

文章编号: 1000-0615(2018)11-1787-17

DOI: 10.11964/jfc.20171211087

凡纳滨对虾养殖池塘中浮游植物群落结构与水质因子的关系

王旭娜¹, 江敏^{1,2*}, 钟锐³, 缪一恒³,
吴涵长¹, 余苗苗¹, 吴丹¹

(1. 上海海洋大学海洋生态与环境学院, 上海 201306;
2. 上海海洋大学水产科学国家级实验教学示范中心, 上海 201306;
3. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306)

摘要: 为研究凡纳滨对虾养殖过程中水质变化特征及其与浮游植物群落结构之间的相关性, 本实验于2016年4月至9月在上海奉贤区某养殖场开展凡纳滨对虾养殖池塘中水质及浮游植物的监测, 分析浮游植物群落结构变化与水质因子的相关性。结果显示, 凡纳滨对虾养殖池塘中共鉴定出113种浮游植物(包含20个未定种), 分别属于7个门、59个属别, 从种的数量上来看, 绿藻门>硅藻门>蓝藻门>裸藻门>黄藻门>金藻门>甲藻门, 18种(含3个未定种)优势种, 第一批次共鉴定出10种(含1个未定种)优势种, 第二批次共鉴定出14种(含2个未定种)优势种, 养殖初期优势种为硅藻门, 之后是绿藻门, 最终以蓝藻门为优势种。对浮游植物群落结构与水质因子进行典范对应分析可知, 绿藻门主要受pH、无机氮的影响(包括总氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮), 蓝藻门主要受磷含量的影响(总磷和活性磷), 硅藻门主要受温度的影响, 因此在养殖过程中要格外关注温度、pH以及氮磷含量的变化。

关键词: 凡纳滨对虾; 水质; 浮游植物; 典范对应分析

中图分类号: S 968.2

文献标志码: A

凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*), 属甲壳纲(Crustacea)、对虾科(Penaeidae)、对虾属(*Penaeus*), 又称南美白对虾, 最初产于南美洲太平洋赤道附近^[1]的厄瓜多尔。其壳薄体肥、肉质鲜美^[2], 适温适盐范围广、生长速率快, 抗病力强, 是我国对虾养殖的主要品种之一, 其养殖规模在沿海和内陆地区得到迅速发展^[3]。

浮游植物作为水生生态系统中重要的初级生产者, 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, 甚至影响整个生态系统的稳定^[4]。由于浮游植物生长周期短, 对水环境的变化敏感且反应迅速, 其生物量和群

落结构能很好地反映水质现状及变化趋势, 是评价水环境质量的重要指标^[5-7]。

彭聪聪等^[8]在凡纳滨对虾半集约化养殖塘中发现, 总氮、总磷量会影响微藻总数量和总生物量; 苏发文等^[9]对凡纳滨对虾盐碱水养殖土池中浮游植物群落结构的研究表明, 铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)和小球藻(*Chlorella*)的生物量与水件pH有关。米振琴等^[10]对斑节对虾(*Penaeus monodon*)精养池中浮游植物与水质因子相关性的研究表明, 影响浮游植物丰度的主要因子依次为磷酸盐>氨氮>亚硝酸氮>硝酸盐>温度>溶解氧。张瑜斌等^[11]研究发现, 在凡纳滨对虾集约

收稿日期: 2017-12-13 修回日期: 2018-03-20

资助项目: 上海市虾类产业技术体系建设项目[沪农科产字(2014)第5号]; 上海高校水产高峰学科建设项目; 上海市高校知识服务平台项目(ZF1206)

通信作者: 江敏, E-mail: mjiaing@shou.edu.cn

化高位养殖池中, 水体盐度较低时, 高水温和高pH有利于蓝藻(Cyanophyta)的生长繁殖, 易使其成为优势种, 而以蓝藻为优势种的浮游植物种群数量的增加极易产生有害水华, 导致水环境恶化、虾病发生。

环境中的各种因素, 如阳光、营养盐、pH值及水中的生物均会影响浮游植物种类及数量的变化, 进而对各水质因子产生影响。因此, 了解凡纳滨对虾养殖池塘中浮游植物群落的特征, 研究水质因子和浮游植物之间的关系, 对维持虾池水体生态系统平衡有重要作用。

1 材料与方法

1.1 实验地点

实验在上海市奉贤区海峰水产养殖专业合作社(北纬N30°52'6.87"东经E121°22'52.96")进行, 选取养殖合作社4、7、8号塘为实验塘, 每个养殖池塘占地面积4 333 m², 平均水深1.5 m, 配备四台叶轮式增氧机, 根据水质状况进行少量加水、换水。

实验期间共进行了2批次凡纳滨对虾的养殖, 由海南空运至养殖场的虾苗, 经10 d的淡化后进入相应池塘, 虾苗投放密度为58尾/m²。第一批次进入池塘时间为2016年4月1日, 出虾时间为6月9日, 合计养殖70 d; 第一批次结束后, 养殖塘经干塘、晒塘、消毒处理后重新进水养水; 第二批次虾苗入塘时间为7月27日, 出虾时间为9月25日, 养殖61 d。

1.2 样品采集及分析

每15天对3口实验塘进行采样, 采样时间为早上8:00—10:00, 每口塘延边设3个固定采样点, 远离食台和增氧机, 距离岸边约1 m, 分别于水面下25 cm采集1 L水样, 混合后用于水质测定和浮游植物检测^[12-13]。第一批次从4月1日—6月9日, 共采集6次, 第二批次从7月27日—9月25日, 共采集5次。

水样采集及保存遵循《地表水和污水监测技术规范》(HJ/T91-2002), 现场记录采样时间、天气、水色, 测定水温(T)、溶解氧(DO)以及pH, 实验室检测总氮(TN)、总氨氮(TAN)、亚硝氮(NO₂⁻-N)、硝氮(NO₃⁻-N)、总磷(TP)、活性磷(AP)、叶绿素a (Chl-a)以及高锰酸盐指数

(COD_{Mn})8个水质指标。T、DO采用美国YSLPro DO溶氧仪测定, pH采用PHBJ-260型便携式pH计测定, TN、TAN、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、TP、AP、Chl-a和COD_{Mn}分别采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB11894-89)、纳氏试剂紫外分光光度法(GB7479-87)、磺胺盐酸萘乙二胺紫外分光光度法(GB7493-87)、水质硝酸盐氮紫外分光光度法(试行)(HJ/T346-2007)、过硫酸钾消解钼酸铵紫外分光光度法(GB11893-89)、钼酸铵紫外分光光度法(GB11893-89)、热乙醇法和碱性高锰酸盐法(GB11892-89)进行测定。

现场在1 L水样中加入15 mL鲁哥试剂及10 mL福尔马林进行固定, 用于浮游植物检测, 在实验室中将样品沉淀24~48 h后浓缩至50 mL, 收集于容量为60 mL的白色透明聚酯瓶中。取浓缩液0.1 mL于浮游植物计数框中, 在光学显微镜下计数, 浮游植物的种类鉴定参考《中国淡水藻类——系统、分类及生态》和《淡水微型生物图谱》。

1.3 数据处理

用Shannon-Wiener多样性指数(H')、Margalef多样性(D)、Pielou指数(J)以及优势度(Y)指数表征浮游植物群落特征^[14-18], 计算公式如下:

$$H' = \sum_{i=0}^i (P_i \times \text{Log}_2 P_i) \quad (1)$$

$$J = \frac{H'}{\text{Log}_2 S} \quad (2)$$

$$D = \frac{S - 1}{\text{Ln} N} \quad (3)$$

$$Y = \frac{n_i \times f_i}{N} \quad (4)$$

$$n_i = n \times \frac{A \times V}{A_C \times V_a} \quad (5)$$

$$N = \sum_{i=0}^i n_i \quad (6)$$

$$P_i = \frac{n_i}{N}; \quad (7)$$

P_i 为第*i*种藻类的个数与样品中所有藻类个数的比值; S 为样品中藻类种类数; N 为所有藻类生物密度(cell/L), A 为计数框面积(mm²), A_C 为计数面积(mm²), V 为1 L原水样沉淀浓缩后的体积(mL), V_a 为计数框的体积(mL), n 为计数所得的浮游植物数目, n_i 为第*i*种藻类的密度,

f_i 为第*i*种藻类在各站点出现的频率。本文将优势度 $Y \geq 0.02$ 的藻类定为优势种。

采用Excel 2010统计分析软件进行数据处理及绘图, 采用Canoco for Windows 4.5软件对物种数据与水质因子进行典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA), 此过程中用于排序的物种为各池塘优势种, 水质和物种数据之间数量级差别较大, 所以进行 $\lg(x+1)$ 转换, CCA分析结果用Canodraw软件制作双序图。

2 结果

2.1 水质因子

两批次虾苗投放前养殖塘的水质因子初始值见表1。

第一批次(4月1日—6月9日)中, 3口塘的T、DO、pH变化范围和均值基本相同(表2), 从均值上看, COD_{Mn}、Chl-a、TP、AP、TN含量是4号塘低于7、8号塘, NO₂⁻-N和NO₃⁻-N是7号塘低于4、8号塘, TAN和氮磷比是8号塘低于2、7号塘; 第二批次(7月27日—9月25日)中, 4号塘的Chl-a和NO₃⁻-N高于7、8号塘, 而TP、AP、TN是4号塘最低, 8号塘的NO₂⁻-N最低, TAN最高。

