

对虾高位池循环水养殖水体浮游植物生态特征研究

魏小岚^{1,2}, 李纯厚^{1*}, 颌晓勇¹, 陆琴燕^{1,3}, 戴明¹, 廖秀丽¹, 胡维安^{1,3}

(1.中国水产科学研究院南海水产研究所 农业部南海渔业资源开发利用重点实验室, 广州 510300; 2.暨南大学生命科学技术学院, 广州 510632; 3.上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306)

摘要:为了掌握对虾高位池循环水养殖过程中浮游植物的变动规律,有效管理水体环境质量,提高养殖效益,于2010年8月至11月,以凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)为实验对象,研究了循环水处理养殖系统的高位池养殖水体中浮游植物的群落结构及其动态变化,试验设计3种不同循环处理量组,即 $20\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ (P1组)、 $40\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ (P2组)和 $60\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ (P3组),探讨不同的循环水处理量和养殖模式对水体中浮游植物的生态特征影响。结果表明,从循环塘中共鉴定出浮游植物99种,隶属于5门49属,对照4号塘共鉴定出浮游植物108种,隶属于8门54属,种类最多的为绿藻门,占总数的39.8%,其次为硅藻门,占总数的21.1%,再次为裸藻门,占总数的16.3%,最后为蓝藻门,占总数的15.4%。循环塘的浮游植物优势种以绿藻和硅藻为主,而对照4号塘的浮游植物以蓝藻为优势种。循环塘和对照4号塘中浮游植物的密度分别为 $208.34\sim 998.8(\times 10^4\text{ ind}\cdot\text{L}^{-1})$ 、 $324.58\sim 1343.26(\times 10^4\text{ ind}\cdot\text{L}^{-1})$,其生物量分别为 $2.96\sim 10.19\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $3.59\sim 18.86\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。循环塘中浮游植物的密度和生物量低于对照4号塘,且存在极显著性差异($P<0.01$)。循环塘浮游植物Shannon-Wiener多样性指数在1.03~2.18之间波动,对照塘浮游植物多样性指数在1.01~1.56之间波动。

关键词:高位池;循环量;浮游植物;生态特征

中图分类号:X174 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2014)02-0392-12 **doi:**10.11654/jaes.2014.02.026

Ecological Characteristics of Phytoplankton in Higher-place Shrimp Ponds with Circulation

WEI Xiao-lan^{1,2}, LI Chun-hou^{1*}, XIE Xiao-yong¹, LU Qin-yan^{1,3}, DAI Ming¹, LIAO Xiu-li¹, HU Wei-an^{1,3}

(1.South China Sea Fisheries Research Institute, CAFS, Guangzhou, 510300, China; 2.Life science and Technology College of Jinan University, Guangzhou 510632, China; 3.College of Fisheries and Life Science Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Phytoplankton dynamics is critical to water quality and shrimp yield in higher-place shrimp ponds. A study was carried out to examine the community structure and dynamics of phytoplankton in higher-place ponds of *Litopenaeus vannamei* with water circulation system from August to November in 2010. The experiment included three different circulation treatments— $20\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ (Pond one), $40\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ (Pond two) and $60\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ (Pond three). Phytoplankton was found to mainly belong to 99 species, 49 genera, 5 phyla in the circulating ponds, and 108 species, 54 genera, 8 phyla in the control pond. Most of the species were the Chlorophyta, followed by Bacillariophyta and Euglenophyta, and last Cyanophyta, accounting for 39.8%, 21.1%, 16.3%, 15.4% of the total, respectively. The dominant species were Chlorophyta and Bacillariophyta in recirculation ponds, but Cyanobacterial in the control pond. Density and biomass of phytoplankton were very significantly lower in the recirculation system ($208.34\sim 998.8 \times 10^4\text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$ and $2.96\sim 10.19\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) than in the control pond ($324.58\sim 1343.26 \times 10^4\text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$ and $3.59\sim 18.86\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) ($P<0.01$). The Shannon-Wiener diversity indexes of phytoplankton were 1.03~2.18 and 1.01~1.56 for recirculating and control aquaculture pond, respectively.

Keywords: higher place pond; rates of recycling; phytoplankton; ecological characteristics

收稿日期:2013-06-30

基金项目:广东省海洋渔业科技推广专项项目(A200901G04, A201001H06);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2009TS16);农业部2011年农业生态环境保护财政项目;广东省科技计划项目(2011B031200001)

作者简介:魏小岚(1987—),男,四川仪陇人,博士研究生,从事水生生物学的研究。E-mail:weixiaolan1987@163.com

*通信作者:李纯厚 E-mail:scslch@vip.163.com

目前,高位池对虾养殖模式存在养殖设施化程度偏低、技术落后、成本高等缺陷。由于缺乏有效疾病防御技术体系,往往滥用抗生素影响成品质量。养殖生产过程中大排大放,可加速水域富营养化、导致水中溶氧量下降、水体恶臭,甚至改变底栖动物区系以及对其他水生生物产生毒性。因此,如何减少养殖对水域环境的污染,降低感染虾病风险,维持良好养殖环境,成为当今对虾高位池养殖发展所面临的重要问题^[1]。

鉴于此,从 2008 年起,中国水产科学研究院南海水产研究所及其科研团队,基于工程化循环水养殖理念,开发出高位池循环水养殖新模式,魏小岚等^[2]对对虾高位池循环水养殖水体悬浮物等环境因子的变化特征进行了研究,李纯厚等^[3]对对虾高位池循环水养殖效果进行了研究。迄今为止,有关文献对于其他养殖水体中浮游植物群落结构及其动态研究有所报道^[4-8],但关于高位池循环水养殖系统中浮游植物的群落生态特征研究尚未见报道。浮游植物是水域生态系统中重要的生产者,对维持对虾养殖水体生态系统中物质循环和能量流动起重要作用^[9]。浮游植物不仅可以作为养殖对虾直接或间接的优质天然饵料,而且能吸收营养盐,放出氧气,对改善水质有重要的调节作用,其种类组成和种群数量决定虾池环境的好坏,是虾池水体调控的主要对象^[4-6]。

故本文初步研究了不同循环水量的条件下,循环水养殖系统对浮游植物群落结构的影响,探讨不同的循环水量对浮游植物群落结构的变动规律,为管理好对虾高位池循环水养殖水质调节和提高对虾养殖效果提供理论指导,为推广应用高位池循环水养殖新模式提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验养殖生物选自广东环球水产有限公司培育的凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*),每 0.066 7 hm² 试验养殖水域投放试验虾苗数量为 10 万尾。

试验养殖饲料选用广东恒兴集团生产的凡纳滨对虾专用配合全价饲料,光合细菌、芽孢杆菌等试验辅助用品由中国水产科学研究院南海水产研究所科技服务公司独家提供。

1.2 实验方法

1.2.1 循环水养殖系统的构建

试验系统主要包括高位池、循环水处理系统、原水处理系统、海水调配系统、供氧系统、反清洗系统、污水回收处理系统等,试验养殖池塘水通过不同循环量泵抽取提到循环水处理装置,进行处理净化后,再流入池塘循环利用,构建“循环水养殖系统(Recirculating aquaculture system, RAS)”。

1.2.2 试验设计

试验的虾苗由深圳环球虾苗厂提供一代虾苗,平均体长(0.6±0.1)cm,每 0.066 7 hm² 投放虾苗 10 万尾,于 2010 年 8 月 25 日放养到各试验虾塘,开始养殖试验。其高位池塘基本参数见表 1,循环水处理量设置 3 个梯度(P1、P2、P3),并设 1 个对照池(P4)。根据系统运行工况,实验分为 4 个时期:第 1 时期,9 月 1 日—10 月 1 日,循环水处理系统不运行;第 2 时期 10 月 1 日—10 月 20 日,系统每天运行 8 h;第 3 时期 10 月 20 日—11 月 1 日,系统每天运行 16 h,第 4 时期,11 月 1 日—11 月 14 日,系统每天运行 24 h。

