

武汉三角湖浮游甲壳动物群落结构

陈星 熊飞* 刘红艳 张繁荣

江汉大学生命科学学院 武汉 430056

摘要: 三角湖是长江中下游地区典型的小型城市湖泊,近年来其富营养化趋势明显。2014年7月至2015年6月对湖中浮游甲壳动物群落及其影响因子进行了调查,旨在为湖泊污染防治和生态修复提供依据。在三角湖共采集浮游甲壳动物9科17属22种。浮游甲壳动物全年平均密度为 (3.7 ± 3.6) ind/L,各月密度变化范围为0.6 ~ 13.1 ind/L,夏季和秋季密度较低,密度峰值出现在2月。浮游甲壳动物全年大部分时间(5、6月除外)以桡足类及无节幼体占优势,其比例为55.2% ~ 95.4%。浮游甲壳动物物种丰富度变化范围为6 ~ 15,平均值为 10 ± 3 ,夏季浮游甲壳动物物种丰富度较低。浮游甲壳动物群落Simpson指数变化范围为0.76 ~ 0.90,平均值为 0.80 ± 0.04 。Pearson相关分析表明,浮游甲壳动物总密度与水深呈显著负相关($r = -0.636$, $P < 0.05$, $n = 11$),显示季节性的水位波动影响浮游甲壳动物密度。典范对应分析(CCA)显示,水温和透明度是影响浮游甲壳动物物种组成季节变化的主要环境因子($P < 0.05$)。高密度的鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙(*Aristichthys nobilis*)放养引起的摄食压力可能是三角湖浮游甲壳动物密度较低的主要原因之一。

关键词: 枝角类; 桡足类; 多样性; 季节变化; 典范对应分析(CCA)

中图分类号: Q958.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0250-3263(2017)05-824-11

Community Structure of Planktonic Crustacean in Sanjiao Lake, Wuhan, China

CHEN Xing XIONG Fei* LIU Hong-Yan ZHANG Fan-Rong

School of Life Sciences, Jianghan University, Wuhan 430056, China

Abstract: Sanjiao Lake is a representative small urban lake in the middle and upper reaches of the Yangtze River. Eutrophication has become a problem for this lake recent years. In order to understand the seasonal community structure of planktonic crustacean and environmental variables, we made a monthly survey in Sanjiao Lake from July 2014 to June 2015 (Fig. 1) to provide a basis for managing eutrophication and providing supports for the ecological restoration efforts. We got the following data: water temperature varied seasonally 10°C in winter and 28°C in summer; sechi disk depth 0.27 to 0.72 m; total nitrogen and total

基金项目 国家自然科学基金项目 (No. 40901037), 武汉市市属高校教研课题 (No. 2014007), 江汉大学学生科研项目 (No. 2015zd81);

* 通讯作者, E-mail: xf9603@163.com;

第一作者介绍 陈星, 男, 硕士研究生; 研究方向: 浮游动物生态学; E-mail: chenxing@ihb.ac.cn.

收稿日期: 2016-12-13, 修回日期: 2017-03-15 DOI: 10.13859/j.cjz.201705011

phosphorous 1.50 to 3.34 and from 0.07 to 0.58, respectively (Table 1). We identified a total of 22 species, belonging to 17 genera and 9 families of planktonic crustacean from the seasonal samples. The community included 13 species in Cladocera and 9 species in Copepoda (Table 2). The species composition showed a light similarity between summer and autumn or winter with Jaccard index ranging from 0.45 to 0.50, and a medium similarity among other seasons with Jaccard index ranging from 0.60 to 0.72 (Table 3). The density of planktonic crustacean ranged from 0.6 to 13.1 ind/L with an average density of 3.7 ± 3.6 ind/L. The lower density occurred in summer and autumn, while the peak was in February. Copepoda and nauplii dominated the community in most months except May and June, accounting for 55.2% - 95.4% of the total density (Fig. 2). The dominant species were *Cyclops vicinus*, *Microcyclops leuckarti*, *Moina irrasa*, *Microcyclops varicicans*, *M. rectirostris*, *Diaphanosoma leuchtenbergianum* and *Bosmina longirostris* (Fig. 3). Species richness of planktonic crustacean ranged from 6 to 15, with an average of 10 ± 3 . Higher species richness occurred from late autumn to spring, while the lower value occurred in summer. Simpson index of the community ranged from 0.76 to 0.90, with an average of 0.80 ± 0.04 (Fig. 4). Pearson correlation analysis showed that the total density of planktonic crustacean had a significantly negative relationship with the water depth ($r = -0.636$, $P < 0.05$, $n = 11$), reflecting that seasonal fluctuation of water level affect the density of planktonic crustacean. Canonical correspondence analysis (CCA) indicated that water temperature and sechi disk depth were the key factors affecting the seasonal variation of species composition of planktonic crustacean ($P < 0.05$, Fig. 5). It is inferred that predator pressure from the intensive aquaculture for Silver Carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) and Bighead Carp (*Aristichthys nobilis*) was likely responsible for the low density of planktonic crustacean community in Sanjiao Lake.

Key words: Cladocera; Copepoda; Diversity; Seasonal variation; Canonical correspondence analysis (CCA)

富营养化是长江中下游浅水湖泊面临的主要环境问题之一,特别是城市湖泊,随着城市的快速发展,富营养化趋势日益加剧(Qin et al. 2013)。城市湖泊生物群落与环境因子和人类活动的关系是湖泊研究者和管理者关注的热点(杨程等 2014)。浮游甲壳动物以藻类等为食,同时又是许多经济鱼类的主要捕食对象,处于湖泊食物链的中间环节,是湖泊生物群落的一个重要类群(薛俊增等 2009)。环境的改变和人类活动的干扰将影响浮游甲壳动物群落结构和多样性。湖泊富营养化将直接导致浮游甲壳动物优势种的转变(Lazareva 2010, 郭匿春等 2013),也可以通过影响藻类群落进而影响以藻类为食的浮游动物的群落结构和丰度(王颖等 2014)。水产养殖造成的捕食压力将会影响浮游甲壳动物群落的种类组成、丰度和多样性(Ban et al. 2013)。研究表明,温度、营养盐、食物