两批次养殖过程中, 初期Chl-a含量均较低, 之后有所增长, 第一批次中上升平稳, 而

第二批次在8月26日出现剧增; 第二批次和第一批次相比, COD_{Mn}略有增高, NO₃⁻-N和NO₂⁻-N均有所减少, 且变化平稳, 波动范围小(图1)。

2.2 浮游植物种类及组成

对3口实验塘浮游植物进行调查, 共鉴定出浮游植物113种(含20个未定种)(表3), 隶属于7个门类、10个纲、20个目、30个科、59个属别(图2)。两个批次中, 以绿藻门(Chlorophyta)所占比例最高, 分别占总种数的47.73%和51.22%, 其次是硅藻门(Bacillariophyta)、蓝藻门(Cyanophyta)、裸藻门(Euglenophyta)和黄藻门(Xanthophyta), 第二批次未鉴别到甲藻门(Pyrrophyta)和金藻门(Chryso-phyta)。

3口实验塘的浮游植物群落结构存在差异(表4), 第一批次中第4、7、8号塘分别发现浮游植物49、46、31种, 隶属于7个门类、11个纲、19个目、27个科、52个属别, 共88个种; 第二批次中第4、7、8号塘分别发现浮游植物29、40、55种, 隶属于7个门类、7个纲、15个目、24个科、47个属别, 共82个种。

2.3 浮游植物多样性

生物多样性指数能够综合反映物种丰富性和均匀性, 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^[19]。

表1 各池塘初始水质因子参数

Tab. 1 Initial water quality factors in the ponds of *L. vannamei*

	第一批次 first season			第二批次 second season		
	4号塘 pond 4	7号塘 pond 7	8号塘 pond 8	4号塘 pond 4	7号塘 pond 7	8号塘 pond 8
温度/°C T	20.70	20.60	21.00	31.40	33.00	33.60
溶解氧/(mg/L) DO	7.64	7.14	5.70	5.75	1.66	1.57
酸碱度 pH	7.83	7.73	7.48	7.38	8.85	7.81
高锰酸盐指数/(mg/L) COD _{Mn}	6.65	6.69	8.6	5.49	6.83	7.41
叶绿素a/(mg/L) Chl-a	6.98	3.49	6.98	8.37	22.32	16.74
总磷/(mg/L) TP	0.04	0.08	0.12	0.06	0.22	0.19
活性磷/(mg/L) AP	0.01	0.02	0.03	0.01	0.14	0.09
总氮/(mg/L) TN	1.98	0.99	1.53	0.65	0.87	1.18
硝氮/(mg/L) NO ₃ ⁻ -N	1.16	0.84	0.7	0.54	0.37	0.35
亚硝氮/(mg/L) NO ₂ ⁻ -N	0.15	0.08	0.09	0.01	0.003	0.006
总氨氮/(mg/L) TAN	2.21	2.71	1.28	0.96	0.53	0.68

表2 凡纳滨对虾各养殖池塘水质因子变化范围

Tab. 2 Physicochemical parameters' variables ranges and mean values of the water quality factors in the ponds of *L. vannamei*

	第一批次 first season			第二批次 second season		
	4号塘 pond 4	7号塘 pond 7	8号塘 pond 8	4号塘 pond 4	7号塘 pond 7	8号塘 pond 8
温度/°C T	20.70~29.10	20.60~29.00	21.00~29.30	25.1~31.4	26.00~33.00	26.60~33.60
	26.03±2.64	26.20±2.73	26.47±2.71	29.24±2.58	29.86±2.74	30.22±2.67
溶解氧/(mg/L) DO	3.19~8.05	2.60~7.93	3.67~7.59	3.49~10.69	1.66~8.29	1.57~10.58
	6.43±1.63	6.21±1.75	5.91±1.23	6.63±2.35	5.67±2.69	6.54±3.25
酸碱度 pH	7.39~8.39	7.60~8.21	7.48~8.65	7.38~8.86	8.30~8.85	7.81~9.09
	7.90±0.32	7.89±0.19	7.94±0.41	8.18±0.51	8.65±0.20	8.59±0.44
高锰酸盐指数/(mg/L) COD _{Mn}	2.94~6.65	1.09~8.56	1.28~8.60	5.49~17.22	6.83~14.53	7.41~12.37
	5.06±1.43	6.03±2.43	5.69±2.56	12.34±4.46	10.57±2.48	10.96±1.83
叶绿素a/(mg/L) Chl-a	6.98~39.06	3.49~159.03	6.98~125.55	8.37~239.94	8.37~172.98	11.16~147.87
	20.93±10.93	66.73±50.07	49.99±40.55	128.34±91.67	71.42±59.02	77.56±54.63
总磷/(mg/L) TP	0.04~0.11	0.04~0.23	0.11~0.21	0.06~0.24	0.11~0.22	0.156~0.22
	0.07±0.03	0.11±0.06	0.16±0.03	0.16±0.07	0.16±0.04	0.19±0.02
活性磷/(mg/L) AP	0.008~0.012	0.01~0.03	0.01~0.04	0.008~0.01	0.008~0.14	0.008~0.09
	0.01±0.002	0.02±0.01	0.03±0.01	0.01±0.002	0.04±0.05	0.03±0.03
总氮/(mg/L) TN	0.34~3.38	0.44~5.44	0.72~4.69	0.65~5.54	0.87~3.66	1.00~4.68
	1.87±1.15	2.22±1.89	2.24±1.47	3.30±2.09	2.37±1.19	2.73±1.43
硝氮/(mg/L) NO ₃ ⁻ -N	0.43~1.27	0.09~0.84	0.42~0.88	0.47~0.59	0.37~0.62	0.35~0.54
	0.90±0.29	0.50±0.29	0.65±0.18	0.54±0.04	0.50±0.08	0.45±0.06
亚硝氮/(mg/L) NO ₂ ⁻ -N	0.12~0.55	0.005~0.80	0.09~1.02	0.002~0.09	0.003~0.08	0.003~0.04
	0.26±0.16	0.21±0.26	0.32±0.32	0.03±0.03	0.04±0.03	0.02±0.01
总氨氮/(mg/L) TAN	0.10~2.21	0.15~2.71	0.15~1.74	0.08~1.67	0.06~1.19	0.21~2.59
	1.01±0.74	1.09±0.95	0.76±0.06	0.79±0.52	0.63±0.38	1.07±0.83
氮磷比 N:P	4.35~56.51	3.42~39.91	4.04~27.08	10.70~28.40	3.87~29.14	4.53~26.41
	30.98±16.01	20.23±12.14	14.73±8.90	18.72±6.88	17.12±10.55	15.15±8.48

注：每个水质因子中第一行数据为变化范围，第二行数据为平均值±标准差

Notes: for every water quality factor, the data in the first line represent variables ranges and in the second line represent means±standard deviation

Shannon-Wiener指数基于物种数量反映群落种类多样性，群落中生物种类增多表示群落的复杂程度增高，即 H' 值越大，群落所含的信息量越大。第一批次Shannon-Wiener多样性指数范围为1.26~3.27，平均值为2.46；第二批次范围为1.67~3.85，平均值为2.74，最高的出现在第二批次8月26日的8号塘，第一批次三个塘的Shannon-Wiener多样性指数在采样初期都是最低的，也符

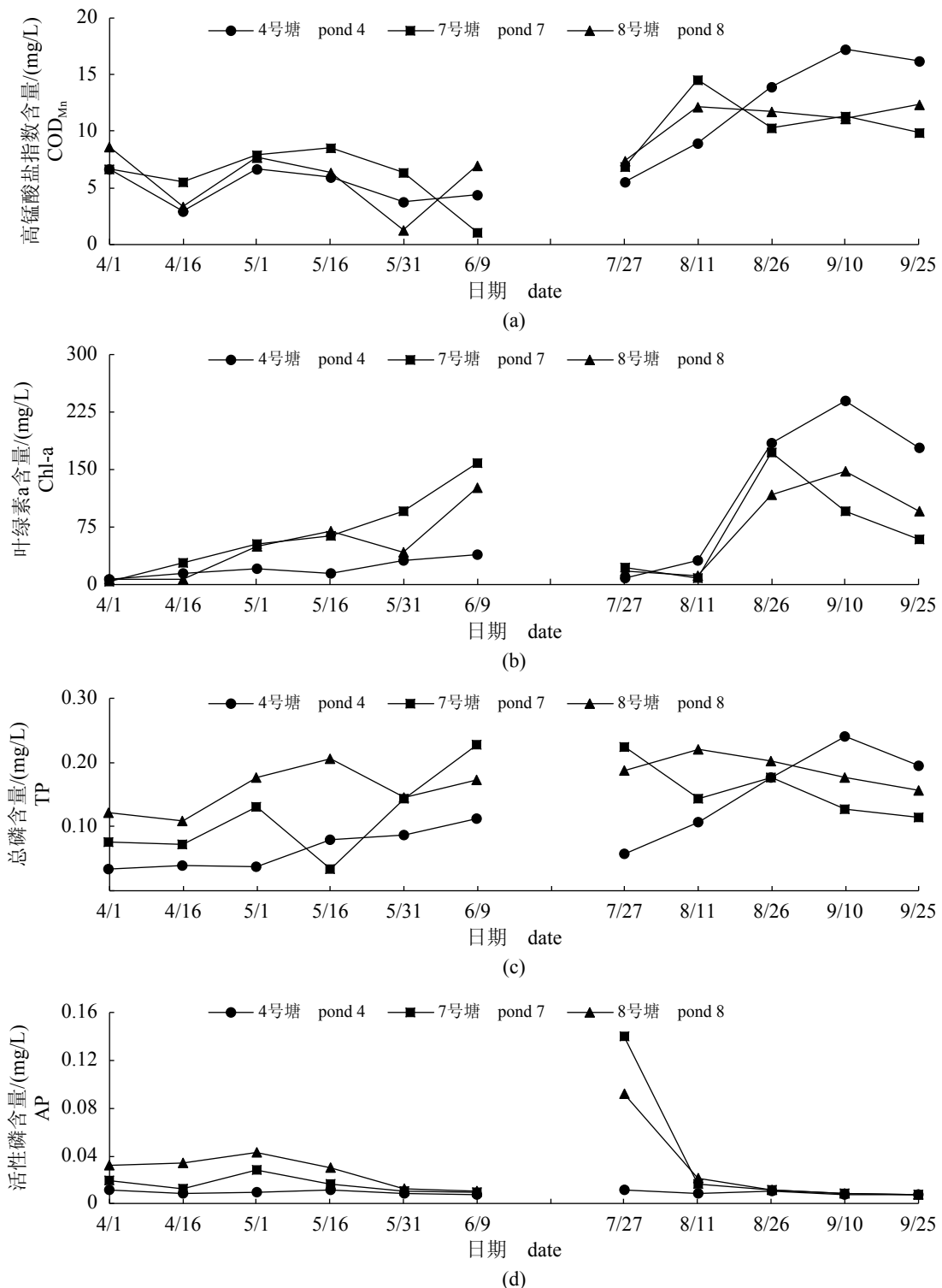
合养殖初期生物种类较少，群落复杂程度小，随着养殖的进行，生物种类增多，指数越大，群落的复杂程度增高。第一批次8号塘Shannon-Wiener多样性指数平缓上升，4、7号塘先上升，后下降，再上升，再下降。第二批次4、7号塘平缓，8号塘先上升后下降(图3)。

