

溇湖控藻网围中鲢鳙对枝角类群落结构的影响

陈立婧¹, 梅 榛¹, 孔优佳², 刘其根^{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: 为了研究控藻网围中鲢鳙对枝角类群落结构的影响以及对富营养化水质改善的效果, 于 2009 年 12 月—2010 年 11 月对溇湖控藻网围外 A 区和网围内 B、D、C 3 区(鲢鳙比分别为 1:4、1:2、1:1.5)枝角类的群落结构和部分水质特征参数进行比较, 并结合二者探讨了控藻网围枝角类群落结构与环境变量的关系。经鉴定, 网围内外共采集到枝角类 32 种, 隶属于 7 科 14 属。研究表明, 网围内外枝角类种类组成相似, A 区枝角类的年均生物密度和年均生物量均高于网围内各区, 且与 B 区存在显著性差异($P < 0.05$)。优势种主要为长额象鼻溞、角突网纹溞和裸腹溞属未定种。8 月 A 区裸腹溞属未定种的生物密度显著高于 B、D 区, 而网围内 3 区波动幅度不大, 结果表明, 体积较大的裸腹溞属未定种比其他两个小型种类更易受到鱼类捕食影响。典范对应分析(CCA)表明, 水温、高锰酸盐指数、硝酸盐氮和透明度是影响枝角类丰度的主要非生物因素。

关键词: 鲢和鳙; 枝角类; 群落结构; 网围; 溇湖

中图分类号: Q 178.5; S 917

文献标志码: A

溇湖位于江苏省南部, 横跨武进、宜兴两市, 是苏南地区仅次于太湖的第二大湖泊, 总面积为 164 km², 平均水深 1.27 m, 为典型浅水型湖泊。地处我国经济发达的长江三角洲地带, 沿岸水系较为发达, 是我国最早开展网围养殖的湖泊之一, 曾先后于“七五”和“八五”期间作为重点攻关对象进行了网围养殖的研究, 为其渔业生产的发展创造了良好的条件。然而, 网围养殖的开展为我国湖泊渔业带来积极作用的同时, 却也不可避免地对湖泊的其他功能造成一定的影响, 甚至造成危害。因此, 选择合适的网围养殖模式、养殖品种及放养量至关重要, 需兼顾经济效益和生态效益。当前很多研究认为, 采用非经典生物操纵方法即控制凶猛鱼类和放养食浮游生物的滤食性鱼类(鲢 *Hypophthalmichthys molitrix*、鳙 *Aristichthys nobilis* 等)可以直接控藻, 改变水生态环境。而枝角类作为世界范围内淡水水体中浮游动物的优势

类群, 多以藻类为食, 其本身又是浮游动物食性鱼类的食物, 是水体中能量流动的重要环节而必会受其影响。因此, 鲢鳙鱼的放养模式、放养密度、放养的湖泊类型都会不同程度地改变湖泊中藻类和枝角类的群落结构^[1]。目前, 有关网围鲢鳙鱼养殖对湖泊生态影响的研究受到广泛关注, 国内学者对千岛湖^[2]、溇湖^[3-4]和东太湖^[5]等开展过较多网围养殖的研究, 多集中在水生植物、理化因子、生物监测、控制富营养化和藻类等方面, 而探讨非生物环境因子以及滤食性鱼类对浮游枝角类影响的相关报道很少^[6-7]。

近年来, 国家水体污染控制与治理重大专项中有多个子项目涉及溇湖。本实验就是结合太湖流域的生态治理专项, 在溇湖敞水区建立经过改进的围网, 通过放养不同比例的鲢鳙鱼, 探讨了网围内外枝角类的群落结构与鲢鳙鱼以及环境因子的相互关系, 为溇湖水生态系统保护、湖泊环

收稿日期:2012-10-08 修回日期:2012-12-14

资助项目:国家“十一五”、“十二五”水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07101-007);湖荡湿地重建与生态修复技术及工程示范项目(2012ZX07101-007);上海市重点学科建设项目(S30701)

通信作者:刘其根, E-mail: qgliu@shou.edu.cn

境治理以及生态网围养殖提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验设计

网围结构 与传统网围养殖使用的固定材料毛竹不同,研究中采用了新型围网,刚性无缝钢管作为支撑,使用了双层机编有结节网衣,网衣上方采用直径 30 cm 的白色泡沫柱形浮子,保持其始终漂浮于水面,网衣下方缀有包裹了石子的石笼,保证了网衣不会在水中漂移;此外,在上方增加了宽 1 m 的网衣防止鲢逃逸。

试验方法 漏湖试验网区域位于漏湖水产

种质资源保护区南部支河口以西约 2 km 处的敞水水域。水流方向自北向南,流速为 0.1 m/s。在试验区域共设置 17 个监测点,分为 3 个试验组,其中 B 组 33.34 hm²,D 组 53.34 hm²,C 组 50.00 hm²,即网围外 A 区(1#-8#)及网围内 B(9#、10#、11#)、C(12#、13#、14#)、D(15#、16#、17#)三区(图 1),分别由三家渔民进行日常管理和维护。自 2009 年 10 月,试验围网内放养鲢鳙,直至 2009 年 12 月投放结束,采取非投饵式试验养殖模式。其中,鲢放养密度为 1 950~2 850 尾/hm²,每尾重量为 6~11 g,鳙的放养密度为 2 850~3 750 尾/hm²,每尾重量为 2~3 g(表 1)。

表 1 网围内外各区的鲢鳙鱼放养情况

Tab.1 The specific stocking situation of fish in different regions inside and outside of fish pen

区域 region	体积/m ³ volumn	生物量/(g/m ³) biomass			
		合计 total	鲢 <i>H. molitrix</i>	鳙 <i>A. nobilis</i>	鲢:鳙 ratio
B	416 875	157.12	32.38	124.74	1:4
D	667 000	112.44	37.48	74.96	1:2
C	625 313	79.96	31.98	47.98	1:1.5

