

对虾高位池循环水养殖水体浮游动物生态特征研究

魏小岚^{1,2}, 李纯厚^{1*}, 颌晓勇¹, 戴明¹, 廖秀丽¹, 胡维安^{1,3}, 肖雅元^{1,3}, 李朋^{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.暨南大学水生生物研究所, 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动物的变动规律,有效管理水体环境质量,提高养殖效益,于2010年8月—11月,以凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)为试验对象,研究了循环水处理高位池养殖水体中浮游动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动物的生态特征影响。结果表明,从各试验塘鉴定出浮游动物主要隶属于四大类,循环塘21属35种,对照塘43属61种,种类最多的为轮虫,占总数的34.4%,其次为原生动物,占总数的31.1%,再次为枝角类,占总数的19.7%,最后为桡足类,占总数的14.8%。循环塘的优势种以原生动物和轮虫为主,而对照塘试验中后期的浮游动物以大型甲壳动物为主,循环塘和对照塘中浮游动物的密度分别为: $131.52\sim 497.17\text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $122.09\sim 373.15\text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$,其生物量分别为 $1.19\sim 3.87\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.64\sim 3.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,循环塘中浮游动物的密度和生物量明显高于对照塘,且存在显著性差异($P<0.05$)。循环塘浮游动物 Shannon-Wiener 多样性指数(H')在1.01~2.08之间波动,而对照塘浮游动物多样性指数(H')在0.76~1.56之间波动。

关键词:高位池;循环量;浮游动物;生态特征

中图分类号:X174 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2013)01-0141-12 **doi:**10.11654/jaes.2013.01.021

Ecological Characteristics of Zooplankton in the Higher Place Pond of Shrimp Recirculating Aquaculture System

WEI Xiao-lan^{1,2}, LI Chun-hou^{1*}, XIE Xiao-yong¹, DAI Ming¹, LIAO Xiu-li¹, HU Wei-an^{1,3}, XIAO Ya-yuan^{1,3}, LI Peng^{1,3}

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

Abstract: Ecological characteristics of zooplankton were studied to master changes in the law of zooplankton in the higher-place pond of shrimp recirculating aquaculture system, to effective manage environmental quality of cultured waters, and to rise cultured benefit. From August to November in 2010, by *Litopenaeus vannamei* as experimental object was research in the higher place pond of shrimp recirculating aquaculture system. Experiments were designed three different recirculating treatment groups, they were $20\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ (Group of pond one), $40\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ (Group of pond two) and $60\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ (Group of pond three), respectively. Community structure and its dynamic changes of zooplankton were studied in the higher-place pond of shrimp recirculating aquaculture system. The experimental results showed that different recirculating quantity and aquaculture pattern might influence on the ecological characteristic of zooplankton in the cultured waters. The zooplanktons were mainly belonged to four categories in the higher place ponds of shrimp recirculating aquaculture system. Four categories had 21 generas and 35 species in the shrimp recirculating aquaculture ponds, and there were 43 generas and 61 species in the shrimp control pond. Species of rotifer, protozoan, cladocera and copepoda were accounted for 34.4%, 31.1%, 19.7% and 14.8% respectively in the total ratio. Dominant species of zooplankton mainly included protozoa and rotifers in the recirculating aquaculture ponds, however, on the lately experimental phase, they mainly included large crustacean animal in the control aquaculture pond. Density of zooplankton were $131.52\sim 497.17\text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$ and $122.09\sim 373.15\text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$ in the recirculating aquaculture ponds and control aquaculture pond respectively, and the biomass of zooplankton respectively were $1.19\sim 3.87\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $0.64\sim 3.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ in the recirculating aquaculture ponds and control aquaculture pond respectively.

收稿日期:2012-05-22

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

Density and biomass of zooplankton of the recirculating aquaculture ponds were higher than that of the control aquaculture pond, and there was a significant difference ($P<0.05$). Shannon-wiener diversity index of zooplankton was 1.01~2.08 between fluctuation in the recirculating aquaculture ponds, but shannon-wiener diversity index of zooplankton was 0.76~1.56 between fluctuation in the control aquaculture pond.

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

传统的高位池对虾养殖模式产生的大量残饵和代谢产物,会导致水体自净和缓冲能力降低,水体呈现严重的富营养化,对水体产生较严重的污染。另外,养殖废水的随意排放,造成了局部地区水域的“二次污染”。我国水资源相对贫乏,养殖生产需要大量清洁水源,养殖用水和废水的循环利用已经成为当今对虾养殖可持续发展的关键问题之一^[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,在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^[2]、对虾高位池循环水养殖效果^[3]等方面开展了研究。迄今为止,有关文献对于其他养殖水体中浮游动物群落结构及其动态研究有所报道^[4-6],但关于高位池循环水养殖系统中浮游动物生态特征的研究尚未见报道。

浮游动物是水域生态系统中一类极为重要的消费者,它们既可作为许多经济鱼虾类的优质天然饵料,又是水体鱼产力的主要提供者^[7-8],在渔业生产中占有举足轻重的地位,同时它可调节控制水中浮游植物和微生物的发生和发展^[9],而且还是养殖水体生态系统中物质循环和能量流动的重要环节,其种类组成、数量的分布和变动与池塘水质、系统内的能流、物流密切相关,它直接或间接影响到对虾生产的生长和系统的生产性能^[10-11]。故本项研究在不同循环水量条件下,开展了循环水处理系统对浮游动物群落结构的影响研究,并就不同的循环水处理系统对浮游动物的动态影响进行了比较研究,探讨不同量的循环水养殖系统作用下对浮游动物生态特征影响的规律,为管理好高位池水质和提高养殖效果提供科学依据,旨在为推广应用高位池循环水养殖新模式提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料的详细内容同文献[3]。

1.2 实验方法

1.2.1 循环水养殖系统的构建

循环水养殖系统的构建的详细内容同文献[2]。

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0.0667 hm²投放虾苗10万尾,于2010年8月25日放养到各试验虾塘,开始养殖实验。其高位池塘基本参数见表1。循环水处理系统设计3个梯度,并设1个对照池。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,系统每日运行8 h;第3时期10月20日—11月1日,系统每日运行16 h;第4时期,11月1日—11月14日,系统每日运行24 h。

1.2.3 养殖管理

养殖管理的详细内容同文献[3]。

1.2.4 采样的时间及位置

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,等待该系统稳定运行,立即开始采样,大约每隔7 d一次,总共6次,一般于上午8:30开始进行,每个高位池设立5个采样点(虾池四角及中央)。同时,对循环塘与对照塘分别进行采样。

