

[引用格式] 王志远, 张丽莉, 王国栋. 白棘三列海胆苗种繁育及盐度对受精、胚胎和幼体发育的影响[J]. 集美大学学报 (自然科学版), 2026, 31(2): 127-138. DOI:10.19715/j.jmuzr.2026.02.01.

白棘三列海胆苗种繁育及盐度对受精、胚胎和幼体发育的影响

王志远^{1,2}, 张丽莉^{1,2}, 王国栋^{1,2}

(1. 集美大学水产学院, 福建 厦门 361021; 2. 农业农村部东海健康海水养殖重点实验室, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为开发我国白棘三列海胆的养殖资源, 本研究对该物种育苗工艺进行改进, 观察受精后胚胎及幼体发育过程, 同时初步探讨盐度变化对白棘三列海胆受精、胚胎及幼体发育的影响。研究结果如下: 1) 用人工授精的方式, 受精率高达 91.4%; 胚胎发育过程包括多细胞阶段、囊胚期及原肠期, 孵化率为 69.2%; 幼体经历多次选优, 选取 1.5×10^6 个棱柱幼体发育至四腕幼体, 再选 1×10^6 个四腕幼体发育至八腕幼体, 整个发育过程持续约 50 d, 最终培育出变态的稚海胆, 完成了白棘三列海胆的人工育苗。2) 在盐度 30~40 范围内, 白棘三列海胆受精率超过 80%, 显著高于低盐度条件 ($P < 0.05$); 盐度 35 时受精和孵化表现最佳, 盐度低于 25 时受精率下降且后续发育受阻, 盐度 20 条件下不能受精; 长腕幼体期适宜盐度为 35~40, 盐度 35 组幼体生长速度优于盐度 40 组, 但盐度 40 组幼体存活率显著高于盐度 35 组 ($P < 0.05$)。

[关键词] 白棘三列海胆; 人工繁育; 胚胎发育; 幼体发育; 盐度

[中图分类号] S 968.9 [文章编号] 1007-7405(2026)02-0127-12 DOI:10.19715/j.jmuzr.2026.02.01

Seed Production of the Sea Urchin *Tripneustes gratilla* and Effects of Salinities on Fertilization, Embryo, and Larval Development

WANG Zhiyuan^{1,2}, ZHANG Lili^{1,2}, WANG Guodong^{1,2}

(1. Fisheries College, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Key Laboratory of Healthy Marine Aquaculture, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Xiamen 361021, China)

Abstract: To develop aquaculture resources for *Tripneustes gratilla* (white-spined sea urchin) in China, this study aimed to improve the breeding process for this species. The fertilization, embryo, and larval development processes were observed, and the effects of salinity changes on fertilization, embryo, and larval development were also preliminarily explored. The results are as follows: 1) Through artificial insemination, the fertilization rate reached 91.4%. The embryonic development process included the multicellular stage, blastula stage, and gastrula stage, with a hatching rate of 69.2%. Going through multiple stages of breeding, 1.5×10^6 prism larvae develop

[收稿日期] 2024-11-04

[基金项目] 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”重点专项(2018YFD0901605); 厦门市海洋渔业局(南方海洋中心)(23YYST076QCB30); 福建省海洋与渔业局(FJHY-YYKJ-2023-1-6)

[通信作者] 王国栋, 博士, 教授, 从事水产养殖育种研究, E-mail:gdwang@jmu.edu.cn

into four-arm larva, and 1×10^6 four-larvae develop into to eight-arm larvae, lasting for approximately 50 days, and finally cultivated the juvenile sea urchins of metamorphosis; 2) At salinity levels of 30-40, the fertilization rate of *T. gratilla* exceeded 80%, significantly higher than that in the low salinity groups (20 and 25) ($P < 0.05$). The best fertilization and hatching performance were observed at 35 salinity. When salinity fell below 25, fertilization rates declined, hindering subsequent development, with no fertilization occurring at 20. The suitable salinity range for the arm larval stage is 35-40; larval growth was better at 35 than at 40, but the survival rate of larvae was significantly higher at 40 than at 35 ($P < 0.05$). In summary, this study systematically observed the developmental process of *T. gratilla* and explored the effects of salinity on larval development. The data obtained can provide support for artificial breeding and large-scale aquaculture of sea urchins.

Keywords: *Tripneustes gratilla*; artificial breeding; embryo development; larval development; salinity

0 引言

白棘三列海胆 (*Tripneustes gratilla*) 隶属棘皮动物门 (Echinodermata) 海胆纲 (Echinoidea) 毒棘海胆科 (Toxopneustidae)^[1], 是热带海域常见的正形目海胆之一, 广泛分布于印度洋至西太平洋热带海域, 在我国常见于海南、广东和台湾等沿海。成体海胆壳呈半球形, 壳高略大于壳径的 1/2, 壳径可达 15 cm, 体重可达 1 kg, 在适宜温度下养殖半年即可达到商品规格^[2], 是我国具有较高经济价值的海胆种类之一, 极具开发价值。目前, 由于过度捕捞、环境污染以及气候变化等原因, 国内外自然海域的白棘三列海胆资源已经遭到严重破坏^[3]。因此, 开展人工繁育技术和基础生物学研究, 是开发海胆养殖新品种和维护自然生态资源的重要举措。

在海胆的人工繁育上, 我国学者先后对中间球海胆 (*Strongylocentrotus intermedius*)^[4]、光棘球海胆 (*Strongylocentrotus nudus*)^[5-8] 和紫海胆 (*Helicodidaris crassispina*)^[9] 进行了相关研究, 突破了这几种海胆人工育苗技术。国内外针对白棘三列海胆的生物学特征也开展了一系列生物学研究, 包括海洋变暖和酸化等对海胆幼体或成体的影响^[10], 然而关于人工育苗的研究较少, 仅见唐鹤鸣^[11] 和杜忆幽等^[12] 的研究报道, 且均未展示海胆完整的变态发育过程。由于白棘三列海胆对温度、盐度等水质条件要求较高, 以及浮游期较长等问题, 导致人工育苗时程长、难度高, 目前其人工育苗技术尚未成熟, 无法大规模培育苗种。另外, 白棘三列海胆理想的栖息地是珊瑚礁, 其生存主要依赖于高盐度环境^[13], 盐度对海胆的繁殖和幼体发育影响较大^[14-16], 但关于盐度对其早期发育的影响尚未见报道。因此, 本研究拟完成白棘三列海胆的胚胎、幼体发育及变态的完整过程, 并初步探究盐度胁迫对幼体发育的影响, 以期完善白棘三列海胆的人工育苗技术, 为规模化开发适合热带海域海胆养殖新品种提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 实验材料

