

文章编号: 1674-5566(2019)02-0237-10

DOI:10.12024/jsou.20180302254

网围养蟹对浮游植物群落结构变化的影响

崇璘璇^{1,2,3}, 刘儒汗^{1,2,3}, 尹丽平^{1,2,3}, 苗雪梅^{1,2,3}, 陈立婧^{1,2,3}

(1. 上海海洋大学 水产科学国家级实验教学示范中心, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 上海水产养殖工程技术研究中心, 上海 201306; 3. 上海海洋大学 水产动物遗传育种中心上海市协同创新中心, 上海 201306)

摘要: 2008 年 6 月至 2009 年 5 月, 调查了阳澄湖网围养殖区及对应湖泊区域 3 组对照点的浮游植物群落结构特征, 分析了浮游植物群落结构与环境变量之间的关系, 利用多种参数对其水质进行评价。经鉴定, 共采集到浮游植物 8 门 116 属 275 种, 网围内主要优势种为不定微囊藻 (*Microcystis isincerta*)、铜绿微囊藻 (*M. aeruginosa*) 和伪鱼腥藻属未定种 (*Pseudoanabaena* sp.), 网围外主要优势种为不定微囊藻、铜绿微囊藻、伪鱼腥藻属未定种及密集微囊藻 (*M. densa*)。网围内浮游植物生物密度年均值 [$(3\ 143.38 \pm 3\ 660.84) \times 10^4$ 个/L] 及生物量 [(3.71 ± 2.31) mg/L] 均低于网围外湖区对照点生物密度年均值 [$(3\ 830.77 \pm 4\ 296.56) \times 10^4$ 个/L] 及生物量 [(5.24 ± 4.10) mg/L]。冗余分析 (RDA) 表明, 水温是影响浮游植物群落结构的主要环境因子, 与生物密度呈正相关关系。水质分析表明, 网围内外水体均为富营养化中污染水平, 且 3 组对照点之间无显著性差异 ($P > 0.05$)。

关键词: 网围养蟹; 阳澄湖; 浮游植物; 群落结构; 冗余分析

中图分类号: S 966.1

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^[1]。阳澄湖是大闸蟹 (中华绒螯蟹 *Eriocheir sinensis*) 生长的理想之地, 东湖和中湖均设有网围养殖大闸蟹, 一直推崇“以蟹保水”的生态养蟹模式。20 世纪 80 年代, 阳澄湖水质为 II 类水, 90 年代下降到 III 类, 进入 21 世纪水质进一步恶化为 III ~ IV 类, 部分指标甚至恶化为劣 V 类, 其中高锰酸盐指数维持在 III 类、总氮指标长期为劣 V 类、总磷指标为 IV ~ V 类^[2]。近年来由于阳澄湖经济的发展和旅游景点的建设对阳澄湖造成很大的污染, 水源质量正在逐步恶化阶段^[3], 对阳澄湖水质的监测和研究也显得尤为重要。苏州政府为维护阳澄湖生态环境并清理湖中航道, 于 2008 年 5 月将养蟹网围缩减至

21.3 km²。

目前, 湖泊网围养殖对生态环境有关的影响已经引起人们广泛的关注, 国内许多专家开始展开对网围养殖的研究, 如东太湖^[4-5]、溇湖^[6] 还有淀山湖^[7] 的网围养殖对生态环境的影响, 主要研究都集中在水生植物、理化因子^[8]、环境效应^[9]、细菌^[10]、轮虫^[11] 及底栖动物^[12] 等方面, 对浮游植物群落结构的影响还未见有报道。浮游植物作为水体的初级生产者、水中重要的饵料生物, 是研究湖泊生态状态、揭示湖泊生态系统结构和功能以及进行养殖和治理等问题的重要保障, 同时更是水体环境的重要指示生物^[13-15]。本研究对阳澄湖中 3 组网围养蟹水域及其湖区对照点的浮游植物群落结构及物种多样性进行分析比较, 为湖泊水体生态系统的监测及水产养殖业的生态网围养殖可持续发展提供基础的数据资料和理论依据。

收稿日期: 2018-03-29 修回日期: 2018-06-07

基金项目: 上海高校知识服务平台水产动物遗传育种中心上海市协同创新中心项目 (ZF1206); 财政部公益性行业 (农业) 科研专项项目 (ayhyzs07-045)

作者简介: 崇璘璇 (1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为水生生物学。E-mail: chong1994@qq.com

通信作者: 陈立婧, E-mail: ljchen@shou.edu.cn

1 材料与方 法

1.1 采样站点设置

2008 年 6 月至 2009 年 5 月, 每月月底取样, 设 6 个采样点, 其中: 阳澄湖中湖及东湖设 3 个网围内的采样点 A1、B1 和 C1; 3 个网围采样点对照的湖区采样点 A2(湖中心)、B2、C2(水资源保护区)。一般网围面积设置为 0.067 km²。

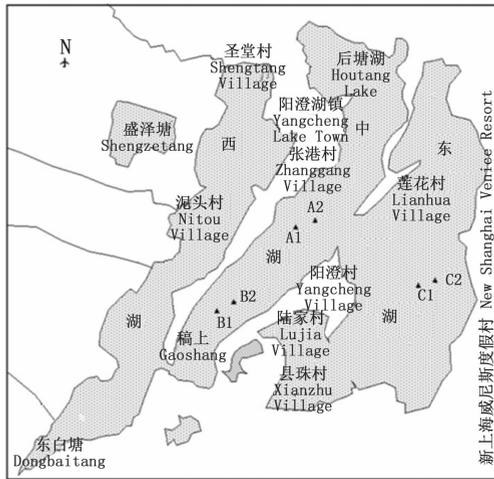


图 1 阳澄湖网围内外采样站点分布图

Fig.1 Sample sites in Yangcheng Lake

生态网围养蟹: 采用草、蟹、螺标准化生态养殖模式, 通过种植水草如金鱼藻、狐尾藻、苦草、轮藻、伊乐藻等达到修复生态的效果, 同时控制好网围中放蟹密度, 并适时投放活螺蛳, 其分泌物具有快速絮凝悬浮物的特质, 以吸附、沉淀水中悬浮颗粒, 网围中采取“品”字型的轮作养殖并混养花白鲢。

