

凡纳滨对虾室内封闭式养殖水质变化与氮收支的试验研究

臧维玲¹, 杨 明¹, 戴习林¹, 张 煜¹, 侯文杰¹, 刘永士¹, 丁福江²

(1.上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306; 2.上海申漕特种水产开发公司, 上海 201516)

摘 要:采用模式 I (臭氧机、增氧机、净水网与复合微生物制剂等)与模式 II (增氧机、净水网、复合微生物制剂与漂白粉精等)开展室内凡纳滨对虾封闭式养殖试验,探讨了养殖池水质变化规律及氮收支状况。结果表明,在 80 d 养殖过程中,两模式所调控的养殖试验池主要水质指标均控制在对虾生长的安全范围。其中以模式 I 与模式 II 分别调控水质的 1 号与 3 号试验池主要水质指标平均值为:pH 分别为 7.92 与 7.96, DO 分别为 6.43 与 6.37 mg·L⁻¹, TAN 分别为 0.517 与 0.558 mg·L⁻¹, NO₂-N 分别为 0.396 与 0.318 mg·L⁻¹, 异养菌总数 6 863 与 19 cfu·mL⁻¹, 弧菌数分别为 13 456 与 25 cfu·mL⁻¹。两池单位水体产量分别为 1.18 和 1.02 kg·m⁻³。两试验池氮收支估算结果为:投入饲料氮分别占氮总输入 94.6%与 95.3%, 水层与虾苗含氮共占 5.4%与 4.7%; 水层氮(含排污水)占氮总输出 50.7%与 58.3%, 其近似于通常泥底养虾塘水层与底泥含氮之和占氮总输出的比例, 其次是收获对虾占氮总输出 31.9%与 25.3%, 池水渗漏等损失输出氮量占氮总输出 17.4%与 16.4%。

关键词: 凡纳滨对虾; 水质; 饲料; 氮收支; 封闭式养殖

中图分类号: X832 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2009)05-1019-06

Experimental Research on Change of Water Quality and Nitrogen Budgets for Indoor Closed Culture Ponds of *Litopenaeus Vannamei*

ZANG Wei-ling¹, YANG Ming¹, DAI Xi-lin¹, ZHANG Yu¹, HOU Wen-jie¹, LIU Yong-shi¹, DING Fu-jiang²

(1.College of Fisheries and Life, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2.Shanghai Shencao Special Fisheries Development Company, Shanghai 201516, China)

Abstract: Traditional shrimp farming has caused many environmental and economical problems, such as worsen quality of offshore waters, disease outbreak and production losses. In order to promote the development of shrimp farming industry, some new techniques and facilities were used in many countries in recent years to fit the demand of eco-aquaculture. Combined biosecurity techniques were applied in this study such as ozone, water purge net, microbe, continuous aeration and water recirculating system to maintain suitable water quality and reduced nutrient releasing from shrimp culture ponds. This study was conducted for indoor closed culture ponds of *Litopenaeus vannamei* to reveal change of water quality and nitrogen budgets in experimental pond 1 using model I which was the combination of ozone applications, aerator, water purge net and microbe, and pond 3 with model II composing of aerator, water purge net, microbe and bleaching powder. The main water quality parameters in pond 1 and pond 3 were as follows respectively: pH 7.92 and 7.96, DO 6.43 and 6.37 mg·L⁻¹, TAN 0.517 and 0.558 mg·L⁻¹, NO₂-N 0.396 and 0.318 mg·L⁻¹. The results showed that the water quality were effectively controlled within safe range in both ponds with different models during culture period for 80 d. Bacteria and vibrio in pond 1 were only 6 863 and 19 cfu·mL⁻¹ for the high effect of ozone on the deactivation of bacteria and viruse, while that in pond 3 reached 13 456 and 25 cfu·mL⁻¹ without ozone. At the end of the experiments, the final biomass loads were 1.18 kg·m⁻³ in pond 1 and 1.02 kg·m⁻³ in pond 3 respectively. Feed contributed 94.6% and 95.3% of total nitrogen inputs in pond 1 and 3, while original water and juvenile shrimp provided 5.4% and 4.7% of total input nitrogen in both corresponding ponds. The major output of nitrogen(50.7% in pond 1 and 58.3% in pond 3) was culture water including effluent, which was similar to the ration of the nitrogen outputs of both culture water and sediment in outdoor shrimp culture ponds with mud sediment. 31.9% of total nitrogen

收稿日期: 2008-11-03

基金项目: 上海市科委创新行动计划(063919112, 073919102)

作者简介: 臧维玲(1938—), 女, 教授, 从事渔业水环境及其调控研究。E-mail: wlzang@shou.edu.cn

output in pond 1 and 25.3% in pond 3 were transformed into harvested shrimp finally, while 17.4% and 16.4% of total output nitrogen in pond 1 and pond 3 were the results of water leakage and so on.