白棘三列海胆取自我国西沙群岛海域, 2023 年 11 月 3 日, 由潜水员采捕壳径 (10.0 ± 0.5) cm、体重 (150.0 ± 15.0) g 以上的个体作为备选亲本, 于海南陵水暂养

后由控温活水车运至厦门市海洋与渔业研究所。亲本暂养于 $1.0\text{ m} \times 1.0\text{ m} \times 2.0\text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高) 的水泥池网箱中, 温度 $20 \sim 23\text{ }^{\circ}\text{C}$, 盐度 $33 \sim 35$, 自然光照, 连续充气, 每日足量投喂海带 (*Saccharina japonica*), 隔日清理残饵。

1.2 海水处理

育苗实验在厦门市海洋与渔业研究所进行。育苗用水为超滤海水, 育苗过程中海水水温 $18.5 \sim 22.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, pH $7.7 \sim 8.2$, 溶解氧 $5.5 \sim 6.5\text{ mg/L}$ 。

盐度实验用水方面, 先将优质海盐和经 $0.01\text{ }\mu\text{m}$ 孔径滤膜超滤过的海水混合制成高盐度海水, 再将蒸馏水与超滤海水混合制成低盐度水。混合溶液静置 30 min 后, 使用盐度计进行校准。根据预实验数据, 本研究设置了五个盐度梯度: 20 、 25 、 30 、 35 和 40 。每个盐度级别使用 1 个 1000 mL 烧杯作为 1 个实验单位, 并为每个盐度级别安排 3 次生物学重复实验。

1.3 育苗设备

浮游幼体的培育在容积 1000 L 、桶高 1 m 的木色圆形塑料桶中进行。底栖硅藻的培育在 $2.0\text{ m} \times 3.0\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高) 的水泥池中进行, 水深控制在 0.8 m 。培养底栖硅藻和采集稚海胆时, 采用无毒透明 PVC 波纹板并使用塑料框架进行组装。

1.4 催产、胚胎孵化与幼体培育

2023 年 12 月 25 日, 采用阴干和水流刺激的方法催产, 使其自然产卵。收集精卵后, 利用沉性卵的特点, 进行卵子质量筛选。精卵结合后 5 min 即可转移到孵化桶孵化。孵化温度为 $22.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 密度为 $15 \sim 20$ 个/ mL , 桶内仅注入一半水量, 且全程不换水, 逐渐添加新水直至桶满, 孵化期间不充气。

浮游幼体培养温度为 $18.5 \sim 22.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, 使用超滤海水在木色圆形塑料桶中进行培养。幼体通过两种换水方式选优: 移至新桶或虹吸法清除底层幼体。幼体到八腕阶段后, 更改为使用 200 目网筐更换水, 每天换水 $2/3$, 隔天进行倒池处理。从二腕幼体开始, 投喂牟氏角毛藻 (*Chaetoceros muelleri*) 和等鞭金藻 (*Isochrysis galbana*) 的混合藻料, 随着幼体的生长, 逐步增加饵料浓度。

1.5 采苗与幼体变态

采苗前, 波纹板用体积分数为 1×10^{-6} 的敌百虫溶液浸泡并冲洗。在幼体变态完成之前, 继续投喂牟氏角毛藻。稚胆附着后转为流水培养模式, 定期清理积污物, 并补充底栖硅藻以满足稚海胆的摄食需求。

1.6 统计分析

数据使用 Excel 2018 软件进行整理, 受精率、孵化率和变态率通过反正弦函数进行转换。使用 IBM SPSSTM Statistics 22 进行数据正态分布检验、方差齐性检验及单因素方差分析, 并随后进行 Duncan 多重比较分析, $P < 0.05$ 表示差异具有统计学意义。使用 GraphPad Prism (版本 8.0.1) 进行数据可视化。受精率、孵化率和变态率计算公式为:

受精率 = (受精卵数量/总数量) $\times 100\%$;

孵化率 = (孵化数量/受精卵数量) $\times 100\%$;

变态率 = (稚海胆数量/实验开始时添加的总幼虫数量) $\times 100\%$ 。

2 结果

2.1 胚胎发育

在 22 ℃ 下催产授精，获得 3×10^6 个受精卵，受精率达 91.4%，胚胎发育过程具体如图 1 所示。精卵结合后形成明显的受精膜，发育状态如图 1A 所示。受精卵最少需要 2.5 h 分裂为二细胞；3 h 分裂为四细胞；5 h 分裂为十六细胞；6 h 达多细胞期；8 h 胚胎细胞开始上浮，到达囊胚期；18 h 后形成胚层和原肠腔发育至原肠期；在原肠期持续 26 h 后发育至棱柱幼体期。孵化率为 69.2%。