1.2.3 养殖管理

养殖管理的详细内容同文献[1,3]。

1.2.4 水质指标的采样与测定方法

检测试验养殖水体营养盐相关指标:亚硝酸氮(NO₂-N)、氨氮(NH₄⁺-N)、硝酸氮(NO₃-N)、活性磷酸盐(PO₄³⁻-P)。检测手段均按照《海洋监测规范》(GB 17378.4—2007)的方法进行。

1.2.5 采样的时间及地点

第 1 时期,9 月 1 日—10 月 1 日,采样 2 次,大约每半个月一次,试验循环水养殖系统于 2011 年 10 月 1 日开始进行,待该系统稳定运行(大约 5~6 h),立即开始采样,大约每隔 7 d 一次,总共 6 次。每个高位

表 1 试验高位池概况

Table 1 Summary of the experimental higher place ponds

项目 Items	P4 池 Pond four	P1 池 Pond one	P2 池 Pond two	P3 池 Pond three
池塘面积 Pond area/hm ²	0.066 7	0.066 7	0.066 7	0.066 7
平均水深 Average depth/m	1.6	1.6	1.6	1.6
循环量 Circulation/m ³ ·h ⁻¹	0	20	40	60
池塘底质 Bottom	水泥地膜 Bottom of cement mulch	水泥地膜 Bottom of cement mulch	水泥地膜 Bottom of cement mulch	水泥地膜 Bottom of cement mulch

池设立5个采样点(虾池四角及中央),用柱状采水器在池塘四角及中央各定量采集水样2 L,混合待用。一般于上午8:30开始进行,对循环塘与对照塘同时进行采样。

1.2.6 样品采集

1.2.6.1 定性采样

浮游植物的定性样品用25#浮游生物网(网目孔径为64 μm)过滤,从表层到深处以大约25 cm·s⁻¹的速度作“∞”形缓慢的循环往复式拖动,其时间大概为2.5 min,将样品转移到100 mL的白色聚乙烯瓶中,加5%福尔马林液固定。

1.2.6.2 定量采样

浮游植物定量采样使用2 L采水器在池塘水体取1 L,采用鲁哥氏液进行固定。

1.2.7 鉴定与分析

浮游植物的定性样品的鉴定按照文献[10]和[11]的方法进行。将浮游植物定量样品静置48 h,用虹吸法小心吸取上清液,反复多次操作,直到浓缩至100 mL的体积,使用甲醛保存。

样品分析时,将保存好的样本先充分摇匀后,迅速用0.1 mL移液枪吸取均匀样品0.1 mL注入到0.1 mL计算框内,在10×40倍视野下采用目镜视野法计数,每个样本重复计数两次,误差小于15%为有效计数,每次计数的个数为300~500个,其中小型个体和大型个体的种类分别计数,以减小实验误差,最后,用细胞体积法推算出浮游植物的生物量。

1.2.8 数据处理与分析

浮游植物种类相似性指数(Jaccard 指数):

$$J_c = c / (a + b - c) \times 100\%$$

式中: a 、 b 分别为两群落出现的种数; c 为两群落的共有种数。

浮游植物多样性指数的计算采用Shannon-Wiener多样性指数,即: $H' = -\sum P_i \ln P_i$

式中: H' 为浮游植物的多样性指数; s 为浮游植物的种数; P_i 为第 i 种浮游植物在其总数中的相对数量。

统计试验数据利用SPSS17.0软件进行单因子方差(ANOVA)和LSD多重比较分析处理,以 $P < 0.05$ 作为显著差异水平,以 $P < 0.01$ 作为极显著差异水平。

2 结果与分析

2.1 循环量对各试验池水体理化指标的影响

各池亚硝氮盐差值较大,对照池与各循环池间差异显著(表2)。氨氮含量表现为试验池P2、P3含量较低,平均值为0.25 mg·L⁻¹左右,P1池含量稍高,在0.37 mg·L⁻¹左右,均显著低于对照池0.48 mg·L⁻¹的水平,且差异显著。各池硝氮水平接近,平均值都维持在1 mg·L⁻¹左右,彼此之间无显著差异。活性磷酸盐除P3池含量为0.13 mg·L⁻¹,显著低于其余各池外,其余各池含量接近,均维持在0.23 mg·L⁻¹左右。

2.2 循环量对浮游植物种类组成的影响

经鉴定,试验虾池浮游植物种属较多,4个塘共检出浮游植物123种,主要由蓝藻门、绿藻门、硅藻门、裸藻门、隐藻门、甲藻门、金藻门及黄藻门的八大藻门所组成。蓝藻门19种,绿藻门49种,硅藻门26种,裸藻门20种,隐藻门3种,甲藻门3种,金藻门1种及黄藻门2种,结果见表3。种类最多的为绿藻门,占总数的39.8%,其次为硅藻门,占总数的21.1%,再次为裸藻门,占总数的16.3%,最后为蓝藻门,占总数的15.4%。绿藻、硅藻和蓝藻多为常见种和优势种,裸藻和隐藻的种类多为常见种和少见种,少数种类有时也可成为优势种,甲藻、金藻及黄藻均为少见种。从鉴定的结果来看,循环水养殖系统的循环量大小对各试验塘浮游植物的种类均有一定的影响,各循环塘中浮游植物种类组成多以绿藻和硅藻为常见种和优势种,并存在相互交织的现象。对照4号塘的种类最多,以蓝藻和绿藻为种类组成,优势种以蓝藻为主,随循环

表2 各塘水体营养盐含量
Table 2 Nutrients in the ponds

理化因子 Physical and chemical factors	对照池 Control pond	P1池 Pond one	P2池 Pond two	P3池 Pond three
NO ₃ ⁻ /mg·L ⁻¹	0.130±0.06A	0.109±0.04B	0.105±0.05B	0.063±0.02C
NH ₄ ⁺ /mg·L ⁻¹	0.478±0.20A	0.375±0.16B	0.284±0.08C	0.215±0.07C
NO ₂ ⁻ /mg·L ⁻¹	1.063±0.16a	0.986±0.17b	0.980±0.16b	0.973±0.15b
PO ₄ ³⁻ /mg·L ⁻¹	0.251±0.10A	0.189±0.10B	0.176±0.10B	0.132±0.11C

注:表中同列数据后小写英文字母不同者表示差异显著($P < 0.05$),大写字母不同者表示差异极显著($P < 0.01$)。

Note: In the same column of table, values with the different small letters mean to significant difference ($P < 0.05$), while with different capital letters mean extremely significant difference ($P < 0.01$).

