水深 1.56m。长期来,西湖水体富营养化和生态系统退化等问题一直是政府和社会各界关注的对象。自 20 世纪 80 年代以来,对来自陆源的污染采取了严格的控制,如防止农田、园林污水径流入湖,截污,打捞湖面垃圾,改用直流电机游船等措施。1986 年疏通了向钱塘江引水冲污工程,当时日引水量为 3 × 10⁵ m³,连续引水一个月即可完成西湖一次水体交换。但引水冲污工程对西湖水质的改善仅局限于引水的进水口——西湖小南湖湖区,对其他湖区水质改善并不明显,且近年来,钱塘江受潮汐和自身污染的影响,一年中能供西湖引水的时间越来越少,西湖水质状况不容乐观^[1]。考虑到西湖湖底沉积多年的淤泥和有机残体,其营养盐含量远高于水体,疏浚富含营养盐的底泥可以削减大量的内源污染^[2]。同时,湖泊深度加大后还有利于游船的航行。因此,杭州市政府于 1999 年对西湖采取了大规模的全湖底泥疏浚工程,平均挖泥深度 0.5 m。

引水冲污和疏浚底泥作为控制城市中小型湖泊富营养化的措施已在国内外广泛应用^[3,4],但对这些大型生态工程的效益评价和水生态响应的报道则很少,尤其是对湖泊底泥疏浚工程还多持慎重的态度^[5,6]。浮游动物在湖泊生态系统食物链中起着重要的作用^[7,8],并且其中的一些类群还可用来指示水体营养状态^[9,10]。本文主要描述引水和疏浚工程支配下杭州西湖浮游动物群落的长期变化,同时报道疏浚工程后西湖浮游动物群落结构的变化,以及与水质理化指标之间的关系,并以此来探讨引水和疏浚工程对西湖浮游动物群落的长期影响。

1 材料和方法

沿西湖引流路线设置 3 个浮游动物采样站,即进水口小南湖(站)、外湖心(站)、出水口少年宫湖区(站)(图 1),分别于 1990 年 1~12 月、1995 年 1~12 月和 2003 年 1~12 月逐月采样。采样和计数按《淡水浮游生物研究方法》^[11]进行,采样时测定水质的理化指标。原生动物和轮虫定量样品用 1 L 采水器分别在采样点的上、中、下 3 个水层各取 1 L 水均匀混合后取 1 L 水样,当即用 2 % 甲醛固定带回实验室,用锥形量筒沉淀浓缩至 20 ml。原生动物种类主要按《淡水浮游生物研究方法》^[11]、江苏安徽淡水沙壳纤毛虫的调查报告^[12]鉴定,轮虫种类鉴定按《中国淡水轮虫志》^[13]。原生动物和轮虫分别取 0.1 ml 和 1 ml 浓缩水样于计数框内,分别在 200 × 和 100 × 显微镜下镜检 2 片计数。原生动物和轮虫生物量(湿重)按体积法^[14]统计。

枝角类和桡足类用 2.5 L 采水器分别在采样点的上、中、下三层各取若干等量水均匀混合后取 10 L 水样,用 25 号(孔径为 64 μm)浮游生物网过滤浓缩至 60~80 ml,当即用 3 % 甲醛固定带回实验室,沉淀浓缩至 20 ml。取 1 ml 浓缩水样于计数框,在 100 × 显微镜下镜检全部样品。枝角类种类按《中国淡水枝角类》^[15]鉴定,桡足类种类按《中国淡水桡足类》^[16]鉴定。枝角类和桡足类生物量(湿重)分别按黄祥飞等^[17]和陈雪梅^[18]体长-体重回归方程式计算。

优势种的优势度按某一种群密度与样本中该类群总密度之比值计算。水体富营养化程度按综合营养状态指数法(TLI)评价^[19], $50 < TLI(\Sigma) \leq 60$ 为轻度富营养, $60 < TLI(\Sigma) \leq 70$ 为中度富营养, $TLI(\Sigma) > 70$ 为重度富营养。1990 年、1995 年和 2003 年引入西湖的实际水量分别为 $2.16 \times 10^7 \text{ m}^3$ 、 $1.55 \times 10^7 \text{ m}^3$ 和 $6.18 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