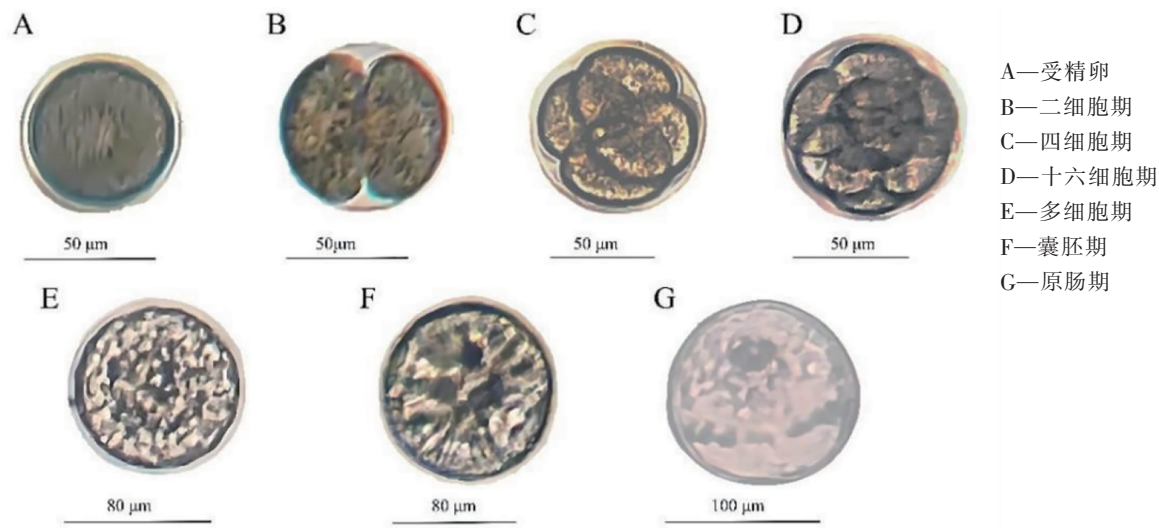


图 1 白棘三列海胆卵裂期发育过程

Fig.1 During the cleavage stage of *Tripneustes gratilla*

2.2 幼体培育的关键技术参数

在水温为 18.5 ~ 22.8 ℃ 的环境条件下，从受精卵发育至稚海胆需 50 d（见表 1）。

表 1 海胆幼体发育过程

Tab.1 Development of *Tripneustes gratilla*

发育阶段	发育时间	体长	发育阶段	发育时间	体长
受精卵	0.2 h	70 μm	四腕幼体 I 期	4.5 d	320 μm
二细胞期	2.5 h	75 μm	四腕幼体 I 期	7 d	480 μm
四细胞期	3.2 h	77 μm	四腕幼体 II 期	12 d	610 μm
八细胞期	3.7 h	79 μm	四腕幼体 II 期	22 d	880 μm
多细胞期	5 h	85 μm	六腕幼体或八腕幼体初期	24 d	905 μm
囊胚期	8 h	89 μm	八腕幼体 I 期	28 d	980 μm
原肠期	18 h	105 μm	八腕幼体 II 期	40 d	1150 μm
棱柱幼体	44 h	135 μm	八腕幼体 II 期	48 d	1010 μm
二腕幼体	3 d	270 μm	稚海胆	50 d	705 mm

注：各期幼体发育的时间指发育最快个体的记录；棱柱幼体及稚海胆体长为直径，其他为口后腕长度。

在 20 ℃ 水温下, 共孵化出 2.1×10^6 个棱柱幼体, 最大体长达 135 μm , 依靠体表皮纤毛在水中旋转运动, 可模糊看到胃 (见图 2A)。选取 1.5×10^6 个优质棱柱幼体进行培育, 养殖密度为 2 个/mL。

第 70 小时发育至二腕幼体 (见图 2B)。口后腕突出, 消化系统基本完善, 胃部呈椭圆状, 食管开始蠕动, 摄食时胃部和肠道有节律地收缩。

约 106 h 后发育至四腕幼体 I 期 (见图 2C)。此时幼体四条腕, 口后腕伸长, 前侧腕突起, 顶端的骨针交汇形成“梯形”结构。选取活性较好的 1×10^6 个优质四腕 I 期幼体进行培育, 养殖密度为 1 个/mL。

7 d 后, 随着幼体的发育, 四条长腕加长 (见图 2D), 食道和肠胃变大。幼体生长至 12 d, 口后腕粗壮, 根部不再相连, 胃占整个身体的比例变大, 胃直径达 260 μm , 幼体体长可达 610 μm , 此时为四腕幼体 II 期 (见图 2E), 幼体养殖密度降低为 0.5 个/mL。幼体保持四条腕直至发育的第 22 天左右, 原梯形结构的反口端顶部凹陷, 两侧突起 2 个角状肉褶, 纤毛旋转摆动, 运动能力增强 (见图 2F), 养殖密度降低为 0.3 个/mL。

约 24 d 后发育至六腕幼体或称八腕初期, 此时幼体同时出现后背腕和口前腕, 长出肩片 (见图 2G)。后背腕和口前腕持续生长, 角状肉褶变粗, 体宽增加, 为八腕幼体 I 期 (见图 2H), 此时养殖密度为 0.2 个/mL。幼体继续生长, 后背腕和前侧腕更加粗壮, 出现前庭复合体, 在第 40 天幼体最大体长达 1150 μm , 达八腕幼体 II 期 (见图 2I)。随后, 口前腕和前侧腕开始缩短, 前庭复合体增大, 将胃向一侧挤压, 初生管足长出, 体长缩小 (见图 2J)。

