

河蟹生态养殖池浮游植物功能类群的结构特征*

郝俊^{1,2,3,4}, 马旭洲^{1,2,3**}, 王武^{1,2,3}, 王高龙^{1,2,3}, 王友成⁵, 郎月林⁵, 李星星⁶

(1: 上海海洋大学农业部淡水水产种质资源重点实验室, 上海 201306)

(2: 上海市水产养殖工程技术研究中心, 上海 201306)

(3: 水产动物遗传育种中心上海市协同创新中心, 上海 201306)

(4: 天津市水产技术推广站, 天津 300221)

(5: 上海鱼跃水产专业合作社, 上海 201611)

(6: 遵义市水产站, 遵义 563000)

摘要: 为探究河蟹生态养殖池浮游植物群落的结构及动态, 2013年4—10月对上海松江泖港地区河蟹养殖池的浮游植物进行了调查, 分析其种类构成、密度、生物量和生物多样性。共检测到浮游植物 105 种, 其中河蟹生态养殖池优势种 11 种, 分别属于 B、D、J、L₀、X1、W₀、X2、S1 和 MP 功能群。河蟹养殖池浮游植物平均密度为 282.58×10^4 cells/L, 平均生物量为 1.59 mg/L, Shannon-Wiener 多样性指数变化范围为 2.11~3.09。水源浮游植物平均密度为 175.13×10^4 cells/L, 平均生物量为 0.99 mg/L, Shannon-Wiener 多样性指数变化范围为 1.70~2.79。河蟹养殖池浮游植物平均密度分别于 5 月 14 日—6 月 14 日和 7 月 29 日—8 月 29 日与水源差异显著; 河蟹养殖池浮游植物平均生物量分别于 5 月 30 日、6 月 14 日和 7 月 29 日—8 月 29 日与水源差异显著; 河蟹养殖池浮游植物 Shannon-Wiener 生物多样性指数分别于 5 月 14 日—6 月 14 日和 8 月 14 日—9 月 15 日与水源差异显著。河蟹养殖池浮游植物的平均密度、平均生物量和生物多样性指数与水源水体变化趋势基本一致, 均高于水源, 群落稳定。

关键词: 河蟹; 浮游植物; 密度; 生物量; 功能类群; 生物多样性指数

Structure of phytoplankton functional groups in the ecological farming crab ponds

HAO Jun^{1,2,3,4}, MA Xuzhou^{1,2,3**}, WANG Wu^{1,2,3}, WANG Gaolong^{1,2,3}, WANG Youcheng⁵, LANG Yuelin⁵ & LI Xingxing⁶

(1: *Key Laboratory of Freshwater Fishery Germplasm Resources, Ministry of Agriculture, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, P.R.China*)

(2: *Shanghai Engineering Research Center of Aquaculture, Shanghai 201306, P.R.China*)

(3: *Shanghai Collaborative Innovation Center for Aquatic Animal Genetics and Breeding, Shanghai 201306, P.R.China*)

(4: *Tianjin Fisheries Technical Extension Station, Tianjin 300221, P.R.China*)

(5: *Shanghai Yuyue Aquaculture Cooperative, Shanghai 201611, P.R.China*)

(6: *Zunyi Fisheries Technical Extension Station, Zunyi 563000, P.R.China*)

Abstract: In order to explore the influence of phytoplankton community structure in the ecological farming crab pond, we collected phytoplankton from the crab ponds and the source of water from April to October 2013 in Maogang Town, Songjiang District, Shanghai. The phytoplankton species composition, density, biomass and biodiversity were analyzed. 11 dominant species of all 105 phytoplankton species were detected, finding that the B, D, J, L₀, X1, W₀, X2, S1, MP were the common species in the ecological farming crab ponds. Average density of the biological pond phytoplankton was 282.58×10^4 cells/L, the average biomass was 1.59 mg/L, and the range of Shannon-Wiener diversity index was 2.11 to 3.09. Average density of the phytoplankton biomass from

* 上海市中华绒螯蟹产业技术体系项目(D8003-10-0208)、国家星火计划项目(2011GA680001)、欧盟 FP7 亚欧水产平台项目(245020)和水产动物遗传育种中心上海市协同创新中心项目(ZF1206)联合资助。2015-10-12 收稿; 2015-12-30 收修改稿。郝俊(1988~),男,硕士,助理工程师;E-mail: jhao402042774@163.com.

** 通信作者; E-mail: xuzhouma@126.com.

the water source samples was 175.13×10^4 cells/L, the average biomass was 0.99 mg/L, and the range of Shannon-Wiener diversity index changed from 1.70 to 2.79. Average density of phytoplankton in crab pool was significantly higher than that in the river water during two periods from May 14 to June 14 and from July 29 to Aug. 29. The average crab pool phytoplankton biomass was significantly higher than that in the source of water at days of May 30, June 14, and from July 29 to Aug. 29. Phytoplankton Shannon-Wiener diversity was significantly higher than that in the source of water in periods from May 14 to June 14 and from Aug. 14 to Sept. 15. In summary, the crab pond phytoplankton species, density, biomass and biodiversity with much stable community were higher than those in the source of water.