2 结果

2.1 引水和疏浚对西湖水质的长期影响

自 1986 年西湖向钱塘江引水后,由于引流对西湖水体的受益程度不同,以及整个西湖被苏堤和白堤隔离成几个连通性不太好的湖区,西湖不同湖区之间的水体富营养化水平发生了明显的差异。根据水体透明度、高锰酸盐、总氮、总磷和叶绿素 a 含量综合营养状态指数 $TLI(\Sigma)$, 站水体的营养水平(轻度富营养)明显低于 ~ 站(中度富营养)(表 1)。以引水第 1 个 5a 后的 1990 年水体综合营养状态指数 $TLI(\Sigma)$ 最低,引水第 2 个 5a 后的 1995 年 $TLI(\Sigma)$ 值最高,疏浚后 2003 年 ~ 站水体的总氮、总磷和叶绿素 a 含量均有不同程度的下降,各站水体综合营养状态指数有所回落,但透明度也有所下降。

2.2 ~ 站浮游动物优势种组成的长期变化(1990~2003 年)

1990~2003 年期间,各类浮游动物优势种的优势度见图 2。引流钱塘江后的 1995 年,西湖原生动物的优势种变为似铃壳虫属(*Tintinnopsis*),疏浚后其优势度在 站增长了而在 站和 站则明显下降了,并出现了另一个优势种筒壳虫属(*Tintinnidium*),其优势度在 3 个采样站中沿着引流方向逐渐增大。2003 年调查中,该两属优势种密度占原生动物总密度的 65.6 % (表 2)。

针簇多肢轮虫(*Polyarthra trigla*)和暗小异尾轮虫(*Trichocerca pusilla*)是西湖稳定的轮虫优势种。前者种群丰度持续增长,特别是 站,年平均密度从 1990 年的 27 个/L 增加到 2003 年的 364 个/L,优势度相应从 11.6 % 上升到 45.6 %。后者在引水前其种群密度较低,引水后增加较快,1995 年后虽保持着较高的种群密度,但其优势度在 3 个采样站均有不同程度的下降。而 1990 年 站的优势种角突臂尾轮虫(*Branchionus angularis*),在

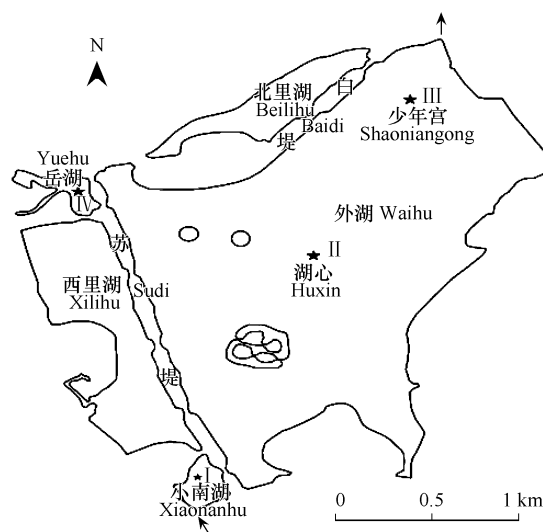


图 1 西湖采样站分布图

Fig. 1 Locations of sampling stations in Lake Xihu, Hangzhou (~)

1995 年和 2003 年中失去了优势种地位。2003 年针簇多肢轮虫和暗小异尾轮虫密度之和占轮虫总密度的 48.7 % (表 2)。

表 1 1990 ~ 2003 年西湖各采样站水体透明度 (SD)、高锰酸盐 (COD_{Mn})、总氮 (TN)、总磷 (TP) 和叶绿素 a (Chl. a) 含量的年平均值

Table 1 Annual mean values for transparency (SD), COD_{Mn}, total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and Chlorophyll-a (Chl. a) at three stations

