

文章编号: 1674-5566(2016)02-0207-10

溇湖控藻网围内外和清淤区轮虫群落结构的对比研究

曾甜甜¹, 刘其根¹, 孔优佳², 陈立婧¹

(1. 上海海洋大学 省部共建水产种质资源发掘与利用教育部重点实验室, 上海 201306; 2. 江苏省溇湖渔业管理委员会, 江苏 常州 213161)

摘要: 于 2013 年 7 月至 2014 年 6 月每月下旬对溇湖控藻网围内、外和清淤区 3 个区域轮虫的群落结构进行对比分析。采用淡水浮游生物调查方法, 对轮虫种类组成、优势度、现存量和物种多样性及与水质特征参数的关系进行了研究。经鉴定: 轮虫共有 51 种, 隶属于 14 科 22 属。主要优势种包括: 角突臂尾轮虫 (*Brachionus angularis*)、针簇多肢轮虫 (*Polyarthra trigla*)、曲腿龟甲轮虫 (*Keratella valga*)、长肢多肢轮虫 (*Polyarthra dolichoptera*) 和长三肢轮虫 (*Filinia longiseta*) 等。典型对应分析 (CCA) 结果表明, 水温 (T)、高锰酸盐指数 (COD_{Mn})、溶解氧 (DO)、总氮 (TN) 和总磷 (TP) 是影响轮虫生态特征的主要水质因子。多重比较表明, 轮虫现存量网围内显著低于网围外 ($P < 0.05$), 网围内、外皆极显著低于清淤区 ($P < 0.01$)。轮虫的生物密度年均值为: 网围内 [$(428 \pm 96) \text{ ind/L}$] < 网围外 [$(939 \pm 220) \text{ ind/L}$] < 清淤区 [$(1216 \pm 330) \text{ ind/L}$]; 生物量: 网围内 [$(0.364 \pm 0.100) \text{ mg/L}$] < 网围外 [$(0.991 \pm 0.316) \text{ mg/L}$] < 清淤区 [$(1.589 \pm 0.328) \text{ mg/L}$]。本研究表明, 鲢鳙鱼控藻对水体富营养化控制有一定效果, 而清淤对水体生态修复具有一定的效果。

关键词: 溇湖; 控藻网围; 清淤区; 轮虫; 群落结构

中图分类号: X 171

文献标志码: A

轮虫由于其种类组成与水体理化指标、水体营养水平和生境多样性具有一定联系, 故研究轮虫群落结构对水体富营养化控制和生态系统修复非常重要^[1-2]。目前, 国内学者针对网围养殖对淡水湖泊生态影响的研究多在骆马湖^[3]、阳澄湖^[4]和溇湖^[5-7]等地进行, 研究内容主要包括: 水体富营养化、水体营养盐、底栖动物和枝角类等。关于清淤或环保疏浚后水体环境变化的研究多在长春南湖^[8]、太湖^[9]和杭州西湖^[10]等地进行, 研究内容包括: 水因子、生态效应和浮游生物等。而未见探讨鲢鳙鱼控藻网围内、外与清淤区不同生境对轮虫群落结构影响的相关报道。本试验结合国家水体污染控制与治理科技重大专项, 在放养鲢、鳙鱼直接控藻的网围区及网围外和实施过生态清淤的清淤区进行水生生物监测, 比较分析两种方式对轮虫群落结构的影响,

以此探讨两种方法对水体生态修复的效果, 为进行高效益生态网围养殖提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 试验设计

进行试验的 3 个区域为: 溇湖南部高密度放养鲢、鳙鱼进行控藻的网围内养殖区, 南部与网围区域对应的网围外区域和北部进行过生态清淤工程的清淤区。其中, 网围内养殖区采样点距网围外区域采样点平均距离为 0.57 km, 网围外区域采样点距清淤区采样点平均距离为 13.50 km。

1.1.1 网围设计

网围面积约 0.50 km², 鲢、鳙鱼控藻网围由细绳、钢性无缝钢管、有结网片等组成, 设置双层网围结构, 且高度高于水深 1.2 m。其中, 为防止

收稿日期: 2015-04-16 修回日期: 2015-06-04

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07101-007); 上海市重点学科建设项目 (S30701); 上海高校知识服务平台上海海洋大学水产动物遗传育种中心 (ZF1206)

作者简介: 曾甜甜 (1990—), 女, 硕士研究生, 研究方向为浮游动物生态学。E-mail: 18817775085@163.com

通信作者: 陈立婧, E-mail: ljchen@shou.edu.cn

养殖鱼类逃逸,外层网目孔径选用 3 cm,内层网目孔径选用 0.71 mm。网围内鲢选择 1 267 ~ 1 667 尾/hm²,每尾体质量为 45 ~ 83 g;鳙为 867 ~ 1 267 尾/hm²,每尾体质量为 167 ~ 250 g 作为放养标准。

1.1.2 采样点设置

2013 年 7 月至 2014 年 6 月,每月中下旬采样 1 次。其中,12 月因为水太浅无法行船,故未采样。采样设置 9 个站点:S1-S9,可分为 3 个区域,即控藻网围内(S1、S2、S3)、网围外(S4、S5、S6)及清淤区(S7、S8、S9),见图 1。各站点经纬度如表 1 所示。