表 3 不同循环量下浮游植物的种类组成及丰富度分布

Table 3 Species and abundance of phytoplankton in ponds with different circulation rates

门 Phylum	种类组成 Species	丰富度 Abundance			
		1#Pond 1	2#Pond 2	3#Pond 3	4#Pond 4
蓝藻门 Cyanophyta	铜绿微囊藻 <i>M. aeruginosa</i>	+			++ +++
	边缘微囊藻 <i>M. marginata</i>				++
	微小微囊藻 <i>M. minutissima</i>	++	+	+	++
	小双色藻 <i>C. parvum</i>				++
	点形平裂藻 <i>M. punctata</i>	+	+	+	+
	细小平裂藻 <i>M. minima</i>	+	+		++
	钝顶螺旋藻 <i>Sp. platensis</i>	++	+	+	++ +++
	为首螺旋藻 <i>Sp. princeps</i>				+
	绿色颤藻 <i>O. chlorine</i>	++ +++	++	+	++ +++
	蛇性颤藻 <i>O. anguina</i>	++	+	+	++
	爬行颤藻 <i>O. animalis</i>				++
	纳氏腔球藻 <i>C. naegelianum</i>				++ +++
	针状蓝纤维藻 <i>D. aciculari</i>	++ +++	+	+	++
	弯曲尖头藻 <i>R. curvata</i>				++
	粘连色球藻 <i>Ch. cohaerens</i>	+	+		++
	惠氏色球藻 <i>Ch. westii</i>				+
	石栖色球藻 <i>Ch. lithophilus</i>	++	++	++	++
	多变鱼腥藻 <i>A. variabilis</i>				++
	可疑聚球藻 <i>S. ambiguus</i>	+	+	+	+
绿藻门 Chlorophyta	华美十字藻 <i>Cr. Lauterbornii</i>	++	++	+	++
	顶锥十字藻 <i>Cr. apiculata</i>				+
	镰形纤维藻 <i>A. falcatus</i>	+	++	++	+
	粗壮纤维藻 <i>A. bibraianus</i>	+	+	+	++
	四角盘星藻 <i>P. tetras</i>	++	++	+	++ +++
	二角盘星藻 <i>P. duplex</i>				++
	短棘盘星藻 <i>P. boryanum</i>	+	+	+	++
	双射盘星藻 <i>P. biradiatum</i>	+	++		+
	弓形藻 <i>S. setigera</i>	++		+	++
	新月并联藻 <i>Q. closterioides</i>	++	++	++	
	颗粒角星鼓藻 <i>S. punctulatum</i>	+	++	++	+
	肥壮蹄形藻 <i>K. obesa</i>	++	+		++
	深叶四片藻 <i>Tet. incisa</i>	++	++	++	+
	双对栅藻 <i>Sc. bijngatus</i>	++	++ +++	+	++
	四尾栅藻 <i>Sc. quadricauda</i>	++	++	++	+
	龙骨栅藻 <i>Sc. carinatus</i>	+	++	++	
	二形栅藻 <i>Sc. dimorphus</i>	+	++	++	++
	奥波莱栅藻 <i>Sc. opoliensis</i>	++	++	+	++
	斜生栅藻 <i>Sc. obliquus</i>	++	+	+	++ +++
	小球藻 <i>C. vulgaris</i>	+	++	++ +++	+
	蛋白核小球藻 <i>C. pyrenoidosa</i>	++ +++	++	++	++
	埃氏小球藻 <i>C. enversonii</i>	++	++	++	+
	椭圆小球藻 <i>C. ellipsoidea</i>	++	++	++	+
	球衣藻 <i>C. globosa</i>	++	++	+	++
	多粒衣藻 <i>C. multigranulis</i>	++	++	++	
	基片衣藻 <i>C. basimaculata</i>	++	++	+	++

续表 3 不同循环量下浮游植物的种类组成及丰富度分布

Continuing table 3 Species and abundance of phytoplankton in ponds with different circulation rates

硅藻门 Bacillariophyta	简单衣藻 <i>C. simplex</i>	++	++ +++	++	++
	肾形衣藻 <i>C. nephriodea</i>	++	++	++	++
	三叶衣藻 <i>C. isabeliensis</i>	++	+	+	++
	退化拟衣藻 <i>C. depauperata</i>	++ +++	++	++	
	椭圆卵囊藻 <i>O. elliptica</i>	++	++	+	
	波吉卵囊藻 <i>O. borgei</i>	++	+	+	++
	单身卵囊藻 <i>O. solitaria</i>	++	++	++	++
	水生卵囊藻 <i>O. submarina</i>	++	++	++	++
	钝角四角藻 <i>T. muticum</i>	+	++	++	+
	具尾四角藻 <i>T. caudatum</i>	++	++	++	
	细小四角藻 <i>T. minimum</i>	++	++	+	++
	端尖月芽藻 <i>Se. westii</i>	++	++	++	++
	小形月芽藻 <i>Se. minutum</i>	++	+	+	++
	长绿梭藻 <i>Ch. Elongatum</i>	+	++	++	
	华美绿梭藻 <i>Ch. Elegans</i>	++	++	++	+
	中华叶衣藻 <i>L. sinensis</i>	++	++	++	++
	平滑四星藻 <i>Te. glabrum</i>	++	++	++	
	孔纹四星藻 <i>Te. Punctatum</i>	++	++	+	++
	淡绿肾片藻 <i>N. olivacea</i>	++	++	++	++
	锥形胶囊藻 <i>G. planctonica</i>	+	++	++	+
	泡状胶囊藻 <i>G. vesiculosa</i>	++	++	+	++
	直立小桩藻 <i>Cha. strictum</i>	++	+	+	++
	河生集星藻 <i>Ac. fluviatile</i>	++	++	++	++
	梅尼小环藻 <i>C. Meneghiniana</i>	++	+	++	+
	眼斑小环藻 <i>C. ocellata</i>	++	++	++	+
	具星小环藻 <i>C. stelligera</i>		++	++	++
	放射舟形藻 <i>Na. radiosa</i>	++	++	++	+
	头端舟形藻 <i>Na. capitata</i>	++	+	+	++
	卡里舟形藻 <i>Na. cari</i>	++	++	++	+
	细长舟形藻 <i>Na. gracilis</i>	+	+	+	++
	微型舟形藻 <i>Na. minima</i>	+	++ +++	++ +++	+
	钝舟形藻 <i>Na. mutica</i>	++	+	++	++
	线形舟形藻 <i>Na. graciloides</i>	+	++	++	+
	披针形舟形藻 <i>Na. lanceolata</i>				++
	纤细羽纹藻 <i>P. gracillima</i>	+	++	++	
	间断羽纹藻 <i>P. interrupta</i>	+	+	++	+
	相等桥弯藻 <i>Cy. aequalis</i>	+++	+	++	+
	两头桥弯藻 <i>Cy. amphicephala</i>	++	++	++	+
	优美桥弯藻 <i>Cy. delicatula</i>	++	++	++ +++	++ +++
	新月形桥弯藻 <i>Cy. cymbiformis</i>	++	++ +++	++	++
	短纹异极藻 <i>G. abbreviatum</i>	+	++	++	+
	海德曲壳藻 <i>A. heideni</i>	++	+	+	
	光亮窗纹藻 <i>E. argus</i>	++	++	++	+
	钝端窗纹藻 <i>E. hyndmanii</i>	+	+	+	++
	谷皮菱形藻 <i>Ni. Palea</i>	+	++	++	+
	线形菱形藻 <i>Ni. linearis</i>	++	++	+	+
	端毛双菱藻 <i>S. capronii</i>	+	+	++	+
	螺旋双菱藻 <i>S. spiralis</i>	+	+	++	+

续表 3 不同循环量下浮游植物的种类组成及丰富度分布
Continuing table 3 Species and abundance of phytoplankton in ponds with different circulation rates