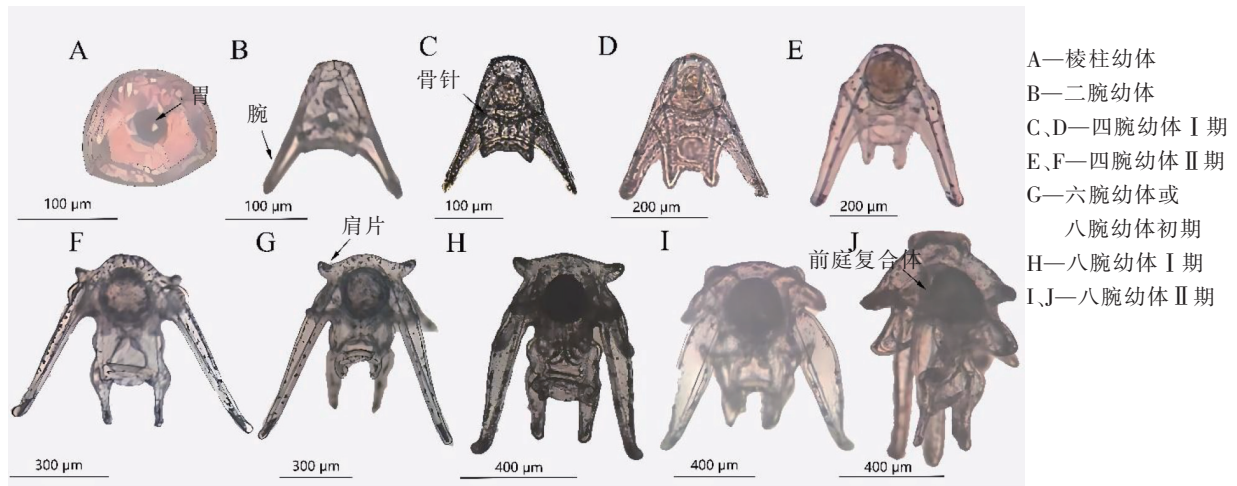


图 2 白棘三列海胆幼体发育
Fig.2 Larval development of *Tripneustes gratilla*

2.3 幼体变态

在受精 49 d 后, 幼体的管足开始伸出并附着在采苗板上进行变态。幼体通常在 1~2 d 内完成变态, 其八个腕的表皮组织向基部收缩并脱落, 体形呈半球形。此时幼棘组织开始生长, 明显看到 5 个管足, 幼棘逐渐伸长, 大部分幼棘末端分叉。完成变态后形成的稚海胆直径约为 705 μm 。在接下来的 3~5 d 内, 幼棘继续生长, 最终发展成完整的棘 (见图 3)。

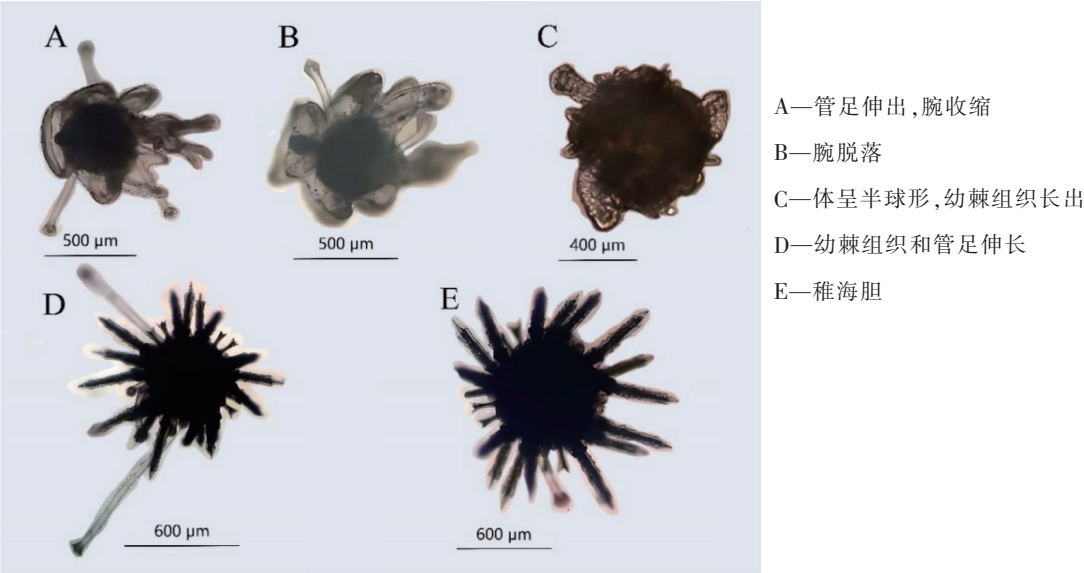


图 3 白棘三列海胆变态过程和稚海胆
Fig.3 Metamorphosis process and juvenile of *Tripneustes gratilla*

2.4 盐度对白棘三列海胆受精和胚胎发育的影响

为研究盐度对白棘三列海胆受精、胚胎发育和长腕幼体发育过程的影响，本研究设定了 20、25、30、35 和 40 五个盐度组。结果表明：在盐度 30、35 和 40 组中，白棘三列海胆的受精率均高于 80%，其中盐度 35 组受精率最高（91.4%），但三组之间差异不具有统计学意义（ $P>0.05$ ）；盐度 25 组受精率为 17.23%，显著低于高盐度组（盐度 30、35 和 40 组）（ $P<0.05$ ）；盐度 20 组未受精（见图 4a）。

盐度 35 组孵化率为 69.2%，显著高于盐度 20、25、30 组（ $P<0.05$ ），与盐度 40 组差异不具有统计学意义（ $P>0.05$ ）。盐度 30 组的孵化率为 53.87%，显著低于盐度 35 和 40 组（ $P<0.05$ ）。盐度 25 组孵化率仅有 17.8%。盐度降到 20 时，受精卵不能成功孵化（见图 4b）。

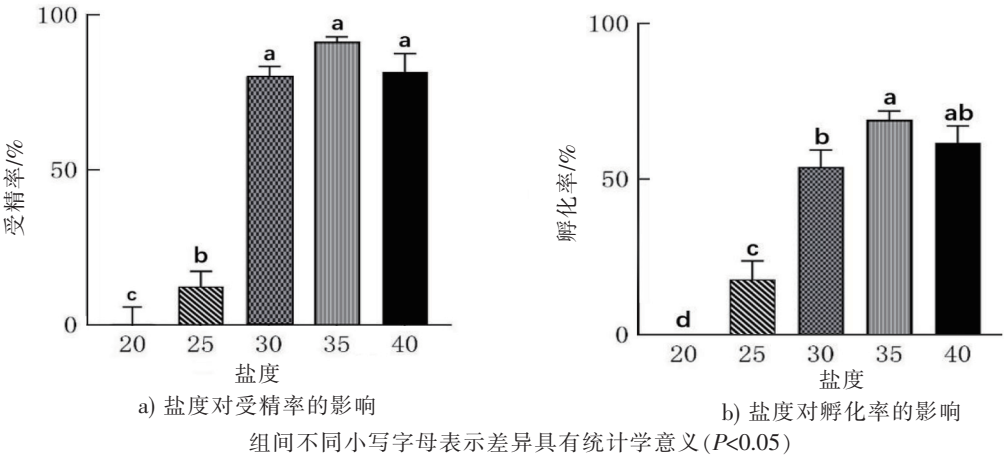


图 4 盐度对受精率和孵化率的影响
Fig.4 Effects of salinity on the fertilization and hatching rate