Keywords: *Litopenaeus vannamei*; water quality; feed; nitrogen budget; closed culture

水产养殖用水多取自于天然水域,故良好的水域生态环境是水产养殖业持续健康发展的根本基础。虽然对虾养殖业是我国水产养殖业支柱性产业之一,但至今部分地区的养殖技术仍未得到根本性的改进与提高。如依然采用高密度、高换水率的传统养殖方法,甚至有的还滥用药物,养殖废水基本不做任何处理便直接排入天然水域,致使部分江、湖、海水域遭受富营养化污染日益加剧。有关水产养殖对于环境的污染问题已引起全球关注^[1]。为改变传统养殖技术与模式,目前国内外均开展了集约化循环水养殖模式的研究^[2-4]。其中 Davis 等^[4]与臧维玲等^[5]研究了对虾工厂化养殖技术装备与水质调控模式,并均取得了较好的养殖效果。鉴于目前我国水产养殖业状况,进一步探讨利用简易养殖设备开展集约化养殖及提高饵料的利用率,降低水体中营养盐含量(尤其是氮元素),应是当前重要的研究课题。已有资料报道室外养虾塘水体氮磷收支研究结果。如 Briggs 等^[6]由斑节对虾集约化养殖试验得到,饲料氮与磷利用率仅分别为 21.3%与 6.4%,约 35%输入氮排放到周围环境;Christopher 等^[6]的研究结果与其类似;齐振雄等^[7]由围隔养虾试验得出,对虾对氮磷利用率分别为 9.1%~11.5%与 3.0%~3.9%。但目前有关室内封闭式养虾水体中氮磷收支状况报道甚少。本试验在不换水、不用药条件下,采用臭氧仪等设备与简易设施两种模式分别调控凡纳滨对虾室内封闭式养殖池水质,通过对养殖全程水质主要指标及虾体、饲料、水层与排放废液中总氮的检测,研究了室内封闭式养虾池水质主要因子演变特点并估算了氮的收支状况。试验结果可为进一步提高养殖用水调控和养殖废水的处理与利用技术提供科学依据,有利于促进养殖业的可持续发展。

1 材料与方法

1.1 试验池

选用上海申漕特种水产开发公司 1 号~4 号卤虫孵化池作为封闭式凡纳滨对虾养殖试验池,试验池均配有循环贮水池(简称贮水池)。池上部为长方体(1.64 m×1.62 m×0.73 m),下部为圆锥体(h=0.4 m),有效养殖水体为 2 m³,池底中心为排污管,可开启阀门排污。

1.2 试验用水和幼虾

以河水作养殖试验用水,预先经漂白粉精(10 mg·L⁻¹)消毒、暗沉淀处理。试验幼虾购自厦门,经淡化暂养后,按低水位(50 cm)布苗,初始盐度以食盐约调至 4,约 40 d 逐以淡水加到 0.65 m。试验期间连续充气。布苗密度与幼虾规格列于表 1。

表 1 试验池布苗简况

Table 1 The seedstock of test ponds

池面积/m ²	水深/m	放苗密度		体长/cm	体重/g
		/尾·m ⁻²	/尾·m ⁻³		
2.65	0.65	453	714	0.85±0.24	0.020

1.3 养殖试验系统设计

试验采用两种模式调控室内凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)高密度封闭式养殖池水质。两模式调控试验池均悬挂一张自行研制水质净化网(简称净水网),并经预先挂膜。净水网(1.6 m×0.9 m)网孔呈菱形,孔边系有易附着生物膜的维纶丝,具良好净化水质能力,转化氨氮与亚硝基氮能力尤佳^[3]。模式 I 由臭氧机(O₃:10 g·h⁻¹)、增氧机、曝气石、净水网、复合微生物制剂等组成,用于调控 1 号与 2 号池水环境;除臭氧机外,模式 II 采用与模式 I 完全相同的设施设备,用于调控 3 号与 4 号试验池水质。两模式调控试验池分别通过水泵(1 700 L·h⁻¹)、水位差与贮水池形成水交换,如此约需 2 h 将试验池水交换 1 遍。据对试验池水质监测结果及为避免池水过于清澈,在养殖 13 d 时悬挂净水网。养殖期间,若网吸附悬浮物过多,取下谨慎漂洗,尽量减轻对生物膜的破坏。