可得性及捕食压力等是影响浮游甲壳动物群落的主要因子,各因子的相对作用大小因湖泊环境和人类活动干扰不同而异(王松波等 2011)。

三角湖位于湖北省武汉经济技术开发区,是长江中下游地区典型的小型城市湖泊,近年来其富营养化趋势明显。2007年以前,三角湖还有茨藻等沉水植物分布(董元火等 2008),而2011年的调查显示其沉水植物已消失(鲁敏等 2014),生态退化明显。目前,三角湖每年投放大量的鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙(*Aristichthys nobilis*)等鱼种,是一个典型的水产养殖型湖泊。在富营养化和水产养殖的双重影响下,三角湖湖泊生态健康和生物多样性现状令人担忧。2014~2015年调查了三角湖浮游甲壳动物群落及其影响因子,旨在为湖泊污染防治和生态修复提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域和样点设置

三角湖面积约 2.45 km²。该区域属亚热带湿润季风气候, 年均气温 16.5℃, 1 月平均气温最低, 约 0.4℃, 7~8 月气温最高, 约 28.1℃; 年均降水量 1 179.4 mm, 其中 5 月降雨最多(李海燕等 2010)。2014 年 7 月至 2015 年 6 月每月月中旬对三角湖浮游甲壳动物群落和环境因子进行采样分析。其中, 9 月因故未进行采样。根据湖区特征, 全湖共设置 10 个采样点, 其中, S1~S5 位于敞水区, S6~S10 位于沿岸区(图 1)。

1.2 样品采集与分析

浮游甲壳动物定性样品用 25 号浮游生物网采集, 用 4% 甲醛溶液固定。定量样品用 2.5 L 有机玻璃采水器采集水面下 0.5 m 处水样 4 次, 共计 10 L 水样, 用 13 号浮游生物网过滤, 装入 50 ml 离心管, 加 4% 甲醛溶液固定。样品带回实验室后, 经 48 h 静置后用吸管小心吸取上清液, 将样品定容至 30 ml 待用。镜检时, 将样品摇匀, 每次取 1 ml 样品放入计数框内, 在显微镜、解剖镜下进行鉴定和计数。样

品鉴定主要参考《中国动物志 节肢动物门 甲壳纲 淡水枝角类》(蒋燮治等 1979) 和《中国动物志淡水桡足类 节肢动物门 甲壳纲 淡水桡足类》(中国科学院动物研究所甲壳动物研究组 1979)。

对各样点水体理化因子进行同步调查。水深 (depth) 用手持声纳测深仪 (Speedtech, SM-5) 测量, 水体透明度 (sechi disk depth, SD) 用赛氏盘 (北京普利特, SD20) 测量, 水温 (water temperature, WT)、电导率 (conductivity, Cond) 和氧化还原电位 (oxidation-reduction potential, ORP) 用 SX751 型便携式多参数水质仪 (上海三信) 进行现场测量。用 2.5 L 有机玻璃柱状采水器采集水面下 0.5 m 处湖水, 取 1 L 水样用于分析水质参数, 水样采集后立即送回实验室冷藏保存, 在 24 h 内完成分析。水质分析指标包括总氮 (total nitrogen, TN)、氨氮 (ammonia nitrogen, NH₄⁺)、硝氮 (nitrate nitrogen, NO₃⁻)、总磷 (total phosphorous, TP)、磷酸盐 (phosphate, PO₄³⁻) 和叶绿素 a (chlorophyll a, Chl.a)。总氮采用碱性过硫酸钾法, 氨氮采用纳氏比色法, 硝氮

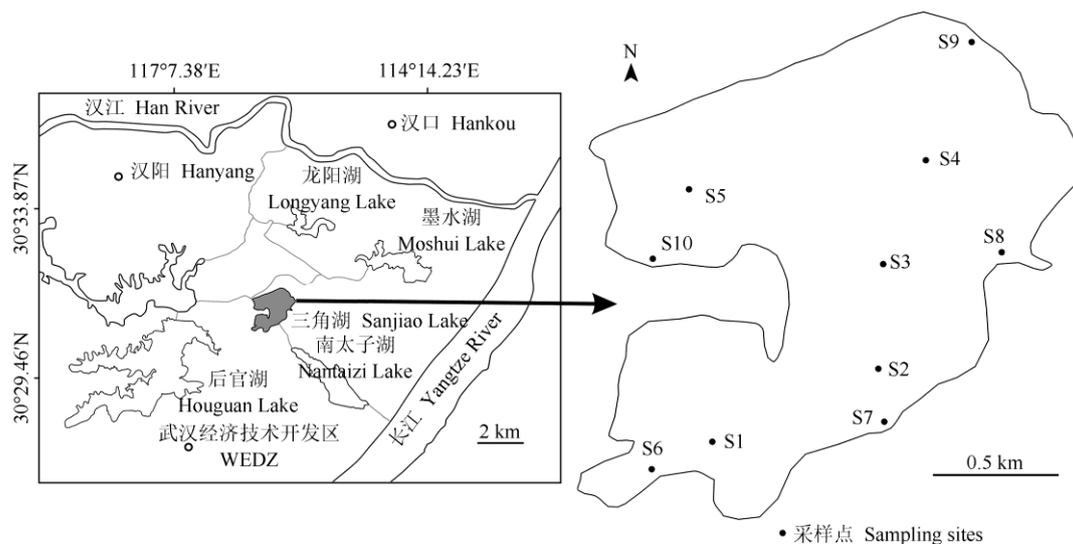


图 1 三角湖的位置及采样点分布

Fig. 1 Location of Sanjiao Lake and sampling sites

采用氨基磺酸紫外分光法, 总磷采用过硫酸钾消解钼锑抗比色法, 磷酸盐采用过硫酸钾消解法, 叶绿素 a 采用丙酮萃取, 具体分析方法参考《水和废水监测分析方法 (第四版)》(国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会 2002)。