Keywords: Crab; phytoplankton; density; biomass; functional groups; biodiversity index

浮游植物作为水生生态系统的初级生产者,是水生态系统食物链中最基础和重要的环节,其种类和数量的变化直接或间接地影响其他水生生物的丰度和分布,甚至会影响整个生态系统的稳定^[1]. 由于浮游植物生长周期短,对水环境的变化敏感而迅速,其生物量和群落结构能很好地反映水质现状及变化趋势,尤其是营养水平的变化,是评价水环境质量的重要指标^[2-4]. 林氏分类法和分子鉴定法在分析生态功能、评价水环境等方面的不足,促进了功能类群分类法的产生^[5]. 浮游植物功能类群是根据浮游植物种对不同环境因子限制的耐受差异及浮游植物个体形态的空间特征差异,将形态、生理和生态特征相似的浮游植物归为一组,组群内的浮游植物具有相同或相近的生存策略,每一组可以反映特定生态类型^[6]. 这种分类方法从生物的生态功能角度出发对浮游植物进行归类,属于生态分类方法,因此,它的提出具有积极的生态学意义^[7]. 2007年 Salmaso 等^[8]结合 FG 功能群和 PTF 功能型的优点,提出了 MFG 功能群划分法. 2010年 Kruk 等^[9]主要根据形态特征参数,提出 MBFG 划分法,使得功能群的应用大为简化. 目前浮游植物功能群分析方法已经被广泛应用^[10-11],黄国佳等^[12]探究了贵州高原三板水库浮游植物功能群时空分布特征,通过浮游植物功能群与环境因子的相互关系得出三板水库水体处于富营养状态.

河蟹学名中华绒螯蟹 (*Eriocheir sinensis*). 1990s 以来,随着人们生活水平逐步提高,我国河蟹养殖产业发展迅速,从大水面粗养发展到围栏精养,从大水体发展到小水面,从鱼蟹混养发展到稻田养蟹、河蟹生态养殖. 传统的河蟹养殖过多追求养殖经济效益,投入过多,引起周围水环境 N、P 浓度上升,富营养化日趋严重,水体水质恶化,是资源密集型、污染型的产业^[13-15]. 河蟹生态养殖是采用“种草、殖螺、稀放、轮养”仿生态模式,通过促进生产者、改革消费者、强化分解者而保持水域养殖生态系统生态平衡的一种新型生产模式^[16]. 对于河蟹生态养殖模式的关键技术,如蟹苗放养规格及密度、水草不同种植模式对水质及产量的影响、池塘溶解氧分布变化规律、生态养殖池塘对水质的净化等已有较多研究^[17-21]. 但对于河蟹生态养殖池塘浮游植物群落功能类群的研究还鲜有报道. 本研究将浮游植物功能类群分类方法运用到河蟹生态养殖池和水源的浮游植物群落时空变化中,探究浮游植物功能群的时空分布特征,以及优势浮游植物功能群与其适应性环境因子之间的相互关系,以期河蟹生态养殖池的水质管理提供理论基础,提高河蟹生态养殖池塘的生态效应,促进河蟹产业可持续发展,为生态养殖生产推广提供有力的理论依据.

1 材料与方 法

1.1 实验地点

实验在上海市松江区泖港镇三泖水产养殖公司养殖场 (30°57'10"N, 121°8'38"E) 进行,养殖地点位于黄浦江上游地区,池塘用水为黄浦江水.

1.2 实验材料

实验幼蟹由上海鱼跃水产合作社养殖基地提供. 每个养殖池塘已经连续多年进行河蟹养殖,3个实验池塘均为 8000 m² 的标准化池塘.

1.3 实验设计

1.3.1 池塘处理 河蟹养殖池规范整洁,最高水位约 1.5 m,坡比 1:3,池底平坦,进排水方便. 池塘南北向,每个池塘前期(6月前)分为种草区(80%)和暂养区(20%). 暂养区主要种植伊乐藻 (*Elodea nuttallii*),种草区主要种植轮叶黑藻 (*Hydrilla verticillata*),兼种伊乐藻和苦草 (*Vallisneria spiralis*),水草总面积控制在池塘面积的 60% 左右.

1.3.2 消毒与清塘 2012年12月商品蟹捕捞上市后,采用生石灰(1125 kg/hm²)、漂白粉(225 kg/hm²)和茶粕(300 kg/hm²)在水深1.0 m条件下消毒清塘,一天后排干池水,进行冻晒池底。

水草种植:1月中旬全池种植伊乐藻,面积为全池面积的30%左右,水位控制在30~40 cm。3月初播种苦草种子(7.5 kg/hm²),水位控制在40~50 cm。4月中旬采用切茎分段扦插法种植轮叶黑藻,种植面积40%左右,水位控制在50~60 cm。种草时,水位控制在超出水草约10 cm。

1.3.3 苗种投放 3月上旬投放规格为100~160只/kg的幼蟹(9000只/hm²)。4月初投放螺蛳(7500 kg/hm²)。4月中旬投放鲢规格为0.50~0.75 kg/尾(30尾/hm²),鳊为0.4~0.5 kg/尾(15尾/hm²),鲢、鳊鱼投放时需注意适当提高池塘水位。6月下旬投放体长2.0 cm的沙塘鳢(*Odontobutis obscurus*)3000尾/hm²。7月上旬投放体长2.0 cm的青虾22.5 kg/hm²。

1.4 采样分析方法

1.4.1 实验方法 实验于2013年4—10月进行,每月采样2次,采样时间为8:30—11:00。共采集3个河蟹池的水样,每个河蟹池设4个采样点;水源设3个采样点。样品采集方法主要根据《湖泊生态调查观测与分析》^[22]进行,浮游植物的鉴定参考《中国淡水藻类:系统、分类及生态》^[23]。

现场测定水温(WT)、pH值,采集1000 ml水样,带回实验室后测定溶解氧(DO)、总氮(TN)、铵态氮(NH₄⁺-N)、亚硝态氮(NO₂⁻-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、总磷(TP)和磷酸盐(PO₄³⁻-P)浓度。DO浓度和WT采用美国YSI 550A溶氧仪测定,pH值采用PHSJ-3F型实验室pH计酸度计测定,其他指标根据《水和废水监测分析方法》^[24]测定。

