

太湖梅梁湾大型控藻围栏对浮游甲壳动物群落结构的影响*

柯志新¹ 谢平^{2**} 过龙根² 徐军² 周琼³

(¹中国科学院南海海洋研究所海洋生物资源可持续利用重点实验室, 广州 510301; ²中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072; ³华中农业大学水产学院, 武汉 430070)

摘要 2005年对太湖梅梁湾大型鲢、鳙控藻围栏内外浮游甲壳动物群落结构的季节变化进行了监测. 结果表明: 围栏内外的环境因子、浮游植物生物量、浮游甲壳动物种类组成无显著差异. 但鲢、鳙放养对浮游甲壳动物的生物量产生了较大的影响, 围栏内浮游甲壳动物的总生物量和枝角类的生物量显著低于围栏外. 总体上, 枝角类各种类的生物量受鲢、鳙放养的影响程度大于桡足类的种类. 太湖梅梁湾浮游甲壳动物的季节演替明显, 大部分种类只是季节性出现. 冬季和春季以溞(*Daphnia* sp.) 和近邻剑水蚤(*Cyclops vicinus*) 等大型种类为主, 夏季和秋季以象鼻溞(*Bosmina* sp.)、角突网纹溞(*Ceriodaphnia cornuta*) 和中华窄腹剑水蚤(*Limnithona sinensis*) 等小型种类为主. 典范对应分析表明, 透明度、温度和浮游植物的生物量是影响浮游甲壳动物季节变化的主要因素.

关键词 鲢 鳙 浮游甲壳动物 群落结构 蓝藻水华

文章编号 1001-9332(2012)08-2270-07 中图分类号 Q145, Q178 文献标识码 A

Effects of large bio-manipulation fish pen on community structure of crustacean zooplankton in Meiliang Bay of Taihu Lake. KE Zhi-xin¹, XIE Ping², GUO Long-gen², XU Jun², ZHOU Qiong³ (¹Key Laboratory of Marine Bio-resource Sustainable Utilization, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China; ²Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; ³College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China). -Chin. J. Appl. Ecol. 2012 23(8): 2270-2276.

Abstract: In 2005, a large bio-manipulation pen with the stock of silver carp and bighead carp was built to control the cyanobacterial bloom in Meiliang Bay of Taihu Lake. This paper investigated the seasonal variation of the community structure of crustacean zooplankton and the water quality within and outside the pen. There were no significant differences in the environmental parameters and phytoplankton biomass within and outside the pen. The species composition and seasonal dynamics of crustacean zooplankton within and outside the pen were similar, but the biomass of crustacean zooplankton was greatly suppressed by silver carp and bighead carp. The total crustacean zooplankton biomass and cladoceran biomass were significantly lower in the pen ($P < 0.05$). In general, silver carp and bighead carp exerted more pressure on cladoceran species than on copepod species. A distinct seasonal succession of crustacean zooplankton was observed in the Bay. Many crustacean species were only dominated in given seasons. Large-sized crustacean (mainly *Daphnia* sp. and *Cyclops vicinus*) dominated in winter and spring, while small-sized species (mainly *Bosmina* sp., *Ceriodaphnia cornuta*, and *Limnithona sinensis*) dominated in summer and autumn. Canonical correspondence analysis showed that water transparency, temperature, and phytoplankton biomass were the most important factors affecting the seasonal succession of the crustacean.

Key words: silver carp; bighead carp; crustacean zooplankton; community structure; cyanobacterial bloom.

* 国家高技术研究发展计划项目(2002AA601011)、国家重点基础研究发展计划项目(2008CB418006-4)和国家自然科学基金项目(41006066)资助.

** 通讯作者. E-mail: xieping@ihb.ac.cn

2011-09-16 收稿 2012-05-03 接受.

太湖位于长江中下游地区,是我国第三大淡水湖泊^[1].近20多年来,太湖周边无锡、苏州、常州等城市工农业发展迅速,对太湖水环境的营养负荷压力很大,水体的富营养化情况严重.蓝藻水华在太湖周边多个城市饮用水源地取水口地区大量暴发,严重影响了供水安全^[2-3].为改善太湖水质,扭转生境退化趋势,研究人员尝试了大量的生态修复措施.在水体放养鲢、鳙鱼来控制水华就是其一^[3-4].鲢、鳙在滤食浮游植物的同时也大量滤食浮游动物,其在水体的大量放养会对水体浮游甲壳动物的群落结构产生影响^[5-8].而浮游甲壳动物在控制浮游植物生物量和季节演替上也具有重要作用^[9-11].因此,研究鲢、鳙放养对水体浮游甲壳动物群落结构的影响有助于全面了解该生态修复措施对湖泊生态环境的影响.

