

阳澄湖养蟹网围内外轮虫群落结构的变化及分析

陈立婧¹, 刘樵¹, 彭自然², 胡忠军², 薛俊增¹, 王武^{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. 上海海洋大学农业部水产种质资源与养殖生态重点开放实验室, 上海 201306)

摘要: 2008年6月至2009年5月对阳澄湖养蟹网围及湖区3组对照点中轮虫群落结构及部分水质特征参数进行调查, 分析了轮虫群落结构与环境变量的关系, 利用多种参数对其水质进行评价。经鉴定, 共采集到轮虫83种, 隶属于12科30属。研究表明, 网围内3个采样点的年平均生物密度及生物量低于湖区3个采样点, 生物密度与水温呈极显著正相关($P < 0.01$)。不同月份受不同环境变量的影响, 除4月份外, 环境变量对生物密度的影响在采样点之间无差异。相似度分析表明, 网围内及相邻湖区的轮虫优势种相似性高。水质分析表明, 6个采样点均为富营养化、 β - α 中污染水体, 东湖网围C₁和中湖网围A₁2采样点程度稍轻, 但6个采样点之间无显著性差异, 这与用卡尔森营养状态指数得出的结果相似。

关键词: 网围养蟹; 轮虫; 群落结构; 阳澄湖

中图分类号: Q 958.15; S 917.4

文献标志码: A

阳澄湖面积为119.04 km², 平均水深为2.12 m, 是太湖平原上第3大淡水湖泊, 对于渔业资源、工农业用水、旅游及洪水控制等起着关键作用, 同时在保护生物多样性及保持生态平衡方面起着不可或缺的作用。由于阳澄湖的水体中含有较高的Ca²⁺、Mg²⁺和Al³⁺, 且65%的底层是表面覆盖淤泥和沙泥的硬质底, 利于鱼、蟹等生长, 2008年阳澄湖中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)的网围养殖年均产量大约有1500 t, 其经济效益超过5亿元。目前, 有关网围养殖对湖泊环境的生态学影响已受到广泛关注, 国内许多专家对此进行研究, 例如东太湖^[1-3]、太湖^[4-5]网围养殖对环境的影响, 但其主要研究都集中在水生植物、理化因子、环境效应及底栖动物等方面, 而对轮虫群落结构的影响却鲜有报道。轮虫是一种对环境理化因子变化敏感的小型浮游动物^[6], 并且由于其个体小、繁殖速度快、是链接微食物环及更高营养级的关键环节^[7], 同时大多物种都是世界种, 地方特有性

低, 因此是评价湖泊水质状态的重要指示生物^[8-9]。国内外学者对轮虫在生物监测中的重要作用做了大量研究^[10-13]。如今, 阳澄湖受到了休闲娱乐和养殖的超负荷利用, 阳澄湖水体富营养化程度逐年增加^[14-15]。但当前对阳澄湖水质的研究报告很少, 未见关于其浮游动物的报道, 本文对阳澄湖中3个网围养蟹水体及其湖区对照点的轮虫群落结构及物种多样性变化进行系统的时空分析, 以期对阳澄湖水生态系统研究、生物多样性保护及生态网围养殖的可持续发展提供基础数据资料及理论依据。

1 材料与方法

1.1 采样点设置

于2008年6月至2009年5月每月下旬采样一次, 共设6个采样点。其中A₁、B₁和C₁是设在阳澄湖中湖及东湖3个网围内的采样点; A(湖中心)、B、C(水资源保护区)是与网围采样点对照的湖区采样点。

收稿日期: 2011-01-26 修回日期: 2011-04-09

资助项目: 财政部公益性行业(农业)科研专题经费(ayhyzx07-045); 上海市重点学科建设项目(S30701); 上海海洋大学博士启动项目

通讯作者: 王武, E-mail: wuwang@shou.edu.cn

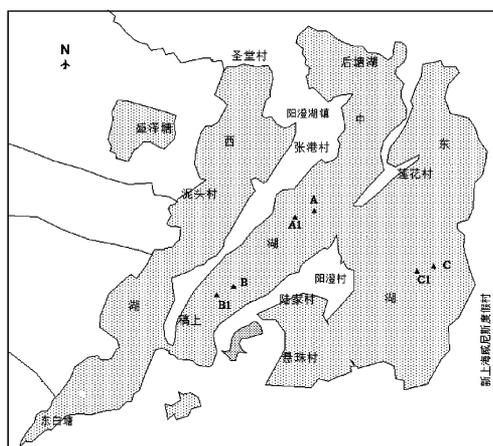


图1 阳澄湖网围内外采样点分布图

Fig.1 Sample sites in Yangcheng Lake

1.2 样品采集

定性样品用25号筛绢制成的浮游生物网拖捞获取。定量样品用5L采水器于距表层0.5m和距底层0.5m水深处各取5L,充分混匀。取1L混合水样现场用鲁哥氏液固定,然后带回实验室经48h沉淀后浓缩至30mL,加4%甲醛溶液保存以备镜检^[16]。每个采样点取3个平行样。轮虫计数采用1mL计数框,在显微镜(Olympus CX21, 100×)下全片计数,取2片计数的平均值作为轮虫密度。轮虫种类的鉴定按KOSTE^[17]分类系统。轮虫生物量采用体积法统计^[18]。用柱状采水器采集湖水1000mL,带回实验室后分析水化指标(TN、TP)和叶绿素a含量,同时现场测量水温、水深、透明度、溶解氧等水质因子。

1.3 数据分析

$$\text{种类优势度}(Y): Y = \frac{N_i}{N} f_i$$

式中, N_i 为第 i 种的个体数, N 为样品中所有种类

的总个体数, f_i 为第 i 种的出现频率。 $Y > 0.02$ 为优势种^[19]。

$$\text{Jaccard 相似性指数}: S_j = c / (a + b - c)$$

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 为两地区所有物种总和^[20]。

多样性指数: Shannon-Wiener 物种多样性指数 (H')^[21]:

$$H' = - \sum_{i=1}^S \left(\frac{N_i}{N} \right) \log_2 \left(\frac{N_i}{N} \right)$$

Margalef 物种丰富度指数 (D):