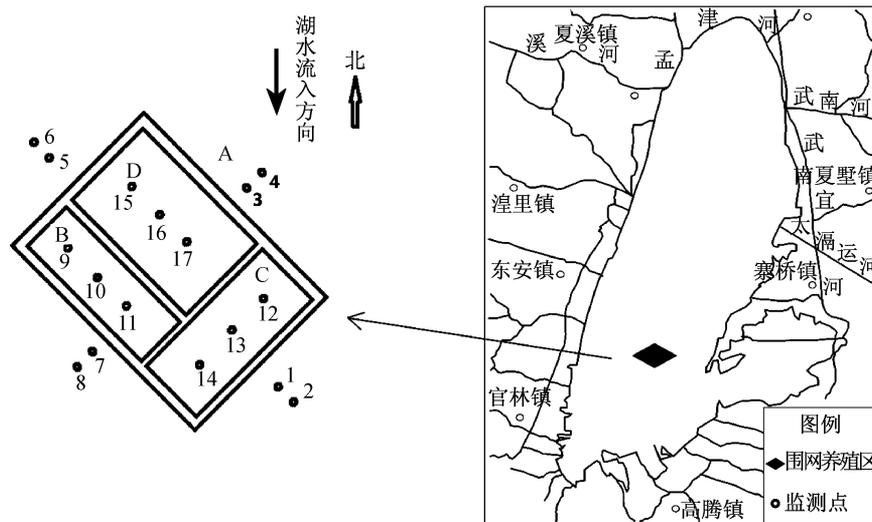


图 1 漏湖网围内外采样点分布图

设网围外为 A 区(1#~8#);网围内 B 区(9#、10#、11#)、C 区(12#、13#、14#)、D 区(15#、16#、17#)。

Fig.1 Sample sites in and outside of fish pen in Gehu Lake

1 to 8 belong to A region;9,10,11 belong to B region;12,13,14 belong to C region;15,16,17 belong to D region.

1.2 样品的采集

2009 年 12 月—2010 年 11 月,每月下旬月底采集样品一次。同时采集定性和定量样品,定量样品用 5 L 采水器分两次共采集 10 L 的混合水样,经过 13#浮游动物网过滤,收集后加入 4% 的甲醛溶液固定,现场测定水温(T)、水深(d)、透明度(SD)、溶解氧(DO)、pH 等,同时采集湖水

1 000 mL,带回试验室测定水样各理化指标(TN、TP)和叶绿素 a(*Chl. a*)浓度。每个定量样品全瓶计数^[8-9]。种类鉴定依据蒋燮治等^[10]、陈花等^[11]的方法。枝角类的生物量根据体长体质量回归方程换算,生物量皆为湿重。

1.3 数据处理

多样性指数 Shannon-Wiener 物种多样性

<http://www.sexuebao.cn>

指数(H')^[12]: $H' = - \sum_{i=1}^S (N_i/N) \times \ln(N_i/N)$

Margalef 物种丰富度指数(D): $D = (S - 1)/\ln N$

Pielou 物种均匀度指数(J): $J = H'/\ln S$

种类优势度(Y): $Y = (N_i/N)f_i$

式中, N_i 为第 i 种的个体数, N 为总个体数, S 为总物种数, f_i 为第 i 种的出现率。 $Y > 0.02$ 为优势种^[13-14]。

Jaccard 相似性指数: $S_j = c/(a + b - c)$

式中, a 为一个地区的物种数总和, b 为另一地区的物种数总和, c 为两地区共有物种数总和^[15]。

所有数据均采用 SPSS17.0 软件进行处理,

不同站点间生物密度和生物量的比较采用单因素方差分析(One-way ANOVA),环境因子与枝角类物种数、现存量的关系采用 Pearson 相关性分析,并利用 Canoco 4.5 软件包对枝角类和环境因子的数据进行典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)。

2 结果

2.1 试验网围内外理化指标

试验区域主要理化指标的各年均值见表 2。通过总磷、透明度的年均值可初步判定水体均为富营养化状态,多重比较 LSD 分析表明网围内外无显著性差异。

表 2 网围内外 4 区环境因子的年均值

Tab. 2 The annual average environmental parameters of 4 regions inside and outside of fish pen

环境变量 environment parameters	A	B	C	D
TN/(mg/L)	2.52 ± 0.69	2.44 ± 0.69	2.57 ± 0.55	2.38 ± 0.64
TP/(mg/L)	0.25 ± 0.11	0.26 ± 0.12	0.22 ± 0.06	0.27 ± 0.12
NH ₄ -N/(mg/L)	1.33 ± 0.69	1.26 ± 0.55	1.37 ± 0.81	1.21 ± 0.53
NO ₃ -N/(mg/L)	1.50 ± 1.00	1.53 ± 0.84	1.54 ± 1.10	1.75 ± 1.10
COD _{Mn} /(mg/L)	9.11 ± 2.06	9.16 ± 2.27	9.12 ± 2.28	9.04 ± 2.13
T/°C	17.78 ± 9.41	17.50 ± 9.34	17.26 ± 8.95	17.03 ± 8.80
DO/(mg/L)	8.12 ± 2.33	7.93 ± 2.88	7.96 ± 1.23	7.37 ± 1.42
SD/m	0.20 ± 0.06	0.19 ± 0.05	0.20 ± 0.06	0.19 ± 0.06
d/m	1.52 ± 0.27	1.56 ± 0.20	1.51 ± 0.22	1.57 ± 0.28

2.2 试验网围内外种类组成

2009 年 12 月—2010 年 11 月 4 个区共采集到枝角类 32 种,隶属于 7 科 14 属(表 3)。其中,尖额溞属的种类数最多,为 6 种,占总种类数的 18.8%。从出现频率来看,长额象鼻溞是全年均出现的种类,其次是角突网纹溞,出现率为 75.0%,脆弱象鼻溞、微型裸腹溞、肋形尖额溞、圆形盘肠溞的出现率为 66.7%,长刺溞、角壳网纹溞和秀体尖额溞的出现率最低,分别仅在 3 月份和 10 月份出现,出现率仅为 8.3%。