本文通过对太湖梅梁湾水源地保护工程示范区内大型鲢、鳙控藻围栏内外浮游甲壳动物群落结构变化的监测,分析和评价了围栏放养鲢、鳙对浮游甲壳动物群落结构的影响,探讨了太湖梅梁湾水体浮游甲壳动物的季节演替的影响因子,为今后的生态环境修复提供参考.

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域概况

梅梁湾位于太湖的北部,面积约100 km²,水深为1.8~2.3 m^[1].它不仅是无锡市的主要水源地,而且是重要的旅游景点.在过去的20年间,该水域微囊藻水华频繁暴发,已经被列为太湖超富营养化的区域之一.为了控制蓝藻水华的发生,在太湖梅梁湾充山自来水厂取水口前方设置了3个放养鲢、鳙鱼的大型围栏,该工程也是梅梁湾系列的水源地生态修复工程的一部分,相关生态修复工程及围栏周边环境详见秦伯强等^[3].每个控藻围栏的面积约为0.36 km²,围栏的网目规格是2 cm × 2 cm.在2005年的1—2月,在3个围栏中投放规格在250 g左右的鲢、鳙鱼种,最初投放密度约为10 g · m⁻³.2005年底,围栏内的鲢、鳙长到1500 g左右,存栏密度约为55 g · m⁻³.

1.2 研究方法

为了比较控藻围栏内外浮游生物的群落结构和水质差别,2005年在围栏内外设置了10个采样点(图1),每月监测各环境指标的变化.用Patalas有机玻璃采水器在每个站位0、0.5、1和1.5 m处各取水样5 L,用64 μm的浮游生物网过滤富集,装入

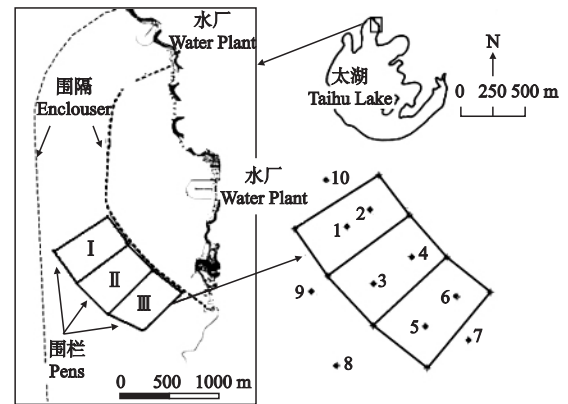


图1 梅梁湾围栏及采样点分布示意图

Fig. 1 Sketch of locations of fish pens and sampling sites in Meiliang Bay.

50 mL的塑料小方瓶,加入4%的福尔马林固定液,作为浮游甲壳动物定量样品.同时取1 L混合水样加入10 mL的鲁哥试剂固定,作为浮游植物样品.浮游植物和浮游动物的观察计数及生物量的估算参照章宗涉等^[12]的方法.水温和透明度用温度计和Secchi透明度盘在采样时原位测定,总氮(TN)经碱性过硫酸钾消解后用紫外分光光度法测定,总磷(TP)经过过硫酸钾消解后用钼锑抗比色法测定^[13].

1.3 数据处理

围栏内为1~6号站位平均,围栏外为7~10号站位平均.围栏内外差异的显著性采用 T 检验分析.所有数据在进行统计分析前均进行了对数转换.采用典范对应分析法(CCA)分析采样期间浮游甲壳动物的群落结构与理化因子之间的关系.在CCA分析时,用Monte-Carlo假设检验来检验环境变量对浮游甲壳动物群落结构影响的显著性($\alpha = 0.05$),CCA分析用统计软件CANOCO 4.5完成.

2 结果与分析

2.1 围栏内外理化因子和藻类生物量

围栏内外各参数的年平均值见表1.围栏内外的水温基本一致,全年水体的平均温度为17.2 °C,最高水温(约31 °C)出现在8月,最低水温(约3 °C)出现在1月.水体透明度全年变化的幅度不大,夏季的透明度比冬季略低,围栏内外的周年平均透明度几乎相同,约为31 cm.围栏内的年平均总氮浓度略高于围栏外,但总磷略低于围栏外.叶绿素 a 的浓度在围栏内外分别为43.74和48.05 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,围栏内低于围栏外.围栏内蓝藻的年平均生物量远低于围栏外,但绿藻和硅藻的生物量略高于围栏外.