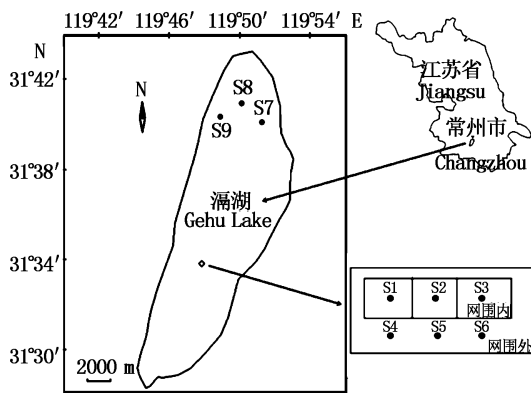


图 1 溇湖采样点站点图

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Lake Gehu

表 1 溇湖采样点的经纬度

Tab. 1 Coordinates of sampling sites in Lake Gehu

站点 site	N	E
S1 养殖区网围内左	31°33'32.5"	119°47'39.2"
S2 养殖区网围内中	31°33'26.1"	119°47'49.7"
S3 养殖区网围内右	31°33'19.4"	119°47'59.9"
S4 养殖区网围外左	31°33'12.9"	119°47'40.1"
S5 养殖区网围外中	31°33'10.2"	119°47'52.1"
S6 养殖区网围外右	31°33'19.7"	119°47'29.6"
S7 清淤区右	31°40'0.7"	119°51'13.4"
S8 清淤区中	31°40'55.7"	119°50'3.7"
S9 清淤区左	31°40'16.8"	119°48'52.8"

1.2 采样方法

采样参考陈伟民等^[11]所著《湖泊生态系统观测方法》中的方法进行,由于溇湖平均水深在 2 m 以内,轮虫样品可用规格为 5 L 的采水器采集表层(0.5 m)水样 10 L。混匀后用量杯量取 1 L 水样于广口瓶中,现场加入 15 mL 的鲁哥氏液以固定。然后带回实验室,倒入分液漏斗中经超过 24

h 的沉淀后浓缩至 50 mL 加 4% 的福尔马林溶液。且每瓶样品应写上对应采样日期和地点等内容的标签保存以备镜检^[12]。采样时现场用萨氏盘测定水深(D)和透明度(SD)。水温(T)、溶解氧(DO)和 pH 等用 YSI600QS 多参数水质监测仪进行测定。同时采集 1 L 水样,带回实验室测定理化指标,叶绿素 a(*Chl. a*)含量采用丙酮溶液萃取法测定^[13]。轮虫种类鉴定依据王家楫^[14]、KOSTE^[15-16]等方法。轮虫生物量采用体积法^[11]统计。

1.3 数据处理方法

1.3.1 计算公式

Shannon-Wiener 物种多样性指数(H')^[17]:

$$H' = - \sum (N_i/N) \ln(N_i/N) \quad (1)$$

式中: N_i 为第 i 种的个体数; N 为总个体数。

Pielou (1975) 物种均匀度指数(J):

$$J = H' / \ln S \quad (2)$$

式中: H' 为 Shannon-Wiener 物种多样性指数; S 为总物种数。

Margalef (1968) 物种丰富度指数(D):

$$D = (S - 1) / \ln N \quad (3)$$

式中: N 为总个体数; S 为总物种数。

$$\text{优势度}(Y) : Y = (N_i/N) \times f_i \quad (4)$$

式中: N_i 为第 i 种的个体数; N 为总个体数; f_i 为第 i 种出现的频率。当 $Y > 0.02$ 认为是优势种^[18-19]。

Jaccard (1901) 相似性系数:

$$S_j = c / (a + b - c) \quad (5)$$

式中: a 为一个地区的物种种类数总和; b 为另一个地区的物种种类数总和; c 为两地区共有物种种类数总和;当 S_j 值为 0.00 ~ 0.25 时,为极不相似;当 S_j 值为 0.25 ~ 0.50 时,为中等不相似;当 S_j 值为 0.50 ~ 0.75 时,为中等相似;当 S_j 值为 0.75 ~ 1.00 时,为极相似^[20]。

1.3.2 统计处理

用 SPSS 19.0 软件对所获得的物种数据和环境数据进行单因素方差分析(one-way ANOVA)进行多重比较,并通过多变量相关(Pearson)分析轮虫群落数据与环境变量等的相关性。利用 Canoco 4.5 软件包对轮虫物种数据和环境因子数据进行典型对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)。

2 结果与分析

2.1 控藻网围内外和清淤区理化指标

控藻网围内外和清淤区各主要理化指标的年均值见表2。多重比较显示,网围内水温(T)、溶氧(DO)和叶绿素 a 含量(*Chl. a*)显著低于网围外($P=0.015, 0.019, 0.013 < 0.05$);网围内氧化还原电位(ORP)和总氮(TN)显著高于网围外($P=0.012, 0.029 < 0.05$);网围内 T、水深(D)和

硝酸盐氮($\text{NO}_3\text{-N}$)极显著低于清淤区($P=0.001, 0.001 < 0.01$);网围内 *Chl. a*、ORP 和高锰酸盐指数(COD_{Mn})极显著高于清淤区($P=0, 0.001, 0.007 < 0.01$);网围外 DO、*Chl. a* 和 COD_{Mn} 极显著高于清淤区($P=0.005, 0, 0.008 < 0.01$);网围外 pH 显著高于清淤区($P=0.034 < 0.05$);网围外 SD、D 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 极显著低于清淤区($P=0, 0, 0.001 < 0.01$);网围外 T 显著低于清淤区($P=0.034 < 0.05$)。

