

文章编号: 1674-5566(2014)05-0680-10

## 罗氏沼虾池塘间歇运转人工湿地调控水质效果及其生长特征

戴习林<sup>1</sup>, 鞠波<sup>1</sup>, 臧维玲<sup>1</sup>, 杨明<sup>2</sup>, 张立田<sup>1</sup>, 丁福江<sup>2</sup>

(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:** 兼用塘内微泡增氧机与净水网, 以间歇运转人工湿地生态系统循环处理罗氏沼虾生产性养殖废水, 研究间歇运转湿地调控虾塘水质效果与虾生长特征。由表面流与水平潜流组成的复合人工湿地生态系统(582.2 m<sup>2</sup>)水力负荷 1.03 m/d, 含斜坡区、挺水植物区与蓄水池。养殖周期内(117 d)无换水与用药, 31 d后间歇运转湿地循环处理虾塘水, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 与 COD<sub>Mn</sub> 去除率分别为 66.4%、39.6% ( $P \leq 0.01$ ), TAN 显著去除(45.0%,  $P \leq 0.05$ ), NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 去除率为 33.3%, 维持极低浓度 [(0.006 ± 0.005) mg/L]。试验塘主要水化指标处于罗氏沼虾生长适宜与安全范围, 蓝绿藻得以有效抑制。对照塘遭受蓝绿藻毒性作用, 收获规格与产量(8.70 g, 0.32 kg/m<sup>2</sup>)均低于试验塘(9.51 ~ 10.72 g, 0.38 ~ 0.41 kg/m<sup>2</sup>)。试验建立了表征罗氏沼虾体重与体长、体重和体长分别与养殖时间的 3 组生长方程, 可为制定罗氏沼虾养殖生产计划、调整生产措施以及预估产量提供科学依据。试验结果表明, 在未用药与换水条件下, 兼用塘内简易设施, 间歇运转人工湿地可节省能源, 有效调控虾塘水质, 确保养殖成功。

**研究亮点:** 目前以人工湿地循环处理罗氏沼虾养殖废水的研究较鲜见。研究试验无换水与用药, 兼用塘内简易设施, 以间歇运转湿地调控生产性罗氏沼虾塘水质在生长安全范围, 具有经济可行、节能减排、易管理等优点。试验提出的罗氏沼虾生长方程可为制定养殖生产计划、预估产量与调整养殖措施等提供科学依据。

**关键词:** 罗氏沼虾; 人工湿地; 间歇运转; 水质; 去除率; 生长特征

**中图分类号:** S 954.2

**文献标志码:** A

罗氏沼虾(*Macrobrachium rosenbergii*) 现为我国养殖的主要淡水虾类品种之一, 在水产养殖产业中占有重要地位<sup>[1]</sup>。当前在虾类养殖中基本均采用高密度、高换水率养殖方式<sup>[2-3]</sup>, 养殖过程中所产生的残饵和虾代谢产物, 致使虾塘中积累了大量氮、磷等营养物质<sup>[4]</sup>, 而养殖废水基本不作处理便排入周围水域。可见此类养殖方法既污染养殖水体本身, 疾病频发, 降低虾产量和质量<sup>[5-7]</sup>, 又导致周边水域富营养化, 破坏生态环境<sup>[8]</sup>。虽然工厂化养殖采用循环水处理技术, 能节省土地与水资源、利于水环境保护等, 但净水设备的成本、能耗与维护费用均较高<sup>[9-11]</sup>, 难以普及。人工湿地为一种新型废水处理技术, 通过物理、化学和生物等作用, 可有效去除养殖废水中氮、磷、有机物、悬浮颗粒以及蓝绿藻等<sup>[12-13]</sup>, 且具有构建、运行费用低, 易维护, 节水等优

点<sup>[14-17]</sup>。因此, 近年来国内外均开展了有关湿地循环处理养殖废水的研究<sup>[10-11, 13, 15-18]</sup>, 包括湿地循环处理养虾废水性能、可行性与效果等的研究<sup>[10-11, 13, 16, 19]</sup>及湿地对养殖废水净化再利用与净化效能的研究<sup>[20-21]</sup>等。此外, 为提高养殖技术与水平, 较多研究报道了不同养殖条件下对虾类的生长特征<sup>[22-25]</sup>, 但至今有关罗氏沼虾生长特征研究的报道为数不多, 且年代较早<sup>[26-29]</sup>。有关湿地间歇运转处理规模化罗氏沼虾养殖废水的研究报道迄今未见。本研究利用以往用于凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*) 养殖废水循环处理研究<sup>[11, 16]</sup>的湿地与养殖塘, 在未换水与用药条件下, 探讨了联合塘内简易设施, 以间歇式运转湿地循环处理生产性罗氏沼虾养殖废水的效果, 同时研究了罗氏沼虾生长特征, 提出了多种表征罗氏沼虾生长特征的生长方程, 研究结果将

收稿日期: 2014-03-12 修回日期: 2014-04-24

基金项目: 上海市科学技术委员会重点攻关项目(11391901400); 上海市科技兴农重点攻关项目[沪农科攻字(2010)第1-6号]

作者简介: 戴习林(1969—), 男, 教授, 研究方向为水产养殖与海洋生物学。E-mail: xldai@shou.edu.cn

为利用人工湿地循环处理养殖废水以及罗氏沼虾规模化健康养殖提供科学与实践依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 养殖塘、用水与试验虾

采用上海申漕特种水产开发公司室外 5 号、6 号与 7 号塘(水泥壁与泥底)进行罗氏沼虾生产性养殖试验,其中 5 号、7 号塘为试验塘,6 号塘为对照塘(68.4 m×26.6 m×2.5 m),面积均为 0.18 hm<sup>2</sup>;养虾用水为当地河水经漂粉精消毒处理;虾苗由公司提供,放养密度为 59.41×10<sup>4</sup>尾/hm<sup>2</sup>(59.41 尾/m<sup>2</sup>),平均体长为(0.65±0.11) cm,体重为(3.9±1.3) mg。

### 1.2 养殖塘设施与日常管理

虾塘安置 0.75 kW 微泡曝气增氧机(4 台/塘),将气泵送入的空气以微气泡(1~3 mm)释放水中,形成乳浊状水流,4 台增氧机联合作用形成环流。三口塘均挂放 5.25 m×0.90 m 水质净化作用良好的人工净水网(2 片/100 m<sup>2</sup>)<sup>[30]</sup>。

定时定点投喂人工配合饲料(3 次/d),投饵量据天气与残饵等情况及时调节。养殖周期内(117 d)无换水与用药,仅添加蒸发与渗漏损失水量。视天气与水质等情况适时开关增氧机。视水质情况,自 31 d 起分别启动湿地系统 13 次循环处理 5 号与 7 号塘水,对照塘仅以塘内设施调控。