表 1 围栏内外的环境参数和藻类生物量的年平均均值
Table 1 Annual mean of environmental parameters and phytoplankton biomass within and outside fish pens

项目 Item	围栏内 Within fish pens	围栏外 Outside fish pens
温度 Temperature (°C)	17.18 ± 10.36	17.18 ± 10.21
透明度 Transparency (cm)	30.65 ± 4.88	30.59 ± 5.80
总氮 TN (mg · L ⁻¹)	2.52 ± 1.79	2.47 ± 1.83
总磷 TP (mg · L ⁻¹)	0.149 ± 0.055	0.152 ± 0.067
叶绿素 a Chlorophyll a (µg · L ⁻¹)	43.74 ± 36.85	48.05 ± 57.81
蓝藻生物量 Cyanobacteria biomass (mg · L ⁻¹)	2.92 ± 6.55	5.90 ± 14.38
绿藻生物量 Chlorophyta biomass (mg · L ⁻¹)	1.77 ± 1.82	1.31 ± 1.17
硅藻生物量 Bacillariophyta biomass (mg · L ⁻¹)	1.80 ± 2.01	1.45 ± 1.44
总浮游植物生物量 Total phytoplankton biomass (mg · L ⁻¹)	8.39 ± 7.67	9.73 ± 15.20

围栏内外浮游植物总生物量年平均分别为 8.39 和 9.73 mg · L⁻¹。围栏内低于围栏外。对围栏内外各参数的月平均值进行 *T* 检验, 其差异均未达到显著性水平。

2.2 围栏内外浮游甲壳动物的种类与生物量的季节变化

围栏所在区域的浮游甲壳动物的群落结构比较简单, 种类较少而且许多种类也只是季节性出现。调查期间, 围栏内外共调查到浮游甲壳动物 22 种, 其

中枝角类 9 属 14 种, 桡足类 8 属 8 种(表 2)。围栏内外浮游甲壳动物出现的种类并无差异。枝角类主要由透明溞(*Daphnia hyalina*)、角突网纹溞(*Ceriodaphnia cornuta*)、象鼻溞(*Bosmina* sp.)、微型裸腹溞(*Moina micrura*)等组成; 桡足类主要由近邻剑水蚤(*Cyclops vicinus*)、广布中剑水蚤(*Mesocyclops leuckarti*)、中华窄腹剑水蚤(*Limnithona sinensis*)和汤匙华哲水蚤(*Sinocalanus dorrii*)等组成。多数种类都只是季节性出现, 只有象鼻溞、广布中剑水蚤、汤匙华哲水蚤、指状许水蚤和猛水蚤(*Canthocamptus* sp.)等在各月的样品中都出现。有些种类只是偶尔出现, 数量极少, 如中华咸水剑水蚤(*Halicyclops sinensis*)、基合溞(*Bosminopsis* sp.)、圆形盘肠溞(*Chydorus sphaericus*)和大尾溞(*Leydigia* sp.)等。

总的来看, 围栏内外浮游甲壳动物的生物量有所差异(图 2)。围栏外总的浮游甲壳动物的生物量显著高于围栏内($P < 0.05$)。围栏内外的年平均总生物量分别为 1.83 和 2.39 mg · L⁻¹。围栏外总枝角类的周年平均生物量为 1.86 mg · L⁻¹, 显著高于围栏内的 1.26 mg · L⁻¹ ($P < 0.05$)。浮游甲壳动物的生物量大部分由枝角类贡献, 围栏内外浮游甲壳动物总

表 2 梅梁湾浮游甲壳动物种类的季节分布

Table 2 Seasonal occurrence of crustacean zooplankton species in Meiliang Bay

种类 Species	月份 Month											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
近邻剑水蚤 <i>Cyclops vicinus</i>	+	+	+	+	+							+
中华窄腹剑水蚤 <i>Limnithona sinensis</i>			+		+	+	+	+	+	+	+	+
广布中剑水蚤 <i>Mesocyclops leuckarti</i>	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	
小剑水蚤 <i>Microcyclops</i> sp.			+	+	+							
中华咸水剑水蚤 <i>Halicyclops sinensis</i>						+						
汤匙华哲水蚤 <i>Sinocalanus dorrii</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
指状许水蚤 <i>Schmackeria inopinus</i>	+	+		+	+	+	+		+	+	+	+
猛水蚤 <i>Canthocamptus</i> sp.	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	
象鼻溞 <i>Bosmina</i> sp.	+		+		+	+	+	+	+	+	+	+
基合溞 <i>Bosminopsis</i> sp.								+	+	+		
角突网纹溞 <i>Ceriodaphnia cornuta</i>						+	+	+	+	+	+	
长刺溞 <i>Daphnia longispina</i>	+	+	+	+	+							
透明溞 <i>D. hyalina</i>	+	+	+	+	+	+						
蚤状溞 <i>D. pulex</i>	+	+	+	+	+							
僧帽溞 <i>D. cucullata</i>				+	+	+	+					
微型裸腹溞 <i>Moina micrura</i>			+		+	+	+	+	+	+	+	
直额裸腹溞 <i>M. rectirostris</i>				+	+	+						
短尾秀体溞 <i>Diaphanasoma brachyurum</i>					+	+	+	+	+	+	+	
长肢秀体溞 <i>D. leuchtenbergianum</i>							+			+		
方形尖额溞 <i>Alona quadrangularis</i>		+			+		+	+	+	+		
圆形盘肠溞 <i>Chydorus sphaericus</i>		+	+								+	+
大尾溞 <i>Leydigia</i> sp.						+						