1.3 群落分析

用物种优势度 (Y) 来确定优势种, 将 $Y > 0.02$ 的种类定为优势种 (徐兆礼等 1989), 计算公式为: $Y = N_i / N \times f_i$, 式中, N_i 为物种 i 的密度, N 为浮游甲壳动物总密度, f_i 为物种 i 的出现频率。

采用 Jaccard 种类相似性指数 (X) 分析浮游甲壳动物群落物种组成的季节差异: $X = c / (a + b - c)$, 式中, a 、 b 分别为不同季节的物种数, c 为两个季节共有的物种数。 $X = 0$ 表示完全不相似, $X = 1$ 表示完全相似, $0.01 \sim 0.25$ 为极度不相似, $0.26 \sim 0.50$ 为轻度相似, $0.51 \sim 0.75$ 为中度相似, $0.76 \sim 0.99$ 为极相似 (陈家长等 2009)。3 ~ 5 月代表春季, 6 ~ 8 月代表夏季, 9 ~ 11 月代表秋季, 12 月至次年 2 月代表冬季。

采用物种丰富度 (S) 和 Simpson 指数 (P)

(Magurran 2004) 分析群落多样性。物种丰富度即为群落内的物种数, Simpson 指数综合了群落的物种丰富度和均匀度信息, 值越大, 表示群落的多样性越高。计算公式如下: $P = 1 / \sum (n_i / N)^2$, 式中, N 为浮游甲壳动物的总密度, n_i 为第 i 种的密度。

采用 Pearson 相关系数分析浮游甲壳动物密度季节动态与环境因子的关系, 分析采用 SPSS 软件。采用约束排序分析中的典范对应分析 (canonical correspondence analysis, CCA) 探讨浮游甲壳动物物种组成季节动态与环境因子的关系 (Leps et al. 2003)。通过逐步选择 (forward selection) 和蒙得卡罗筛选检验法筛选有效的环境因子组合对物种数据进行解释。分析采用 CANOCO4.5 软件。

2 结果分析

2.1 环境因子

2014 ~ 2015 年三角湖水体理化指标见表 1。三角湖具有明显的水位波动, 水深变化范围为 0.82 ~ 1.34 m, 夏、秋季较深, 冬季较浅。透明度变化范围为 0.27 ~ 0.72 m, 冬季和春季 (12 月至次年 4 月) 透明度较高, 夏、秋季透

表 1 三角湖的水体理化指标

Table 1 Physical-chemical parameters in Sanjiao Lake

| 指标 Parameter | 月份 Month | | | | | | | | | | | |
|--|----------|------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|--|
| | 7 | 8 | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
| 水深 Depth (m) | 0.94 | 1.39 | 1.34 | 1.06 | 1.14 | 0.90 | 0.82 | 0.98 | 1.23 | 0.86 | 1.04 | |
| 透明度 Secchi disk depth (m) | 0.33 | 0.29 | 0.29 | 0.27 | 0.72 | 0.53 | 0.35 | 0.42 | 0.57 | 0.25 | 0.27 | |
| 水温 Water temperature (°C) | 27.5 | 27.8 | 20.4 | 15.5 | 10.0 | 10.3 | 11.5 | 14.3 | 15.9 | 27.6 | 28.9 | |
| 氧化还原电位 (mV) Oxidation-reduction potential | 193 | 113 | 119 | 100 | 175 | 133 | 160 | 107 | 113 | 200 | 120 | |
| 电导率 Conductivity (µs/cm) | 551 | 535 | 456 | 412 | 345 | 355 | 375 | 371 | 363 | 420 | 421 | |
| 总氮 Total nitrogen (mg/L) | 2.46 | 2.42 | 1.50 | 2.91 | 3.07 | 2.78 | 3.26 | 3.29 | 3.34 | 2.42 | 2.70 | |
| 氨氮 Ammonia nitrogen (mg/L) | 1.26 | 0.55 | 0.32 | 0.67 | 0.68 | 0.97 | 1.22 | 1.23 | 1.28 | 0.71 | 0.95 | |
| 硝氮 Nitrate nitrogen (mg/L) | 0.26 | 0.48 | 0.40 | 0.55 | 0.79 | 0.65 | 0.75 | 0.89 | 0.46 | 0.29 | 0.29 | |
| 总磷 Total phosphorous (mg/L) | 0.58 | 0.34 | 0.34 | 0.24 | 0.22 | 0.15 | 0.33 | 0.11 | 0.07 | 0.38 | 0.28 | |
| 磷酸盐 Phosphate (mg/L) | 0.28 | 0.11 | 0.04 | 0.04 | 0.05 | 0.05 | 0.11 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | |
| 叶绿素 a Chlorophyll a (µg/L) | 81.4 | 96.0 | 156.7 | 87.1 | 55.6 | 40.0 | 66.6 | 69.7 | 64.0 | 214.6 | 145.4 | |

明度较低。水温季节变化明显，冬季水温较低，约 10℃，夏季温度较高，约 28℃。水体总氮的变化范围为 1.50 ~ 3.34 mg/L，最低值出现在 10 月，最高值出现在 4 月，总磷变化范围为 0.07 ~ 0.58 mg/L，最低值出现在 4 月，最高值出现在 7 月。叶绿素 a 的变化范围为 40.0 ~ 214.6 μg/L，最低值出现在 1 月，最高值出现在 5 月。

2.2 种类组成

2014 年 7 月至 2015 年 6 月在三角湖共采集到浮游甲壳动物 9 科 17 属 22 种，其中枝角类 13 种，桡足类 9 种（表 2）。不同季节采集到的种类数差别不大，分别为夏季 14 种，秋季 16 种，冬季 15 种，春季 17 种。其中短尾秀体溞（*Diaphanosoma brachyurum*）、僧帽溞（*Daphnia cucullata*）、发头裸腹溞（*Moina*

irrasa）、长额象鼻溞（*Bosmina longirostris*）、模式有爪猛水蚤（*Onychocamptus mohammed*）、近邻剑水蚤（*Cyclops vicinus*）和广布中剑水蚤（*Mesocyclops leuckarti*）在 4 个季节均采集到。双棘伪仙达溞（*Pseudosida bidentata*）、蚤状溞（*Daphnia pulex*）、矩形尖额溞（*Alona rectangula*）和四刺窄腹剑水蚤（*Limnoithona tetraspina*）等只在某个季节出现。夏季和秋季，夏季和冬季浮游甲壳动物种类相似性指数较低（0.45, 0.50），其群落为轻度相似；其他季节之间种类相似性指数范围为 0.60 ~ 0.72，群落为中度相似（表 3）。