1.2.5 样品采集方式

1.2.5.1 定性采样

定性采样按照文献的方法进行^[4-6]。

表1 试验高位池概况

Table 1 Summary of the experimental higher place

项目 Items	4号池 Pond 4	1号池 Pond 1	2号池 Pond 2	3号池 Pond 3
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 Capacity/m ³ ·h ⁻¹	0	20	40	60
池塘底质 Substrate character	水泥地膜	水泥地膜	水泥地膜	水泥地膜

1.2.5.2 定量采样

定量采样按照文献的方法进行^[4-6]。

1.2.6 鉴定与分析

浮游动物定性样品按照文献的方法进行鉴定^[12-20]。

浮游动物样品的定量分析,首先对各主要的种类挑选醒目正常的个体约 45 个,用目测微尺测量其身体的大小、宽度、厚度等体形参数,用求积公式及回归方程算出每个个体的体积,求出各种浮游动物的平均体积并换算成平均体重。计数定量样品时,把浓缩样品上下颠倒充分摇匀后,用定量吸管迅速吸取 0.1 mL 和 1 mL 的样品分别注入到体积为 0.1 mL 和 1 mL 计数框内,然后分别在 10×20 倍的显微镜下计数原生动物和轮虫。一般情况下,计数两片,取其平均值,甲壳动物要全部计数,数量多则需要分次多批计数。当样品有较多的浮游植物时,则加入伊红进行染色再进行计数。另外,用目测微尺测量甲壳动物体长后,根据文献中的体长-体重的回归方程进行推算,把计算的结果利用公式换算成数量(·L⁻¹),最后按照湿重值计算其生物量(mg·L⁻¹)。

1.3 数据处理与分析

浮游动物多样性指数的计算采用 Shannon - Wiener 多样性指数^[20],即:

$$H' = - \sum_{i=1}^n P_i \ln P_i$$

式中:H'为浮游动物的多样性指数;n为浮游动物的种数;P_i为第 i 种浮游动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 循环量对浮游动物种类组成的影响

经鉴定,试验虾池浮游动物种属较少,4 个塘共检出浮游动物 61 种,主要由原生动物、轮虫、枝角类及桡足类四类浮游动物组成,结果见表 2。循环塘 27 属 35 种,对照塘 42 属 61 种;种类最多的为轮虫,占总数的 34.4%,其次为原生动物,占总数的 31.1%,再次为枝角类,占总数的 19.7%,桡足类最少,占总数的 14.8%。从鉴定的结果看,循环水系统的循环量大小对各试验塘浮游动物的种类均有一定的影响,虽各塘中浮游动物种类组成存在交错现象和大小型化交织现象(轮虫和甲壳动物并存)。对照塘的种类最多,但随循环量的增加,种类数(常见种、优势种)呈现递减趋势,以 P3 池的种类最少。

表 2 不同循环量下浮游动物的种类组成及丰富度分布

Table 2 Species composition and abundance of zooplankton in the different recycling rates

类 Category	种类组成 Species composition	丰富度 Abundance			
		1 号虾池 Pond 1	2 号虾池 Pond 2	3 号虾池 Pond 3	4 号虾池 Pond 4
原生动物 Protozoan	瓶口虫 <i>L. acuminata</i>	++	+	+	++ +++
	简单瓶口虫 <i>L. simplex</i>	+	++ +++	++	+
	太阳虫 <i>Actinophrys</i>	++	++	+	++
	放射毛刺虫 <i>H. laradians</i>				++
	稀毛游仆虫 <i>Euplotes raresta</i>	++	++	++	+
	冠砂壳虫 <i>D. corona</i>				+
	毛板壳虫 <i>C. hirtu</i>	+	++	++	+
	旋急游虫 <i>S. spiralis</i>				+
	卵形前管虫 <i>Prorodoovum</i>				++
	小单环栉毛虫 <i>D. balbianitnanum</i>	++ +++	++ +++	++	+
	腐生尖毛虫 <i>O. saprobia</i>	++	++	+	++
	尾草履虫 <i>P. caudatum</i>				+
	银灰膜袋虫 <i>C. glaucoma</i>				++
	大舟形虫 <i>L. magnum</i>	++	++	++	+
	猎裂口虫 <i>Am. meleagris</i>	++	+	+	++
	针棘刺泡虫 <i>Ac. aculeate</i>	+	+	++	+
	蚤状中缢虫 <i>Me. Pulex</i>				++
	王氏拟铃壳虫 <i>T. wang</i>	+	++	++	+

续表 2 不同循环量下浮游动物的种类组成及丰富度分布
Continued table 2 Species composition and abundance of zooplankton in the different recycling rates

类 Category	种类组成 Species composition	丰富度 Abundance			
		1 号虾池 Pond 1	2 号虾池 Pond 2	3 号虾池 Pond 3	4 号虾池 Pond 4
轮虫 Rotifer	圆筒状拟铃壳虫 <i>T. cylindrata</i>				++
	壶状臂尾轮虫 <i>B. urceus</i>				++
	蓼花臂尾轮虫 <i>B. clayciflorus</i>	++ +++	++ +++	++ +++	+
	角突臂尾轮虫 <i>B. angularis</i>	++ +++	++ +++	++ +++	++
	矩形臂尾轮虫 <i>B. leydigi</i>				+
	蒲达臂尾轮虫 <i>B. budapestiensis</i>	++	++	+	++
	剪形臂尾轮虫 <i>B. forficula</i>				++
	裂足臂尾轮虫 <i>B. diversicornis</i>	++	++	++ +++	+
	裂痕龟纹轮虫 <i>A. fissa</i>	+	++		++ +++
	针簇多肢轮虫 <i>P. trigla</i>				++
	矩形龟甲轮虫 <i>K. quadrata</i>	++	++	++	++
	螺形龟甲轮虫 <i>K. cochlearis</i>				+
	曲腿龟甲轮虫 <i>K. valga</i>	++	+	+	++ +++
	近矩多棘轮虫 <i>M. subquadratus</i>	++	++	++	+
	前节晶囊轮虫 <i>A. priodonta</i>				++
	环顶巨腕轮虫 <i>P. fennica</i>	++	++	++	+
	团状聚花轮虫 <i>C. hippocrepis</i>				++
	五肋鞍甲轮虫 <i>L. quinquecostata</i>				+
	盘状鞍甲轮虫 <i>L. patella</i>	++ +++	++	+	++
枝角类 Cladocera	卵形鞍甲轮虫 <i>L. ovalis</i>	++	+	+	++
	冠突鞍甲轮虫 <i>L. cristata</i>				+
	尖尾鞍甲轮虫 <i>L. acuminata</i>	++	++	++	++
	多刺裸腹蚤 <i>M. macrocopa</i>				++
	微型裸腹蚤 <i>M. micrura</i>	++	++	+	++ +++
	矩形尖额蚤 <i>A. rectangular</i>	+	+	+	++
	圆形盘肠蚤 <i>C. sphaericus</i>				+
	短尾秀体蚤 <i>D. brachyurum</i>	++	+	++ +++	++
	长肢秀体蚤 <i>D. leuchtenbergianum</i>	++	++ +++	++	++
	棘爪网纹蚤 <i>C. reticulata</i>				+
	隆腺蚤 <i>D. carinata</i>	++ +++	++	+	++
	拟老年低额蚤 <i>S. vetuloides</i>	+	+	++	+
	方形网纹蚤 <i>Ce. quadrangula</i>				+
	角突网纹蚤 <i>Ce. cornuta</i>	++	+	+	++
	美丽网纹蚤 <i>Ce. pulchella</i>				+
桡足类 Copepoda	绥芬跛足猛水蚤 <i>M. suifunensis</i>	++	++	++	+
	近刺大吉猛水蚤 <i>T. vicinospinalis</i>				++
	隐密裂囊猛水蚤 <i>Sc. clandestina</i>	++	+	++	+
	完美美丽猛水蚤 <i>N. pietschmanni</i>				++
	模式有爪猛水蚤 <i>O. mohammed</i>	+	+	++	+
	特异荡镖水蚤 <i>Ne. incongruens</i>	++	++	+	++
	中华哲水蚤 <i>S. sinensis</i>				++
	英勇剑水蚤 <i>C. strenuous</i>				+
	南方中剑水蚤 <i>Me. leuckarti</i>	+++	+++	+++	++ +++