不同盐度对白棘三列海胆胚胎发育影响的结果如图 5 所示。盐度 35 组具有最佳发育速率, 培育 3 h 超过 80% 的胚胎达到二细胞期, 培育 24 h 有 65.84% 的胚胎进入原肠期, 培育 72 h 有 64.38% 的胚胎成长为棱柱幼体。盐度 35 组与盐度 30、40 组相比, 胚胎发育速度的差异不具有统计学意义 ($P>0.05$)。培育 3 h, 51.37% 盐度 30 组、81.37% 盐度 40 组的胚胎发育至二细胞期; 培育 24 h, 33.93% 盐度 30 组、45.53% 盐度 40 组的胚胎发育成原肠期; 培育 72 h, 48.05% 盐度 30 组和 51.57% 盐度 40 组的胚胎发育至棱柱幼体。而盐度 25 组死亡率显著高于盐度 30、35、40 组 ($P<0.05$)。盐度 20 组胚胎仅能发育到四细胞期, 后续无法继续发育。

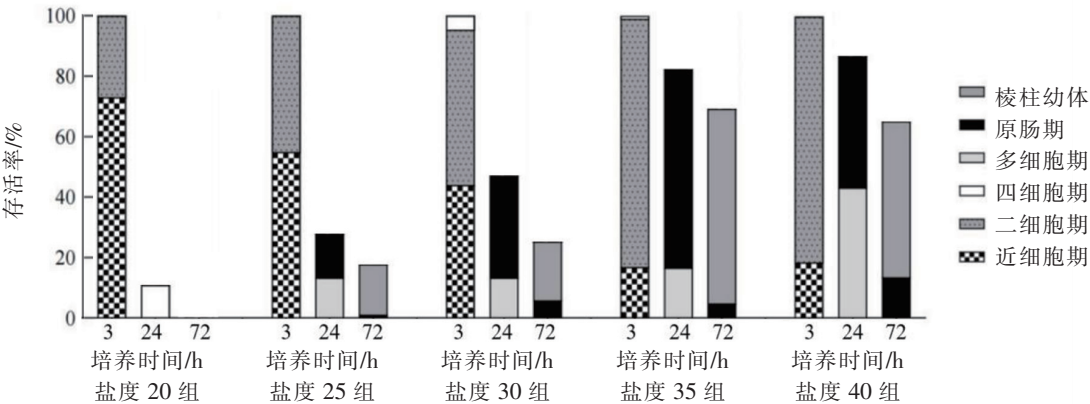


图 5 不同盐度对白棘三列海胆胚胎发育的影响 ($P<0.05$)

Fig.5 Effects of different salinity on the embryonic development of *Tripneustes gratilla* ($P<0.05$)

2.5 盐度对白棘三列海胆长腕幼体发育的影响

不同盐度组对白棘三列海胆长腕幼体发育的影响如图 6 所示。在盐度 40 组中, 幼体的生存率显著高于其他盐度组 ($P<0.05$); 盐度 35 组中幼体虽能正常发育到八腕幼体 II 期, 但死亡率显著高于盐度 40 组 ($P<0.05$); 而盐度 20、25 和 30 组中, 幼体无法发育至六腕幼体期, 极少数发育至四腕幼体后全部死亡。具体而言, 海胆幼体经过 5、15、25、35 和 45 d 培养后, 盐度 40 组死亡率分别为 16.4%、33.72%、40.08%、46.93% 和 53.77%, 盐度 35 组死亡率分别为 21.7%、43.99%、52.76%、58.48% 和 72.82%。

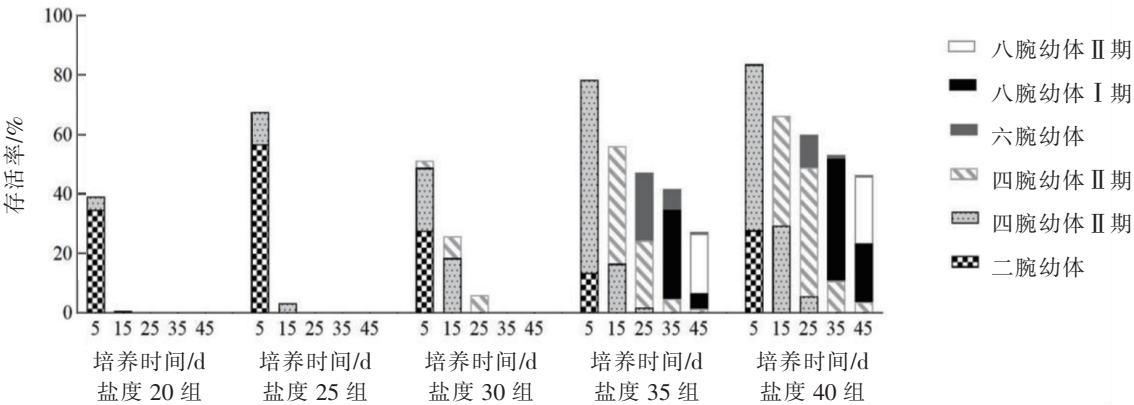


图 6 不同盐度对白棘三列海胆长腕幼体发育的影响 ($P<0.05$)

Fig.6 Effects of different salinity on the morphology development of *Tripneustes gratilla* ($P<0.05$)

在盐度 35 和 40 组中, 幼体发育速度存在显著差异, 盐度 35 组幼体发育最快, 显著高于其他组 ($P < 0.05$)。培养 5 d, 有 94.96% 的二腕幼体在盐度 35 下成功发育到四腕幼体 I 期, 而盐度 40 组中只有 55.86%。培养 15 d, 盐度 35 组中有 39.54% 的二腕幼体发育到四腕幼体 II 期, 盐度 40 组中有 36.96%。培养 25 d, 盐度 35 组中有 50% 个体发育到六腕幼体期; 但在盐度 40 组中, 只有 20% 左右的个体发育到六腕幼体期, 其他仍停留在四腕幼体 II 期。培养 35 d, 盐度 40 组仍有 10.74% 个体处在四腕幼体 II 期。培养 45 d, 盐度 35 组中有 80% 个体发育到八腕幼体 II 期; 而盐度 40 组中仅有 50% 个体发育到八腕幼体 II 期, 依旧有 19.65% 停留在八腕幼体 I 期。