2.3 密度

三角湖浮游甲壳动物各月份的密度变化范围为 0.6 ~ 13.1 ind/L，全年平均密度为（3.7 ±

表 2 三角湖浮游甲壳动物种类组成

Table 2 Species list of planktonic crustaceans in Sanjiao Lake

| 科 Family | 种 Species | 夏 Summer | 秋 Autumn | 冬 Winter | 春 Spring |
|---------------------|---|----------|----------|----------|----------|
| 薄皮溞科 Leptodoridae | 透明薄皮溞 <i>Leptodora kindti</i> | + | | | + |
| 仙达溞科 Sididae | 短尾秀体溞 <i>Diaphanosoma brachyurum</i> | + | + | + | + |
| | 长肢秀体溞 <i>D. leuchtenbergianum</i> | | + | + | + |
| | 双棘伪仙达溞 <i>Pseudosida bidentata</i> | + | | | |
| 溞科 Daphnidae | 僧帽溞 <i>Daphnia cucullata</i> | + | + | + | + |
| | 同形溞 <i>D. similis</i> | + | | + | + |
| | 蚤状溞 <i>D. pulex</i> | | + | | |
| 盘肠溞科 Chydoridae | 直额裸腹溞 <i>Moina rectirostris</i> | + | + | | + |
| | 发头裸腹溞 <i>M. irrasa</i> | + | + | + | + |
| | 光滑平直溞 <i>Pleuroxus laevis</i> | + | + | | + |
| | 卵形盘肠溞 <i>Chydorus ovalis</i> | | + | + | + |
| | 矩形尖额溞 <i>Alona rectangula</i> | | | + | |
| 象鼻溞科 Bosminidae | 长额象鼻溞 <i>Bosmina longirostris</i> | + | + | + | + |
| 老丰猛水蚤科 Laophontidae | 模式有爪猛水蚤 <i>Onychocamptus mohammed</i> | + | + | + | + |
| 胸饰水蚤科 Centropagidae | 汤匙华哲水蚤 <i>Sinocalanus dorrii</i> | | + | + | + |
| 长腹剑水蚤科 Limnoithona | 四刺窄腹剑水蚤 <i>Limnoithona tetraspina</i> | | | | + |
| 剑水蚤科 Cyclopidae | 锯缘真剑水蚤 <i>Eucyclops serrulatus</i> | | + | + | + |
| | 近邻剑水蚤 <i>Cyclops vicinus</i> | + | + | + | + |
| | 剑水蚤属 1 种 <i>Cyclops</i> sp. | | + | + | |
| | 跨立小剑水蚤 <i>Microcyclops varicaticans</i> | + | + | + | |
| | 广布中剑水蚤 <i>Mesocyclops leuckarti</i> | + | + | + | + |
| | 短尾温剑水蚤 <i>Thermocyclops brevifurcatus</i> | + | | | + |

表 3 三角湖浮游甲壳动物不同季节的种类相似性指数

Table 3 Species similarity index of planktonic crustaceans community among different seasons in Sanjiao Lake

| | 夏 Summer | 秋 Autumn | 冬 Winter | 春 Spring |
|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 夏 Summer | | 0.50 | 0.45 | 0.63 |
| 秋 Autumn | 0.50 | | 0.72 | 0.65 |
| 冬 Winter | 0.45 | 0.72 | | 0.60 |
| 春 Spring | 0.63 | 0.65 | 0.60 | |

3.6) ind/L。夏季和秋季三角湖浮游甲壳动物密度较低, 最低值出现在 10 月份, 10 月份后, 密度逐渐上升, 密度峰值出现在次年 2 月份, 之后密度又下降到 3 月份的 2.6 ind/L; 除 5、6 月份外, 桡足类及无节幼体占优势, 约占总密度的 55.2% ~ 95.4% (图 2)。

2.4 优势种

三角湖浮游甲壳动物优势种包括: 近邻剑水蚤 (优势度 0.073)、广布中剑水蚤 (0.067)、发头裸腹溞 (0.066)、跨立小剑水蚤 (0.048)、直额裸腹溞 (0.026)、长肢秀体溞 (0.023) 和长额象鼻溞 (0.023)。各优势种优势度具有明

显的季节变化 (图 3), 如近邻剑水蚤和广布中剑水蚤, 夏、秋季优势度较低, 冬、春季优势度较高, 近邻剑水蚤 2 月份优势度高达 0.278, 广布中剑水蚤 4 月份优势度高达 0.368。发头裸腹溞在冬末和春季优势度较低, 而在夏、秋季具有较高的优势度。

2.5 群落多样性

三角湖浮游甲壳动物物种丰富度和 Simpson 指数见图 4。物种丰富度变化范围为 6 ~ 15, 平均值为 10 ± 3 , 最高值出现在 11 月份, 最低值出现在 8 月份。总体上, 秋末到春季浮游甲壳动物物种丰富度较高, 而夏季较低 (6 ~ 9 种)。浮游甲壳动物群落 Simpson 指数变化范围为 0.76 ~ 0.90, 平均值为 0.80 ± 0.04 , 最高值出现在 11 月份, 而其他月份变化不大。

2.6 浮游甲壳动物与环境因子的关系

Pearson 相关分析表明, 桡足类密度 (不含无节幼体) 与水温 ($r = -0.759, P < 0.01, n = 11$)、电导率 ($r = -0.817, P < 0.01, n = 11$) 和总氮 ($r = 0.663, P < 0.05, n = 11$) 相关关系显著; 枝角类密度与叶绿素 a 相关关系显著 ($r = 0.712, P < 0.01, n = 11$); 浮游甲壳动物总密度与水深相关关系显著 ($r = -0.636, P <$