~ (1990 ~ 2003)							
采样站 Stations	年份 Years	透明度 SD (m)	高锰酸盐 COD _{Mn} (mg/L)	总氮 TN (mg/L)	总磷 TP (mg/L)	叶绿素 a 含量 Chl. a (mg/L)	综合营养状态指数 TLI (Σ)
	1990	0.83	4.50	1.992	0.084	0.017	54.4
	1995	0.70	4.25	2.640	0.117	0.021	57.5
	2003	0.67	3.86	2.450	0.076	0.020	55.3
	1990	0.49	8.00	1.811	0.117	0.061	63.5
	1995	0.51	7.80	2.372	0.137	0.082	65.3
	2003	0.45	6.17	1.870	0.102	0.072	62.7
	1990	0.46	7.90	1.921	0.119	0.079	64.7
	1995	0.50	7.20	2.103	0.156	0.084	65.1
	2003	0.42	5.77	1.920	0.132	0.070	63.5

表 2 疏浚后西湖 3 个采样站中各类浮游动物优势种的年平均密度 (ind./L)

Table 2 Average density (ind./L) of dominant species of each part of zooplankton at Stations ~ in Lake Xihu, Hangzhou after dredging

种类 Species	采样站 Sampling stations			平均 Mean
原生动物 Protozoa				4122
筒壳虫 <i>Tintinnidium</i> spp.	104	2166	1892	1387
似铃壳虫 <i>Tintinnopsis</i> spp.	142	2596	1220	1319
淡水麻铃虫 <i>Leptotintinus fluviatile</i>	17	867	600	495
急游虫 <i>Strombidium</i> spp.	167	288	208	221
栉毛虫 <i>Didinium</i> spp.	17	500	138	218
轮虫 Rotifera				2363
针簇多肢轮虫 <i>Polyarthra trigla</i>	364	795	858	672
暗小异尾轮虫 <i>Trichocerca pusilla</i>	100	1007	330	479
细异尾轮虫 <i>T. gracilis</i>	49	867	371	429
裂痕龟统轮虫 <i>Anuraeopsis fissa</i>	94	396	241	244
迈氏三肢轮虫 <i>Filinia maior</i>	97	212	158	156
枝角类 Cladocera				4.50
长肢秀体溞 <i>Diaphanosoma leuchtenbergianum</i>	4.12	1.28	0.90	2.10
长额象鼻溞 <i>Bosmina longirostris</i>	4.93	0.42	0.30	1.88
微型裸腹溞 <i>Moina micrura</i>	0.07	1.22	1.23	0.84
颈沟基合溞 <i>Bosminopsis deitersi</i>	1.38	0.00	0.02	0.47
桡足类 (成体) Copepoda (adult)				
粗壮温剑水蚤 <i>Thermocyclops dybowskii</i>	0.00	0.34	0.30	0.23
汤匙华哲水蚤 <i>Sinocalanus dorrii</i>	0.26	0.19	0.13	0.19
近邻剑水蚤 <i>Cyclops vicinus</i>	0.01	0.08	0.21	0.10
桡足幼体 Copepodids	1.87	3.30	4.83	3.33
无节幼体 Nauplius	17.10	24.58	27.50	23.06

引水后,西湖枝角类第一优势种长肢秀体溞 (*Diaphanosoma leuchtenbergianum*) 的种群密度一直在增加,但其优势度则明显下降;而一些体型较小的优势种,如长额象鼻溞 (*Bosmina longirostris*)、颈沟基合溞 (*Bosminopsis deitersi*) 和微型裸腹溞 (*Moina micrura*) 的优势度均有不同程度的增加。并且,疏浚后 站的长额象鼻溞和 站

的微型裸腹溞分别取代了长肢秀体溞第一优势种的地位。2003 年调查中,长肢秀体溞和长额象鼻溞的密度占枝角类总密度的 88.4 % (表 2)。

1990 ~ 1995 年期间西湖 3 个采样站桡足类优势种缺乏资料。疏浚后的研究表明:哲水蚤中的优势种为主要出现在 站的汤匙华哲水蚤 (*Sinocalanus dorrii*),其优势度分布表现为沿着引流方向逐渐下降,剑水蚤中的优势种为出现在 ~ 站的粗壮温剑水蚤 (*Thermocyclops dybowskii*)。该两种优势种成体密度占桡足类成体总密度的 77.6 % (表 2)。