有研究表明 H' 越大，水体自净能力越强^[20]， $H'>3$ 为轻度或无污染， H' 在1~3之间为中度污

染, H' 在0~1 之间为重度污染^[21-23], 本研究中 H' 在1~3.85之间, 处于中度污染和轻度或无污染, 说明养殖塘中水环境质量有待改善和提高。

Margalef指数反映群落物种丰富度, 是指一个群落或环境中物种数目的多寡, 亦表示生物

群聚中种类丰富程度, 生物多样性越高, 物种数目越多。第一批次Margalef多样性指数范围为0.62~1.74, 平均值为0.65; 第二批次范围为0.78~2.18, 平均值0.69, 最高的出现在第二批次8月26日的8号塘(图4)。群落物种丰富度的变化



(图1 Fig. 1)

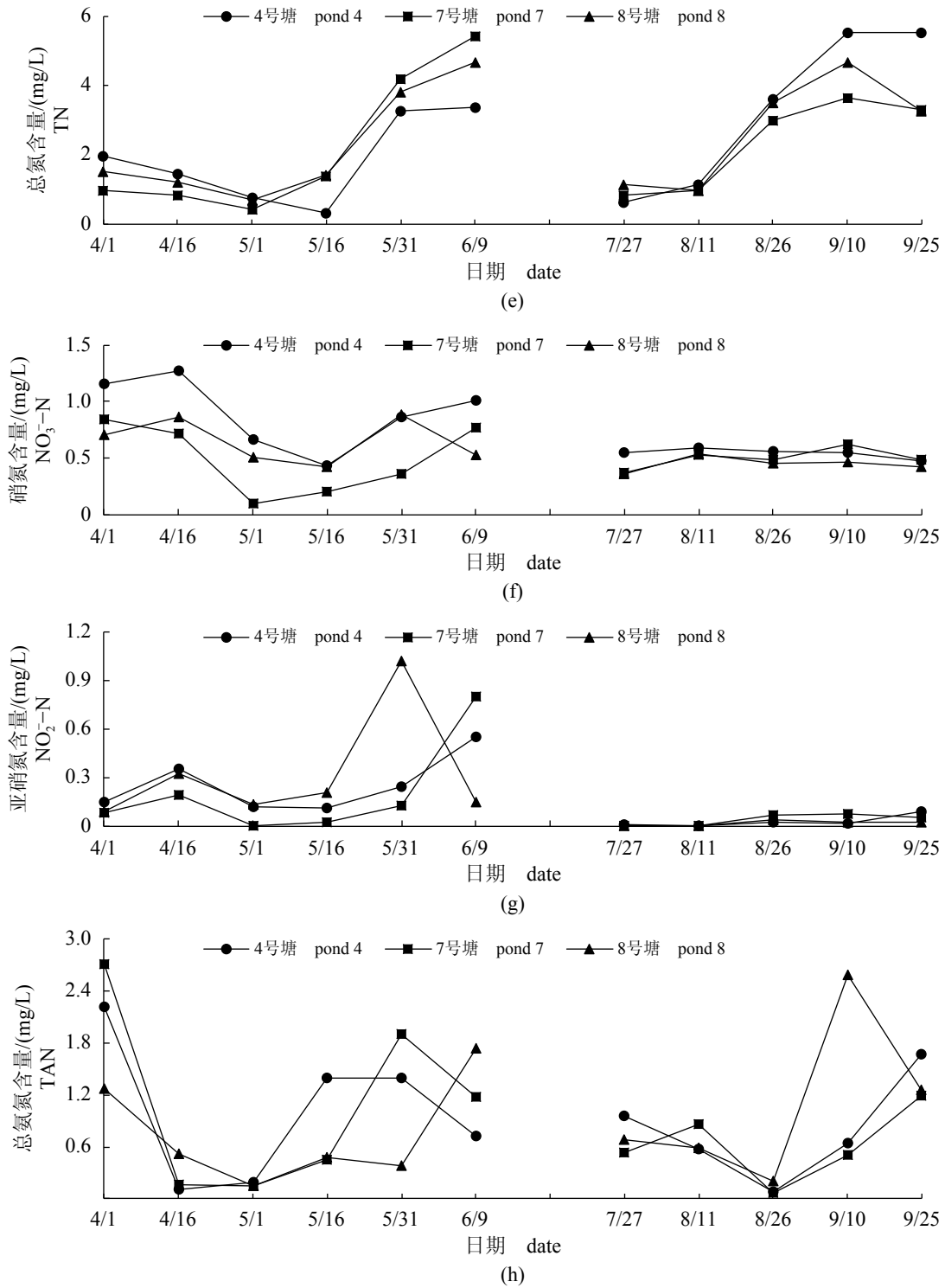


图 1 凡纳滨对虾各养殖池塘水质因子变化

(a)高锰酸盐指数变化; (b)叶绿素a变化; (c)总磷变化; (d)活性磷变化; (e)总氮变化; (f)硝氮变化; (g)亚硝氮变化; (h)总氨氮变化

Fig. 1 Ranges of the water quality factors in the ponds of *L. vannamei*

(a) changes of COD_{Mn}; (b) changes of Chl-a; (c) changes of TP; (d) changes of AP; (e) changes of TN; (f) changes of NO₃⁻-N; (g) changes of NO₂⁻-N; (h) changes of TAN

