

凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*) 工厂化养殖系统微藻的群落特征分析*

沈明明^{1,2} 李健^{1,3①} 王清印^{1,3} 葛红星² 刘萍^{1,3} 常志强^{1,3}

(1. 上海海洋大学水产与生命学院 上海 201306;

2. 农业部海洋渔业可持续发展重点实验室 中国水产科学研究院黄海水产研究所 青岛 266071;

3. 青岛海洋科学与技术国家实验室 海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室 青岛 266071)

摘要 2015年6-9月期间,对青岛市宝荣水产科技有限公司凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)工厂化养殖车间的6个实验池进行采样调查,分析了水体中微藻的种类组成、丰度、多样性和优势种演替特征,并结合养殖情况进行了讨论。共检出微藻5门28属49种(其中优势种14种),丰度范围为 $5.2 \times 10^5 - 9.4 \times 10^8$ cell/L,生物量范围为1.23-208.00 mg/L,多样性指数范围为0.42-2.44。多样性指数低于0.9时,生态系统稳定性差,对虾易发病。不同养殖阶段微藻优势种类不同,前期主要是绿藻门(Chlorophyta)、硅藻门(Bacillariophyta)和部分甲藻门(Pyrophyta)的种类,中、后期以蓝藻门(Cyanophyta)的微囊藻(*Microcystis* sp.)和颤藻(*Oscillatoria* sp.)为主。对虾养殖密度显著影响微藻优势种演替,300 ind/m²养殖密度(A1池)藻相稳定且以绿藻和硅藻为优势种,对虾生长良好;400-500 ind/m²养殖密度(B1、C1和C2池)颤藻在中、后期演替成为绝对优势种,对虾易发病死亡。本研究为优化对虾工厂化养殖环境、指导养殖生产提供参考。

关键词 凡纳滨对虾;工厂化养殖;微藻;群落特征

中图分类号 Q178.1 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2017)05-0064-09

对虾池塘养殖一直是我国主要的传统生产模式,但该模式存在养殖水域污染严重、易出现流行病、受气候制约以及单位面积产出较低等问题,而对虾工厂化养殖模式对环境污染较轻,能有效防止对虾暴发性流行病,产量高且能有效保证对虾的食品安全(孟庆武等,2008)。近几年,凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)工厂化养殖模式在山东青岛、日照等地区迅速发展起来。工厂化养殖模式尽管切断了与外界病源的联系,对养殖用水进行了更规范、更科学的管理,但病害仍

时有发生,这可能跟水体中浮游藻类群落演替有着一定的关系(陈剑锋等,2006)。微藻是虾池生态系的重要组成部分,尤其是数量和生物量都占统治地位的优势种,在一定程度上代表着微藻的群落特征,其变动会给对虾的生长带来一定的影响。深入研究虾池微藻的群落特征,不仅对阐明虾池人工生态系的结构、功能有重要理论意义,而且对控制适宜的浮游植物种群和数量,维持对虾稳定产出也有重要的实践意义(Attayde *et al.*, 1999)。我国对虾工厂化养殖发展的时

* 国家虾产业技术体系(CARS-47)、泰山产业领军人才项目(LNJY2015002)和青岛海洋科学与技术国家实验室鳌山科技创新计划项目(2015ASKJ02)共同资助 [This work was supported by Modern Agro-industry Technology Research System (CARS-47), the Program of Shandong Leading Talent (LNJY2015002) and Science and Technology Innovation Project of Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology (2015ASKJ02)]. 沈明明, E-mail: damingziaa@163.com

① 通讯作者:李健,研究员, E-mail: lijian@ysfri.ac.cn

收稿日期:2016-05-27, 收修改稿日期:2016-06-02

1) Li YQ. Analysis on farming system of super-intensive and effect of main factors on growth, immunity and nutrient budgets in shrimp. Doctoral Dissertation of Ocean University of China, 2006, 40-68 [李玉全. 工厂化养殖系统分析及主要养殖因子对对虾生长、免疫及氮磷收支的影响. 中国海洋大学博士研究生学位论文, 2006, 40-68]

间还较短,目前的研究报道多集中于养殖效益、理化因子、管理技术等方面(李玉全, 2006¹⁾; 谢立民等, 2003; 刘娇等, 2008; 刘海英, 2006¹⁾; 管崇武等, 2010), 关于凡纳滨对虾工厂化养殖系统中微藻的群落特征还未见系统的研究报告, 微藻群落演替规律及其与养殖环境因子之间的关系也不明确。本文研究了凡纳滨对虾工厂化养殖系统的微藻群落特征, 系统地分析了微藻种类组成、丰度、多样性和优势种演替特征, 并结合养殖情况进行了讨论, 以期优化对虾工厂化养殖环境、指导养殖生产提供参考。

1 材料与方法

1.1 采样地点

本实验于 2015 年 6-9 月在青岛市宝荣水产科技有限公司进行。对虾工厂化养殖车间顶部覆盖塑料薄膜用于保温, 内设 60 个面积为 2.67 m² 的近六边形水泥池, 池底铺设“回”形纳米气孔管道进行供气, 具备独立的给排水系统, 养殖用水为经砂滤、消毒以及充分曝气的地下海水。选取 6 个条件基本相同的水泥池用于本实验, 实验用凡纳滨对虾购自广东恒兴育苗场, 虾苗经 20 d 暂养后, 体重达(0.036±0.006) g, 于 6 月 10 日放至养殖池, 编号为 A1、A2、B1、B2、C1、C2, 其中, A1 池和 A2 池对虾放养密度为 300 ind/m², B1 和 B2 池为 400 ind/m², C1 和 C2 为 500 ind/m²。