3 讨论

3.1 亲本驯化

亲本状态差异对海胆的受精、胚胎发育以及幼体的生长与存活有重要影响^[17]。本实验率先开展了白棘三列海胆人工育苗研究, 亲本来自西沙群岛海域, 捕捞后经水车运输到实验场地。有研究^[15-16]表明, 自然海域下, 白棘三列海胆在多个月份均有产卵情况, 因此本研究将亲本驯养一段时间后进行育苗实验。海胆幼体发育前期的能量供应主要依赖于母体提供的脂类物质^[17-18], 因此母本性腺发育程度如何影响幼体发育成功与否。白棘三列海胆属于热带海胆, 适应较高水温, 而福建水温适宜其生长。在饲养过程中发现, 白棘三列海胆在 18 ℃ 的水温下可存活, 可适应福建冬季低温环境。同时, 在驯养实验中观察到, 当盐度低于 28 时海胆存活率降低, 而盐度调整至 33 以上时存活率显著提高, 表明白棘三列海胆对盐度要求较高, 未来进行野生海胆驯化以及成胆养殖时应注意保持较高盐度, 避免海胆死亡。

3.2 受精、胚胎和幼体发育特征

在水温 18.5 ~ 22.8 ℃ 条件下, 白棘三列海胆的胚胎发育速率与光棘球海胆、中间球海胆等冷水性海胆^[19]以及暖水性的高腰海胆 (*Mespilia globulus*)^[20]类似, 但是低于紫海胆^[21]在更高温度 (26 ℃) 下的发育速率。如表 2 所示: 白棘三列海胆从原肠期开始发育显著放缓, 达到棱柱幼体阶段需 44 h, 其他海胆中发育时间最长的中间球海胆也只需 30 h; 在长腕幼体期, 白棘三列海胆的发育速度相较于其他经济类海胆较慢, 特别是从四腕幼体到六腕幼体阶段约需要 20 d, 而其他经济类海胆仅需 4 ~ 6 d; 紫海胆和高腰海胆的发育速度相对较快, 尤其是从六腕幼体到变态为稚海胆的阶段, 高腰海胆仅需 4 d, 而白棘三列海胆则需更长的时间来积累能量和完成变态。此外, 前人研究结果^[16]显示, 在 24 ~ 27 ℃ 的养殖环境下, 在白棘三列海胆配子受精后的第 20 天, 成功变态出了稚海胆, 这表明白棘三列海胆的早期发育速度与水温条件紧密相关。这也提示, 白棘三列海胆的幼体发育周期时间线较长, 在第 20 ~ 50 天均可以变态成为稚海胆。

在海胆幼体的发育过程中, 不同海胆不仅在发育时间上存在显著差异, 在幼体的体长和形态上也各不相同。白棘三列海胆卵子直径仅有 70 μm 左右, 小于中间球海胆、紫海胆和高腰海胆的 80 ~ 95 μm^[22-26]; 但其在长腕幼体阶段的体长普遍大于其他海胆, 如高腰海胆^[22]、紫海胆^[23-24]和中间球海胆^[25-26]等。如: 在四腕幼体阶段, 白棘三列海胆

的体长可以达到 800 μm , 而相比之下, 高腰海胆和中间球海胆在此阶段的体长仅约为 400 μm ^[20,27], 紫海胆约为 500 μm ^[21]; 且白棘三列海胆幼体的最大体长(八腕幼体Ⅱ期)可以达到 1100 μm , 远大于其他已知海胆种类的 700 ~ 800 μm 最大体长^[19-21]。由此可推测, 更大的体型需要更多的时间发育, 即白棘三列海胆的生长周期相较于其他经济海胆更久。

表2 不同海胆胚胎和幼体发育过程比较
Tab.2 Combined embryonic and larval development process of different sea urchin

发育阶段	紫海胆 ^[9]	高腰海胆 ^[20]	光棘球海胆 ^[19]	中间球海胆 ^[19]	白棘三列海胆(本文)
受精卵	0 h	0 h	0 h	0 h	0 h
二细胞期	1 h	1 h	1 h	1 h	2.5 h
四细胞期	1.5 h	1.5 h	1.5 h	1.5 h	3.2 h
八细胞期	2 h	2 h	2 h	2.5 h	3.7 h
多细胞期	3 h	4.5 h	5 h	5 h	5 h
囊胚期	4 h	8 h	10 h	11 h	8 h
原肠期	5 h	15 h	15 h	18 h	18 h
棱柱幼体	7 h	23 h	24 h	30 h	44 h
四腕幼体	30 h	58 h	42 h	50 h	3 d
六腕幼体	4 d	7.5 d	5.5 d	8 d	24 d
八腕幼体	6 d	9 d	7 d	13 d	30 d
稚海胆	13 d	12 d	20 d	21 d	50 d

3.3 幼体培育的影响因素

海胆长腕幼体培育受多种因素影响, 包括原生动物数量和幼体密度等^[9]。育苗环境和微藻培养过程极易受到原生动物的污染, 源海水中的原生动物孢子在适宜温度下也会大量繁殖。一些体型较大的原生动物不仅能分泌有毒物质, 还能直接捕食单细胞藻类^[28-29], 进而影响海胆幼体的活动能力, 导致幼体下沉并大量死亡。有研究^[9]表明, 使用超滤海水能够减少原生动物的污染, 并通过定期更换养殖水体, 将水体中的原生动物数量控制在每毫升不超过 5 个, 可以显著提高白棘三列海胆幼体的存活率和变态率。本研究在养殖过程中发现由于水体底层残饵和粪便等因素导致底层原生动物密度较高, 并影响饵料利用率。因此, 未来应进一步改善养殖模式, 减少原生动物的产生, 同时研究特异灭杀原生动物的绿色药物, 进一步提升海胆幼体的存活率。

本研究观察到白棘三列海胆幼体在八腕幼体后期出现了大规模的下沉现象。据梁其旭^[9]在紫海胆的研究中显示, 紫海胆的八腕幼体一旦开始下沉, 1 d 后便会全部死亡。然而, 在白棘三列海胆的八腕幼体后期, 幼体下沉后继续喂养 5 d 并未死亡, 反而能够继续发育。究其原因可能是: 一方面, 八腕幼体在后期已经达到了变态的需求条件, 因