表2 漏湖3个区域理化因子的年均值

Tab.2 The annual average physicochemical indexes of 3 regions in Lake Gehu

理化因子 physicochemical index	网围内 inside	网围外 outside	清淤区 dredging area
pH	7.98 ± 0.17	8.23 ± 0.04	7.87 ± 0.22
水温 T/℃	19.22 ± 0.11	19.67 ± 0.13	20.04 ± 0.23
溶氧 DO/(mg/L)	9.31 ± 0.08	9.82 ± 0.31	9.13 ± 0.10
透明度 SD/m	0.25 ± 0.01	0.27 ± 0.01	0.34 ± 0.01
水深 D/m	1.50 ± 0.06	1.53 ± 0.02	2.40 ± 0.19
氧化还原电位 ORP(mv)	174.4 ± 6.76	151.73 ± 9.26	138.10 ± 7.33
总氮 TN/(mg/L)	2.40 ± 0.09	2.25 ± 0.04	2.34 ± 0.05
总磷 TP/(mg/L)	0.34 ± 0.12	0.30 ± 0.05	0.19 ± 0.04
硝酸盐氮 $\text{NO}_3\text{-N}$ /(mg/L)	0.70 ± 0.02	0.68 ± 0.05	0.89 ± 0.05
氨氮 $\text{NH}_4\text{-N}$ /(mg/L)	0.50 ± 0.03	0.43 ± 0.01	0.53 ± 0.13
高锰酸盐指数 COD_{Mn} /(mg/L)	5.46 ± 0.54	5.43 ± 0.43	4.16 ± 0.11
叶绿素 a 含量 <i>Chl. a</i> /($\mu\text{g/L}$)	39.5 ± 3.1	47.5 ± 0.8	22.4 ± 3.8

2.2 控藻网围内外和清淤区轮虫的种类组成对比

控藻网围内共鉴定出轮虫 38 种,网围外 44 种,清淤区 39 种,有 30 种为共有种。其中,臂尾轮科最多,为 10 种,占共有种的 33.3%(表3)。3 个区域轮虫的种类数季度变化特点为秋季 > 春季 > 夏季 > 冬季,轮虫种类总体呈现出春秋多于冬夏的特点。

控藻网围内轮虫的全年优势种为角突臂尾轮虫(*Brachionus angularis*)、针簇多肢轮虫(*Polyarthra trigla*)、曲腿龟甲轮虫(*Keratella valga*)和长肢多肢轮虫(*P. dolichoptera*);优势度分别为 0.11、0.10、0.08、0.08。网围外优势种为角突臂尾轮虫、针簇多肢轮虫、曲腿龟甲轮虫、长

肢多肢轮虫和长三肢轮虫(*Filinia longiseta*);优势度分别为 0.12、0.11、0.10、0.07、0.07。清淤区优势种为针簇多肢轮虫、角突臂尾轮虫、曲腿龟甲轮虫和长肢多肢轮虫;优势度分别为 0.16、0.11、0.10、0.08。

3 个区域之间轮虫的种类为中等相似,控藻网围内与网围外 Jaccard 相似性指数为 0.75,网围内与清淤区为 0.71,网围外与清淤区为 0.66。控藻网围内、外和清淤区的污染指示种类差异明显,分别为 29 种、35 种和 32 种,均以寡污- β 中污染指示种最多,其百分比分别为 24.1%、28.6% 和 28.1%。控藻网围内寡污染指示种类为 3 区最多(24.1%),清淤区 β -中污染指示种类为 3 区最多(25.0%)。

表 3 涇湖 3 个区域出现的污染指示种及 CCA 分析中的物种代码
 Tab. 3 The pollution indicators in 3 regions of Lake Gehu and the codes of species in CCA

代码 code	种类 species	网围内 inside	网围外 outside	清淤区 dredging area	污染指示等级 pollution indicating level
	疣毛轮科 Synchaetidae				
1	长肢多肢轮虫 <i>Polyarthra dolichoptera</i>	+	+	+	
2	针簇多肢轮虫 <i>P. trigla</i>	+	+	+	β - α
3	真翅多肢轮虫 <i>P. euryptera</i>	+	+	+	α
	梳状疣毛轮虫 <i>Synchaeta pectinata</i>	+	+	+	α
4	郝氏皱甲轮虫 <i>Ploesoma hudsoni</i>			+	α - β
	异尾轮科 Trichocercidae				
5	暗小异尾轮虫 <i>Trichocerca pusilla</i>	+	+	+	β
6	纵长异尾轮虫 <i>T. elongata</i>	+	+	+	α
7	刺盖异尾轮虫 <i>T. capucina</i>	+	+	+	α
	鼠轮科 Trichocercidae				
8	沟痕同尾轮虫 <i>Diurella sulcata</i>	+	+		
9	纤巧同尾轮虫 <i>D. tenuior</i>	+	+	+	
10	对棘同尾轮虫 <i>D. stylata</i>	+	+		β - α
	臂尾轮科 Brachionidae				
	裂痕龟纹轮虫 <i>Anuraeopsis fissa</i>		+		α - β
11	曲腿龟甲轮虫 <i>Keratella valga</i>	+	+	+	α - β
12	矩形龟甲轮虫 <i>K. quadrata</i>	+	+	+	α - β
13	螺形龟甲轮虫 <i>K. cochlearis</i>	+	+	+	α - β
14	缘板龟甲轮虫 <i>K. ticinensis</i>	+	+	+	
	唇形叶轮虫 <i>Notholca labis</i>		+		β
	叶状帆叶轮虫 <i>Argonotholca foliacea</i>	+			
15	裂足臂尾轮虫 <i>Brachionus diversicornis</i>	+	+	+	α
16	萼花臂尾轮虫 <i>B. calyciflorus</i>	+	+	+	β - α
	剪形臂尾轮虫 <i>B. forficula</i>		+	+	β
	镰状臂尾轮虫 <i>B. falcatus</i>			+	β
17	角突臂尾轮虫 <i>B. angularis</i>	+	+	+	β - α
18	尾突臂尾轮虫 <i>B. caudatus</i>	+	+	+	
	肛突臂尾轮虫 <i>B. bennini</i>	+	+		
	浦达臂尾轮虫 <i>B. budapestiensis</i>		+		β
19	皱褶臂尾轮虫 <i>B. plicatilis</i>	+	+	+	β
20	壶状臂尾轮虫 <i>B. urceus</i>	+	+	+	β - α
	方形臂尾轮虫 <i>B. quadridentatus</i>		+		β - α
	须足轮科 Euchlanidae				
	小须足轮虫 <i>Euchlanis parva</i>	+	+		
	大肚须足轮虫 <i>E. dilatata</i>	+	+	+	α - β
	三翼须足轮虫 <i>E. triquetra</i>			+	
	水轮科 Epiphanidae				
	棒状水轮虫 <i>Epiphanes clavulatus</i>		+		α - β
	六腕轮科 Hexarthridae				
21	奇异六腕轮虫 <i>Hexarthra mira</i>	+	+	+	β
	镜轮科 Testudinellidae				
	沟痕泡轮虫 <i>Pompholyx sulcata</i>	+		+	β
	三肢轮科 Filiniidae				
22	长三肢轮虫 <i>Filinia longiseta</i>	+	+	+	α
23	跃进三肢轮虫 <i>F. passa</i>	+	+	+	β - α
	角三肢轮虫 <i>F. cornuta</i>	+	+	+	α
	尾三肢轮虫 <i>F. major</i>	+	+		β
24	小三肢轮虫 <i>F. minuta</i>			+	
	旋轮科 Philodinidae				
25	红眼旋轮虫 <i>Philodina erythrophthalma</i>	+		+	β
	巨环旋轮虫 <i>P. megalotrocha</i>		+		