1.4.2 数据处理与分析 生物多样性指数采用Shannon-Wiener多样性指数(H'),是种类和种类中个体分配上的均匀性的综合指标,反映群落结构复杂程度和稳定性,其计算公式为:

$$H' = -\sum [(n_i/N) \cdot \log_2(n_i/N)] \quad (1)$$

式中, n_i 为第*i*种的个体数, N 为所有物种的总个体数。种类优势度 Y 的计算公式为:

$$Y = (n_i/N) \cdot f_i \quad (2)$$

式中, f_i 为第*i*种的出现频率, $Y > 0.02$ 为优势种。

采用SPSS 18.0软件包进行数据统计分析。河蟹养殖池与水源的浮游植物平均密度、平均生物量和生物多样性指数的比较均采用单因素方差分析(One-way ANOVA)。

浮游植物功能群丰度与环境因子的RDA分析采用CANOCO 4.5软件。

2 结果与分析

2.1 河蟹养殖池和水源水体的理化指标

根据《渔业水质标准》(GB 11607)和《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅲ级标准,2013年4—10月河蟹生态养殖池主要有PO₄³⁻-P、TP和pH值超标,水源主要超标指标为TN,同时水源水DO浓度远低于《渔业水质标准》和《地表水环境质量标准》。实验期间河蟹养殖池NO₂⁻-N浓度始终低于水源,且河蟹养殖池NO₂⁻-N浓度呈现整体下降趋势,而水源呈中期最高、前后期相对下降的趋势。河蟹养殖池NO₃⁻-N浓度变化趋势与NO₂⁻-N变化趋势相似,整个养殖区河蟹养殖池浓度较水源组低,水源NO₃⁻-N浓度一直保持在较高水平。养殖前期成蟹池NH₄⁺-N浓度略高于水源,6月29日之后,成蟹池NH₄⁺-N浓度较水源低。在整个养殖期间,成蟹池PO₄³⁻-P浓度均高于水源组,但在6月29日,水源PO₄³⁻-P浓度反超成蟹池(表1)。

表1 河蟹养殖池和水源水的理化指标

Tab.1 Physicochemical parameters in crab ponds and water source

指标	河蟹池	水源
WT/°C	11.13~32.20	11.17~32.37
DO/(mg/L)	4.83~9.00	2.60~7.47
pH	8.29~9.92	7.42~8.46
TN/(mg/L)	0.82~3.12	2.22~5.34
NH ₄ ⁺ -N/(mg/L)	0.18~1.25	0.26~2.31
NO ₂ ⁻ -N/(mg/L)	0.005~0.097	0.074~0.199
NO ₃ ⁻ -N/(mg/L)	0.07~0.71	0.45~2.28
TP/(mg/L)	0.24~0.57	0.10~0.63
PO ₄ ³⁻ -P/(mg/L)	0.12~0.40	0.02~0.48

2.2 河蟹养殖池与水源浮游植物的物种组成与优势种

2013年4—10月在上海松江泖港地区河蟹生态养殖池和水源共鉴定出浮游植物8门48属105种。其

中,绿藻门种类数最多,为45种;其次为硅藻门,为23种;裸藻门15种;蓝藻门9种;甲藻门6种;隐藻门5种;金藻门和黄藻门各1种.绿藻、硅藻、裸藻和蓝藻是河蟹养殖池和水源浮游植物群落的优势类群.河蟹生态养殖池鉴定出浮游植物80种,明显高于水源浮游植物(63种).

河蟹生态养殖池浮游植物优势种11种,分别为啮蚀隐藻(*Cryptomonas erosa*)、小席藻(*Phormidium tenus*)、银灰平列藻(*Merismopedia glauca*)、尖尾蓝隐藻(*Chroomonas acuta*)、广缘小环藻(*Cyclotella bodanica*)、尖针杆藻(*Synedra acus*)、短小舟形藻(*Navicula exigua*)、小球藻(*Chlorella vulgaris*)、球衣藻(*Chamydomonas globosa*)、集星藻(*Actinastrum hantzschii*)和链丝藻(*Ulothrix flaccidum*).根据功能群分类方法^[6],对浮游植物优势种进行功能类群划分,分别属于9个功能类群,为B、D、J、L₀、X1、W₀、X2、MP和S1(表2).水源浮游植物优势种6种,分别为小席藻、小球藻、银灰平列藻、广缘小环藻、四尾栅藻(*Scenedesmus quadricauda*)和短小舟形藻,分别属于S1、X1、L₀、B、J和MP功能类群.养殖池与水源的浮游植物优势种类大致相同,养殖池浮游植物的优势种类数多于水源,但水源优势种种类的优势度要高于养殖池.

表2 河蟹养殖池和水源浮游植物优势种功能群分类^[6]

Tab.2 Functional groups of phytoplankton in crab ponds and water source

组群	代表种(属)	生境特征
B	广缘小环藻 <i>Cyclotella bodanica</i>	中营养中小型或大型浅水水体,无分层现象
D	尖针杆藻 <i>Synedra acus</i> 、针形菱形藻 <i>Nitzschia acicularis</i>	河流在内的浑浊型浅水水体
J	集星藻 <i>Actinastrum</i> sp.、栅藻 <i>Scenedesmus</i> sp.、盘星藻 <i>Pediastrum</i> sp.、空星藻 <i>Coelastrum</i> sp.	混合的高营养浅水水体
L ₀	平裂藻 <i>Merismopedia</i> sp.、多甲藻 <i>Peridinium</i> sp.、色球藻 <i>Chroococcus</i> sp.	广适性,寡营养型到富营养型,大中型深水或浅水湖泊
X1	小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i> 、微小单针藻 <i>Monoraphidium minutum</i> 、纤维藻 <i>Ankistrodesmus</i> sp.	富营养型到高度富营养型的浅水水体
W ₀	衣藻 <i>Chamydomonas</i> sp.、绿色颤藻 <i>Oscillatoria chlorina</i>	有机质或水生生物腐败物丰富的河流和池塘
X2	蓝隐藻 <i>Chroomonas</i> sp.、微球衣藻 <i>Chamydomonas microsphaeraerella</i> 、隐藻 <i>Cryptomonas</i> sp.	中营养型到高度营养型的浅水水体
MP	舟形藻 <i>Navicula</i> sp.、链丝藻 <i>Ulothrix</i> sp.	经常受到搅动的、浑浊的浅水水体
S1	席藻 <i>Phormidium</i> sp.、蓝纤维藻 <i>Dactylococcopsis</i> sp.	透明度较低的混合水体