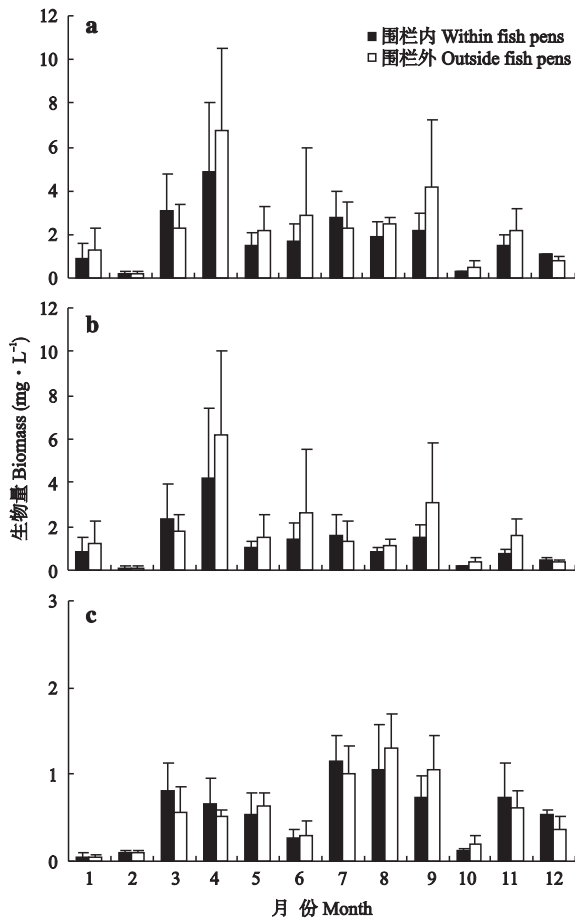


图2 围栏内外浮游甲壳动物生物量的季节变化

Fig.2 Seasonal variations of biomass of crustacean zooplankton within and outside fish pens.

a) 总浮游甲壳动物 Total crustacean zooplankton; b) 枝角类 Cladocerans; c) 桡足类 Copepods.

生物量和枝角类的生物量的季节变化动态基本一致: 在春季时浮游甲壳动物的总生物量最大, 冬季较小. 围栏内外枝角类最大生物量均发生在4月, 分别为 4.87 和 $6.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 最小生物量发生在2月, 分别为 0.21 和 $0.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 浮游动物在各采样点的分布不均匀, 导致平均值的标准误差很大. 桡足类的生物量7、8、9月较高, 1、2月最低. 围栏内外桡足类年平均生物量分别为 0.57 和 $0.53 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 差异不显著($P = 0.513$).

2.3 围栏内外浮游甲壳动物优势种的季节动态

枝角类的种类季节更替现象明显, 几个主要种类都只是季节性出现, 在有些月份则完全消失(图3). 象鼻溞是围栏水域的第一优势种群, 全年都有分布, 1—4月象鼻溞的密度最小, 生物量接近零, 随着温度的升高其生物量逐渐上升, 围栏内在9月达到最大生物量($1.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 围栏外最大生物量发生在6月($2.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 围栏内外象鼻溞的周

年平均生物量分别为 0.45 和 $0.69 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 差异接近显著($P = 0.079$). 溞属只在冬季和春季出现, 是春季水体的绝对优势种群, 可以形成很高的生物量(5月围栏内生物量达到最高, 为 $5.35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 该属的种类在6月以后迅速消失. 围栏内的周年平均生物量为 $0.64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 低于围栏外的 $0.80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 但围栏内外各月生物量没有呈现出显著差异($P = 0.392$). 角突网纹溞也是一个典型的季节性出现种, 在夏季和秋季有较高的密度, 生物量最大值发生在9月(围栏内为 $0.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 围栏外为 $1.07 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 冬季生物量很小, 春季只发现零星几个个体. 角突网纹溞的年平均生物量在围栏内外分别为 0.10 和 $0.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 围栏内外差异不显著($P = 0.196$). 微型裸腹溞的生物量在5月达到最大(围栏内为 $0.35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 围栏外为 $0.57 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 而在冬季样品中没有发现, 其在围栏内外年平均生物量分别为 0.05 和 $0.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 差异不显著($P = 0.160$).