2.3 ~ 站浮游动物种类组成、密度和生物量

疏浚后的 2003 年调查中,西湖 3 个采样站的定量样品中共发现 69 种浮游动物,其中原生动物 26 种,轮虫 27 种,枝角类和桡足类各 8 种。1990 ~ 1995 年引流期间,浮游动物密度和生物量增加较缓,随着引流水量的减少以及疏浚工程的实施,浮游动物密度和生物量增加迅速。浮游动物中,原生动物和轮虫两类群密度之和占浮游动物总密度 97.1 % ~ 99.7 %,平均为 99.0 %;此两类群的生物量之和占浮游动物总生物量 53.4 % ~ 92.3 %,平均 78.0 %。

3 个采样站浮游动物丰度与水体的营养状态密切相关。1990 ~ 2003 年期间, ~ 站浮游动物年平均密度分别为 1321、6088 和 4972 个/L,生物量分别为 0.431、0.977 和 0.920 mg/L。轮虫生物量在各站显示持续的增加, 站枝角类生物量增加显著,疏浚后 ~ 站原生动物生物量明显增加,而 站桡足类生物量在 1995 年后下降了。各采样站每年通常有 2 ~ 3 个浮游动物生物量高峰出现 (图 3)。

2.4 浮游动物生物量与水质理化因子之间的相关分析 (1990 ~ 2003 年)

以各采样站水质理化指标的年平均值为自变量,各类浮游动物生物量的年平均值为应变量之间进行的相关性分析见表 3。轮虫生物量与水体 pH 值和叶绿素 a 含量之间分别有极显著和显著的正相关关系,与水体透明度之间有极显著的负相关关系。其他各类浮游动物生物量与水质理化因子之间的相关性均不显著,水体中总氮和总磷含量不是直接影响浮游动物生物量的主要因素 (表 3)。

表 3 1990 ~ 2003 年期间西湖各类浮游动物生物量与水体透明度 (SD)、pH 值、总氮 (TN)、总磷 (TP) 和叶绿素 a (Chl. a) 含量之间的相关系数

Table 3 Correlation coefficients of each part biomass of zooplankton and transparency (SD), pH value, total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and Chlorophyll-a (Chl. a) concentration in Lake Xihu, Hangzhou during 1990 ~ 2003

生物量 Biomass	样本数 n	透明度 SD	高锰酸盐 COD _{Mn}	pH 值 pH value	总氮 TN	总磷 TP	叶绿素 a Chl. a
原生动物 Protozoa	9	- 0.6306	0.0387	0.657	- 0.5307	0.1533	0.4891
轮虫 Rotifera	9	- 0.8740 **	0.1497	0.8802 **	- 0.4350	0.3828	0.7572 *
枝角类 Cladocera	9	0.3848	0.6417	- 0.2983	0.5999	- 0.5937	- 0.5994
桡足类 Copepoda	9	- 0.5026	- 0.0001	0.4259	0.0592	0.518	0.4891

*0.05 显著水平 Significant at 0.05 level; ** 0.01 显著水平 Significant at 0.01 level

疏浚后,以各采样站每月水质理化指标为自变量,各类浮游动物的月生物量为应变量之间进行的相关性分析见表 4。西湖浮游动物生物量与水体叶绿素 a 含量和高锰酸盐指数之间的相关性程度较高,并在不同的采样点和不同的浮游动物类群上显示出明显的差异性。原生动物生物量仅在 站与水体叶绿素 a 含量、高锰