### 1.3 人工湿地生态系统组成与废水处理工艺流程

#### 1.3.1 人工湿地生态系统组成

由表面流(FWS)与水平潜流(SF)组成的复合型人工湿地系统建于闲置梯形低洼地(图 1),符合人工湿地构建要求<sup>[31]</sup>,先前湿地曾多次用于对虾养殖废水处理研究<sup>[11,16]</sup>,本试验前再次进行了维护。湿地生态系统为梯形(上底 7.3 m、下底 24.0 m,高 37.2 m,面积 582.2 m<sup>2</sup>),包含斜坡区、挺水植物区与蓄水池,面积比为 1.0:2.3:1.4。

斜坡区(坡度 3%):粘土泥底加铺 25 cm 厚碎石作基质(孔隙率 0.442,下同),植被植物有红蓼(*Polygonum orientale*)、喜旱莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)、合萌(*Aeschynomene indica*)等(平均密度 > 50 株/m<sup>2</sup>)。

挺水植物区:粘土泥底加铺基质 14 cm 厚碎石,并植被香蒲(*Typha angustifolia*, > 40 株/m<sup>2</sup>)

与美人蕉(*Canna indica*, > 4 株/m<sup>2</sup>)。

蓄水池:水深 1.6 m 泥池,用于蓄存处理水。池中挂放 36 张净水网,水中植物有金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*),水面浮箱植物有美人蕉,并布放 36 尾鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)鱼种。

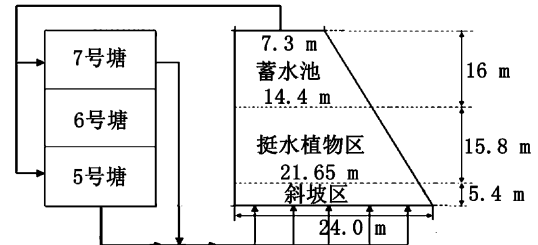


图 1 人工湿地生态系统工艺流程示意图

Fig. 1 The diagram of system structure and technological flow of constructed wetlands ecosystem  
箭头代表水流方向。

#### 1.3.2 人工湿地废水处理工艺流程

利用潜水泵(2.2 kW)将试验塘水由管道( $\Phi = 10$  cm)送至斜坡区上缘横置的进水管(湿地进水口),水从开具的管孔( $\Phi = 10$  mm)流出潜流入该区基质、经挺水植物区、渗透碎石堤(厚度 90~100 cm)进入蓄水池,再由置于池底潜水泵(2.2 kW)将蓄存处理水经管道(湿地出水口)送回试验塘,如此形成试验塘与湿地生态系统间水处理循环流程(图 1)。在湿地进、出水管口以管道流量计控制流量为 25 m<sup>3</sup>/h,每次循环水量约占虾塘总水量的 22%。湿地系统水力负荷(HLR)为 1.03 m/d,水力停留时间(HRT)为 0.63 d。

### 1.4 养殖塘水质状况与人工湿地净水效果测定

#### 1.4.1 养殖塘水质状况测定

养殖周期内每 7 天于虾塘长边中点、离塘梗约 1.5 m,采取水面下 30~40 cm(水深 < 1.2 m)处水样或水面下 10 cm、离底 5 cm 两处水样(水深 ≥ 1.2 m),检测水温、pH、DO、总氨氮(TAN)、亚硝基氮(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N)、硝基氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、活性磷(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P)、化学需氧量(COD<sub>Mn</sub>)等指标。

#### 1.4.2 湿地生态系统净水效果测定

在循环处理试验塘养殖废水时,分别取湿地系统进、出口水样检测三态氮(TAN、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P、COD<sub>Mn</sub>等指标。

### 1.5 试验虾样采集

自试验开始,每 14 天分别随机采集三口塘虾样(15 pcs/塘),检测体长、体重。虾体长增长率、体重增重率计算公式如下:

$$R_L = (L_n - L_{n-1}) / L_{n-1} \times 100\% \quad (1)$$

$$R_W = (W_n - W_{n-1}) / W_{n-1} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $n(1 \leq n \leq 10)$  为检测次数; $R_L$  为体长增长率; $L_n, L_{n-1}$  分别为第  $n$  与  $(n-1)$  次检测体长; $R_W$  为体重增重率; $W_n, W_{n-1}$  分别为第  $n$  与  $(n-1)$  次检测体重。

### 1.6 水质指标测定方法

水质指标测定方法参照文献[32-33]。DO:WTW 多参数水质测定仪(德国产);TAN:蔡氏比色法; $\text{NO}_2^-$ -N:重氮偶氮比色法; $\text{NO}_3^-$ -N:锌镉还原-重氮偶氮比色法; $\text{PO}_4^{3-}$ -P:钼蓝比色法;COD<sub>Mn</sub>:碱性高锰酸钾法。

非离子氨氮( $\text{NH}_3$ -N)浓度由总氨氮(TAN)浓度通过下式计算求得<sup>[34]</sup>:

$$C_{\text{NH}_3\text{-N}} = C_{\text{TAN}} \times f_{\text{NH}_3\text{-N}} \quad (3)$$

$$f_{\text{NH}_3\text{-N}} = 1 / [1 + 10^{(\text{pKa} - \text{pH} + \text{pYH}^+)}] \quad (4)$$

使用 SPSS 13.0 统计软件对试验数据进行单因素方差分析(One-way ANOVA)、回归分析等。

## 2 结果与分析

### 2.1 人工湿地生态系统处理养虾废水效果

养殖周期内(117 d),无换水与用药,仅添加蒸发与渗漏损失水量。养殖 31 d 至结束,根据水质与虾状况,启动 FWS-SF 湿地生态系统对 5、7 号试验塘分别进行 13 次循环处理。表 1 为其中 11 次湿地运行时进出口水质指标平均值。表 1 表明,虽然湿地以间歇方式运转,每次仅约处理全塘水量 22%,流量(25 m<sup>3</sup>/h)与 HLR(1.03 m/d)又较高,但对营养盐与有机物仍有良好去除作

用,三态氮(TAN、 $\text{NO}_2^-$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N)与 COD<sub>Mn</sub> 均呈较高去除率(45.0%、33.3%、66.4%与 39.6%),其中  $\text{NO}_3^-$ -N 与 COD<sub>Mn</sub> 极显著去除( $P \leq 0.01$ ),TAN 显著去除( $P \leq 0.05$ ), $\text{NO}_2^-$ -N 去除率为 33.3%,维持极低浓度(0.006 mg/L),磷酸盐去除率为 35.4%。进水口各营养盐浓度均较低,故显示较低去除速率:TAN 为 0.171 g/(m<sup>2</sup>·d)、 $\text{NO}_2^-$ -N 为 0.003 g/(m<sup>2</sup>·d)、 $\text{NO}_3^-$ -N 为 0.077 g/(m<sup>2</sup>·d)、 $\text{PO}_4^{3-}$ -P 为 0.018 g/(m<sup>2</sup>·d),较高浓度 COD 去除速率高达 8.760 g/(m<sup>2</sup>·d)。可能因硝化作用,使 pH 显著下降 0.67( $P \leq 0.05$ ),因有机物氧化耗氧<sup>[13,35]</sup>,致使湿地出水口 DO 极显著降低 1.27 mg/L( $P \leq 0.01$ )。