此提前进入了变态的准备状态;另一方面,白棘三列海胆幼体表现出过大的体型特性导致浮游能力下降。这表明白棘三列海胆的发育过程和已知的其他海胆存在明显差异,未来应开展更全面的生物学基础研究,阐明白棘三列海胆的生物学特性,为进一步开发白棘三列海胆资源提供基础资料。

3.4 盐度对白棘三列海胆受精和胚胎发育的影响

本研究数据表明,白棘三列海胆在 30、35、40 的盐度下受精率均超过 80%,而低盐度(20 和 25)限制了受精能力。有意思的是,成年海胆在盐度 25 下难以存活,但受精仍可能发生,这种情况在海参(*Eupentacta fraudatrix*)、海星(*Asterias amurensis* 和 *Asterina pecinifera*)等其他棘皮动物中^[30-33]也有报道,即这些物种能在比其存活的最低盐度水平还低的条件下受精,这表明白棘三列海胆对盐度的反应随发育阶段而有所差异。此现象可能是成体产卵策略,有助于幼体适应复杂的环境^[34]。另外,Allen 等^[35]发现,盾形海胆(*Echinarachnius parma*)即便在低盐度海水中其成功受精的卵也不会破裂。当盐度升高至 40 时,白棘三列海胆也展现出高受精率和孵化率,这在其他海胆中罕见。例如,紫海胆在盐度 40 下无法受精^[21],光棘球海胆和中间球海胆在高盐度下也无法正常发育^[36-37]。这可能与白棘三列海胆亲本所处的高盐度环境相关,推测白棘三列海胆是狭盐性种类,主要分布在特定的高盐度海域生存^[38-41]。

3.5 盐度对白棘三列海胆长腕幼体发育的影响

本研究中,盐度 30~40 为白棘三列海胆长腕幼体的适宜盐度范围,该结果与其他主要几种经济海胆的适盐范围差距较大^[37,40]。如:中间球海胆幼体适盐范围为 14~28^[36];杂色松海胆(*Lytechinus variegatus*)的适盐范围为 27.5~35^[40];紫海胆幼体的适盐范围为 25~35^[21];冷水性海胆在盐度 40 下幼体几乎无法存活^[41]。这一现象可能是由于高盐度和低温度限制原生动物的生长,从而降低了水中原生动物对白棘三列海胆幼体的危害。

此外,本研究发现白棘三列海胆对盐度的敏感性在每个生命阶段似乎有所不同,其胚胎阶段比幼体阶段有更高的盐度耐受性。因为在发育的各个阶段,幼体对盐度降低的抗性可能高于成年个体,这也是其他无脊椎动物的特征,有可能与经历这些阶段时的生态特征相关^[42-43]。

综上,育苗过程中的这些复杂因素为优化繁育技术提供了契机,同时也表明了白棘三列海胆幼体具有较高的可塑性。这种可塑性说明,通过调整和优化育苗条件,将会提高其生存率和健康成长的概率,为白棘三列海胆的稳定繁育打下良好基础。

4 结论

本研究通过改进育苗工艺,经历多个阶段的选育,最终培育出变态的稚海胆,完成了白棘三列海胆的人工育苗,并记录了白棘三列海胆早期发育的形态,为白棘三列海胆的规模化养殖提供了科学依据和技术支持。而且,本实验还表明,在较高的盐度条件下,其幼体的孵化率和存活率均显著提高。在海胆苗种生产中,盐度等因素不仅可作为诱导繁殖和幼体培育的标准参数,还能为海胆这一重要经济物种的大规模苗种生产和商业化养殖提供技术支持。

[参考文献]

- [1] 高绪生,常亚青. 中国经济海胆及其增养殖[M]. 北京:中国农业出版社,1999:1-2.
- [2] RADHAD A W, BASZARY C D U, LEKATOMPESSEY V C, et al. Substrate types on habitat breeding embryonic development and larval morphometric of sea urchin *Tripneustes gratilla* (Linnaeus 1758) [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 618(1): 12-30.
- [3] CARBONI S, ADDIS P, CAU A, et al. Aquaculture could enhance Mediterranean Sea urchin fishery, expand supply[J]. Global Aquaculture Advocate, 2012(3): 44-45.
- [4] 常亚青,张伟杰,冷晓飞,等. 中间球海胆“大金”[J]. 中国水产, 2015(12): 58-59.
- [5] 李云峰,周力,赵志刚. 光棘球海胆的人工育苗技术[J]. 北京水产, 2008(5): 50-51.
- [6] 张寿山. 海胆的人工繁殖方法[J]. 海洋科学, 1982(2): 65-66.
- [7] 高绪生,胡庆明. 大连紫海胆人工育苗试验[J]. 水产科学, 1990, 9(2): 17-20.
- [8] 王子臣,常亚青. 经济类海胆增养殖研究进展及前景[J]. 海洋科学, 1997(6): 20-22.
- [9] 梁其旭. 紫海胆苗种繁育优化技术及盐度温度对个体发生的影响[D]. 厦门:集美大学, 2021.
- [10] GIBSON R, ATKINSON R, GORDON J, et al. Impact of ocean warming and ocean acidification on marine invertebrate life history stages: vulnerabilities and potential for persistence in a changing ocean[J]. Oceanography and Marine Biology, 2011, 49: 1-42.
- [11] 唐鹤鸣. 白棘三列海胆人工育苗技术研究[J]. 河北渔业, 2008(1): 35-36.
- [12] 杜忆幽,刘忠颖,刘卫东. 白棘三列海胆北方育苗初试[J]. 水产养殖, 2022, 43(4): 51-53.
- [13] FERNANDEZ C, PASQUALINI V, BOUDOURESQUE C, et al. Effect of an exceptional rainfall event on the sea urchin (*Paracentrotus lividus*) stock and seagrass distribution in a Mediterranean coastal lagoon[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2006, 68(1): 259-270.
- [14] LAWRENCE J M, LAWRENCE A L, WATTS S A. Feeding, digestion and digestibility of sea urchins[J]. Developments in Aquaculture and Fisheries Science, 2013, 38: 135-154.
- [15] 高绪生,常亚青. 中国经济海胆及其增养殖[M]. 北京:中国农业出版社, 1999: 27-27.
- [16] ALSAFFAR A H, LONE K P. Reproductive cycles of *Diadema setosum* and *Echinometra mathaei* (Echinoidea: Echinodermata) from Kuwait (northern Arabian Gulf) [J]. Bulletin of Marine Science, 2000, 67(2): 845-856.
- [17] BYRNE M, PROWSE T A A, SEWELL M A, et al. Maternal provisioning for larvae and larval provisioning for juveniles in the toxopneustid sea urchin *Tripneustes gratilla* [J]. Marine Biology, 2008, 155: 473-482.
- [18] BYRNE M, SEWELL M A, PROWSE T A A. Nutritional ecology of sea urchin larvae: influence of endogenous and exogenous nutrition on *Echinopluteal* growth and phenotypic plasticity in *Tripneustes gratilla* [J]. Functional Ecology, 2008, 22(4): 643-648.
- [19] 常亚青,王子臣,宋坚,等. 四种海胆杂交的可行性及子代的早期发育[J]. 水产学报, 2000, 24(3): 211-216.
- [20] 王宝锋,张伟杰,胡方圆,等. 高腰海胆胚胎及幼体发育过程[J]. 大连海洋大学学报, 2019, 34(4): 526-530.
- [21] 梁其旭,张丽莉,黄世玉,等. 盐度对紫海胆受精、胚胎发育、幼体生长、摄食和变态的影响[J]. 水产学报, 2023, 47(5): 84-96.
- [22] KITAZAWA C, KOBAYASHI C, KASAHARA M, et al. Morphogenesis of adult traits during the early development of *Mespilia globulus* (Linnaeus, 1758) (Echinodermata: Echinoidea) [J]. Zoological Studies, 2012, 51(8): 1481-1489.
- [23] 杨章武,李正良,郑雅友,等. 紫海胆人工育苗技术的研究[J]. 台湾海峡, 2001, 20(1): 32-36.
- [24] 经晨晨,张伟杰,宋坚,等. 中间球海胆与紫海胆种间杂交的受精、孵化和幼体发育研究[J]. 大连海洋大学学报, 2015, 30(6): 620-626.
- [25] 韩奋杰,张伟杰,秦宇博,等. 中间球海胆幼体及稚海胆生长性状的遗传参数估计[J]. 大连海洋大学学报, 2017, 32(2): 145-149.
- [26] QI S B, ZHAO X W, ZHANG W J, et al. The effects of 3 different microalgae species on the growth, metamorphosis and MYP