裸藻门 Euglenophyta	三角袋鞭藻 <i>P. trichophorum</i>	+	++	++	+
	弯曲袋鞭藻 <i>P. deflexum</i>				++
	盘形异丝藻 <i>H. discomorphum</i>	++	++	++	+
	圆口壶藻 <i>U. cyclostomus</i>	++	++	++	+
	广卵异鞭藻 <i>A. prosgeobium</i>				+
	三棱鞭胞藻 <i>Pe. steinii</i>	++	++	++	
	变异多形藻 <i>D. proteus</i>				++
	易变裸藻 <i>E. mutabilis</i>	++	++	+	+
	囊形柄裸藻 <i>C. vesiculosum</i>	++	++	+	+
	树状柄裸藻 <i>C. arbuscula</i>				++
	扁圆囊裸藻 <i>T. curta</i>	++	++	++	+
	暗绿囊裸藻 <i>T. euchlora</i>	+	++	+	++
	西刺囊裸藻 <i>T. klebsii</i>				++
	华丽囊裸藻 <i>T. superba</i>	++	++ +++	++ +++	+
	长梭囊裸藻 <i>T. nodsoni</i>	++	++	++	+
	伪编织鳞孔藻 <i>L. pseudotexta</i>				++
	卵形鳞孔藻 <i>L. ovum</i>	+	+	+	++
	编织鳞孔藻 <i>L. texta</i>		++	+	
	圆柱扁裸藻 <i>P. cylindrus</i>				+
	爪形扁裸藻 <i>P. onyx</i>	++	++	+	+
隐藻门 Cryptophyta	具尾蓝隐藻 <i>C. caudata</i>	+	++	++	
	卵形隐藻 <i>C. ovata</i>	+++	++	+++	+
	嗜蚀隐藻 <i>C. erosa</i>	++	++	++	
甲藻门 Dinophyta	真裸甲藻 <i>G. eucyaneum</i>				++
	二角多甲藻 <i>P. bipes</i>				+
	威氏多甲藻 <i>P. willei</i>				++
金藻门 Chrysophyceae	椭圆附钟藻 <i>E. utriculus</i>				+
黄藻门 Xanthophyta	膝口藻 <i>G. semen</i>				++
	扁形膝口藻 <i>G. depressum</i>				+

注:“+”少见种 Rare species;“++”常见种 Common species;“+++”优势种 Dominant species。

表 4 不同试验时期各池塘浮游植物种类相似性指数
Table 4 Species similarity index of phytoplankton in ponds during different experimental periods

时期 Phase	指数 Index	塘号 Number of each pond					
		P1/P2	P1/P3	P1/P4	P2/P3	P2/P4	P3/P4
第 1 时期 Phase one	种类数 Species number	66/71	66/73	66/64	71/73	71/64	73/64
	共有种数 Same species number	62	63	59	67	61	60
	Jaccard 指数 Jaccard index/%	85.7	82.9	83.1	87	82.4	77.9
第 2 时期 Phase two	种类数 Species number	62/58	62/53	62/69	58/53	58/69	53/69
	共有种数 Same species number	56	51	53	49	47	46
	Jaccard 指数 Jaccard index/%	87.5	79.7	67.9	79	58.8	60.5
第 3 时期 Phase three	种类数 Species number	59/52	59/48	59/72	52/48	52/72	48/72
	共有种数 Same species number	46	41	48	47	42	40
	Jaccard 指数 Jaccard index/%	70.8	62.1	57.8	88.7	51.2	50
第 4 时期 Phase four	种类数 Species number	53/45	53/41	53/76	45/41	45/76	41/76
	共有种数 Same species number	39	36	38	37	34	31
	Jaccard 指数 Jaccard index/%	66.1	62	41.8	75.5	39.1	36

处理量的增加,种类数(常见种、优势种)呈现递减的现象,P3 池的种类最少。

如表 4 所示,在第 1 时期,各试验池塘,指数在 77.9%~87%之间变化,种类相似性高,但从养殖第 2 时期起,循环塘的指数范围为 62%~88.7%,而对照 4 号塘的指数范围为 36%~67.9%。总体上来看,对照 4 号塘的相似指数明显低于循环塘,说明对照 4 号塘与循环塘种类组成存在差异,表明该循环水养殖系统能够改变池塘浮游植物种类组成。

2.3 循环量对浮游植物优势种的影响

根据各塘浮游植物在群落出现的丰富度和对总生物量的贡献程度,确定各塘的优势种^[12](表 5)。

如图 1 所示,1 号虾池浮游植物优势种为绿色颤藻、针状蓝纤维藻、蛋白核小球藻、卵形隐藻、退化拟衣藻、相等桥弯藻。优势种越少,其优势度越高,作为优势种,蛋白核小球藻主要出现在整个试验养殖时期。绿色颤藻、针状蓝纤维藻的优势度相对较高,但生物量少,而卵形隐藻、退化拟衣藻、相等桥弯藻的生物

表 5 各虾池浮游植物优势种组成
Table 5 Composition of dominant phytoplankton species in shrimp ponds

1 号虾池 Pond1	2 号虾池 Pond2	3 号虾池 Pond3	4 号虾池 Pond4
绿色颤藻 <i>O. chlorine</i>	双对栅藻 <i>Sc. Bijngatus</i>	简单衣藻 <i>C. simplex</i>	纳氏腔球藻 <i>C. naegelianum</i>
针状蓝纤维藻 <i>D. aciculari</i>	简单衣藻 <i>C. simplex</i>	优美桥弯藻 <i>Cy. Delicatula</i>	铜绿微囊藻 <i>M. aeruginosa</i>
蛋白核小球藻 <i>C. pyrenoidosa</i>	微型舟形藻 <i>Na.minima</i>	微型舟形藻 <i>Na.minima</i>	绿色颤藻 <i>O. chlorine</i>
卵形隐藻 <i>C. ovata</i>	新月形桥弯藻 <i>Cy. cymbiformis</i>	华丽囊裸藻 <i>T. superba</i>	钝顶螺旋藻 <i>Sp. platensis</i>
相等桥弯藻 <i>Cy. Aequalis</i>	华丽囊裸藻 <i>T. superba</i>	卵形隐藻 <i>C. ovata</i>	四角盘星藻 <i>P. tetras</i>
退化拟衣藻 <i>C. depauperata</i>		小球藻 <i>C. vulgaris</i>	优美桥弯藻 <i>Cy. Delicatula</i>
			斜生栅藻 <i>Sc. obliquus</i>