· 续表 3 ·

代码 code	种类 species	网围内 inside	网围外 outside	清淤区 dredging area	污染指示等级 pollution indicating level
	长足轮虫 <i>Rotaria neptunia</i>	+	+	+	α
	腔轮科 Lecanidae				
	囊形单趾轮虫 <i>Monostyla bulla</i>	+	+	+	α - β
	尖趾单趾轮虫 <i>M. dosterocerca</i>		+	+	β
	蹄形腔轮虫 <i>Lecane unguolata</i>	+	+	+	α - β
	晶囊轮科 Asplanchnidae				
26	前节晶囊轮虫 <i>Asplanchna priodonta</i>	+	+	+	α - β
27	盖氏晶囊轮虫 <i>A. girodi</i>	+	+	+	α - β
	卜氏晶囊轮虫 <i>A. brightwelli</i>		+	+	α - β
	腹尾轮科 Gastropodidae				
28	卵形彩胃轮虫 <i>Chromogaster ovalis</i>	+	+	+	
	聚花轮科 Conochilidae				
29	独角聚花轮虫 <i>Conochilus unicornis</i>	+	+	+	α

2.3 控藻网围内外和清淤区轮虫的现存量对比

由图 2 可知,轮虫生物密度年均值控藻网围内 $[(428 \pm 96) \text{ ind/L}] < \text{网围外} [(939 \pm 220) \text{ ind/L}] < \text{清淤区} [(1216 \pm 330) \text{ ind/L}]$ 。方差分析表明,生物密度在 3 个区域之间存在显著的差异($F = 8.619, P = 0.017 < 0.05$);多重比较显示,网围内显著低于网围外($P = 0.038 < 0.05$),网围外显著低于清淤区($P = 0.040 < 0.05$),网围内极显著低于清淤区($P = 0.006 < 0.01$)。

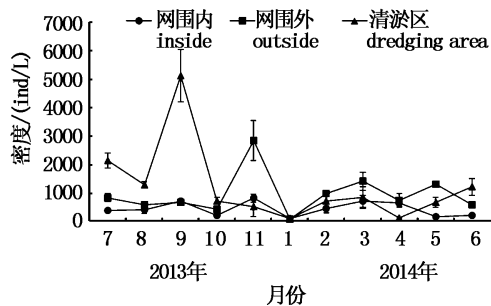


图 2 溇湖 3 个区域轮虫生物密度的周年变化
Fig. 2 Annual variation of density of rotifers in 3 regions of Lake Gehu

由图 3 可知,生物量年均值控藻网围内 $[(0.364 \pm 0.100) \text{ mg/L}] < \text{网围外} [(0.991 \pm 0.316) \text{ mg/L}] < \text{清淤区} [(1.589 \pm 0.328) \text{ mg/L}]$ 。方差分析结果表明,生物量在 3 个区域之间具有极显著的差异($F = 15.483, P = 0.004 < 0.01$),多重比较显示,网围内显著低于网围外($P = 0.029 < 0.05$),网围外显著低于清淤区($P = 0.035 < 0.05$),网围内极显著低于清淤区($P = 0.001 < 0.01$)。

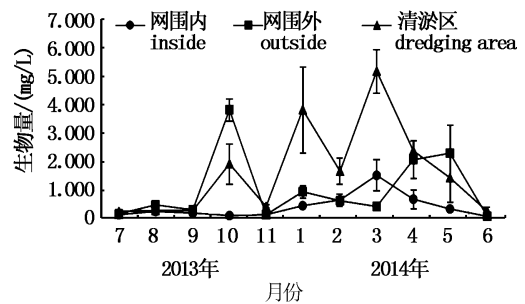


图 3 溇湖 3 个区域轮虫生物量的周年变化
Fig. 3 Annual variation of biomass of rotifers in 3 regions of Lake Gehu