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

Pielou 物种均匀度指数 (J):

$$J = H' / \ln S$$

式中, N_i 为第 i 种的生物密度, N 为轮虫总生物密度, S 为总物种数。

所有数据采用 SPSS 18.0 软件处理, 并利用 CANOCO 4.5 软件包对轮虫和环境因子的数据进行典型性分析 (CCA), 在环境因子特征变量构成的空间上, 对环境变量和主要轮虫密度排序作图, 实现了轮虫群落与环境因子之间的对应排序。由于轮虫出现种类数低于浮游植物出现种类数, 因此本文中用 CCA 分析所选取的轮虫应满足在 6 个采样点均出现, 且生物密度占总生物密度的 1% 及以上, 为 25 种。

2 结果

2.1 湖泊水质

表 1 为阳澄湖 6 个采样点各自的环境变量及卡尔森营养状态指数年均值。通过总磷、透明度、叶绿素及卡尔森营养状态指数的年平均值可以判定 6 个采样点水体均为富营养水平。多重比较 LSD 分析表明 6 个采样点之间无显著性差异。

表 1 6 个采样点环境变量及卡尔森营养状态指数的年平均值

Tab.1 The annual average of environmental parameters and TSI in 6 sites

环境变量 environmental parameters	A	A ₁	B	B ₁	C	C ₁
水温/°C water temperature	18.47	18.67	18.17	18.63	18.18	18.31
溶解氧/(mg/L) DO	9.61	9.39	9.68	9.15	9.75	9.62
酸碱度 pH	8.62	8.63	8.68	8.25	8.68	8.49
透明度/cm SD	69.88	65.17	55.38	50.71	58.42	55.04
COD _{Mn} /(mg/L)	6.08	6.18	6.01	6.33	6.06	6.04
总氮/(mg/L) TN	2.12	2.91	2.13	1.86	1.67	1.57
总磷/(mg/L) TP	0.59	0.78	0.71	0.56	0.44	0.54
叶绿素 a/(μg/L) Chl. a	25.68	26.71	25.83	24.37	19.16	24.31
卡尔森营养状态指数 TSI	68.98	70.62	70.90	70.24	68.09	70.52

2.2 种类组成及污染指示种

2008年6月至2009年5月阳澄湖网围和湖区6个采样点共采集到轮虫83种,隶属于12科30属。其中异尾轮属和臂尾轮属出现的种类数最多,分别为15种和9种,占总种类数的18.1%和10.7%。除B₂采样点外,其余5个采样点均在夏秋季出现种类数的高峰,冬季种类数最少并且数量相似。各采样点间种类数差异不显著($P>0.05$)。

由表2可知,采样点A、B、C、A₁、B₁和C₁的污染指示种类数分别为39种、35种、38种、41种、29种和34种,均以 β -中污染指示种最多,其百分比分别为46.2%、42.9%、47.4%、46.3%、44.8%和50.0%。采样点C₁中寡污染指示种类数达到该点所有污染指示种类数的20.6%,在所有采样点中比例最高;而A₁采样点中 α - β 中污染指示种类数达到该点所有指示种类数的26.8%,在所有采样点中比例最高。

表2 6个采样点出现的污染指示种
Tab.2 The pollution indicators in 6 sites

		A	A ₁	B	B ₁	C	C ₁
针簇多肢轮虫 <i>Polyarthra trigla</i>	β - α	+	+	+	+	+	+
小多肢轮虫 <i>P. minor</i>	o	+					
真翅多肢轮虫 <i>P. euryptera</i>	o	+					
梳状疣毛轮虫 <i>Synchaeta pectinata</i>	α - β	+	+	+	+	+	+
长圆疣毛轮虫 <i>S. oblonga</i>	β	+		+			+
长三肢轮虫 <i>Filinia longiseta</i>	α	+	+	+	+	+	+
尾三肢轮虫 <i>F. maior</i>	β	+	+	+	+	+	+
顶生三肢轮虫 <i>F. terminalis</i>	α - β		+	+		+	
角三肢轮虫 <i>F. cornuta</i>	o	+		+	+		+
臂三肢轮虫 <i>F. brachiata</i>	o					+	
蒲达臂尾轮虫 <i>Brachionus budapestiensis</i>	β	+	+	+		+	+
角突臂尾轮虫 <i>B. angularis</i>	β - α	+	+	+	+	+	+
萼花臂尾轮虫 <i>B. calyciflorus</i>	β - α	+	+	+	+	+	+
裂足臂尾轮虫 <i>B. diversicornis</i>	β	+	+			+	+
壶状臂尾轮虫 <i>B. urceolaris</i>	β	+	+	+	+	+	+
镰状臂尾轮虫 <i>B. falcatus</i>	β	+	+			+	
剪形臂尾轮虫 <i>B. forficula</i>	β	+	+	+		+	+
矩形臂尾轮虫 <i>B. leydigii</i>	β					+	+
螺形龟甲轮虫 <i>Keratella cochlearis</i>	β	+	+	+	+	+	+
曲腿龟甲轮虫 <i>K. valga</i>	α - β	+	+	+	+	+	+
矩形龟甲轮虫 <i>K. quadrata</i>	α - β	+	+	+	+	+	+
裂痕龟纹轮虫 <i>Anuraeopsis fissa</i>	α - β	+	+	+	+	+	+
暗小异尾轮虫 <i>Trichocerca pusilla</i>	β	+	+	+	+	+	+
刺盖异尾轮虫 <i>T. capucina</i>	o	+	+	+		+	+
圆筒异尾轮虫 <i>T. cylindrica</i>	α - β	+	+	+	+	+	+
纵长异尾轮虫 <i>T. elongata</i>	o	+	+	+		+	+
长刺异尾轮虫 <i>T. longiseta</i>	α - β	+	+	+		+	
罗氏异尾轮虫 <i>T. rousseleti</i>	o			+			
细异尾轮虫 <i>T. gracilis</i>	o				+		
等刺异尾轮虫 <i>T. similis</i>	β	+	+	+	+	+	+
前节晶囊轮虫 <i>Asplanchna priodonta</i>	β	+	+	+	+	+	+
盖氏晶囊轮虫 <i>A. girodi</i>	α - β	+	+			+	
跳跃无柄轮虫 <i>Ascomorpha. saltans</i>	o	+	+	+		+	+
没尾无柄轮虫 <i>A. ecaudis</i>	o	+	+		+	+	+
红眼旋轮虫 <i>Philodina erythrophthalma</i>	β	+	+	+	+	+	+
长足轮虫 <i>Rotaria reptunia</i>	α			+			+
尖爪单趾轮虫 <i>Monstyla cornuta</i>	β			+	+	+	