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

2.2 循环量对浮游动物优势种的影响

根据各塘浮游动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^[7],如表 3 所示。各塘浮游动物优势种的动态演替如图 1~图 4 所示。

如图 1 所示,1 号虾池浮游动物优势种为小单环桡毛虫、萼花臂尾轮虫、角突臂尾轮虫、盘状鞍甲轮虫、南方中剑水蚤、隆腺蚤。优势种越少,其优势度越高,隆腺蚤作为优势种,主要出现在养殖水体的早期。角突臂尾轮虫、盘状鞍甲轮虫的优势度相对较高,但其个体小,生物量少,而小单环桡毛虫的个体大,生物量多,尽管其优势度有时并不高,但对维持养殖环境

的稳定性起主要作用,萼花臂尾轮虫出现在低盐度养殖的后期。

如图 2 所示,2 号虾池浮游动物优势种为简单瓶口虫、萼花臂尾轮虫、角突臂尾轮虫、针簇多肢轮虫、裂足臂尾轮虫、南方中剑水蚤、长肢秀体蚤。早期优势种少,以长肢秀体蚤为主,优势度高,养殖中期随优势种增多,优势度降低,以简单瓶口虫、南方中剑水蚤为主。南方中剑水蚤在养殖中期一直维持较强的优势地位。到了养殖中后期,尽管角突臂尾轮虫、针簇多肢轮虫、裂足臂尾轮虫的优势度不高,虽其个体小,生物量相对较高。养殖结束之前,优势种以萼

表 3 各虾池浮游动物优势种组成

Table 3 Composition of the dominant zooplankton species in shrimp ponds

1 号虾池 Pond 1	2 号虾池 Pond 2	3 号虾池 Pond 3	4 号虾池 Pond 4
小单环桡毛虫 <i>D. balbianitnanum</i>	简单瓶口虫 <i>La. simplex</i>	圆筒状拟铃壳虫 <i>T.cylindrata</i>	瓶口虫 <i>La. Acuminat</i>
萼花臂尾轮虫 <i>B. clayciflorus</i>	萼花臂尾轮虫 <i>B. clayciflorus</i>	萼花臂尾轮虫 <i>B. clayciflorus</i>	曲腿龟甲轮虫 <i>K. valga</i>
角突臂尾轮虫 <i>B. angularis</i>	角突臂尾轮虫 <i>B. angularis</i>	角突臂尾轮虫 <i>B. angularis</i>	裂痕龟纹轮虫 <i>A. fissa</i>
盘状鞍甲轮虫 <i>L. patella</i>	针簇多肢轮虫 <i>P. trigla</i>	裂足臂尾轮虫 <i>B. diversicornis</i>	南方中剑水蚤 <i>Me. leuckarti</i>
南方中剑水蚤 <i>Me. leuckarti</i>	裂足臂尾轮虫 <i>B. diversicornis</i>	南方中剑水蚤 <i>Me. leuckarti</i>	微型裸腹蚤 <i>Mo. micrura</i>
隆腺蚤 <i>Da.carinata</i>	南方中剑水蚤 <i>Me. leuckarti</i>	短尾秀体蚤 <i>Di. brachyurum</i>	
	长肢秀体蚤 <i>Di.leuchtenbergianum</i>		

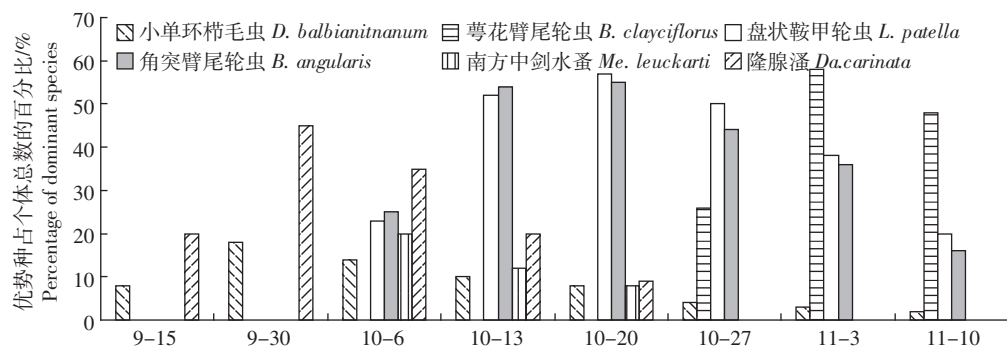


图 1 1 号塘浮游动物优势种的动态演替

Figure 1 The dynamic succession of dominant species of zooplankton in the pond one