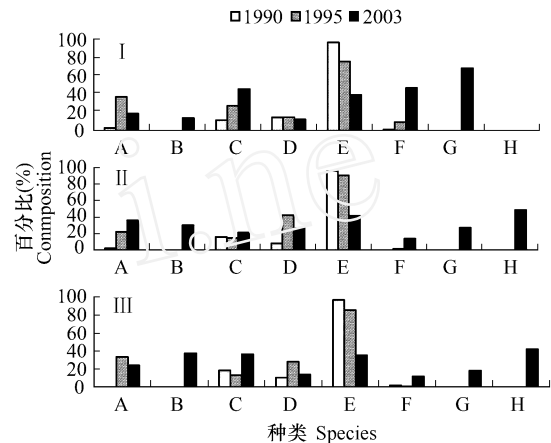


图 2 1990 ~ 2003 年 ~ 站各类浮游动物优势种密度的百分组成

Fig. 2 Percentage composition by density of dominant species of each part of zooplankton during 1990 ~ 2003 at Stations ~

A: 似铃壳虫 *Tintinnopsis*; B: 筒壳虫 *Tintinnidium*; C: 针簇多肢轮虫 *Polyarthra trigla*; D: 暗小异尾轮虫 *Trichocerca pusila*; E: 长肢秀体溞 *Diaphanosoma leuchtenbergianum*; F: 长额象鼻溞 *Bosmina longirostris*; G: 汤匙华哲水蚤 *Sinocalanus dorrii*; H: 粗壮温剑水蚤 *Thermocyclops dybowskii*

酸盐指数之间有显著的正相关关系;各站轮虫生物量与水体叶绿素 a 含量之间均有显著的正相关性,并以站相关性为最高,与水体高锰酸盐指数之间均无显著相关性;各站枝角类生物量与水体叶绿素 a 含量、高锰酸盐指数之间均有极显著或显著的正相关性; ~ 站的桡足类生物量与水体叶绿素 a 含量、高锰酸盐指数之间均有显著的正相关性。

表 4 疏浚后 3 个采样站各类浮游动物生物量与水体叶绿素 a 含量、高锰酸盐指数之间的相关关系 (2003 年)

采样站 Stations	项目 Items	样本数 n	原生动物 Protozoa	轮虫 Rotifera	枝角类 Cladocera	桡足类 Copepoda
	叶绿素 a Chlorophyll-a	12	0.6171 *	0.7080 **	0.7708 **	0.2163
	高锰酸盐指数 COD _{Mn}	12	0.6510 *	0.3610	0.6554 *	0.3860
	叶绿素 a Chlorophyll-a	12	- 0.2924	0.6379 *	0.8227 **	0.6263 *
	高锰酸盐指数 COD _{Mn}	12	- 0.0806	0.4997	0.8833 **	0.6155 *
	叶绿素 a Chlorophyll-a	12	- 0.1957	0.6510 *	0.7823 **	0.6779 *
	高锰酸盐指数 COD _{Mn}	12	0.0400	0.5440	0.7370 **	0.6220 *