1.2 样品采集及处理

根据《湖泊生态调查观测与分析》^[16] 进行采样和分析。浮游植物定性样品用 25 号浮游生物网(网目 64 μm)采集, 将生物网在水面下作“∞”状来回移动 5~10 min, 收集于 60 mL 的标本瓶, 加入约水样体积 4% 的甲醛溶液固定。定量样品用 5 L 柱式采水器在表层、底层各采 5 L 水, 取 1 L 的混合水样用水样体积的 1% 鲁哥氏液和 4% 的甲醛溶液固定, 带回实验室后在室内沉淀器中沉淀 48 h, 浓缩至 50 mL。

定性及定量样品用光学显微镜(Olympus CX21, 10×40 倍)计数镜检, 取 0.1 mL 滴入浮游植物计数框内, 用盖玻片封口放置在显微镜下观察计数, 单个样品重复计数两次取平均值(两次

计数结果相对偏差小于 ±15%)。

种类鉴定主要依据朱浩然^[17]、魏印心^[18]、齐雨藻等^[19]、施之新^[20]、胡鸿钧等^[21]、XIA 等^[22]对藻类特征的描述。

1.3 数据分析

种类优势度公式:

$$Y = (n_i/N) \times f_i \quad (1)$$

式中: n_i 为第 i 种物种的个数; N 为所有物种的个数; f_i 为第 i 种物种的出现频率。当 $Y > 0.02$ 时该种为优势种^[23]。

群落种类组成的多样性分析使用公式 2~4。

Shannon-Wiener 物种多样性指数:

$$H' = - \sum (n_i/N) \ln(n_i/N) \quad (2)$$

Margalef 物种丰富度指数:

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

Pielou 物种均匀度指数:

$$J = H' / \ln S \quad (4)$$

式中: N 为样品中所有种类的总个体数; S 为样品中种类总数; n_i 为第 i 种物种个体数^[24]。

Jaccard 相似性指数:

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

式中: a 为一个地区的物种种类数总和; b 为另一地区的物种种类数总和; c 为两地区共有的物种种类数。当 S_j 值为 0~0.25 时极不相似; 当 S_j 值为 0.25~0.50 时中等不相似; 当 S_j 值为 0.50~0.75 时中等相似; 当 S_j 值为 0.75~1.00 时极相似^[25]。

水体富营养化评价标准: 浮游植物密度 < 30 × 10⁴ 个/L 为贫营养水平; 30 × 10⁴ ~ 100 × 10⁴ 个/L 为中营养水平; 大于 100 × 10⁴ 个/L 为富营养水平。

根据多样性指数对水质进行评价标准: $H' < 1$, 为重污染, 1~3 为中污染, $H' > 3$ 为轻污染或无污染; $D > 5$ 水质清洁, $D > 4$ 为寡污型, $D > 3$ 为 β-中污型, $D < 3$ 为 α-中污-重污型; $J < 0.3$ 为重污染, 0.3~0.5 为中污染, 0.5~0.8 为轻污染或无污染。

数据的统计及相关性分析用 SPSS 18.0 和 CANOCO 4.5 软件。

2 结果与分析

2.1 湖泊水质因子

在各站点调查浮游植物的同时测定理化指

标,即水深(Deep)、水温(Tem)、透明度(SD)、溶解氧(DO)、叶绿素 a(*Chl. a*)、总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、氨氮(NH₃-N),并

计算卡尔森营养状态指数 TSIM 等。方差分析表明各理化指标 6 个采样点之间无显著性差异 ($P > 0.05$),见表 1。

表 1 阳澄湖网围内外 6 个站点理化指标年均值

Tab. 1 The annual average of main physical and chemical parameters in the 6 sample sites of Yangcheng Lake

指标 Index	A1	A2	B1	B2	C1	C2
水温 Water temperature/°C	19.20 ± 10.70	19.32 ± 10.56	19.00 ± 10.52	18.92 ± 10.30	17.60 ± 11.00	18.89 ± 10.56
水深 Depth/m	1.89 ± 0.40	1.94 ± 0.28	2.03 ± 0.31	1.90 ± 0.21	1.82 ± 0.30	1.81 ± 0.26
透明度 SD/cm	65.33 ± 21.10	59.67 ± 22.47	50.00 ± 15.78	51.38 ± 18.22	62.00 ± 22.30	57.71 ± 16.71
pH	8.59 ± 0.60	8.45 ± 0.87	8.79 ± 0.77	8.30 ± 0.77	8.40 ± 0.40	8.54 ± 0.55
溶解氧 DO/(mg/L)	9.13 ± 2.80	10.72 ± 2.77	9.81 ± 3.29	10.42 ± 2.87	9.42 ± 3.00	10.15 ± 2.02
高锰酸盐指数 COD _{Mn} /(mg/L)	4.95 ± 4.00	6.45 ± 1.78	7.09 ± 3.90	6.26 ± 1.89	6.35 ± 2.30	6.54 ± 1.75
氨氮 NH ₃ -N/(mg/L)	0.46 ± 0.40	0.65 ± 0.47	0.72 ± 0.59	0.60 ± 0.56	0.58 ± 0.30	0.91 ± 1.32
总氮 TN/(mg/L)	1.92 ± 2.20	2.57 ± 1.70	1.49 ± 1.27	2.35 ± 1.70	1.17 ± 0.40	1.90 ± 1.35
总磷 TP/(mg/L)	0.145 ± 0.10	0.14 ± 0.09	0.19 ± 0.06	0.20 ± 0.08	0.135 ± 0.10	0.20 ± 0.14
叶绿素 a <i>Chl. a</i> /(mg/m ³)	26.83 ± 18.90	37.29 ± 25.02	15.59 ± 25.02	31.84 ± 25.74	20.85 ± 19.90	20.75 ± 16.17
卡尔森营养状态指数 TSIM	67.00	68.71	68.06	71.83	62.81	67.32