据资料^[3]提出方法,在养殖试验前对 1 号与 2 号试验池通过水质指标测定结果确定合适的臭氧消毒贮水池时间、两次消毒间隔时间以及试验池与贮水池水循环交换时间分别为 4 h、4 d 与 4 h。用类似方法确定 3 号与 4 号试验池水循环交换时间及两池与贮水池间循环交换水的间隔时间分别为 6 h 与 3 d,6 号贮水池视其与 3 号池水质状况适当泼洒漂白粉精予以处理。上述时间参数需随养殖时间延长适时予以调整。

1.4 日常管理

养殖试验期间,不换水、不用药。每日观察对虾摄食、活动与蜕壳等状况;按 4 次·d⁻¹ 投喂配合饲料,投

饵料按常规方法^[8],前 30 d 投饵量约为体重 10%,此后逐步降至 5%左右,同时据天气、摄食、残饵与蜕壳等情况随时予以调节;通过向贮水池泼洒生石灰液,调控养殖池水 pH 在对虾生长合适范围内;适时添加因蒸发、渗漏等损失水量。

1.5 采样与测定方法

每 10 d 与 30 d 分别取试验池水样测定相关水质指标,收集试验池排出污液,并计量、测定总氮,同时测取饲料、虾苗与收获虾体总氮。测定方法如下^[9-10],溶解氧(DO)和五日生化需氧量(BOD₅):修正碘量法;COD_{Mn}:碱性高锰酸钾法;pH:pHB-4 型便携式 pH 计;总氨氮(TAN):纳氏比色法;NO₂-N:重氮-偶氮比色法;NO₃-N:锌镉还原-重氮偶氮比色法;水质总氮采用过硫酸钾法测定(GB 11894—89);饲料与虾体中总氮均采用饲料中粗蛋白测定方法(GB/T 6432—94);异养菌和弧菌测定采用倒平板法^[11];非离子氨氮(NH₃-N)含量由总氨氮(TAN)含量通过下式计算而得^[12]:

$$C_{\text{NH}_3-\text{N}} = C_{\text{TAN}} \times f_{\text{NH}_3-\text{N}}$$

$$f_{\text{NH}_3-\text{N}} = 1/[1+10^{(\text{p}K_a-\text{pH}+\text{p}YH)}]$$

式中: $f_{\text{NH}_3-\text{N}}$ 为非离子氨氮(NH₃-N)占总氨氮(TAN)的百分比, $\text{p}K_a$ 为 NH₄⁺水解反应表观平衡常数的负对数, $\text{p}YH = -\lg Y_H$ (氢离子活度系数的负对数)。

2 结果与讨论

2.1 试验期间养殖池的水质变化

试验周期内,4 口养殖试验池主要水质指标变化状况基本类似。表 2 和表 3 为分别由模式 I 与模式 II 调控水质的 1 号与 3 号试验池水质变化状况。由表 2、表 3 可知,试验期间,1 号池和 3 号池水质变化特点与趋势基本一致,如两池水温均值均为 29℃,处于对虾合适生长范围^[13]。

试验池布苗密度较高,随养殖时间的增加,虾粪便与代谢物和残饵等均逐渐增多,这些物质的分解,使池水 pH 逐渐降低。如至 60 d 时,1 号与 3 号试验

表 2 养殖期间 1 号池水质变化状况(mg·L⁻¹)

Table 2 Fluctuation of water quality parameters in pond 1 during 80 culture days (mg·L⁻¹)

