

不同流速和苗种规格对缢蛏平面流中间培育效果的影响

林兴管^{1,2}, 张翔^{1,2}, 滕爽爽^{1,2}, 肖国强^{1,2}, 蔡逸龙^{1,2}

(1. 浙江省海洋水产养殖研究所, 浙江 温州 325005; 2. 浙江省近岸水域生物资源开发与保护重点实验室, 浙江 温州 325005)

摘要: 为了优化蛏苗集约化平面流中间培育技术, 研究了不同进水流速和苗种规格对缢蛏中间培育效果的影响, 并分析了集约化平面流中间培育系统的水质状况。结果显示, 不同进水流速对缢蛏稚贝生长影响显著, 稚贝生长速率随进水流速增加而增加, 但成活率下降。通过流速与成活率和体质量日增长量的线性回归分析, 估算 0.163 L/s 为适宜的进水流速。在适宜流速和相同放苗重量下, 大规格苗种(8 万粒/kg)生长速度显著高于小规格苗种(18 万粒/kg), 但因为小规格组放苗数量多, 小规格组单位面积质量较其高出 23.72%。除低流速组以外, 平面流中间培育过程对叶绿素 *a* 和铵态氮有良好的去除效果, 去除率分别达到 36.99%和 3.88%以上, 这表明平面流集约化中间培育在利用海水池塘水体进行苗种中间培育的同时, 也起到了池塘养殖水体的净化作用。综合认为, 在养殖密度 0.5 kg/m²、流速 0.163 L/s 的培育条件下, 可以保证水体自污染程度较低, 缢蛏苗种生长较快, 成活率在 73.12%以上。

关键词: 缢蛏; 平面流培育系统; 中间培育; 流速; 苗种规格

中图分类号: S967.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2020)04-0103-08
DOI: 10.11759/hyxx20190715001

缢蛏(*Sinonovacula constricta*), 隶属软体动物门、瓣鳃纲、异齿亚纲、帘蛤目、竹蛏科、缢蛏属, 适宜生长在潮流畅通、有淡水注入的内湾, 在我国沿海广为分布, 因其味道鲜美、营养价值高、生长快和产量高等优点, 是浙江、福建等地主要滩涂贝类养殖品种之一^[1]。工厂化生产的贝类苗种, 在进入滩涂和池塘养殖前, 需经过中间培育过程, 以增加其养殖成活率。齐秋贞等^[2]研究了缢蛏幼苗从浮游幼虫到幼贝的全过程, 认为壳长 3.7 mm 以上个体才可称为蛏苗, 但由于缢蛏苗壳瓣薄而脆, 易破碎, 一般壳长 1 cm 以上的幼苗才易移植养成。

随着缢蛏养殖业的发展, 对苗种质量、数量和规格需求也相应提高, 浙江省缢蛏人工养殖一般需求较大规格(壳长 1.5~2 cm)的商品化苗种。目前, 大规格苗种的中间培育一般利用潮间带滩涂筑塘蓄水培育^[3-5]或水泥池^[6]进行培育, 均采用大换水的方法进行改善水质, 存在单位水体利用率低、放养苗种密度低、成活率低和生产成本高等缺点, 影响缢蛏苗种生产和养殖业的健康可持续发展。随着中培模式的不断探索, 循环流水模式较传统开放式换水模式较适用于高密度养殖。国内外有关高密度循环流水系统培育贝类大规格苗种的报道较少^[7-10], 由于苗种在培育前期个体较小, 对系统进排水方式要求严格。根

据不同培育目的, 设定适宜流速、放苗规格和密度, 达到所需规格后, 及时出售是规避养殖风险、提高养殖效益的有效途径。本文研究平面流集约化循环培育系统(简称平面流系统)在池塘循环水养殖条件下, 试验探寻了不同流速和规格对高密度养殖缢蛏稚贝生长及水质变化, 确定生态经济适宜流速和规格, 为缩短大规格苗种培育周期提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 基于海水池塘的平面流集约化循环水培育系统构建

该培育系统由平面养殖水槽、进排水系统及配套池塘等辅助设施组成。平面养殖水槽(4 m×3 m×0.3 m)

收稿日期: 2019-07-15; 修回日期: 2019-10-09

基金项目: 浙江省农业(水产)新品种选育重大科技专项(2016C02055-9-2); 浙江省重点研发计划项目(2018C02039); 浙江省科技计划项目(2018F10015)

[Foundation: The Major Scientific and Technological Novel Variety Breeding Project (Aquaculture) of Zhejiang Province, No. 2016 C02055-9-2; Key Research and Development Project of Zhejiang Province, No.2018C02039; Science and Technology Planning Project of Zhejiang Province, No.2018F10015]
作者简介: 林兴管(1991-), 男, 浙江苍南人, 从事滩涂贝类遗传育种及养殖技术研究, E-mail: linxinguan123@163.com; 肖国强(1978-), 通信作者, 副研究员, 主要从事滩涂贝类遗传育种研究, E-mail: xiaogq1978@163.com

由水泥和大理石瓷砖筑成,采用PVC管连接各组件构建进出水管道。进排水系统由水泵浮台、水泵、高位水塔、液位控制器和进排水水管组成,其中进水管安装阀门调节流速,排水管可调节高度以控制养殖水槽内水位。养殖池塘为浙江省常见的鱼、虾、贝混养的多生态位海水养殖池塘,起到饵料供给功能。中间培育系统水循环过程为:通过水泵将池塘水泵入高位水塔,由进水管在高度差的作用下自行流到各个养殖水槽以供贝苗供饵,再通过排水口回到池塘(如图1所示)。