比较复杂, 并无明显规律。

Shannon-Wiener多样性指数和Margalef多样

性指数呈现相似的趋势, 最高值均出现在8月

26日的8号塘, 在5月16日前, 8号塘均为上升趋

表 3 凡纳滨对虾各养殖池塘浮游植物名录

Tab. 3 Phytoplankton species in the ponds of *L. vannamei*

门类 phylum	种类 species	种类 species	
绿藻门 Chlorophyta	葡串藻属未定种 <i>Pyrobotrys</i> sp.	空球藻 <i>Eudorina elegans</i>	
	团藻未定种 <i>Volvox</i> sp.	美丽团藻 <i>V. aureus</i>	
	球团藻 <i>V. globator</i>	球囊藻 <i>Gloeocystis Sphaerocystis</i>	
	硬弓形藻 <i>Schroederia robusta</i>	小球藻属未定种 <i>Chlorella</i> sp.	
	椭圆小球藻 <i>C. ellipsoidea</i>	长刺顶棘藻 <i>C. longiseta</i>	
	被刺藻 <i>Franceia ovalis</i>	二叉四角藻 <i>Tetraedron bifurcatum</i>	
	三角四角藻 <i>T. trigonum</i>	针形纤维藻 <i>Ankistrodesmus acicularis</i>	
	镰形纤维藻 <i>A. falcatus</i>	螺旋纤维藻 <i>A. spiralis</i>	
	蹄形藻 <i>Kirchneriella lunaris</i>	纤细月牙藻 <i>Selenastrum gracile</i>	
	小形月牙藻 <i>S. minutum</i>	粗棘四刺藻 <i>Treubaria crassispina</i>	
	并联藻属未定种 <i>Quadrigula</i> sp.	柯氏并联藻 <i>Q. chodatii</i>	
	二角盘星藻大孔变种 <i>Pediastrum duplex var. clathratum</i>	单角盘星藻 <i>P. simplex</i>	
	栅藻属未定种 <i>Scenedesmus</i> sp.	巴西栅藻 <i>S. brasiliensis</i>	
	被甲栅藻 <i>S. armatus</i>	尖细栅藻 <i>S. acuminatus</i>	
	二形栅藻 <i>S. dimorphus</i>	斜生栅藻 <i>S. obliquus</i>	
	爪哇栅藻 <i>S. javaensis</i>	四尾栅藻 <i>S. quadrecauda</i>	
	华美十字藻 <i>Crucigenia lauterbornii</i>	四角十字藻 <i>C. quadrata</i> sp.	
	四足十字藻 <i>C. tetrapedia</i>	集星藻 <i>Actinastrum hantzschii</i>	
	丝藻属未定种 <i>Ulothrix</i> sp.	多形丝藻 <i>U. variabilis</i>	
	细丝藻 <i>U. tenerrima</i>	颤丝藻 <i>U. oscillatoria</i>	
	尾丝藻属未定种 <i>Uronema</i>	尾丝藻 <i>U. confervicolum</i>	
	刚毛藻属未定种 <i>Cladophora</i> sp.	龟背基枝藻 <i>Basicladia chelonum</i>	
	迪格梭形鼓藻 <i>Netrium digitus</i>	新月藻属未定种 <i>Closterium</i> sp.	
	锐新月藻 <i>C. acerosum</i>	中型新月藻 <i>C. intermedium</i>	
	库津新月藻 <i>C. kuetzingii</i>	微小新月藻 <i>C. parvulum</i>	
	小新月藻 <i>C. venus</i> sp.	鼓藻属未定种 <i>Cosmarium</i> sp.	
	近缘鼓藻 <i>C. connatum</i>	圆孔纹鼓藻 <i>C. maculatum</i>	
	光角星鼓藻 <i>Staurastrum muticum</i>		
	蓝藻门 Cyanophyta	大平裂藻 <i>Merismopedia major</i>	微小平裂藻 <i>M. tenuissima</i>
		细小平裂藻 <i>M. minima</i>	中华平裂藻 <i>M. sinica</i>
		点形平裂藻 <i>M. punctata</i>	优美平裂藻 <i>M. elegans</i>
微囊藻属未定种 <i>Microcystis</i> sp.		不定微囊藻 <i>M. incerta</i>	
铜绿微囊藻 <i>M. aeruginosa</i>		中华尖头藻 <i>M. sinica</i>	
小型色球藻 <i>Chroococcus minor</i>		不定腔球藻 <i>Coelosphaerium dubium</i>	

· 续表3 ·

门类 phylum	种类 species	种类	
蓝藻门 <i>Cyanophyta</i>	小颤藻 <i>Oscillatoria tenuis</i>	断裂颤藻 <i>O. fraga</i>	
	蛇形颤藻 <i>O. anguina</i>	大螺旋藻 <i>Spirulina major</i>	
	极大螺旋藻 <i>S. maxima</i>	螺旋鱼腥藻 <i>Anabaena spiroides</i>	
	念珠藻属未定种 <i>Nostoc</i> sp.	普通念珠藻 <i>N. commune</i>	
	点形念珠藻 <i>N. punctiforme</i>		
金藻门 <i>Chrysophyta</i>	锥囊藻属未定种 <i>Dinobryon</i> sp.	拟辐尾藻属未定种 <i>Uroglenopsis</i> sp.	
黄藻门 <i>Xanthophyta</i>	拟气球藻 <i>Botrydiopsis arhiza</i>	绿囊藻 <i>Chlorobotrys regularis</i>	
	小型黄管藻 <i>Ophiocytium parvulum</i>		
硅藻门 <i>Bacillariophyta</i>	棘冠藻 <i>Corethron</i>	颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i>	
	小环藻属未定种 <i>Cyclotella</i> sp.	广缘小环藻 <i>C. bodanica</i>	
	梅尼小环藻 <i>C. meneghiniana</i>	星芒小环藻 <i>C. stelligera</i>	
	新星形冠盘藻 <i>Stephanodiscus neoastraea</i>	湖沼圆筛藻 <i>Coscinodiscus lacustris</i>	
	美丽星杆藻 <i>Asterionella formosa</i> Hassall	微绿肋缝藻 <i>Frustulia vulgaris</i>	
	中肋异菱藻 <i>Anomoeoneis costata</i>	舟形藻属未定种 <i>Navicula</i> sp.	
	隐头舟形藻 <i>N. cryptocephala</i>	双头舟形藻 <i>N. dicephala</i>	
	微型舟形藻 <i>N. minima</i>	小型舟形藻 <i>N. minuscula</i>	
	扁圆舟形藻 <i>N. placentula</i>	羽纹藻属未定种 <i>Pinnularia</i> sp.	
	磨石形羽纹藻 <i>P. molaris</i>	粗糙桥弯藻 <i>Cymbella aspera</i>	
	新月桥弯藻 <i>C. cymbiformis</i>	何氏卵形藻 <i>Cocconeis hustdtii</i>	
	扁圆卵形藻 <i>C. placentula</i>	线性双菱藻 <i>Surirella linearis</i>	
	粗壮双菱藻 <i>S. robusta</i>		
	甲藻门 <i>Pyrrophyta</i>	桶形多甲藻 <i>Peridinium umbonatum</i>	
	裸藻门 <i>Euglenophyta</i>	尾裸藻 <i>Euglena caudata</i>	囊裸藻属未定种 <i>Trachelomonas</i> sp.
		相似囊裸藻 <i>T. similis</i>	扁裸藻属未定种 <i>Phacus</i> sp.
		变胞藻属未定种 <i>Astasia</i> sp.	弦月藻 <i>Menuidium pellucidum</i>

势, 4月16日4号塘上升, 5月1日下降。说明群落中生物种类增多, 群落的复杂程度增强, 生物多样性高, 丰富度增加。

Pielou指数反映群落均匀度, 即一个群落中全部物种个体数目的分布状况, 第一批次 Pielou均匀度指数(J)为0.33~0.91, 平均值为1.07; 第二批次为0.37~0.95, 平均值为1.17。第一批次, 8号塘变化比较平稳, 4、7号塘波动较大, 第二批次4号塘变化平稳, 7、8号塘波动较大, 变化平稳表示群落物种分布的均匀度较好(图5)。

2.4 浮游植物优势种及优势度

根据 $Y = \frac{n_i \times f_i}{N}$ 计算优势度, 将 $Y \geq 0.02$ 的藻类定为优势种, 所有塘共鉴别出18个(含3个未定种)优势种(表5), 绿藻门8种, 蓝藻门8种, 硅藻门2种, 优势度最高的是蓝藻门的细小平裂藻(0.76)。第一批次共鉴定出10种(含1未定种)优势种, 包括梅尼小环藻、丝藻属未定种、四尾栅藻、四足十字藻、蹄形藻、椭圆小球藻、微囊藻属未定种、细丝藻、细小平裂藻、针形纤维藻; 第二批次共鉴定出14种(含2未定种)优势种, 包括被刺藻、大平裂藻、梅尼小环藻、蛇

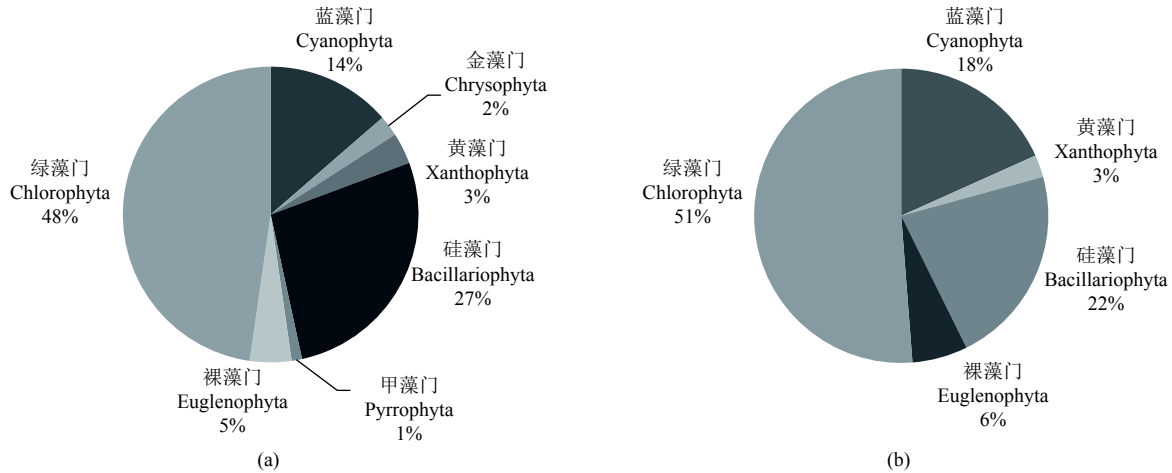


图 2 浮游植物门类构成

(a)第一批次浮游植物门类构成; (b)第二批次浮游植物门类构成

Fig. 2 The composition of phytoplankton community

(a) the composition of phytoplankton community in first season; (b) the composition of phytoplankton community in second season