2.3 河蟹养殖池与水源浮游植物的平均密度

河蟹养殖池浮游植物密度变化范围为 $193.15 \times 10^4 \sim 394.03 \times 10^4$ cells/L,平均密度为 282.58×10^4 cells/L;水源浮游植物密度变化范围为 $103.73 \times 10^4 \sim 262.71 \times 10^4$ cells/L,平均密度为 175.13×10^4 cells/L.河蟹养殖池和水源浮游植物平均密度在实验期间均呈现先上升后下降的变化趋势,河蟹养殖池的浮游植物平均密度高于水源(图1a).

河蟹养殖池浮游植物平均密度在采样期间呈现双峰型的变化规律:峰值出现在6月14日,次峰值出现在7月29日,4月14日出现最低谷值.水源浮游植物平均密度呈现单峰型,峰值出现在6月29日,谷值也出现在4月14日.河蟹养殖池浮游植物平均密度分别于5月14日—6月14日和7月29日—8月29日与水源差异显著($P < 0.05$).

2.4 河蟹养殖池与水源浮游植物的平均生物量

河蟹养殖池浮游植物生物量变化范围为 $1.05 \sim 2.38$ mg/L,平均生物量为 1.59 mg/L;水源浮游植物生物量变化范围为 $0.52 \sim 1.55$ mg/L,平均生物量为 0.99 mg/L.河蟹养殖池在实验期间均呈现双峰型变化趋势;水源浮游植物平均生物量呈现单峰型变化趋势.河蟹养殖池浮游植物平均生物量高于水源(图1b).

河蟹养殖池浮游植物平均生物量峰值出现在6月14日,次峰值出现在7月29日,谷值出现在4月14日.水源浮游植物平均生物量峰值出现在6月14日,谷值出现在4月14日.河蟹养殖池浮游植物平均生物

量分别于5月30日、6月14日和7月29日—8月29日与水源差异显著($P<0.05$).

2.5 河蟹养殖池与水源浮游植物的多样性指数

河蟹养殖池浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数变化范围为 2.11~3.09, 水源浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数变化范围为 1.70~2.79. 河蟹养殖池与水源浮游植物 Shannon-Wiener 生物多样性指数均呈先上升后下降的变化趋势. 河蟹养殖池浮游植物 Shannon-Wiener 生物多样性指数高于水源(图 1c).

河蟹养殖池浮游植物 Shannon-Wiener 生物多样性指数先缓慢上升, 7月14日达到峰值后缓慢下降. 水源浮游植物 Shannon-Wiener 生物多样性指数与河蟹养殖池一致, 也在7月14日达到峰值. 河蟹养殖池浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数分别于5月14日—6月14日和8月14日—9月15日与水源差异显著($P<0.05$).

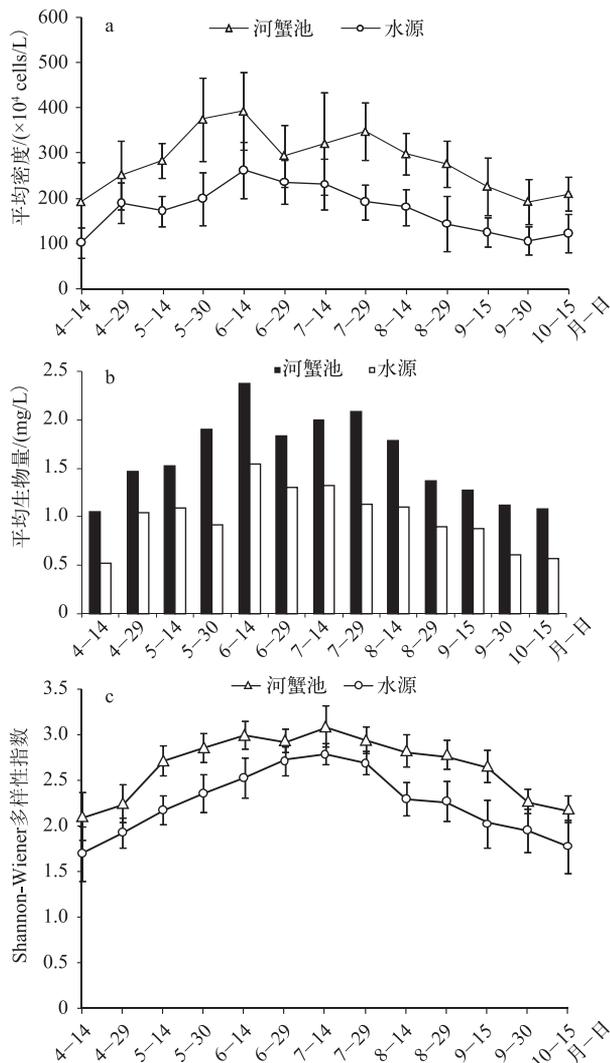


图1 河蟹养殖池和水源浮游植物平均密度(a)、平均生物量(b)和Shannon-Wiener多样性指数(c)变化

Fig.1 Variation of the average density (a), average biomass (b) and Shannon-Wiener diversity index (c) of phytoplankton in crab ponds and water source

2.6 河蟹养殖池与水源浮游植物功能群丰度与环境因子的 RDA 分析

通过对浮游植物功能群丰度数据去趋势分析(DCA),发现排序轴长为 1.550,浮游植物功能群群落分布更接近线性模型,故对浮游植物功能群丰度和 9 个环境因子进行冗余分析(RDA)(图 2).轴 1 和轴 2 的特征值分别为 0.417 和 0.158.前 2 个环境因子与物种轴之间的相关系数分别为 0.958 和 0.966,拟合度较好;物种-环境累计百分数分别为 55.10% 和 75.90%.