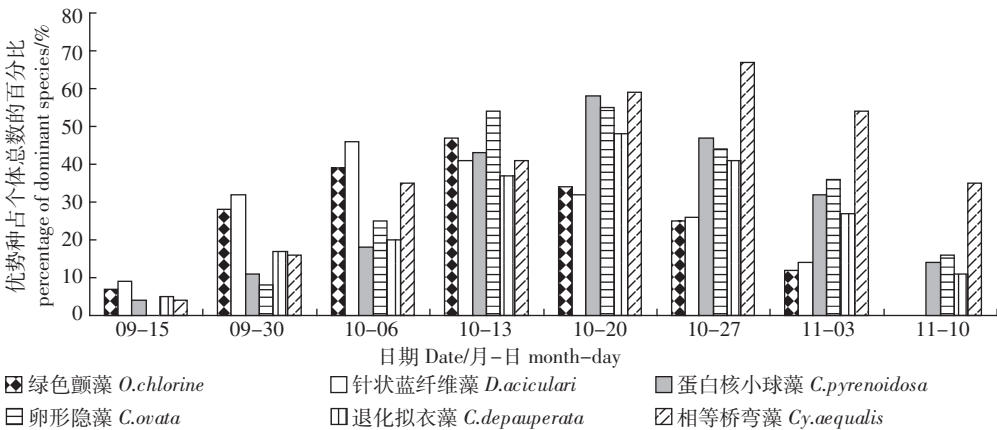


图 1 1 号塘浮游植物优势种的动态演替

Figure 1 Dynamic succession of dominant species of phytoplankton in the pond one

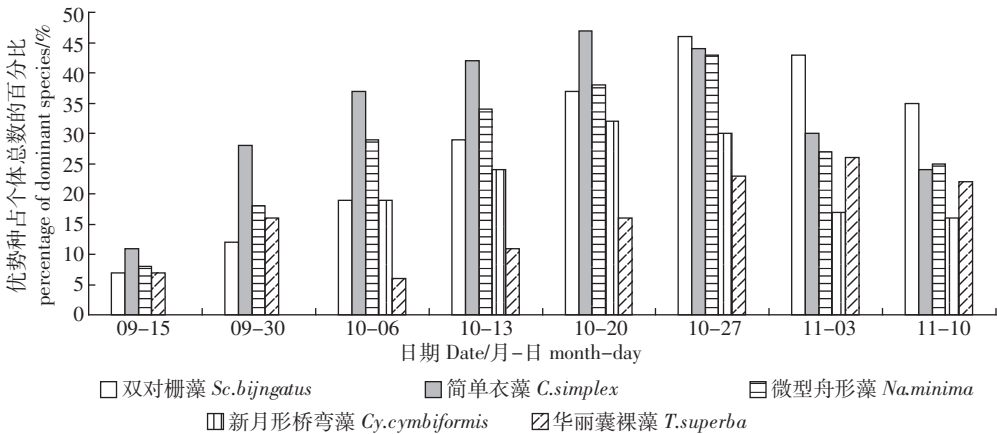


图 2 2 号塘浮游植物优势种的动态演替

Figure 2 Dynamic succession of dominant species of phytoplankton in the pond two

量多,尽管其优势度有时并不太高,但对维持养殖环境的稳定性起主要作用。

如图2所示,2号虾池浮游植物优势种为双对栅藻、简单衣藻、微型舟形藻、新月形桥弯藻、华丽囊裸藻。试验第1时期,优势种少,以简单衣藻、微型舟形藻为主,优势度高,从试验第2时期起,随优势种增多,优势度降低,以双对栅藻、简单衣藻、微型舟形藻、新月形桥弯藻为主。简单衣藻在试验中期一直维持较强的优势地位,试验结束之前,优势种以双对栅藻为主。

如图3所示,3号虾池浮游植物优势种组成以简单衣藻、小球藻、微型舟形藻、优美桥弯藻、华丽囊裸藻、卵形隐藻为主体,在试验第1时期,华丽囊裸藻和卵形隐藻形成共优势种,并伴随有一定小部分数量的绿藻门和硅藻门种类出现的状况。养殖中期,简单衣藻和微型舟形藻取代其地位成为优势种,简单衣藻在试验中后期一直维持较强的优势地位。

如图4所示,4号虾池浮游植物优势种为纳氏腔球藻、钝顶螺旋藻、绿色颤藻、铜绿微囊藻、四角盘星藻、优美桥弯藻、斜生栅藻。试验第1时期四角盘星藻、优美桥弯藻、斜生栅藻为优势种,但中后期纳氏腔球藻、钝顶螺旋藻、绿色颤藻、铜绿微囊藻在该养殖水体中逐渐占有绝对优势,尤其是铜绿微囊藻,其种群相当不稳定,形成蓝藻的富营养化现象。

从观测浮游植物优势种的动态演替过程来看,浮游植物的优势种在不同循环量的养殖池塘和不同的养殖时间都有所变化。

2.4 循环量对浮游植物现存量的影响

如图5、图6所示,循环塘和对照塘中浮游植物的密度分别为:208.34~998.83($\times 10^4 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$);324.58~1343.26($\times 10^4 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$),其生物量分别为2.96~10.19 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$;3.59~18.86 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。由此可知,循环塘中浮游植物的密度和生物量低于对照塘,并存在极显著差异($P < 0.01$)见表2、表6、表7。综合分析表明,随试验周

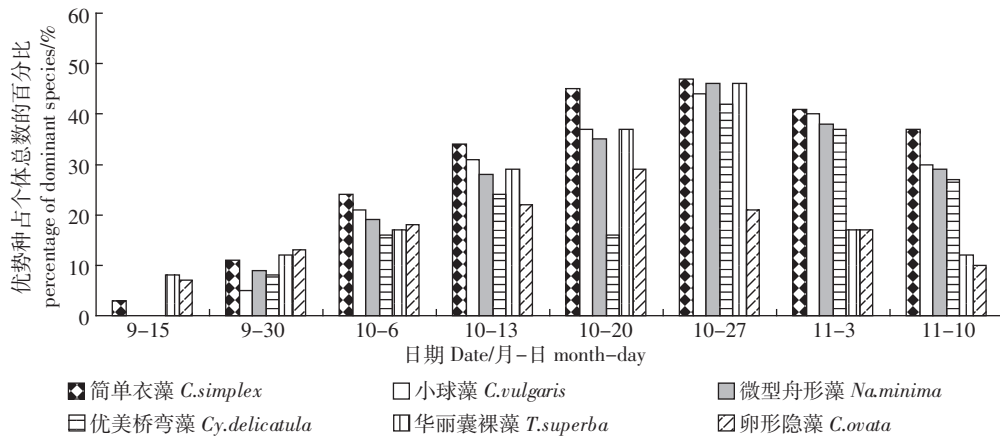


图3 3号塘浮游植物优势种的动态演替

Figure 3 Dynamic succession of dominant species of phytoplankton in the pond three

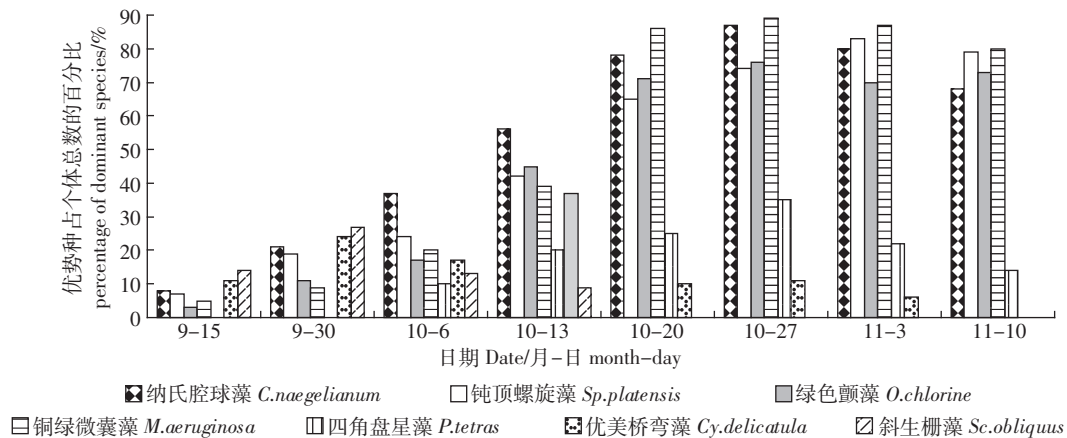


图4 4号塘浮游植物优势种的动态演替

Figure 4 Dynamic succession of dominant species of phytoplankton in the pond four