续表 2

		A	A ₁	B	B ₁	C	C ₁
尖趾单趾轮虫 <i>M. closterocerca</i>	β	+	+			+	+
精致单趾轮虫 <i>M. elachis</i>	β		+				
尖角单趾轮虫 <i>M. priodonta</i>	o		+				
爪趾单趾轮虫 <i>M. unguitata</i>	β		+				
蹄形腔轮虫 <i>Lecane unguolata</i>	o-β		+				
盘状鞍甲轮虫 <i>Lepadella patella</i>	o-β	+	+			+	
钩状狭甲轮虫 <i>Colurella uncinata</i>	o			+			
钝角狭甲轮虫 <i>C. obtusa</i>	o						+
钳形猪吻轮虫 <i>Dicranophorus forcipatus</i>	o				+		
凸背巨头轮虫 <i>Cephalodella gibba</i>	β				+		
大肚鬚足轮虫 <i>Euchlanis dilatata</i>	o-β		+				
小链巨头轮虫 <i>Cephalodella catellina</i>	β	+	+	+	+	+	+
尖刺间盘轮虫 <i>Dissotrocha aculeata</i>	β	+	+	+	+	+	+
奇异六腕轮虫 <i>Hexarthra mira</i>	β	+	+	+	+	+	+
沟痕泡轮虫 <i>Pompholys sulcata</i>	β	+	+				
扁平泡轮虫 <i>P. complanata</i>	β	+	+	+	+	+	+
独角聚花轮虫 <i>Conochilus unicornis</i>	o	+		+	+	+	+
椎尾水轮虫 <i>Epiphanes senta</i>	α	+	+		+		
多态胶鞘轮虫 <i>Collotheca ambigua</i>	o		+				
无常胶鞘轮虫 <i>C. mutabilis</i>	o			+	+		
蔽水胶鞘轮虫 <i>C. pelagica</i>	o					+	

注: o 为寡污染指示种; o-β 为中污染指示种; β 为中污染指示种; α 为中污染指示种。

Notes: o is oligosaprobic; o-β is mesosaprobic; β is mesosaprobic; α is mesosaprobic.

2.3 优势种

从各采样点全年优势种组成看,网围内 3 采样点间相似性指数很高,均超过 0.83;中湖湖区采样点 A 和 B 的相似性达到 0.86;网围及湖区对照点 B 和 B₁ 之间的相似度也达到 0.86。所有采样点全年均以针簇多肢轮虫 (*Polyarthra trigla*) 和螺形龟甲轮虫 (*Keratella cochlearis*) 为第一或第二优势种,优势度总和的范围为 0.44 ~ 0.53,其中 B 和 B₁ 2 个采样点中针簇多肢轮虫优势度最大(0.28 和 0.34),而 A、A₁、C 和 C₁ 4 个采样点中螺形龟甲轮虫的优势度最大,为 0.26、0.27、0.30 和 0.31。Pearson 相关性显示二者在各采样点中生物密度的月份变化与其对应的轮虫总生物密度

的月份变化呈极显著性正相关关系 ($r = 0.584$, $P = 0.000$, $n = 70$; $r = 0.626$, $P = 0.000$, $n = 64$)。

从表 3 可知各采样点在春、夏、秋三季的主要优势种(优势度 > 0.10) 几乎相同,但在冬季时仅针簇多肢轮虫在各采样点均为第一优势种,而第二优势种发生变化,各网围内采样点与其对应的湖区采样点具有相同的第二优势种,即 A 与 A₁ 的第二优势种为疣毛轮属未定种一种、B 与 B₁ 的第二优势种为萼花臂尾轮虫、C 与 C₁ 的第二优势种为螺形龟甲轮虫。Pearson 相关性指出异尾轮属未定种一种在各点中生物密度的月份变化与其对应的温度的月份变化呈极显著正相关 ($r = 0.615$, $P = 0.000$, $n = 71$)。

表 3 6 个采样点主要优势种季节变化
Tab. 3 Seasonal variation of main dominant species in 6 sites

	春 spring	夏 summer	秋 autumn	冬 winter
针簇多肢轮虫 <i>Polyarthra trigla</i>	all sites	A, B, C, A ₁ , C ₁	all sites	all sites
螺形龟甲轮虫 <i>Keratella cochlearis</i>	all sites		all sites	C, C ₁
异尾轮属未定种一种 <i>Trichocera</i> sp.		all sites		
疣毛轮属未定种一种 <i>Synchaeta</i> sp.	A ₁			A, A ₁
萼花臂尾轮虫 <i>Brachionus calyciflorus</i>			B, B ₁	
曲腿龟甲轮虫 <i>Keratella valga</i>		B ₁		

2.4 轮虫的生物密度和生物量

阳澄湖轮虫 2008 年 6 月至 2009 年 5 月网围内 3 个采样点年平均生物密度和生物量分别为 3 590/L 和 2.46 mg/L;湖区 3 个采样点年平均生物密度和生物量分别为 2 969/L 和 1.99 mg/L,从总体数量上看湖区大于网围内。6 个采样点的生物密度的排序为 $A_1(4\ 762 \pm 4\ 049)$ 、 $A(4\ 513 \pm 3\ 316)$ 、 $C(3\ 533 \pm 1\ 833)$ 、 $B(2\ 645 \pm 1\ 794)$ 、 $C_1(2\ 616 \pm 1\ 469)$ 和 $B_1(1\ 529 \pm 1\ 294)$ /L。6 个采样点的生物量的排序为 $A(3.202 \pm 2.111)$ 、 $A_1(3.031$

$\pm 2.331)$ 、 $B(2.081 \pm 1.452)$ 、 $C(2.068 \pm 1.324)$ 、 $C_1(1.630 \pm 0.783)$ 和 $B_1(1.302 \pm 1.407)$ mg/L。从各采样点季节变化来看,轮虫生物密度和生物量高峰出现的季节并不相同,中湖 A、 A_1 、B、 B_1 4 个点和东湖网围内的采样点出现在春季,而东湖湖区采样点出现在夏季。多重比较显示, B_1 的生物密度和 A、 A_1 的生物密度呈极显著差异 ($P=0.010$; $P=0.005$);同时, B_1 的生物量和 A、 A_1 的生物量呈显著性差异 ($P=0.012$; $P=0.022$), C_1 和 A_1 的生物量之间也呈现显著性差异 ($P=0.036$)。