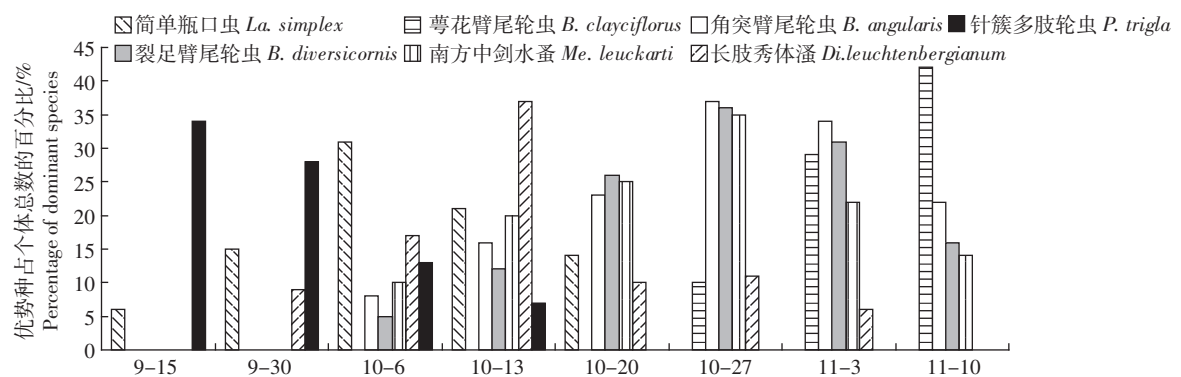


图 2 2 号塘浮游动物优势种的动态演替

Figure 2 The dynamic succession of dominant species of zooplankton in the pond two

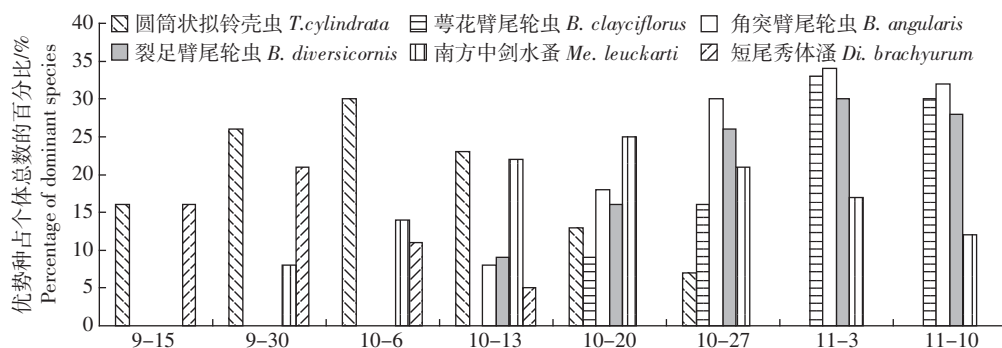


图3 3号塘浮游动物优势种的动态演替

Figure 3 The dynamic succession of dominant species of zooplankton in the pond three

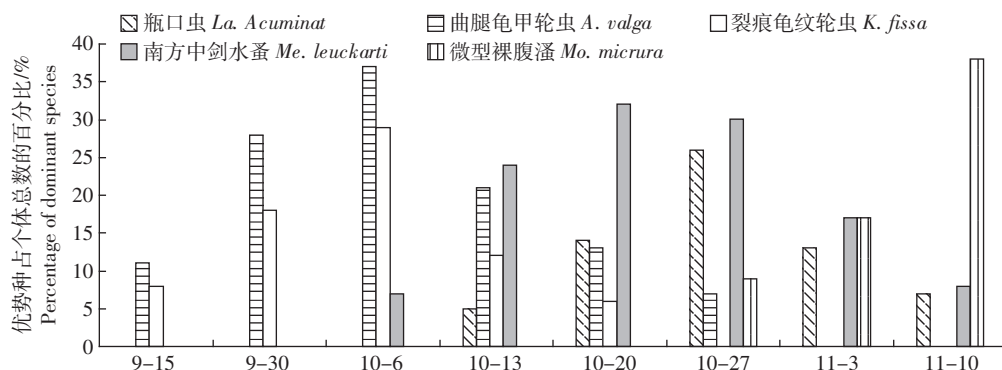


图4 4号塘浮游动物优势种的动态演替

Figure 4 The dynamic succession of dominant species of zooplankton in the pond four

花臂尾轮虫为主。

如图3所示,3号虾池浮游动物优势种组成以圆筒状拟铃壳虫、蓼花臂尾轮虫、角突臂尾轮虫、裂足臂尾轮虫、南方中剑水蚤、短尾秀体蚤为主体,在低盐度的养殖前期以短尾秀体蚤和圆筒状拟铃壳虫形成共优势种,并伴随有一定数量的原生动物出现的现象。养殖中期,裂足臂尾轮虫、南方中剑水蚤取代其地位成为优势种,裂足臂尾轮虫在中后期一直维持较强的优势地位,后期优势种还是以蓼花臂尾轮虫为主。

如图4所示,4号虾池浮游动物优势种为瓶口虫、蓼花臂尾轮虫、曲腿龟甲轮虫、裂痕龟纹轮虫、南方中剑水蚤、微型裸腹蚤为主体。早期为蓼花臂尾轮虫、曲腿龟甲轮虫、裂痕龟纹轮虫为优势种,但中期逐渐被南方中剑水蚤、瓶口虫替代,南方中剑水蚤在该养殖水体中占有绝对优势,其种群相当稳定,养殖后期以微型裸腹蚤为主。

从观测浮游动物优势种的动态演替过程结果来看,浮游动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。

2.3 循环量对浮游动物现存量的影响

如表4所示,各塘浮游动物密度变化为122.09~497.17 ind·L⁻¹,平均为307.16 ind·L⁻¹。各试验虾池平均数相差较大,其中以P4第1时期最低,为122.09 ind·L⁻¹;以P3号池第4时期最高,为497.17 ind·L⁻¹。各口试验虾池浮游动物密度变化总的趋势是逐渐升高。参见表4,对各池密度的数据进行方差分析表明,各循环试验池间以及对照池之间浮游动物密度存在差异性,以循环组P2、P3在第3、4时期与P1的浮游动物密度存在差异显著($P<0.05$)。然而,各循环组与P4在各时期存在差异显著($P<0.05$)。

同样,如表5所示,试验虾池浮游动物生物量变化为0.17~6.73 mg·L⁻¹,平均为2.69 mg·L⁻¹。各试验虾池生物量平均数相差不大,其中以4号池最低,为0.17 mg·L⁻¹;3号池最高,为6.73 mg·L⁻¹。在生物量上,各塘情况不一,循环塘以轮虫占优势,而对照塘池塘以桡足类占优势,原生动物在个别试验阶段占优势。各口试验虾池浮游动物生物量的变化总的来看趋势也是逐渐升高的。参见表5及图5~图8,对各池生物量的数据进行方差分析表明,各时期各循环试验池间

表 4 各时期各塘浮游动物密度的平均含量(ind·L⁻¹)
Table 4 Mean density of different phases of zooplankton in experimental ponds(ind·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 m ³ ·h ⁻¹ (P4)	232.54±189.26a	122.09±145.46b	246.34±212.53c	373.15±264.28d
20 m ³ ·h ⁻¹ (P1)	132.34±102.25c	275.38±212.54a	326.41±293.39b	416.58±287.67c
40 m ³ ·h ⁻¹ (P2)	154.27±133.45b	283.16±242.27a	387.29±259.67a	453.49±334.60b
60 m ³ ·h ⁻¹ (P3)	131.52±105.42c	294.42±264.19a	398.37±267.96a	497.17±346.59a

注:表中数值为试验期间测量数据(均值±标准差),同列数据后小写英文字母不同者表示差异显著($P<0.05$)。下表同。
Note:The datas of the table are the experimental datas(mean ± standard deviation),lowercase english sunerscripts significant difference in the same column($P<0.05$),after the table as the same case.