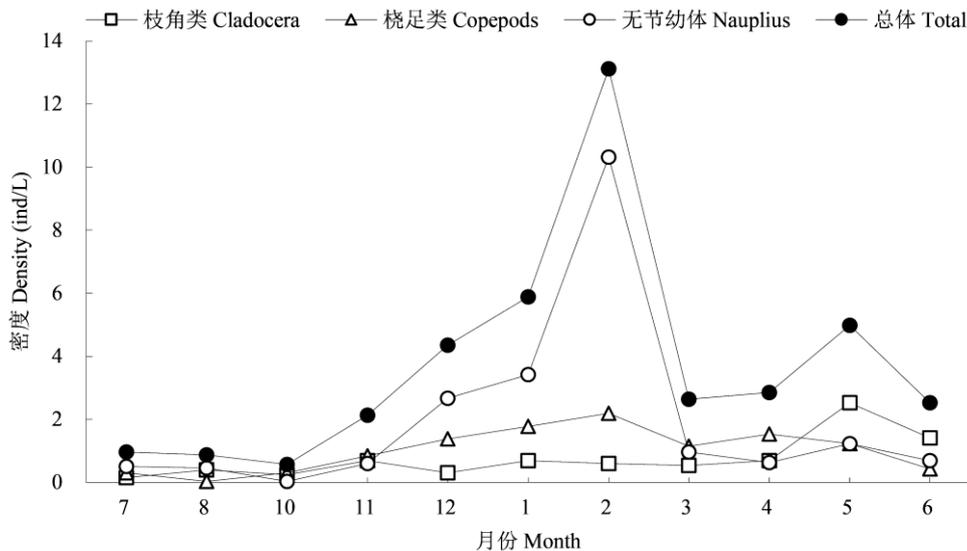


图 2 三角湖浮游甲壳动物密度季节变化

Fig. 2 Seasonal variation of planktonic crustacean density in Sanjiao Lake

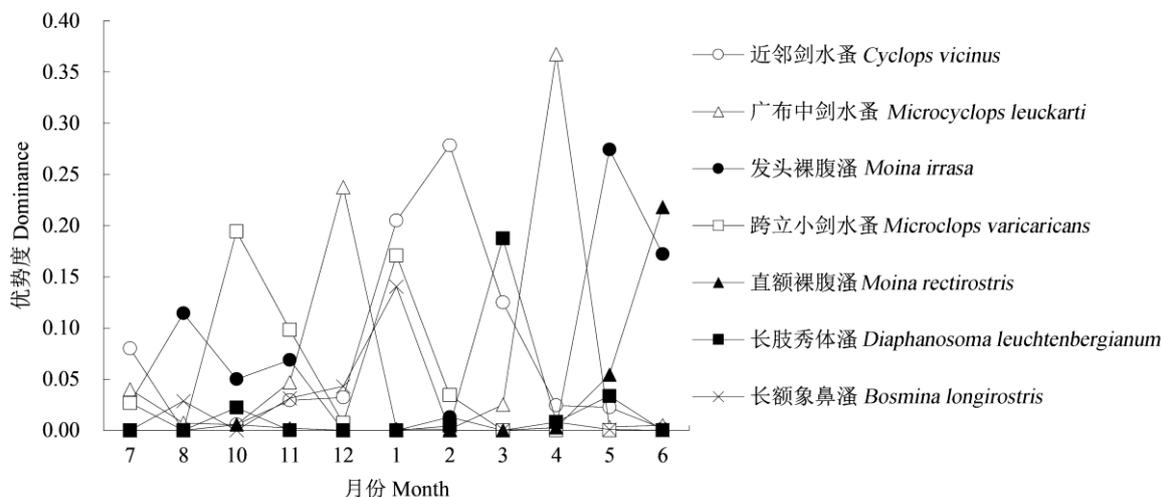


图3 三角湖浮游甲壳动物主要种类优势度季节变化

Fig. 3 Seasonal variation of planktonic crustacean dominance in Sanjiao Lake

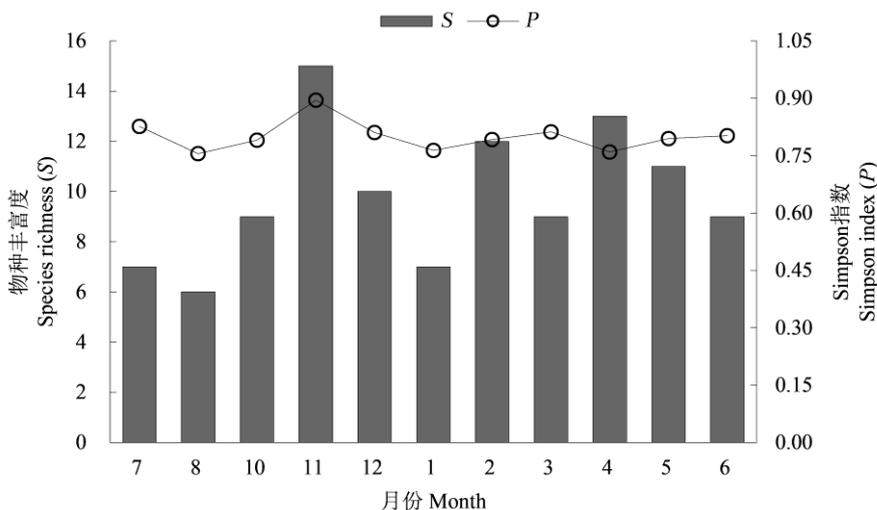


图4 三角湖浮游甲壳动物物种丰富度和 Simpson 指数

Fig. 4 Species richness and Simpson index of planktonic crustacean community in Sanjiao Lake

0.05, $n = 11$); 浮游甲壳动物总密度与其他环境因子相关关系不显著 ($P > 0.05$)。

CCA 分析显示(图 5),环境变量水温(WT)和透明度(SD)通过了逐步选择的显著性检验 ($P < 0.05$),表明水温和透明度是影响三角湖浮游甲壳动物物种组成季节变化的主要环境因子。CCA 图第一轴解释了 30.8%浮游甲壳动物物种数据的方差,前两轴共解释了 43.5%浮游甲壳动物物种数据的方差。第一轴主要与水温