网围内外枝角类的种类数及分布均呈现出一定的季节差异。其中,2010 年春季枝角类的种类数最多,为 27 种,其次是秋季,为 23 种,夏季为 20 种,冬季种类最少,为 17 种。根据 Jaccard 群落相似性分析,A 区和网内 B 区、C 区、D 区的群落组成相似,其相似度均超过 83.3%。网围内、外 4 季均出现的有长额象鼻溞、脆弱象鼻溞和矩形尖额溞,而模糊秀体溞、多刺秀体溞、镰角秀体溞、直额

裸腹溞、短型裸腹溞、微型裸腹溞和裸腹溞未定种 1 种春夏秋冬 3 季均有出现,吻状异尖额溞则在冬春秋 3 季均有出现。

2.3 生物密度和生物量

网围内外枝角类年均生物密度和生物量分别为(38.4 ± 90.5)个/L 和(1.194 ± 2.893) mg/L。网围内外各区的年均生物密度和生物量走势大致相同(图 2),A 区的年均生物密度和生物量分别为(54.6 ± 118.7)个/L 和(1.702 ± 3.811) mg/L,网围内年均生物密度和生物量分别为(24.0 ± 50.6)个/L 和(0.744 ± 1.596) mg/L。A 区各站点年均生物密度和生物量均高于放养鲢鳙鱼的各区(B、C、D 区),且 A 区与 B 区差异显著($P = 0.045$),网围内的年均生物密度和生物量大小排列依次是 C [(30.9 ± 74.0)个/L, (1.004 ± 2.393) mg/L] > D [(21.8 ± 36.6)个/L, (0.660 ± 1.103) mg/L] > B [(19.2 ± 30.7)个/L, (0.567 ± 0.856) mg/L],网围内各区之间差异不显著。

表 3 网围内外枝角类各季节出现情况及 CCA 分析中的种类代码

Tab. 3 The cladocera taxa inside and outside of fish pen of Gehu Lake in different seasons and the symbols used by CCA

代码 symbol	枝角类 cladocerans	冬季 winter	春季 spring	夏季 summer	秋季 autumn
	薄皮溞科				
	薄皮溞属				
k1	透明薄皮溞 <i>Leptodora richardi</i>		ABC	ABCD	
	仙达溞科				
	秀体溞属				
c3	奥氏秀体溞 <i>Diaphanosoma orghidani</i>	ACD	ABCD		
c4	模糊秀体溞 <i>D. dubium</i>		ABCD	ABCD	ABC
c1	多刺秀体溞 <i>D. sarsi</i>		ACD	ABCD	ABCD
c2	镰角秀体溞 <i>D. excisum</i>		AC	ABCD	ABCD
	溞科				
	溞属				
	蚤状溞 <i>Daphnia pulex</i>	AD	AD		
	长刺溞 <i>D. galeata</i>		ABC		
f1	僧帽溞 <i>D. cucullata</i>		ABCD	AC	
	网纹溞属				
i1	角突网纹溞 <i>Ceriodaphnia cornuta</i>	AB		ABCD	ABCD
	角壳网纹溞 <i>C. cornigera</i>		AD		
	裸腹溞科				
	裸腹溞属				
b3	直额裸腹溞 <i>Moina rectirostris</i>		ABCD	AB	ACD
b2	短型裸腹溞 <i>M. brachiata</i>		ABCD	ABD	ABCD
b1	微型裸腹溞 <i>M. micrura</i>	B	ABCD	ABCD	ABCD
b4	裸腹溞未定种 1 种 <i>Moina</i> sp.		ABCD	ABCD	ABD
	象鼻溞科				
	象鼻溞属				
a1	长额象鼻溞 <i>Bosmina longirostris</i>	ABCD	ABCD	ABCD	ABCD
a2	脆弱象鼻溞 <i>B. fatalis</i>	ABCD	AD	ABCD	ABCD
	基合溞属				
n1	颈沟基合溞 <i>Bosminopsis deitersi</i>	A			BCD
	粗毛溞科				
	泥溞属				
e1	活泼泥溞 <i>Ilyocryptus agilis</i>	BD	ABC		ABCD
	粗毛溞属				
j1	粉红粗毛溞 <i>Macrothris rosea</i>			A	ABCD
	盘肠溞科				
	大尾溞属				
g1	粗刺大尾溞 <i>Leydigia leydigii</i>	AD	AD		A
	尖额溞属				
d2	方形尖额溞 <i>Alona quadrangularis</i>	AB	AC	A	A
	秀体尖额溞 <i>A. diaphana</i>				AD
d3	华南尖额溞 <i>A. milleri</i>			ABCD	ABCD
d5	矩形尖额溞 <i>A. rectangula</i>	ABD	AD	ABD	ABCD
d1	点滴尖额溞 <i>A. guttata</i>	A	AC		
d4	肋形尖额溞 <i>A. costata</i>	ABCD	BCD	A	AD
	弯额溞属				
l1	镰吻弯额溞 <i>Rhynchotalona falcata</i>		C		
	异尖额溞属				
m1	吻状异尖额溞 <i>Disparalona rostrata</i>	ABCD	ABCD		ABCD
	盘肠溞属				
h3	圆形盘肠溞 <i>Chydorus sphaericus</i>	ABCD	ABC	A	AC
h1	卵形盘肠溞 <i>C. ovalis</i>	ABCD	B		AB
	侧扁盘肠溞 <i>C. latus</i>	AD	C		
h2	驼背盘肠溞 <i>C. gibbus</i>	ACD	ABC	D	

注:A、B、C、D 分别指代网围内外各区域。

Notes: A, B, C, D respectively represented different regions.