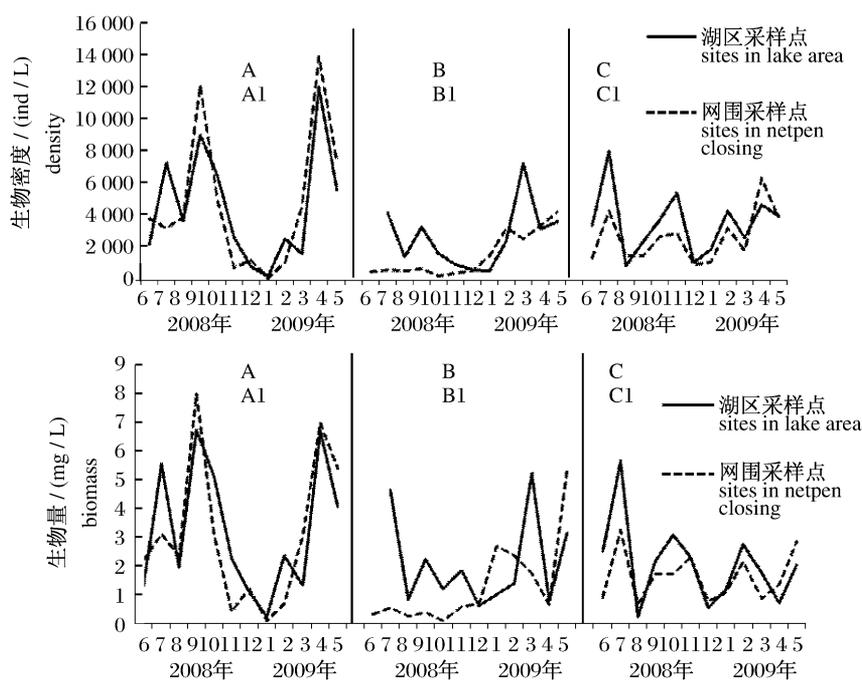


图2 网围内及湖区 6 采样点轮虫生物密度和生物量周年变化 (B 采样点六月份样品缺失)

Fig.2 Monthly average density and biomass of Rotifer in 6 sites (sample of B in June was lost)

2.5 轮虫群落的物种多样性指数

阳澄湖湖区 3 个采样点的轮虫群落的 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数和 Pielou 均匀度指数的年平均值分别为 (1.796 ± 0.594) 、 (1.592 ± 0.669) 和 (0.709 ± 0.159) ;网围内 3 个采样点分别为 (1.686 ± 0.594) 、 (1.394 ± 0.675) 和 (0.719 ± 0.169) 。从图 3 可知,除秋季 B_1 点外其他 5 个采样点 Shannon-Wiener 多样性指数和 Margalef 丰富度指数均为夏秋季高而冬春季低。东湖网围内除春季外 Shannon-Wiener 指数均高于东湖湖区采样点,而网围内 Margalef 指数四季均低于湖区;中湖网围内采样点 A_1 的两指数在夏秋季高于、冬春季低于与其对应的湖区采样点 A;中湖网围内采样点

B_1 的两指数在四季均低于与其相对应的湖区采样点 B。各采样点间 Shannon-Wiener 多样性指数差异不显著; B_1 与 A、B 的 Margalef 丰富度指数差异显著 ($P=0.016$; $P=0.023$)。网围内外 6 个采样点的卡尔森营养状态指数与其对应的均匀度指数呈显著负相关关系 ($r = -0.244$, $P = 0.040$, $n = 71$),但与 Shannon-Wiener 多样性指数没有明显相关性。

2.6 阳澄湖轮虫与不同环境变量的典型性分析 (CCA)

表 4 为 CCA 分析中所选取轮虫的物种代码。在 CCA 分析前,为消除物种丰富度极端值对分类的影响,对环境变量进行 $\log(x+1)$ 的转换,使其趋于正态分布。

