

DOI: 10.5846/stxb202108102200

林岗, 饶小珍. 饵料、盐度和温度对刺巨藤壶幼虫生长发育的影响. 生态学报, 2022, 42(21): 8628-8639.

Lin G, Rao X Z. Effects of diets, salinity and temperature on the larval development of *Megabalanus volcano*. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(21): 8628-8639.

饵料、盐度和温度对刺巨藤壶幼虫生长发育的影响

林 岗^{1,2}, 饶小珍^{1,2,*}

1 福建师范大学生命科学学院, 福州 350117

2 福建师范大学福建省特色海洋生物资源可持续利用重点实验室, 福州 350117

摘要:刺巨藤壶 (*Megabalanus volcano*) 是沿海污损生物的优势种, 也是沿岸居民常食用的海鲜之一。为探究刺巨藤壶幼虫室内培养的适宜条件, 采用生态学单因子梯度实验方法, 研究饵料种类及密度、盐度 (18、22、26、30、34、38 和 42) 和温度 (14℃、18℃、22℃、26℃、30℃ 和 34℃) 等生态因子对刺巨藤壶幼虫生长发育的影响, 以 VI 期无节幼虫存活率、VI 期无节幼虫发育时间、金星幼虫存活率、金星幼虫发育时间和金星幼虫体长等为观察指标。中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*) 和牟氏角毛藻 (*Chaetoceros muelleri*) 均设置 5×10^4 个/mL、 10×10^4 个/mL、 20×10^4 个/mL、 40×10^4 个/mL 和 80×10^4 个/mL 5 个密度梯度, 亚心形扁藻 (*Platymonas subcordiformis*) 设置 2.5×10^4 个/mL、 5×10^4 个/mL、 10×10^4 个/mL、 15×10^4 个/mL 和 20×10^4 个/mL 5 个密度梯度。结果表明, 3 种微藻的低密度组刺巨藤壶幼虫均不能发育至金星幼虫, 而达到一定的藻密度幼虫均能发育至金星幼虫阶段; 幼虫发育时间随藻密度的提高而降低; 幼虫存活率和金星幼虫的体长一般随藻密度的提高而增加。中肋骨条藻 80×10^4 个/mL 组的金星幼虫存活率高达 41.33%、金星幼虫体长 681.43 μm ; 牟氏角毛藻 80×10^4 个/mL 组的金星幼虫存活率高达 43.67%、金星幼虫体长 668.39 μm ; 中肋骨条藻和牟氏角毛藻是培养刺巨藤壶幼虫的适宜饵料, 最适密度是 40×10^4 个/mL 和 80×10^4 个/mL。亚心形扁藻 20×10^4 个/mL 组的金星幼虫存活率最高仅 14.33%、金星幼虫体长仅 554.60 μm , 因此亚心形扁藻不是培养刺巨藤壶幼虫的适宜饵料。除 18 盐度组幼虫只能发育到 IV 期无节幼虫外, 22—42 各盐度组的幼虫均能发育到金星幼虫阶段, 30 盐度组的金星幼虫存活率最高为 35.67%; 幼虫发育时间各盐度组相差不大; 在 22 和 26 低盐培养下, 金星幼虫的体长相对较长。26—34 盐度是幼虫发育的适宜盐度。14℃ 和 34℃ 温度组幼虫最多发育到 V 期无节幼虫, 18—30℃ 各温度组的幼虫均能发育至金星幼虫阶段, 22℃ 的金星幼虫存活率最高为 50.67%; 随着温度的提高, 幼虫发育时间显著缩短; 在 18℃ 低温培养下, 金星幼虫的体长相对较长。22—26℃ 是幼虫发育的适宜温度。总之, 在合适的藻类密度、盐度和温度条件下, 在室内培养刺巨藤壶无节幼虫一般在 8 d 可达金星幼虫阶段, 金星幼虫的存活率可达 35% 以上。

关键词:刺巨藤壶; 饵料; 盐度; 温度; 无节幼虫; 金星幼虫

Effects of diets, salinity and temperature on the larval development of *Megabalanus volcano*