RDA 图中功能群 S1、MP、J、X1、B 的丰度与 DO 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度(与轴 1 的相关系数分别为 0.69 和 0.71,与轴 2 的相关系数分别为 0.26 和 0.04)呈正相关.功能群 D、X2、Lo 的丰度与 TN、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度(与轴 1 的相关系数分别为 0.17、0.7 和 0.49,与轴 2 的相关系数分别为 -0.02、-0.48 和 -0.42)呈正相关.功能群 W0 的丰度与 TP、pH、WT 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度(与轴 1 的相关系数分别为 -0.56、-0.57、-0.74 和 -0.73,与轴 2 的相关系数分别为 0.14、0.10、-0.07 和 0.01)呈正相关.

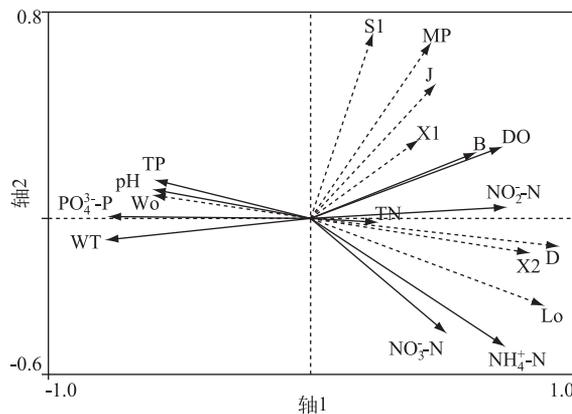


图 2 河蟹养殖池浮游植物功能群丰度与环境因子的 RDA 分析

Fig.2 Redundancy analysis of functional groups of phytoplankton in crab ponds and environmental factors

3 讨论

3.1 河蟹生态养殖池与水源浮游植物功能类群特征

浮游植物群落结构明显受水环境因子的影响,包括温度、溶解氧、营养盐等^[25-26].采样期间浮游植物种类数季节变化显著,总体上呈夏季最多、春秋次之、冬季最少的规律.蓝藻门和绿藻门种类数在各季节均占优势.蓝藻门在光线较弱、温度相对较高的秋季大量出现.控制浮游植物群落结构和物种演替有两个重要因素:一是水体混合、光、温度、浊度和盐度等的物理过程,二是营养物质浓度^[27-29].

调查发现,河蟹生态养殖池浮游植物优势种 11 种,分别属于 9 个功能类群,优势种数和功能群种类数全部高于水源.生态养殖池优势功能群类群大多数为适合在高营养型水体生存的类群,是由于河蟹生态养殖池投喂人工饲料及冰鲜鱼,大量外源性营养物质进入池塘,池塘营养水平较高.浮游植物功能类群的组成类型是由水体的营养水平决定的^[30].图 2 表明,大部分优势功能群与 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 TN 等营养盐因子呈正相关,优势功能群类型基本反映了池塘的营养水平.

3.2 河蟹生态养殖池和光源浮游植物功能群类群与环境因子之间的关系

不同的浮游植物有不同的最适温度,对大多数浮游植物来说,其最适生长温度介于 18~25℃ 之间^[31],并且在其它环境条件适宜的情况下,温度每上升 10℃,浮游植物代谢活动强度增加 2 倍^[2].在采样初期河蟹生态养殖池春季的平均水温为 18.91℃,温度较低,昼夜温差相对于夏、秋季节更大,且水草刚刚被种植到池塘中,生态效应较弱,利于 B 功能类群硅藻生长成为养殖池优势类群.经 RDA 分析也得出,B 功能类群与水温呈负相关,随着水温的升高,B 功能群藻类数量减少.此时 B 功能类群也是水源的优势种类,说明此时河蟹养殖池水环境与水源大致相同.

从5月14日至9月15日的河蟹生态养殖池水温范围为23.8~32.2℃,平均水温达到27.1℃.在这段时间内,浮游植物种类数增加,并且大量繁殖,生物密度大幅度上升,达到采样期间的峰值和次峰值.浮游植物的种类数和密度的变化趋势与上海周边河道和湖泊测定的结果^[32-33]相一致.养殖池塘中河蟹残饵、粪便等大量营养物质输入,致使水体浑浊,透明度降低,且养殖后期河蟹活动加剧,将池底底泥搅动,也导致池塘水体透明度降低,水下光强减弱.这种池塘环境有利于S1功能类群的发展,致使S1功能类群在整个养殖期都为池塘水体的优势类群.黄享辉等^[30]的研究也发现以喜静水水体的丝状蓝藻为代表的S1功能类群常年保持优势.此时的水源以S1、MP功能类群为浮游植物优势类群,与养殖池相比,河道中水生植物的密度、浮游生物的密度和种类数均小于养殖池,但浮游植物优势种的优势度大于养殖池.经RDA分析得出,S1、MP功能类群与DO浓度呈正相关,水体透明度影响水体中浮游植物的光合作用,从而影响水体DO浓度.