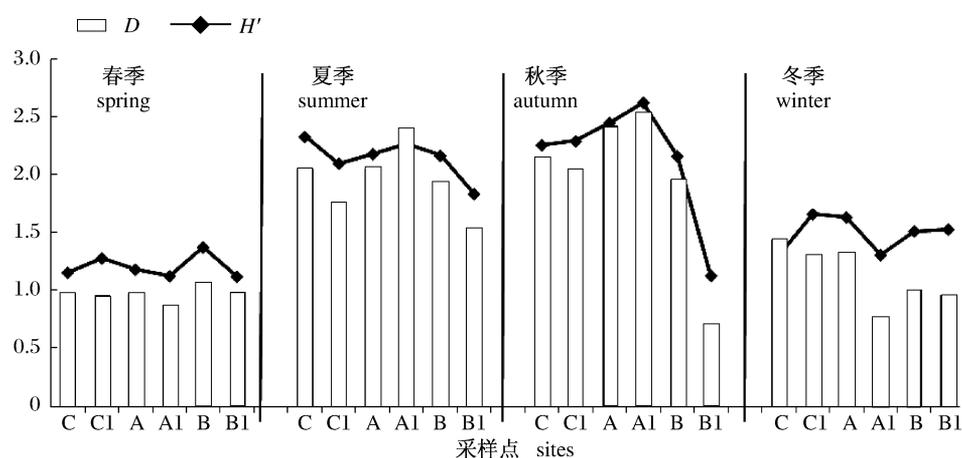


图3 6 采样点多样性指数季节变化

Fig. 3 Seasonal variation of species diversity indices in 6 sites

表4 CCA 分析中选取轮虫的物种代码

Tab. 4 The codes of species in CCA

代码 code	物种 species	代码 code	物种 species	代码 code	物种 species
a1	针簇多肢轮虫 <i>Polyarthra trigla</i>	c1	壶状臂尾轮虫 <i>Brachionus urceus</i>	m	裂痕龟纹轮虫 <i>Anuraeopsis fissa</i>
a2	疣毛轮属未定种一种 <i>Synchaeta</i> sp.	c2	蒲达臂尾轮虫 <i>B. budapestiensis</i>	f	前节晶囊轮虫 <i>Asplanchna priodonta</i>
a3	梳状疣毛轮虫 <i>S. pectinata</i>	c3	角突臂尾轮虫 <i>B. angularis</i>	g	小链巨头轮虫 <i>Cephalodella catellina</i>
b1	长三支轮虫 <i>Filinia longiseta</i>	c4	萼花臂尾轮虫 <i>B. calyciflorus</i>	h	红眼旋轮虫 <i>Philodina erythrophthalma</i>
b2	尾三支轮虫 <i>F. major</i>	c5	剪形臂尾轮虫 <i>B. forficula</i>	i	尖刺间盘轮虫 <i>Dissotrocha aculeata</i>
d1	螺形龟甲轮虫 <i>Keratella cochlearis</i>	e1	暗小异尾轮虫 <i>Trichocerca pusilla</i>	j	独角聚花轮虫 <i>Conochilus unicornis</i>
d2	曲腿龟甲轮虫 <i>K. valga</i>	e2	圆筒异尾轮虫 <i>T. cylindrica</i>	k	扁平泡轮虫 <i>Pompholyx complanata</i>
d3	矩形龟甲轮虫 <i>K. quadrata</i>	e3	等刺异尾轮虫 <i>T. similis</i>	l	奇异六腕轮虫 <i>Hexarthra mira</i>
		e4	异尾轮属未定种一种 <i>Trichocera</i> sp.		

第一、第二排序轴的特征值分别为 0.285 和 0.099;环境因子轴与物种排序轴之间的相关系数分别为 0.921 和 0.819;物种变异累计百分数分别为 21.8% 和 29.4%;物种—环境变异累计百分数分别为 56.5% 和 76.2%。

将阳澄湖水体 8 个环境变量对轮虫生物密度进行 CCA 分析。图 4 排序结果表明,温度、总磷和叶绿素对轮虫群落结构影响较大,而 pH 值影响最小。6 个采样点 12 个月的 72 组数据被分为 3 部分:所有采样点的 5、9、10 月份轮虫生物密度与透明度正相关程度最大;所有站点的 6、7、8 月份轮虫生物密度与温度、叶绿素正相关程度最大;所有采样点的 1、2、3、11、12 月份轮虫生物密度与总磷和溶氧正相关程度最大。而 6 个采样点 4 月份的数据呈现另外一种规律:A 和 A₁ 中轮虫生物密度与叶绿素 a 正相关程度最大;B 和 B₁ 轮虫生物密度与总磷正相关程度最大;环境变量对 C 和 C₁ 轮虫生物密度无显著影响。

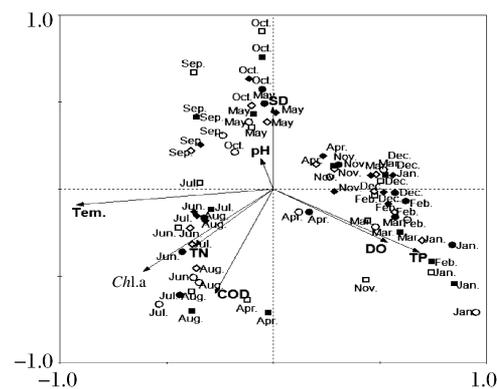


图4 阳澄湖轮虫采样点与环境变量的 CCA 排序
Fig. 4 CCA ordination diagram of rotifer communities between the sites and environmental variables

●: A; ○: A₁; ■: B; □: B₁; ◆: C; ◇: C₁.

根据阳澄湖筛选的轮虫种类与 8 个环境变量,进行种类与采样点的 CCA 排序(图 5)。结果表明,温度对轮虫的影响最大,暖水种有异尾轮

属、裂痕龟纹轮虫、奇异六腕轮虫均与温度呈较大的正相关性;冷水种有矩形龟甲轮虫、疣毛轮属则在温度箭头的反方向,与温度呈较大的负相关性。叶绿素 a、总氮和 COD_{Mn} 的影响也相对较大。螺形龟甲轮虫和针簇多肢轮虫分布在坐标轴中间,8 种环境变量对其影响程度相似,这也印证了前面所述的该两种轮虫在所有采样点中均为全年优势种。

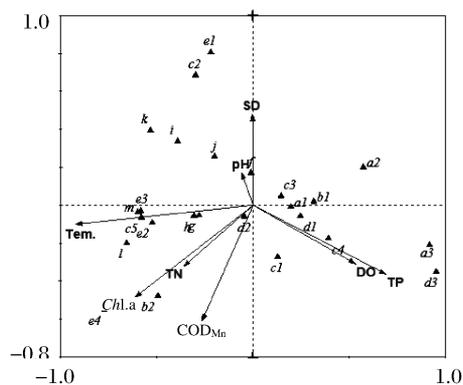


图5 阳澄湖轮虫种类与环境变量的 CCA 排序

Fig.5 CCA ordination diagram of rotifer communities between the species and environmental variables

3 讨论

3.1 优势种的时空动态变化

针簇多肢轮虫和螺形龟甲轮虫在 6 个采样点中均为各站点全年的第一或第二优势种,并且针簇多肢轮虫在各采样点的四季中均为主要优势种。有研究表明,针簇多肢轮虫是一种广温性轮虫^[22],它可以适应较宽的温度范围。当温度升高,食物变得充足,其生物密度也会同时增长。此外,针簇多肢轮虫的咀嚼器为杖形,可进行撕裂和吮吸行为,以此获得各种植物细胞内部的液体^[23],因此针簇多肢轮虫的食物种类丰富,加之广温性的特点,使其成为全年优势种。螺形龟甲轮虫成为全年优势种的原因可能为(1)可以在食物浓度很低的情况下生存^[24-25];(2)有不同的变种,两者可交替出现。例如无棘刺变种(*K. cochlearis tecta*),可以在富营养水体中大量存在^[26],而有棘刺变种(*K. cochlearis cochlearis*)则可以在冬季冷水中出现^[27],其棘刺是为了防御捕食者^[26]。