### 2.2 试验期间养殖塘水质变化特点

表 2 为养殖周期内试验塘与对照塘水化学指标测定平均值。三口塘水温相近,平均 26.4~26.7 °C;pH 为 8.50~8.84,6 号与 7 号塘存显著差异( $P \leq 0.05$ );溶解氧丰富(7.47~8.16 mg/L),其中 5 号塘尤高,显著高于 6 号塘( $P \leq 0.05$ );试验塘 TAN(0.156~0.289 mg/L)低于对照塘(0.322~0.358 mg/L),5 号塘显著低于对照塘( $P \leq 0.05$ ),两试验塘非离子氨氮( $\text{NH}_3$ -N)显著低于对照塘( $P \leq 0.05$ );养殖期间,虾塘  $\text{NO}_2^-$ -N 维持低浓度,多数测定值低于 0.10 mg/L,三口塘平均值为 0.01~0.04 mg/L;当地河水有机物含量较高,虾塘初始 COD<sub>Mn</sub> 均高于 16 mg/L,试验塘平均为 12.26~17.05 mg/L,对照塘为 15.46~18.48 mg/L,7 号塘显著低于 6 号塘。养殖周期内,三口塘主要水化指标均处于罗氏沼虾生长的适宜范围<sup>[36-37]</sup>。另因三虾塘藻类较多并挂放净水网,尤其是对照塘约在 60 d 时,水面出现蓝绿藻,并日渐增多几乎覆盖虾塘大部分水面,其虽未经湿地循环处理,氮磷营养盐含量也较低,因此

表 1 通过人工湿地水质指标的平均处理结果 (n=11)

Tab.1 Mean treatment results for various parameters of water quality by the FWS-SF wetlands (n=11)

水质指标	浓度/(mg/L)		去除率/%	去除速率/[g/(m <sup>2</sup> ·d)]
	进水口	出水口		
pH	8.88 ± 0.54 <sup>A</sup>	8.21 ± 0.31 <sup>B</sup>		
DO	8.07 ± 0.97 <sup>A</sup>	6.80 ± 0.88 <sup>B</sup>		
TAN	0.369 ± 0.190 <sup>a</sup>	0.203 ± 0.064 <sup>b</sup>	45.0	0.171
$\text{NO}_2^-$ -N	0.009 ± 0.008 <sup>a</sup>	0.006 ± 0.005 <sup>a</sup>	33.3	0.003
$\text{NO}_3^-$ -N	0.113 ± 0.078 <sup>A</sup>	0.038 ± 0.032 <sup>B</sup>	66.4	0.077
$\text{PO}_4^{3-}$ -P	0.048 ± 0.053 <sup>a</sup>	0.031 ± 0.024 <sup>a</sup>	35.4	0.018
COD <sub>Mn</sub>	21.49 ± 6.64 <sup>A</sup>	12.98 ± 2.42 <sup>B</sup>	39.6	8.760

注:同一行数据不含相同上标字母表示存在显著差异,大写字母为极显著( $P \leq 0.01$ ),小写字母为显著( $P \leq 0.05$ )。

三口塘营养盐浓度均处于较低水平,试验塘 DO、N)、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 均在罗氏沼虾生长安全范围<sup>[38-39]</sup>, TAN 与 COD<sub>Mn</sub>均优于对照塘,三口塘 TAN(NH<sub>3</sub>- 但蓝绿藻毒性较严重地影响了对照塘虾的生长。

表 2 养殖周期内(117 d)养殖塘水质指标平均值  
Tab.2 Mean values of water quality in culture ponds during the 117 d culture period

指标	塘号		
	5	6	7
温度(表层/底层)/°C	(26.6 ± 3.1/26.4 ± 2.8) <sup>a</sup>	(26.7 ± 3.0/25.5 ± 2.8) <sup>a</sup>	(26.6 ± 3.0/26.4 ± 2.5) <sup>a</sup>
pH(表层/底层)	(8.64 ± 0.32/8.66 ± 0.14) <sup>ab</sup>	(8.69 ± 0.28/8.84 ± 0.11) <sup>a</sup>	(8.50 ± 0.33/8.67 ± 0.14) <sup>b</sup>
DO(表层/底层)/(mg/L)	(8.16 ± 1.26/8.16 ± 1.46) <sup>a</sup>	(7.51 ± 0.98/7.47 ± 1.15) <sup>b</sup>	(7.90 ± 0.79/8.10 ± 1.10) <sup>ab</sup>
COD <sub>Mn</sub> (表层/底层)/(mg/L)	(17.00 ± 4.74/13.22 ± 2.27) <sup>ab</sup>	(18.48 ± 4.04/15.46 ± 1.63) <sup>a</sup>	(16.32 ± 5.18/12.26 ± 2.23) <sup>b</sup>
TAN(表层/底层)/(mg/L)	(0.216 ± 0.151/0.153 ± 0.060) <sup>B</sup>	(0.322 ± 0.168/0.358 ± 0.154) <sup>A</sup>	(0.289 ± 0.151/0.247 ± 0.124) <sup>AB</sup>
NH <sub>3</sub> -N(表层/底层)/(mg/L)	(0.049 ± 0.061/0.032 ± 0.016) <sup>B</sup>	(0.073 ± 0.051/0.096 ± 0.025) <sup>A</sup>	(0.043 ± 0.025/0.054 ± 0.031) <sup>B</sup>
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N(表层/底层)/(mg/L)	(0.018 ± 0.031/0.005 ± 0.005) <sup>a</sup>	(0.027 ± 0.046/0.010 ± 0.010) <sup>a</sup>	(0.042 ± 0.060/0.016 ± 0.008) <sup>a</sup>
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N(表层/底层)/(mg/L)	(0.207 ± 0.238/0.026 ± 0.027) <sup>B</sup>	(0.264 ± 0.273/0.094 ± 0.084) <sup>AB</sup>	(0.390 ± 0.365/0.380 ± 0.407) <sup>A</sup>
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P(表层/底层)/(mg/L)	(0.051 ± 0.049/0.018 ± 0.027) <sup>a</sup>	(0.040 ± 0.043/0.006 ± 0.006) <sup>a</sup>	(0.047 ± 0.034/0.024 ± 0.014) <sup>a</sup>

注:同一行数据不含相同上标字母表示存在显著差异,大写字母为极显著(P ≤ 0.01),小写字母为显著(P ≤ 0.05)。

2.3 养殖周期内罗氏沼虾生长状况

2.3.1 体重与体长呈幂函数关系

将养殖周期内所测三口塘罗氏沼虾体重(W, g)与体长(L, cm)作散点图(图2),发现三口塘罗氏沼虾体重与体长关系呈幂函数曲线形式,经回归分析得到体重与体长相关方程式如下:

5号塘  $W = 0.0152L^{3.2567} \quad R^2 = 0.9993$  (5)

6号塘  $W = 0.0162L^{3.2398} \quad R^2 = 0.9996$  (6)

7号塘  $W = 0.0160L^{3.2824} \quad R^2 = 0.9991$  (7)

(5) ~ (7) 方程决定系数(R<sup>2</sup> = 0.9991 ~ 0.9996)表明,三口塘罗氏沼虾体重与体长的关系均适合方程  $W = aL^b$ ,经显著性检验,均在 α = 0.01 水平极显著相关。方程符合甲壳类生物体重与体长间存在  $W = aL^b$  的相关特点<sup>[23]</sup>。图2表明,在早期,特别是 L < 4 cm(约 60 d)时,体重增重速度远低于体长,此后体重转为以较快速度增长,符合一般虾的生长特征<sup>[23,26-27,29]</sup>。

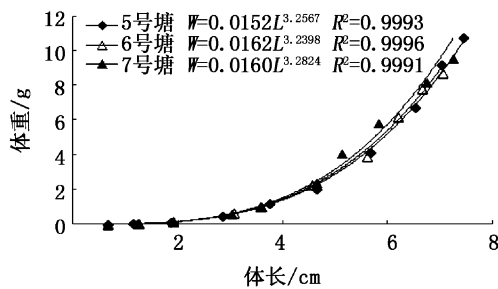


图 2 5号、6号和7号塘罗氏沼虾体重与体长的关系曲线

Fig.2 Relationship between weight and length of Macrobrachium rosenbergii in pond 5, 6 and 7

2.3.2 体重与养殖天数的关系

将体重(W, g)与养殖天数(d)作散点图(图3),体重与养殖天数间拟合为与养殖状况更相符的指数函数方程,体重随时间的变化呈现先平缓后上升的曲线,相关方程如下:

5号塘  $W = 0.0127e^{0.0639d} \quad R^2 = 0.9251$  (8)

6号塘  $W = 0.0163e^{0.0604d} \quad R^2 = 0.9058$  (9)

7号塘  $W = 0.0155e^{0.0612d} \quad R^2 = 0.9119$  (10)

将方程(8) ~ (10)分别作显著性检验,均在 α = 0.01 水平极显著相关。曾报道过罗氏沼虾体重与养殖时间之间有 VON BERTALANFFY 指数函数<sup>[25]</sup>与回归关系<sup>[26]</sup>等。图2表明,约 57 d 内,体重随时间变化极为缓慢,其后体重生长明显加快,由方程(8) ~ (10)可知,当 72 d 后,两试验塘体重均超过对照塘。

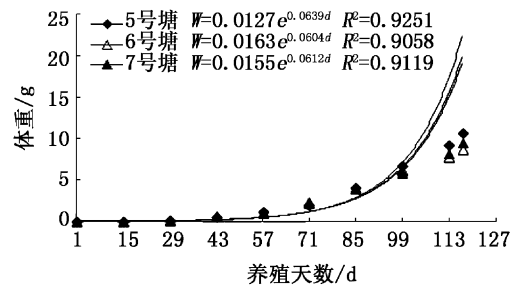


图 3 5号、6号和7号塘罗氏沼虾体重与养殖天数的关系曲线

Fig.3 Relationship between body weight and culture day of Macrobrachium rosenbergii in pond 5, 6 and 7

为了解体重增重速度随养殖天数的变化规

律,微分方程(4)~(6),可得以下体重增重速度( $V_w$ , g/d)与养殖天数( $d$ , d)间的关系方程,决定系数同(4)~(6)方程:

$$5 \text{ 号塘 } V = 0.0008e^{0.0639d} \quad (11)$$

$$6 \text{ 号塘 } V = 0.0010e^{0.0604d} \quad (12)$$

$$7 \text{ 号塘 } V = 0.0010e^{0.0612d} \quad (13)$$

将养殖天数代入方程(11)~(13)可得相应体重增重速度( $V_w$ ),将其与养殖天数作相关曲线图,两者呈指数函数相关(图4),表明在试验体重范围内,体重增重速度随养殖时间呈指数函数变化,即体重增重速度随时间异速递增。

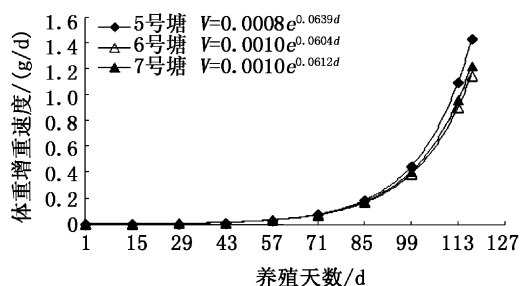


图4 5号、6号和7号塘罗氏沼虾体重增重速度与养殖天数的关系曲线

Fig. 4 Relationship between growth rate of body weight and culture day of *Macrobrachium rosenbergii* in pond 5, 6 and 7

联合图3、图4与方程(7)~(9)可发现,在1~57 d内,三口塘体重增重速度相近,且均极为缓慢,此后增长速度逐渐增大。约自72 d至养殖结束,5、7号塘体重增重速度始终大于6号塘,且随时间差异逐渐增大。特别在60余天时,6号塘水面蓝绿藻明显增多,并日趋严重,尽管经人工打捞,仍无法有效抑制。虽然在养殖周期内,三口塘主要水化指标均在虾生长安全范围内,但后期6号塘虾遭受蓝绿藻的毒性作用,摄食量日渐下降,体重增加低于试验塘,以致最终试验收获虾规格与产量等生产指标均低于试验塘。试验塘31 d起,间歇启动湿地循环处理塘水,蓝绿藻得以抑制,能够确保虾正常生长。

### 2.3.3 体长与养殖天数的关系

将虾体长( $L$ , cm)与养殖天数( $d$ , d)作散点图(图5),发现体长与养殖天数之间呈线性相关,相关方程如下:

$$5 \text{ 号塘 } L = 0.0608d + 0.3273 \\ R^2 = 0.9959 \quad (14)$$

$$6 \text{ 号塘 } L = 0.0567d + 0.4867 \\ R^2 = 0.9945 \quad (15)$$

$$7 \text{ 号塘 } L = 0.0563d + 0.4600 \\ R^2 = 0.9954 \quad (16)$$

将方程(14)~(16)分别作显著性检验,各方程均在 $\alpha = 0.01$ 水平极显著。虾体长与养殖时间的线性关系与资料<sup>[26,28-29]</sup>报道一致,不同于其他罗氏沼虾呈幂函数<sup>[27]</sup>、凡纳滨对虾呈二次函数<sup>[25,27]</sup>等的非线性关系报道。在养殖早期,体重增加慢于体长(图2)。联用(11)~(13)  $V_w$ - $d$ 方程与(14)~(16)  $L$ - $d$ 方程,可算得约88~89 d后,体重增重速度超过体长增长速度。图5显示,三口塘虾体长随养殖天数的变化较接近,5号塘略优,不同于体重生长随时间的变化规律。