表 4 凡纳滨对虾各养殖池塘浮游植物群落结构组成

Tab. 4 The composition of phytoplankton community in the ponds of *L. vannamei*

实验塘 site	第一批次 first season						第二批次 second season					
	门 phylum	纲 class	目 order	科 family	属 genus	种 species	门 phylum	纲 class	目 order	科 family	属 genus	种 species
4号 pond4	蓝藻门 Cyanophyta	1	2	2	2	3	蓝藻门 Cyanophyta	1	1	1	1	1
	金藻门 Chrysophyta	2	2	2	2	2	/					
	黄藻门 Xanthophyta	1	1	2	2	2	黄藻门 Xanthophyta	1	1	2	2	2
	硅藻门 Bacillariophyta	2	4	4	9	13	硅藻门 Bacillariophyta	2	4	5	8	8
	甲藻门 Pyrrophyta	1	1	1	1	1	/					
	裸藻门 Euglenophyta	1	1	1	4	4	裸藻门 Euglenophyta	1	1	1	3	3
7号 pond7	绿藻门 Chlorophyta	2	5	9	17	24	绿藻门 Chlorophyta	2	4	8	13	15
	蓝藻门 Cyanophyta	1	2	4	6	10	蓝藻门 Cyanophyta	1	2	5	5	7
	黄藻门 Xanthophyta	1	1	2	2	2	/					
	硅藻门 Bacillariophyta	2	4	5	7	11	硅藻门 Bacillariophyta	2	3	3	6	9
8号 pond8	绿藻门 Chlorophyta	2	4	6	13	23	绿藻门 Chlorophyta	2	4	6	14	24
	蓝藻门 Cyanophyta	1	1	1	1	3	蓝藻门 Cyanophyta	1	3	5	6	11
	硅藻门 Bacillariophyta	2	4	4	6	7	硅藻门 Bacillariophyta	2	4	4	8	12
	裸藻门 Euglenophyta	1	1	1	1	1	裸藻门 Euglenophyta	1	1	1	2	2
	绿藻门 Chlorophyta	2	4	8	13	20	绿藻门 Chlorophyta	2	5	8	17	24

形颤藻、四尾栅藻、铜绿微囊藻、椭圆小球藻、微小平裂藻、细丝藻、细小平裂藻、小环藻属未定种、小型色球藻、优美平裂藻、针形纤维藻。

养殖初期硅藻门和绿藻门为主要优势种, 优势度较高, 养殖中后期则是蓝藻门和绿藻门逐渐占据优势, 之后蓝藻门优势度超过绿藻门。杨秀兰等^[15]对盐碱地封闭式对虾养殖中浮游

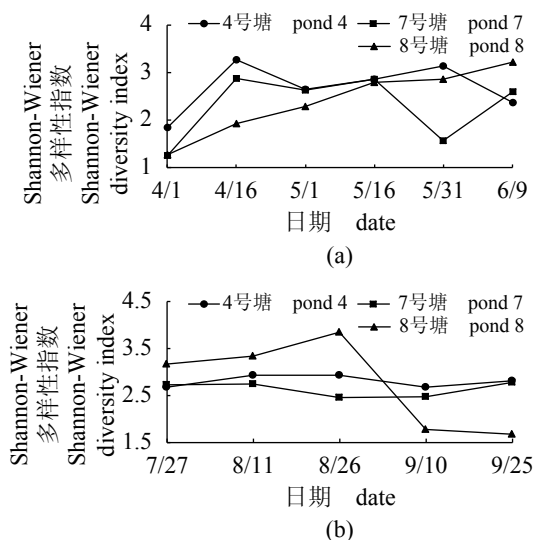


图3 凡纳滨对虾各养殖池塘浮游植物

Shannon-Wiener多样性指数变化

(a)第一批次浮游植物Shannon-Wiener多样性指数变化；(b)第二批次浮游植物Shannon-Wiener多样性指数变化

Fig. 3 Shannon-Wiener index of phytoplankton in the ponds of *L. vannamei*

(a) Shannon-Wiener index of phytoplankton in first season; (b) Shannon-Wiener index of phytoplankton in second season

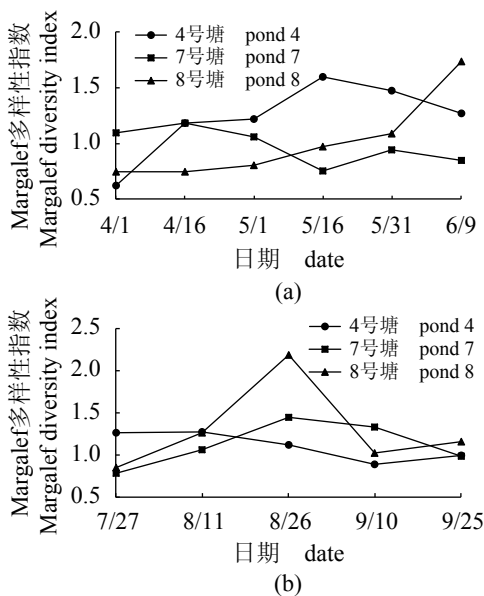


图4 凡纳滨对虾各养殖池塘浮游植物Margalef多样性指数变化

(a)第一批次浮游植物Margalef多样性指数变化；(b)第二批次浮游植物Margalef多样性指数变化

Fig. 4 Margalef index of phytoplankton in the ponds of *L. vannamei*

(a) Margalef index of phytoplankton in first season; (b) Margalef index of phytoplankton in second season

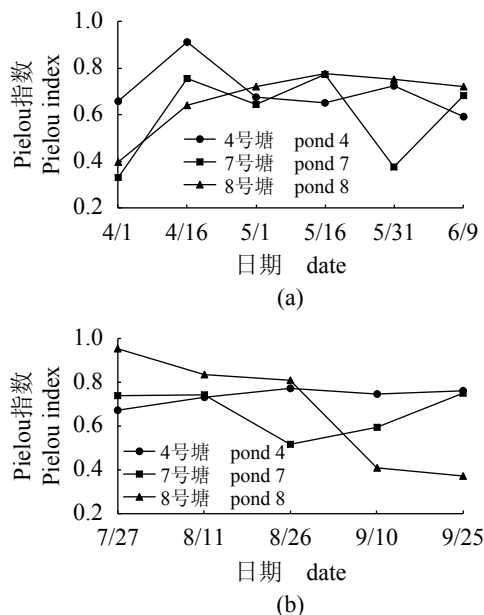


图5 凡纳滨对虾各养殖池塘浮游植物Pielou指数变化

(a)第一批次浮游植物Pielou指数变化；(b)第二批次浮游植物Pielou指数变化

Fig. 5 Pielou index of phytoplankton in the ponds of *L. vannamei*

(a) Pielou index of phytoplankton in first season; (b) Pielou index of phytoplankton in second season

生物研究发现,随着养殖的进行,水体中饲料残渣及对虾排泄物不断累积,在微生物的分解下,氮磷等营养盐含量升高明显,会有利于喜N蓝藻和绿藻的大量繁殖。

2.5 浮游植物功能群丰度与水质因子的关系

CCA分析判断主要水质因子对浮游植物空间分布的解释程度,水质因子与浮游植物物种的相关性强弱和正负,因此,没有将第一批次与第二批次的的数据分别分析,而是所有数据一起进行分析。选取全部水质因子和养殖期间获得的15种浮游植物优势种用于CCA分析(表6)。

在11个水质因子中,氨氮与轴1的相关性系数最高($r=0.57$),其次是pH($r=0.42$),亚硝氮与轴1呈负相关($r=-0.18$);活性磷与轴2的相关性最高($r=0.77$),其次是温度($r=0.36$),溶解氧、叶绿素a、总氮与轴2呈负相关($r=-0.54$ 、 -0.36 、 -0.35)(表7)。

pH(0.42)、 NO_2^- -N(-0.18)、TAN(0.57)、TP(0.27)、主要贡献于第一排序轴,浮游植物主要分布于第一排序轴左右;T(0.36)、Chl-a(-0.36)、 COD_{Mn} (-0.26)、DO(-0.54)、TN

表 5 凡纳滨对虾各养殖池塘浮游植物的优势种及优势度

Tab. 5 Phytoplankton dominant species and their corresponding dominance in the ponds of *L. vannamei*