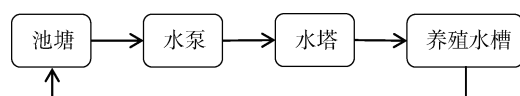


图1 平面流集约化循环培育系统结构

Fig. 1 Flow diagram of the circulatory raceway system

1.2 最优流速试验

通过调节水槽进水阀门分别处于1/2开启、3/4开启和全开位置设置了3个流速组,经实地测试分别为低流速组(0.12 L/s)、中流速组(0.16 L/s)和高流速组(0.21 L/s)(实际测定平均值),每个流速组设置一个平面水槽,每个水槽缢蛭稚贝(壳长 $10.92\text{ mm} \pm 0.10\text{ mm}$,体质量 $0.076\text{ g} \pm 0.005\text{ g}$)放养密度均为 0.5 kg/m^2 。从放苗日计算养殖天数,试验期间,每隔15 d测定各组进出水口水质,并测定其壳长和体质量。试验共进行45 d,试验结束后计算各个养殖水槽内稚贝成活率。通过联立分析流速对生长和成活率的线性回归方程组,获得最优流速。

1.3 最优流速下不同规格缢蛭苗种中间培育试验

将两种规格稚贝分别在最优流速下的平面养殖水槽中进行中间培育试验,每个试验组设置一个平面水槽,并设置一个未放苗的平面水槽作为对照组。小规格稚贝(壳长 $3.12\text{ mm} \pm 0.10\text{ mm}$,18万粒/kg)和大规格稚贝(壳长 $4.29\text{ mm} \pm 0.09\text{ mm}$,8万粒/kg)养殖密度均为 0.5 kg/m^2 。从放苗日计算养殖天数,试验期间,每隔8 d测定各组进出水口水质,并测定其壳长和体质量。试验共进行24 d,为减少人工洗苗称重对缢蛭稚贝造成损伤给试验带来的影响,只在试验结束后计算各个养殖水槽内稚贝成活率。

1.4 监测指标和测定方法

1.4.1 水质指标检测和指标计算

溶解氧(DO)、pH值、水温、盐度采用德国Multi-

3410便携式多功能水质分析仪测定。各个指标的测定方法如下:根据次溴酸钠氧化法测定铵态氮,铈还原法测定硝态氮,萘乙二胺分光光度法测定亚硝氮,磷钼蓝分光光度法测定活性磷酸盐,以上方法均按照国标法GB17378-2007《海洋监测规范》^[1]第4部分:海水分析》进行;叶绿素a测定采用分光光度法进行测定,测定方法按照《海洋监测规范第7部分:近海污染生态调查和生物监测》进行。各水质指标去除率计算公式为:

$$R_R = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中, R_R 为各水质指标去除率(%), C_0 、 C_1 分别表示各试验组中进水和出水的水质指标。

1.4.2 生长指标测定和指标计算

放苗时记录各个试验组放苗重量与苗种初始规格,此后每隔一个取样周期,从每个试验组平面养殖水槽前中后分别随机挑选60颗苗种洗净,用滤纸吸干表面水分,采用数显游标卡尺(精确度0.01 mm)测定壳长,采用电子天平(精确度0.001 g)称量体质量,并计算平均壳长(L)和平均体质量(W),所用指标计算公式如下:

$$R_{XDL} = \frac{L_t - L_0}{L_0} \times 100\%, \quad (2)$$

$$R_{XDW} = \frac{W_t - W_0}{W_0} \times 100\%, \quad (3)$$

$$G_{DL} = \frac{L_t - L_0}{t}, \quad (4)$$

$$G_{DW} = \frac{W_t - W_0}{t}, \quad (5)$$

$$R_{SGL} = \frac{\ln L_t - \ln L_0}{t} \times 100\%, \quad (6)$$

$$R_{SGW} = \frac{\ln W_t - \ln W_0}{t} \times 100\%, \quad (7)$$

式中, L 表示平均壳长(mm), W 表示平均体质量(g), R_{XDL} 表示壳长相对增长率(%), R_{XDW} 表示体质量相对增长率(%), G_{DL} 表示壳长日增长量($\mu\text{m/d}$), G_{DW} 表示体质量日增长量(mg/d), R_{SGL} 表示壳长特定增长率(%), R_{SGW} 表示体质量特定增长率(%), t 表示养殖时间(d), L_t 和 W_t 表示养殖 t 天时平均壳长和平均体质量, L_0 和 W_0 表示试验开始时平均壳长和平均体质量。

试验结束后,分别测定各个平面水槽缢蛭苗种总重量和苗种体质量规格(抽样样品重:小规格 $\geq 30\text{ g}$,中规格 $\geq 50\text{ g}$,大规格 $\geq 200\text{ g}$),总产量除以规格即

得各平面养殖水槽苗种数量。

$$R_S = \frac{S_1}{S_0} \times 100\%, \quad (8)$$

式中, R_S 为中培成活率(%), S_0 和 S_1 分别表示初始和试验结束时苗种数量。

1.5 统计分析

试验数据用“平均值±标准差”表示。不同流速试验数据通过 SPSS 19.0 统计软件进行处理分析, 利用单因素方差分析进行显著性检验, 用最小显著极差法(LSD)进行多重比较(以 $P<0.05$ 作为差异显著); 用样本 T 检验来对不同规格缢蛭苗种的生长性能进行差异显著性检验(以 $P<0.05$ 作为差异显著)。