氮、磷等营养盐是浮游植物生长必需的营养元素^[34-35].随着河蟹生长速度逐渐加快,投喂大量饵料,残饵和粪便向养殖水体释放大量氮、磷,6月开始投喂海水冰鲜鱼,饵料源性的磷释放到水体,8月中旬之后,为了增加河蟹生殖退壳的增重率,饲料投喂量大幅度增加.同时,伊乐藻、轮叶黑藻在夏季高温环境下衰败死亡,向水体释放氮、磷^[36-37].水体浮游植物的现存量与营养盐浓度有显著的线性关系,浮游植物现存量的增加是水体营养盐增加的重要表征^[38].夏秋季节池塘水温较高,死亡的浮游植物、动物等在细菌的作用下很快形成碎屑^[39],池塘水体的营养盐升高,为绿藻门大量繁殖提供了物质基础,J功能类群在夏、秋季节成为池塘优势种,与陈立婧等^[40]在上海世博园白莲泾的研究结果相一致.夏季池塘水体水温较高,水体分层现象明显,营养盐在水体中分布不均,下层水体的营养盐不易对流到上层水体.甲藻具有较强的运动能力,可以充分利用水体营养盐,在分层现象明显的水体中,以甲藻为代表种的L₀功能类群成为优势类群^[41].河蟹池比水源水体的氮、磷浓度高,为浮游植物的大量繁殖提供了物质条件,浮游植物平均密度和平均生物量全部高于水源,浮游植物生物量比陈立婧等^[40]在上海世博园白莲泾测定的值高很多.水源水由于处于重要人口密集地,大量的生活污水和农业用水进入黄浦江,且水生植物密度和浮游植物生物量低于养殖池,致使水源水体NH₄⁺-N、NO₃⁻-N和NO₂⁻-N浓度高于养殖池,X1、L₀、J等适应于富营养型水体的浮游植物功能类群大量繁殖,成为优质功能类群.这也与RDA分析中NH₄⁺-N、NO₃⁻-N和NO₂⁻-N等环境因子与X1、L₀、J功能群丰度呈正相关相一致.

浮游植物的群落特征及其动态变化是多个环境因子在时间和空间上综合作用的结果,与水环境中各种理化因子密切相关^[42].生物多样性指数能够综合反映物种丰富性和均匀性^[43],常作为水质评价的指标,一般其数值越大说明水质越好,受污染程度越低^[44].生态养殖池浮游植物生物多样性指数在采样期间高于水源,说明生态养殖池的生态环境要优于水源.但Shannon-Wiener多样性指数 $H' > 3$ 为轻或无污染, H' 在1~3之间为中污染, H' 在0~1之间为重污染^[45];养殖池和水源同属于中污染水体.通过研究发现生态养殖池浮游植物的平均密度、平均生物量和Shannon-Wiener多样性指数都要高于水源水,说明河蟹池浮游植物群落更复杂,生态系统更稳定,生态环境优于水源.本文对河蟹池浮游植物群落结构及动态的研究为河蟹生态养殖模式提供了理论依据.为了进一步巩固河蟹生态养殖的生态效益,水生植物的高温保护和河蟹成熟蜕壳期的投喂模式为今后研究的重要方向.

4 参考文献

- [1] Hu Ren, Lin Qiuqi, Duan Shunshan *et al.* Distribution of chlorophyll-a and phosphorus in subtropical reservoirs, South China. *Ecologic Science*, 2002, **21**(4): 310-315 (in Chinese with English abstract). [胡韧, 林秋奇, 段舜山等. 热带亚热带水库浮游植物叶绿素a与磷分布的特征. *生态科学*, 2002, **21**(4): 310-315.]
- [2] Huang Yuyao ed. *Ecology of inland water pollution: principles and application*. Beijing: Science Press, 2001: 11-58 (in Chinese). [黄玉瑶. *内陆水域污染生态学: 原理与应用*. 北京: 科学出版社, 2001: 11-58.]
- [3] Rott E, Cantonati M, Füreder L *et al.* Benthic algae in high altitude streams of the Alps—a neglected component of the aquatic biota. *Hydrobiologia*, 2006, **562**(1): 195-216.
- [4] Sidik MJ, Nabi MRU, Hoque MA. Distribution of phytoplankton community in relation to environmental parameters in cage culture area of Sepanggar Bay, Sabah, Malaysia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, **80**(2): 251-260.
- [5] Reynolds CS, Huszar V, Kruk C *et al.* Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of*