养殖天数/d	水温/℃	pH	DO	TAN	NH ₃ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	COD _{Mn}	BOD ₅	异养菌数/ cfu·mL ⁻¹	弧菌数/ cfu·mL ⁻¹
0	25.8	8.36	8.00	0.472	0.049	0	2.532	6.45	0.46	0	0
10	27.0	8.35	6.63	0.231	0.025	2.626	3.455	11.09	2.52	2 563	0
20	26.3	8.26	7.53	0.342	0.029	0.030	8.027	6.71	0.57	11 433	6
30	32.2	7.82	6.73	0.297	0.018	0.041	10.255	7.14	0.03	3 366	10
40	32.3	7.88	6.10	0.419	0.028	0.147	16.822	8.47	0.58	10 600	55
50	30.2	7.86	6.61	0.599	0.034	0.116	16.028	11.72	1.46	700	2
60	30.9	7.50	3.70	1.119	0.029	0.347	19.663	16.98	3.41	1 020	4
70	32.0	7.71	5.98	0.621	0.028	0.144	13.886	10.82	3.72	7 650	65
80	27.6	7.57	6.56	0.554	0.014	0.118	19.398	6.48	3.91	24 200	30
平均值	29.40±2.68	7.92±0.33	6.43±1.21	0.517±0.263	0.028±0.009	0.396±0.842	12.229±6.495	9.54±3.49	1.85±1.55	6 836±7 794	19±25

表 3 养殖期间 3 号池水质变化状况(mg·L⁻¹)

Table 3 Fluctuation of water quality parameters in pond 3 during 80 culture days (mg·L⁻¹)

养殖天数/d	水温/℃	pH	DO	TAN	NH ₃ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	COD _{Mn}	BOD ₅	异养菌数/ cfu·mL ⁻¹	弧菌数/ cfu·mL ⁻¹
0	25.0	8.59	8.42	0.219	0.034	0.706	2.372	9.13	0.46	1 660	3
10	27.0	8.43	7.83	0.226	0.029	0.785	4.225	9.32	1.99	1 453	17
20	26.1	8.29	7.48	0.436	0.040	0.066	7.641	7.84	0.73	15 267	45
30	32.2	7.76	6.49	0.437	0.022	0.054	9.417	9.32	0.79	8 800	26
40	32.2	7.83	6.49	0.404	0.025	0.058	13.646	9.09	1.03	9 433	4
50	30.3	7.83	4.54	0.618	0.033	0.280	22.249	12.29	1.16	7 400	2
60	30.7	7.50	3.78	1.281	0.034	0.383	19.628	22.04	3.22	8 318	7
70	31.7	7.71	5.90	0.676	0.031	0.177	20.017	12.36	4.48	20 500	77
80	26.8	7.68	6.36	0.729	0.021	0.351	21.014	7.89	5.62	48 276	53
平均值	29.10±2.86	7.96±0.38	6.37±1.49	0.558±0.326	0.029±0.006	0.318±0.273	13.357±7.695	11.03±4.44	2.16±1.86	13 456±4 359	25±26

池 pH 分别由初始的 8.36 和 8.59 均降至 7.50。但由于及时泼洒石灰液、调整充气石曝气量与加强排污等方法,使池水 pH 与 DO 的变化范围波动较小,基本均维持在合适范围内,1 号与 3 号池 pH 与 DO 平均值分别为 7.92 与 7.96, 6.43 mg·L⁻¹ 与 6.37 mg·L⁻¹。但在养殖 60 d 时,两池 DO 分别降至 3.70 与 3.78 mg·L⁻¹,同时 TAN、NO₂-N、COD_{Mn} 等也均相应达高值,并高于前后两次检测值,pH 达最低值。此现象与经 60 d 养殖,水中存有较多有机悬浮物,特别是净水网吸附了大量的悬浮物有关。据此当时即对净水网进行清洗,使水质明显得以改进,此从第 70 d 检测的上述指标可得以说明。由此可见,约在养殖 50 d 时应及时清洗净水网片。

在 80 d 养殖期间,试验池水中 TAN 随时间逐渐增高,NO₂-N 则呈波动性变化,但两者检测值均处于对虾生长的安全范围内^[3]。如 1 号池、3 号池 TAN 变化范围分别为 0.231~1.119 mg·L⁻¹ 与 0.219~1.281 mg·L⁻¹。因当地河水 NO₂-N 较高,故 3 号池初始水高达 0.706 mg·L⁻¹,在养殖进行至第 10 d 时,1 号与 3 号试验池 NO₂-N 的积累达到峰值(2.626 和 0.785 mg·L⁻¹),但自第 13 d 挂放预先挂膜的净水网后,NO₂-N 浓度急速下降,且此后均处于较低水平,浓度始终低于 0.5 mg·L⁻¹。1 号与 3 号池 NO₂-N 浓度的变幅分别为 0.030~0.347 mg·L⁻¹ 与 0.054~0.383 mg·L⁻¹。由于池水经暗沉淀与漂白粉精或臭氧处理,藻类甚微。试验结果显示了资料报道^[3]净水网具较强转化氨氮与亚硝基氮的能力。