参照彭聪聪等(2011)划分对虾养殖阶段的方法, 根据对虾的生长情况并兼顾采样周期, 将对虾养殖周期分为 3 个阶段: 6 月 13 日-7 月 11 日为前期, 7 月 12 日-8 月 8 日为中期, 8 月 9 日-9 月 6 日为后期。

1.2 样品采集与处理

2015 年 6 月 13 日-9 月 6 日, 共计 84 d, 每隔 14 d 从各池采水样 2 L, 取 1 L 倒入聚乙烯塑料瓶, 加入 5% 鲁哥氏液(Lugol's solution)固定, 静置 24 h 后, 将水样浓缩至 20 ml, 显微镜下检查微藻。另外 1 L 水样装瓶带回实验室, 低温保存, 用于测定氨氮等化学因子。

依照《中国海藻志》(郭玉洁等, 2003)、《水生生物学》(赵文等, 2005)等对微藻进行定性鉴定。用血球计数板进行定量检测, 取 0.1 ml 浓缩水样于计数框内在显微镜下计数, 假定浮游植物细胞为随机分布, 计数误差在±10%内。

每天使用 YSI556 型多参数水质仪(YSI, 美国)

监测实验池水体的温度(T)、溶解氧(DO)、盐度(S)和 pH 值等常规水质参数。水样中氨氮(NH₄⁺-N)、亚硝酸盐(NO₂⁻-N)、硝酸盐(NO₃⁻-N)、磷酸盐(PO₄³⁻-P)、总氮(TN)和总磷(TP)等浓度均按照《海洋调查规范》(GB/T12763.4-2007)进行测定。

1.3 数据处理

$$\text{微藻密度 } D(\text{cell/L})=200 \times P_n \times N_0 / N_1$$

式中, P_n 为计数框计数的浮游植物个数, N_0 为计数框总格数, N_1 为计数过的方格数。

生物量(mg/L)计算参照蔡林婷等(2013)的方法:

$$B=D \times R$$

式中, B 为微藻生物量, $R_{\text{小型藻}}=2 \times 10^{-7}$ mg;

$R_{\text{中型藻}}=2 \times 10^{-6}$ mg; $R_{\text{大型藻}}=5 \times 10^{-6}$ mg

浮游植物多样性指数采用 Shannon-Wiener 物种多样性指数(H'):

$$H' = - \sum_{i=1}^s P_i \log_2 P_i$$

式中均采用物种数量作为指标, 其中, $P_i=n_i/N$, n_i 为物种 i 的个体数, N 为群落样本的总个体数, 即 P_i 为物种 i 占总个体数的比例, S 为群落物种数。

参照张才学等(2007)划分微藻丰度的方法, 微藻 $P_i < 0.01$, 为稀有种; $0.01 \leq P_i \leq 0.1$, 为常见种; $P_i \geq 0.1$, 为优势种。

2 结果与分析

2.1 环境理化因子变化状况和养殖情况

养殖期间, 不同养殖时期各实验池的 pH、氨氮等环境理化因子的变化情况见表 1。pH 范围为 7.75-8.32, 后期降幅较大。总氨氮为 0.02-1.79 mg/L, 中期升幅较大。亚硝氮为 0.01-0.71 mg/L, 养殖前期处于较低水平, 中期迅速上升, 后期稳定在较高水平。硝酸氮为 0.01-2.70 mg/L, 随着养殖进行, 浓度上升较快。无机磷为 0.01-2.04 mg/L。总氮为 1.48-5.65 mg/L, 总磷为 0.79-4.24 mg/L。

各养殖池对虾存活率和产量等生长性能如表 2 所示。养殖第 26 天(7 月 9 日)-第 40 天(7 月 23 日), 出现连续阴雨天气, 此阶段 B1 池和 C2 池对虾前 7 d 死亡率超过 40%, 随后一直都有对虾死亡。养殖至 70 d 以后, B1 池和 C1 池对虾出现“偷死”症状, 直至养殖结束, 都有对虾陆续死亡。

1) Liu HY. Water quality characteristic of industrial shrimp farming and effects of higher dissolved oxygen on its farming. Master's Thesis of Ocean University of China, 2006, 26-52 [刘海英. 对虾工厂化养殖水质特征及高溶解氧对养殖的影响. 中国海洋大学硕士研究生学位论文, 2006, 26-52]