* 0.05 显著水平 Significant at 0.05 level ; ** 0.01 显著水平 Significant at 0.01 level

3 讨论

引流钱塘江前杭州西湖原生动物的优势种为毛板壳虫 (*Coleps hirtus*) 和珍珠映毛虫 (*Cinetochilum margaritaceum*) 等纤毛虫^[20]。引水后,它们的优势种地位逐渐被似铃壳虫 (*Tintinnopsis* spp.) 和小筒壳虫 (*Tintinnidium pusillum*) 等沙壳纤毛虫 (*Tintinnoinea*) 所代替,疏浚后沙壳纤毛虫迅速繁殖,特别是 站和 站沙壳纤毛虫含量分别占总原生动物的 66.1 %和 74.1 %, 站沙壳纤毛虫年平均密度最高,达 5630 个/L。沙壳纤毛虫是一类披有外壳的浮游寡毛类 (*Oligotricha*) 原生动物,种类繁多,主要分布在海洋。淡水中沙壳纤毛虫主要是包括筒壳虫和似铃壳虫两属,但含量往往很多^[12]。在引水的后期,钱塘江水越来越受潮汐的影响,我们推测西湖沙壳纤毛虫的快速发展可能是由引流钱塘江水进入,适应于西湖水质环境和疏浚后的生态条件所致。除螺形龟甲轮虫 (*Keratella cochlearis*) 自引水后退出优势种地位外,其他优势种如针簇多肢轮虫、暗小异尾轮虫和三肢轮虫 (*Filinia*) 等变化不大,生活于中上层水层的剪形臂尾轮虫 (*Brachionus forficula*) 和裂足臂尾轮虫 (*B. diversicornis*) 等也被生活于中下水层的暗小异尾轮虫和裂痕龟纹轮虫 (*Anuraeopsis fissa*) 所代替。疏浚后针簇多肢轮虫为西湖轮虫第 1 优势种,这一结果恰巧与武汉东湖在滤食鱼类控制下轮虫优势种由螺形龟甲轮虫演变为针簇多肢轮虫相似^[21]。引水使枝角类第 1 优势种由短尾秀体溞 (*Diaphanosoma brachyurum*) 变为长肢秀体溞。疏浚后,体型较小的长额象鼻溞和微型裸腹溞分别上升为 站和 站的第 1 优势种; 站第 1 优势种仍为长肢秀体溞。

有关轮虫丰度与水体营养状态相适应已有较多的报道^[21,22],营养水体通过提供轮虫的有效食物通常会增进水体富营养化进程,1990~2003 年轮虫生物量与水体透明度呈显著的负相关关系从直观上支持了这个观点。本研究结果表明:富营养化较重的 ~ 站轮虫密度和

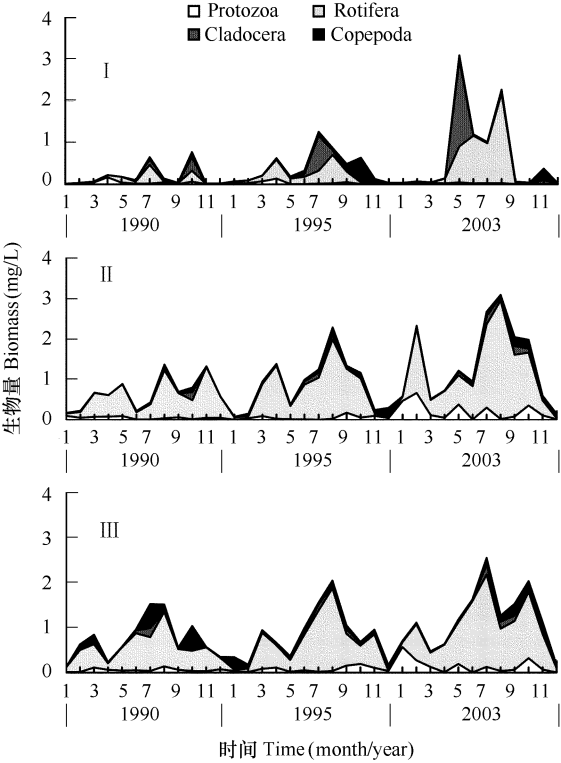


图 3 1990~2003 年间西湖 3 个采样站各类浮游动物生物量的月变化
Fig.3 Monthly changes in biomass of each part of zooplankton at three stations in Lake Xihu, Hangzhou during 1990~2003

生物量明显高于富营养化较轻的 站。并且疏浚后的 2003 年轮虫密度和生物量又明显高于 1995 年,这与疏浚后水体中出现大量由有机碎屑构成的“污染云团”有关^[6],这些污染碎屑或直接被轮虫利用,或通过藻类增殖提供轮虫的有效食物。富营养化期间,浮游动物种群密度分布也发生了显著的变化,中-寡污性种类如颈沟基合溞(*Bosminopsis deitersi*)和汤匙华哲水蚤(*Sinocalanus dorrii*)种群密度 站明显高于 ~ 站,而富营养化种类如微型裸腹溞(*Moina micrura*)则 站明显低于 ~ 站,西湖浮游动物在不同湖区形成这种分布格局是由水体的营养状态差异所造成^[23]。原生动物和轮虫两类群密度之和占浮游动物总密度的 99.0%,生物量占 78.0%,这在一定程度上反映了西湖富营养特征。