中华窄腹剑水蚤和近邻剑水蚤呈明显的季节性分布(图4). 中华窄腹剑水蚤在2月和4月的样品中没有被检出, 该种在6月以后成为水体的优势种, 7月密度达到最大(围栏内为 $197 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$, 围栏外为 $152 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$). 但是由于该种个体很小(平均体长仅为 0.45 mm), 7月围栏内外的最大生物量仅分别为 0.71 和 $0.66 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 围栏内外年平均生物量分别为 0.14 和 $0.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 差异不显著($P = 0.180$). 近邻剑水蚤的个体非常大(平均体长为 1.44 mm), 且只在冬季和早春大量出现, 3月达到最大生物量(围栏内为 $0.59 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 围栏外为 $0.47 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 在夏季和秋季近邻剑水蚤几近消失. 围栏内外年平均生物量分别为 0.09 和 $0.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 差异不显著($P = 0.333$). 广布中剑水蚤和汤匙华哲水蚤在水体大多数月份都有分布, 但生物量较小(图4). 广布中剑水蚤在7月生物量最大(围栏内为 $0.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 围栏外为 $0.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 围栏内外年平均生物量分别为 0.02 和 $0.017 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 差异不显著($P = 0.578$). 汤匙华哲水蚤在春、秋分布较多, 冬、夏较少, 在2月密度最小, 几乎不能检出. 围栏内最大生物量出现在11月($0.48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 围栏外最大生物量出现在5月($0.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 围栏内外汤匙华哲水蚤的年平均生物量分别为 0.15 和 $0.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 大多数月份围栏内的平均生物量大于围栏外, 但一般差异不显著.

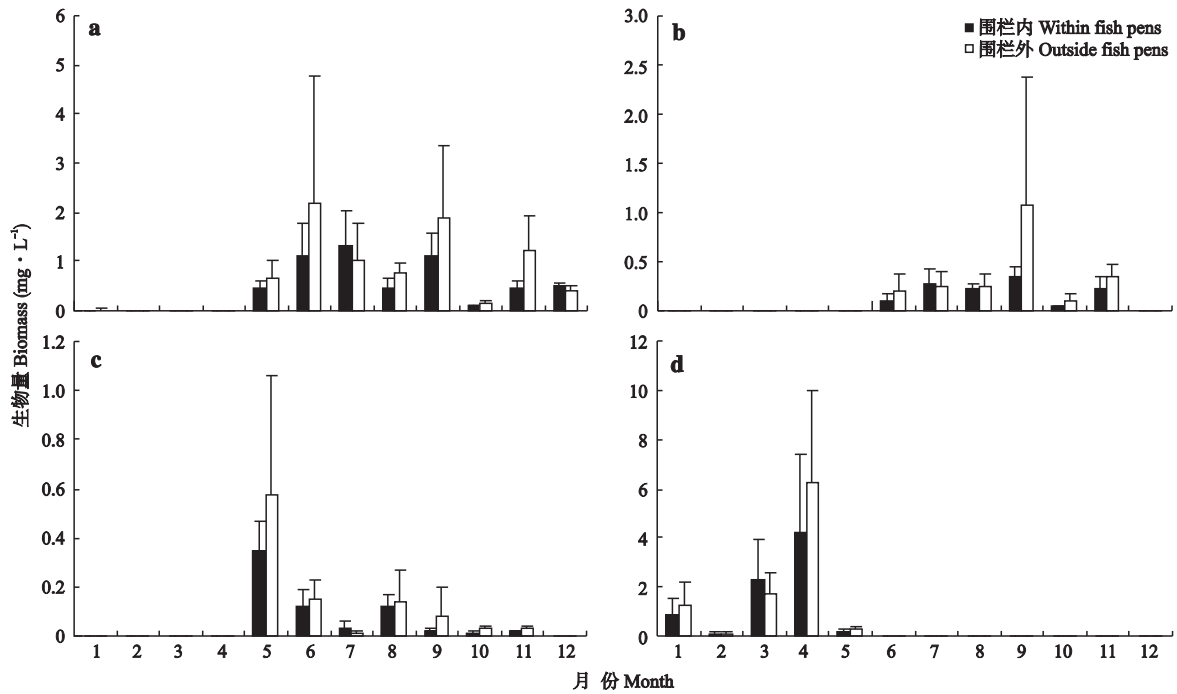


图3 围栏内外枝角类优势种生物量的季节变化

Fig.3 Seasonal variations of biomass of dominant cladoceran species within and outside fish pens.

a) 象鼻溞 *Bosmina* sp.; b) 角突网纹溞 *Ceriodaphnia cornuta*; c) 微型裸腹溞 *Monia micrura*; d) 溞 *Daphnia*.