从优势种的季节变化来看,春秋两季 6 个采

样点的优势种前两位仍是针簇多肢轮虫和螺形龟甲轮虫,而夏冬季却有不同。夏季异尾轮属未定种一种取代螺形龟甲轮虫成为各采样点第一或第二优势种,这与温度有关。SPSS 中相关性指数指出,异尾轮属未定种一种与温度呈极显著正相关关系,CCA 也表明异尾轮属是所有 25 种被选取的种类中与温度正相关最大的轮虫,这与黄祥飞^[28-29]等得出的异尾轮属为暖水种的结论相符。冬季 6 个采样点的第一优势种均为针簇多肢轮虫,但第二优势种却随不同网围内和湖区采样点的变化而变化。大多数疣毛轮属适应冷水条件^[22],是冷水种,因此有条件成为冬季优势种;同时螺形龟甲轮虫、疣毛轮属未定种一种和萼花臂尾轮虫与溶氧(DO)有正相关性,说明温度和溶氧是影响冬季阳澄湖各点轮虫的优势种分布的主要原因,这与 ARORA 等^[11]对 Yamuna (Delhi) 河、SELLAMI 等^[16]对 Southern Tunisia 水体的研究结果一致。

6 个采样点之间全年优势种的 S_j 相似性指数并不相同。相邻湖区两采样点的优势种相似性很高,可能是由于网围和湖区水体未完全分开,相邻的 2 个采样点有少量的水交换;不同网围之间的优势种相似性很高,然而东湖湖区采样点与中湖网围内两采样点的优势种相似性很低,这是由于轮虫所在的生境不同所造成的。网围内由于养蟹而种植大量水草,如伊乐藻、苦草等沉水植物,不仅为河蟹提供了食物,还净化水体,同时还为不同的轮虫提供了有利的微环境^[11]及影响作为浮游动物重要食物来源的浮游植物^[30];东湖湖区采样点周围虽然也有许多水草,但大多都是菱角或是金鱼草,为浮水植物;而中湖湖区采样点水草很少,因此造成不同生栖地的轮虫优势种均不相同。

3.2 环境因子对生物密度的影响

国内外学者^[31-32]将影响轮虫种群结构的因素分为生物因子、非生物环境因子及食物,其中生物因子包括桡足类和鱼类等对轮虫的捕食、枝角类与轮虫的竞争和机械损伤;非生物环境因子包括温度、溶氧、叶绿素 a、总磷等。不同种类的轮虫由于自身咀嚼器不同^[7,32]或是对某种营养范围或极端营养条件有偏好^[33],因此食物不同,包括有机碎屑、微藻及粒径相对较大的颗粒藻类,本次调查得出的全年优势种针簇多肢轮虫和螺形龟甲轮虫不选择颗粒很小的食物,如细菌等^[30],而其

他大部分种类均为滤食性物种,因此浮游植物是其主要食物来源。

从季节来看,3组网围内及湖区对照采样点的轮虫生物密度变化趋势互不相同,但6个采样点轮虫生物密度均在2008年7月和2009年4月(B在3月)有一个上升。阳澄湖轮虫采样点与环境变量的CCA排序图指出影响这两个月的环境因子并不相同。7月6个采样点均主要受叶绿素a和温度影响。Pearson相关性指出,温度和叶绿素呈极显著正相关关系($r=0.596, P=0.000, n=71$),温度升高,叶绿素a含量增大。叶绿素a含量是表征藻类现存量的重要指标之一,直接反应了藻类的数量变化^[28]。藻类增多代表轮虫的食物密度增加,因此轮虫生物密度上升。虽然8月份的水温和叶绿素a含量均很高,但由于8月份的藻类以微囊藻(*Microcystis sp.*)为主,而大多数轮虫由于其自身生理及行为学原因或由于微囊藻通过增大种群规模或生成水面泡沫而不食用微囊藻^[34]。不同的环境变量分别影响4月份3组网围及湖区对照采样点,4月份6个采样点的温度均上升至20℃,尽管不同采样点受到的环境变量不同,但其结果均为造成螺形龟甲轮虫种群生物密度的激增,6个点4月份的螺形龟甲轮虫生物密度各占其总生物密度的80%以上,而在5月份生物密度迅速下降,甚至未在B和B₁2个采样点检测到。MARIA等^[24]在研究食物限制与轮虫季节性群落数量下降时发现螺形龟甲轮虫在5、6月份生物密度激增,而在夏季直至秋季生物密度均很低,其研究认为是食物限制产生的影响。A和A₁、B和B₁采样点与其研究结论相似,4采样点的叶绿素a均在4月急速增加而5月骤然降低,采样点与环境变量的CCA排序图也证明,4月份该两点受到叶绿素a和总磷的影响最大。

从网围内外生物密度对比来看,除A₁采样点的轮虫年平均生物密度略高于A的轮虫年平均生物密度外,其余2个网围内轮虫年平均生物密度均低于与其对应的湖区采样点的轮虫年平均生物密度。网围内及湖区的生物密度差异可能与养殖活动有关。在每年冬季,网围内无养殖活动,各网围及湖区对照采样点的轮虫生物密度相似;2月底至3月份投放扣蟹,并采用二级放养技术将蟹养殖在暂养区内直至5月中旬,期间3月份投放颗粒性饲料、4月份将网围内的水草围起来、5

月份投放动物性饵料,导致网围内水体食物丰富同时又有良好的栖息地,从而4、5月份网围内轮虫生物密度普遍略高于湖区轮虫生物密度。6—9月温度升高,因此投喂饲料要控制,以植物性饵料为主,即水草、玉米等。水草不仅是河蟹的饲料,还是河蟹栖息、避敌、蜕壳的场所,同时又可以增加水中的溶解氧,净化水体,维护良好的水域环境^[7,35]。伊乐藻对养殖污水中的N、P等物质有着较好的净化作用^[36],因此定期收割水草可以保持网围内水体质量,从而这期间网围内轮虫生物密度低于相对应的湖区轮虫生物密度。9月份为河蟹的营养强化阶段,10月份收获。收获时船只的频繁作业、人为的捕捞行为对轮虫种群产生影响,使其生物密度低于湖区轮虫生物密度。不同网围内轮虫生物密度的差异主要取决于养殖期间的水草投放量、饵料投喂是否科学。通过对网围及湖区轮虫生物密度的对比,没有发现传统研究中^[9-10,37]关于网围养殖导致水质变差的结论,而与吴庆龙等^[37]对东太湖河蟹网围养殖区内环境效应、凌云等^[38]对阳澄湖河蟹网围养殖区内浮游细菌的调查结论相同,虽然投饵有可能增加了水体中的氮、磷,但由于采用了生态养殖模式,网围养蟹对网围水质及浮游生物影响不大,网围内与湖区差异已不明显。