LIN Gang^{1,2}, RAO Xiaozhen^{1,2,*}

1 College of Life Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China

2 Fujian Key Laboratory of Special Marine Bio-resource Sustainable Utilization, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China

Abstract: The acorn barnacle *Megabalanus volcano* is a dominant fouling organism of coastal ecosystem, and inhabits at low intertidal and subtidal areas in tropical and subtropical shores. To explore the suitable culture conditions of *M. volcano* larvae, the effects of diets (species and density), salinity (18, 22, 26, 30, 34, 38, 42), and temperature (14℃, 18℃, 22℃, 26℃, 30℃, 34℃) on the larval development of *M. volcano* were evaluated. The survival percentage of naupliar VI,

基金项目: 福建省高校产学研合作项目 (2018N5007)

收稿日期: 2021-08-10; 网络出版日期: 2022-06-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xzrao@fjnu.edu.cn

survival percentage of cyprids and development time of naupliar VI, development time of cyprids cyprid length were investigated as observation indicators. *Skeletonema costatum* ($5 \times 10^4/\text{mL}$, $10 \times 10^4/\text{mL}$, $20 \times 10^4/\text{mL}$, $40 \times 10^4/\text{mL}$, $80 \times 10^4/\text{mL}$), *Chaetoceros muelleri* ($5 \times 10^4/\text{mL}$, $10 \times 10^4/\text{mL}$, $20 \times 10^4/\text{mL}$, $40 \times 10^4/\text{mL}$, $80 \times 10^4/\text{mL}$) and *Platymonas subcordiformis* ($2.5 \times 10^4/\text{mL}$, $5 \times 10^4/\text{mL}$, $10 \times 10^4/\text{mL}$, $15 \times 10^4/\text{mL}$, $20 \times 10^4/\text{mL}$) were chosen as the diets of *M. volcano*. Results showed the following. Nauplii could not develop to cyprids at a low algal density for 3 algae, and could develop to cyprids over than a certain density. The larval development time decreased with algal density, however the larval survival percentage and the cyprid length generally increased with algal density. The highest survival percentage of cyprids on a diet of *S. costatum* (at $80 \times 10^4/\text{mL}$) was 41.33%, and the cyprid length was $681.43 \mu\text{m}$. The highest survival percentage of cyprids on a diet of *C. muelleri* (at $80 \times 10^4/\text{mL}$) was 43.67%, and the cyprid length was $668.39 \mu\text{m}$. *S. costatum* and *C. muelleri* were the suitable algae for rearing *M. volcano*. The optimum density for larval development on *S. costatum* and *C. muelleri* was $40 \times 10^4/\text{mL}$ and $80 \times 10^4/\text{mL}$. The highest survival percentage of cyprids on a diet of *P. subcordiformis* (at $20 \times 10^4/\text{mL}$) was 14.33%, and the cyprid length was $554.60 \mu\text{m}$. The survival percentage and length of cyprids on a diet of *P. subcordiformis* were much smaller than those on a diet of *S. costatum* or *C. muelleri*. Therefore, *P. subcordiformis* wasn't a suitable alga for rearing *M. volcano*. Nauplii of *M. volcano* could develop successfully to cyprids at a salinity range of 22—42 except at 18 salinity, the highest survival percentage of cyprids was 35.67% at 30 salinity, the larval development time was not significantly different among salinity groups, the cyprid length at low salinity (22 and 26) was longer than that at high salinity (30—42). The optimum salinity range for larval development was 26—34 salinity. Nauplii of *M. volcano* could develop successfully to cyprids at a temperature range of 18—30 °C except at 14 °C and 34 °C, the highest survival percentage of cyprids was 50.67% at 22 °C, the larval development time was significantly reduced as temperature increased; the cyprid length at low temperature (18 °C) was longer than that at high temperature (22 °C, 26 °C, 30 °C). The optimum temperature range for larval development was 22—26 °C. In short, under the suitable alga, salinity and temperature conditions, larvae of *M. volcano* could generally develop to cypris phase after 8 days of rearing and the survival percentage of cyprids was up over 35%.