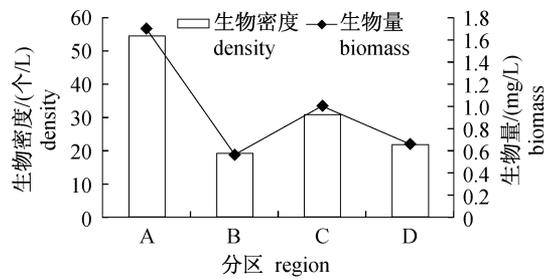


图2 网围内外4分区年均生物密度和生物量
Fig.2 The average density and biomass inside and outside of fish pen

从全年各月的变化来看(图3),网围内外4区的生物密度和生物量从5月开始有明显增加, A区和C区枝角类生物密度和生物量的高峰只有一个,均出现在夏季的8月(254.4 ± 266.8)个/L和(7.888 ± 8.582) mg/L, (182.0 ± 50.4)个/L和(5.671 ± 1.566) mg/L,而B、D区有两个峰值。B区峰值分别出现在7月(47.2 ± 39.5)个/L, (1.440 ± 1.209) mg/L和10月(91.7 ± 19.5)个/L, (2.426 ± 0.576) mg/L。D区出现在8月(126.7 ± 9.4)个/L, (3.883 ± 0.315) mg/L和10月(59.0 ± 6.1)个/L, (1.647 ± 0.043) mg/L。8月A区与B、D2区生物密度和生物量均构成极显著差异($P < 0.01$)。9月B、D区生物密度和生物量较低而C区相对较高,甚至高于A区。

2.4 优势种

优势种组成 排在前三位的优势种为长额

象鼻溞、角突网纹溞和裸腹溞属未定种1种,其优势度分别为0.47、0.05、0.04。从各季节的主要优势种组成看(表4),优势种的构成随季节变化比较明显。长额象鼻溞为各季第1优势种,角突

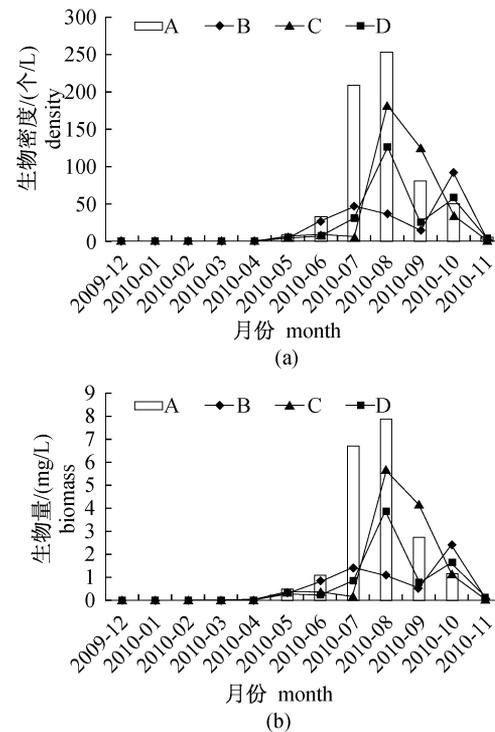


图3 网围内外4个分区枝角类生物密度和生物量的周年变化

Fig.3 Monthly average density and biomass of cladocera inside and outside of fish pen

表4 不同季节间涸湖网围内外优势种及其优势度的差异
Tab.4 The differences of both dominant species and the corresponding dominance among different seasons inside and outside of fish pen of Gehu Lake

	冬季 winter		春季 spring		夏季 summer		秋季 autumn	
	网外 outside	网内 inside						
长额象鼻溞	0.26	0.23	0.16	0.21	0.45	0.57	0.45	0.61
微型裸腹溞				0.04				0.02
裸腹溞属未定种			0.14	0.11	0.12	0.07	0.04	0.04
多刺秀体溞					0.06	0.04		
模糊秀体溞			0.03		0.03	0.03		
华南尖额溞					0.03			
肋形尖额溞	0.08	0.14						
卵形盘肠溞	0.03							
驼背盘肠溞								
圆形盘肠溞	0.09	0.10						
角突网纹溞					0.07	0.11	0.21	0.12
吻状异尖额溞							0.03	

网纹蚤为夏秋季节的优势种,裸腹蚤属未定种在除冬季以外均构成优势。夏季优势种类数最多,网围内、外分别为5种和6种,以长额象鼻蚤、角突网纹蚤、裸腹蚤属未定种、多刺秀体蚤和模糊秀体蚤为主;而冬春季枝角类生物密度较低,优势种多为可适应中低温度的种类,冬季以长额象鼻蚤、盘肠蚤属和肋形尖额蚤为主,春季以长额象鼻蚤、裸腹蚤属未定种为主。除排在前三名的优势种以外,秋季吻状异尖额蚤在网围外构成优势种。相同季节网围内外的优势种构成相似,只是优势度大小有所不同,长额象鼻蚤在春夏秋3季优势度均呈现出网围内大于网围外的情况,而裸腹蚤属未定种在春夏季网围外优势度均大于网围内。

主要优势种生物密度和生物量的变化 长额象鼻蚤作为第一优势种,除10月外,7月—9月与其他各月均构成显著性差异(图4)。A区年均生物密度为 (28.1 ± 67.5) 个/L,其他3区分别为C (17.5 ± 42.3) 个/L > D (14.4 ± 25.5) 个/L > B (11.1 ± 21.7) 个/L。6月生物密度出现明显上升,A区和C区增加较明显。A、C、D3区长额象鼻蚤在8月均达到全年最大值,分别为 (136.5 ± 139.6) 个/L、 (113.7 ± 41.7) 个/L、 (88.2 ± 12.5) 个/L,而B区在10月达到其最大值 (60.8 ± 12.1) 个/L。

角突网纹蚤生物密度在7月开始出现明显上升,8月、9月与其它各月构成显著性差异。其年均生物密度C区 (8.3 ± 24.6) 个/L > A区 (7.6 ± 22.5) 个/L > D区 (3.0 ± 7.1) 个/L > B区 (1.8 ± 5.0) 个/L。冬春季其生物密度较低,个别月份其值为0个/L。4个区在8月均达到全年最大值,分别为 (48.7 ± 53.6) 个/L、 (10.3 ± 14.1) 个/L、 (54.3 ± 4.2) 个/L、 (24.5 ± 5.4) 个/L。A区和C区变化幅度较大,8月之后两者均呈现明显的下降,但整体水平仍高于B、D区。

裸腹蚤属未定种的生物密度从4月开始出现上升,夏季相应月份显著高于其它各月。4月—8月期间,A区的生物密度均高于网围养殖区,其年均生物密度 (6.7 ± 17.1) 个/L与B区 (1.5 ± 2.3) 个/L、D区 (1.1 ± 2.1) 个/L构成显著性差异($P=0.031, P=0.020$),A区最大值出现在8月 (28.9 ± 38.3) 个/L。网围内裸腹蚤属未定种的波动幅度不大,增长也处于一个较低水平,C区