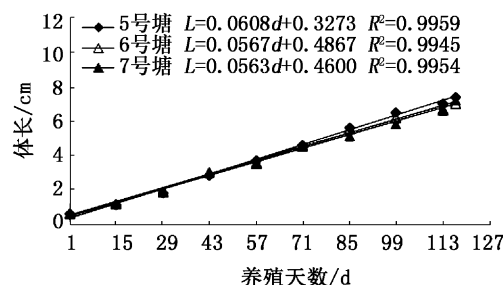


图5 5号、6号和7号塘罗氏沼虾体长随养殖天数的变化

Fig. 5 Relationship of body length and culture days of *Macrobrachium rosenbergii* in pond 5, 6 and 7

## 2.4 养殖效果

5号、6号与7号塘罗氏沼虾经117 d的养殖效果列于表3。约自60 d起,6号塘水面蓝绿藻日渐增多,以致大面积水面犹如泼洒蓝绿色油漆,为减少经济损失,曾尽力打捞去除,但仍无法控制发展,以致影响虾的生长与成活率;两试验塘与6号塘左右相邻,水面也曾出现少量蓝绿藻,但由于湿地的循环处理,两塘蓝绿藻繁衍得以控制。表3表明,收获罗氏沼虾各项指标均显示5号、7号塘优于6号塘。两试验塘收获虾平均体长与体重均大于对照塘,5号塘虾平均体重显著大于6号与7号塘( $P \leq 0.05$ )。5号、7号塘虾周增重量(0.65 g/w、0.57 g/w)为6号塘(0.52 g/w)1.3倍与1.1倍,故6号塘产量仅分别为5号、7号塘的78%、84%。同时,两试验塘虾成活率与饵料系数也好于对照塘。可见,在养殖周期内,联用塘内简易设施,间歇启动湿地循环处理

生产性养殖塘水可有效改进水质,确保养殖效果。

表 3 3 口养殖塘罗氏沼虾养殖效果

Tab. 3 Culture results of *Macrobrachium rosenbergii* in pond 5, 6 and 7

塘号	养殖天数 /d	平均体长 /cm	平均体重 /g	周增长量 /cm	周增重量 /g	单位水体产量		成活率 /%	饵料 系数	平均肥满度 /(g/cm)
						/(kg/m <sup>2</sup> )	/(kg/m <sup>3</sup> )			
5	117	7.45 ± 1.19	10.72 ± 4.90 <sup>a</sup>	0.41	0.65	0.41	0.34	63.6	1.57	1.44
6	117	7.06 ± 1.17	8.70 ± 4.42 <sup>b</sup>	0.39	0.52	0.32	0.27	61.8	1.63	1.23
7	117	7.25 ± 1.36	9.51 ± 4.92 <sup>b</sup>	0.40	0.57	0.38	0.32	66.4	1.61	1.31

注:同一列数据上标不含有相同字母表示存在显著差异( $P \leq 0.05$ )。

### 3 讨论

#### 3.1 间歇运转人工湿地生态系统调控罗氏沼虾塘水质效果

养殖周期内,联用塘内简易设施,以 FWS-SF 人工湿地生态系统间歇循环处理养虾废水,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N(66.4%)与 COD<sub>Mn</sub>(39.6%)得以极显著去除( $P \leq 0.01$ ),TAN(45.0%)显著去除( $P \leq 0.05$ ),使养殖周期内试验塘有害物质 TAN、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 浓度均维持在罗氏沼虾生长安全范围<sup>[38-39]</sup>:TAN(NH<sub>3</sub>-N)为 0.153 ~ 0.289(0.032 ~ 0.054) mg/L,NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 为 0.005 ~ 0.042 mg/L。COD<sub>Mn</sub>基本维持在低于初始值范围:12.26 ~ 17.00 mg/L。上述结果表明,湿地间歇运转也具有连续运转时处理废水的功能特点<sup>[10,12-13,15,40]</sup>。此特点显示试验湿地存有较好氨化、硝化与反硝化作用:废水通过湿地,氨化作用使 COD<sub>Mn</sub>显著下降,但 COD<sub>Mn</sub>的直接与间接转化产物 TAN、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 却并未因此而积累,湿地存有的硝化作

用及时将 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 转化为 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N,而后者不仅无相应的积累,反而被极显著去除,显示湿地同时存有较强的反硝化作用,使 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 发生脱氮反应而被去除<sup>[10-11,13,16,41]</sup>。这一特点与本试验之前曾应用该湿地处理凡纳滨对虾养殖废水的试验结果相一致<sup>[11,16]</sup>。试验周期内,养虾废水多种指标获得良好的处理效果也表明,湿地对污染物的去除是吸附、沉淀、氨化、硝化与反硝化等多种作用的综合结果,其中硝化与反硝化作用是去氮的主要途径<sup>[10-11,13,16,42]</sup>。资料<sup>[7,10-11,16,20,43-44]</sup>指出,湿地去除污染物的性能主要与 HLR 与污染物浓度有关,湿地水力负荷升高,污染物负荷增大,致使去除率降低,去除速率增大,但湿地承受能力有限度,当去除速率达最高值后,则随污染物负荷增大而降低。表 4 表明,本试验处理废水 TAN、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度与湿地 HLR 均低于之前使用该湿地时的相应值<sup>[16]</sup>,故污染物去除率较前试验更高,但去除速率则较之为低。

表 4 本试验与文献[16]人工湿地循环处理养殖废水效果比较

Tab. 4 Comparison of removal percentage and removal rates of pollutants in the overall constructed wetlands for treating the aquaculture wastewater in this study and in literature

水质指标	本试验(HLR1.03 m/d)				臧维玲等(HLR1.65 m/d) <sup>[16]</sup>			
	浓度/(mg/L)		去除百分率	去除速率	浓度/(mg/L)		去除百分率	去除速率
	进水口	出水口	/%	/[g/(m <sup>2</sup> ·d)]	进水口	出水口	/%	/[g/(m <sup>2</sup> ·d)]
TAN	0.369	0.203	45.0	0.171	0.591	0.385	37.9	0.307
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	0.009	0.006	33.3	0.003	0.794	0.614	22.7	0.227
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	0.113	0.038	66.4	0.077	2.359	2.171	8.0	0.450
COD <sub>Mn</sub>	21.49	12.98	39.6	8.760	19.06	16.27	14.7	3.430

试验中三态氮浓度仅分别为臧维玲等<sup>[16]</sup>试验的 62.4%、1.1% 与 4.8%,仅 COD<sub>Mn</sub>高出 12.7%。因此湿地对三态氮的去除率(33.3% ~ 66.4%)均高于后者(8.0% ~ 37.9%),去除速率则均低于后者,特别是浓度极低的 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 去除