2 结果

2.1 不同流速缢蛭苗种中间培育效果

2.1.1 不同流速对缢蛭苗种生长和存活的影响

由图 2 和图 3 可知, 在放养密度和规格相同的条件下, 各流速组的壳长与体质量生长趋势线明显随流速降低呈降次排列, 表明同样的生长时间, 流速越大壳长和体质量生长越快。在试验中, 壳长和体质量生长趋势基本相同, 但在不同流速组中壳长(或体质量)生长趋势有较大差异。高流速组在前中期生长较快, 后期生长较慢; 中流速组在前期和后期生长较慢, 中期生长最快; 低流速组在整个试验过程中呈稳定增长的趋势。

由表 1 可知, 不同流速组的稚贝生长率和成活率有显著性差异, 高流速组稚贝生长较快, 但成活率略有降低, 而低流速组稚贝生长较慢, 但是成活率却保持在较高的水平。单位面积重量随流速的增

加而增加。通过线性回归分析得出流速(x)与成活率(y)的回归方程为 $y=1.0170 - 0.4508x$ ($R=0.9766$, $P=0.1381$), x 与体质量日增长量(y')的回归方程为 $y'=0.6090 + 6.4754x$ ($R=0.9972$, $P=0.0474$)。将 y 和 y' 进行百分比转换统一坐标系, 联立转换后线性方程组, 推算得交点处适宜流速为 0.163 L/s。

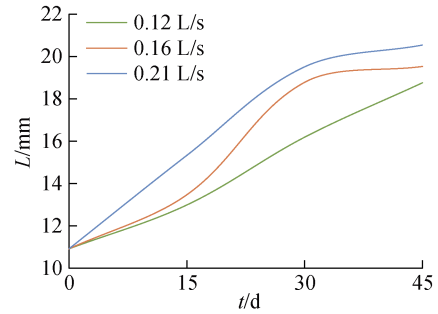


图 2 中间培育过程中的壳长生长曲线

Fig. 2 Growth curve of shell length during the intermediate culture period

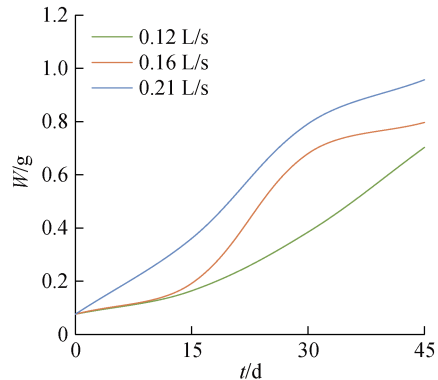


图 3 中间培育过程中体质量生长曲线

Fig. 3 Growth curve of body weight during the intermediate culture period

表 1 不同流速对缢蛭稚贝生长的影响

Tab. 1 Effects of different flow rates on the growth of *Sinonovacula constricta* juveniles

| 流速/ (L/s) | L/mm | W/g | $R_{SGL}/\%$ | $R_{SGW}/\%$ | $R_{XDL}/\%$ | $R_{XDW}/\%$ | $G_{DL}/$ ($\mu m/d$) | $G_{DW}/$ (mg/d) | $R_S/$ % |
|--------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------|
| 0.12 | 18.76±0.02 ^c | 0.703±0.010 ^c | 1.202±0.002 ^c | 4.952±0.031 ^c | 71.76±0.15 ^c | 828.41±13.00 ^c | 174.54±0.36 ^c | 13.93±0.22 ^c | 96 |
| 0.16 | 19.53±0.10 ^b | 0.797±0.010 ^b | 1.292±0.011 ^b | 5.232±0.028 ^b | 78.83±0.89 ^b | 953.30±13.36 ^b | 191.34±2.16 ^b | 16.03±0.22 ^b | 95 |
| 0.21 | 20.54±0.15 ^a | 0.975±0.008 ^a | 1.404±0.016 ^a | 5.638±0.019 ^a | 88.07±1.37 ^a | 1164.46±10.78 ^a | 213.75±3.32 ^a | 19.58±0.18 ^a | 92 |

注: 表中数据为试验结束时各生长指标“平均值±标准差”; 同列上标不同字母表示该指标组间差异显著($P<0.05$)。

2.1.2 不同流速水质的变化

在本实验过程中海水温度在 17.27~20.17℃ 范围内, 盐度在 18.78~18.96, pH 值在 8.12~8.23, DO 在 7.44~7.91 mg/L, DO 浓度随流速的增加而增加, 但变化幅度不大, 其他参数进出水变化幅度较小, 均在

适宜缢蛭苗种生长范围内。

由表 2 可知, 进水的叶绿素浓度明显高于出水口叶绿素的浓度, 而且随着流速的增加, 高流速组的去除率小于低流速组。低流速组中出水口铵态氮浓度较进水铵态氮浓度略微上升, 中流速组去除率