3.3 水质评价

轮虫可以作为水体的营养状况的指示生物,这一观点得到国内外学者的研究印证^[39-42]。尽管不同学者对轮虫指示种有不同的观点,但对大多数指示种的看法是一致的。在对阳澄湖网围内及湖区水体调查后发现,一般认为的富营养化指示种在A及A₁中均有发现,而其余4点除沟痕泡轮虫外也都有出现,并且在不同季节成为各点的优势种。因此这6个采样点均为富营养化水体,且富营养化程度相似,这与卡尔森营养状态指数所得出的结论一样。

轮虫同时也是水体污染程度的良好指示种根据通过SLÁDECEK^[43]对Czechoslovakia及周边国家620种轮虫调查得出的污染指示种列表,对阳澄湖的83种轮虫进行分类,结果发现,6个网围内及湖区采样点均为β-中污染指示种占主要优势、C₁的寡污染指示种所占比例在6个采样点中最高、A₁的α-β中污染指示种的总和在6个采样点最高,证明6个采样点水体均达到β-中污

染程度,而 C_1 及 A_1 的污染程度较轻。

也有研究认为在一定范围内,水体富营养化会降低物种多样性及均匀性^[44-45],同时也有学者调查得出在一些富营养程度高的水体中多样性指数较高^[31]。通过阳澄湖的轮虫多样性指数与卡尔森营养状态指数相关性分析证明多样性指数与水质之间的关系是复杂的,不仅取决于水体营养化程度,同时还与其他生物及非生物因子有关。单将 Shannon-Wiener 多样性指数作为一个参考指标来看,其值在 <1 时为重污染;在 $1-2$ 时 α -中污染;在 $2-3$ 时为 β -中污染;在 >3 时为寡污染。因此,阳澄湖网围内及湖区 6 个采样点水体均达到 α -中污染程度,而 C_1 和 A_1 的年均值较高,这与用污染指示种得出的结论相似。

感谢上海海洋大学吴淑贤、蔡骏、马俊等同学参加的部分野外调查及室内试验。同时也感谢阳澄湖渔政站在调查期间所提供的船只及阳澄湖水文数据。

参考文献:

- [1] 吴庆龙,陈开宁,胡耀辉,等. 东太湖河蟹网围养殖的环境效应[J]. 农业环境保护, 2001, 20(6): 432-434.
- [2] 何俊,谷孝鸿,刘国锋. 东太湖网围养蟹效应及养殖模式优化[J]. 湖泊科学, 2009, 21(4): 523-529.
- [3] 杨清心,李文朝,俞林,等. 东太湖围栏养殖及其环境效应[J]. 湖泊科学, 1995, 7(3): 256-261.
- [4] 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.
- [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): 291-300.
- [6] ARORA J, MEHRA N K. Seasonal dynamics of rotifers in relation to physical and chemical conditions of the river Yamuna (Delhi), India [J]. Hydrobiologia, 2003, 491: 101-109.
- [7] SEGERS H. Rotifera: Biology, ecology and systematic [M]. Netherlands: Backbuys, 2006: 4.
- [8] JEPPESEN E, JENSEN P J, et al. Trophic dynamics in turbid and clear water lakes with special emphasis on the role of zooplankton for water clarity [J]. Hydrobiologia, 1999, 408/409: 217-231.
- [9] SCHEFFER M. The effect of aquatic vegetation on turbidity: how important are the filter feeders [J]. Hydrobiologia, 1999, 408/409: 307-316.
- [10] 陈立婧,顾静,彭自然,等. 溇湖轮虫群落结构与水质生态学评价[J]. 动物学杂志, 2008, 43(3): 7-16.
- [11] 李共国,虞左明. 千岛湖轮虫群落结构及水质生态学评价[J]. 湖泊科学, 2003, 15(2): 169-175.
- [12] 杨桂军,潘宏凯,刘正文. 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.
- [13] SELLAMI I, HAMZA A, MHAMDI M A. Abundance and biomass of rotifers in relation to the environmental factors in geothermal waters in Southern Tunisia [J]. Journal of Thermal Biology, 2009, 34: 267-275.
- [14] 骆东玲. 浅水湖泊富营养化的机理与应对策略—以阳澄湖为例[J]. 农业环境与发展, 2007, 3: 14-18.
- [15] 潘红玺,吉磊. 阳澄湖若干水质资料的分析与评价[J]. 湖泊科学, 1997, 9(3): 187-190.
- [16] 张觉民,何志辉. 内陆水域渔业自然资源调查手册 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1991.
- [17] KOSTE W. Rotatoria. die rdertiere mitteleuropas begründet von Max Voigt [M]. Berlin: Gebruder Borntraeger, 1978.
- [18] 黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1999, 72-79.
- [19] 王云龙,袁琪,沈新强. 长江口及邻近水域春季浮游植物的生态特征[J]. 中国水产科学, 2005, 12(3): 301.
- [20] 谢桂林,傅荣怒,刘建丽,等. 菏泽牡丹园土壤甲螨群落特点研究[J]. 生态学报, 2004, 24(4): 695.
- [21] KREBS C J. Ecology: The experimental analysis of distribution and abundance [M]. New York: Harper & Row, 1978: 455-457.
- [22] BERZINS B, PEJLER B. Rotifer occurrence in relation to temperature [J]. Hydrobiologia, 1989b, 15: 223-231.
- [23] WALZ N. Comparative population dynamics of the rotifers *Brachionus angularis* and *Keratella cochlearis* [J]. Hydrobiologia, 1987, 147: 209-213.
- [24] MARIA J G, THOMAS M F. Food limitation and seasonal population declines of rotifers [J]. Oecologia, 1992, 89: 560-566.
- [25] CARMEN D M, MODENUTTI, B E. Keratella distribution in North Patagonian lakes (Argentina) [J]. Hydrobiologia, 1996, 321: 1-6.
- [26] WEN X L, XI Y L, QIAN F P, et al. Comparative