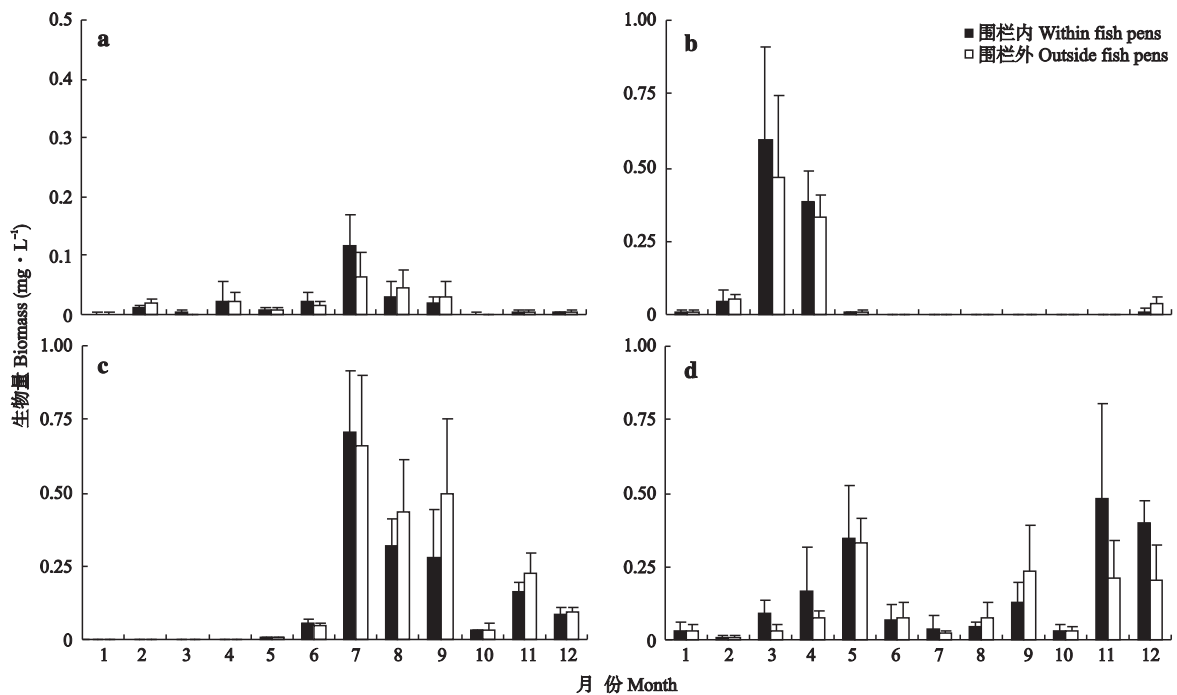


图4 围栏内外桡足类优势种生物量的季节变化

Fig.4 Seasonal variations of biomass of dominant copepod species within and outside fish pens.

a) 广布中剑水蚤 *Mesocyclops leuckarti*; b) 近邻剑水蚤 *Cyclops vicinus*; c) 中华窄腹剑水蚤 *Limnithona sinensis*; d) 汤匙华哲水蚤 *Sinocalanus dorrii*.

2.4 围栏内外浮游甲壳动物季节动态与理化因子的关系

从围栏内外浮游甲壳动物生物量的季节变化来

看, 围栏内外的浮游甲壳动物季节演替趋势没有差异. 综合采用围栏内外所有站点时间系列的数据分析浮游甲壳动物的季节演替与环境因子的关系. 典

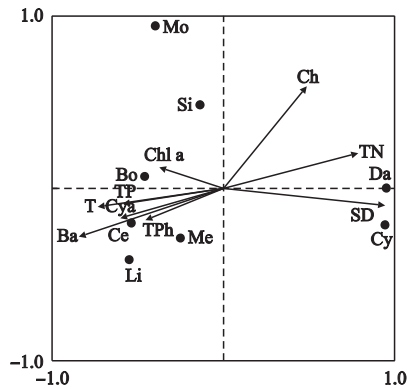


图5 浮游甲壳动物优势种与理化因子和藻类生物量的CCA排序图

Fig. 5 CCA ordination plot on dominant species of crustacean zooplankton with environmental variables.

Bo: 象鼻溞 *Bosmina* sp.; Ce: 角突网纹溞 *Ceriodaphnia cornuta*; Mo: 微型裸腹溞 *Moina micrura*; Da: 溞 *Daphnia* sp.; Me: 广布中剑水蚤 *Mesocyclops leuckarti*; Cy: 近邻剑水蚤 *Cyclops vicinus*; Li: 中华窄腹剑水蚤 *Limnithona sinensis*; Si: 汤匙华哲水蚤 *Sinocalanus dorrii*; T: 温度 Temperature; SD: 透明度 Transparency; TP: 总磷 Total phosphorus; TN: 总氮 Total nitrogen; TPh: 总浮游植物 Total phytoplankton; Chl a: 叶绿素 a Chlorophyll a; Cya: 蓝藻 Cyanobacteria; Ch: 绿藻 Chlorophyta; Ba: 硅藻 Bacillariophyta.