表 2 不同流速对水质指标的影响

Tab. 2 Effects of different flow rates on the water quality indicators

| 流速/ (L/s) | 日龄/ d | 各水质指标质量浓度/(mg/L) | | | | | | | | | | 去除率/% | | | | |
|--------------|----------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|---------|
| | | 叶绿素* | | 铵态氮 | | 硝态氮 | | 亚硝氮 | | 活性磷酸盐 | | 叶绿素 | 铵态氮 | 硝态氮 | 亚硝氮 | 活性磷酸盐 |
| | | 进水 | 出水 | 进水 | 出水 | 进水 | 出水 | 进水 | 出水 | 进水 | 出水 | | | | | |
| 0.12 | 15 | 25.79 | 11.59 | 0.260 | 0.304 | 0.528 | 0.591 | 0.074 | 0.075 | 0.001 | 0.009 | 55.06 | -16.92 | -11.93 | -1.35 | -800 |
| | 30 | 4.47 | 1.53 | 0.220 | 0.242 | 1.913 | 1.977 | 0.540 | 0.544 | 0.048 | 0.041 | 65.77 | -10.00 | -3.35 | -0.74 | 14.58 |
| | 45 | 1.87 | 0.34 | 0.112 | 0.128 | 1.432 | 1.762 | 0.396 | 0.487 | 0.044 | 0.045 | 81.82 | -14.29 | -23.04 | -22.98 | -2.27 |
| 0.16 | 15 | 33.69 | 15.22 | 0.288 | 0.243 | 0.466 | 0.586 | 0.072 | 0.071 | 0.003 | 0.010 | 54.82 | 15.63 | -25.75 | 1.39 | -233.33 |
| | 30 | 4.09 | 2.21 | 0.258 | 0.248 | 2.039 | 1.975 | 0.489 | 0.547 | 0.034 | 0.044 | 45.97 | 3.88 | 3.14 | -11.86 | -29.41 |
| | 45 | 3.00 | 0.74 | 0.244 | 0.234 | 1.721 | 1.794 | 0.395 | 0.548 | 0.040 | 0.054 | 75.33 | 4.10 | -4.24 | -38.73 | -35.00 |
| 0.21 | 15 | 21.36 | 13.46 | 0.290 | 0.192 | 0.557 | 0.470 | 0.073 | 0.077 | 0.003 | 0.002 | 36.99 | 33.79 | 15.62 | -5.48 | 33.33 |
| | 30 | 6.24 | 1.82 | 0.251 | 0.233 | 1.928 | 1.938 | 0.484 | 0.519 | 0.036 | 0.042 | 70.83 | 7.17 | -0.52 | -7.23 | -16.67 |
| | 45 | 1.19 | 0.40 | 0.239 | 0.128 | 1.645 | 1.568 | 0.402 | 0.408 | 0.056 | 0.081 | 66.39 | 46.44 | 4.68 | -1.49 | -44.64 |

注：表中数据为试验中水质指标平均值；“*”单位为 $\mu\text{g/L}$ ；去除率为负值表示该指标出水浓度大于进水浓度；活性磷酸盐由于进水浓度极低，所以去除率变化较大

略微大于高流速组；硝态氮平均去除率较低，随着流速的增加而增加；在培育前期，亚硝氮浓度较低，随着培育时间的增加，浓度逐渐上升，不同流速对亚硝氮去除率变化不明显，亚硝氮浓度出水较进水略微升高；试验组出水活性磷酸盐浓度较进水浓度略微升高，但浓度水平较低，高流速组中活性磷酸盐浓度增加较多。

2.2 不同规格缢蛭苗种中间培育效果

2.2.1 不同规格对苗种生长和存活的影响

由表 3 可知，在流速和放养重量相同条件下，在 0~16 d，大规格稚贝相对壳生长生长率和壳长日增生长量均大于小规格稚贝，但在 24 d，大规格稚贝壳长相对增长率和日均增长率均小于小规格稚贝。在 24 d，大规格稚贝规格(壳长 $9.48 \text{ mm} \pm 0.30 \text{ mm}$, 1.27 万 粒/kg)显著大于小规格稚贝规格(壳长 $7.62 \text{ mm} \pm 0.16 \text{ mm}$,

2.10 万 粒/kg)($P < 0.05$)，且其成活率较小规格组高出 7.33%，但从单位面积重量来看，小规格稚贝放苗数量多，单位面积重量较大规格组高 23.72%，小规格稚贝壳壳长特定生长率较高。

2.2.2 不同规格水质的变化

在本实验过程中海水温度在 $14.30\sim 18.31\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内，盐度在 $21.20\sim 22.11$ ，pH 在 $8.00\sim 8.36$ ，DO 在 $7.36\sim 8.36 \text{ mg/L}$ ，均在适宜缢蛭苗种生长范围内。

由表 4 可知，试验组进出水叶绿素 *a* 和铵态氮浓度变化明显，进水叶绿素和铵态氮浓度明显高于出水，而大规格组叶绿素去除率小于小规格组，而铵态氮去除率大于小规格组。在对照组中，叶绿素 *a* 和活性磷酸盐浓度略微上升，铵态氮、硝酸氮和亚硝氮浓度略微降低。在培育前期，大规格组硝态氮和亚硝氮浓度略微升高，随着养殖日龄的增加，去除率变

表 3 不同规格对缢蛭稚贝生长的影响

Tab. 3 Effects of different sizes on the growth of *S. constricta* juveniles

| 规格 | 日龄/d | <i>L</i> /mm | <i>W</i> /mg | <i>R</i> _{XDL} /% | <i>G</i> _{DL} /($\mu\text{m/d}$) | <i>R</i> _{SGL} /% | 单位面积质量/(kg/m^2) | <i>R</i> _S /% |
|-----|------|--------------|--------------|----------------------------|---|----------------------------|----------------------------|--------------------------|
| 小规格 | 0 | 3.12 | 2.78 | — | — | — | — | — |
| | 8 | 4.28 | 6.31 | 37.18 | 145 | 3.95 | — | — |
| | 16 | 5.48 | 11.14 | 75.64 | 75 | 3.52 | — | — |
| | 24 | 7.62 | 23.81 | 144.23 | 89 | 3.72 | 3.13 | 73.12 |
| 大规格 | 0 | 4.29 | 6.25 | — | — | — | — | — |
| | 8 | 5.97 | 13.59 | 39.16 | 210 | 4.13 | — | — |
| | 16 | 7.65 | 24.04 | 78.32 | 105 | 3.62 | — | — |
| | 24 | 9.48 | 39.37 | 120.98 | 76 | 3.30 | 2.53 | 80.45 |