试验中,NO₃-N 始终呈上升趋势,两池峰值达 19.663 mg·L⁻¹ 与 22.249 mg·L⁻¹。有资料提出^[14],NO₃-N 达 30 mg·L⁻¹ 将影响对虾生长,故两模式应设法进一步降低与控制 NO₃-N 浓度。

当地河水 COD_{Mn} 较高,虽然 3 号池初始水经暗沉淀与漂白粉精处理,但仍高达 9.13 mg·L⁻¹,介于我国地表水Ⅲ与Ⅳ类标准之间,而 1 号池初始水因又经具强氧化能力臭氧处理,其部分有机物转化为 TAN,故其 COD_{Mn} 仅为前者 70.6%,但 TAN 却为 3 号池的 2.2 倍。

由表 2 与表 3 可知,因臭氧的强杀菌力使 1 号试验池微生物量低于 3 号池,1 号池 BOD₅ 平均值为 3 号池的 85.6%也与此有关。1 号池异养菌与弧菌数分别为 700~24 200 cfu·mL⁻¹ 与 0~65 cfu·mL⁻¹,3 号池异养菌与弧菌数分别为 1 453~48 276 cfu·mL⁻¹ 与 2~77 cfu·mL⁻¹。郭平等指出^[11],中国对虾正常塘异养菌与弧菌数的变化范围分别为 52~2.7×10⁴ cfu·mL⁻¹ 与 14~

3.0×10³ cfu·mL⁻¹。可见试验所用臭氧与漂白粉精处理养殖水质均可控制异养菌与弧菌数在安全范围内。

由上述可知,养殖期间,两模式采取的设施与方法均可良好控制试验池水质指标在适合对虾生长的范围。

2.2 试验池养殖效果

80 d 试验池养殖效果列于表 4。由表 4 可知,分别用模式 I 与模式 II 所调控水质的 1 号与 3 号池成活率分别为 44.8%与 42.3%,单位水体产量为 1.18 kg·m⁻³(0.89 kg·m⁻²)与 1.02 kg·m⁻³(0.77 kg·m⁻²),此与裴建明等养殖结果相近^[15],后者以封闭式循环水淡化养殖凡纳滨对虾 80~85 d,单位水体产量 0.742~0.907 kg·m⁻²。肥满度(100 W·L⁻³)常用以表征虾体丰满程度,其主要受养殖环境和饲养条件的影响,且不同生长阶段对应不同的肥满度值。如中国对虾正常的肥满度在体长 5~10 cm 为 1.1,10 cm 以上为 1.2~1.3^[16]。本试验采取两种模式饲养凡纳滨对虾 80 d,肥满度值分别为 1.22(1 号池)和 1.18(3 号池),可见,虽试验放养密度较高,但因水质调控与管理得当,对虾生长状况良好。

表 4 试验池对虾养殖产量状况

Table 4 Summary of shrimp production in experimental ponds

池号	平均体长/ cm	平均体重/ g	单位水体产量		成活率/%	肥满度
			/kg·m ⁻²	/kg·m ⁻³		
1	7.11±0.81	4.40	0.89	1.18	44.8	1.22
3	6.99±0.62	4.03	0.77	1.02	42.3	1.18

由上述可知,采用模式 I 与模式 II 将养殖池水质调控在凡纳滨对虾合适生长状况下,对虾的养殖效果也较好。应指出,因养殖水体仅 2 m³,且试验期间曾有 10 d 的中午持续高温,每日池水约有 3~4 h 温度为 35 ℃,这两点对于虾生长与成活率均会有所影响。

试验结果表明,在不用药、不换水条件下,试验所采用水质调控技术与设备对于开展室内凡纳滨对虾集约化养殖是可行的。鉴于模式 I 采用臭氧杀灭微生物的能力优于模式 II 所用漂白粉精,且对虾生长状况也较模式 II 为好,尚可再增大放养密度,但模式 II 则设施简易,操作简便,成本低,易推广。模式 I 与模式 II 若增设滤器,用以去除水中大量悬浮物,则水环境状况将可得以进一步改善,养殖效果也将更佳。