普遍高于其他网围养殖区。3个优势种生物量走势与生物密度相似。

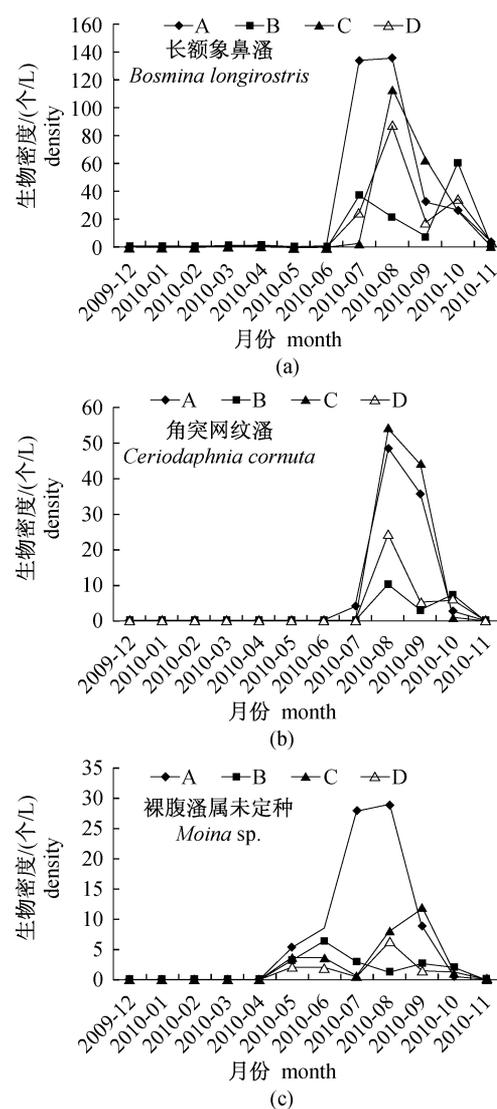


图4 网围内外4分区主要优势种生物密度的周年变化
Fig. 4 Monthly average density of main dominant species inside and outside of fish pen

2.5 多样性指数分析

从网围内外各区域来看,各区域年均 Shannon-Wiener 物种多样性指数(H' 值)排序依次是A区 $(1.078) > B$ 区 $(1.014) > C$ 区 $(1.005) > D$ 区 (0.926) , Margalef 物种丰富度指数(D 值)依次是C区 $(1.194) > A$ 区 $(1.181) > B$ 区 $(1.162) > D$ 区 (1.109) , Pielou 物种均匀度指数(J 值)依次是C区 $(0.646) > A$ 区 $(0.627) > B$ 区 $(0.622) > D$ 区 (0.572) 。Shannon 指数除D

区外,其他 3 区在夏季均达到全年中的最大值, A、B、D3 区在春季达到全年最小值,春夏秋 3 季 A 区 H' 值均为最高, D 区最低; Margalef 指数, A 区、C 区在秋季达到全年最大值,冬季 C 区、春季 D 区、夏季 A 区、秋季 B 区均低于同季节其他 3

区; Pielou 指数 A、B、C、D4 区在冬季均达到全年最大值,而在春季均为全年最小值,夏秋季 C 区均高于、春夏季 D 区均低于同季节其他三区(图 5)。

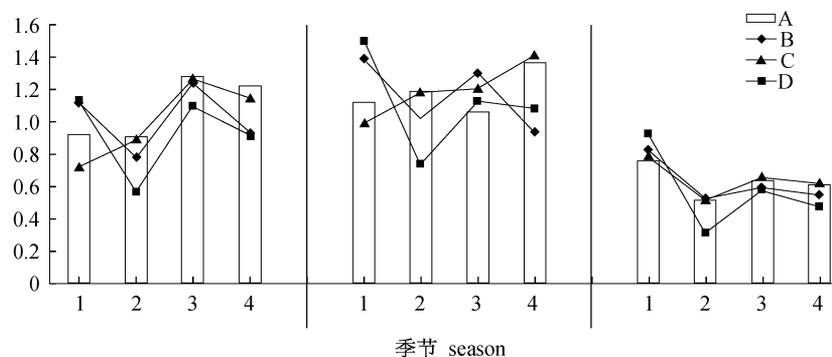


图 5 网围内外 4 个分区不同季节间多样性指数的变化

1. 冬, 2. 春, 3. 夏, 4. 秋。

Fig. 5 Seasonal variation of diversity indices of 4 regions inside and outside of fish pen

1. winter, 2. spring, 3. summer, 4. autumn.

2.6 枝角类各物种与环境因子的 CCA 分析

典范对应分析(CCA)可以较好地反映样方种类组成、生态重要值以及环境因子对群落组成的作用。根据枝角类的相对丰度和出现频率,选取 27 种枝角类用于 CCA 分析,表 2 中有其相应的物种编码。在进行 CCA 分析前,通过对物种数据和环境数据进行 DCA 分析得到四个排序轴中梯度最大值为 5.408(大于 4),表明可以选择 CCA 单峰模型进行数据分析。轴 1、轴 2 的特征值分别为 0.422 和 0.230,物种排序轴和环境因子排序轴的相关系数高达 0.911 和 0.769,说明这两个排序轴能够很好地反映放养鲢鳙鱼的网围中枝角类与环境因子的相互关系。物种变异累积百分数分别为 14.9% 和 23.0%,物种-环境变异累积百分数分别为 41.8% 和 64.6%(表 5)。

根据所选物种与环境因子的 CCA 排序图(图 6),表明在放养一定数量鲢鳙鱼的网围中,其相应的水生态环境对枝角类的群落分布具有不同程度的影响。其中,水温、 COD_{Mn} 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、SD 的影响较大。绝大多数裸腹溞属、秀体溞属、角突网纹溞、透明薄皮溞和僧帽溞与水温、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 SD

呈正相关性;盘肠溞属、颈沟基合溞、粗刺大尾溞等与 TP 呈正相关,与水温、 COD_{Mn} 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 呈负相关。相对其它物种而言,长额象鼻溞、角突网纹溞和裸腹溞属未定种这 3 种优势种距离原点较近,对环境的承受能力也较强。