表 5 各时期各塘浮游动物生物量的平均含量(mg·L⁻¹)
Table 5 Mean biomass of different phases of zooplankton in experimental ponds (mg·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 m ³ ·h ⁻¹ (P4)	3.01±2.46a	1.20±1.07c	2.41±1.81b	0.64±0.47d
20 m ³ ·h ⁻¹ (P1)	1.19±0.54d	2.43±1.83b	2.71±2.27a	3.25±2.58c
40 m ³ ·h ⁻¹ (P2)	2.36±1.73c	2.65±2.12a	2.84±2.16a	3.87±2.86a
60 m ³ ·h ⁻¹ (P3)	2.58±0.91b	2.79±2.31a	2.97±2.04a	3.65±2.59b

以及对照池之间浮游动物生物量存在差异性。各循环组与 P4 在各时期存在差异显著($P<0.05$),除第 3 时期,循环组的各试验池的浮游动物生物量也存在差异显著($P<0.05$)。

如图 5 所示,除 P3 塘外,其余三塘中浮游植物生物量均大于浮游动物生物量,且浮游植物与浮游动物生物量之比随循环处理量的增加而递减。结合图 6~图 9 可以发现,随着原生动物和轮虫密度和生物量所占比例的增加,浮游植物生物量占浮游生物总生物量的百分比逐渐降低。甲壳动物的密度和生物量各自所占的比例随循环处理量的增加而递减,而浮游植物与浮游动物的生物量之比却随循环处理量的增加而递减,这说明随循环处理量的增加抑制了浮游植物的生

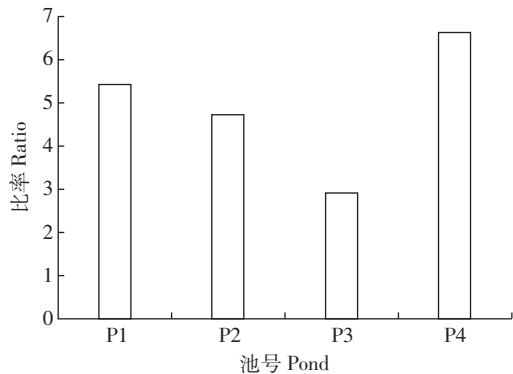


图 5 各试验塘中浮游植物与浮游动物的生物量之比
Figure 5 Ratio of biomass between phytoplankton and zooplankton in experimental ponds

长繁殖并推动了浮游动物的小型化。

各试验池浮游动物生物量的试验周期性动态变化如图 6~图 9 所示。

不同的循环水量的浮游动物生物量的试验周期性存在显著性差异($P<0.05$),其共性为浮游动物生物量周期性一般都在各试验时期开始时出现最大峰值(见图 6~图 9)。

2.4 循环量对浮游动物多样性指数的影响

生物多样性指数是指某一区域各种生物个体数量的出现概率之和,主要与数量有关,因生物多样性特点应与生物种类组成和数量变化有关^[20],故多样性指数常被用来作为评价池塘生物种类组成的多样性水平。养殖水体环境好,浮游动物种类多,多样性高,养殖环境差,浮游动物种类少,多样性低。从图 10 可以看出,2 号虾池多样性指数最高,其次是 3 号池,4 号虾池最低。这充分说明 2 号养殖环境最好,4 号最差,这与 2 号虾池养殖效果最好,4 号虾池养殖效果差的结果一致。

如图 10 所示,循环塘浮游动物多样性指数在 1.01~2.08 之间波动,并呈上升趋势,而对照塘浮游动物多样性指数在 0.76~1.56 之间波动,在试验第一阶段,除循环塘(P1、P2、P3)的浮游动物多样性指数 $H'=1.28$ 低于对照塘 P4($H'=1.47$)外,在其他试验实验时间,循环塘浮游动物多样性指数都要高于对照塘,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。

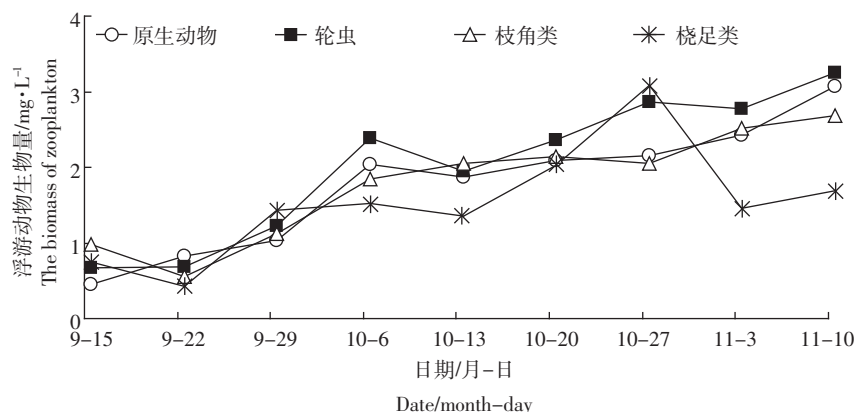


图6 1号塘浮游动物生物量的周期动态演替

Figure 6 The dynamicly cycle succession of biomass of zooplankton in the pond one

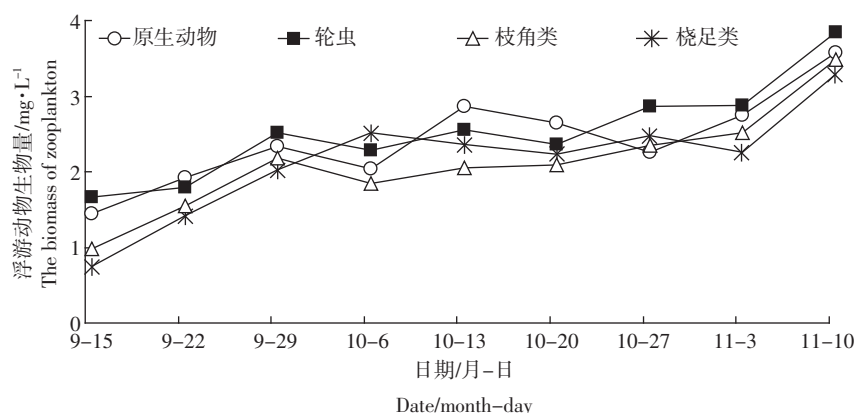


图7 2号塘浮游动物生物量的周期动态演替

Figure 7 The dynamicly cycle succession of biomass of zooplankton in the pond two