2.4 控藻网围内外和清淤区轮虫的多样性指数对比

3 个区域轮虫多样性指数的月均值列于表 4。Shannon-Wiener 物种多样性指数(H')网围外 (1.65 ± 0.15) 高于清淤区 (1.64 ± 0.10) ,网围内最小 (1.53 ± 0.46) ,无显著差异。Pielou 物种均匀度指数(J)差异极显著($F = 16.177, P = 0.004 < 0.01$);网围外显著低于清淤区($P = 0.018 < 0.05$);网围外极显著低于网围内($P = 0.018 < 0.05$)。Margalef 物种丰富度指数(D)差异显著($F = 6.132, P = 0.035 < 0.05$);网围内显著低于网围外($P = 0.025 < 0.05$);网围内显著低于清淤区($P = 0.021 < 0.05$)。

2.5 环境因子对轮虫群落结构的影响

根据轮虫的相对密度(>0.002)和相对频率(>0.15)对所选 29 种进行排序分析。首先进行非约束性排序,通过对物种数据进行去趋势对应分析(Detrended correspondence analysis, DCA)得到 4 个排序轴的梯度长度,其中,梯度最大值为 4.132(>4),故约束性排序选择单峰模型 CCA(Canonical correspondence analysis)进行分析。

表 4 漏湖 3 个区域多样性指数月均值

Tab. 4 Month average of diversity indexes of rotifers in 3 regions of Lake Gehu

时间 time		网围内 inside	网围外 outside	清淤区 dredging area
201307	H'	1.11 ± 0.16	1.03 ± 0.15	1.80 ± 0.19
	J	0.87 ± 0.16	0.48 ± 0.06	0.90 ± 0.06
	D	0.32 ± 0.04	0.80 ± 0.06	0.72 ± 0.08
201308	H'	1.62 ± 0.22	1.85 ± 0.10	1.57 ± 0.23
	J	0.80 ± 0.05	0.78 ± 0.03	0.84 ± 0.14
	D	1.00 ± 0.63	1.02 ± 0.09	0.71 ± 0.26
201309	H'	1.82 ± 0.32	2.01 ± 0.19	1.03 ± 0.35
	J	0.89 ± 0.05	0.88 ± 0.08	0.97 ± 0.05
	D	0.80 ± 0.21	1.06 ± 0.28	0.29 ± 0.14
201310	H'	1.61 ± 0.24	2.20 ± 0.10	1.69 ± 0.08
	J	0.97 ± 0.01	0.83 ± 0.04	0.85 ± 0.13
	D	0.59 ± 0.14	1.38 ± 0.03	0.76 ± 0.21
201311	H'	1.46 ± 0.07	1.02 ± 0.09	1.99 ± 0.26
	J	0.91 ± 0.05	0.76 ± 0.14	0.85 ± 0.04
	D	0.53 ± 0.01	0.43 ± 0.09	1.07 ± 0.36
201401	H'	1.82 ± 0.18	2.28 ± 0.16	1.92 ± 0.16
	J	0.94 ± 0.03	0.92 ± 0.16	0.83 ± 0.03
	D	0.73 ± 0.12	1.26 ± 0.16	1.01 ± 0.15
201402	H'	1.85 ± 0.30	1.98 ± 0.36	1.67 ± 0.33
	J	0.96 ± 0.04	0.93 ± 0.05	0.75 ± 0.15
	D	0.75 ± 0.26	0.88 ± 0.24	0.88 ± 0.14
201403	H'	1.70 ± 0.30	1.48 ± 0.39	1.83 ± 0.10
	J	0.86 ± 0.06	0.76 ± 0.09	0.80 ± 0.02
	D	0.71 ± 0.16	0.69 ± 0.24	0.83 ± 0.10
201404	H'	1.22 ± 0.16	1.62 ± 0.06	1.58 ± 0.08
	J	0.95 ± 0.01	0.90 ± 0.03	0.80 ± 0.07
	D	0.70 ± 0.06	1.83 ± 1.28	2.75 ± 1.26
201405	H'	1.78 ± 0.41	1.94 ± 0.21	1.53 ± 0.41
	J	0.81 ± 0.09	0.77 ± 0.09	0.92 ± 0.11
	D	0.35 ± 0.05	0.60 ± 0.03	0.71 ± 0.12
201406	H'	0.80 ± 0.18	0.87 ± 0.25	1.21 ± 0.74
	J	0.97 ± 0.05	0.98 ± 0.04	0.99 ± 0.02
	D	0.20 ± 0.06	0.23 ± 0.09	0.41 ± 0.35

CCA 分析结果显示,前两个轴的特征值分别为 0.408 和 0.225,前两轴物种与环境因子的相关系数分别为 0.929 和 0.846,能较好地反映轮虫与环境因子之间的关系。由图 4 可知,水温(T)、溶氧(DO)、总氮(TN)、总磷(TP)和高锰酸盐指数(COD_m)等对轮虫群落结构的影响较大,且第一轴能有效显示季节性变化,第二轴能较好地显示水体的营养状况。角突臂尾轮虫和针簇多肢轮虫位于排序图中部,说明环境变量对它们的影响程度相似,故其成为全年优势种。

3 讨论

3.1 漏湖控藻网围内外和清淤区轮虫种类组成特征

角突臂尾轮虫和针簇多肢轮虫是 3 个区域的全年第一或第二优势种。角突臂尾轮虫是最普通的种类之一,终年可见,是 β - α 中污性水体常

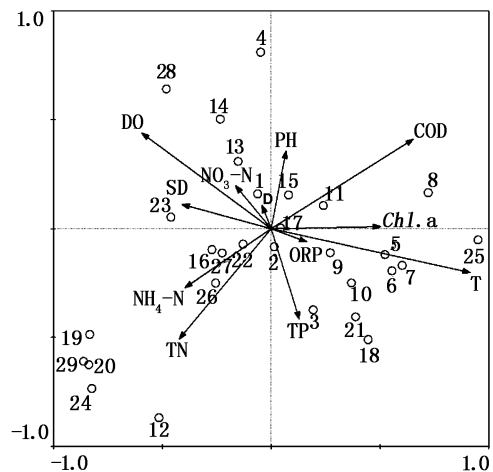


图 4 漏湖轮虫物种与环境因子的 CCA 排序图
Fig. 4 CCA ordination diagram between rotifer species and environmental factors in Lake Gehu