表1 虾池主要理化因子的变化情况

Tab.1 Changes of main physical-chemical factors in shrimp ponds

池号 Pond No.	养殖阶段 Culture period	pH	氨氮 NH ₄ -N (mg/L)	硝酸盐氮 NO ₃ -N (mg/L)	磷酸盐 PO ₄ ³⁻ -P (mg/L)	总氮 TN (mg/L)	总磷 TP (mg/L)
A1	前期 Early	8.24±0.69	0.02±0.01	0.02±0.01	0.04±0.01	1.48±0.61	0.83±0.24
	中期 Mid	8.22±0.48	0.67±0.25	0.68±0.25	0.36±0.14	2.81±1.46	1.39±0.45
	后期 Late	7.84±0.62	0.41±0.14	1.85±0.92	1.02±0.61	4.86±1.67	3.14±1.01
A2	前期 Early	8.20±0.41	0.02±0.01	0.02±0.01	0.06±0.02	1.46±0.63	0.93±0.21
	中期 Mid	8.14±0.62	0.68±0.24	0.69±0.35	0.41±0.17	2.72±1.08	1.46±0.64
	后期 Late	7.82±0.74	0.42±0.22	1.56±0.42	1.25±0.51	4.76±1.98	3.14±0.93
B1	前期 Early	7.98±0.61	0.03±0.01	0.03±0.01	0.06±0.02	1.64±0.53	0.84±0.32
	中期 Mid	7.88±0.57	0.83±0.33	0.82±0.34	0.56±0.12	3.44±1.33	1.65±0.65
	后期 Late	8.18±0.74	0.68±0.28	1.93±0.81	1.58±0.52	4.98±1.09	3.82±0.97
B2	前期 Early	8.22±0.63	0.02±0.01	0.02±0.01	0.04±0.01	1.51±0.66	0.84±0.23
	中期 Mid	8.15±0.56	0.85±0.34	0.91±0.56	0.52±0.12	2.96±1.26	1.09±0.34
	后期 Late	7.90±0.86	0.56±0.14	2.11±1.06	1.74±0.65	5.21±2.45	3.93±1.08
C1	前期 Early	8.34±0.73	0.02±0.01	0.02±0.01	0.07±0.02	1.48±0.69	0.79±0.35
	中期 Mid	8.32±0.76	1.78±0.85	1.56±0.76	0.89±0.32	3.48±1.70	1.69±0.86
	后期 Late	7.75±0.77	1.19±0.96	2.47±1.02	1.98±0.68	5.11±2.46	4.24±1.38
C2	前期 Early	8.02±0.85	0.03±0.01	0.04±0.01	0.06±0.01	1.61±0.56	0.93±0.42
	中期 Mid	7.98±0.77	1.79±1.03	1.67±0.64	0.78±0.44	3.64±1.43	1.98±0.58
	后期 Late	7.86±0.55	1.18±0.75	2.45±1.08	1.86±0.82	5.65±2.53	4.03±1.48

2.2 微藻种类组成

对虾工厂化养殖实验池中的微藻种类和丰富度如表3所示。6个实验池中共鉴定出微藻5门28属49种,其中绿藻门8属10种,占总种类数的20.4%;硅藻门9属19种,占38.8%;蓝藻门6属13种,占26.5%;甲藻门4属6种,占12.2%;隐藻门1属1种,占2%。绿藻、蓝藻和硅藻多为优势种和常见种,甲藻有2种优势种,隐藻有1种优势种,其余为常见种和稀有种。

2.3 微藻的数量和多样性变化

不同养殖时期对虾实验池中微藻的密度、生物量

表2 对虾生长性能

Tab.2 The growth performance of shrimp

池号 Pond No.	A1	A2	B1	B2	C1	C2
成活率 Survival rate (%)	84.16	78.57	37.89	86.18	61.23	59.63
产量 Yield (kg/m ²)	4.28	3.64	2.08	5.14	3.87	3.54

表3 虾池微藻种类和丰富度

Tab.3 Species and abundance of microalgae in shrimp ponds

种类 Species	丰富度 Abundance	种类 Species	丰富度 Abundance
绿藻门 Chlorophyta		旋链角毛藻 <i>C.curvisetus</i>	++
扁藻属 <i>Platymonas</i> sp.		假弯角毛藻 <i>C.pseudocurvisetus</i>	++
亚心型扁藻 <i>P.subcordiformis</i>	++	盒形藻属 <i>Biddulphia</i> sp.	
空球藻属 <i>Eudorina</i> sp.		中华盒形藻 <i>B.sinensis</i>	+
空球藻 <i>E.elegans</i>	+	长耳盒形藻 <i>B.aurita</i>	+
小球藻属 <i>Chlorella</i> sp.		双尾藻属 <i>Ditylum</i> sp.	
小球藻 <i>C.vulgaris</i>	+++	布氏双尾藻 <i>D.brightwellii</i>	+
蛋白核小球藻 <i>C.pyrenoidesa</i>	+++	太阳双尾藻 <i>D.sol</i>	+
椭圆小球藻 <i>C.ellipsoidea</i>	++	舟形藻属 <i>Navicula</i> sp.	
凯氏小球藻 <i>C.kessleri</i>	++	隐头舟形藻 <i>N.cryptocephala</i>	+
杂球藻属 <i>Pleodorina</i> sp.		膜状舟形藻 <i>N.membranacea</i>	+
杂球藻 <i>P.californica</i>	+	蓝藻门 Cyanophyta	