2.3 试验池的氮收支

2.3.1 氮输入状况

凡纳滨对虾经室内封闭式养殖 80 d,对 1 号与 3

号试验池氮收支状况作估算时,视氮输入途径包含有水层、虾苗及投入饲料的输入(见表 5)。表 5 表明,1 号与 3 号池由水层与虾苗输入氮量仅占总氮输入的 5.4%与 4.7%。通过投喂的饲料贡献氮分别占氮总输入的 94.6%与 95.3%,符合通常养殖塘饵料为输入总氮主要贡献者的特点。如有资料报道^[17-18],室外养虾塘饲料对系统氮估算贡献率约在 90%左右。

表 5 试验池氮的收支状况

Table 5 Nitrogen inputs and outputs in test ponds

池号	氮输入/%			氮输出/%		
	水层	虾苗	饲料	水层	收获成虾	其他
1	5.1	0.3	94.6	50.7	31.9	17.4
3	4.4	0.3	95.3	58.3	25.3	16.4

2.3.2 氮输出状况

估算试验池总氮输出时,视其输出途径包括水层(含排污水)、收获虾及其他(渗漏+水鼠偷食等)。其中“其他”为输入总氮量与输出总氮量之差。表 5 表明,1 号与 3 号池水层(含排污水)输出氮分别占氮总输出的 50.7%与 58.3%,远高于通常室外泥底、不排污虾塘报道水层所占比例的估算值。如李玉全等^[19]工厂化养虾池水层与底泥氮分别占氮总输出的 27.5%~36.3%与 30.9%~43.9%。试验用水虽预经暗沉淀与漂白粉精等严格处理,试验池几乎无藻类,但池中存有大量残饵、粪便及代谢物等污物,曝气作用使污物漂浮在水中,加之从未换水,仅由池底管道排去部分污物,使池底沉积物极微,导致水层氮在氮总输出中占较高比例。但试验估算水层(含排污水)输出氮占氮总输出的比例与李玉全等估算养殖池水层与底泥输出氮总和所占氮总输出的比例(58.4%~80.2%)相近。由此可见,室内封闭式集约化养虾池水层(含排污水)输出氮占氮总输出比例较高,但实际上其近似于通常不排污虾塘所包含水层与沉积物两项氮的贡献总和。

1 号与 3 号池收获虾体氮占氮总输出 31.9%与 25.3%,近于李玉全相应值(14.5%~28.7%),表明饲料的利用转化率较高。此外池水渗漏与水鼠偷食等造成的氮输出量占氮总输出 17.4%与 16.4%。试验结果显示,水层是室内封闭式养虾池氮输出最主要途径,其次是对虾收获。

3 结语

(1)试验提出的两种模式均有效将室内凡纳滨对虾封闭式养殖池水质调控在虾生长可适范围内,其中

模式 I 略优于模式 II,但模式 II 易于推广应用;两种模式若增设过滤器,可有更佳水环境调控与养殖效果。

(2)室内凡纳滨对虾封闭式养殖池饲料投入为氮总输入的主要途径,水层(含排污水)氮输出比例最高,其近似于通常养殖塘水层与沉积物氮输出之和。对于氮的输入与输出,两种模式所得结果近似。

参考文献:

- [1] Naylor R L, Goldburg R J, Primavera J H, et al. Effect of aquaculture on world fish supplies[J]. *Nature*, 2000(405): 1017-1024.
- [2] 丁永良. 工业化养鱼的进展[J]. 水产科技情报, 2001, 28(1): 20-22.
DING Yong-liang. Development of indoor intensive fish culture[J]. *Fisheries Science & Technology Information*, 2001, 28(1): 20-22.
- [3] 臧维玲, 戴习林, 徐嘉波, 等. 室内凡纳滨对虾工厂化养殖循环水调控技术与模式[J]. 水产学报, 2008, 32(5): 749-757.
ZANG Wei-ling, DAI Xi-lin, XU Jia-bo, et al. The technique and mode of regulating-controlling circulating water for indoor industrial culture of *Penaeus vannamei*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2008, 32(5): 749-757.
- [4] Davis D A, Arnold C R. The design, management and production of a re-circulating raceway system for the production of marine shrimp[J]. *Aquacultural Engineering*, 1998(1): 193-211.
- [5] Briggs M S P, Funge-Smith S J. A nutrient budgets of some intensive marine shrimp culture ponds in Thailand[J]. *Aquaculture and Fisheries Management*, 1994(25): 789-811.
- [6] Christopher Jackson, Nigel Preston, Peter J Thompson, et al. Nitrogen budget and effluent nitrogen components at an intensive shrimp farm[J]. *Aquaculture*, 2003(218): 397-411.
- [7] 齐振雄, 李德尚, 张曼平, 等. 对虾养殖池塘氮磷收支的实验研究[J]. 水产学报, 1998, 22(2): 124-128.
QI Zhen-xiong, LI De-shang, ZHANG Man-ping, et al. Experimental studies on nitrogen and phosphorus budgets of shrimp culture pond[J]. *Journal of Fisheries of China*, 1998, 22(2): 124-128.
- [8] 王良臣, 刘修业. 对虾养殖[M]. 天津: 南开大学出版社, 1991: 132-136.
WANG Liang-chen, LIU Xiu-ye. Prawn culture[M]. Tianjin: Nankai University Press, 1991: 132-136.
- [9] 臧维玲. 养鱼水质分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1991: 44-96.
ZANG Wei-ling. Water quality analyses for fish culture[M]. Beijing: Agriculture Press, 1991: 44-96.
- [10] 国家质量技术监督局. 海水分析[S]//海洋监测规范. 北京: 中国标准出版社, 1998: 142-143, 150-162.
State Bureau of Quality and Technology Supervision. Seawater analyses[S]//the specification for marine monitoring. Beijing: China Standard Press, 1998: 142-143, 150-162.
- [11] 郭平, 许美美. 对虾养殖池水域环境细菌的动态变化[J]. 海洋与湖沼, 1994, 25(6): 625-630.
GUO Ping, XU Mei-mei. The bacteriar variation in the water environment of cultured prawn pond[J]. *Oceanologia ET Limnologia Sinica*, 1994, 25(6): 625-630.

- [12] Alabaster J S, Lloyd R. Water quality criteria for freshwater fish[M]. (2nd edit). London: University Press of Cambridge, 1982: 85–87.
- [13] 王广军. 南美白对虾的生物学特性及养殖技术[J]. 水产科技, 2000(1): 17–21.
WANG Guang-jun. Biology characteristic and culture technology of *Penaeus vannamei*[J]. *Fisheries Science & Technology*, 2000(1): 17–21.
- [14] 臧维玲, 戴习林, 罗春芳, 等. 氨、亚硝酸盐和硝酸盐对凡纳滨对虾幼虾的毒性作用[J]. 水产科技情报, 2005, 32(3): 42–46.
ZANG Wei-ling, DAI Xi-lin, LUO Chun-fang, et al. Toxic effects of ammonia, nitrite and nitrate on *Penaeus vannamei*[J]. *Fisheries Science & Technology Information*, 2005, 32(3): 42–46.
- [15] 裴建明, 邓永辉, 曹义虎, 等. 南美白对虾封闭式循环水淡化养殖试验[J]. 江西水产科技, 2001(4): 26–29.
FEI Jian-ming, DENG Yong-hui, CAO Yi-hu, et al. Experiment of closed recirculating desalting culture of *Penaeus vannamei*[J]. *Jiangxi Fishery Science and Technology*, 2001(4): 26–29.
- [16] 王克行. 虾蟹类增养殖学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997: 30–31.
WANG Ke-hang. Multiculture of shrimp and crab[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1997: 30–31.
- [17] 杨逸萍, 王增焕, 孙建, 等. 精养虾池主要水化学因子变化规律和氮的收支[J]. 海洋科学, 1999(1): 15–17.
YANG Yi-ping, WANG Zeng-huan, SUN Jian, et al. The variation law of aqueous chemical factors and the budgets of nitrogen in the intensive ponds[J]. *Marine Sciences*, 1999(1): 15–17.
- [18] Dharendra Prasad Thakur, C Kwei Lin. Water quality and nutrient budget in closed shrimp (*Penaeus monodon*) culture systems[J]. *Aquaculture Engineering*, 2003(27): 159–176.
- [19] 李玉全, 李健, 王清印, 等. 养殖密度对工厂化对虾养殖池氮磷收支的影响[J]. 中国水产科学, 2007, 14(6): 926–931.
LI Yu-quan, LI Jian, WANG Qing-yin, et al. Effect of stocking density on input and output of nitrogen and phosphorus in super-intensive shrimp farming pond[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2007, 14(6): 926–931.