注：表中数据为培育过程中壳长和体质量生长指标的平均值；“—”为空值；单位面积质量和成活率在试验结束后进行测定，试验中无数据

表 4 不同规格稚贝培育过程水质指标

Tab. 4 Changes of the water quality index in the intermediate cultivation process

| 流速/ (L/s) | 日龄 /d | 各水质指标质量浓度/(mg/L) | | | | | | | | | | 去除率/% | | | | |
|--------------|----------|------------------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | | 叶绿素* | | 铵态氮 | | 硝态氮 | | 亚硝氮 | | 活性磷酸盐 | | 叶绿素 | 铵态氮 | 硝态氮 | 亚硝氮 | 活性磷酸盐 |
| | | 进水 | 出水 | 进水 | 出水 | 进水 | 出水 | 进水 | 出水 | 进水 | 出水 | | | | | |
| 大规格 | 8 | 11.59 | 4.41 | 0.01 | 0.01 | 0.21 | 0.24 | 0.06 | 0.07 | 0.05 | 0.05 | 61.95 | 0.00 | -14.29 | -16.67 | 0.00 |
| | 16 | 11.02 | 4.21 | 0.42 | 0.20 | 0.35 | 0.31 | 0.11 | 0.09 | 0.06 | 0.04 | 61.80 | 52.38 | 11.43 | 18.18 | 33.33 |
| | 24 | 8.63 | 4.12 | 0.32 | 0.11 | 0.16 | 0.11 | 0.03 | 0.02 | 0.07 | 0.05 | 52.26 | 65.63 | 31.25 | 33.33 | 28.57 |
| 小规格 | 8 | 11.62 | 4.12 | 0.01 | 0.01 | 0.20 | 0.20 | 0.06 | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 64.54 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 20.00 |
| | 16 | 11.08 | 4.01 | 0.39 | 0.35 | 0.30 | 0.30 | 0.09 | 0.09 | 0.06 | 0.05 | 63.81 | 10.26 | 0.00 | 0.00 | 16.67 |
| | 24 | 8.71 | 4.03 | 0.34 | 0.20 | 0.20 | 0.17 | 0.03 | 0.03 | 0.07 | 0.06 | 53.73 | 41.18 | 15.00 | 0.00 | 14.29 |
| 对照组 | 8 | 11.62 | 12.20 | 0.01 | 0.01 | 0.22 | 0.22 | 0.06 | 0.06 | 0.05 | 0.05 | -5.00 | 9.00 | 0.00 | 2.00 | 0.00 |
| | 16 | 11.08 | 11.74 | 0.41 | 0.34 | 0.35 | 0.35 | 0.11 | 0.11 | 0.06 | 0.06 | -6.00 | 17.00 | 0.00 | 3.00 | 0.00 |
| | 24 | 8.70 | 9.05 | 0.33 | 0.28 | 0.17 | 0.15 | 0.03 | 0.03 | 0.07 | 0.08 | -4.00 | 15.00 | 10.00 | 3.00 | -14.29 |

注：表中数据为试验中水质指标平均值；“*”单位为 $\mu\text{g/L}$ ；去除率为负值表示该指标出水浓度大于进水浓度；去除率为 0 表示该指标进出水浓度变化极小

大，而小规格稚贝变化幅度较小。各组出水活性磷酸盐浓度均处于上升趋势，且无明显差异。

3 讨论

3.1 流速对缢蛭苗种生长和环境水质的影响

摄食量是影响贝类生长的关键因素之一，而贝类的摄食量受到遗传、水体环境、微藻种类、苗种规格等因素的影响。许章程^[12]研究了饵料密度、放养密度、光照强度和底质等生态因子对缢蛭稚贝生长和存活的影响，其中饵料浓度是影响生长的一个重要因素，饵料丰富则苗种生长快速。缢蛭属于底栖滤食性贝类，平面流系统维持了缢蛭摄食区的饵料丰度，提高了缢蛭对饵料单位水体利用率。在平面流系统中，海水池塘微藻丰度一定的情况下，流速的大小直接关系到饵料浓度，流速越大表明单位时间内平面水槽中提供的藻类数量越多，饵料越丰富，因此苗种生长速率加快。这与本研究中流速越大稚贝生长速度越快，反之则稚贝生长速度降低的结果相符。

与此同时，研究也发现流速提升导致苗种死亡率提高，这与包永波^[13]等结果相似，在适宜的流速范围内，流速的提高加快了贝类的滤水率，从而提高了摄食率，流速过高则会干扰贝类摄食的生理活动，导致不能正常摄食，使死亡率升高。