速率仅为后者的 1.3%。据两次试验的三态氮浓度、处理废水流量及湿地面积等可算得试验与臧维玲等<sup>[16]</sup>先后使用该湿地三态氮负荷率为 0.506 g/(m<sup>2</sup>·d)、6.178 g/(m<sup>2</sup>·d),相应去除速率总和分别为 0.251 g/(m<sup>2</sup>·d)与 0.984 g/(m<sup>2</sup>·d)。

藏维玲等<sup>[16]</sup>三态氮负荷率为本试验的 12 倍多,去除速率为本试验的 3.9 倍。但应指出,虽然藏维玲等试验<sup>[16]</sup>  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  负荷率 $[31.449 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})]$ 为本试验 $[22.135 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})]$ 的 1.4 倍,但其去除速率仅为本试验的 39.2%。此可能为  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  负荷率过高已超过湿地承受能力所致。LIN 等<sup>[13]</sup> 试验湿地对  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  的去除也出现类似情况,其认为是  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  负荷率过高之因。由上述可知,判断湿地污染物去除效果应综合分析污染物浓度、去除率与去除速率等水平。试验处理废水三态氮浓度较低,尽管去除速率较低,但呈现较高去除率,以致在养殖周期内湿地可有效维持 5 号、7 号虾塘水化指标在低值、虾生长安全范围内<sup>[38-39]</sup> (表 2)。多次试验<sup>[11,16,45]</sup> 均证明虾塘内放置微泡曝气增氧机与人工净水网可确保塘水溶氧丰富并良好控制主要水化指标在虾生长安全范围内。但 6 号塘因蓝绿藻的毒性作用影响虾的生长、成活率与虾体光洁度,最终产量仅为试验塘平均产量 84%。试验湿地主要植被为香蒲,有关研究<sup>[46]</sup> 曾指出,湿地植被香蒲对蓝绿藻具较强抑制作用和较高去除率,可有效去除氮、磷、有机物和病原微生物等。本试验与以前试验<sup>[11,16]</sup> 先后所使用的同一湿地均显示了这一特点。可见在养殖周期内,联合塘内设施,湿地以间歇方式运转可以有效改进虾塘水质,维持虾塘水质在合适范围,并节省能源。

### 3.2 养殖试验塘罗氏沼虾生长特征

据试验结果建立了表征罗氏沼虾生长特征的 3 组生长方程:  $W$ - $L$ 、 $W$ - $d$  与  $L$ - $d$  的相关方程,其中  $W$ - $L$  间呈幂函数关系 ( $W = aL^b$ ), 与诸多关于罗氏沼虾<sup>[26-29]</sup> 与对虾<sup>[24-25,45,47]</sup> 生长研究报告相一致,该方程为研究虾类生长特征的重要方程<sup>[47]</sup>,其综合、定量描述了虾生长过程中体重与体长生长的变化特点与规律,普遍被用于分析与研究养殖过程中虾体重与体长的生长状况,据此可科学地调整养殖措施,如布苗密度、饵料投喂种类与数量的确定以及水环境管理改进等。虽然式中参数  $b$  至今尚无统一生物学定义,但  $b$  具有重要的生物学意义<sup>[23-24,47-49]</sup>: 据  $b$  值可了解  $W$  与  $L$  的生长状况、判断虾是否处于等速生长状态,即  $W$  与  $L$  是否按照同比例增加。ARANEDA 等<sup>[24]</sup> 将参数  $b$  称为等速生长指数,认为仅在  $b = 3$  时,生长是等速的,否则均为异速生长。试验塘

$b$  值 (3.2398 ~ 3.2824) 均大于 3, 系异速生长。养殖种类、生长期、密度、环境等的差异均会影响  $b$  值的大小<sup>[24,47]</sup>, 通常成虾  $b$  值接近或大于 3<sup>[24,26-28,45,47]</sup>。试验塘  $b$  大于对照塘, 显示试验塘虾体重增加强度更强于体长。试验塘养殖密度分别为周智勇等<sup>[26]</sup> 与翁寿锦等<sup>[27]</sup> 的 2 倍与 3 倍, 此两者初始体长为试验的 4.8 倍与 3.1 倍, 养殖时间与环境也有较大差异, 以致使  $W$  与  $L$  幂函数方程中  $b$  值有所不同: 5 号塘:  $W = 0.0152 L^{3.2567}$ ; 周智勇等<sup>[26]</sup>:  $W = 0.0194 L^{3.1426}$ ; 翁寿锦等<sup>[27]</sup>:  $W = 0.0347 L^{2.9604}$ , 但三方程均表征了罗氏沼虾生长过程中  $W$  与  $L$  相似的变化特点。

图 2 ~ 图 5 与方程 (1) ~ (12) 均表明, 虾在不同生长阶段体长与体重生长状况不同, 特别是体重呈明显地异速增长特点, 此与资料<sup>[26-27]</sup> 报道相似。在虾生长前期 60 d 内, 三口塘试验虾体长增长速度远快于体重, 此后体重转为快速增长, 因此在养殖约两个月后应适当增加投饵量, 提高饵料质量和提供良好的养殖环境以满足虾快速生长的需求。图 3 与图 4 表明, 在前约 57 d 期间, 三口塘体重增重速度较接近, 但因自 31 d 起启动湿地循环处理试验塘水质, 有效控制蓝绿藻增长, 而 6 号塘在 60 余天时水面开始出现大量蓝绿藻, 因此在约 71 d 后试验塘虾体重增重速度超过对照塘, 并随时间延长差异继续增大, 以致最终试验塘收获虾各项生产指标均优于对照塘。

由于多种因素 (种类、生长期、密度、水环境、底质、饵料投喂方法等) 影响养殖过程中虾体重与体长生长状况<sup>[22-25,29,47]</sup>, 因而以往报道<sup>[25-27]</sup> 有多种形式方程定量描述体重随时间生长变化呈现不同形式曲线, 如周智勇等<sup>[26]</sup> 与翁寿锦等<sup>[27]</sup> 养殖罗氏沼虾分别采用方程为  $W = aT^b$  与  $W = a[1 - e^{-b(t+c)}]^3$ , 再如查广才等<sup>[25]</sup> 与谢仁政等<sup>[50]</sup> 分别以低盐度与高位池养殖凡纳滨对虾, 各自采用 BOLTZMANN 方程与 VON BERTALANFFY 方程, ARANEDA 等<sup>[24]</sup> 仅以折线图定性表示体重随时间生长变化, 本试验提出的指数函数曲线图与周智勇等<sup>[26]</sup> 相近。尽管因品种、生长期与养殖条件等的差异导致有多种形式方程定量描述体重随时间生长变化, 但上述各类方程均显示养殖周期内体重增重速度随时间而变, 早期体重增重较缓慢, 约 43 ~ 57 d 后则增长加快。如周智勇等<sup>[26]</sup> 养殖罗氏沼虾密度为 30

ind./m<sup>2</sup>,  $W-T$  方程:  $W = 0.5766T^{2.2913}$  ( $T = 1 \sim 5$  个月,  $0.61 \leq W \leq 21.50$  g), 其  $W-T$  图显示, 约 60 d 后体重以较快速度增长, 养殖 90 ~ 120 d 实际平均增重速度为 60 d 的 2.5 ~ 3.1 倍。试验养殖罗氏沼虾 117 d, 密度为 59 ind./m<sup>2</sup>, 5 号塘  $W-d$  方程:  $W = 0.0127e^{0.0639d}$  ( $1 \leq d \leq 117$ ), 养殖 57 d 后体重增重速度加快(见图 4), 85 ~ 117 d 平均体重增重速度  $V$  为 57 d 的 2.7 ~ 5.4 倍。虽然试验与周智勇等<sup>[26]</sup> 养殖条件有较大差异, 试验虾增重速度高于周智勇等<sup>[26]</sup>, 但两者  $W-d$  所表征的体重随时间生长变化特点基本一致。