- analysis of rotifer community structure in five subtropical shallow lakes in East China: role of physical and chemical conditions[J]. *Hydrobiologia*, 2011, 661:303-316.
- [27] 黄样飞,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.
- [28] 陈立婧,顾静,刘其根,等. 上海崇明岛明珠湖轮虫群落结构[J]. 应用生态学报,2009,20(12):3060-3062.
- [29] 陈光荣,刘焱,应文晔,等. 惠州西湖浮游动物群落对生态恢复的响应[J]. 安徽农业科学,2007,35(6):1662-1663.
- [30] GRUNDSTRON R. Changes in the population dynamics of *Keratella cochlearis*(Gosse), *Kellicottia longispina*(Gosse) and *Polyarthra vulgaris* Carlin in a fertilized enclosure[J]. *Hydrobiologia*, 1987, 147: 215-219.
- [31] 郭凯,赵文,殷守仁,等. 北京官厅水库轮虫群落结构与水体富营养化状况[J]. 湖泊科学,2010,22(2):256-264.
- [32] 王晓辉,望甜,林秋奇. 亚热带抽水型水库中轮虫的丰度与动态[J]. 生态科学,2008,27(5):402-405.
- [33] PEJLER B. Zoolanktic indicators of trophy and their food[J]. *Hydrobiologia*, 1983, 101:111-114.
- [34] ARORA J, MEHRA N K. Seasonal dynamics of zooplankton in a shallow eutrophic, man-made hyposaline lake in Delhi (India): role of environmental factors[J]. *Hydrobiologia*, 2009, 626: 27-40.
- [35] 徐学峰. 水库网围生态养殖无公害河蟹技术[J]. 北京水产,2003,3:34-36.
- [36] 高光. 伊乐藻、轮叶黑藻净化养鱼污水效果试验[J]. 湖泊科学,1996,8(2):184-187.
- [37] 吴庆龙,陈凯宁,高光,等. 大水面网围精养对水环境的影响极其对策[J]. 水产学报,1995,19(12):343-348.
- [38] 凌云,王峤淑,顾佳洁,等. 阳澄湖湖区与围网养殖区浮游细菌群落结构变化研究[J]. 湖北农业科学,2010,49(8):1942-1945.
- [39] 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.
- [40] 王丽卿,程婧蕾,郑小燕,等. 淀山湖轮虫多样性及生物量时空变化[J]. 水产学报,2008,32(6):907-912.
- [41] ARORA H C. Rotifera as indicators of trophic nature of environments [J]. *Hydrobiologia*, 1966, 27: 146-158.
- [42] MAEMETS A. Rotifers as indicators of lake types in Estonia[J]. *Hydrobiologia*, 1983, 104:357-361.
- [43] SLÁDECEK V. Rotifers as indicators of water quality[J]. *Hydrobiologia*, 1983, 100:169-201.
- [44] 钱方平,席贻龙,温新利. 湖泊富营养化对轮虫群落结构及物种多样性的影响[J]. 生物多样性,2007,15(4):344-355.
- [45] 熊金林,梅兴国,胡传林. 湖北四湖泊营养类型与轮虫群落的关系[J]. 动物学杂志,2003,33(6):8-13.

The variation and analysis of rotifer community structure in and out of crab-net-pen closing in the Yangcheng Lake

CHEN Li-jing¹, LIU Qiao¹, PENG Zi-ran², HU Zhong-jun², XUE Jun-zeng¹, WANG Wu^{1*}

(1. Ministry of Education Key Laboratory of Exploration and Utilization of Aquatic Genetic Resources,

Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Ministry of Agriculture Key Laboratory of Aquatic Genetic Resources and Aquaculture Ecology,

Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Rotifer species are cosmopolitan and the endemism is very low. They are highly susceptible to physical and chemical changes in their environment due to their small size and permeable integument, and they are known to be an important link between the microbial loop and higher trophic levels, so rotifer is an excellent indicator of the water status of a lake. Yangcheng Lake is one of the most important freshwater lakes in China. The total area of the lake is 119.04 km², aquatic plants are dense providing a food source for crabs and the lake yields high numbers of the Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*). Currently, although the ecological effects of the pen culture on the environment have received extensive attention, expert mainly focus on aquatic plants, physical and chemical factors, environmental effects and benthic animals, but rarely reported on the rotifer community structures. To date, no studies have been done on rotifers in Yangcheng Lake in detail. Thus, the aim of this study was to analyze the spatial and temporal variation of rotifer community structure and species diversity in net-pen closing and lake areas, in order to provide the data and theoretical basis for aquatic ecosystem of Yangcheng Lake, biodiversity conservation and sustainable development of ecological-pen-culture. Rotifer community structure and several feature parameters of water quality were investigated in 3 controlled sites in net-pen closing and lake areas of Yangcheng Lake, during June 2008 to May 2009. The relationship of rotifer community structure and environmental parameters was analyzed, various parameters were used to assess the water quality. The totals of 83 rotifer species were collected, belonging to 30 genera and 12 families. The study showed that the annual average density and biomass of 3 sites in net-pen closing were lower than those in lake areas, density exhibited significant positive correlations with temperature. The CCA biplot of samples and environmental variables showed that rotifer assemblages followed a water temperature gradient, suggesting that water temperature was the most important factor in determining seasonality, but the pH was the lowest. Different months were affected by different environmental parameters, there was no differentia in sites except April. The CCA biplot of species and environmental variables shows that the warm-stenotherm species like *Trichocerca* sp., *Anuraeopsis fissa*, *Hexarthra mira* in the down-left quadrant have strong positive correlations; the cold-stenotherm species like *Keratella quadrata*, *Synchaeta* sp. in the top-right have strong negative correlations; the eurytherm species like *Polyarthra trigla* and *Keratella cochlearis* are in the middle of the biplot, which support these two species are dominant ones in a year. According to the Jaccard similarity index (S_j), the high similarity in dominant species occurred between net-pen closing and adjacent lake areas. Water quality showed that 6 sites were all eutrophication and β - α mesosaprobic, although there was a slight degree in sites C₁ and A₁, no significant differences in 6 sites, which was similar to the results by TSI.

Key words: crab-net-pen culture; rotifer; community structure; the Yangcheng Lake

Corresponding author: WANG Wu. E-mail: wwang@shou.edu.cn