	日期 date	门类 phylum	优势种 dominant species	优势度 Y	
第一批次 first season	4/1	硅藻门 Bacillariophyta	梅尼小环藻 <i>C. meneghiniana</i>	0.24	
		蓝藻门 Cyanophyta	微囊藻属未定种 <i>Microcystis</i> sp.	0.19	
	4/16	硅藻门 Bacillariophyta	梅尼小环藻 <i>C. meneghiniana</i>	0.37	
		绿藻门 Chlorophyta	椭圆小球藻 <i>C. ellipsoidea</i>	0.18	
		绿藻门 Chlorophyta	针形纤维藻 <i>A. acicularis</i>	0.04	
		绿藻门 Chlorophyta	四尾栅藻 <i>S. quadrecauda</i>	0.04	
		绿藻门 Chlorophyta	蹄形藻 <i>K. lunaris</i>	0.03	
	5/1	绿藻门 Chlorophyta	细丝藻 <i>U. tenerrima</i>	0.46	
		硅藻门 Bacillariophyta	梅尼小环藻 <i>C. meneghiniana</i>	0.15	
		绿藻门 Chlorophyta	椭圆小球藻 <i>C. ellipsoidea</i>	0.07	
		蓝藻门 Cyanophyta	细小平裂藻 <i>M. minima</i>	0.04	
		绿藻门 Chlorophyta	针形纤维藻 <i>A. acicularis</i>	0.03	
		5/16	蓝藻门 Cyanophyta	细小平裂藻 <i>M. minima</i>	0.43
			绿藻门 Chlorophyta	椭圆小球藻 <i>C. ellipsoidea</i>	0.20
	硅藻门 Bacillariophyta		梅尼小环藻 <i>C. meneghiniana</i>	0.08	
	绿藻门 Chlorophyta		丝藻属未定种 <i>Ulothrix</i> sp.	0.04	
	绿藻门 Chlorophyta		针形纤维藻 <i>A. acicularis</i>	0.03	
	5/31	蓝藻门 Cyanophyta	细小平裂藻 <i>M. minima</i>	0.76	
		绿藻门 Chlorophyta	椭圆小球藻 <i>C. ellipsoidea</i>	0.03	
	6/9	绿藻门 Chlorophyta	丝藻属未定种 <i>Ulothrix</i> sp.	0.16	
蓝藻门 Cyanophyta		细小平裂藻 <i>M. minima</i>	0.07		
绿藻门 Chlorophyta		椭圆小球藻 <i>C. ellipsoidea</i>	0.06		
硅藻门 Bacillariophyta		梅尼小环藻 <i>C. meneghiniana</i>	0.04		
绿藻门 Chlorophyta		针形纤维藻 <i>A. acicularis</i>	0.03		
绿藻门 Chlorophyta		四足十字藻 <i>C. tetrapedia</i>	0.02		
第二批次 second season		7/27	蓝藻门 Cyanophyta	大平裂藻 <i>M. major</i>	0.10
蓝藻门 Cyanophyta	铜绿微囊藻 <i>M. aeruginosa</i>		0.08		
	8/11	绿藻门 Chlorophyta	四尾栅藻 <i>S. quadrecauda</i>	0.05	
		绿藻门 Chlorophyta	丝藻属未定种 <i>Ulothrix</i> sp.	0.05	
		蓝藻门 Cyanophyta	小型色球藻 <i>C. minor</i>	0.03	
		蓝藻门 Cyanophyta	细小平裂藻 <i>M. minima</i>	0.24	
		绿藻门 Chlorophyta	椭圆小球藻 <i>C. ellipsoidea</i>	0.12	
		绿藻门 Chlorophyta	四尾栅藻 <i>S. quadrecauda</i>	0.12	
		硅藻门 Bacillariophyta	梅尼小环藻 <i>C. meneghiniana</i>	0.11	
	绿藻门 Chlorophyta	针形纤维藻 <i>A. acicularis</i>	0.06		

· 续表5 ·

日期 date	门类 phylum	优势种 dominant species	优势度 Y
	绿藻门 Chlorophyta	细丝藻 <i>U. tenerrima</i>	0.04
	绿藻门 Chlorophyta	被刺藻 <i>F. ovalis</i>	0.02
8/26	蓝藻门 Cyanophyta	微小平裂藻 <i>M. tenuissima</i>	0.18
	绿藻门 Chlorophyta	椭圆小球藻 <i>C. ellipsoidea</i>	0.12
	硅藻门 Bacillariophyta	小环藻属未定种 <i>Cyclotella</i> sp.	0.04
	蓝藻门 Cyanophyta	蛇形颤藻 <i>O. anguina</i>	0.03
	绿藻门 Chlorophyta	针形纤维藻 <i>A. acicularis</i>	0.03
	绿藻门 Chlorophyta	细丝藻 <i>U. tenerrima</i>	0.02
9/10	蓝藻门 Cyanophyta	优美平裂藻 <i>M. elegans</i>	0.24
	绿藻门 Chlorophyta	椭圆小球藻 <i>C. ellipsoidea</i>	0.04
	绿藻门 Chlorophyta	四尾栅藻 <i>S. quadrecauda</i>	0.03
9/25	蓝藻门 Cyanophyta	大平裂藻 <i>M. major</i>	0.25
	绿藻门 Chlorophyta	四尾栅藻 <i>S. quadrecauda</i>	0.08
	绿藻门 Chlorophyta	细丝藻 <i>U. tenerrima</i>	0.03
	绿藻门 Chlorophyta	针形纤维藻 <i>A. acicularis</i>	0.03

表 6 CCA分析中浮游植物的种类代码

Tab. 6 Phytoplankton species codes for redundancy analysis (CCA)

代码 code	种类 species	代码 code	种类 species
A1	被刺藻 <i>F. ovalis</i>	A9	椭圆小球藻 <i>C. ellipsoidea</i>
A2	大平裂藻 <i>M. major</i>	A10	微小平裂藻 <i>M. tenuissima</i>
A3	梅尼小环藻 <i>C. meneghiniana</i>	A11	细丝藻 <i>U. tenerrima</i>
A4	蛇形颤藻 <i>O. anguina</i>	A12	微小平裂藻 <i>M. minima</i>
A5	四尾栅藻 <i>S. quadrecauda</i>	A13	小型色球藻 <i>C. minor</i>
A6	四足十字藻 <i>C. tetrapedia</i>	A14	优美平裂藻 <i>M. elegans</i>
A7	蹄形藻 <i>K. lunaris</i>	A15	针形纤维藻 <i>A. acicularis</i>
A8	铜绿微囊藻 <i>M. aeruginosa</i>		

(-0.35)、AP(0.77)主要贡献于第二排序轴。A2(蓝藻门大平裂藻)与TP显著正相关, A8(蓝藻门铜绿微囊藻)、A13(蓝藻门小型色球藻)与AP显著正相关, A7(绿藻门蹄形藻)、A14(蓝藻门优美平裂藻)与TAN正相关, A1(绿藻门被刺藻)、A4(蓝藻门蛇形颤藻)与NO₃⁻-N正相关; A5(绿藻门四尾栅藻)与pH显著正相关, 与NO₂⁻-N负相关。A10(蓝藻门微小平裂藻)、A11(绿藻门细丝藻)、

A12(蓝藻门微小平裂藻)、A13(蓝藻门小型色球藻)、A15(绿藻门针形纤维藻)均与NO₂⁻-N显著正相关(图6)。

位于轴2左侧的浮游植物种类较密集, 说明它们之间的分布差异程度小, NO₂⁻-N对它们的影响较大。位于轴2右侧的浮游植物种类的距离较远, 说明它们之间的分布差异程度大, pH、AP、TP对于其影响较大(图6)。

3 讨论

3.1 浮游植物群落结构特征

凡纳滨对虾养殖期间共鉴定出浮游植物7个门、10个纲、20个目、30个科、59个属, 从种的数量上来看, 绿藻门>硅藻门>蓝藻门>裸藻门>黄藻门>金藻门>甲藻门, 李景等^[24]研究温棚高产养虾池中浮游植物群落中绿藻多为常见种, 张瑜斌等^[1]在研究高位虾池养殖过程中发现硅藻的种类较多, 而主养凡纳滨对虾的池塘浮游植物群落也以绿藻门的种类最多, 数量上则是蓝藻居多, 绿藻次之, 结合本研究结果发现, 与虾养殖池塘中浮游植物的常见种较为相近, 多为绿藻门和硅藻门; 从数量上看, 养殖初期以绿

表 7 水质因子与两个排序轴间的相关性系数

Tab. 7 Correlation coefficients of water quality factors and two axes of CCA

指标 factors	轴1 SP1	轴2 SP2	温度 T	溶解氧 DO	酸碱度 pH	高锰酸盐指数 COD _{Mn}	叶绿素a Chl-a	总磷 TP	活性磷 AP	总氮 TN	硝氮 NO ₃ ⁻ -N	亚硝氮 NO ₂ ⁻ -N	总氨氮 TAN	氮磷比 N:P
轴1 SP1	1.00													
轴2 SP2	-0.16	1.00												
温度 T	0.01	0.36	1.00											
溶解氧 DO	0.11	-0.54	-0.53	1.00										
酸碱度 pH	0.42	0.00	0.09	0.56	1.00									
高锰酸盐指数 COD _{Mn}	0.07	-0.26	-0.06	0.63	0.73	1.00								
叶绿素a Chl-a	0.01	-0.36	0.12	0.36	0.31	0.37	1.00							
总磷 TP	0.27	0.22	0.44	-0.17	0.40	0.14	0.50	1.00						
活性磷 AP	0.34	0.77	0.46	-0.57	0.16	-0.16	-0.41	0.31	1.00					
总氮 TN	0.14	-0.35	-0.16	0.29	0.09	0.06	0.71	0.42	-0.47	1.00				
硝氮 NO ₃ ⁻ -N	-0.09	-0.13	0.06	-0.17	-0.17	-0.30	0.12	0.18	-0.21	0.43	1.00			
亚硝氮 NO ₂ ⁻ -N	-0.18	0.00	-0.04	-0.40	-0.51	-0.70	0.10	0.20	-0.17	0.42	0.64	1.00		
总氨氮 TAN	0.57	-0.34	-0.42	0.27	0.01	-0.06	0.02	0.02	-0.21	0.55	0.10	0.06	1.00	
氮磷比 N:P	-0.05	-0.36	-0.42	0.30	-0.21	-0.07	0.23	-0.39	-0.50	0.58	0.24	0.22	0.44	1.00