同样原因, 体长随时间生长变化也是以多种形式方程描述, 如罗氏沼虾有线性方程<sup>[26,29]</sup> 或幂函数方程<sup>[27]</sup>, 凡纳滨对虾有二次曲线方程<sup>[25]</sup> 或线性方程<sup>[47]</sup> 或幂函数方程<sup>[50]</sup>, 试验提出了线性方程。DALL 等指出以线性函数足以描述对虾幼虾体长随时间生长变化, 还认为因生长条件等的差异, 各类方程的生长参数不能直接进行比较<sup>[47]</sup>。因此应该据养殖实际条件提出相应的表达体重、体长生长变化特点的方程。利用  $L-d$  方程可了解虾的生长及估计虾的养殖产量<sup>[25,51]</sup>。以上表明, 虾类养殖可据三组方程设计养殖方案, 了解、预估养殖过程中体重与体长生长变化特点及产量, 据此相应调整养殖方案与措施。可见 3 种生长方程 ( $W-L$ 、 $W-d$ 、 $L-d$ ) 具有重要的实践意义与应用价值。

#### 参考文献:

- [1] 陈马康. 罗氏沼虾养殖的现状和前景[J]. 科学养鱼, 2000(8): 10, 12.
- [2] BRIGGS M R P, FVNGE-SMITH S J. A nutrient budget of some intensive marine shrimp ponds in Thailand [J]. Aquaculture Research, 1994, 25(8): 789 - 811.
- [3] PHILLIPS M J, LIN C K, BERERIDGE M C M. Shrimp culture and the environmental-lessons from the World's most rapidly expanding warm water aquaculture sector [J]. Environment and Aquaculture in Developing Countries, ICLARM Conference Proceeding, 1993, 31: 171 - 197.
- [4] SHANG Y C, LEUNG P, LING B H. Comparative economics of shrimp farming in Asia[J]. Aquaculture, 1998, 164(1/4), 183 - 200.
- [5] THAKUR D P, LIN C K. Water quality and nutrient budget in closed shrimp (*Penaeus mondon*) culture systems [J]. Aquacultural Engineering, 2003, 27(3): 159 - 176.
- [6] JACKSON C, PRESTON N, THOMPSON P J et al. Nitrogen budget and effluent nitrogen components at an intensive shrimp farm [J]. Aquaculture, 2003, 218(1/4): 397 - 411.
- [7] 臧维玲. 养鱼水质分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1991: 44 - 96.
- [8] 苏跃朋, 马姓, 田相利, 等. 中国明对虾精养池塘氮、磷和碳收支的研究[J]. 南方水产, 2009, 5(6): 54 - 58.
- [9] NAYLOR R L, GOLDBURG R J, PRIMAVERA J H, et al. Effect of aquaculture on world fish supplies [J]. Nature, 2000, 405(6790): 1017 - 1024.
- [10] LIN Y F, JING S R, LEE D Y, et al. Performance of a constructed wetland treating intensive shrimp aquaculture wastewater under high hydraulic loading rate [J]. Environmental Pollution, 2005, 134(3): 411 - 421.
- [11] 臧维玲, 张煜, 戴习林, 等. 人工湿地联合塘内设施调控生产性虾塘水环境的效果与技术[J]. 水产学报, 2012, 36(4): 568 - 575.
- [12] TEICHERT-CODDINGTON D R, MARTINEZ D, RAMIREZ E. Partial nutrient budgets for semi-intensive shrimp farms in Honduras[J]. Aquaculture, 2000, 190(1/2): 139-145.
- [13] LIN Y F, JING S R, LEE D Y. The potential use of constructed wetlands in a recirculating aquaculture system for shrimp culture[J]. Environmental Pollution, 2003, 123(1): 107 - 113.
- [14] 李羚. 人工湿地处理污水技术及其在我国的应用现状和对策[J]. 现代城市研究, 2004, 19(12): 33 - 39.
- [15] 吴振斌, 李谷, 付贵萍, 等. 基于人工湿地的循环水产养殖系统工艺设计及净化效能[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1): 129 - 133.
- [16] 臧维玲, 刘永士, 戴习林, 等. 低频率运转下人工湿地对养虾水的去氮作用及其动力学[J]. 农业工程学报, 2013, 29(18): 210 - 217.
- [17] LIN Y F, JING S R, LEE D Y, et al. Nutrient removal from aquaculture wastewater using a constructed wetlands system [J]. Aquaculture, 2002, 209(1/4): 169 - 184.
- [18] ZACHRITZ II W H, HANSON A T, SAUCEDA J A, et al. Evaluation of submerged surface flow (SSF) constructed wetlands for recirculating tilapia production systems [J]. Aquacultural Engineering, 2008, 39(1): 16 - 23.
- [19] 张政, 付融冰, 顾国维, 等. 人工湿地脱氮途径及其影响因素分析[J]. 生态环境, 2006, 15(6): 1385 - 1390.
- [20] REDDING T, TODD S, MIDDLE A. The treatment of aquaculture wastewaters—a botanical approach [J]. Journal of Environmental Management, 1997, 50(3): 283 - 299.
- [21] 高凤仙, 钟元春. 构建功能性人工湿地处理养殖场废水[J]. 农业工程学报, 2006, 22(14): 264 - 267.
- [22] 李卓佳, 曹煜成, 文国樑, 等. 集约式养殖凡纳滨对虾体长与体重的关系[J]. 热带海洋学报, 2005, 24(6): 67 - 71.
- [23] 张灵侠, 沈琪, 胡超群, 等. 两个凡纳滨对虾家系体重与体长的关系[J]. 热带海洋学报, 2006, 25(1): 23 - 26.
- [24] ARANEDA M, PÉREZ E P, GASCA-LEYVA E. White shrimp *Penaeus vannamei* culture in freshwater at three