1990~2003 年,西湖水体年平均 pH 值与年平均轮虫生物量之间呈极显著的正相关关系(表 3)。实际上, pH 值与水体透明度之间也有极显著的负相关关系($r = -0.902$, $p < 0.01$),与叶绿素 a 含量之间则有极显著的正相关关系($r = 0.890$, $p < 0.01$)。 站水体 pH 年平均值从 1990 年的 7.61 上升到 2003 年的 8.02, 站从 8.30 上升到 8.68, 站从 8.32 上升到 8.61,这可能是西湖水体富营养化加重的主要原因之一。引水后的 1995 年与轮虫生物量最密切的生态因子是水体叶绿素 a 含量^[24],而疏浚后的 2003 年与轮虫生物量最密切的生态因子是水体碱性环境。

References:

- [1] Ma J L. Water quality analysis of the West Lake after drawing current from Qiantang River. *Environmental Pollution & Control*, 1996, 18(5): 31~33.
- [2] Pei H P, Wang W W, He J T, *et al.* A phosphorus circulation dynamics model in the ecosystem for the West Lake after drawing, Hangzhou. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 6, 648~653.
- [3] Zhang D N. Analysis of environmental benefit for water diversion project of Xuanwu Lake. *Environmental Monitoring & Technology*, 1995, 7(3): 17~18.
- [4] Wang X Y, Feng J, Hu M Z. Factor analysis and dynamics of pre-and post-dredging of Nanhu Lake in Changchun. *Environmental Monitoring in China*, 2004, 20(2): 10~13.
- [5] Fan C X, Qin B Q, Gu X H. Approach on comprehensive treatment technology of Lake Taihu. *Shanghai Environmental Science*, 2001, 20(12): 601~604.
- [6] Pu P M, Wang G X, Hu C H, *et al.* Can we control eutrophication by dredging? *Journal of Lake Sciences*, 2000, 12(3): 269~279.
- [7] Porter K G, Pearl H, Hodson R, *et al.* Microbial interactions in lake food webs. In: Carpenter S. R. ed. *Complex Interactions in Lake Communities*. New York: Springer-Verlag, 1988. 209~227.
- [8] Stockner J G, Porter K G. Microbial food webs in freshwater planktonic ecosystems. In: Carpenter S. R. ed. *Complex Interactions in Lake Communities*. New York: Springer-Verlag, 1988. 69~83.
- [9] Gannon J E, Stemberger R S. Zooplankton (especially crustaceans and rotifers) as indicators of water quality. *Transactions of the American Fisheries Society*, 1978, 97: 16~35.
- [10] Li G G, Yu Z M. Community Structure of rotifer and ecological assessment of water quality in Qiandao Lake. *Lake Sciences*, 2003, 15(2): 169~176.
- [11] Zhang Z S, Huang X F, ed. *Method of studies on plankton*. Beijing: Science Press, 1991. 358~362.
- [12] Jiang X Z. Notes on the freshwater Tintinninea from Jiangsu and Anhui provinces. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1956, 1: 61~87.
- [13] Wang J J, ed. *Fauna Sinica of Chinese Freshwater Rotifera*. Beijing: Science Press, 1961.
- [14] Hang X F. Application of the simplified method of weight determination to various species of planktonic rotifers in Lake Donghu, Wuhan. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1981, 7(3): 347~356.
- [15] Chiang S C, Du N S, eds. *Fauna Sinica, Crustacea, Freshwater Cladocera*. Beijing: Science Press, 1979.
- [16] Fauna editorial committee, academia sinica eds. *Fauna Sinica (Freshwater Copepoda)*. Beijing: Science Press, 1979.
- [17] Huang X F, Hu C Y. Formulae of length-weight of freshwater common cladocerans. In: Editorial Committee of the Chinese Crustacean Society eds. *Transactions of the Chinese Crustacean Society*, 1. Beijing: Science Press, 1986. 147~157.
- [18] Chen X M. Biomass calculation of freshwater Copepoda. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1981, 7(3): 397~408.
- [19] Wang M C, Liu X Q, Zhang J H. Evaluate method and classification standard on lake eutrophication. *Environmental Monitoring in China*, 2002, 18(5): 47~49.
- [20] Wei C D, Yu D W. Studies on zooplankton in the West Lake, Hangzhou. *Journal of Hangzhou University (Natural Science Edition)*, 1983, 10 (supplement): 1~17.
- [21] Shao Z J, Xie P, Zhuhe Y. Long-term changes of planktonic rotifers in a subtropical Chinese lake dominated by filter-feeding fishes. *Freshwater Biology*, 2001, 46, 973~986.