续表 3

种类 Species	丰富度 Abundance	种类 Species	丰富度 Abundance
月牙藻属 <i>Selenastrum</i> sp.		色球藻属 <i>Chroococcus</i> sp.	
纤细月牙藻 <i>S.gracile</i>	+	小形色球藻 <i>Ch.minor</i>	+
微绿球藻属 <i>Nannochloris</i> sp.		微小色球藻 <i>Ch.minutus</i>	++
眼状微绿球藻 <i>N.oculata</i>	+++	微囊藻属 <i>Microcystis</i> sp.	
卵囊藻属 <i>Oocystis</i> sp.		具缘微囊藻 <i>M.marginata</i>	+
波吉卵囊藻 <i>O.borgei</i>	+	不定微囊藻 <i>M.incerta</i>	+++
小形卵囊藻 <i>O.parva</i>	+	坚实微囊藻 <i>M.firma</i>	++
单生卵囊藻 <i>O.solitaria</i>	+	隐杆藻属 <i>Aphanothece</i> sp.	
空星藻属 <i>Coelastrum</i> sp.		温声隐杆藻 <i>Ap.caldariorum</i>	+
空星藻 <i>C.sphaericum</i>	++	栖霞隐杆藻 <i>Ap.saxicola</i>	+
小抱空星藻 <i>C.microporum</i>	+	颤藻属 <i>Oscillatoria</i> sp.	
硬毛藻属 <i>Chaetomorpha</i> sp.		威利颤藻 <i>O.willei</i>	+++
线形硬毛藻 <i>C.linum</i>	+	弱细颤藻 <i>O.tenuis</i>	+++
粗硬毛藻 <i>C.crassa</i>	+	盐泽颤藻 <i>O.saline</i>	+
杜氏藻属 <i>Dunaliella</i> sp.	+	绿色颤藻 <i>O.chlorina</i>	++
盐生杜氏藻 <i>D.salina</i>	+	阿氏颤藻 <i>O.agardhii</i>	+
巴尔杜氏藻 <i>D.bardawil</i>	+	螺旋藻属 <i>Spirulina</i> sp.	
硅藻门 Bacillariophyta		大螺旋藻 <i>S.major</i>	++
直链藻属 <i>Melosira</i> sp.		席藻属 <i>Phormidium</i> sp.	
具槽直链藻 <i>M.sulcata</i>	+++	窝形席藻 <i>P.foveolarum</i>	++
变异直链藻 <i>M.varians</i>	++	束毛藻属 <i>Trichodesmium</i> sp.	
圆筛藻属 <i>Coscinodiscus</i>		细发束毛藻 <i>T.thiebautii</i>	+
线形圆筛藻 <i>C.lineatus</i>	+++	甲藻门 Pyrrophyta	
格氏圆筛藻 <i>C.granil</i>	+	原甲藻属 <i>Prorocentrum</i> sp.	
辐射圆筛藻 <i>C.radiatus</i>	+	海洋原甲藻 <i>P.micans</i>	+
小环藻属 <i>Cyclotella</i> sp.		微小原甲藻 <i>P.minimum</i>	+++
扭曲小环藻 <i>C.comta</i>	+++	裸甲藻属 <i>Gymnodinium</i> sp.	
条纹小环藻 <i>C.striata</i>	+	蓝色裸甲藻 <i>G.coeruleum</i>	+
海链藻属 <i>Thalassiosira</i> sp.		链状裸甲藻 <i>G.catenatum</i>	+
诺氏海链藻 <i>T.nordenskioldi</i>	+++	多甲藻属 <i>Peridinium</i> sp.	
细弱海链藻 <i>T.subtilis</i>	++	扁多甲藻 <i>P.depressum</i>	+++
骨条藻属 <i>Skeletonema</i> sp.		角藻属 <i>Ceratium</i> sp.	
中肋骨条藻 <i>S.costatum</i>		长角角藻 <i>C.macroceros</i>	++
细柱藻属 <i>Leptocylindrus</i> sp.		棱角藻 <i>C.fucus</i>	++
细柱藻 <i>L.minimus</i>		隐藻门 Cryptophyta	
环毛藻属 <i>Corethron</i> sp.		隐藻属 <i>Cryptomonas</i> sp.	
海洋环毛藻 <i>C.pelagicum</i>	+	卵形隐藻 <i>C.ovata</i>	+++
角毛藻属 <i>Chaetoceros</i> sp.		蓝隐藻属 <i>Chroomonas</i> sp.	
洛氏角毛藻 <i>C.lorenzianus</i>	+++	长形蓝隐藻 <i>Ch.oblonga</i>	+
牟氏角毛藻 <i>C.muelleri</i>	+++		

注: +: 稀有种, ++: 常见种, +++: 优势种

Notes: +: Rare species, ++: Common species, +++: Dominant species

和多样性指数如表 4 所示。整个养殖期间, 6 个实验池的微藻密度为 $5.2 \times 10^5 - 9.4 \times 10^8$ cell/L, 生物量为 1.23–208.00 mg/L, 微藻密度和生物量均呈现出逐渐

升高的趋势。A1 和 A2 池对虾密度最低(300 ind/m^2), 整个养殖过程中微藻的密度和生物量也处于较低水平, 而 C1 和 C2 池对虾密度最高(500 ind/m^2), 养殖后期

表 4 不同养殖期虾池中微藻的总密度、总生物量以及多样性指数
Tab.4 Density, biomass and diversity index of microalgae in shrimp ponds

池号 Pond No.	养殖阶段 Culture period	密度 Density (10 ⁶ cell/L)	生物量 Biomass (mg/L)	多样性指数 <i>H'</i>
A1	前期 Early	2.31±0.53	6.92±2.63	1.56±0.24
	中期 Mid	13.89±3.86	8.43±1.62	0.75±0.05
	后期 Late	96.63±24.87	134.32±119.23	1.28±0.45
A2	前期 Early	0.64±0.13	1.23±0.27	0.68±0.07
	中期 Mid	4.32±1.76	4.76±2.13	0.95±0.18
	后期 Late	12.65±5.12	10.80±6.27	0.74±0.26
B1	前期 Early	2.16±0.39	1.04±0.33	1.59±0.39
	中期 Mid	121.28±58.90	38.34±19.23	0.48±0.00
	后期 Late	562.23±276.97	168.65±58.23	1.06±0.29
B2	前期 Early	1.89±0.57	5.23±2.76	1.94±0.28
	中期 Mid	28.64±13.34	34.20±15.21	2.35±1.22
	后期 Late	86.86±58.22	136.80±119.83	1.32±0.42
C1	前期 Early	3.41±1.25	8.95±6.83	1.65±0.35
	中期 Mid	476.65±128.23	75.64±47.32	1.49±0.62
	后期 Late	869.32±493.73	186.56±154.98	0.79±0.13
C2	前期 Early	2.75±1.23	6.84±5.23	1.13±0.36
	中期 Mid	133.48±123.27	45.57±23.85	0.85±0.05
	后期 Late	652.32±286.22	153.40±95.83	0.63±0.06