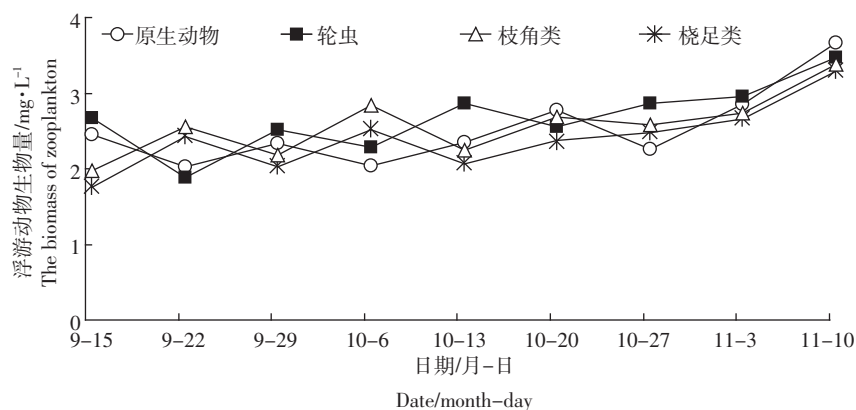


图8 3号塘浮游动物生物量的周期动态演替

Figure 8 The dynamicly cycle succession of biomass of zooplankton in the pond three

3 讨论

3.1 循环水养殖系统对各循环塘中浮游动物种类组成的影响

表2结果反映循环塘与对照塘的浮游动物的种类组成特征变化趋势趋于相似,但是,某种浮游动物

种类组成在循环塘的某个试验时期出现空白,相对于对照塘多出现的常见种,循环塘多出现原生动物和轮虫的种类,其中以轮虫居多,种类呈现小型化现象。因为一方面循环塘的藻类多以绿藻门占明显优势,从而更好地提供给浮游动物所摄食,有利于试验养殖水体浮游动物更好地生长、发育和繁殖;另一方面,随循环

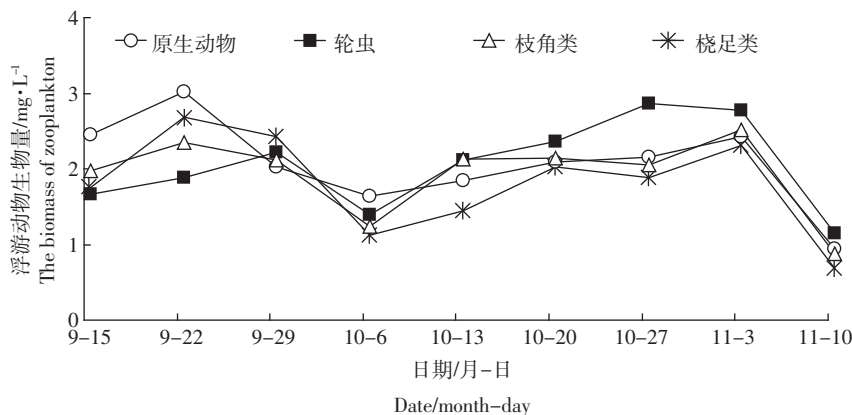


图9 4号塘浮游动物生物量的周期动态演替

Figure 9 The dynamicly cycle succession of biomass of zooplankton in the pond four

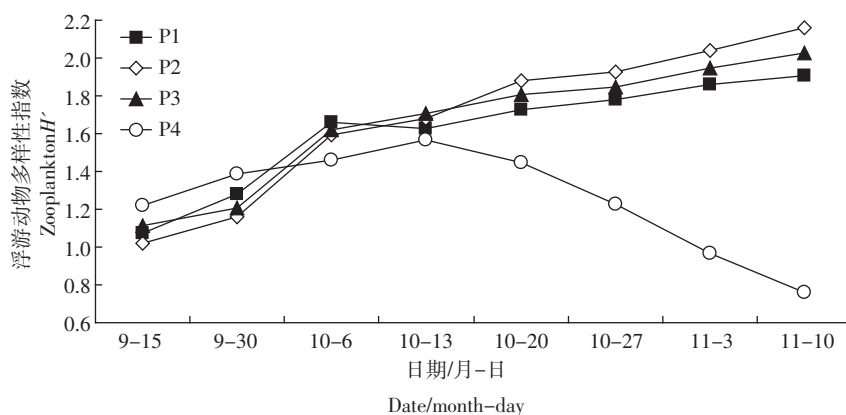


图10 各塘水体浮游动物多样性指数的变化情况

Figure 10 The variation of diversity indices of zooplankton in experimental ponds

水量的增加,循环水养殖系统对养殖水体大型浮游生物过滤处理能力加强,而有关文献表明,发现随养殖密度的增加促进了浮游植物的生长繁殖并推动了浮游动物的小型化^[21]。由试验方法可知,尽管试验高位池循环水养殖系统的水源相同、循环水处理装置既对养殖水体具有较强的处理净化功能,又对浮游生物有较高的过滤能力^[22],但在系统运行稳定期间,发现循环水量不同的P2和P3的水色基本相近,在试验的第三时期,都同时或时间交叉前后几天出现过绿色的现象。可以初步说明塘P2和P3的浮游植物种类组成可能存在交错重复现象,浮游植物的种类组成的定性鉴定结果更加充分地补充说明了此现象。而有关文献也表明在循环水养殖池中的浮游生物存在交叉现象^[23]。据此,本文大胆地假设各循环塘对虾养殖水体中浮游动物的种类组成也可能出现交错重复现象。对浮游动物的定性鉴定结果则验证了此种猜测的正确性,实验结果检出了各循环塘中的部分属种有部分相重部分相重的现象,即在一个塘出现的种,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来源相同,虽然循环量不相同,但循环水处理原理是一样的,只是对水体的处理、过滤及净化能力表现强弱而已;另一方面,循环水养殖系统大多数是针对有害于养殖的不明物质清除^[22],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。