网围内的透明度均值[(61.22 ± 7.65) cm]高于网围外[(56.97 ± 7.42) cm],溶解氧均值[(9.68 ± 0.07) mg/L]高于网围外[(9.39 ± 0.23) mg/L],总磷均值[(0.18 ± 0.42) mg/L]高于网围外[(0.16 ± 0.01) mg/L]。而网围内氨氮均值为(0.45 ± 0.04) mg/L,略低于网围外[(0.49 ± 0.05) mg/L],总氮均值[(1.35 ± 0.15) mg/L]低于网围外[(1.58 ± 0.70) mg/L],叶绿素 a 均值[(23.55 ± 3.81) mg/m³]低于网围外[(25.13 ± 1.37) μg/L]。其他环境因子均值没有太大差异。

2.2 养蟹网围内外浮游植物种类组成的对比

阳澄湖养蟹网围内外 6 个采样点共采集到浮游植物 8 门 116 属 275 种(包括变种),其中蓝藻门 17 属 38 种,绿藻门 54 属 111 种,硅藻门 32 属 46 种,裸藻门 6 属 23 种,隐藻门 2 属 4 种,甲藻门 3 属 5 种,金藻门 3 属 4 种,黄藻门 4 属 5 种。在网围内采样点 A1、B1、C1 采集到浮游植物分别为 176 种、167 种、183 种;网围外湖区采样点 A2、B2、C2 分别为 176 种、163 种、189 种。对 3 组对照组进行 S_j 相似性指数分析:A1 与 A2 为 0.63, B1 与 B2 为 0.72, C1 与 C2 为 0.62,结果显示各养蟹网围内外浮游植物种类均为中等相似。

养蟹网围内外浮游植物各门类所占比例相似:网围内蓝藻门占 78.44%,绿藻门占 16.96%,硅藻门占 3.39%,裸藻门占 0.03%,黄藻门占

0.57%,金藻门占 0.23%,甲藻门占 0.05%;网围外蓝藻门占 74.59%,绿藻门占 15.87%,硅藻门占 4.44%,裸藻门占 0.11%,黄藻门占 0.55%,金藻门占 0.30%,甲藻门占 0.02%。在阳澄湖这 6 个采样点中蓝藻、绿藻和硅藻占浮游植物总数 90% 以上,其中 3 组对照组即 A1 与 A2、B1 与 B2、C1 与 C2 的绿藻、硅藻和蓝藻的占比相似(图 2),均以蓝藻门占主要比例,绿藻门次之,硅藻门最少。

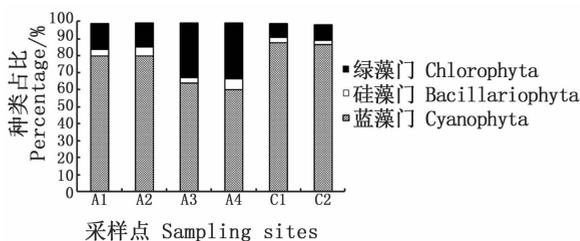


图 2 网围内外主要门类浮游植物所占的百分比
Fig. 2 The percentage of different phylum phytoplankton in Yangcheng Lake

阳澄湖网围内发现优势种共 3 种,分别为铜绿微囊藻(*M. aeruginosa*)、不定微囊藻(*M. aeruginosa*)和伪鱼腥藻属未定种(*Pseudoanabaena* sp.),均属蓝藻门;这 3 种蓝藻在网围外也是优势种,但相比网围内多了密集微囊藻(*M. densa*),同样均属蓝藻门。其中阳澄湖网围内外优势度排前 3 且在网围内外均出现的优势种有 3 种,为

铜绿微囊藻、不定微囊藻和伪鱼腥藻属未定种。

2.3 养蟹网围内外浮游植物优势种的季节变化

阳澄湖网围内外共出现优势种 21 种,隶属于蓝藻门(8 种)、硅藻门(3 种)、绿藻门(10 种)。从整体上看,优势种有较为明显的季节变化,不同季节的主导优势种以及优势种类有一定的差异(表 2)。网围内冬季优势种种类数最多,为 11 种,以绿藻门为主,优势度最高的是裂开圆丝鼓藻(*Hyalotheca dissiliens*),优势度为 0.11;秋季优势种为 10 种,以蓝、绿藻门为主,优势度最高的是铜绿微囊藻,为 0.22;春季优势种为 9 种,以绿藻门为主,优势度最高的是伪鱼腥藻属未定种,为 0.34;优势种种类数最少的是夏季,为 7

种,均为蓝藻,优势度最高的是铜绿微囊藻,为 0.38。网围外冬季优势种种类数最多,为 11 种,以绿藻门为主,但是优势度最高的是硅藻门的梅尼小环藻(*Cyclotella meneghiniana*),为 0.13;春季和秋季优势种均为 10 种,以蓝、绿藻门为主,优势度最高的种均是不定微囊藻(*M. incerta*),分别为 0.13 和 0.15;夏季优势种种类数最少,为 6 种,均为蓝藻门,优势度最高的是铜绿微囊藻,为 0.37。总体看来,阳澄湖网围内外四季优势种组成以及演替情况相似,各个季节均出现的优势种为不定微囊藻和伪鱼腥藻属未定种,总体上春秋冬季蓝硅藻分布均匀,而夏季以蓝藻门为主。