微藻密度和生物量都达到较高水平,明显高于低密度池,主要类群为颤藻,生物量占比达到 80%以上。养殖期间,各实验池微藻多样性指数范围为 0.42–2.44。低密度(A1 和 A2 间)以及中密度(B1 和 B2 间)实验池微藻的多样性指数变化呈现一定的差异性,而 2 个高密度(C1 和 C2 间)实验池微藻多样性指数变化趋势一致,均表现为随养殖时间增加一直下降。

2.4 虾池微藻优势种的组成及演替情况

不同养殖时期各虾池微藻优势种演替情况如图 1 所示,优势种及对应编号参见表 5。

低密度养殖实验池 A1 优势种有 6 种,养殖前期,小球藻一直处于优势地位,此外,还有扭曲小环藻(*C.comta*)、扁多甲藻(*P.depressum*)和卵形隐藻(*C.ovata*),优势种优势度都在 0.15 以下,养殖至第 42 天,蓝藻门的威利颤藻(*Oscillatoria willei*)演替成为优势种,随后颤藻优势度减少,小球藻重新成为优势种并保持至养殖末期。A2 池优势种有 6 种,整个养殖阶段微藻密度明显低于其他池,前、中期优势种主要为硅藻门的线形圆筛藻(*C.lineatus*)和牟氏角毛藻(*C.muelleri*),第 14 天,扁多甲藻和牟氏角毛藻共同成为优势种,后期蓝藻门的弱细颤藻(*O.tenuis*)长期占据优势地位。

中密度养殖实验池 B1 优势种有 6 种,前期以牟

氏角毛藻为主要优势种,14 d 以后,不定微囊藻(*M.incerta*)迅速演替成为优势种,一直持续到 50 d 以后,优势种演替为威利颤藻和弱细颤藻,微小原甲藻(*P.minimum*)在养殖 70 d 左右成为优势种,只持续 5 d,威利颤藻在养殖末期优势度达到 0.48,成为绝对优势种。B2 池优势种有 5 种,前、中期优势种主要是绿藻门的小球藻和硅藻门的扭曲小环藻和洛氏角毛藻(*C.lorenzianus*),后期小球藻成为绝对优势种,优势度高达 0.32。

高密度养殖实验池 C1 优势种有 5 种,前期优势种为小球藻、扭曲小环藻和洛氏角毛藻,第 28 天左右,蓝藻门的弱细颤藻和威利颤藻逐渐演替成为优势种并在养殖后期成为绝对优势种,颤藻优势度高达 0.82。C2 池优势种有 7 种,养殖前 14 d 内,优势种为蛋白核小球藻(*C.pyrenoidesa*)、诺氏海链藻(*T.nordenskioldi*)和牟氏角毛藻,随后不定微囊藻迅速演替为绝对优势种;第 28 天,优势种变为硅藻门的角毛藻和弱细颤藻,第 38 天,颤藻取代角毛藻成为绝对优势种。

3 讨论

本研究中,各实验池中微藻的数量变化均呈前期较低、中期快速升高、后期达到最高的趋势。青岛市

表 5 微藻优势种及相应编号
Tab.5 Microalgae dominant species and their corresponding codes

编号 No.	微藻种类 Species	拉丁名 Latin names	编号 No.	微藻种类 Species	拉丁名 Latin names
P1	小球藻	<i>Chlorella vulgaris</i>	P8	牟氏角毛藻	<i>Chaetoceros muelleri</i>
P2	蛋白核小球藻	<i>Chlorella pyrenoidesa</i>	P9	不定微囊藻	<i>Microcystis incerta</i>
P3	眼状微绿球藻	<i>Nannochloris oculata</i>	P10	威利颤藻	<i>Oscillatoria willei</i>
P4	线形圆筛藻	<i>Coscinodiscus lineatus</i>	P11	弱细颤藻	<i>Oscillatoria tenuis</i>
P5	扭曲小环藻	<i>Cyclotella comta</i>	P12	微小原甲藻	<i>Prorocentrum minimum</i>
P6	诺氏海链藻	<i>Thalassiosira norden</i>	P13	扁多甲藻	<i>Peridinium depressum</i>
P7	洛氏角毛藻	<i>Chaetoceros lorenzianus</i>	P14	卵形隐藻	<i>Crypto monas ovata</i>