苗种培育过程中，残饵、粪便和死亡生物残骸等分解产生铵态氮、亚硝氮和硫化氢等有害物质，从而

使养殖水体水质恶化，甚至可能引起病害发生。同时，室外培育过程中的降雨会导致盐度、温度等发生较大波动，不利于贝类生长。在养殖过程中换水可以改善养殖生物的环境条件，维持养殖水体理化性质^[14]，有助于贝苗生长。在不同流速试验中，水质条件均在缢蛭稚贝适宜生长范围内，且波动范围较小，保持苗种成活率在 92%以上。较高的流速能略微提高水体中溶解氧浓度，但水温、盐度和 pH 值均无明显变化。流速大导致养殖水体更换周期短，提供饵料的总量大，但部分藻类在未被摄食的情况下，被流速较快的水流带回池塘，导致叶绿素去除率随流速的增大而减小。

孙国祥等^[15]在研究流速对大菱鲆养殖过程中水质氮素的影响中发现，养殖水体中总氨氮、非离子氨及亚硝酸氮浓度随流速的增大先快速下降后缓降趋稳。这与本试验结果相似，在低流速组，铵态氮浓度出水较进水浓度上升，而随着流速的增加，出水铵态氮浓度降低，中流速组去除率较高流速组略微增加，这可能是硝化作用达到上限，而高流水组缢蛭排氨水平提高导致。

在循环水养殖系统中，一般通过底泥中硝化细菌的硝化作用将铵态氮转化成亚硝酸态氮，并进一步转化成硝态氮，在此转化过程中，氨氮氧化速率是限速参数^[16]，而氨氮浓度、溶解氧、有机物、水流、温度、pH 值等构成影响氨氮转化速率的主要因素^[17]。本试验中，亚硝氮浓度随培育时间的增加而增加，

但不同流速组间亚硝氮去除率差异不大,与 Zhu 等^[18]通过增大水流能提高硝化效率的结果不符,这可能是由于随着流速增加,单位水体铵态氮浓度降低,反应底物降低导致转化成亚硝氮浓度降低。在试验过程中出水硝态氮浓度较进水略微升高,且流速越大,浓度越大,这是由于水体中溶解氧较高,水流和底泥的硝化作用占优势,硝化作用终产物增加。

平面流系统中活性磷酸盐总体水平较低,在培育中后期有上升趋势,这可能是培育过程中,随着培育时间的增加,水中积累的有机物分解、水生生物和养殖生物的代谢,导致水体中的活性磷酸盐不断增加。这与郑余琦等^[19]发现缢蛏扰动能对降低养殖沉积物中有机磷的浓度结果相同。随流速的增加,活性磷酸盐浓度略微提高,这可能是流水增加了缢蛏生物扰动作用。

3.2 苗种规格对缢蛏生长和环境水质的影响

放养规格与成活率密切相关,规格大成活率高。齐秋贞等^[2]研究了缢蛏幼苗从浮游幼虫到幼贝的全过程,认为壳长 3.7 mm 以上个体才可称为蛏苗,在 0.5 kg/m² 放养密度下,大规格稚贝生长速度和成活率均大于小规格稚贝,说明随着稚贝规格的增大,其适应环境能力、摄食和消化能力随之增强。梁飞龙等^[20]在大珠母贝的中间培育中,发现规格较大的贝苗投入到海区养殖后,其适应能力更强且成活率更高。陈明强等^[21]在黑蝶贝苗种中间培育,规格较大的贝苗在盐度变化时对其生长和成活率的影响较小。较高的苗种培育密度影响其生长速率,在不明显影响贝苗的成活率和生长的前提下,一定范围内增加养殖密度是提高养殖产量的有效途径。在本研究中,虽然大规格组生长速率和成活率均高于小规格稚贝,但单位面积质量却小于小规格组,在综合考虑价格等因素,小规格苗种养殖效益更高。

双壳贝类通过滤水作用摄食海水中浮游植物和有机碎屑,又通过排粪作用(粪便和假粪)和排泄作用把废物排入海水中,从而影响海区中营养盐的组成和分布^[22]。贝类的体重是决定滤水率和摄食滤率的重要因子之一^[23]。缢蛏随单位个体增大,单位重量的滤食率和排氨率降低。姜祖辉等^[24]认为新陈代谢器官所占体质量比值较肌肉和脂肪所占比值小,从而引起随个体增大而单位质量的耗氧率和排氨率降低的现象。这与本研究中规格稚贝组叶绿素去除

率较大的结果相符。在中间培育过程中,小规格组铵态氮、硝态氮、亚硝氮去除率均小于大规格组,这可能主要因为小规格缢蛏稚贝单位重量的排氨率较大规格组高,释放到水体的氨氮总量较多,同时在微生物的硝化作用下,导致硝态氮和亚硝氮水平提高。对养殖对象而言,总氨氮和亚硝氮富集到一定程度后会对养殖对象产生明显的毒害作用,所以控制水体中氨氮和亚硝氮的浓度尤为重要^[25]。在本试验中,在适宜流速下不同规格组中通过循环流水改善养殖生物的环境条件,均有效降低了水体中铵态氮浓度。

4 结论

综上所述,缢蛏中间培育过程中并非流速越大越好,流速增大会使稚贝生长速率增加,但同时会导致其死亡率提高。综合分析死亡率和生长速率与流速的关系,估算出 0.163 L/s 是较为适应于本培育系统的流速值。在适宜流速和相同放苗重量下,小规格稚贝 18 万粒/kg 相较于大规格稚贝 8 万粒/kg 具有更高特定生长率和单位面积重量,综合考虑经济效益等条件下,小规格稚贝的收益更高。同时,缢蛏平面流系统中间培育过程能通过削减水体中无机氮磷盐、浮游微藻等方式提高池塘水质,而对水体溶氧量、盐度和温度等无明显影响,是一种有效的海水池塘水体净化手段,具有明显的生态效益。