表 5 环境因子与前两个排序轴的相关系数

Tab. 5 The correlation coefficients between environmental factors and the first two ordination axes

参数 parameters	轴 1 spec ax1	轴 2 spec ax2
TN/(mg/L)	-0.217 7	-0.075 6
TP/(mg/L)	0.180 5	-0.113 9
$\text{NH}_4\text{-N}/(\text{mg/L})$	-0.060 8	0.182 4
$\text{NO}_3\text{-N}/(\text{mg/L})$	-0.464 8	-0.202 1
$\text{COD}_{\text{Mn}}/(\text{mg/L})$	-0.360 5	-0.391
T/°C	-0.789 4	-0.018 8
DO/(mg/L)	-0.170 8	0.019 7
SD/m	-0.330 7	0.310 1
d/m	-0.373 3	-0.166 5

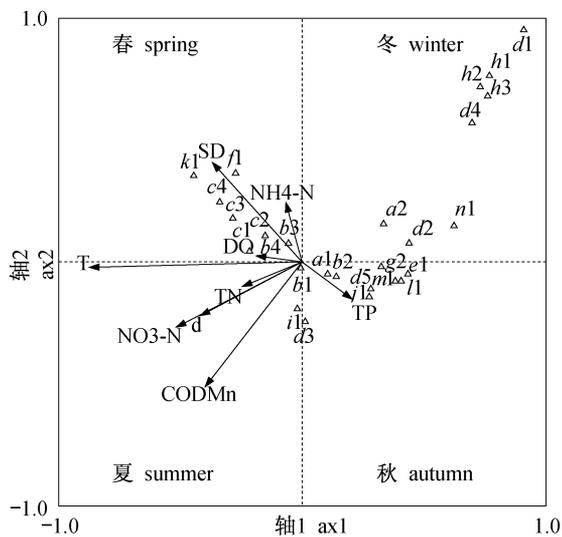


图6 枝角类物种与环境因子的 CCA 排序图

Fig. 6 CCA ordination diagram between the cladocera communities and environmental factors

3 讨论

3.1 实验水体中枝角类的优势种

优势种演替方面,长额象鼻溞为全年出现频率最高的种类,与角突网纹溞和裸腹溞属未定种构成全年主要优势种。滤食性鱼类的放养会促使水体中的浮游动物群落向小体型以及逃跑能力更强的方向发展。长额象鼻溞(0.23~0.70 cm)和角突网纹溞(0.20~0.45 cm)这类小型种类,其自身的灵活性可令其更容易逃避鲢鳙的捕食,相反,长刺溞、蚤状溞这些个体相对较大的溞属类群仅在冬春季温度较低的月份出现,此时鱼类的捕食压力也相对较小。长额象鼻溞在 A、C、D 3 区的最大值均出现在 8 月,而 B 区则出现在 10 月,可能是因为 10 月份对鱼的捕捞,导致单位面积鲢鳙生物量最大的 B 区受其影响最大,鱼量的骤减降低了捕食压力,因此长额象鼻溞得以大量繁殖而在 10 月达到全年最大值,D 区在 10 月也有所升高,但其受鱼类的影响不如 B 区。裸腹溞属未定种主要出现在 5—11 月,网围外生物密度和生物量普遍高于网围内,夏季其网围外优势度大于网围内,A 区与 B、D 两区构成显著差异,说明鲢鳙的放养对裸腹溞属未定种的群落结构造成一定影响,可能归因于裸腹溞属未定种(0.87±0.17) cm 的个体较其他枝角类大,更易被鱼类捕食。此外,裸腹溞属未定种构成春夏秋 3 季优势种且全年出现的频率较高,这是由于裸腹溞属大多为耐

污性种类,CCA 分析也显示裸腹溞属未定种对环境因子的承受能力较强,因此它在富营养化水体中能大量繁殖生长,并在夏季达到高峰。

本次调查中所鉴定的裸腹溞属未定种,个体属于裸腹溞属中的大型种类,头部较大、眼上凹很浅,复眼很小位于头部的中央,后腹部末端的圆锥部分不像本属的其他种类那样细长,各侧具有羽状肛刺 8 个及叉状肛刺 1 个,雌体出现于 7 月底等这些典型特征初步判断它可能是兴凯裸腹溞(*Moina chankensis*)。由于兴凯裸腹溞是我国特有种,只在黑龙江兴凯湖有过发现,但它很有可能非兴凯湖的区域出现,最近有试验调查显示,淀山湖和嘉兴等江浙沪地带均有出现过相类似的裸腹溞个体(未发表数据),只是目前没有任何相关文献证明其存在于除兴凯湖以外的地区,因此本实验尚不确定,但以后可通过分子生物学和形态学相结合的方法,根据其基因表达和序列对比将其定种。

3.2 鲢鳙对枝角类群落结构的影响

该水体中枝角类主要以小型种类为主,鱼类捕食和竞争是造成枝角类群落结构改变的重要因素。早在 20 世纪 60 年代初期,Hrbacek 等^[16]首先证实了鱼类在调节浮游动物的种类组成和大小方面具有重要作用,20 世纪 60 年代中期,Brooks 等^[17]提出了大小效率假说,鱼类对浮游动物的捕食特性主要集中在两点,即大小选择和猎物的可见性^[18-20],因此当夏季水生生态系统受到环境的胁迫时,某些大型种类如春季出现的僧帽溞、蚤状溞、长刺溞和透明薄皮溞等消失,而长额象鼻溞等小型耐污种类迅速增加。杨宇峰等^[21]通过在东湖设计围圈试验证实,在鲢鳙鱼混养的围圈,溞类一直没有建立起大的种群;而在无鱼的两个围圈中,溞类数量较多,认为这是鲢鳙直接摄食的结果^[21],与本实验的研究结果一致。此外,鲢鳙的过滤器鳃耙结构在一定程度上有所区别,导致它们食性上的差异,前者较多地摄食浮游植物,而后者则较喜食浮游动物^[22],试验中 B 区投放鲢鳙比设定在 1:4,相较 D、C 区投放总量更大,鳙所占的比例更高,单位体积鱼类放养量较多的 B 区相对于网围外的区域,鱼类捕食的几率也大大增加可能是导致网围外 A 区和网围内 B 区的年均生物密度呈显著性差异的原因。