- [22] Balvay G, Laurent M. Long-term quantitative evolution of rotifers during the eutrophication in Lake Geneva. *Aquatic Science*, 1990, 150:162~175
- [23] Li G G, Wu Z Y, Yu Z M. Changes in the community structure of Cladocera before and after dredging in the West Lake, Hangzhou, Zhejiang Province. *Biodiversity Science*, 2005, 13(3): 248~254.
- [24] Li G G, Wei C D, Pei H P. Effect of drawing water on the rotifer community in the West Lake, Hangzhou. *Chinese Journal of Zoology*, 1998, 33(5):1~4.

参考文献:

- [1] 马玖兰. 西湖引流钱塘江水9年后的水质分析. *环境污染与防治*, 1996, 18(5):31~33.
- [2] 裴洪平, 王维维, 何金土, 等. 杭州西湖引水后生态系统中磷循环模型. *生态学报*, 1998, 18(6):648~653.
- [3] 张丹宁. 玄武湖引水工程的环境效益分析. *环境监测管理与技术*, 1995, 7(3):17~18.
- [4] 王小雨, 冯江, 胡明忠. 长春南湖底泥疏浚前后水因子分析及动态变化. *中国环境监测*, 2004, 20(2):10~13.
- [5] 范成新, 秦伯强, 谷孝鸿. 太湖湖内综合治理技术探讨. *上海环境科学*, 2001, 20(12):601~604.
- [6] 濮培民, 王国祥, 胡春华, 等. 底泥疏浚能控制湖泊富营养化吗? *湖泊科学*, 2000, 12(3):269~279.
- [10] 李共国, 虞左明. 千岛湖轮虫群落结构及水质生态学评价. *湖泊科学*, 2003, 15(2):169~176.
- [11] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京:科学出版社, 1991. 358~362.
- [12] 蒋燮治. 江苏安徽淡水沙壳纤毛虫的调查报告. *水生生物学集刊*, 1956, 1:61~87.
- [13] 王家楫编. 中国淡水轮虫志. 北京:科学出版社, 1961.
- [14] 黄祥飞. 简易测重法在武汉东湖轮虫常见种中的应用. *水生生物学集刊*, 1981, 7(3):409~416.
- [15] 蒋燮治, 堵南山. 中国动物志(淡水枝角类). 北京:科学出版社, 1979.
- [16] 中国科学院动物研究所甲壳动物研究组编. 中国动物志(淡水桡足类). 北京:科学出版社, 1979.
- [17] 黄祥飞, 胡春英. 淡水常见枝角类体长-体重回归方程式. 见:甲壳动物学论文集编委会编. 甲壳动物学论文集. 1. 北京:科学出版社, 1986. 147~157.
- [18] 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.
- [19] 王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法和分级标准. *中国环境监测*, 2002, 18(5):47~49.
- [20] 魏崇德, 俞大维. 杭州西湖浮游动物的研究. *杭州大学学报, 自然科学版(增刊)*, 1983, 10:1~17.
- [23] 李共国, 吴芝瑛, 虞左明. 疏浚工程前后杭州西湖枝角类群落结构的变化. *生物多样性*, 2005, 13(3):248~254.
- [24] 李共国, 魏崇德, 裴洪平. 引水对杭州西湖轮虫群落结构的影响. *动物学杂志*, 1998, 33(5):1~4.