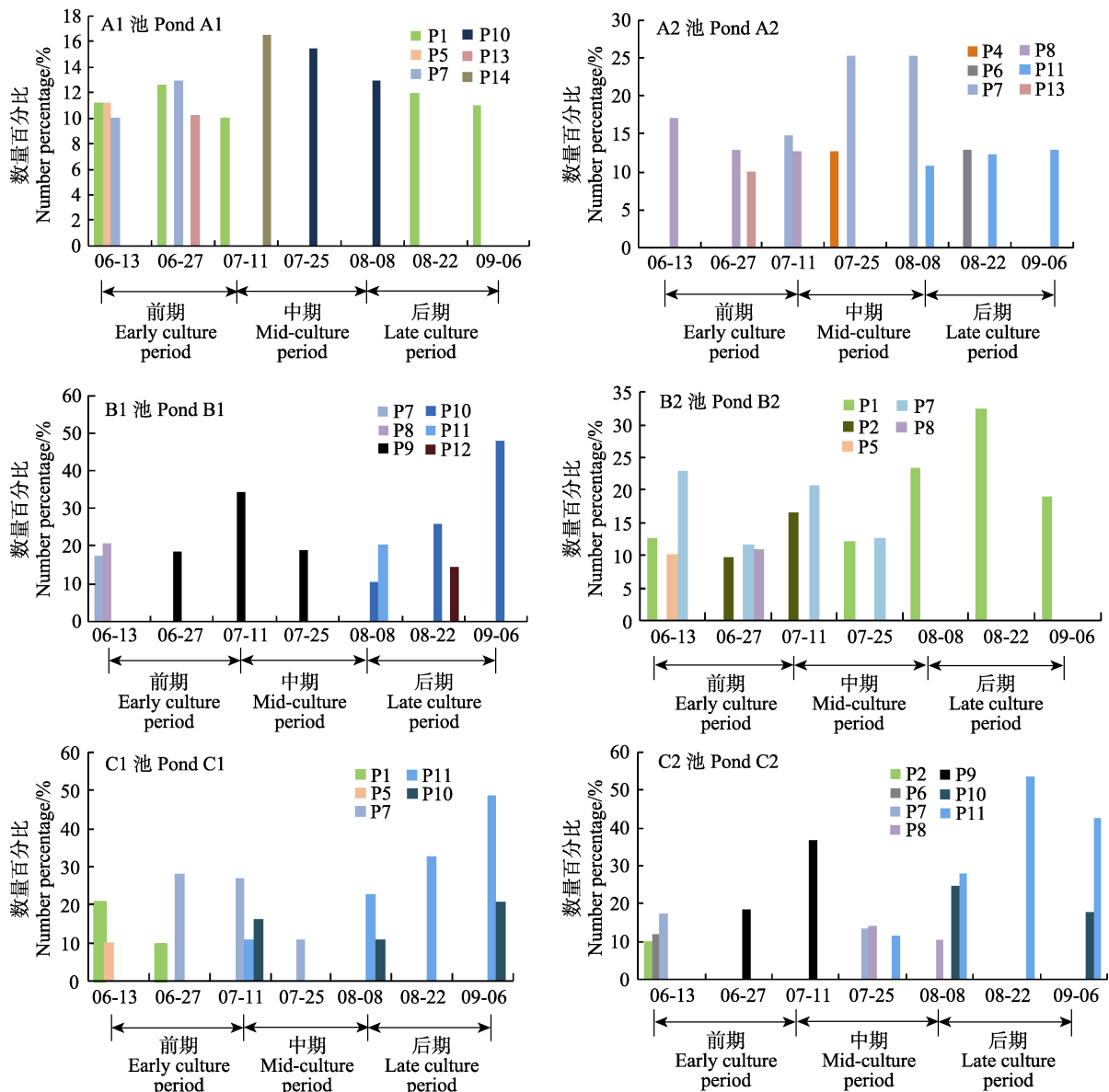


图 1 虾池微藻优势种演替动态

Fig.1 Dynamic succession of microalgae species in shrimp ponds

P1-P14 代表微藻优势种种类的编号, 种类及对应编号见表 5
P1-P14 in this diagram represented corresponding codes for dominant species, and microalgae species, and their corresponding codes were shown in Tab.5

区凡纳滨对虾工厂化养殖用水多来源于地下海水经砂滤后使用,进入养殖池前还要通过滤网过滤,经过多层过滤的水体中的微藻含量较少,因此,养殖前期密度偏低。养殖中、后期,水温逐渐升高,随着对虾的快速生长和投饵量的增加,大量未被摄食的残料、对虾排泄物等营养盐也在养殖池中累积,刺激了微藻的大量繁殖(刘孝竹等,2011;彭聪聪等,2011)。C1池在最后一次采样时,颤藻生物量达到165 mg/L,占微藻总生物量的78%,C2池颤藻生物量也达到119 mg/L,占63%,水中可见颤藻丝状群体结块贴壁生长,对虾大量发病死亡。据曹平等(2011)报道,当颤藻浓度达到12.5 mg/L时,对虾成活率明显下降。虽然颤藻也能吸收氨氮、亚硝氮等有害物质,但高密度的颤藻极易引发“倒藻”,导致大量羟胺、硫化物等有毒物质释放,造成对虾应激死亡(Cremen *et al.*, 2007)。因此,在养殖后期,应该注意对颤藻等不良微藻进行繁殖评估和有效控制。A2池微藻生物量明显低于其他养殖池,对虾虽未发病,但生长缓慢,终产量明显低于相同放养密度的A1池,分析原因可能是低密度的藻相结构造成了微藻对养殖系统调节能力的低下,水质多变不稳定,给对虾生长带来了不利影响。

多样性指数可用于定量反映浮游植物的异质性与稳定性,该指数越大,微藻群落信息含量越大,抗干扰能力越强,稳定性越高(孙耀等,1998)。中、高密度对虾实验池微藻多样性指数呈现先升高后降低的趋势,可能是由于养殖前期水体经多层过滤,池中微藻种类和数量都极少,相应地多样性指数偏低,随着养殖的进行,生态系统逐步完善,稳定性增强,多样性指数也相应增加;到了养殖后期,由于蓝藻类的颤藻暴发性生长成为优势种,微藻群落演替向单一方向发展,表现为多样性指数迅速降低(彭聪聪等,2011)。B1池中后期、C1和C2池后期,多样性指数多低于0.9,水质不同程度恶化,对虾表现出病症和死亡现象,其他虾池除几次低于0.9,其余多在0.9以上,对虾生长良好。这与郭皓等(1996)报道的结论相似。因此,在养殖过程中,当微藻多样性指数低于0.9时,应加强管理,预防对虾发病。

优势种可代表一个群落的生态特征(黄翔鹤等,2002)。本研究中,对虾工厂化养殖的中后期,颤藻优势种占到总量的58%–90%,表明微藻总量的变动是由较为单一的优势种控制的。张才学等(2007)调查发现,湛江地区对虾工厂化养殖池后期,微藻优势种主要是小球藻和小环藻等耐污种类。李玉全等(2006)在青岛小麦岛进行的研究发现,对虾工厂化养殖池中的微藻群落以硅藻为主。本研究中,前期优势种主要