参考文献:

- [1] 徐凤山,张素萍. 中国海产双壳类图志[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 211-213.
Xu Fengshan, Zhang Suping. An Illustrated Bivalve Mollusca Fauna of China Seas[M]. Beijing: Science Press, 2008: 211-213.
- [2] 齐秋贞,杨明月. 缢蛏浮游幼虫,稚贝和幼贝的生长发育[J]. 台湾海峡, 1984, 3(1): 90-99.
Qi Qiuzhen, Yang Mingyue. The growth and development of the planktonic larvae, spats and young shells of *Sinonovacula constricta*[J]. Taiwan Strait, 1984, 3(1): 90-99.
- [3] 李为学,张士罡. 缢蛏苗短期强化培育新技术[J]. 江西饲料, 2011, (5): 40-42.
Li Weixue, Zhang Shigang. New technology of short term strengthening cultivation seedling of *Sinonovacula constricta*[J]. Jiangxi Feed, 2011, (5): 40-42.
- [4] 陈高峰,余海,黄克蚕,等. 缢蛏中间苗种培育技术初步研究[J]. 科学养鱼, 2010, (4): 35-35.
Chen Gaofeng, Yu Hai, Huang Kecan, et al. Pilot study the intermediate cultivate technology of *Sinonovacula*

- contracta*[J]. Scientific Fish Farming, 2010, (4): 35-35.
- [5] 叶大华. 蛭苗的暂养方法[J]. 中国水产, 1985, (1): 29.
Ye Dahua, The technique of temporary rearing seedling of *Sinonovacula contracta*[J]. China Fisheries, 1985, (1): 29.
- [6] 薛宝宝, 李浩, 彭连法, 等. 缢蛭苗水泥池中间培育试验[J]. 上海海洋大学学报, 2017, 26(6): 39-46.
Xue Baobao, Li Hao, Peng Lianfa, et al. The experiment of intermediate culture of razor clam *Sinonovacula contracta* in cement pond[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2017, 26(6): 39-46.
- [7] Manzi J J, Hadley N H, Maddox M B. Seed clam, *Mercenaria mercenaria*, culture in an experimental-scale upflow nursery system[J]. Aquaculture, 1986, 54(4): 301-311.
- [8] 刘德经, 罗瑜, 黄金凤. 西施舌大规格苗种培育技术研究[J]. 经济动物学报, 2007, 11(3): 153-156.
Liu Dejing, Luo Yu, Huang Jinfeng. Studies on techniques of seedling cultivation of large size *Coelomastra antiquata*[J]. Journal of Economic Animal, 2007, 11(3): 153-156.
- [9] 肖国强, 柴雪良, 林志华, 等. 平面流水循环系统集约化培育硬壳蛤稚贝的研究[J]. 台湾海峡, 2008, 27(2): 197-203.
Xiao Guoqiang, Chai Xueliang, Lin Zhihua, et al. Intensive culture for juvenile hard clam *Mercenaria mercenaria* in circulatory raceway system[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2008, 27(2): 197-203.
- [10] 刘鹰, 杨红生, 张涛, 等. 封闭循环流水培育贝类苗种的初步实验[J]. 动物学杂志, 2003, 38(4): 72-75.
Liu Ying, Yang Hongsheng, Zhang Tao, et al. Shellfish culture in an experimental scale closed recirculating water nursery system[J]. Chinese Journal of Zoology, 2003, 38(4): 72-75.
- [11] GB 17378-2007, 海洋监测规范[S].
GB 17378-2007, The Specification for Marine Monitoring[S].
- [12] 许章程, 韦信敏, 何进金. 若干生态因子对缢蛭稚贝生长和存活的影响[J]. 台湾海峡, 1990, 9(1): 62-68.
Xu Zhangcheng, Wei Xinmin, He Jinjin. Effects of some ecological factors on growth and survival of juvenile *Sinonovacula contracta*[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 1990, 9(1): 62-68.
- [13] 包永波, 尤仲杰. 几种因子对海洋滤食性贝类摄食率的影响[J]. 水产养殖, 2004, 25(6): 29-33.
Bao Yongbo, You Zhongjie. Influences of some factor on ingestion rate of marine suspension-feeding mollusks[J]. Journal of Aquaculture, 2004, 25(6): 29-33.
- [14] 王光玉, 姜佳慧, 祝楠, 等. 换水率和密度对刺参生长和水质的影响[J]. 渔业现代化, 2017, 44(6): 55-62.
Wang Guangyu, Jiang Jiahui, Zhu Nan, et al. Effects of water exchange rate and stocking density on growth of *Apostichopus japonicus* and water quality[J]. Fishery Modernization, 2017, 44(6): 55-62.
- [15] 孙国祥, 李勇, 田喆, 等. 流速对封闭循环水养殖大菱鲆生长、摄食及水质氮素的影响[J]. 海洋科学, 2011, 35(5): 53-60.
Sun Guoxiang, Li Yong, Tian Zhe, et al. Effects of flow rate on the growth, feed intake and water nitrogen in a closed recirculation aquaculture system of turbot (*Scophthalmus maximus* L.) [J]. Marine Sciences, 2011, 35(5): 53-60.
- [16] McMillan J D, Wheaton F W, Hochheimer J N, et al. Pumping effect on particle sizes in a recirculating aquaculture system[J]. Aquaculture Engineering, 2003, 27(1): 53-59.
- [17] 石芳永. 海水封闭循环养殖系统中生物滤器的设计和优化[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2009.
Shi Fangyong. Design and optimization of biofilter in recirculating aquaculture systems[D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2009.
- [18] Zhu Songming, Chen Shulin. Effects of air-diffusion turbulent flow on nitrification rate in fixed film biofilters: A comparison study[J]. North American Journal of Aquaculture, 2001, 65: 240-247.
- [19] 郑余琦, 郑忠明, 秦文娟. 缢蛭(*Sinonovacula contracta*)生物扰动对养殖废水处理系统中沉积物磷赋存形态垂直分布的影响[J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(1): 161-170.
Zheng Yuqi, Zheng Zhongming, Qin Wenjuan. Effects of bioturbation by razor clam *Sinonovacula contracta* on vertical distribution of phosphorus form in sediment in an aquaculture wastewater treatment ecosystem[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2017, 48(1): 161-170.
- [20] 梁飞龙, 王钦贵, 邓岳文, 等. 培育密度对大珠母贝受精卵的孵化率及不同期幼虫生长率、成活率与变态率的影响[J]. 海洋湖沼通报, 2017, (6): 75-81.
Liang Feilong, Wang Qingui, Deng Yuewen, et al. Effects of stocking density on hatching, growth, survival and metamorphosis at larval stages of pearl oyster *pinctada maxima*[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2017, (6): 75-81.
- [21] 陈明强, 李有宁, 郭华阳, 等. 黑蝶贝苗种中间培育技术的初步研究[J]. 水产科学, 2016, 35(5): 239-243.
Chen Minqiang, Li Youning, Guo Huayang, et al. Intermediate culture of blacklip pearl oyster *pinctada margaritifera* juveniles[J]. Fisheries Science, 2016, 35(5): 239-243.
- [22] 周毅, 杨红生, 张福绥. 海水双壳贝类的生物沉积及其生态效应[J]. 海洋科学, 2003, 27(2): 23-26.
Zhou Yi, Yang Hongsheng, Zhang Fusui. Biodeposition