相关 ($r = 0.97$),代表了水温梯度,5~8月水温较高,11月至次年2月水温较低。第二轴主要与透明度相关 ($r = 0.65$),代表了透明度梯度,12月透明度最高,5~8月透明度较低。透明薄皮溞、直额裸腹溞、双棘伪仙达溞、发头裸腹溞和短尾温剑水蚤等种类倾向在水温高、透明度低的季节出现。11月至次年2月水温较低,近邻剑水蚤、广布中剑水蚤、跨立小剑水蚤和长额象鼻溞等种类倾向于水温低、透明度

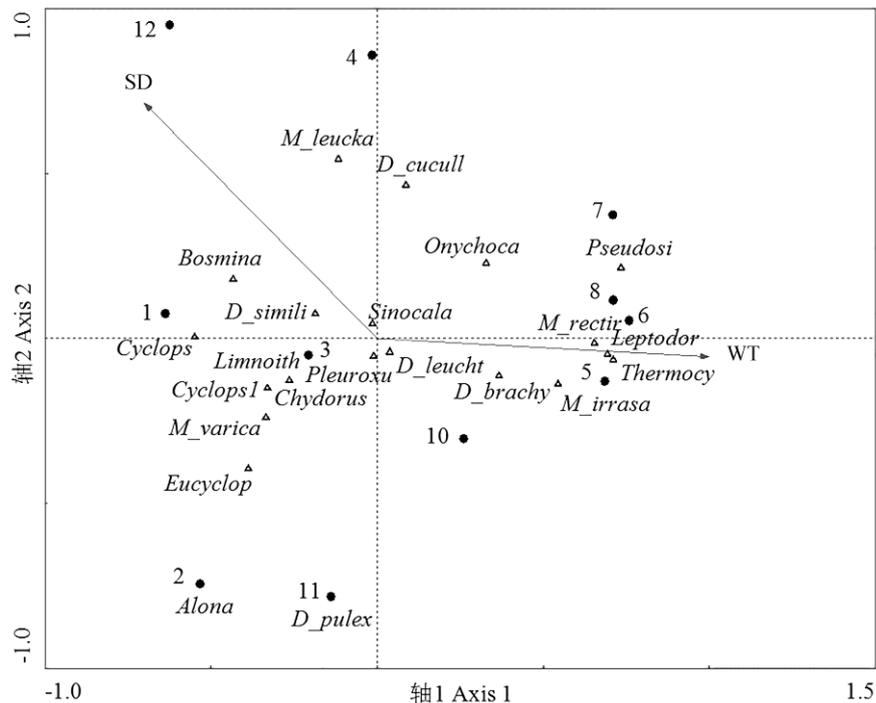


图 5 浮游甲壳动物与环境因子的典范对应分析排序图

Fig. 5 Ordination plot of canonical correspondence analysis for planktonic crustacean species, samples with selected environmental variables

三角形代表物种；箭头代表环境因子：WT. 水温；SD. 透明度；黑色圆圈代表采样月份：1~12月。

Empty triangle indicating species; Arrow indicating environmental variables (WT for Water temperature; SD for Sechi disk depth); Solid dark point for the months samples collected.

Leptodor. 透明薄皮蚤; *D_brachy.* 短尾秀体蚤; *D_leucht.* 长肢秀体蚤; *Pseudosi.* 双棘伪仙达蚤; *D_cucull.* 僧帽蚤; *D_simili.* 同形蚤; *D_pulex.* 蚤状蚤; *M_rectir.* 直额裸腹蚤; *M_irrasa.* 发头裸腹蚤; *Pleuroxu.* 光滑平直蚤; *Chydorus.* 卵形盘肠蚤; *Alona.* 矩形尖额蚤; *Bosmina.* 长额象鼻蚤; *Onychoca.* 模式有爪猛水蚤; *Sinocala.* 汤匙华哲水蚤; *Limnoith.* 四刺窄腹剑水蚤; *Eucyclop.* 锯缘真剑水蚤; *Cyclops.* 近邻剑水蚤; *M_varica.* 跨立小剑水蚤; *M_leucka.* 广布中剑水蚤; *Thermocy.* 短尾温剑水蚤; *Cyclops1.* 剑水蚤属 1 种。

Leptodor. *Leptodora kindii*; *D_brachy.* *Diaphanosoma brachyurum*; *D_leucht.* *Diaphanosoma leuchtenbergianum*; *Pseudosi.* *Pseudosida bidentata*; *D_cucull.* *Daphnia cucullata*; *D_simili.* *Daphnia similis*; *D_pulex.* *Daphnia pulex*; *M_rectir.* *Moina rectirostris*; *M_irrasa.* *Moina irrasa*; *Pleuroxu.* *Pleuroxus laevis*; *Chydorus.* *Chydorus ovalis*; *Alona.* *Alona rectangulara*; *Bosmina.* *Bosmina longirostris*; *Onychoca.* *Onychocampus mohammed*; *Sinocala.* *Sinocalanus dorrii*; *Limnoith.* *Limnoithona tetraspina*; *Eucyclop.* *Eucyclops serrulatus*; *Cyclops.* *Cyclops vicinus*; *M_varica.* *Microclops varicaricans*; *M_leucka.* *Mesocyclops leuckarti*; *Thermocy.* *Thermocyclops brevifurcatus*; *Cyclops1.* *Cyclops* sp.