Key Words: *Megabalanus volcano*; diet; salinity; temperature; nauplius; cyprid

无柄蔓足类(藤壶)是沿海生态系统的重要组成部分,也是主要的污损生物之一^[1-3],常成群固着于海岸岩石、堤坝码头、舰船浮标、海水管道、平台设施及养殖设备上,对人类涉海经济活动产生极大危害和巨大经济损失。国外对纹藤壶属(*Amphibalanus*)的纹藤壶(*A. amphitrite*)、网纹纹藤壶(*A. reticulatus*)和象牙纹藤壶(*A. eburneus*)和藤壶属(*Balanus*)的三角藤壶(*B. trigonus*)等种类的幼虫形态、各种生态因子对幼虫发育的影响、特别是以纹藤壶为模式动物对金星幼虫附着和变态的条件和机制等进行了大量研究,这些工作为蔓足类的生物学、生态学和防除研究奠定了坚实基础^[2-10]。国内中国科学院南海海洋研究所曹文浩等主要以网纹纹藤壶为对象也进行了一些相关报道^[11-14]。

刺巨藤壶(*Megabalanus volcano*)属于节肢动物门(Arthropoda)、甲壳亚门(Crustacea)、蔓足下纲(Cirripedia)、围胸总目(Thoracica)^[15],栖息于热带和亚热带海域低潮带或潮下带,我国的东海和浙江舟山以南至西沙群岛海域是其主要分布地。刺巨藤壶虽然是沿海污损生物的优势种,但它的肌肉非常发达,也是沿岸居民常食用的海鲜之一^[1,14]。巨藤壶属的红巨藤壶(*M. rosa*)在藤壶胶的研究中起重要作用^[16-17];而另一种巨藤壶 *M. azoricus* 个体很大,闭壳肌和卵巢发达,在葡萄牙亚速尔群岛作为一个经济种类受到过度采集,资源量不断下降^[18-19],目前也尝试开展人工增殖的研究^[18-20]。蔓足类的生活史通常由卵、6期无节幼虫、1期不摄食的金星幼虫和固着的成体组成^[1-3]。幼虫培养的成功与否是研究藤壶幼虫发育、揭示其附着机理的基础,也是开展防污材料筛选的前提条件^[1-2]。本课题组对刺巨藤壶的精子结构进行了观察^[21],但有关刺巨藤壶幼虫室内培养条件的研究未见报道。培养刺巨藤壶幼虫适宜的饵料是什么?幼虫生长发育适宜的温

度和盐度范围是多少?了解这些基本生态因子对幼虫的影响可以明确刺巨藤壶幼虫培养的适宜条件。本文以刺巨藤壶Ⅵ期无节幼虫存活率、Ⅵ期无节幼虫出现时间、金星幼虫存活率、金星幼虫出现时间和金星幼虫体长等为观察指标,研究了3种饵料及密度(中肋骨条藻 *Skeletonema costatum*、牟氏角毛藻 *Chaetoceros muelleri* 和亚心型扁藻 *Platymonas subcordiformis*)、盐度和温度等因子对刺巨藤壶幼虫生长发育的影响,以便能在实验室培养刺巨藤壶金星幼虫,为藤壶生物学、海洋生态学及附着机理等方面的研究提供资料,也可为其人工增殖的开展提供指导。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 刺巨藤壶成体室内培养与幼虫的采集

刺巨藤壶成体于2017年5月下旬采自福建省平潭综合实验区芦洋乡马腿村(26.0173°N, 119.6653°E),海区水温24.1℃、盐度28.8,成体峰吻径20—27 mm、高43—62 mm。亲体在实验室放置于200 L的养殖桶中培养育肥,每日投喂藻类和卤虫,并定时清污。养殖条件为海水盐度29—30、pH为7.9—8.0、水温25—27℃,所用海水经过滤、紫外线消毒处理。每日检查,观察到刺巨藤壶成体释放出Ⅰ期无节幼体,以筛网立即收集Ⅰ期无节幼体,将收集到的Ⅰ期无节幼虫置于容量为3000 mL的玻璃烧杯中。Ⅰ期无节幼体在12 h内将发育为Ⅱ期无节幼体,利用幼虫的趋光性用吸管吸取健康活泼的Ⅱ期无节幼虫作为实验材料。