范对应分析(CCA)结果表明,显著影响浮游甲壳动物季节演替的因子依次为透明度、绿藻生物量、浮游植物总生物量、温度和蓝藻生物量,这5个因子累计对浮游甲壳动物优势种生物量季节变异的解释度达到78%。从CCA排序图(图5)上可以看出,根据与环境因子的关系大致可以将浮游甲壳动物优势种分为3组:溞属和近邻剑水蚤一般在低温、高透明度、高总氮和绿藻生物量高的环境下占优势;象鼻溞、角突网纹溞、中华窄腹剑水蚤和广布中剑水蚤等则喜欢在高温、高叶绿素a、高总磷、硅藻和蓝藻生物量高的环境下出现;而微小裸腹溞和汤匙华哲水蚤则喜欢比较适中的生存环境。

3 讨论

3.1 鲢、鳙放养对围栏内外浮游甲壳动物群落结构的影响

由于围栏是个开放的系统,围栏内外的水体有自由交换能力,水流的频繁交换掩盖了鱼类对水质和浮游生物群落结构的影响。研究结果显示,围栏内外的环境因子和浮游植物的生物量一般都没有达到显著性差异。但是,围栏内浮游甲壳动物的总生物量和枝角类的生物量还是显著低于围栏外,表明围栏内圈养的鱼类对浮游动物形成了强大的摄食压力。泵吸式滤食性鱼类捕食浮游动物的选择性主要与浮游动物的种类和个体的逃避能力有关^[6,14-15]。一般

认为,滤食性鱼类的放养会显著降低浮游动物的生物量,促使水体浮游动物的群落向小体型、逃跑能力更强的方向发展^[6-7,15]。研究结果显示,鲢、鳙的滤食对总枝角类和象鼻溞的影响最大,围栏内外达到或接近显著差异。这应该与枝角类的逃逸能力比桡足类低,被鱼类捕食的可能性更大有关^[14,16]。Cook等^[17]的围隔试验也表明,在鳙鱼存在的围隔中浮游动物很快由溞类优势转向桡足类优势。

有些研究认为,鲢、鳙的摄食造成了浮游动物现存量的降低,从而减少了浮游植物被浮游动物摄食的压力,会造成小型浮游植物生物量的上升,对水质的净化反而起到不利的作用^[18]。在太湖梅梁湾水域,大型溞属种类在水华暴发前的6月就消失了,蓝藻水华暴发时期水体浮游甲壳动物主要由小型种类组成,如象鼻溞(0.23~0.7 mm)、角突网纹溞(0.2~0.45 mm)和窄腹中剑水蚤(0.35~0.55 mm)。而这些小型的浮游甲壳动物往往不能有效摄食微囊藻水华^[19-21],但其生物量的减少并不会使蓝藻从摄食压力下释放出来而促进蓝藻水华的发展。另一方面,控藻围栏的面积相对于梅梁湾来说是很小的,Smith^[22]的围隔试验结果显示,将鲢、鳙圈养在一定的水域,其余水域则可以作为浮游动物的避难所,从而使鱼类摄食对整个浮游动物造成的负面影响微乎其微,不会减小水华暴发期间浮游动物对微囊藻水华的摄食压力。

3.2 太湖浮游甲壳动物的季节变化规律

围栏内外浮游甲壳动物的季节变化动态一致,鲢、鳙的放养并没有导致围栏内外群落结构及季节演替出现差异。CCA分析结果显示,围栏养殖区的浮游甲壳动物种类的季节变化主要受透明度、温度和浮游植物生物量的影响。很多研究表明,温度是左右浮游甲壳动物数量变动和分布的重要影响因素^[23-24]。陈伟民等^[23]对太湖梅梁湾冬末春初的浮游动物变化研究也指出,温度是该湖区浮游甲壳动物季节演替的主要影响因素之一。另外,食物的丰度和质量也会对浮游甲壳动物的群落结构产生较大的影响^[9,24]。Ke等^[11]的研究发现,微囊藻水华的出现对春末夏初太湖梅梁湾浮游生物的季节演替起了关键性的作用。在本研究中,大型溞属的生物量与蓝藻生物量呈显著的负相关,小型的浮游甲壳动物(如象鼻溞、角突网纹溞、中华窄腹剑水蚤)却随着蓝藻密度的增加逐渐达到峰值。许多研究已经证实,大型浮游甲壳动物受蓝藻水华的影响更明显,而小型浮游甲壳动物由于对蓝藻水华有更强的适应能力,所