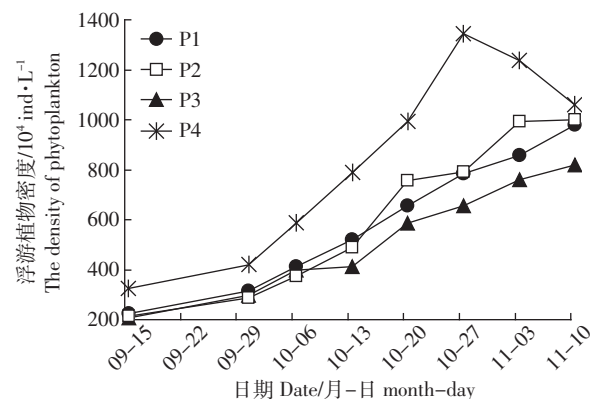


图 5 各塘水体浮游植物密度的变化情况

Figure 5 Variation of phytoplankton density in experimental ponds

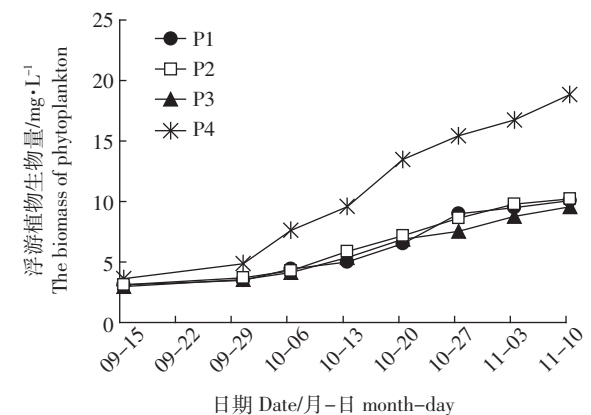


图 6 各塘水体浮游植物生物量的变化情况

Figure 6 Variation of phytoplankton biomass in experimental ponds

期的变化,浮游植物密度和生物量的高低程度与磷显著相关。活性磷酸盐在试验前期(第 1 时期)相对较低,这与水中浮游植物大量繁殖,消耗水中的活性磷酸盐有一定的关系。到试验中期(第 2、3 时期),随循

环水养殖系统的开启和运行稳定,对照塘的活性磷酸盐逐渐上升,对照塘的浮游植物现存量就日趋大增,而循环塘的浮游植物现存量日趋平稳递增,满足养殖水体所需。当对照塘中的活性磷酸盐在试验后期(第 4 时期)时,含量呈逐渐上升现象,并达到高峰值。这与养殖试验水体处于相对静止状态,并且没有对水体进行处理净化有关系,这促使对照塘水体中浮游植物的现存量达到顶峰。重复测量结果表明,P3 与其他循环塘组的密度存在显著差异,循环塘组与对照塘 P4 浮游植物的密度和生物量随试验周期变化存在差异极显著的波动($P<0.01$),见表 6、表 7。

2.5 循环量对浮游植物多样性指数的影响

物种多样性是度量群落中种类组成稳定程度以及数量分布均匀程度的指标,因而,多样性指数常被用来评价池塘生物种类组成的多样性水平。养殖水体

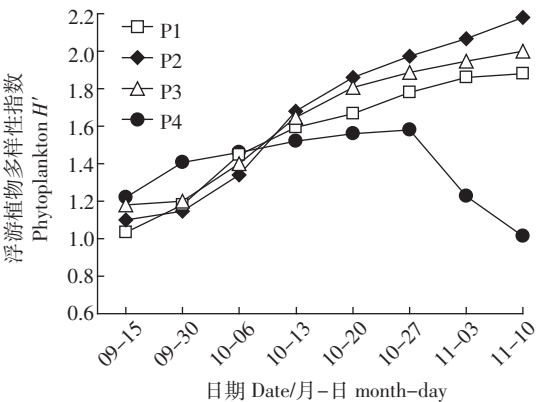


图 7 各塘水体浮游植物多样性指数的变化情况

Figure 7 Variation of diversity indices of phytoplankton in experimental ponds

表 6 各时期各塘浮游植物密度的平均含量($\times 10^4 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$)
Table 6 Mean density of phytoplankton at different phases($\times 10^4 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$)

池塘 Pond	第 1 时期 Phase one	第 2 时期 Phase two	第 3 时期 Phase three	第 4 时期 Phase four
0 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (P4)	371.57±85.74A	793.26±124.63A	1343.26±182.28A	1146.96±165.78A
20 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (P1)	270.24±67.25B	529.29±98.45B	784.19±123.30B	917.11±142.49B
40 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (P2)	250.18±66.42B	538.48±102.31B	791.42±124.76B	995.17±149.66B
60 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (P3)	252.85±66.53B	465.76±94.18C	654.18±112.62C	788.36±123.94C

注:表中同列不同大写字母表示极显著性差异($P<0.01$)。下同。
Note: Different uppercase letters express significant difference in the same column($P<0.01$).

表 7 各时期各塘浮游植物生物量的平均含量($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
Table 7 Mean biomass of phytoplankton at different phases($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

池塘 Pond	第 1 时期 Phase one	第 2 时期 Phase two	第 3 时期 Phase three	第 4 时期 Phase four
0 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (P4)	4.24±0.85A	9.29±1.76A	14.38±2.45A	16.41±2.87A
20 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (P1)	2.43±0.52B	5.32±1.03B	8.11±1.52B	8.29±1.58B
40 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (P2)	2.44±0.53B	5.26±1.02B	8.07±1.50B	8.34±1.63B
60 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (P3)	2.57±0.57B	5.35±1.04B	6.85±1.20B	7.53±1.42B

环境好,浮游植物种类多,多样性高;养殖环境差,浮游植物种类少,多样性低。

试验循环水养殖系统从第2时期开始运行,系统运行稳定之后,采集6次样品。如图7所示,循环塘浮游植物多样性指数在1.03~2.18之间波动,从试验第2时期的中旬,循环塘浮游植物多样性指数显著高于对照4号塘,说明循环水养殖系统能够调节群落生态特征,水域生态环境更稳定,有利于对虾养殖。对照塘浮游植物多样性指数在1.01~1.56之间波动,从第3试验时期起,对照塘多样性指数呈递减趋势。由此可知,对照塘中浮游植物相对于循环塘而言,分布不均匀,群落信息含量不大,结构较不稳定,演替速度快。

3 讨论

3.1 循环水养殖系统对各循环塘中浮游植物种类组成的影响

浮游植物种类组成是群落性质最重要的因素,也是鉴别不同群落类型的基本特征。试验循环水养殖系统在传统的高位池养殖模式的基础上系统地配备了泡沫分离处理设备、生物过滤净化等装置,使试验高位池的水体能够垂直流动和上下均匀混合,彻底地改变了水体的运动状况,使高位池的水体变为“循环水”^[1]。随着养殖水域生境的变化,生境中所栖息的浮游生物种类也会随之发生改变,进而所形成的浮游生物群落也不相同^[13-14]。

尽管试验高位池循环水养殖系统的循环水处理装置都对养殖水体具有较强的处理净化功能,也对浮游生物有较高的过滤能力,然而在系统运行稳定的第3时期,发现不同循环量组的P2和P3的相似指数为88.7%,可以初步说明P2和P3的浮游植物种类组成可能存在重复交错现象,即使在试验循环水养殖系统运行最稳定的第3时期,都同时或交叉前后几天出现过呈绿色的现象。种类组成的定性鉴定结果充分证实了即使完全不同循环量的试验循环塘,浮游植物种类组成也同样存在重复交错现象。而吴振斌等^[15]的研究也说明在循环水养殖池中的浮游生物存在交叉现象,即在一个循环塘出现的种,可能同时或者早晚都要出现在其他的循环塘。因为一方面养殖水体的水源相同,循环塘的循环量虽不尽相同,但循环水养殖的原理是相同的,只是对养殖水体的处理、过滤及净化能力表现强弱而已;另一方面,魏小岚等^[9]报道循环水养殖系统大多数是针对有害于养殖的不明物质进行清除,大量的有利于养殖水体的生物都未被物理过滤和