高的季节出现。

3 讨论

3.1 浮游甲壳动物群落特征

本研究表明，三角湖浮游甲壳动物群落的优势种均为我国淡水水体中常见的小型化种类

(蒋燮治等 1979, 中国科学院动物研究所甲壳动物研究组 1979)。枝角类优势种与白洋淀相似(易磊等 2010), 桡足类优势种与杭州西湖相似(李共国等 2006)。三角湖浮游甲壳动物密度为 (3.7 ± 3.6) ind/L, 密度明显低于长江中下游地区的其他湖泊, 如武汉南湖浮游甲壳

动物密度平均值为 119.7 ind/L, 范围为 61.0 ~ 264.8 ind/L (刘红等 2005), 太湖不同富营养化水平的梅梁湾、湖心区和胥口湾浮游甲壳动物密度分别为 199 ind/L、150 ind/L 和 91 ind/L (王颖等 2014)。而同样位于长江中下游地区的富营养化城市小型湖泊南京玄武湖的浮游甲壳动物密度水平与三角湖接近, 平均值 4.4 ind/L, 范围 0.5 ~ 15.9 ind/L (孙颖等 2012)。三角湖和玄武湖浮游甲壳动物密度偏低, 可能与鱼类捕食压力较大有关。三角湖浮游甲壳动物密度水平虽然与玄武湖接近, 但群落组成并不相同 (孙颖等 2012), 可能与特定湖泊的生境、历史和营养盐演变等条件有关。

3.2 浮游甲壳动物群落季节动态的影响因子

水温是浮游甲壳动物群落结构季节动态最重要的影响因子之一 (王松波等 2011)。水温会影响不同类型浮游甲壳动物的生长、死亡和繁殖等生物学特性, 从而影响浮游甲壳动物的群落组成 (Maier 1989)。枝角类更倾向于温度高的季节, 在夏季有较强的滤食和繁殖能力, 而桡足类对低温和食物缺乏的冬季有更强的适应能力 (张晓燕等 2014), 如近邻剑水蚤在水温约为 25 ~ 27°C 时在东湖敞水区消失 (陈雪梅 1984)。三角湖枝角类和桡足类密度的季节变化规律反映了这一特性, 枝角类 5、6 月份的密度大于桡足类, 而其他月份桡足类占优势, 桡足幼体密度在 2 月份达到峰值。

一般认为, 浮游甲壳动物密度与水温呈正相关, 春、夏季较高, 秋、冬季较低 (邓道贵等 2010, 徐梅等 2016)。而三角湖浮游甲壳动物群落总密度与水温相关关系不显著, 桡足类密度与水温呈负相关, 这可能与鱼类的捕食压力有关。因条件的限制, 本研究未采集鱼类数据进行定量分析。但已有的研究表明, 捕食是影响浮游甲壳动物群落的一个重要生物因子, 鱼类的捕食压力会一定程度上控制浮游甲壳动物的总密度和生物量 (刘宝贵等 2015); 鲢、鳙放养对枝角类的影响大于桡足类 (柯志新等 2012)。三角湖是典型的养殖型湖泊, 每年 2 ~ 3

月后开始投放鲢、鳙等鱼种, 夏季是鱼类的生长旺季, 对浮游甲壳动物的捕食强度大, 每年 11 ~ 12 月起捕鱼类, 浮游甲壳动物的捕食压力减少。很可能是鲢、鳙的捕食压力导致了三角湖浮游甲壳动物密度的季节变化特点, 即夏季较低, 冬季较高, 大部分季节桡足类占优势。这与刘宝贵等 (2015) 在养殖型湖泊军山湖观察到的现象一致。鱼类捕食不仅控制浮游甲壳动物密度和生物量, 也会导致其群落结构的小型化 (Vanni 1988, 谢钦铭等 1998, Iglesias et al. 2011)。研究表明, 鲢、鳙对大型浮游甲壳动物捕食的选择性较高 (陈立婧等 2013)。三角湖中, 桡足类缺乏大型的哲水蚤, 枝角类以裸腹溞、长肢秀体溞和长额象鼻溞等小型种类为优势种, 这可能与三角湖高密度的鲢、鳙鱼放养造成的捕食压力有关。

除了捕食压力的影响外, 浮游甲壳动物密度的季节变化还可能与高水位对浮游动物的稀释作用有关 (刘宝贵等 2016)。三角湖具有明显的水位波动, 夏、秋季水位较高, 对浮游甲壳动物密度具有明显的稀释效应, 而冬季水位较低, 稀释效应小。浮游甲壳动物总密度与水深显著负相关, 显示季节性的水位波动影响浮游甲壳动物密度。

食物的可得性也是影响浮游甲壳动物生长和繁殖的主要因子之一 (Xie et al. 2000, Stefanidis et al. 2010)。随着营养盐水平的升高, 藻类密度和生物量增加, 为浮游甲壳动物提供更多的食物资源, 有利于浮游甲壳动物的生长。一般认为, 浮游甲壳动物密度或生物量与叶绿素 a 含量呈正相关 (李娟等 2014)。三角湖浮游甲壳动物总密度与叶绿素 a 含量相关关系不显著, 原因可能是湖泊营养水平已经很高, 藻类丰富, 食物资源已不再是浮游甲壳动物生长的限制因子。

透明度在一定程度上能反映水质的好坏, 在低温的冬季, 藻类生物量低, 透明度较高, 而在夏季温度高, 常常会引起藻类生物量爆发, 水体透明度降低。透明度是影响浮游甲壳动物

物种组成季节动态的主要因子之一 (Estlander et al. 2009, 柯志新等 2012)。本研究显示, 透明度也是影响三角湖浮游甲壳动物群落季节动态的一个重要因子。

三角湖浮游甲壳群落不仅受水温、水位和透明度等环境因子的影响, 而且在很大程度上受高密度的水产养殖活动的影响, 即鲢、鳙的摄食压力导致了浮游甲壳动物密度较低, 群落小型化。三角湖富营养化程度严重, 浮游植物细胞密度平均值达 102×10^6 ind/L (鲁敏等 2014), 存在爆发蓝藻水华的风险。建议停止大规模的水产养殖活动, 一方面可以减少养殖活动中投饵、施肥和施药等措施带来的水质污染, 另一方, 可以降低鱼类对浮游甲壳动物群落的捕食压力, 提高浮游甲壳动物群落对藻类的控制效应, 促进生态系统的良性循环。