- densities; Condition state based on length and weight [J]. *Aquaculture*, 2008, 283(1): 13-18.
- [25] 查广才, 周昌清, 黄建荣, 等. 低盐度养殖的凡纳滨对虾体长和体重的增长规律[J]. *水产学报*, 2006, 30(4): 489-495.
- [26] 周智勇, 熊国根, 陈文静, 等. 罗氏沼虾生长研究[J]. *江西水产科技*, 2001, 4(2): 16-18.
- [27] 翁寿锦, 赵少崔. 罗氏沼虾生长特性[J]. *福建水产*, 1988(2): 32-35.
- [28] 郑善坚. 罗氏沼虾池塘养殖技术及生长研究[J]. *淡水渔业*, 1995, 25(4): 40-41.
- [29] 刘永土, 臧维玲, 侯文杰, 等. 室内罗氏沼虾幼虾养殖密度对水质与生长的影响[J]. *上海海洋大学学报*, 2010, 19(2): 184-189.
- [30] 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.
- [31] 崔理华, 卢少勇. 污水处理的人工湿地构建技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 50-53, 98-103, 148-150, 227-228.
- [32] 国家环保总局. 水和废水检测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 200-284.
- [33] 国家质量技术监督局. 海洋监测规范, 第四部分: 海水分析(GB17378.4—1998)[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998: 142-143, 150-162.
- [34] ALABASTER J S, LLOYD R. Water quality criteria for freshwater fish[M]. Landon: University Press of Cambridge, 1982: 85-87.
- [35] TILLEG D R, BADRINARAYANAN H, ROSAT R, et al. Constructed wetlands as recirculation filters in large-scale shrimp aquaculture [J]. *Aquacultural Engineering*, 2002, 26(2): 81-109.
- [36] 李文涛, 关宏宇. 罗氏沼虾人工养殖技术探讨[J]. *黑龙江水产*, 2010(4): 12-13.
- [37] CHEN S M, CHEN J C. Effects of pH on survival, growth, molting and feeding of giant freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii* [J]. *Aquaculture*, 2003, 218(1): 613-623.
- [38] 毕英佐, 李桂峰, 李海燕, 等. 罗氏沼虾育苗水体氨氮、亚硝酸盐氮的变化规律及对幼体的影响[J]. *华南农业大学学报*, 2002, 23(3): 67-70.
- [39] 臧维玲, 沈林华. 亚硝酸盐和氨对罗氏沼虾幼体的毒性[J]. *上海水产大学学报*, 1996, 5(1): 15-22.
- [40] 陈家长, 何尧平, 孟顺龙, 等. 表面流人工湿地在池塘养殖循环经济模式中的净化效能研究[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(5): 1898-1904.
- [41] 马娟, 彭永臻, 王丽, 等. 温度对反硝化过程的影响以及pH值变化规律[J]. *中国环境科学*, 2008, 28(11): 1004-1008.
- [42] 吴晓磊. 人工湿地废水处理机理[J]. *环境科学*, 1995, 16(3): 83-86.
- [43] SCHULZ C, GELBRECHT J, RENNERT B. Treatment of rainbow trout farm effluents in constructed wetland with emergent plants and subsurface horizontal water flow [J]. *Aquaculture*, 2003, 217(1/4): 207-221.
- [44] JING S R, LIN Y F, WANG T W, et al. Microcosm wetlands for wastewater treatment with different hydraulic loading rates and macrophytes [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31(2): 690-696.
- [45] ZANG W, YANG M, DAI X, et al. Regulation of water quality and growth characteristics of indoor raceway culture of *Litopenaeus vannamei* [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2009, 27(4): 740-747.
- [46] 况琪军, 吴振斌, 夏宜. 人工湿地生态系统的除藻研究[J]. *水生生物学报*, 2000, 24(6): 655-658.
- [47] 陈楠生, 李新正, 刘恒, 等. 对虾生物学[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1992, 229-271.
- [48] 李星颀, 陈赛斌. 鱼类生长的数学描述[J]. *浙江水产学院学报*, 1983, 2(1): 29-39.
- [49] 华元渝, 胡传林. 鱼种重量与长度相关公式( $W = aL^b$ )的生物学意义及其应用[C]//鱼类学论文集. 北京: 科学出版社, 1981: 125-131.
- [50] 谢仁政, 刘建勇, 范才军, 等. 高位池养殖凡纳滨对虾生长的研究[J]. *广东海洋大学学报*, 2007, 27(6): 50-54.
- [51] WHITING D G, TOLLEY H D, FELLINGHAM G W. An empirical Bayes procedure for adaptive forecasting of shrimp yield [J]. *Aquaculture*, 2000, 182(3/4): 215-228.

## The effect of regulating-controlling water quality by constructed wetlands at intermittent operation for *Macrobrachium rosenbergii* culture and the prawn growth characteristic

DAI Xi-lin<sup>1</sup>, JU Bo<sup>1</sup>, ZANG Wei-ling<sup>1</sup>, YANG Ming<sup>2</sup>, ZHANG Li-tian<sup>1</sup>, DING Fu-jiang<sup>2</sup>

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

**Abstract:** A constructed wetlands ecosystem was developed with intermittent operation combined with microvesicle aerators and water purification nets to circularly treat culture wastewater for the purpose of studying the effect of regulating-controlling water quality for *Macrobrachium rosenbergii* culture and the prawn growth characteristic. The FWS-SF wetlands ecosystem used in this study consisted of a free water surface flow (FWS) wetland and a subsurface flow (SF) wetland. The whole area of FWS-SF wetlands was 582.2 m<sup>2</sup>, including three units: the slope unit, the macrophyte unit, and the reservoir unit. The experiment was conducted during a 117 day period with no water exchange and medicine use. Since the 31th day, the constructed wetlands ecosystem was intermittently operated at a hydraulic loading rate (HLR) of 1.03 m/d during the culture period, and significantly removed NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, COD<sub>Mn</sub>, TAN by 66.4%, 39.6% ( $P \leq 0.01$ ), and 45.0% ( $P \leq 0.05$ ) respectively, the removal percentage of NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N was 33.3% and keep in very low concentration ( $0.006 \pm 0.005$  mg/L). The main aquatic chemical parameters of experimental ponds were all maintained within a suitable and safe range for prawn growth, and blue-green algae bloom was effectively inhibited. At the end of the experiment, because of blue-green algae toxic effect, average adult prawn size and yield of the control pond (8.70 g, 0.32 kg/m<sup>2</sup>) were smaller or lower than that in the experimental pond (9.51 – 10.72 g, 0.38 – 0.41 kg/m<sup>2</sup>). The study presented three groups of growth equations of the relationship between body weight and body length, body weight and culture days, body length and culture days, respectively, it can provide a scientific basis for designing the culture production plan, adjusting the production measures and estimating yield of *Macrobrachium rosenbergii*. This experiment shows that constructed wetlands ecosystem at intermittent operation and combined with pond simple facilities could effectively control water quality in prawn pond under the conditions of no water exchange and no medicine use and then ensured a good harvest.

**Key words:** *Macrobrachium rosenbergii*; constructed wetlands; intermittent operation; water quality; removal rate; growth characteristic