见种类,最适宜生活在有机质较多的天然池塘或浅水湖泊^[14]。数量高峰出现在春季,这与王家

楫^[14]、黄祥飞等^[12]在全国多地的研究结果相符。针簇多肢轮虫是广温性种类^[21],具有可以撕扯和汲取的棒形口器,能吸取多种浮游植物细胞和动物捕食者体内的液体^[22],由于其食物种类丰富,导致其成为全年优势种。李共国等^[10]的研究表明清淤后针簇多肢轮虫为第一优势种,黄祥飞等^[12]的研究表明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,本试验中无论是网围内还是清淤区针簇多肢轮虫都是全年优势种,这与几位学者的研究结果一致。

在 3 个区域中,轮虫种类数呈现夏秋多于秋冬的特点。夏季暗小异尾轮虫(*Trichocerca pusilla*)、纵长异尾轮虫(*T. elongata*)成为优势种,且种群数量比春、冬季多。由图 4 可知,异尾轮属的暗小异尾轮虫、纵长异尾轮虫、刺盖异尾轮虫(*T. capucina*)等是其中与温度正相关性最大的轮虫,这与胡春英等^[12]得出的异尾轮属为暖水种的结论相符。春季轮虫种类数较少,螺形龟甲轮虫与蓴花臂尾轮虫大量繁殖,成为优势种。CCA 分析表明螺形龟甲轮虫与溶氧(DO)有正相关,这与 SELAMI 等^[23]的研究结果相符。蓴花臂尾轮虫,晶囊轮属等在排序图中显示出与总氮(TN)呈正相关,与高锰酸盐指数(COD_{Mn})呈负相关,这与王家楫等^[14]得到的适宜生活在乙型中污染水体的结果相符。

3 个区域中,网围内寡污染指示种的种类数最多,而网围外中污染指示的种类数最多,说明鲢鳙鱼控藻对控制水体富营养化有一定效果^[7]。清淤区寡污染指示种的种类数较网围内少,但寡污染指示种的现存量显著高于其他 2 个区域,说明清淤对水体生态修复具有一定的效果。控藻网围内轮虫现存量低于网围外是由于网围内放养了鲢鳙鱼,鳙鱼的鳃耙结构决定了它喜食浮游动物,虽然其中浮游甲壳类占 90%,轮虫占 10%^[24],但是由于网围内鳙鱼密度高,所以被鳙鱼滤食的轮虫量相对高于网围外。清淤区轮虫的现存量高于网围外是由于清淤后水体中出现的有机污染碎屑构成“污染云团”可直接或通过藻类增殖被轮虫食用^[25]。

3.2 环境变量对轮虫群落结构的影响

轮虫作为浅水湖泊中浮游动物的优势类群之一,群落组成与环境因子密切相关。CCA 分析中水温(T)与两个排序轴的相关系数分别为

0.8493、-0.1708,表明水温是影响轮虫分布最大的环境因子,这与国内外多数学者的观点一致^[4, 13]。此次试验中,暖水种类异尾轮属在夏季达到高峰,春秋季少,冬季无也说明了这一观点。

本试验中轮虫现存量整体呈现出春、秋高于冬、夏的特点,且轮虫生物密度升高的同时水体透明度升高、浮游植物生物量(*Chl. a*)下降,这与都雪等^[26]的研究一致。春季密度达到峰值是由于春季较冬季水温高,轮虫休眠卵的孵化率提高,卵发育时间减少,种群周转加速^[27]。夏季水温较之春季更高,此时轮虫群落增长受溶氧(DO)制约^[23]。因为夏季水温升高藻类易暴发,大量藻类繁殖会引起水体中有机物的呼吸作用加强,且藻类死亡后分解也要消耗水体的溶氧^[28],会使水体溶氧量降低,因此轮虫密度未在夏季达峰值。一般情况下,轮虫密度与叶绿素 a 含量(即浮游植物生物量)呈正相关^[29],但本试验中 *Chl. a* 含量在夏季达到峰值,轮虫密度未达峰值的原因是溇湖夏季微囊藻增多导致 *Chl. a* 的含量高,而微囊藻抑制轮虫的生长和繁殖^[30]。

运用典范分析(图 4)得到 T、DO、TN、TP、COD_{Mn} 等环境变量对轮虫群落结构的影响较大的结论。STEFANIDIS 和 PAPASTERGIADOU^[31]认为在浅水湖泊中,TP 含量是判定水体富营养化程度的一个重要指标,且 TP 升高导致鱼类丰度增加进而影响轮虫群落结构;而 WANG 等^[32]的研究表明轮虫密度与水体无机氮含量呈显著正相关;本试验中多变量相关分析 Pearson 结果表明,总磷(TP)与轮虫密度存在显著的正相关关系($r=0.627, P=0.039 < 0.05$)。CCA 排序图也显示,晶囊轮属等常见于营养丰富水体的种类与 TN、TP 的相关性较高。本试验结果表明环境变量影响轮虫的种类组成、时空分布和群落结构,且 T、DO 和 TN、TP、COD_{Mn} 等是影响轮虫生态特征分布的重要环境因子。

参考文献:

- [1] HERZIG A. The analysis of planktonic rotifer populations: A plea for long-term investigations[J]. *Hydrobiologia*, 1987, 147(1): 163-180.
- [2] ZHAO S Q, FANG J Y, JI W, et al. Lake restoration from impoldering: impact of land conversion on riparian landscape in Honghu Lake area, Central Yangtze [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2003, 95(1): 111-118.