以绿藻和硅藻的一些种类为主,中后期蓝藻的微囊藻和颤藻多演替成为优势种,与以上二者的研究结果有较大差异。可能原因是后期水体的高营养水平是颤藻等蓝藻大量暴发的原因,蓝藻的大量繁殖抑制了绿藻和硅藻等的生长(彭聪聪等,2010)。对虾工厂化养殖模式是在小水体中进行的高密度商业化养殖方式,在养殖过程中受到投饵、换水、增氧、消毒等多种人工因子调控(孟庆武等,2008),不同养殖地区、不同养殖工艺、养殖用水的处理方式等都有可能造成微藻优势种差异(吴斌等,2008;李雪松等,2006)。

本研究发现,养殖密度对微藻群落的演替也有较大影响,较低养殖密度的A1池(300 ind/m²),大部分时间都以小球藻占优势地位,藻相良好,而B1池(400 ind/m²)和C1、C2池(500 ind/m²)在养殖后期,藻相被颤藻控制。卢静等(2000)报道,低密度(70 ind/m²)养殖围隔,微藻以硅藻种类的舟形藻(*Navicule*)和小环藻为主,中高养殖密度(210–350 ind/m²)虾池,裸甲藻属(*Gymnodinium*)、蓝球藻属(*Chroococcus*)等种类占优势。李玉全等(2013)报道,对虾养殖密度显著影响工厂化养殖系统氮磷的输出,随着养殖密度的增加,投饵量以及对虾的代谢物、排泄物都高于低养殖密度,使得高密度虾池的营养水平高于低密度虾池,水中不同的营养水平可能造成微藻演替差异。以上表明,过高的养殖密度可能是导致养殖后期蓝藻等不良微藻演替成为优势种的原因之一。

参 考 文 献

- Attayde JL, Hansson LA. Effects of nutrient recycling by zooplankton and fish on phytoplankton communities. *Oecologia*, 1999, 121(1): 47–54
- Cai LT, Chen C, Wang YN, *et al.* Dynamic change of the phytoplankton in the breeding ponds of *Penaeus vannamei*. *Journal of Ningbo University (Natural Science and Engineering Edition)*, 2013, 26(2): 7–11 [蔡林婷, 陈晨, 王一农, 等. 凡纳滨对虾设施化养殖塘中浮游植物的动态变化. *宁波大学学报(理工版)*, 2013, 26(2): 7–11]
- Cao P, Huang XH, Li CL, *et al.* Effects of *Oscillatoria* sp. on growth and immune activities of *Litopenaeus vannamei*. *Fishery Modernization*, 2011(5): 25–30 [曹平, 黄翔鹤, 李长玲, 等. 颤藻对凡纳滨对虾生长和免疫相关酶活力的影响. *渔业现代化*, 2011(5): 25–30]
- Chen JF, Lai YH, Tong WP. Fluctuation of pH values in water of industrialized cultivation of white leg shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Fisheries Science*, 2006, 25(9): 457–458 [陈剑锋,