表 2 阳澄湖网围内外四季优势种的对比

Tab.2 Seasonal variation of main dominant species in the Yangcheng Lake

代码/优势种 Code/Species	优势度 Dominance							
	网围内 Inside				网围外 Outside			
	春 Spr.	夏 Sum.	秋 Aut.	冬 Win.	春 Spr.	夏 Sum.	秋 Aut.	冬 Win.
蓝藻门 Cyanophyta								
A1 铜绿微囊藻 <i>Microcystis aeruginosa</i>		0.38	0.22			0.37	0.13	
A2 密集微囊藻 <i>M. densa</i>						0.09		
A3 具缘微囊藻 <i>M. marginata</i>		0.02					0.03	
A4 不定微囊藻 <i>M. incerta</i>	0.09	0.17	0.18	0.04	0.13	0.13	0.15	0.02
A5 微小平裂藻 <i>Merismopedia tenuissima</i>		0.03	0.02				0.03	
A6 类颤藻鱼腥藻 <i>Anabeana oscillarioides</i>					0.03			
A7 伪鱼腥藻属未定种 <i>Pseudoanabaena</i> sp.	0.34	0.04	0.07	0.07	0.20	0.04	0.08	0.10
A8 小颤藻 <i>Oscillatoria tenuis</i>					0.03			
硅藻门 Bacillariophyta								
B9 颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i>							0.03	
B10 梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i>				0.10				0.13
B11 尖针杆藻 <i>Synedra acusvar</i>				0.09				
绿藻门 Chlorophyta								
C12 巨型胶囊藻 <i>Gloecystis ampla</i>			0.03					
C13 小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i>	0.02		0.03	0.05	0.04		0.02	0.12
C14 微芒藻 <i>Micractinium pusillum</i>	0.03			0.06	0.04			0.05
C15 丝藻属未定种 <i>Ulothrix</i> sp.			0.02					
C16 小双胞藻 <i>Geminella minor</i>			0.02	0.03			0.04	0.02
C17 裂开圆丝鼓藻 <i>Hyalotheca dissiliens</i>				0.11				0.06
C18 胶网藻未定种 <i>Dictyosphaerium</i> sp.	0.03			0.05	0.04			0.04
C19 四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricauda</i>								0.03
C20 被甲栅藻 <i>S. armatus</i>	0.03							
C21 小空星藻 <i>Coelastrum microporum</i>	0.02				0.03			

2.4 养蟹网围内外浮游植物现存量对比

阳澄湖养蟹网围内生物密度年均值为 $(3\ 143.38 \pm 3\ 660.84) \times 10^4$ 个/L,网围外生物密度年均值为 $(3\ 830.77 \pm 4\ 296.56) \times 10^4$ 个/L,网围内年均值低于网围外,这种现象在 3—5 月

7—8 月这两个时间段较为明显。方差分析表明网围内外没有显著差异($P > 0.05$)。且从总体趋势看来,阳澄湖养蟹网围内外浮游植物生物密度的年变化趋势相似,7 月和 8 月浮游植物生物密度值出现高峰期,在次年 4 月和 5 月出现小高峰

(图3)。

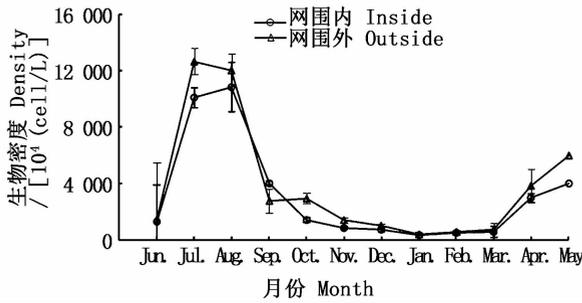


图3 网围内外浮游植物平均生物密度的周年变化

Fig. 3 Variation of monthly average density of phytoplankton in Yangcheng Lake

浮游植物生物量在网围外年均值为(5.24 ± 4.10) mg/L,网围内的年均值为(3.71 ± 2.31) mg/L,网围内生物量均值低于网围外。网围内外生物量在6月份出现高峰期,在次年5月出现小高峰(图4)。方差分析表明网围内外没有显著差异(P>0.05)。

2.5 养蟹网围内外浮游植物的物种多样性指数
阳澄湖浮游植物网围内平均 Shannon-Wiener

表3 网围内外浮游植物多样性指数 H', D 和 J 的季度变化

Tab. 4 Seasonal variation of H', D and J in the Yangcheng Lake

	H'				J				D			
	春 Spr.	夏 Sum.	秋 Aut.	冬 Win.	春 Spr.	夏 Sum.	秋 Aut.	冬 Win.	春 Spr.	夏 Sum.	秋 Aut.	冬 Win.
A1	2.56	1.98	2.55	2.81	0.62	0.49	0.65	0.80	3.87	2.97	3.11	2.26
A2	2.42	1.79	2.51	2.72	0.58	0.46	0.58	0.71	4.01	2.87	4.14	2.83
B1	2.53	2.06	2.26	2.68	0.62	0.53	0.59	0.69	3.51	2.77	2.71	3.07
B2	2.52	1.27	2.41	2.64	0.61	0.32	0.59	0.69	3.67	1.97	3.51	2.82
C1	2.15	2.33	2.69	2.90	0.53	0.58	0.67	0.77	3.37	3.20	3.11	2.85
C2	2.22	1.84	2.36	2.91	0.54	0.45	0.59	0.74	3.57	3.31	3.21	3.29