3.2 循环水养殖系统对各循环塘中浮游动物优势种的影响

由于各塘浮游动物种类组成不同,对各塘群落结构和群落环境的形成和维持起明显的控制作用,就是该塘的优势种^[7]。在循环水养殖虾池浮游动物群落中,有时生物量优势种更显重要,有些种类虽然个体数量多,优势度突出,其个体小,生物量多,对浮游生物群落和养殖对虾环境稳定性具有重要的维持作用。而有些种类个体数量并不占优势,但个体大,生物量少,对维持浮游生物群落及对虾养殖环境稳定性不起重要作用,以P2优势种为例,该塘优势度比其他试验塘表现较突出。造成这种现象的原因:一方面,主要可能就

是循环水量和养殖模式的差异性。根据浮游动物群落的优势度相关原理^[19-20]分析可得 P2 塘中浮游动物出现的优势种相对最适合对虾的生长及其完成正常生理过程的需要,这与 P2 养殖效果最好相吻合;另一方面,循环水养殖系统循环量不同,40 m³·h⁻¹ 处理量的循环水处理设备对浮游动物的过滤能力不太高,可能未被过滤的浮游动物比较适宜生长在 P2 的养殖水环境,这一点与 P2 塘养殖水环境较好也刚好相符合。

在凡纳滨对虾循环水养殖水体中,有些浮游动物优势种可以同时出现各试验塘,如各循环塘中均出现萼花臂尾轮虫、角突臂尾轮虫。解释这样的现象的理由为:一方面是因为这些动物体型相对较小,在循环水系统处理时,其身体各个部分免以受伤;另一方面,经过循环水处理后的水体,养殖水体的理化环境因素更加适这些浮游动物的生存。此外,有些塘优势种表现出差异化,尤其循环塘与对照塘差异化表现极其显著。致使这种现象出现的原因是:首先是循环塘与对照塘差异化是实验设计的养殖模式差异性而致;其次是各循环塘出现不同的优势种,是实验设计的循环水量的差异而致,对水体的物理过滤,生物净化的能力不同;再次,根据竞争排斥原理^[7,19-20],在一个对虾循环水养殖系统运行稳定的养殖周期内,两个以上受资源限制的,具有相同资源利用方式的种,不能长期共存在一起,浮游动物为了避免争夺有限的共同资源而致;最后,根据生态位的原理^[7,19-20],对于浮游动物,在有限空间的试验塘中,利用某个特定的浮游植物时,只能出现在某个特殊时间段和地点来完成,浮游动物为了避免出现争夺有限的共同的空间而致。另外,还有可能有捕食者与猎物的关系而导致这种现象^[24]。

3.3 生态因子对各塘中浮游动物现存量的影响

如表 4、表 5 及图 6~图 9 所示,轮虫动物的密度和生物量随试验时期周期性的交换变更而变化,并存在显著性的差异($P<0.05$)。出现这样现象的最大可能就是环境要素,它对试验养殖水体的浮游动物起作用的因子,称作“生态因子”^[20]。生态因子对此影响较大^[27],生态因子对浮游动物的数量变动的影,主要方面是非密度制约因子^[9],如气候(温度变化等),对浮游动物数量变化的影响强度随其种群密度而变化。次要方面是密度制约因子^[25],如生物(虾的捕食及浮游动物之间竞争、捕食自相残杀等种间种内关系),另外,还有人为因子(循环水养殖系统的物理处理及生物过滤及外界的干扰等)的作用。随着轮虫和原生动物的密度和生物量的变化就会对整个浮游动

物的密度和生物量产生一定的影响,因为循环塘中的现存量是以原生动物和轮虫动物占主体而组成的。有关研究文献也指出,随着甲壳动物的密度和生物量的升高会出现浮游动物生物量大起大落的现象^[21]。不过,究竟真正由何因素和具体的原因还需要进一步研究证实。

P2、P3 浮游动物的密度和生物量从第 2 时期,高于其他试验塘,分别在 283.16~453.49、294.42~497.17 ind·L⁻¹ 和 2.65~3.87、2.79~3.65 mg·L⁻¹ 范围内变化。其主要原因是这 2 个塘的浮游植物相比其他循环塘稀少一些。有关文献也充分表明,浮游生物群落结构的变化与其自身组成密切相关^[26-27],当循环塘的浮游动物的密度和生物量相对较多,相应塘中藻类的质量浓度就相对稀少,反之亦然。这主要是由于浮游动物取食浮游植物的缘故。另外,对照塘浮游动物的密度和生物量低于各循环塘,并伴随大型化的现象。这与有关文献报道称循环水养殖鱼池中的浮游生物出现小型化现象^[25]一致,导致这样现象的主要原因可能是试验养殖模式的差异性。另外,根据种群的密度效应^[19,21-22]的 Yoda 氏-2/3 自疏法则分析,对照塘中同年龄阶段的固定浮游动物不能逃避竞争,其典型结果是较少量的较大个体都存活下来。

3.4 循环水养殖系统对各塘中浮游动物多样性的影响

物种多样性具有两重涵义^[28-29],一是种的丰富度,二是种的均匀度。浮游动物群落多样性与养殖环境关系密切^[30-31],同海水养殖相比,低盐度的高位池循环水养殖中由于循环水的作用,如图 10 所示,循环塘的浮游动物群落相对复杂,多样性较高,其值在 1.01~2.08 之间波动,并呈上升趋势。究其规律认为,由于整个试验过程中养殖环境基本受人为控制,分析最大可能是受循环水养殖系统的影响,循环水养殖系统(Recirculating Aquaculture Systems, RAS)是采用一定的工程设施和水处理设备将养殖排放水处理后实现循环利用,日均利用率在 95%以上,对养殖过程的主要环境因子进行人工调控,为养殖生物提供适宜生长的环境条件,实现高产、高效、优质和“零”污染^[2]。因此,循环水养殖系统对养殖水体中浮游动物的影响可以认为是一种外界干扰影响作用,当浮游动物随着水流被不同流量的水泵同时抽提后,研究发现使得浮游动物群落结构处于一个动态的变化中,根据 Connell 中度干扰假设理论^[7],即中等适度的干扰可以增加或者维持高的生物多样性,而 P2 的循环量是中等量。因此,P2 塘浮游动物多样性就较高,而对照塘浮游动物群落多

样性指数平均在 0.76~1.56, 其规律为养殖前期浮游动物种类少, 多样性低, 中期增高, 后期又降低。

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原生动物和轮虫为常见种, 对照塘以大型甲壳动物为常见种, 初期无差异, 中后期, 差异明显。