- gene expression of two sea urchins, *Strongylocentrotus intermedius* and *S. nudus* [J]. *Aquaculture*, 2018, 492: 123-131.
- [27] 王子臣, 常亚青. 虾夷马粪海胆人工育苗的研究 [J]. *中国水产科学*, 1997, 4(1): 61-68.
- [28] COMBES A, DELLINGER M, CADEL-SIX S, et al. Ciliate *Nassula* sp. grazing on a microcystin-producing cyanobacterium (*Planktothrix agardhii*): impact on cell growth and in the microcystin fractions [J]. *Aquatic Toxicology*, 2013, 126: 435-441.
- [29] 郭胜娟. 金藻 *Poterioochromonas* sp. 生理特性及控制藻类水华潜力的研究 [D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2008.
- [30] KASHENKO S D. Combined effect of temperature and salinity on the development of the holothurian *Eupentacta fraudatrix* [J]. *Russian Journal of Marine Biology*, 2000, 26: 188-193.
- [31] KASHENKO S D. The reaction of the starfish *Asterias amurensis* and *Patiria pectinifera* (Asteroidea) from Vostok Bay (sea of Japan) to a salinity decrease [J]. *Russian Journal of Marine Biology*, 2003, 29: 110-114.
- [32] KASHENKO S D. Responses of embryos and larvae of the starfish *Asterias amurensis* to changes in temperature and salinity [J]. *Russian Journal of Marine Biology*, 2005, 31: 294-302.
- [33] KASHENKO S D. The combined effect of temperature and salinity on development of the sea star *Asterina pectinifera* [J]. *Russian Journal of Marine Biology*, 2006, 32: 37-44.
- [34] COWEN R K, PARIS C B, SRINIVASAN A. Scaling of connectivity in marine populations [J]. *Science*, 2006, 311: 522-527.
- [35] ALLEN J D, PECHENIK J A. Understanding the effects of low salinity on fertilization success and early development in the sand dollar *Echinarachnius parma* [J]. *The Biological Bulletin*, 2010, 218(2): 189-199.
- [36] 王笑月, 董颖, 王丽梅, 等. 盐度对中间球海胆(♀) × 光棘球海胆(♂) 杂交子代受精卵孵化及浮游幼体生长发育的影响 [J]. *水产科学*, 2009, 28(8): 472-474.
- [37] 孙勉英, 高绪生. 盐度对大连紫海胆生长发育的影响 [J]. *水产学报*, 1991, 15(1): 72-76.
- [38] 大贝政治, 孙光. 附着硅藻对皱纹盘鲍幼虫附着及稚贝生长的影响 [J]. *国外水产*, 1992(3): 15-17.
- [39] 丁敬敬, 胡亚强, 黄勃, 等. 温度和盐度对羊鲍胚胎发育及幼虫发育的影响 [J]. *水产学报*, 2016, 40(6): 917-924.
- [40] ROLLER R A, STICKLE W B. Effects of temperature and salinity acclimation of adults on larval survival, physiology, and early development of *Lytechinus variegatus* (Echinodermata: Echinoidea) [J]. *Marine Biology*, 1993, 116(4): 583-591.
- [41] SAMEOTO J A, METAXAS A. Can salinity-induced mortality explain larval vertical distribution with respect to a halocline? [J]. *The Biological Bulletin*, 2008, 214(3): 329-338.
- [42] NAGABHUSHANAM R, GOPALA K, MURTI K. Effect of salinity on the developmental stages of *Chiton granoradiatus* Leloup [J]. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 1967, 14(1): 162-165.
- [43] KACHENKO S D. The effect of freshening on development of Far East Trepang [J]. *Marine Biology*, 1992(3/4): 43-52.

(责任编辑 朱雪莲 英文审校 黄力行)