2.6 养蟹网围内外浮游植物与环境变量的 RDA 分析

对阳澄湖网围内外 21 种优势种和环境因子分别进行趋势对应分析(DCA),可知网围内排序轴中梯度最大值为 1.459,网围外为 1.426。采用基于线性模型的排序方法,用 RDA 对 21 种优势种与理化因子进行分析,其中浮游植物种类代码见表 2,前两个主排序轴与环境因子相关性系数统计信息见表 4。

网围内第一、第二排序轴特征值分别为 0.414 和 0.123;浮游植物种类与环境因子相关性系数分别为 0.916 和 0.920,物种变异累计百分

多样性指数 H'、Pielou 物种均匀度指数 J 和 Margalef 物种丰富度指数 D 分别为 2.46 ± 0.07、0.63 ± 0.02 和 3.06 ± 0.06;网围外湖区采样点年平均 H' 值、J 值和 D 值分别为 2.30 ± 0.08、0.57 ± 0.02 和 3.25 ± 0.24。3 种多样性指数没有明显的季节变化,且均在 8 月出现最小值,多样性指数 H' 和均匀度指数 J 的最大值出现在 3 月份,而丰富度指数 D 的最大值出现在 4 月份。方差分析表明网围内外没有显著差异(P > 0.05),见表 3。

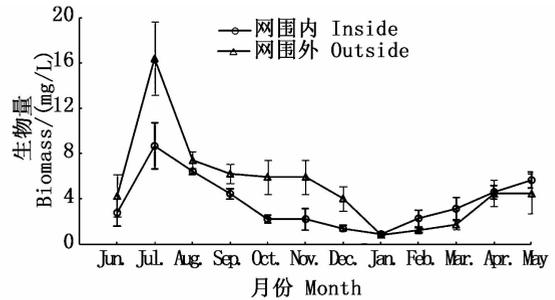


图4 网围内外浮游植物平均生物量的周年变化

Fig. 4 Variation of monthly average biomass of phytoplankton in Yangcheng Lake

数分别是 41.4% 和 53.7%,种类-环境变异累计百分数分别是 53.7% 和 65.9%。网围外第一、第二排序轴特征值分别为 0.551 和 0.142;浮游植物种类与环境因子相关性系数分别为 0.999 和 0.993,物种变异累计百分数分别是 55.1% 和 69.4%,种类-环境变异累计百分数分别是 56.3% 和 70.8%。

对环境变量与浮游植物密度进行 RDA 分析,网围内排序结果表明溶解氧和水温对浮游植物群落结构的影响比较大,其中水温对浮游植物群落结构影响最大,而影响最小的环境因子是 pH。所有的蓝藻都与水温有较大的正相关,与

pH、溶氧呈负相关;硅藻门中梅尼小环藻和尖针杆藻与水温呈负相关,与溶氧、pH 呈正相关,而硅藻门中颗粒直链藻与温度和 pH 呈正相关,与溶氧呈负相关;绿藻门中巨型胶囊藻、四尾栅藻和被甲栅藻在排序图中位置接近,说明它们生境相似,与水温呈正相关,溶氧呈负相关,除此之外大部分绿藻与水温呈负相关,其中小双胞藻与坐

标轴原点较为相近,可以看出它受环境因子的影响较小。网围外排序结果表明 pH 和水温对浮游植物群落结构的影响比较大,其中 pH 对浮游植物群落结构影响最大,而总氮的影响最小。蓝藻门、硅藻门以及绿藻门浮游植物与水温的相关性情况与网围内相似(图 5)。

表 4 阳澄湖网围内外 6 个采样点浮游植物群落 RDA 分析的统计信息

Tab. 4 Summary statistics for the axes of RDA performed on phytoplankton in Yangcheng Lake

轴 Axis	网围内 Inside		网围外 Outside	
	轴 1 Axis 1	轴 2 Axis 2	轴 1 Axis 1	轴 2 Axis 2
特征值 Eigenvalues	0.414	0.123	0.551	0.142
浮游植物种类与环境因子相关性 Spec. -env. correlations	0.916	0.920	0.999	0.993
物种变异累积百分数 Cum. percentage variance of species data	41.4	53.7	55.1	69.4
种类-环境变异累积百分数 Cum. percentage variance of spec. -env. relation	50.8	65.9	56.3	70.8
总特征值 Sum of all eigenvalues	1.000		1.000	
总典范特征值 Sum of all canonical eigenvalues	0.814		0.979	

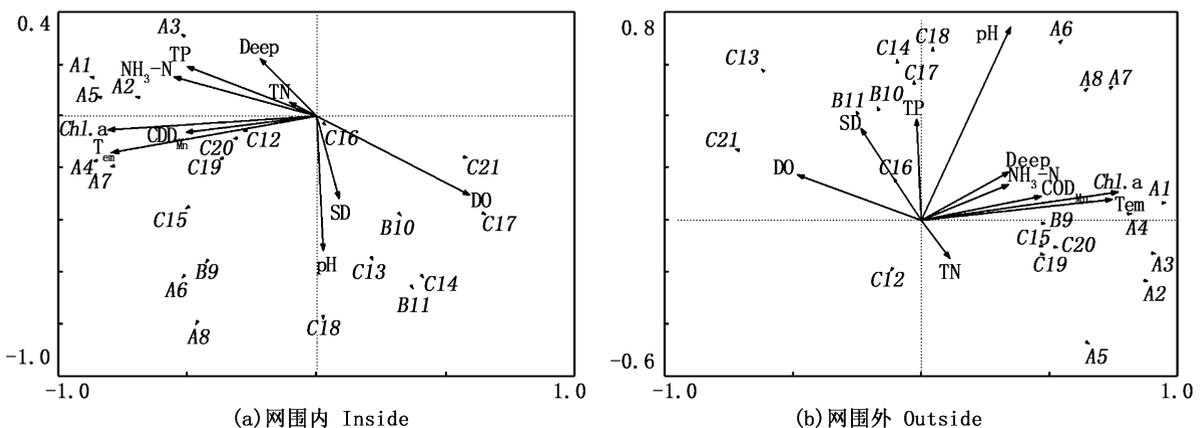


图 5 阳澄湖网围内外浮游植物物种与环境因子的 RDA 分析

Fig. 5 RDA biplot of phytoplankton species and environmental variables of Yangcheng Lake