B 区、D 区生物密度和生物量 8 至 10 月之间

呈现“高-低-高”的特点。D区由于位于靠近湖水流入的地方,相较其他2个网围区其鱼类的生存环境更适宜,而B区网围体积相对较小以及鲢鳙的放养量较高,枝角类被鱼类摄食几率增大,因此9月这两区生物密度有所降低;10月初对鱼类进行过一次捕捞,而B、D区作为鱼类放养量较高的区域必会受其较大影响,加上秋季温度降低,鱼类的食量减少,导致了10月份枝角类生物密度又升高的现象,且从对A区未造成明显的也可以证明这一点。

3.3 环境因子对枝角类群落结构的影响

作为浅水湖泊中浮游动物的优势类群之一,枝角类的群落组成与环境因子密切相关。CCA分析表明,在该鲢鳙网围养殖水体中,温度仍然是影响最大的环境因子,Pearson相关分析也显示,温度与枝角类生物密度、生物量和物种数均呈极显著正相关($P=0.000$, $P=0.000$, $P=0.000$)。研究显示,浮游甲壳动物具有一定的生理阈值,如角突网纹溞的最低温度阈值在 $10\sim 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间^[23],温度较低时角突网纹溞可能难以生存。角突网纹溞在冬春季生物密度较低,个别月份其值为0个/L,7月和8月增速较快,达到全年峰值,之后呈现明显的下降,与研究结果一致。

枝角类生物密度和生物量整体上呈现出夏秋高而冬春低的特点。温度的影响是其中的一个原因,微型裸腹溞每年出现在5—11月,而当水温低于 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时就会消失,作为网围内外夏季优势种其生物密度较高,构成枝角类总生物密度的一大部分,而且4种广温性或暖温性的秀体溞也在夏季大量出现;此外,微囊藻毒素可能也有一定影响。溇湖网围内外5—11月,铜绿微囊藻、微小色球藻、微小平裂藻等蓝藻构成主要优势种,而Hansson等^[24]通过对瑞典南部的6个湖泊中微囊藻毒素浓度和浮游动物群落组成波动的调查发现,象鼻溞属和轮虫这样小型的、相对低效的浮游植物掠食者的生物量与毒素浓度成正相关。夏季随着水华的爆发,蓝藻值达到高峰,微囊藻毒素的影响可能使数量庞大的小型个体生存下来。

ANOVA分析显示,月份之间生物密度和生物量的差异显著,尤其是8月的相关数据与除7月以外的其他10个月均呈显著性差异。温度除了直接影响之外,也可以间接影响群落组成,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。夏季尤其是8月,水体中叶绿素a的含量较高,有助于以浮游藻类为食的浮游甲壳动物生长与繁殖;此外,营养盐对枝角类的构成也有一定的影响,生物密度、生物量和物种数与 COD_{Mn} ($P=0.000$, $P=0.000$, $P=0.000$)、 $\text{NO}_3\text{-N}$ ($P=0.004$, $P=0.002$, $P=0.000$)呈极显著正相关性,与 $\text{NH}_4\text{-N}$ ($P=0.015$, $P=-0.019$, $P=-0.001$)呈显著负相关性,生物密度和生物量与TN、TP不呈显著相关,这与CCA分析显示的 COD_{Mn} 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的影响大于TN和TP相一致。网围内3个区域之间的环境参数、生物密度和生物量差异不显著,可能是由于网围本身为了模拟湖泊自然环境,是个较为开放的系统,水体具有一定的交换能力而减弱了鱼类的影响。

3.4 非生物操纵方法(鲢鳙放养)的效果

溇湖控藻网围春夏秋3季枝角类的种类数较多,并未因鲢鳙的放养而导致种类数急剧下降,此外与相关溇湖的研究中Shannon多样性指数^[25]相比无显著差异。从夏季网围内外4个分区各多样性指数的对比发现,A区与网围内各养殖区的差别虽不显著,但物种丰富度指数均低于网围内3个区域,因此某种程度上说放养鲢鳙起到了一定的效果,但是污染指示种的大量存在证明网围区域仍然处于营养化的水平。

试验过程中特别是在高温季节,网围外聚集着大量肉眼可见的蓝绿藻群体(呈现泡沫状),而网围内相对少些。网围内外藻类年均生物密度有显著差异($P<0.05$),叶绿素a也呈极显著差异($P<0.01$)。Panov等^[26]的研究表明,鲢喜食蓝藻,并且能够消化鱼腥藻、束丝藻、纤维藻和小球藻,然而随着环境因素和季节的变化,鲢鳙的食性也会改变,在水库、河流和湖泊中,白鲢食物以硅藻为主,池塘中以绿球藻鞭毛藻为主,生活在肥水中的鲢主要食物是蓝绿藻。溇湖控藻网围采用非生物操纵法进行生态修复的研究,网围内不投饵,放养经济鱼类自然生长,鲢鳙可较好地摄食湖泊中的蓝绿藻,净化水环境。每个湖泊都有最适控渔量,因此采取适时、适度放养滤食性鱼类至关重要,而关于放养比例、放养量还有待进一步研究。

感谢上海海洋大学武震、张永栋硕士及贾佩娇博士给予的采样及野外调查帮助,同时也感谢溇湖渔业管理委员会给予的支持。

参考文献:

- [1] 刘建康,谢平. 用鲢鳙直接控制微囊藻水华的围隔实验和湖泊实践[J]. 生态科学, 2003, 22(3): 193-196.
- [2] 陈来生,洪海平,洪荣华,等. 千岛湖网围放养鲢鳙鱼的水体净化功能和渔业合理经营的探讨[J]. 水产科技情报, 2005, 32(6): 259-261.
- [3] 刘其根,孔优佳,陈立侨,等. 网围养殖对漏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.
- [4] 胡莉莉,赵瑞坤,张向群,等. 漏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.
- [5] 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.
- [6] Starling F L R M. Control of eutrophication by silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) in the tropical Paranoú reservoir (Brasília, Brazil): a mesocosm experiment [J]. *Hydrobiologia*, 1993, 257(3): 143-152.
- [7] Starling F L R M, Rocha A J A. Experimental study of the impacts of planktivorous fishes on plankton community and eutrophication of a tropical Brazilian reservoir [J]. *Hydrobiologia*, 1990, 200-201(1): 581-591.
- [8] 黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 2000: 141-247.
- [9] 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: 358-388.
- [10] 蒋燮治,堵南山. 中国动物志-节肢动物门甲壳纲淡水枝角类[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [11] 陈花,林秋奇,徐磊,等. 中国秀体溇属常见种类记述[J]. 生态科学, 2011, 30(3): 223-338.
- [12] Krebs C J. Ecology: The experimental analysis of distribution and abundance[M]. New York: Harper & Row, 1978: 455-457.
- [13] 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.
- [14] 王云龙,袁骥,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): 300-306.
- [15] 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): 693-699.
- [16] Hrbacek J, Dvorakova M, Korinek V, et al. Demonstration of the effect of the fish stock on the species composition of zooplankton and the intensity of metabolism of whole plankton association [J]. *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie*, 1961, 14: 192-195.
- [17] Brooks J L, Doson S I. Predation, body size and composition of plankton [J]. *Science*, 1965, 150(3692): 28-35.
- [18] 黄祥飞,陈雪梅,伍焯田,等. 武汉东湖浮游动物数量和生物量变动的研究[J]. 水生生物学集刊, 1984, 8(3): 345-358.
- [19] 杨宇峰,黄祥飞. 鲢鳙对浮游动物群落结构的影响[J]. 湖泊科学, 1992, 4(3): 78-86.
- [20] Gliwicz Z M. Relative significance of direct and indirect effects of predation by planktivorous fish on zooplankton [J]. *Hydrobiologia*, 1994, 272(1-3): 201-210.
- [21] 杨宇峰,黄祥飞. 浮游动物生态学研究进展[J]. 湖泊科学, 2000, 12(1): 81-89.
- [22] 倪达书,蒋燮治. 花鲢和白鲢的食性问题[J]. 动物学报, 1954, 6(1): 59-71.
- [23] Anderson D H, Benke A C. Growth and reproduction of the Cladoceran *Ceriodaphnia dubia* from a forested floodplain swamp [J]. *Limnology and Oceanography*, 1994, 39(7): 1517-1527.
- [24] Hansson L A, Gustafsson S, Rengefors K, et al. Cyanobacterial chemical warfare affects zooplankton community composition [J]. *Freshwater Biology*, 2007, 52(7): 1290-1301.
- [25] 陈立婧. 漏湖富营养化对浮游生物影响的生态学研究[D]. 上海: 上海水产大学, 2008.
- [26] Panov D A, Sorokin Y I. Experimental research in the feeding of the young bighead and silver carp [J]. *Voprosy Ikhtiologii*, 1969, 9: 138-152.

The influences of silver carp and bighead carp in bio-manipulation pen on the community structure of cladocera in Lake Gehu

CHEN Lijing¹, MEI Zhen¹, KONG Youjia², LIU Qigen^{1*}

(1. Key Laboratory of Exploration and Utilization of Aquatic Genetic Resources (MOE-affiliated),
Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Fisheries Management Commission of Gehu Lake, Changzhou 213161, China)

Abstract: As a dominant group of zooplankton in fresh water worldwide, Cladocera plays an important role in the material circulation and energy flow of water ecosystem, and it is not only a consumer for small animals and algae, but also food for zooplanktivorous fish. Many current studies have showed that non-classical bio-manipulation, a way to prevent water bloom and improve water environment by controlling fierce fish and stocking planktonivorous filter-feeding fish (such as *Hypophthalmichthys molitrix* and *Aristichys mobilis*), can be effective. However, to some extent, phytoplankton and community structure of cladocera may be varied with different stocking patterns, fish density and lake type. Lake Gehu, a total area of 164 km² crossing Wujin and Yixing, is located in the south of Jiangsu province. In recent years, more attention was paid to the researches about the influence of *H. ypophthalmichthys molitrix* and *Aristichys mobilis* on lake ecosystems, of which the past domestic studies were mainly focused on aquatic plants, physical and chemical factors, the control of eutrophication and phytoplankton, however, no reports have been made in the bio-manipulation fish pen of Lake Gehu about the influences of abiotic environmental factors and filter-feeding fish on cladocera, and that is our work to fill in the blanks. Thus, from December 2009 to November 2010, a large bio-manipulation fish pen with the stock of silver carp (*H. molitrix*) and bighead carp (*A. mobilis*) inside was built to control the cyanobacterial bloom in Lake Gehu, an investigation and laboratory analysis was carried out to compare the variation of the cladoceran community structure between region A outside of the fish pen and regions B, D, C with different ratios of fish (1:4, 1:2, 1:1.5), which was combined to discuss the influences of bio-manipulation fish pen on cladocera and the effects on improving eutrophic water. Through the identification, 32 species of cladocera, belonging to 7 families, 14 genera were collected inside and outside of the fish pen where there were no differences between species, and the annual average density and biomass of region A were both higher than any region inside of the fish pen, having a significant difference ($P < 0.05$) with region B, respectively. The main dominant species were *Bosmina longirostris*, *Ceriodaphnia cornuta* and *Moina* sp. In August, the density of *Moina* sp. in region A had significant differences from region B and D, while 3 regions inside of fish pen had no apparent differences, *et al.*, the results of which indicated that *Moina* sp. with a larger volume was easier to be preyed by fish than the other two small species. Moreover, some characteristic parameters of water were investigated to depict the correlation between cladoceran and environmental variables. CCA (Canonical Correspondence Analysis) showed that water temperature, permanganate index (COD_{Mn}), nitrate nitrogen (NO_3-N) and water transparency (SD) were the main abiotic factors affecting the community structure of cladocera.

Key words: *Hypophthalmichthys molitrix* and *Aristichys mobilis*; cladocera; community structure; fish pen; Lake Gehu

Corresponding author: LIU Qigen. E-mail: qgliu@shou.edu.cn