参 考 文 献

- Ban S, Makino W, Sakano H, et al. 2013. Annual variation in biomass and the community structure of crustacean zooplankton over 5 years in Lake Toya, Japan. *Limnology*, 14(1): 59–70.
- Estlander S, Nurminen L, Olin M, et al. 2009. Seasonal fluctuations in macrophyte cover and water transparency of four brown-water lakes: implications for crustacean zooplankton in littoral and pelagic habitats. *Hydrobiologia*, 620(1): 109–120.
- Iglesias C, Mazzeo N, Meerhoff M, et al. 2011. High predation is of key importance for dominance of small-bodied zooplankton in warm shallow lakes: evidence from lakes, fish enclosures and surface sediments. *Hydrobiologia*, 667(1): 133–147.
- Lazareva V I. 2010. Long-term zooplankton dynamics in the Rybinsk Reservoir (1956 - 2005). *Water Resources*, 37(5): 684–698.
- Leps J, Smilauer P. 2003. *Multivariate Analysis of Ecological Data Using CANOCO*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Magurran A E. 2004. *Measuring Biological Diversity*. Oxford: Blackwell Publishing.
- Maier G. 1989. The effect of temperature on the development times of eggs, naupliar and copepodite stages of five species of cyclopoid copepods. *Hydrobiologia*, 184(1/2): 79–88.
- Qin B Q, Gao G, Zhu G W, et al. 2013. Lake eutrophication and its ecosystem response. *Science Bulletin*, 58(9): 961–970.
- Stefanidis K, Papastergiadou E. 2010. Influence of hydrophyte abundance on the spatial distribution of zooplankton in selected lakes in Greece. *Hydrobiologia*, 656(1): 55–65.
- Vanni M J. 1988. Freshwater zooplankton community structure: introduction of large invertebrate predators and large herbivores to a small species community. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 45(10): 1758–1770.
- Xie P, Iwakuma T, Fujii K. 2000. Effect of available food and temperature on the growth and reproduction of *Daphnia rosea*. *Journal of Freshwater Ecology*, 15(3): 379–388.
- 陈家长, 孟顺龙, 尤洋, 等. 2009. 太湖五里湖浮游植物群落结构特征分析. *生态环境学报*, 18(4): 1358–1367.
- 陈立婧, 梅榛, 孔优佳, 等. 2013. 溇湖控藻网围中鲢鳙对枝角类群落结构的影响. *水产学报*, 37(4): 545–555.
- 陈雪梅. 1984. 温度对武汉东湖近邻剑水蚤发育及繁殖的影响. *水生生物学报*, (4): 419–426.
- 邓道贵, 邢荣龙, 马睿, 等. 2010. 淮北采煤塌陷区小型湖泊浮游甲壳动物群落结构的季节变化. *湖泊科学*, 22(4): 591–597.
- 董元火, 曾长立, 吴翠. 2008. 湖北省三角湖水生植物物种多样性研究. *安徽农业科学*, 36(6): 2416–2418.
- 郭道春, 马友华, 李堃, 等. 2013. 农田生态拦截沟中浮游甲壳动物群落结构研究. *水生态学杂志*, 34(1): 50–58.
- 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 2002. *水和废水监测分析方法*. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社.
- 蒋燮治, 堵南山. 1979. *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.
- 柯志新, 谢平, 过龙根, 等. 2012. 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. *应用生态学报*, 23(8): 2270–2276.
- 李共国, 吴芝瑛, 虞左明. 2006. 引水和疏浚工程支配下杭州西湖浮游动物的群落变化. *生态学报*, 26(10): 3508–3515.
- 李海燕, 赵锦慧, 梁师英. 2010. 后官湖地区 NPP 的计算及分析. *安徽农业科学*, 38(28): 15835–15837.
- 李娟, 温周瑞, 李庚辰, 等. 2014. 太湖梅梁湾和贡湖湾浮游甲壳动物群落结构及其与环境因子的相互关系. *长江流域资源与环境*, 23(增刊 1): 81–90.
- 刘宝贵, 刘霞, 吴瑶, 等. 2016. 鄱阳湖浮游甲壳动物群落结构特征. *生态学报*, 36(24): 1–8.

- 刘宝贵, 谭国良, 邢久生, 等. 2015. 围湖养殖对军山湖浮游甲壳动物群落结构的影响. *生态与农村环境学报*, 31(1): 82–87.
- 刘红, 马徐发, 熊邦喜. 2005. 武汉南湖的浮游甲壳动物. *淡水渔业*, 35(5): 22–24.
- 鲁敏, 熊飞, 刘红艳, 等. 2014. 三角湖浮游植物群落结构与水质评价. *水生态学杂志*, 35(6): 61–66.
- 孙颖, 舒婷婷, 李静, 等. 2012. 南京玄武湖浮游甲壳动物的水平分布及其与环境的关系. *湖泊科学*, 24(3): 422–428.
- 王松波, 薛庆举, 高光, 等. 2011. 新疆博斯腾湖浮游甲壳动物群落结构. *湖泊科学*, 23(6): 926–933.
- 王颖, 杨桂军, 秦伯强, 等. 2014. 太湖不同生态类型湖区浮游甲壳动物群落结构季节变化比较. *湖泊科学*, 26(5): 743–750.
- 谢钦铭, 李长春. 1998. 鄱阳湖桡足类的群落组成与现存量季节变化的初步研究. *江西科学*, (3): 180–187.
- 徐梅, 吴芳仪, 刘靛靛, 等. 2016. 焦岗湖浮游甲壳动物群落结构的季节动态. *生态学杂志*, 35(5): 1254–1262.
- 徐兆礼, 陈亚瞿. 1989. 东黄海秋季浮游动物优势种聚集强度与鲈鳕渔场的关系. *生态学杂志*, 8(4): 13–15.
- 薛俊增, 堵南山. 2009. 甲壳动物学. 上海: 上海教育出版社.
- 杨程, 马剑敏. 2014. 城市湖泊生态修复及水生植物群落构建研究进展. *长江科学院院报*, 31(7): 13–20.
- 易磊, 刘存歧, 邢晓光, 等. 2010. 白洋淀浮游甲壳动物的生物多样性研究. *水生态学杂志*, 3(4): 41–46.
- 张晓燕, 张笑君, 林秋奇, 等. 2014. 一座热带中型水库浮游甲壳动物种类多样性与群落结构季节变化. *生态科学*, 33(5): 998–1004.
- 中国科学院动物研究所甲壳动物研究组. 1979. 中国动物志: 节肢动物门 甲壳纲 淡水桡足类. 北京: 科学出版社.