以在水华暴发的夏季成为优势^[25]。

参考文献

- [1] Sun S-C (孙顺才), Huang Y-P (黄漪平). Lake Taihu. Beijing: Ocean Press, 1993 (in Chinese)
- [2] Qin B-Q (秦伯强), Wu Q-L (吴庆龙), Gao J-F (高俊峰), et al. Water environmental issues in Taihu Lake of China: Problems, causes and management. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2002, **17**(2): 221–228 (in Chinese)
- [3] Qin B-Q (秦伯强), Hu W-P (胡维平), Liu Z-W (刘正文), et al. Ecological engineering experiment on water purification in drinking water source in Meiliang Bay, Lake Taihu. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2007, **27**(1): 5–12 (in Chinese)
- [4] Xie P (谢平). Silver Carp and Bighead Carp, and Their Use in the Control of Algal Blooms. Beijing: Science Press, 2003 (in Chinese)
- [5] Yang YF, Huang XF, Liu JK. Long-term changes in crustacean zooplankton and water quality in a shallow, eutrophic Chinese lake densely stocked with fish. *Hydrobiologia*, 1999, **391**: 195–203
- [6] Lu M, Xie P, Tang HJ, 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. *Hydrobiologia*, 2002, **487**: 19–31
- [7] Yang Y-F (杨宇峰), Huang X-F (黄祥飞). The influence of silver carp and bighead on the zooplankton community structure. *Journal of Lake Sciences* (湖泊科学), 1992, **4**(3): 78–86 (in Chinese)
- [8] Yang Y-F (杨宇峰), Huang X-F (黄祥飞). Structure of zooplankton community in Donghu Lake of Wuhan. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 1994, **5**(3): 319–324 (in Chinese)
- [9] Sommer U, Gliwicz MZ, Lampert W, et al. The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters. *Archiv für Hydrobiologie*, 1986, **106**: 433–471
- [10] Lampert W, Fleckner W, Rai H, et al. Phytoplankton control by grazing zooplankton: A study on the spring clear-water phase. *Limnology and Oceanography*, 1986, **31**: 478–490
- [11] Ke ZX, Xie P, Guo LG. Controlling factors of spring-summer phytoplankton succession in Lake Taihu (Meiliang Bay, China). *Hydrobiologia*, 2008, **607**: 41–49
- [12] Zhang Z-S (章宗涉), Huang X-F (黄祥飞). Study Methods on Freshwater Plankton. Beijing: Science Press, 1991 (in Chinese)
- [13] Editorial Board of Analysis Method of Water and Waste Water (水和废水监测分析方法编委会). Analysis Method of Water and Waste Water. 4th Ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002 (in Chinese)
- [14] Lazzaro X, Drenner RW, Stein RA, et al. Planktivores and plankton dynamics: Effects of fish biomass and planktivore type. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1992, **49**: 1466–1473
- [15] Dong SL, Li DS. Comparative studies on the feeding selectivity of silver carp *Hypophthalmichthys molitrix* and bighead carp *Aristichthys nobilis*. *Journal of Fish Biology*, 1994, **44**: 621–626
- [16] Zhao W (赵文), Dong S-L (董双林), Zhang Z-Q (张兆琪), et al. Effect of silver carp stocking and fertilization on plankton community in enclosure in saline-alkaline ponds. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2001, **12**(2): 299–303 (in Chinese)
- [17] Cooke SL, Hill WR, Meyer KP. Feeding at different plankton densities alters invasive bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*) growth and zooplankton species composition. *Hydrobiologia*, 2009, **625**: 185–193
- [18] Hambright KD, Blumenshine SC, Shapiro J. Can filter-feeding fishes improve water quality in lakes? *Freshwater Biology*, 2002, **47**: 1173–1182
- [19] Crisman TL, Reaver IR. Applicability of planktonic bio-manipulation: For managing eutrophication in the subtropics. *Hydrobiologia*, 1990, **200/201**: 177–185
- [20] Xie P, Liu JC. Practical success of biomanipulation using filter-feeding fish to control cyanobacteria blooms. *The Scientific World Journal*, 2001, **1**: 337–356
- [21] Radke RJ, Kahl U. Effects of a filter-feeding fish [silver carp, *Hypophthalmichthys molitrix* (Val.)] on phyto- and zooplankton in a mesotrophic reservoir: Results from an enclosure experiment. *Freshwater Biology*, 2002, **47**: 2337–2344
- [22] Smith DW. Biological control of excessive phytoplankton growth and the enhancement of aquaculture production. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1985, **42**: 1940–1945
- [23] Chen W-M (陈伟民), Qin B-Q (秦伯强). The zooplankton distribution during winter and early spring and its environmental effects in Meiliang Bay, Taihu Lake. *Journal of Lake Science* (湖泊科学), 1998, **10**(4): 10–16 (in Chinese)
- [24] Xie P, Toshio I, Koichi F. Effect of available food and temperature on the growth and reproduction of *Daphnia rosea*. *Journal of Freshwater Ecology*, 2000, **15**: 379–388
- [25] Guo NC, Xie P. Development of tolerance against toxic *Microcystis aeruginosa* in three cladocerans and the ecological implications. *Environmental Pollution*, 2006, **143**: 513–518

作者简介 柯志新 男, 1976年生, 副研究员. 主要从事水域生态学研究. E-mail: kzx@scsio.ac.cn

责任编辑 肖红