3 讨论

3.1 养蟹网围内外浮游植物与环境因子的相关分析

浮游植物的生长繁殖会受到各类因子的制约,限制因子必须在适合浮游植物生长的范围内。这些因素可能是浮游植物所处水体的环境因素,如温度、压力、pH、盐度、水动力、营养盐等,也可能是水体中其他生物种类甚至是浮游植物不同种类之间,如捕食、竞争、寄生等^[26]。

从季节上来看,网围内外的浮游植物生物密度变化趋势相似:均于 5 月生物密度达到小高

峰,7 月或 8 月达到生物密度最高峰。由此看出在浮游植物生物密度周年变化中有较为明显的季节规律,合适的水温有助于浮游植物的生长^[27]。Pearson 相关性统计结果表明:水温与浮游植物的生物密度、生物量呈极显著正相关(与生物密度: $r = 0.615$, $P < 0.01$;与生物量: $r = 0.504$, $P < 0.01$)。阳澄湖网围内外 21 种优势种和环境因子的 RDA 分析结果表明温度是对浮游植物密度分布造成影响最大的环境因子:蓝藻是喜温性藻,与水温呈正相关,处于 13 °C 以下的蓝藻生长缓慢,其最适生长温度为 25 ~ 35 °C,主要出现在温度较高的夏秋季;金藻门的黄群藻与黄

藻门的黄丝藻都是冷水种,与水温呈负相关,主要出现在寒冷的冬季;硅藻门中梅尼小环藻和尖针杆藻与水温呈负相关,与大部分硅藻喜低温的特征相符。由此可认为水温是影响阳澄湖浮游植物现存量的重要决定因素。

网围内外浮游植物现存量没有统计学上的显著差异,从年均值上看,网围内生物密度和生物量基本都低于网围外。阳澄湖围网养殖期为3—10月,非养殖期为11月至次年2月;养殖期间一般3—4月份会投放蟹苗和螺蛳及种水草,由于水温渐渐升高,河蟹开始全面摄食;4—10月是浮游植物生长高峰期,也是河蟹摄食的旺季,尤其是9月份摄食强度达到顶峰,但4—10月份网围内浮游植物的生物密度和生物量均低于网围外。可见网围中放养的大闸蟹、花白鲢以及投放的螺蛳会滤食、摄食浮游植物,对浮游植物现存量起到降低效果。

Pearson 相关性分析结果显示溶解氧与浮游植物生物密度呈极显著负相关(与生物密度: $r = -0.240$, $P < 0.01$)。网围养殖期间的4月份开始网围内种植水草,这些水草是河蟹的天然饵料,也是河蟹栖息、避敌、蜕壳的场所,对于水体而言可以增加溶氧量、净化水体^[28-29]。同时,水草通过向水体中释放化感物质来抑制浮游植物的生长,也可以为水体中生存的其他微生物提供附着基质,一些微生物以浮游植物为食,故能有效控制浮游植物的现存量^[30]。网围中的氮、磷并没有因为投放饵料而升高,反而与网围外湖区的含量相近甚至略低,金鱼藻、狐尾藻、苦草和伊乐藻可以明显控制水体中总氮、总磷含量^[31-32]。另外,轮藻对小球藻和鱼腥藻有抑制作用^[33],狐尾藻通过向水体释放酚类化合物抑制蓝藻(如巨颤藻和铜绿微囊藻)的生长^[34],相关研究表明金鱼藻和苦草对浮游植物也有抑制作用^[35]。因此,定期种植水草可以维持网围内水质,有效抑制浮游植物大量繁殖,在此期间网围内浮游植物的生物密度和生物量并没有因为养殖投放饵料导致水质变差,反而低于对应湖区。

3.2 养蟹网围内外水质比较

根据国内有关湖泊富营养化评价标准^[36],网围内以及对应湖区的生物密度均大于 100×10^4 个/L,网围生物量的年均值范围为 3~5 mg/L,网围外湖区的生物量均值略大于 5 mg/L,网围内低

于 5 mg/L,可见网围内外均属中营养-富营养水体,且跟网围外湖区富营养化水平相比,网围内还略低。

根据浮游植物多样性指数评价标准^[37],养蟹网围内外的年均 H' 值都小于 3, D 值都在介于 3 和 4 之间,可得网围内外水质均为 β -中污型。从网围内外比较来看,网围 H' 值和 D 值都要大于网围外的,网围的水质比网围外略好,这与浮游植物的现存量得出的结果相似。

传统研究^[38-39]认为网围养殖导致湖泊水质变差,而吴庆龙等^[40]对东太湖河蟹网围养殖区域内水体环境效应的影响、凌云等^[10]对阳澄湖养殖网围内浮游细菌的调查以及陈立婧等^[11]对阳澄湖河蟹网围内外轮虫群落结构变化的研究皆得出网围养蟹对湖泊整体水质及湖泊中浮游生物的影响均不大。通过对比研究发现,网围养蟹的养殖模式对阳澄湖浮游植物群落结构没有影响,由于养殖期间投放的水草可以有效控制浮游植物的大量繁殖,能够达到“以蟹保水”的目标,较有效的改善湖泊水质,缓解湖泊富营养化发展。