生物净化处理。

对照4号塘为传统高位池的养殖方式,没有采用养殖水体的循环处理。试验第1时期,与循环塘浮游植物种类组成基本一致。但随着试验时间的推移,从试验的第2时期起,该塘以颤藻、绿裂藻、微囊藻、螺旋藻等蓝藻为主。另外,循环水养殖系统运行稳定,使得试验对照塘中浮游植物种类组成与循环塘的差异性突出,主要以蓝藻门的种类为主。有关文献表明,在我国传统池塘养殖中,蓝藻“水华”出现的养殖水体一般被认为是水质管理不佳、物质循环不良的“老水”,不利于水产养殖^[16]。因此,对照塘的生态系统稳定性比较差,导致该塘的藻类群落结构相对简单,不利于维持该塘的生态系统平衡,当水体条件适宜时,有些有害藻类就会大量暴发,超过一定的生态耐受性范围与极限,造成生态危机进而有可能阻止水中试验对象的正常摄食、生长等生命活动^[17-18]。对照塘的种类最多,以蓝藻和绿藻为主,随循环处理量的增加,种类数呈现递减的现象。因此,从浮游植物种类数的角度考虑,循环塘P2循环处理量相对最为适宜。

3.2 各塘中浮游植物优势种和现存量的变化特征

浮游植物的群落结构受一系列外界因素的影响。一方面,受水温、溶氧等自然条件变化的影响^[19-20];另一方面,受到虾的摄食等抽彩式竞争、捕食和循环水养殖系统的调控等人为因素影响而处于不断变化之中,多样性指数相对较大,循环塘生态系统相对稳定^[15,18]。浮游植物的生长繁殖受水体中营养盐的影响,而N、P又是最主要的限制因子^[21]。

如表2所示,4个塘间N、P含量存在显著或者极显著差异,因此各塘浮游植物的现存量也有着差异性(循环塘和对照塘中浮游植物的密度分别为208.34~998.83($\times 10^4$ ind $\cdot$ L⁻¹)、324.58~1 343.26($\times 10^4$ ind $\cdot$ L⁻¹);其生物量分别为2.96~10.19 mg $\cdot$ L⁻¹、3.59~18.86 mg $\cdot$ L⁻¹)。试验第1时期,与循环塘浮游植物现存量及优势种基本一致。但随着养殖时间延长,对虾排泄的废物增多,该试验系统使得在对照塘水体中适宜生长的浮游植物种类出现锐减的现象,而适宜在循环水情况下生长的藻类的种类增加。优势种由绿硅藻转变为铜绿微囊藻等蓝藻门种类,数量变幅较大,尤其是在试验第3时期,表现最为明显,一方面由于对照塘N、P营养盐质量浓度较高,另一方面受浮游动物摄食浮游植物的影响,因为对照塘浮游动物密度与生物量相对循环塘较低,并存在显著性差异($P<0.05$),使它对浮游植物影响较弱。对照塘中铜绿微囊藻等蓝藻大量生长,出

现富营养化现象,因此,藻类群落结构相对简单,生态系统稳定性较差^[22-23]。

虽然在循环塘中边缘微囊藻等蓝藻数量极少,但总的来说表现为:绿藻、硅藻、裸藻和隐藻等分别在各个试验时期成为优势种,其数量受到有效调控,而且随循环水的循环量增加,丰度下降,浮游植物的群落结构相对比较复杂。有文献报道^[24-25],总磷浓度超过 $0.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,蓝藻的生长很大程度上受物理因子,尤其是水体稳定性的影响。因此,当养殖水体发生垂直混合时,边缘微囊藻等蓝藻的悬浮机制优势丧失,而是通过循环水混合方式提高水体稳定性进而抑制富营养化现象的发生^[26-27]。

3.3 对虾循环水养殖系统养殖水体中浮游植物多样性

浮游植物的多样性是藻类及其水域环境形成的生态复合体以及与此相关的各种生态过程的总和^[28-29]。因此,水体浮游植物多样性与水生态系统稳定性有密切的联系^[30]。2007年吴恢碧等^[8]在湖北荆州试验结果表明,静态池塘与循环塘的浮游植物多样性指数(H)分别在1.68~2.56和2.15~2.94范围内波动,2008年杨慧君等^[18]在湖北洪湖试验,其试验结果为对照塘与循环塘的浮游植物多样性指数(H)分别为1.16~1.48和1.39~1.62。本文的循环塘与对照塘的浮游植物多样性指数(H)分别在1.03~2.18、1.01~1.56之间波动。表明浮游植物多样性指数变化规律都是一致的,集中表现为:前期高、中后期低的现象。其最可能的原因是受试验循环水养殖系统影响,它将室内工厂化水处理设备采用的生态工程技术应用于池塘养殖,调控养殖水体生态环境,循环水养殖系统通过泡沫物理处理、生物过滤等技术手段,不仅可以去除池塘有害物质和多余营养盐,达到调节水体理化环境的目的,而且水体理化环境与浮游植物密切相关^[31],这样可防止边缘微囊藻及其他有害藻类过度繁殖,保持有益浮游植物多样性。由此可以说明,循环水养殖系统能够有效地为高位池虾苗养殖提供稳定健康的生态环境。

4 结论

(1)循环塘的种属的数目相对少于对照塘,循环塘的种类组成以绿藻和硅藻为常见种,对照塘以蓝藻和绿藻为常见种,初期无差异,中后期差异明显。

(2)循环塘优势种以绿藻和硅藻为主,复杂且演替速度慢;而对照塘试验养殖中后期以蓝藻为主,一旦演替速度快。

(3)循环塘中浮游植物的现存量低于对照塘,并

存在极显著性差异($P<0.01$)。循环塘的现存量表现为递增规律,而对照塘表现高低起伏的现象。

(4)循环塘多样性指数高于对照塘,呈递增趋势,且稳定性较好,而对照塘多样性指数表现为前期高,中后期低的规律。

参考文献:

- [1] 李纯厚,魏小岚,王学锋,等.池塘循环水对虾养殖模式的技术特点及发展趋势[J].广东农业科学,2011,38(24):105-108.
LI Chun-hou, WEI Xiao-lan, WANG Xue-feng, et al. Technical characteristics and trend of cultivation pattern under the recycling water in shrimp pond[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2011, 38(24): 105-108.
- [2] 魏小岚,李纯厚,颜晓勇,等.对虾高位池循环水养殖水体悬浮物等环境因子的变化特征[J].安全与环境学报,2012,12(1):11-15.
WEI Xiao-lan, LI Chun-hou, JIE Xiao-yong, et al. Study on variation features of SS etc environmental factors under shrimp culture of recycling water treatment systems in higher place pond[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2012, 12(1): 11-15.
- [3] 李纯厚,魏小岚,颜晓勇,等.对虾高位池循环水养殖效果比较分析[J].广东农业科学,2011,38(17):91-95.
LI Chun-hou, WEI Xiao-lan, JIE Xiao-yong, et al. Study on culture of comparative analysis under the different recycling rates of water in higher place shrimp pond[J]. *Guangdong Agricultural Science*, 2011, 38(17): 91-95.
- [4] 黄翔鹏,王庆恒.对虾高位池优势浮游植物种群与成因研究[J].热带海洋学报,2002,21(4):36-44.
HUANG Xiang-hu, WANG Qing-heng. A study on dominant phytoplankton species in high-level prawn ponds its formation cause[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2002, 21(4): 36-44.
- [5] 李卓佳,张汉华,郭志勋,等.虾池浮游微藻的种类组成、数量和多样性变动[J].湛江海洋大学学报,2005,25(3):33-38.
LI Zhuo-jia, ZHANG Han-hua, GUO Zhi-xun, et al. Species composition, quantity variation and biodiversities of phytoplankton in shrimp culture ponds[J]. *Journal of Zhanjiang Ocean University*, 2005, 25(3): 33-38.
- [6] 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 Guang-Cai, ZHOU Chang-Qing, HUANG Jian-Rong, 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.
- [7] 高云霓,吴晓辉,邓平,等.人工湿地-池塘复合养殖系统中浮游藻类生态特征[J].农业环境科学学报,2007,26(4):1230-1234.
GAO Yun-ni, WU Xiao-hui, DENG Ping, et al. Ecological characteristics of phytoplankton in a constructed wetland-pond integrated aquaculture system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4): 1230-1234.
- [8] 吴恢碧,李谷,陶玲,等.循环流水池塘养殖系统浮游植物群落结构与特征[J].华中农业大学学报,2008,27(5):648-654.
WU Hui-bi, LI Gu, TAO Ling, et al. Characteristics of phytoplankton