(2) 循环塘优势种以原生动物和轮虫为主, 复杂且演替速度慢; 而对照塘试验养殖中后期以大型甲壳动物为主, 突出单一且演替速度快。

(3) 循环塘中浮游动物的现存量高于对照塘, 并存显著性差异 ($P < 0.05$); 循环塘的现存量呈递增趋势, 而对照塘表现起伏的现象。

(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] 王 凌, 岳 平, 谢善何, 等. 南方高位池养殖生态环境影响及对策[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(8): 194-204.
WANG Ling, YUE Ping, XIE Shan-he, et al. The south pond farming ecological environmental impact and countermeasures[J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, 32(8): 194-204.
- [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] 刘爱芬, 吴晓辉, 贺 锋, 等. 人工湿地组合工艺对水体中浮游动物群落结构的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(2): 309-314.
LIU Ai-fen, WU Xiao-hui, HE Feng, et al. Effect of different combination system of constructed wetland on zooplankton community structure[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(2): 309-314.
- [5] 吴振斌, 刘爱芬, 吴晓辉, 等. 人工湿地循环处理的养殖水体中浮游动物动态变化[J]. 应用与环境生物学报, 2007, 13(5): 668-673.
WU Zhen-bin, LIU Ai-fen, WU Xiao-hui, et al. Dynamics of zooplankton in fish-culturing ponds with water circled by integrated vertical flow constructed wetland [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2007, 13(5): 668-673.
- [6] 张世羊, 周巧红, 成水平, 等. 复合养殖系统中浮游动物种类丰度及其影响因素[J]. 中国环境科学, 2009, 29(7): 745-750.
ZHANG Shi-yang, ZHOU Qiao-hong, CHENG Shui-ping, et al. Compound aquaculture system in planktonic animal species abundance and its affecting factors[J]. *Chinese Environment Science*, 2009, 29(7): 745-750.
- [7] Maberly S C, King L. Nutrient limitation of phytoplankton and periphyton growth in upland lakes [J]. *Freshwater Biology*, 2002, 47(11): 2136-2152.
- [8] Bouterland P R, Dickie L M. Biomass spectra of aquatic ecosystems in relation to fisheries yield[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1992, 49(4): 1528-1538.
- [9] 孙濡泳. 动物生态学原理[M]. 3版. 北京: 北京师范大学出版社, 2001.
SUN Ru-yong. Animal ecology principle[M]. 3 edition. Beijing: Beijing Normal University Press, 2001.
- [10] Pinel-Aloul B, Pont D. Spatial distribution patterns in freshwater macrozooplankton: Variation with scale[J]. *Can J Zool*, 1991, 69(36): 1557-1570.
- [11] 罗冬莲. 厦门三个重要养殖水域浮游动物的数量分布特征[J]. 台湾海峡, 2004, 23(4): 458-468.
LUO Dong-lian. Xiamen three major cultured waters in the animal population distribution[J]. *The Strait of Taiwan*, 2004, 23(4): 458-468.
- [12] 王家楫. 中国淡水轮虫志[M]. 北京: 科学出版社, 1961.
WANG Jia-ji. Freshwater rotifer records of China[M]. Beijing: Science Press, 1961.
- [13] 蒋燮治, 堵南山. 中国动物志节肢动物门甲壳纲淡水枝角类[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
JIANG Xie-zhi, DU Nan-shan. China animal of arthropod animal phylum crustacea freshwater cladocera[M]. Beijing: Science Press, 1979.
- [14] 中国科学院动物研究所甲壳动物研究组. 中国动物志(淡水桡足类)[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
Chinese Academy of Sciences Institute of Animal Carapace Animal Study Group. China animal records(freshwater copepods)[M]. Beijing: Science Press, 1979.
- [15] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
ZHANG Zong-she, HUANG Xiang-fei. Study method on freshwater plankton[M]. Beijing: Science Press, 1991.
- [16] 张觉民, 何志辉. 内陆水域渔业自然资源调查手册[M]. 北京: 农业出版社, 1991.
ZHANG Jue-min, HE Zhi-hui. The inland waters fishery resources survey handbook[M]. Beijing: Agriculture Press, 1991.
- [17] 大连水产学院. 淡水生物学[M]. 北京: 农业出版社, 1982.
Dalian Fisheries University. Freshwater biology[M]. Beijing: Agriculture Press, 1982.
- [18] 沈蕴芬. 原生动物学[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
SHEN Yun-fen. Protozoology[M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [19] 梁象秋. 水生生物学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
LIANG Xiang-qiu. Aquatic biology[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2002.
- [20] 刘建康. 高级水生生物学[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
LIU Jian-kang. Advanced aquatic biology[M]. Beijing: Science Press,

- 1999.
- [21] 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其动态研究[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. Study on plankton community structure and its dynamics of circulating water pond[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2007, 26(1): 90–94.
- [22] Guerdat T C, Losordo T M, Classen J J, et al. An evaluation of commercially available biological filters for recirculating aquaculture systems[J]. *Aquacultural Engineering*, 2010, 42(1): 38–49.
- [23] 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, 40(3): 20–35.
YANG Hui-jun, XIE Cong-xin, HE Xu-gang, et al. Study on plankton community structure and its dynamics of the circulating water pond and circulating water pond[J]. *Freshwater Fisheries*, 2010, 40(3): 20–35.
- [24] Hansson L A, Gyllstrom M, Atahl-Delbanco A. Responses to fish predation and nutrients by plankton at different levels of taxonomic resolution[J]. *Freshw Biol*, 2004, 49(11): 1538–1550.
- [25] 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 Ecology Sinica*, 2004, 24(8): 1748–1755.
- [26] Mischke CC, Zimba P V. Plankton community responses in earthen channel catfish nursery ponds under various fertilization regimes[J]. *Aquaculture*, 2004, 233(87): 219–235.
- [27] Sierp M T, Qin J G. Effects of fertilizer and crayfish on plankton and nutrient dynamics in hardwater ponds[J]. *Hydrobiologia*, 2001, 462(312): 1–7.
- [28] Barnett A, Beisner B E. Zooplankton biodiversity and lake trophic state: Explanations invoking resource abundance and distribution[J]. *Ecology*, 2007, 88(7): 1675–1686.
- [29] Ramirez García P, Nandini S, Sarma S S S, et al. Seasonal variations of zooplankton abundance in the freshwater reservoir Valle de Bravo (Mexico)[J]. *Hydrobiologia*, 2002, 467(1–3): 342–371.
- [30] Hoffmann M D, Dodson S I. Land use, primary productivity, and lake area as descriptors of zooplankton diversity[J]. *Ecology*, 2005, 86(12): 255–261.
- [31] Hessen D O, Faafeng B A, Smith V H, et al. Extrinsic and intrinsic controls of zooplankton diversity in lakes[J]. *Ecology*, 2006, 87(21): 433–443.