感谢上海海洋大学吴淑贤、刘樵、蔡骏、马俊等同学参加的部分野外调查及室内实验,同时也感谢阳澄湖渔政站提供的采样船及阳澄湖网围养殖数据。

参考文献:

- [1] 楚敏明. 浅议保护阳澄湖水质的对策措施[J]. 江苏水利, 2004(12): 36-37.
CHU M M. Discussion on the measures to protect water quality of Yangcheng Lake [J]. Jiangsu Water Resources, 2004(12): 36-37.
- [2] 杨积德, 沈楨, 陈美丹, 等. 阳澄湖水环境综合整治对策研究与分析[J]. 中国给水排水, 2010, 26(6): 6-10.
YANG J D, SHEN Z, CHEN M D, et al. Research on comprehensive improvement countermeasures of Yangcheng Lake water environment [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(6): 6-10.
- [3] 翁建中, 李继影, 徐恒省, 等. 阳澄湖浮游植物研究及其富营养化评价[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(10): 41-44, 49.
WENG J Z, LI J Y, XU H S, et al. Studies on phytoplankton of Yangchenghu Lake and its eutrophication evaluation [J]. Environmental Science and Management, 2009, 34(10): 41-44, 49.
- [4] 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.
HE J, GU X H, LIU G F. Effect and optimization model of

- enclosure crab culture in East Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009, 21(4): 523-529.
- [5] 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.
YANG Q X, LI W C, YU L, et al. Pen-fish-farming development in East Taihu Lake and its effects on lake environment [J]. *Journal of Lake Sciences*, 1995, 7(3): 256-261.
- [6] 刘其根, 孔优佳, 陈立侨, 等. 网围养殖对溲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 and Environmental Biology*, 2005, 11(5): 566-570.
- [7] 薛俊增, 蔡桢, 方伟, 等. 淀山湖养殖围网拆除后昆山水域浮游生物生态现状初步研究[J]. *上海海洋大学学报*, 2010, 19(4): 514-520.
XIE J Z, CAI Z, FANG W, et al. Ecological status of plankton in Kunshan area of Dianshan Lake after aquaculture net dismantling [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2010, 19(4): 514-520.
- [8] 宋学宏, 邴旭文, 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.
- [9] 辛玉婷. 阳澄湖网围养殖污染负荷计算及其污染效应研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
XIN Y T. Study on the pollution load calculation and polluting effect of barrier net aquaculture in Yangcheng Lake [D]. Nanjing: Hohai University, 2007.
- [10] 凌云, 王峤淑, 顾佳洁, 等. 阳澄湖湖区与网围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.
LING Y, WANG Q S, GU J J, et al. Population dynamics and diversity of bacteria in Yangcheng Lake and its enclosure culture area [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2010, 49(8): 1942-1945.
- [11] 陈立婧, 刘樵, 彭自然, 等. 阳澄湖养蟹网围内外轮虫群落结构的变化及分析[J]. *水产学报*, 2011, 35(8): 1247-1257.
CHEN L J, LIU Q, PENG Z R, et al. The variation and analysis of rotifer community structure in and out of crab-net-pen closing in the Yangcheng Lake [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2011, 35(8): 1247-1257.
- [12] 孙月娟, 王武, 刘其根, 等. 江苏阳澄湖螺类群落的空间分布格局[J]. *长江流域资源与环境*, 2011, 20(6): 711-716.
SUN Y J, WANG W, LIU Q G, et al. Spatial distribution of snail (Gastropod) community in Yangcheng Lake, Jiangsu Province, China [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(6): 711-716.
- [13] LEPISTÖ L, RÄEIKE A, PIETILÄINEN O P. Long-term changes of phytoplankton in a eutrophicated boreal lake during the past one hundred years (1893-1998) [J]. *Algal Studies*, 1999, 94: 223-244.
- [14] NAUMANN E. Några synpunkter angående limnoplanktons Ökologi med särskild hänsyn till fytoplankton [J]. *Svensk Botanisk Tidskrift*, 1919, 13: 129-163.
- [15] NYGAARD G. Hydrobiological studies on some Danish ponds and lakes. II: the quotient hypothesis on some new or little known phytoplankton organisms [J]. *Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab*, 1949, 7: 1-242.
- [16] 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: 1-247.
HUANG X F. Survey, Observation and Analysis of Lake Ecology [M]. Beijing: China Standard Press, 2000: 1-247.
- [17] 朱浩然. 中国淡水藻志, 第7卷, 色球藻纲[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
ZHU H R. The freshwater algae of China, Volume 7, Chromococcophyceae [M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [18] 魏印心. 中国淡水藻类志, 第7卷第1册, 绿藻门双星藻目中带鼓藻科、鼓藻目鼓藻科[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
WEI Y X. Flora algarum sinicarum aquae dulcis [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [19] 齐雨藻, 李家英. 中国淡水藻志, 第10卷, 硅藻门, 羽纹纲[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
QI Y Z, LI J Y. Flora algarum sinicarum aquae dulcis [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [20] 施之新. 中国淡水藻志, 第12卷, 硅藻门, 异极藻科[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
SHI Z X. Flora algarum sinicarum aquae dulcis [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [21] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类——系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
HU H J, WEI Y X. The freshwater algae of China; systematics, taxonomy and ecology [M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [22] XIA Y C, KUANG Q J. Study on the phytoplankton in a large reservoir [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 1992, 10(4): 359-370.
- [23] 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.
WANG Y L, YUAN J, SHEN X Q. Ecological character of phytoplankton in spring in the Yangtze River estuary and adjacent waters [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2005, 12(3): 300-306.
- [24] TSIRTISIS G, KARYDIS M. Evaluation of phytoplankton community indices for detecting eutrophic trends in the marine environment [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*,