- community structure in a recirculating aquaculture system[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2008, 27(5):648-654.
- [9] 魏小岚,李纯厚,颜晓勇,等.对虾高位池循环水养殖水体浮游动物生态特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(1):141-152.
- WEI Xiao-lan, LI Chun-hou, JIE Xiao-yong, et al. Ecological characteristics of zooplankton in the higher-place pond of shrimp recirculating aquaculture system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1):141-152.
- [10] 胡鸿钧. 中国淡水藻类[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1980:11-520.
- HU Hong-jun. The freshwater algae of china[M]. Shanghai:Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1980:11-520.
- [11] 胡鸿钧. 中国淡水藻类:系统分类及生态[M]. 北京:科学出版社, 2006:23-903.
- HU Hong-jun. The freshwater algae of China: Systematics, taxonomy and Ecology[M]. Beijing:Scientific Publishers, 2006:23-903.
- [12] 孙濡泳. 动物生态学原理[M]. 第三版. 北京:北京师范大学出版社, 2001.
- SUN Ru-yong. Principle of animal ecology[M]. The third edition. Beijing:Beijing Normal University Press, 2001.
- [13] 张汉华,李卓佳,郭志勋,等. 有益微生物对海水养虾池浮游生物生态特征的影响研究[J]. *南方水产*, 2005, 1(2):7-14.
- ZHANG Han-hua, LI Zhuo-jia, GUO Zhi-xun, et al. Study on the influences of probiotics on ecological characteristics of plankton in the maricultural ponds[J]. *South China Fisheries Science*, 2005, 1(2):7-14.
- [14] 刘孝竹,李卓佳,曹煜成,等. 珠江三角洲低盐度虾池秋冬季浮游微藻群落结构特征的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(5):1010-1018.
- LIU Xiao-zhu, LI Zhuo-jia, CAO Yu-cheng, et al. Study on the characteristics of planktonic microalgae community structure of low salinity shrimp ponds during autumn and winter in pearl river delta[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(5):1010-1018.
- [15] 吴振斌,张世羊,高云霓,等. 循环水养殖池中浮游生物的群落结构及动态研究[J]. *华中农业大学学报*, 2007, 26(1):90-94.
- WU Zhen-bin, ZHANG Shi-yang, GAO Yun-ni, et al. Studies on plankton community structure and its dynamics in a recycling aquaculture system[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2007, 26(1):90-94.
- [16] Chuntapa B, Powtongsook S, Menasveta P. Water quality control using *Spirulina platensis* in shrimp culture tanks[J]. *Aquaculture*, 2003, 220:355-366.
- [17] 梁伟峰,李卓佳,陈素文,等. 对虾养殖池塘微藻群落结构的调查与分析[J]. *南方水产*, 2007, 5(3):33-39.
- LIANG Wei-feng, LI Zhuo-jia, CHEN Su-wen, et al. Investigation and analysis on characteristics of microalgae community in prawn ponds[J]. *South China Fisheries Science*, 2007, 5(3):33-39.
- [18] 杨慧君,谢从新,何绪刚,等. 循环水池塘与非循环水池塘中浮游生物的群落结构及其动态研究[J]. *淡水渔业*, 2010, 42(3):28-35.
- YANG Hui-jun, XIE Cong-xin, HE Xu-gang, et al. Studies on plankton community structure and its dynamics in recycling and non-recycling aquaculture ponds[J]. *Freshwater Fisheries*, 2010, 42(3):28-35.
- [19] 况琪军,胡征军,周广杰,等. 香溪河流域浮游植物调查与水质评价[J]. *武汉植物学研究*, 2004, 22(6):507-513.
- Kuang Q J, Hu Z Y, Zhou G J. Investigation on phytoplankton in Xi-anxi River watershed and the evaluation of its water quality [J]. *Wuhan BotRes*, 2004, 22(6):507-513.
- [20] 彭聪聪,李卓佳,曹煜成,等. 虾池浮游微藻与养殖水环境调控的研究概况[J]. *南方水产*, 2010, 6(5):75-80.
- PENG Cong-cong, LI Zhuo-jia, CAO Yu-cheng, et al. A review of water environment regulation by planktonic microalgae in shrimp ponds [J]. *South China Fisheries Science*, 2010, 6(5):75-80.
- [21] McCormick P V, Shuford III R B E, Rawlik P S. Changes in macroinvertebrate community structure and function along a phosphorus gradient in the Florida Everglades[J]. *Hydrobiologia*, 2004, 529:113-132.
- [22] 曹煜成,李卓佳,杨莺莺,等. 浮游微藻生态调控技术在对虾养殖应用中的研究进展[J]. *南方水产*, 2007, 3(4):70-73.
- CAO Yu-cheng, LI Zhuo-jia, YANG Ying-ying, et al. Research progress on technology of microalgae ecological management in shrimp culture[J]. *South China Fisheries Science*, 2007, 3(4):70-73.
- [23] 刘孝竹,李卓佳,曹煜成,等. 低盐度养殖池塘常见浮游微藻的种类组成、数量及优势种群变动[J]. *南方水产*, 2009, 5(1):9-16.
- LIU Xiao-zhu, LI Zhuo-jia, CAO Yu-cheng, et al. Common species composition, quantity variation and dominant species of planktonic microalgae in low salinity culture ponds[J]. *South China Fisheries Science*, 2009, 5(1):9-16.
- [24] Cremen M C, Martinez-Goss M R. Phytoplankton bloom in commercial shrimp ponds using green-water technology[J]. *Aquac Res*, 2007, 19(6):615-624.
- [25] Mischke C C, Zimba P V. Community responses of plankton under various fertilization regimes in earthen channel catfish nursery ponds[J]. *Aquaculture*, 2004, 233(87):219-235.
- [26] Tookwinas S, Songsangjinda P. Water quality and phytoplankton communities in intensive shrimp culture ponds in Kung Krabae Bay Eastern Thailand [J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 1999, 30(1):36-45.
- [27] Steinberg C E W, Hartmann H M. Plankton bloomforming cyanobacteria and the eutrophication of lakes and rivers[J]. *Freshwater Biology*, 1988, 20(7):279-287.
- [28] Giner J D. Phytoplankton as biological indicator of water quality[J]. *Water Research*, 1973, 7(2):2479-2487.
- [29] Maberly S C, King L. Nutrient limitation of phytoplankton and periphyton growth in upland lakes[J]. *Freshwater Biology*, 2002, 47(11):2136-2152.
- [30] Carmichael W W. Hemagglutination method for detection of freshwater cyanobacteria (bluegreen algae) toxins[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1981, 41(6):1383-1388.
- [31] 陈金玲,赖秋明,苏树叶,等. 精养虾池主要生态因子变化特点与相关性分析[J]. *南方水产科学*, 2012, 8(4):49-56.
- CHEN Jin-ling, LAI Qiu-ming, SU Shu-ye, et al. Study on variation characteristics and correlation analysis of major ecological factors in intensive shrimp ponds[J]. *South China Fisheries Science*, 2012, 8(4):49-56.