- by seawater bivalve mollusk[J]. *Marine Sciences*, 2003, 27(2): 23-26.
- [23] 林元烧, 曹文清, 罗文新, 等. 几种主要养殖贝类滤水率的研究[J]. *海洋学报*, 2003, 25(1): 86-92.
Lin Yuanshao, Cao Wenqing, Luo Wenxin, et al. Experimental studies on filtration rates in four species of suspension feeding bivalves[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2003, 25(1): 86-92.
- [24] 姜祖辉, 王俊, 唐启升. 体重、温度和饥饿对口虾蛄呼吸和排泄的影响[J]. *渔业科学进展*, 2000, 21(3): 28-32.
- Jiang Zuhui, Wang Jun, Tang Qisheng. Studies on effects of body weight, water temperature and starvation on respiration and excretion of mantis shrimp (*Oratosquilla oratoria*)[J]. *Marine Fisheries Research*, 2000, 21(3): 28-32.
- [25] 李文亚. 循环水系统放养密度对鲍养殖水质的影响及水处理效果优化研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2016.
Li Wenya. Study on effects of stocking densities on abalone water quality and optimization of treatment in the recirculating aquaculture system[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2016.

Effect of different flow rates and sizes on the growth and survival of *Sinonovacula constricta* juveniles in the circulatory raceway system

LIN Xing-guan^{1, 2}, ZHANG Xiang^{1, 2}, TENG Shuang-shuang^{1, 2}, XIAO Guo-qiang^{1, 2}, CAI Yi-long^{1, 2}

(1. Zhejiang Mariculture Research Institute, Wenzhou 325005, China; 2. Zhejiang Key Laboratory of Exploitation and Preservation of Coastal Bio-Resource, Wenzhou 325005, China)

Received: Jul. 15, 2019

Key words: *Sinonovacula constricta*; recirculating raceway system; intermediate culture; flow rate; size

Abstract: This study aimed to reduce the intermediate culture period of seedlings of *Sinonovacula constricta* and accelerate the culture of large-sized products. The effects of flow rate and size on the growth and water quality of the seedlings were investigated in a circulatory raceway system. Seedlings with a mean initial weight of 0.076 g ± 0.005 g were reared at three different flow rates (i.e., 0.12, 0.16, and 0.21 L/s) in a flat sink for 45 d. Results showed that the specific growth rate and weight gain rate increased rapidly with the increase in flow rate, whereas, the mortality rate showed a reverse pattern. The ecological economical flow rate was calculated to be 0.163 L/s on the basis of the survival rate with daily average weight gain rate. When the system flow rate was 0.163 L/s, the growth rate of the large-sized group (80 000 individuals/kg) was significantly higher than that of the small-sized group (180 000 individuals/kg). Meanwhile, the weight per unit area of the large-sized group was lower than that of the small-sized group by 23.72% because the number of seedlings in the small-sized group was larger than that of the large-sized group. In addition to the low flow rate, the intermediate process of planar flow has a good removal effect on chlorophyll *a* and ammonium nitrogen, with removal rates of 36.99% and 3.88%, respectively. This finding indicates that planar flow induces intensive intermediate cultivation, while, the use of seawater and pond water for the intermediate cultivation of seedlings plays a role in purifying these water bodies. The results of this study indicate that the minimum degree of self-pollution and growth and survival rates higher than 73.12% can be guaranteed at a culture density of 0.5 kg/m² and a flow rate of 0.163 L/s.

(本文编辑: 刘珊珊)