- Plankton Research*, 2002, **24**(5): 417-428.
- [6] Padisák J, Crossetti LO, Naselli-Flores L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates. *Hydrobiologia*, 2009, **621**(1): 1-19.
- [7] Yang Wen, Niu Jinyong, Lu Kaihong *et al.* The establishment, development and application of classification approach of freshwater phytoplankton based on the functional group: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, **25**(6): 1833-1840(in Chinese with English abstract). [杨文, 牛津永, 陆开宏等. 淡水浮游植物功能类群分类法的提出、发展及应用. *应用生态学报*, 2014, **25**(6): 1833-1840.]
- [8] Salmaso N, Padisák J. Morpho-Functional Groups and phytoplankton development in two deep lakes (Lake Garda, Italy and Lake Stechlin, Germany). *Hydrobiologia*, 2007, **578**(1): 97-112.
- [9] Kruk C, Huszar VLM, Peeters ETHM *et al.* A morphological classification capturing functional variation in phytoplankton. *Freshwater Biology*, 2010, **55**(3): 614-627.
- [10] Moreno-Ostos E, Cruz-Pizarro L, Basanta A *et al.* The spatial distribution of different phytoplankton functional groups in a Mediterranean reservoir. *Aquatic Ecology*, 2008, **42**(1): 115-128.
- [11] Becker V, Huszar VLM, Crossetti LO. Responses of phytoplankton functional groups to the mixing regime in a deep subtropical reservoir. *Hydrobiologia*, 2009, **628**(1): 137-151.
- [12] Huang Guojia, Li Qihua, Chen Chuan *et al.* Phytoplankton functional groups and their spatial and temporal distribution characteristics in Sanbanxi Reservoir, Guizhou Province. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(2): 418-428(in Chinese with English abstract). [黄国佳, 李秋华, 陈椽等. 贵州高原三板水库浮游植物功能群时空分布特征. *环境科学学报*, 2015, **35**(2): 418-428.]
- [13] Wu Qinglong, Chen Kaining, Hu Yaohui *et al.* Impacts of pen crab farming on environment in east Taihu Lake. *Agro-environmental Protection*, 2001, **20**(6): 432-434(in Chinese with English abstract). [吴庆龙, 陈开宁, 胡耀辉等. 东太湖河蟹围网养殖的环境效应. *农业环境保护*, 2001, **20**(6): 432-434.]
- [14] Jiang Min, Gu Guowei, Li Yongmei. Impacts of aquaculture on the environment in China and countermeasures. *Chongqing Environmental Sciences*, 2003, **25**(5): 11-14(in Chinese with English abstract). [江敏, 顾国维, 李咏梅. 我国水产养殖对环境的影响及对策. *重庆环境科学*, 2003, **25**(5): 11-14.]
- [15] Chen Jiazhang, Hu Gengdong, Qu Jianhong *et al.* TN and TP from pond crab farming in the Taihu Valley. *Rural Eco-Environment*, 2005, **21**(1): 21-23(in Chinese with English abstract). [陈家长, 胡庚东, 瞿建宏等. 太湖流域池塘河蟹养殖向太湖排放氮磷的研究. *农村生态环境*, 2005, **21**(1): 21-23.]
- [16] Wang Wu, Li Yingsen ed. Ecological culture of Chinese mitten crab aquaculture. Beijing: China Agriculture Press, 2010: 2-56(in Chinese). [王武, 李应森. 河蟹生态养殖. 北京: 中国农业出版社, 2010: 2-56.]
- [17] Zhou Mingdong. The comparison of culture results and growth characteristics of *Eriocheir sinensis* under different specifications and densities [Dissertation]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009(in Chinese with English abstract). [周明东. 池塘养殖不同规格、密度河蟹生长特性及养殖效果 [学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2009.]
- [18] Xu Wengang, Wang Chun, He Jie *et al.* Ecological effects of bottom water layer aeration systems in intensively-reared juvenile *Eriocheir sinensis* ponds. *Freshwater Fisheries*, 2012, **42**(3): 60-67(in Chinese with English abstract). [徐文刚, 王春, 何杰等. 底层增氧在中华绒螯蟹幼蟹集约化培育池塘中的生态学效应. *淡水渔业*, 2012, **42**(3): 60-67.]
- [19] Dong Jiangshui, Chen Hongjun, Wang Xinhua. Effects of snails feeding rates on size, yield and survival of Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis*. *Fisheries Science*, 2009, **28**(11): 691-694(in Chinese with English abstract). [董江水, 陈红军, 王新华. 螺类投放量对中华绒螯蟹规格、产量和成活率的影响. *水产科学*, 2009, **28**(11): 691-694.]
- [20] Dai Hengxin, Li Yingsen, Ma Xuzhou *et al.* The research of dissolved oxygen distribution in the crab ecological culture ponds. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2013, **22**(1): 66-73(in Chinese with English abstract). [戴恒鑫, 李应森, 马旭洲等. 河蟹生态养殖池塘溶解氧分布变化的研究. *上海海洋大学学报*, 2013, **22**(1): 66-73.]
- [21] Dai Hengxin, Ma Xuzhou, Li Yingsen *et al.* Purification effect of the ecological culture pattern of *Eriocheir sinensis* on the water quality in Datong Lake, Hunan. *Journal of Safety and Environment*, 2012, **12**(5): 89-94(in Chinese with English abstract). [戴恒鑫, 马旭洲, 李应森等. 湖南大通湖河蟹生态养殖模式对水质净化的试验研究. *安全与环境学报*, 2012, **12**(5): 89-94.]
- [22] Huang Xiangfei ed. Observation and analysis of lake ecosystem. Beijing: Standards Press of China, 1999: 4-167(in Chinese). [黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析. 北京: 中国标准出版社, 1999: 4-167.]