- [3] 黄文钰, 许朋柱, 范成新, 等. 网围养殖对骆马湖水体富营养化的影响[J]. 农村生态环境, 2002, 18(1): 22 - 25.
HUANG W Y, XU P Z, FAN C X, et al. Effect of cage aquaculture on eutrophication in Luoma lake [J]. Rural Ecological Environment, 2002, 18(1): 22 - 25.
- [4] 宋学宏, 柳旭文, 孙丽萍, 等. 阳澄湖网围养殖区水体营养盐的时空变化与水质评价[J]. 水生生态学杂志, 2010, 3(6): 23 - 29.
SONG X H, BING X W, SUN L P, et al. The spatial and temporal changes of nutrients of net - pen aquaculture area in Yangcheng lake and its water quality evaluation [J]. Journal of Hydroecology, 2010, 3(6): 23 - 29.
- [5] 胡莉莉, 赵瑞坤, 张向群, 等. 溇湖网围养殖后对水体富营养化的影响[J]. 水产学报, 1991, 15(4): 291 - 301.
HU L L, ZHAO R K, ZHANG X Q, et al. Monitoring of water eutrophication after development of pen fishculture in Lake Ge Hu [J]. Journal of Fisheries of China, 1991, 15(4): 291 - 301.
- [6] 刘其根, 孔优佳, 陈立侨, 等. 网围养殖对溇湖底栖动物群落组成及物种多样性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2005, 11(5): 566 - 570.
LIU Q G, KONG Y J, CHEN L Q, et al. Effect of pen aquaculture on community structure and species diversity of zoobenthos in Gehu Lake [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2005, 11(5): 566 - 570.
- [7] 陈立婧, 梅榛, 孔优佳, 等. 溇湖控藻网围中鲢鳙对枝角类群落结构的影响[J]. 水产学报, 2013, 37(4): 545 - 555.
CHEN L J, MEI Z, KONG Y J, et al. The influences of silver carp and bighead carp in bio-manipulation pen on the community structure of cladocera in Lake Gehu [J]. Journal of Fisheries of China, 2013, 37(4): 545 - 555.
- [8] 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[J]. 中国环境检测, 2004, 20(2): 10 - 13.
WANG X Y, FENG J, HU M Z. Factor analysis and dynamics of pre-and post-dredging of Nanhu Lake in Changchun [J]. Environmental Monitoring in China, 2004, 20(2): 10 - 13.
- [9] 毛志刚, 谷孝鸿, 陆小明, 等. 太湖东部不同类型湖区底泥疏浚的生态效应[J]. 湖泊科学, 2014, 26(3): 385 - 392.
MAO Z G, GU X H, LU X M, et al. Ecological effects of dredging on aquatic ecosystem in the different regions of eastern Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2014, 26(3): 385 - 392.
- [10] 李共国, 吴芝瑛, 虞左明. 引水和疏浚工程支配下杭州西湖浮游动物的群落变化[J]. 生态学报, 2006, 26(10): 3508 - 3515.
LI G G, WU Z Y, YU Z M. Changes in the structure of zooplankton community in Lake Xihu (West Lake), Hangzhou after water pumping and dredging treatments [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(10): 3508 - 3515.
- [11] 陈伟民, 黄祥飞, 周万平, 等. 湖泊生态系统观测方法 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005: 23 - 35.
CHEN W M, HUANG X F, ZHOU W P, et al. Lake Ecosystem Observation Methods [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2005: 23 - 35.
- [12] 黄祥飞, 胡春英, 伍焯田. 武汉东湖的轮虫 [J]. 水生生物学报, 1985, 9(2): 129 - 143.
HUANG X F, HU C Y, WU Z T. Rotifers in Lake Donghu, Wuhan [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1985, 9(2): 129 - 143.
- [13] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1991: 10 - 252.
ZHANG Z S, HUANG X F. Freshwater Plankton Research Methods [M]. Beijing: Science Press, 1991: 10 - 252.
- [14] 王家楫. 中国淡水轮虫志 [M]. 北京: 科学出版社, 1961.
WANG J J. Freshwater Rotifer Records of China [M]. Beijing: Science Press, 1961.
- [15] KOSTE W, ROTATORI A. Die Rdetiere Mitte Leuro Pasbegm Detvon Max Voigtò [M]. Berlin: Gebrder Borntraeger, 1978: 1 - 4681.
- [16] KOSTE W, SHIE R J. Tasmanian Rotifera; Affinities with the Australian Fauna [M]//MAY L, WALLACE R, HERZIG A. Rotifer Symposium IV. Netherlands: Springer, 1987: 31 - 43.
- [17] KREBS C J. Ecology: The experimental Analysis of Distribution and Abundance [M]. New York: Harper & Row, 1978: 455 - 457.
- [18] 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.
LI G G, YU Z M. A study on the diversity of a zooplankton community in Lake Qiandaohu, Zhejiang [J]. Biodiversity Science, 2001, 9(2): 115 - 121.
- [19] 徐兆礼, 陈亚瞿. 东黄海秋季浮游动物优势种聚集强度与鲳鲈渔场的关系 [J]. 生态学杂志, 1989, 8(4): 13 - 15.
XU Z L, CHEN Y Q. Aggregated intensity of dominant species of zooplankton in autumn in the East China Sea and Yellow Sea [J]. Journal of Ecology, 1989, 8(4): 13 - 15.
- [20] 李树恒. 重庆市大巴山自然保护区蝶类垂直分布及多样性的初步研究 [J]. 昆虫知识, 2003, 40(1): 63 - 67.
LI S H. Vertical distribution and diversity of butterflies in the Dabashan mountain nature reserve, Chongqing [J]. Entomological Knowledge, 2003, 40(1): 63 - 67.
- [21] BERZINS B, PEJLER B. Rotifer occurrence in relation to temperature [J]. Hydrobiologia, 1989, 175(3): 223 - 231.
- [22] SEGERS H. Rotifer: Biology, Ecology and Systematic [M]. Netherlands: Backbuys, 2006: 42.
- [23] SELLAMI I, HAMZA A, MHAM D, et al. Abundance and biomass of rotifers in relation to the environmental factors in