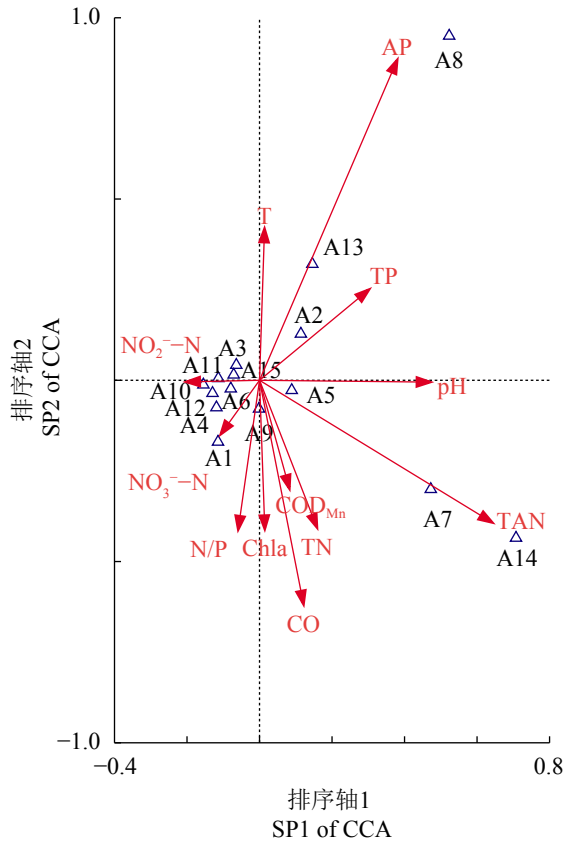


图 6 凡纳滨对虾各养殖池浮游植物与环境因子的 CCA排序图

Fig. 6 CCA ordination biplot of phytoplankton species and environmental variables in the ponds of *L. vannamei*

藻和硅藻为主, 这可能与该藻类适宜低营养盐生长有关, 养殖后期蓝藻门数量升高趋势明显。

养殖水体中浮游植物的多样性指数和均匀度指数越低, 藻类越为单一, 不利于养殖水环境的稳定, 对外来变化的缓冲能力较弱。有研究表明多样性指数越大, 物种群落结构越稳定, 对稳定养殖水环境的生态系统具有重要意义, 而多样性指数过低易导致对虾出现不同程度的病害^[11]。本实验养殖池塘的Shannon-Wiener多样性指数和Margalef多样性指数分别在1.26~3.85和0.62~2.18之间, 浮游植物生物多样性较好, 群落复杂程度较高, 稳定性较好。本研究共鉴别出优势种18种(含3个未定种)。第一批次共鉴定出10种(含1未定种)优势种, 第二批次共鉴定出14种(含2未定种)优势种, 绿藻门8种, 蓝藻门8种, 硅藻门2种, 优势度最高的是蓝藻门的细小平裂藻(0.76), 养殖初期优势种为硅藻门, 之后是绿藻门, 最终以蓝藻门为优势。

3.2 浮游植物与水质因子之间的关系

养殖池是一个相对较为封闭的生态系统, 水质因子的变化必然会影响到浮游植物群落结构及优势种的变化。不同的浮游植物有不同的最适生长环境^[25], 其种类、密度、多样性、优势种的演替与各种水质因子如温度、pH、溶解氧、

营养盐等有非常密切的关系^[26-27],也有一些研究表明,温度和营养盐的作用通常比其他因子更为重要^[28-34]。薄芳芳等^[35]的研究显示,影响硅藻生物量的主要环境因子为温度,而蓝藻、裸藻、绿藻则主要受氮磷营养盐浓度和溶解氧的影响。孟顺龙等^[36]研究表明氮主要影响绿藻,磷主要影响蓝藻。本研究中,通过对养殖池浮游植物优势种与水质因子进行典范对应分析发现,蓝藻门的大平裂藻与TP显著正相关,蓝藻门的铜绿微囊藻和小型色球藻与AP正相关,即蓝藻门主要受磷含量的影响;绿藻门的蹄形藻与TAN正相关,被刺藻、四足十字藻和椭圆小球藻与NO₃⁻-N正相关,细丝藻和针形纤维藻与NO₂⁻-N显著正相关,四尾栅藻与pH正相关,说明绿藻门主要受pH和无机氮的影响;硅藻门梅尼小环藻则与T显著正相关,即本研究发现的相关性结果与前人研究较为契合。

浮游植物的群落结构及其动态演替规律是多个因子在时间和空间序列上作用的结果,本研究发现绿藻门主要受pH、无机氮(包括总氮、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮)的影响,蓝藻门主要受磷含量(包括总磷和活性磷)的影响,硅藻门主要受温度的影响,所以在养殖过程中要格外关注温度、pH以及氮磷含量的变化。

感谢海峰养殖合作社徐平、张峰对采样和实验工作的支持!

参考文献:

- [1] Rodríguez S R, Regalado E M, Pérez J A C, *et al.* Comparison of some reproductive characteristics of farmed and wild white shrimp males *Litopenaeus vannamei* (Decapoda: Penaeidae)[J]. *Revista de Biología Tropical*, 2007, 55(1): 199-206.
- [2] 周井娟. 中国对虾养殖业发展轨迹及技术变迁[J]. *中国农学通报*, 2016, 32(8): 22-29.
Zhou J J. Development path and technological change of shrimp aquaculture in China[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(8): 22-29(in Chinese).
- [3] 黄永春, 艾华水, 殷志新, 等. 第四代凡纳滨对虾抗WSSV选育家系的抗病及免疫特性研究[J]. *水产学报*, 2010, 34(10): 1549-1558.
Huang Y C, Ai H S, Yin Z X, *et al.* Studies on WSSV-resistant and immune characteristics of the 4th generation selective breeding families for resistance to the white spot syndrome virus (WSSV) of *Litopenaeus vannamei*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2010, 34(10): 1549-1558(in Chinese).
- [4] 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[J]. *生态科学*, 2002, 21(4): 310-315.
Hu R, Lin Q Q, Duan S S, *et al.* Distribution of Chlorophyll-a and phosphorus in subtropical reservoirs, South China[J]. *Ecologic Science*, 2002, 21(4): 310-315(in Chinese).
- [5] 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: 11-58.
Huang Y Y. Pollution ecology of inland waters——principles and application[M]. Beijing: Science Press, 2001: 11-58(in Chinese).
- [6] Rott E, Cantonati M, Füreder L, *et al.* Benthic algae in high altitude streams of the Alps—a neglected component of the aquatic biota[J]. *Hydrobiologia*, 2006, 562(1): 195-216.
- [7] Sidik M J, Rashed-Un-Nabi M, Hoque M A. Distribution of phytoplankton community in relation to environmental parameters in cage culture area of Sepanggar Bay, Sabah, Malaysia[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, 80(2): 251-260.
- [8] 彭聪聪, 李卓佳, 曹煜成, 等. 凡纳滨对虾半集约化养殖池塘浮游微藻优势种变动规律及其对养殖环境的影响[J]. *海洋环境科学*, 2011, 30(2): 193-198.
Peng C C, Li Z J, Cao Y C, *et al.* Change of dominant species of planktonic microalgae in *Litopenaeus vannamei*'s semi-intensive culture ponds and its impact on the culture environment[J]. *Marine Environmental Science*, 2011, 30(2): 193-198(in Chinese).
- [9] 苏发文, 高鹏程, 来琦芳, 等. 铜绿微囊藻和小球藻对水环境pH的影响[J]. *中国水产科学*, 2016, 23(6): 1380-1388.
Su F W, Gao P C, Lai Q F, *et al.* Effects of *Microcystis aeruginosa* and *Chlorella pyrenoidosa* on water environment pH[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2016, 23(6): 1380-1388(in Chinese).
- [10] 米振琴, 谢骏, 潘德博, 等. 精养虾池浮游植物、理化因子与虾病的关系[J]. *上海水产大学学报*, 1999, 8(4): 304-308.
Mi Z Q, Xie J, Pan D B, *et al.* Relationship among the phytoplankton, physicochemical factors and shrimp dis-