- 1998, 50(3): 255-269.
- [25] CARLSON R E. A trophic state index for lakes[J]. *Limnology and Oceanography*, 1997, 22(2): 361-369.
- [26] ŠMILAUER P, LEPŠ J. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO 5 [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [27] 黄玉瑶. 内陆水域污染生态学—原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
HUANG Y Y. Pollution ecology of inland waters [M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [28] NOGRADY T, WALLACE R L, SNELL T W, et al. Rotifera. Volume 1: biology, ecology and systematics [J]. *Quarterly Review of Biology*, 2006, 52(8): 1646-1646.
- [29] 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.
XU X F. A technology about ecological reservoir net enclosure without pollution [J]. *Beijing Aquatic Products*, 2003(3): 34-36.
- [30] 杨旻, 吴小刚, 张维昊, 等. 富营养化水体生态修复中水生植物的应用研究[J]. *环境科学与技术*, 2007, 30(7): 98-102.
YANG M, WU X G, ZHANG W H, et al. Application of aquatic plant in ecological restoration of eutrophic water [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 30(7): 98-102.
- [31] 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): 184-188.
GAO G. Experimental studies on the effect of purification of fishculture waste water by *Elodea nantali* and *Hydrilla verticillata* [J]. *Journal of Lake Sciences*, 1996, 8(2): 184-188.
- [32] 宋福, 陈艳卿, 乔建荣, 等. 常见沉水植物对草海水体(含底泥)总氮去除速率的研究[J]. *环境科学研究*, 1997, 10(4): 47-50.
SONG F, CHEN Y Q, QIAO J R, et al. Study on the removal rate to total nitrogen in Caohai Lake (including sediments) by common submerged macrophytes [J]. *Research of Environmental Sciences*, 1997, 10(4): 47-50.
- [33] BERGER J, SCHAGERL M. Allelopathic activity of *Chara aspera* [J]. *Hydrobiologia*, 2003, 501(1/3): 109-115.
- [34] NAKAI S, INOUE Y, HOSOMI M, et al. *Myriophyllum spicatum* released allelopathic polyphenols inhibiting growth of blue-green algae *Microcystis aeruginosa* [J]. *Water Research*, 2000, 34(11): 3026-3032.
- [35] JASSER I. The influence of macrophytes on a phytoplankton community in experimental conditions [J]. *Hydrobiologia*, 1995, 306(1): 21-32.
- [36] 王朝晖, 韩博平, 胡韧, 等. 广东省典型水库浮游植物群落特征与富营养化研究[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(4): 402-405, 409.
WANG Z H, HAN B P, HU R, et al. Phytoplankton community structure and eutrophication of reservoirs in Guangdong Province, China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(4): 402-405, 409.
- [37] 郭沛涌, 林育真, 李玉仙. 东平湖浮游植物与水质评价[J]. *海洋湖沼通报*, 1997(4): 37-42.
GUO P Y, LIN Y Z, LI Y X. Study on phytoplankton and evaluation of water quality in Dongping Lake [J]. *Transaction of Oceanology and Limnology*, 1997(4): 37-42.
- [38] SCHEFFER M. The effect of aquatic vegetation on turbidity; How important are the filter feeders? [J]. *Hydrobiologia*, 1999, 408/409: 307-316.
- [39] 陈立婧, 顾静, 彭自然, 等. 溲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.
CHEN L J, GU J, PENG Z R, et al. The community structure of rotifer and ecological assessment of water quality of Lake Gehu [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2008, 43(3): 7-16.
- [40] 吴庆龙, 陈凯宁, 高光, 等. 大水面网围精养对水环境的影响及其对策[J]. *水产学报*, 1995, 19(4): 343-349.
WU Q L, CHEN K N, GAO G, et al. Effects of pen fish culture on water environment and their countermeasure [J]. *Journal of Fisheries of China*, 1995, 19(12): 343-349.

Effect of pen crab farming on phytoplankton community structure

CHONG Linxuan^{1,2,3}, LIU Ruhan^{1,2,3}, YIN Liping^{1,2,3}, MIAO Xuemei^{1,2,3}, CHEN Lijing^{1,2,3}

(1. National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Agriculture, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. Shanghai Collaborative Innovation for Aquatic Animal Genetics and Breeding, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: From June 2008 to May 2009, the phytoplankton community structure characteristics of the net-pen closing area and three corresponding points in Yangcheng Lake were investigated, the relationship between the phytoplankton community structure and environmental variables was analyzed, and multiple parameters were used to evaluate water quality. A total of 275 species, belonging to 116 genera of 8 phyla, were identified. In net-pen closure area, *Microcystis incerta*, *M. aeruginosa* and *Pseudoanabaena* sp. were the dominant species, while *Microcystis incerta*, *Merismopedia aeruginosa*, *Pseudoanabaena* sp. and *M. densa* were dominant in lake area. The annual mean value of density [$(3\ 143.38 \pm 3\ 660.84) \times 10^4$ cell/L] and biomass [(3.71 ± 2.31) mg/L] of phytoplankton in the lake area were lower than the average value of density [$(3\ 830.77 \pm 4\ 296.56) \times 10^4$ cell/L] and biomass [(5.24 ± 4.10) mg/L] in net-pen closure area. The results of redundancy analysis (RDA) suggested that temperature was the main environmental factor affecting the community structure of phytoplankton, and it had a significant positive correlation with the density of phytoplankton. Water quality analysis indicated that the water in the net-pen closure area and lake area was all meso-eutrophicated, and there was no significant difference among the 3 groups.

Key words: pen crab farming; Yangcheng Lake; phytoplankton; community structure; redundancy analysis