- [23] Hu Hongjun, Wei Yinxin eds. The freshwater algae of China: systematics, taxonomy and ecology. Beijing: Science Press, 2006; 10-800 (in Chinese). [胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类: 系统、分类及生态. 北京: 科学出版社, 2006; 10-800.]
- [24] State Environmental Protection Administration ed. Methods for the monitoring and analysis of water and wastewater (4th ed). Beijing: Chinese Environmental Science Press, 2002; 88-186 (in Chinese). [国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002; 88-186.]
- [25] Sun Chunmei, Fan Yawen. Canonical correspondence analysis of the relationship between algal community and environment variables of Heilongjiang River in Heihe. *J Lake Sci*, 2009, **21**(6): 839-844 (in Chinese with English abstract). DOI: 10.18307/2009.0614. [孙春梅, 范亚文. 黑龙江黑河江段藻类植物群落与环境因子的典型对应分析. 湖泊科学, 2009, **21**(6): 839-844.]
- [26] Tian Zhiqiang, Tian Binghui, Xin Lihua *et al.* Relationship between structure of phytoplankton community and water quality factors in Yuqiao Reservoir in autumn. *Environmental Pollution & Control*, 2011, **33**(5): 64-68 (in Chinese with English abstract). [田志强, 田秉晖, 辛丽花等. 于桥水库秋季浮游植物群落结构与水质因子的关系. 环境污染与防治, 2011, **33**(5): 64-68.]
- [27] Yusoff FM, Zubaidah MS, Matias HB *et al.* Phytoplankton succession in intensive marine shrimp culture ponds treated with a commercial bacterial product. *Aquaculture Research*, 2002, **33**(4): 269-278.
- [28] Nuccio C, Melillo C, Massi L *et al.* Phytoplankton abundance, community structure and diversity in the eutrophicated Orbetello lagoon (Tuscany) from 1995 to 2001. *Oceanologica Acta*, 2003, **26**(1): 15-25.
- [29] Domingues RB, Sobrino C, Calvão H. Impact of reservoir filling on phytoplankton succession and cyanobacteria blooms in a temperate estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, **74**(1): 31-43.
- [30] Huang Xianghui, Hu Ren, Lei Lamei *et al.* Seasonal succession of phytoplankton functional groups in typical small and medium-sized reservoirs in southern China. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, **22**(2): 311-318 (in Chinese with English abstract). [黄享辉, 胡韧, 雷腊梅等. 南亚热带典型中小型水库浮游植物功能类群季节演替特征. 生态环境学报, 2013, **22**(2): 311-318.]
- [31] Shen Yunfen, Zhang Zongshe, Gong Xunju *et al.* eds. New technology of micro biological monitoring. Beijing: China Architecture & Building Press, 1990: 7-408 (in Chinese). [沈韞芬, 章宗涉, 龚循矩等. 微型生物监测技术. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990: 7-408.]
- [32] Xu Yuping, Liu Caihong, Zhang Yaoyao *et al.* Phytoplankton community structure and its relation to environmental factors in a newly excavated landscape river. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33**(3): 637-645 (in Chinese with English abstract). [徐玉萍, 刘彩虹, 张垚垚等. 新开挖景观河道浮游植物群落结构特征及与环境因子的关系. 生态学杂志, 2014, **33**(3): 637-645.]
- [33] Wang Liqing, Shi Rong, Ji Gaohua *et al.* Phytoplankton community structure and its succession in Dianshan Lake. *Biodiversity Science*, 2011, **19**(1): 48-56 (in Chinese with English abstract). [王丽卿, 施荣, 季高华等. 淀山湖浮游植物群落特征及其演替规律. 生物多样性, 2011, **19**(1): 48-56.]
- [34] Ouyang Hao, Han Boping. Water quality and phytoplankton community in the Qiyeshi Reservoir after water diversion from Dongjiang River. *J Lake Sci*, 2007, **19**(2): 204-211 (in Chinese with English abstract). DOI: 10.18307/2007.0215. [欧阳昊, 韩博平. 从东江调水后契谷石水库的水质和浮游植物群落结构特征. 湖泊科学, 2007, **19**(2): 204-211.]
- [35] Liu Xia, Lu Xiaohua, Chen Yuwei. Long-term evolution of planktonic diatoms and their relationships with environmental factors in Lake Taihu. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(4): 821-827 (in Chinese with English abstract). [刘霞, 陆晓华, 陈宇炜. 太湖浮游硅藻时空演化与环境因子的关系. 环境科学学报, 2012, **32**(4): 821-827.]
- [36] Zhang Laijia, Ye Chun, Ye Chunhua *et al.* The effect of submerged macrophytes decomposition on water quality. *Research of Environmental Sciences*, 2013, **26**(2): 145-151 (in Chinese with English abstract). [张来甲, 叶春, 叶春华. 沉水植物腐解对水体水质的影响. 环境科学研究, 2013, **26**(2): 145-151.]
- [37] Pan Huiyun, Xu Xiaohua, Gao Shixiang. Study on process of nutrition release during the decay of submerged macrophytes. *Research of Environmental Sciences*, 2008, **21**(1): 64-68 (in Chinese with English abstract). [潘慧云, 徐小花, 高士祥. 沉水植物衰亡过程中营养盐的释放过程及规律. 环境科学研究, 2008, **21**(1): 64-68.]
- [38] Schindler DW, Fee EJ. Experimental lakes area: whole-lake experiments in eutrophication. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 1974, **31**(5): 937-953.

- [39] Ditty JG, Shaw RF. Larval development, distribution, and ecology of cobia *Rachycentron canadum* (family: Rachycentridae) in the northern Gulf of Mexico. *Fishery Bulletin*, 1992, **90**(4): 668-677.
- [40] Chen Lijing, Gu Jing, Zhang Yinjiang *et al.* The research on community structure and species diversity of planktonic algae in Bailianjing Shanghai Expo Garden. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 2008, **17**(3): 333-338 (in Chinese with English abstract). [陈立婧, 顾静, 张饮江等. 上海世博园白莲泾浮游藻类群落结构和物种多样性. 上海水产大学学报, 2008, **17**(3): 333-338.]
- [41] Pollinger U. Freshwater armored dinoflagellates: Growth, reproduction strategies and population dynamics. In: Sandgren CD ed. Growth and reproduction strategies of freshwater phytoplankton. Cambridge: Cambridge University Press, 1988: 441.
- [42] Chai Yi, Peng Ting, Guo Kun *et al.* Community characteristics of phytoplankton in Lake Changhu and relationships with environmental factors in the summer of 2012. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, **38**(8): 857-867 (in Chinese with English abstract). [柴毅, 彭婷, 郭坤等. 2012年夏季长湖浮游植物群落特征及其与环境因子的关系. 植物生态学报, 2014, **38**(8): 857-867.]
- [43] Sun Ruyong ed. Theory of animal ecology (3rd ed). Beijing: Beijing Normal University Publishing Group, 2008: 6-587 (in Chinese). [孙濡泳. 动物生态学原理(第三版). 北京: 北京师范大学出版社, 2008: 6-587.]
- [44] Shannon CE, Weaver W eds. The mathematical of communication. Urbana: The University of Illinois Press, 1964.
- [45] Kuang Qijun, Ma Peiming, Hu Zhengyu *et al.* Study on the evaluation and treatment of lake eutrophication by means of algae biology. *Journal of Safety and Environment*, 2005, **5**(2): 87-91 (in Chinese with English abstract). [况琪军, 马沛明, 胡征宇等. 湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展. 安全与环境学报, 2005, **5**(2): 87-91.]