- geothermal waters in Southern Tunisia [J]. *Journal of Thermal Biology*, 2009, 34(6): 267–275.
- [24] 陈少莲, 刘肖芳, 华俐. 鲢、鳙在东湖生态系统的氮、磷循环中的作用[J]. *水生生物学报*, 1991, 15(1): 8–26.
CHEN S L, LIU X F, HUA L. The role of silver carp and bighead in the cycling of nitrogen and phosphorus in the east lake ecosystem [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1991, 15(1): 8–26.
- [25] 濮培民, 王国祥, 胡春华, 等. 底泥疏浚能控制湖泊富营养化吗? [J]. *湖泊科学*, 2000, 12(3): 269–279.
PU P M, WANG G X, HU C H, et al. Can we control lake eutrophication by dredging? [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2000, 12(3): 269–279.
- [26] 都雪, 王齐东, 张超文, 等. 洪泽湖轮虫群落结构及其与环境因子的关系 [J]. *湖泊科学*, 2014, 26(2): 269–276.
DU X, WANG Q D, ZHANG C W, et al. Community structure of rotifers in relation to environmental factors in Lake Hongze [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, 26(2): 269–276.
- [27] PAVÓN-MEZA E L, SARMA S S S, NANDINI S. Combined effects of algal (*Chlorella vulgaris*) food level and temperature on the demography of *Brachionus havanaensis* (Rotifera): a life table study [J]. *Hydrobiologia*, 2005, 546(1): 353–360.
- [28] 胡菊香, 吴生桂, 陈金生, 等. 巢湖富营养化对轮虫的影响研究 [J]. *环境科学与技术*, 2007, 30(12): 16–18, 68.
HU J X, WU S G, CHEN J S, et al. Effect of eutrophication on rotifers in Chaohu Lake [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 30(12): 16–18, 68.
- [29] 杨桂军, 潘宏凯, 刘正文, 等. 太湖不同富营养水平湖区轮虫季节变化的比较 [J]. *湖泊科学*, 2007, 19(6): 652–657.
YANG G J, PAN H K, LIU Z W, et al. Comparative study on seasonal variations in rotifers of the waters with different trophic states in Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2007, 19(6): 652–657.
- [30] 朱津永, 陆开宏, 潘洁慧. 微囊藻水华对淡水浮游动物轮虫和枝角类影响的研究进展 [J]. *中国水产科学*, 2008, 15(2): 367–375.
ZHU J Y, LU K H, PAN J H. Progress in the effect of *Microcystis* bloom on freshwater zooplankton rotifer and cladoceran [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2008, 15(2): 367–375.
- [31] STEFANIDIS K, PAPASTERGIADOU E. Influence of hydrophyte abundance on the spatial distribution of zooplankton in selected lakes in Greece [J]. *Hydrobiologia*, 2010, 656(1): 55–65.
- [32] WANG S B, XIE P, GENG H. The relative importance of physicochemical factors and crustacean zooplankton as determinants of rotifer density and species distribution in lakes adjacent to the Yangtze River, China [J]. *Limnological Ecology and Management of Inland Waters*, 2010, 40(1): 1–7.

Comparison study of community structure of rotifer between inside and outside of bio-manipulation area and dredging area in Lake Gehu

ZENG Tiantian¹, LIU Qigen¹, KONG Youjia², CHEN Lijing¹

(1. Key Laboratory of Exploration and Utilization of Aquatic Genetic Resources, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Fisheries Management Commission of Lake Gehu, Changzhou 213161, Jiangsu, China)

Abstract: From July 2013 to June 2014, in late every month comparative experiment was carried out to study the community structure of rotifer in three regions of Lake Gehu. The three regions include dredging area, inside and outside of bio-manipulation area. Using freshwater plankton survey method to study the relationship between species composition, dominance, standing crop, species diversity of rotifers and water quality parameters. A total of 51 species of rotifer were collected and identified, belonging to 14 families and 22 genera. Dominant species throughout the year were: *Brachionus angularis*, *Polyarthra trigla*, *Keratella valga*, *Polyarthra dolichoptera* and *Filinia longiseta*. Canonical correspondence analysis (CCA) showed that water temperature (T), dissolved oxygen (DO), permanganate index (COD_{Mn}), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) were the main environmental variables affecting the community structure of rotifer. Multiple comparison showed that density of rotifer inside of bio-manipulation pen was significantly lower than that outside of bio-manipulation pen ($P < 0.05$). Inside and outside of bio-manipulation pen extremely significantly lower than dredging area ($P < 0.01$). The annual average density of rotifers: inside of bio-manipulation area [(428 ± 96) ind/L] < outside of bio-manipulation area [(939 ± 220) ind/L] < dredging area [(1216 ± 330) ind/L]. The annual average biomass of rotifers: inside of bio-manipulation area [(0.364 ± 0.100) mg/L] < outside of bio-manipulation area [(0.991 ± 0.316) mg/L] < dredging area [(1.589 ± 0.328) mg/L]. The experiment showed that the silver and bighead carp that control algae have some good effect on eutrophication control, and dredging has certain effect on water ecological restoration.

Key words: Lake Gehu; bio-manipulation pen; dredging area; rotifer; community structure