- 赖廷和, 童万平. 凡纳滨对虾工厂化养殖水体 pH 值的变化特征. 水产科学, 2006, 25(9): 457-458]
- Cremen MC, Martinez-Goss MR, Corre VL, *et al.* Phytoplankton bloom in commercial shrimp ponds using green-water technology. Journal of Applied Phycology, 2007, 19(6): 615-624
- Guan CW, Liu H, Zhang YL. Experimental study on breeding *Litopenaeus vannamei* in recirculating aquaculture system. Fishery Modernization, 2010, 38(4): 21-25 [管崇武, 刘晔, 张宇雷. 凡纳滨对虾工厂化循环水养殖试验研究. 渔业现代化, 2010, 38(4): 21-25]
- Guo H, Yu ZG. The characteristics of phytoplankton community in prawn pond and the relationships with shrimp disease. Marine Science, 1996(1): 39-45 [郭皓, 于占国. 虾池浮游植物群落特征及其与虾病的关系. 海洋科学, 1996(1): 39-45]
- Guo YJ. Chinese algae. Beijing: Science Press, 2003 [郭玉洁. 中国海藻志. 北京: 科学出版社, 2003]
- Huang XH, Wang QH. A study on dominant phytoplankton species in high-level prawn ponds and its formation cause. Journal of Tropical Oceanography, 2002(4): 36-44 [黄翔鹤, 王庆恒. 对虾高位池优势浮游植物种群与成因研究. 热带海洋学报, 2002(4): 36-44]
- Li XS, Liang JR, Chen CP, *et al.* Species diversity of phytoplanktons in shrimp aquaculture areas in the Quanzhou Bay Fujian Province. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2006(S1): 234-239 [李雪松, 梁君荣, 陈长平, 等. 泉州湾虾池浮游植物种类多样性研究. 厦门大学学报(自然科学版), 2006(S1): 234-239]
- Li YQ, Li J, Wang QY, *et al.* Analysis on structure and benefit of super-intensive and semi-intensive shrimp farming systems. Marine Fisheries Research, 2006, 27(5): 85-90 [李玉全, 李健, 王清印, 等. 对虾工厂化养殖与池塘养殖系统结构与效益比较分析. 海洋水产研究, 2006, 27(5): 85-90]
- Li YQ, Wang RJ, Jiang LX. Effects of density-stress on water quality and growth of *Marsupenaeus japonicas*. Marine Fisheries Research, 2013, 37(10): 53-57 [李玉全, 王仁杰, 姜令绪. 密度胁迫对日本囊对虾生长和水环境的影响. 海洋科学, 2013, 37(10): 53-57]
- Liu J, Qu KM, Liu HY, *et al.* Studies on features of water environment in industrialized shrimp culture system. Marine Fisheries Research, 2008, 29(6): 1-8 [刘娇, 曲克明, 刘海英, 等. 对虾工厂化养殖水环境基本特征研究. 海洋水产研究, 2008, 29(6): 1-8]
- Liu XZ, Cao YC, Li ZJ, *et al.* Study on microalgae community structure and its relationship with environment factors in the shrimp ponds during the later phases of culture period. Progress in Fishery Sciences, 2011, 32(3): 84-91 [刘孝竹, 曹煜成, 李卓佳, 等. 高位虾池养殖后期浮游微藻群落结构特征. 渔业科学进展, 2011, 32(3): 84-91]
- Lu J, Li DS, Dong SL. The impact of stocking density on plankton community in shrimp pond. Journal of Fisheries of China, 2000, 24(3): 240-246 [卢静, 李德尚, 董双林. 对虾池的放养密度对浮游生物群落的影响. 水产学报, 2000, 24(3): 240-246]
- Meng QW, Wang S, Zhao YJ, *et al.* The characteristics, development trend and prospects of prawn's industrial aquaculture in China. Ocean Development and Management, 2008, 25(3): 124-127 [孟庆武, 王圣, 赵玉洁, 等. 我国对虾工厂化养殖的特点、发展趋势及前景. 海洋开发与管理, 2008, 25(3): 124-127]
- Peng CC, Li ZJ, Cao YC, *et al.* Change of dominant species of planktonic microalgae in *Litopenaeus vannamei*'s semi-intensive culture ponds and its impact on the culture environment. Marine Environmental Science, 2011, 30(2): 193-198 [彭聪聪, 李卓佳, 曹煜成, 等. 凡纳滨对虾半集约化养殖池塘微藻优势种变动规律及其对养殖环境的影响. 海洋环境科学, 2011, 30(2): 193-198]
- Sun Y, Li F, Li J, *et al.* Phytoplankton community characteristics and the interrelationship with nutrient salts in shrimp ponds. Marine Fisheries Research, 1998, 19(2): 45-50 [孙耀, 李锋, 李健, 等. 虾塘水体中浮游植物群落特征及其与营养状况的关系. 海洋水产研究, 1998, 19(2): 45-51]
- Wu B, Liao SM. Primary report of species composition of microalgae in the culture ponds of shrimp *Litopenaeus vannamei* in Beihai, Guangxi. Guangxi Sciences, 2008, 15(4): 452-455 [吴斌, 廖思明. 广西北海凡纳滨对虾养殖池塘中微型藻类组成调查. 广西科学, 2008, 15(4): 452-455]
- Xie LM, Lin XT, Xu ZN, *et al.* Phytoplankton communities and physical and chemical factors in different types of shrimp ponds. Ecologic Science, 2003, 22(1): 34-37 [谢立民, 林小涛, 许忠能, 等. 不同类型虾池的理化因子及浮游植物群落的调查. 生态科学, 2003, 22(1): 34-37]
- Zhang CX, Lao Z, Liu YL, *et al.* Change of phytoplankton and physicochemical factors in ponds of shrimp *Peuanaeus vannamei* with different cultural patterns during late period. Journal of Guangdong Ocean University, 2007, 27(4): 38-44 [张才学, 劳赞, 刘玉莲, 等. 凡纳滨对虾常见养殖模式下养殖后期浮游植物及理化因子的变化. 广东海洋大学学报, 2007, 27(4): 38-44]
- Zhao W. Hydrobiology. Beijing: China Agriculture Press, 2005 [赵文. 水生生物学. 北京: 中国农业出版社, 2005]

Analysis of the Microalgae Community in Industrial Aquaculture Ponds of Pacific White Shrimp (*Litopenaeus vannamei*)

SHEN Mingming^{1,2}, LI Jian^{1,3①}, WANG Qingyin^{1,3}, GE Hongxing²,
LIU Ping^{1,3}, CHANG Zhiqiang^{1,3}

(1. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306;

2. Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071;

3. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071)

Abstract The microalga community in 6 industrial aquaculture ponds of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) was analyzed at Baorong Aquatic Science and Technology Limited Corporation in Qingdao from June to September in 2015. The composition of species, abundance, biodiversity and characteristics of dominant species succession were investigated and discussed based on the situation of shrimp culture. A total of 49 species of microalgae were identified that belonged to 28 genera and 5 phylums (including 14 dominant species). The population density of microalgae was 5.2×10^5 – 9.4×10^8 cell/L, the biomass was 1.23–208.00 mg/L, and the biodiversity index was 0.42–2.44. The stability of the ecosystem was weak and the shrimps were prone to outbreaks of diseases when the biodiversity index was below 0.9. The dominant species in the early stage of cultivation were green algae, diatoms and some species of dinoflagellates. *Microcystis incerta* and *Oscillatoria willei* belonging to *Cyanophyta* gradually became the dominant species in the middle to late stages. The culture density of shrimp had significant effects on the succession of microalga dominant species. The shrimp grew well in a stable community of microalgae where the culture density was 300 ind/m² (pond A1) and the dominant species were mainly green algae and diatoms. The harmful *Oscillatorias* tended to become the dominant species in the middle to late stages as the culture density was 400–500 ind/m² (in pond B1, C1 and C2), which easily led to the outbreak of shrimp diseases. Our study provided important information on the tuning of the environment of industrial aquaculture ponds.

Key words *Litopenaeus vannamei*; Industrial aquaculture; Microalgae species; Community characters

① Corresponding author: LI Jian, E-mail: lijian@ysfri.ac.cn