- ease in intensive shrimp farming pond[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 1999, 8(4): 304-308(in Chinese).
- [11] 张瑜斌, 龚玉艳, 陈长平, 等. 高位虾池养殖过程浮游植物群落的演替[J]. 生态学杂志, 2009, 28(12): 2532-2540.
Zhang Y B, Gong Y Y, Chen C P, *et al.* Succession of phytoplankton community in exalted shrimp ponds during culture process[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(12): 2532-2540(in Chinese).
- [12] 王玉彬. 茅莲湖水产养殖池塘中浮游生物的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2007: 1-68.
Wang Y B. Studies on the plankton of Aquaculture Ponds in Maolian Lake[D]. Nanchang: Nanchang University, 2007: 1-68(in Chinese).
- [13] 张继民, 刘霜, 张琦, 等. 黄河口附近海域浮游植物种群变化[J]. 海洋环境科学, 2010, 29(6): 834-837.
Zhang J M, Liu S, Zhang Q, *et al.* Population variation of phytoplankton around Yellow River Estuary[J]. *Marine Environmental Science*, 2010, 29(6): 834-837(in Chinese).
- [14] 查广才, 周昌清, 黄建荣, 等. 凡纳对虾淡化养殖虾池微型浮游生物群落及多样性[J]. 生态学报, 2004, 24(8): 1748-1755.
Zha G C, Zhou C Q, Huang J R, *et al.* Studies on the structure and biodiversity of the microplankton community in *Litopenaeus vannamei* desalination culture ponds[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(8): 1748-1755(in Chinese).
- [15] 杨秀兰, 王爱敏, 薄学锋, 等. 浮游生物在盐碱地封闭式对虾养殖中的生态作用[J]. 齐鲁渔业, 2002(10): 5-8.
Yang X L, Wang A M, Bo X F, *et al.* The ecological function of plankton in the closed saline - alkali prawn pond[J]. Shandong Fisheries, 2002(10): 5-8(in Chinese).
- [16] 查广才, 麦雄伟, 周昌清, 等. 凡纳滨对虾低盐度养殖池浮游藻类群落研究[J]. 海洋水产研究, 2006, 27(1): 1-7.
Zha G C, Mai X W, Zhou C Q, *et al.* Study on the planktonic algae community in low salinity culture ponds of *Litopenaeus vannamei*[J]. Marine Fisheries Research, 2006, 27(1): 1-7(in Chinese).
- [17] 郝俊, 马旭洲, 王武, 等. 河蟹生态养殖池浮游植物功能类群的结构特征[J]. 湖泊科学, 2016, 28(5): 1047-1056.
Hao J, Ma X Z, Wang W, *et al.* Structure of phytoplankton functional groups in the ecological farming crab ponds[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(5): 1047-1056(in Chinese).
- [18] 郭永坚, 朱长波, 阴晓丽, 等. 凡纳滨对虾-鲮网围分隔混养池塘浮游植物群落结构特征的研究[J]. 南方水产科学, 2015, 11(1): 45-54.
Guo Y J, Zhu C B, Yin X L, *et al.* Characteristics of phytoplankton community in mesh enclosure isolated ponds with polyculture of *Litopenaeus vannamei* and *Mugil cephalus*[J]. *South China Fisheries Science*, 2015, 11(1): 45-54(in Chinese).
- [19] 孙濡泳. 动物生态学原理[M]. 第3版. 北京: 北京师范大学出版社, 2001: 6-587.
Sun R Y. Animal ecology principle[M]. 3rd ed. Beijing: Beijing Normal University Press, 2001: 6-587(in Chinese).
- [20] Paerl H W, Hall N S, Peierls B L, *et al.* Hydrologic variability and its control of phytoplankton community structure and function in two shallow, coastal, lagoonal ecosystems: The Neuse and New River Estuaries, North Carolina, USA[J]. Estuaries and Coasts, 2014, 37(1): 31-45.
- [21] 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[J]. 安全与环境学报, 2005, 5(2): 87-91.
Kuang Q J, Ma P M, Hu Z Y, *et al.* Study on the evaluation and treatment of lake eutrophication by means of algae biology[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2005, 5(2): 87-91(in Chinese).
- [22] 孟顺龙, 陈家长, 胡庚东, 等. 太湖蠡湖浮游植物群落特征及其对水质的评价[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(1): 30-36.
Meng S L, Chen J Z, Hu G D, *et al.* Phytoplankton community characteristics and its eco-assessment on water quality in Lihu Lake, Taihu Lake[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2010, 19(1): 30-36(in Chinese).
- [23] 孟顺龙, 徐跑, 李丹丹, 等. 团头鲂池塘工业化生态养殖系统中浮游植物群落结构分析[J]. 上海海洋大学学报, 2018, 27(1): 79-90.
Meng S L, Xu P, Li D D, *et al.* Community structure of phytoplankton in pond industrial eco-aquaculture system culturing *Megalobrama amblycephala*[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2018, 27(1): 79-90(in Chinese).

- [24] 李景, 陈昌福. 温棚高产养虾池中浮游植物群落与水化学因子特征[J]. *中国水产*, 2015(7): 72-76.
Li J, Chen C F. Characteristics of phytoplankton community and hydrochemical factors in high producing greenhouse ponds of shrimp[J]. *China Fisheries*, 2015(7): 72-76(in Chinese).
- [25] 秦雪, 徐宾铎, 杨晓改, 等. 黄河口及其邻近水域夏季浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. *水产学报*, 2016, 40(5): 711-720.
Qin X, Xu B D, Yang X G, *et al.* Phytoplankton community structure and its relationship with environmental variables in summer in the Yellow River Estuary and its adjacent waters[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2016, 40(5): 711-720(in Chinese).
- [26] 刘晓彤. 夏、秋季黄河口及其邻近海域浮游植物群落结构和粒级结构的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011: 1-82.
Liu X T. Studies on community structure and size-fractionated structure of phytoplankton in Yellow River Estuary and its adjacent area in summer and autumn[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011: 1-82(in Chinese).
- [27] McQuoid M R. Influence of salinity on seasonal germination of resting stages and composition of microplankton on the Swedish west coast[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2005, 289: 151-163.
- [28] 苏芝娟, 王玉珏, 董志军, 等. 调水调沙后黄河口邻近海域浮游植物群落响应特征[J]. *海洋学报*, 2015, 37(4): 62-75.
Su Z J, Wang Y J, Dong Z J, *et al.* Response of phytoplankton assemblages to the water-sediment regulation in the adjacent sea of the Yellow River mouth[J]. *Haiyang Xuebao*, 2015, 37(4): 62-75(in Chinese).
- [29] Erga S R, Ssebiyonga N, Hamre B, *et al.* Nutrients and phytoplankton biomass distribution and activity at the Barents Sea Polar Front during summer near Hopen and Storbanken[J]. *Journal of Marine Systems*, 2014, 130: 181-192.
- [30] Ellwood M J, Law C S, Hall J, *et al.* Relationships between nutrient stocks and inventories and phytoplankton physiological status along an oligotrophic meridional transect in the Tasman Sea[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2013, 72: 102-120.
- [31] 俞秋佳, 徐凤洁, 蒋跃, 等. 夏秋季苏州河浮游植物群落特征及其影响因子[J]. *生态与农村环境学报*, 2014, 30(4): 450-457.
Yu Q J, Xu F J, Jiang Y, *et al.* Characteristics of phytoplankton community in Suzhou River in summer and autumn and their affecting factors[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, 30(4): 450-457(in Chinese).
- [32] 李思阳, 韩志勇, 许振成, 等. 高州水库浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. *水生态学杂志*, 2013, 34(5): 16-24.
Li S Y, Han Z Y, Xu Z C, *et al.* Study on the structure of phytoplankton community and its relationships with environmental factors in gaozhou reservoir[J]. *Journal of Hydroecology*, 2013, 34(5): 16-24(in Chinese).
- [33] 曾艳艺, 黄翔鹤. 氮、磷、硅对条纹小环藻生长和叶绿素a含量的影响[J]. *广东海洋大学学报*, 2011, 31(4): 46-51.
Zeng Y Y, Huang X H. Effects of nitrate, phosphate and silicate on growth and chlorophyll-a content of *Cyclotella striata*[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2011, 31(4): 46-51(in Chinese).
- [34] 董娟, 李大平, 陶勇, 等. 氮磷胁迫下藻-菌群落的变化研究[J]. *环境科学与技术*, 2012, 35(12): 40-45, 55.
Dong J, Li D P, Tao Y, *et al.* Variation of algal-bacterial community under Nitrogen-Phosphorus stress[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 35(12): 40-45, 55(in Chinese).
- [35] 薄芳芳, 杨虹, 左倬, 等. 上海公园水体夏季浮游植物群落与环境因子的关系[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(7): 1259-1265.
Bo F F, Yang H, Zuo Z, *et al.* Relationship between phytoplankton community in summer and environmental factors in Shanghai park lakes[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(7): 1259-1265(in Chinese).
- [36] 孟顺龙, 裘丽萍, 胡庚东, 等. 氮磷比对两种蓝藻生长及竞争的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(7): 1438-1444.
Meng S L, Qiu L P, Hu G D, *et al.* Effect of nitrogen and phosphorus ratios on growth and competition of two blue-green algae[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(7): 1438-1444(in Chinese).

The relationship between phytoplankton community structure and water quality factors in the pond of *Litopenaeus vannamei*

WANG Xuna¹, JIANG Min^{1,2*}, ZHONG Rui³, MIAO Yiheng³,
WU Hanchang¹, YU Miaomiao¹, WU Dan¹

(1. College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education,
Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In order to study the correlations between the change of water quality and phytoplankton community structure during the process of *Litopenaeus vannamei* aquaculture, the water quality was tested and the changes of phytoplankton community structure were analyzed from April 2016 to September 2016 in an aquaculture farm in Fengxian District, Shanghai, and then the correlations between phytoplankton community structure and water quality factors were analyzed. The results showed that there were 7 phyla, 59 genera, 113 species (including 20 unnamed species), Chlorophyta>Bacillariophyta>Cyanophyta>Euglenophyta>Xanthophyta>Chrysophyta>Pyrrophyta, and 18 dominant species (including 3 unnamed species)—there were 10 dominant species (including 1 unnamed species) in the first season and 14 dominant species (including 2 unnamed species) in the second season. Dominant species were Bacillariophyta at beginning, then Chlorophyta and finally Cyanophyta. According to CCA analyzing, Chlorophyta is mainly affected by pH and nitrogen (including ammonia nitrogen, nitrate nitrogen, nitrite nitrogen), Cyanophyta by phosphorus (including total phosphorus and active phosphorus), and Bacillariophyta by temperature, so we should pay more attention to temperature, pH, nitrogen and phosphorus.

Key words: *Litopenaeus vannamei*; water quality; phytoplankton; canonical correspondence analysis

Corresponding author: JIANG Min. E-mail: mjjiang@shou.edu.cn

Funding projects: Shanghai Shrimp Industry Technology System Program [Agriculture Reserch System of Shanghai, China (2014-5)]; Shanghai Municipal Education Commission Peak Aquatic Disciplines; The Project of Shanghai Universities' Knowledge Service Platform (ZF1206)