1.1.2 藻类的培养

实验所需中肋骨条藻、牟氏角毛藻和亚心型扁藻由福建师范大学藻种培养室提供。用f/2培养基进行藻类单种扩大培养。以对数生长期的藻类进行投喂。藻类培养温度在(24±1)℃,光照周期为D:L=18h:6h。

1.2 实验设置

实验在500 mL的烧杯中进行,400 mL海水引入100只刺巨藤壶无节幼虫,幼虫密度为0.25只/mL,实验过程中不充气。投饵时,先用血球计数板确定藻类原液浓度,再经换算,在每个实验组中投入相应的饵料量。

每天全换水1次,投饵1次。在换水之前随机用吸管吸取约10只幼虫在显微镜下观察和记录其生长状况。换水时利用幼虫的趋光性吸取培养液中存活的幼虫到新的烧杯。一旦观察到出现Ⅵ期无节幼虫和金星幼虫时,统计烧杯中存活的无节幼虫和金星幼虫数量。直到每个烧杯中的无节幼虫发育为金星幼虫或者全部无节幼虫死亡时实验结束。

1.2.1 饵料实验

中肋骨条藻设置 5×10^4 个/mL、 10×10^4 个/mL、 20×10^4 个/mL、 40×10^4 个/mL和 80×10^4 个/mL 5个密度梯度,牟氏角毛藻设置 5×10^4 个/mL、 10×10^4 个/mL、 20×10^4 个/mL、 40×10^4 个/mL和 80×10^4 个/mL 5个密度梯度,亚心型扁藻设置 2.5×10^4 个/mL、 5×10^4 个/mL、 10×10^4 个/mL、 15×10^4 个/mL和 20×10^4 个/mL 5个密度梯度。每个实验组三个平行。海水盐度为29—30、水温25—26℃。

1.2.2 盐度实验

设置7个盐度梯度分别为18、22、26、30、34、38和42。高盐组用海水晶、低盐组用反渗透水进行配制。所用饵料为牟氏角毛藻,藻类密度控制在 50×10^4 个/mL,水温25—26℃。每个实验组三个平行。

1.2.3 温度实验

设置6个温度梯度分别为14℃、18℃、22℃、26℃、30℃和34℃。各温度组用控温系统进行调控。所用饵料为牟氏角毛藻,藻类密度控制在 50×10^4 个/mL,海水盐度为29—30。换水前各温度组使用的海水提前进行预温处理。每个实验组三个平行。

1.3 实验观察和统计的指标

1.3.1 Ⅵ期无节幼虫的发育时间和存活率

Ⅵ期无节幼虫的发育时间为每实验组最早出现Ⅵ期无节幼虫时发育所用的时间(d)。

Ⅵ期无节幼虫存活率=出现Ⅵ期无节幼虫时统计存活的无节幼虫数量/起始的无节幼虫数量 $\times 100\%$ 。

1.3.2 金星幼虫的发育时间和存活率

金星幼虫的发育时间为每实验组最早出现金星幼虫时发育所用的时间(d)。

金星幼虫存活率=实验结束时,每实验组中累计获得的金星幼虫总数/起始的无节幼虫数量 $\times 100\%$ 。

1.3.3 金星幼虫体长的测量

用目镜测微尺测量金星幼虫的体长。将同一实验条件培养的金星幼虫收集到同一烧杯中,若金星幼虫超过 20 只,随机抽取 20 只测量;若不足 20 只金星幼虫,对所有虫体进行测量。

1.4 数据分析

刺巨藤壶 VI 期无节幼虫存活率、金星幼虫存活率、金星幼虫体长均以平均值 $\pm$ 标准差表示。SPSS 20.0 软件对数据进行统计分析,用单因素方差分析(ANOVA)藻类密度、盐度和温度对 VI 期无节幼虫存活率、金星幼虫存活率、金星幼虫体长影响的差异显著性,在进行方差分析前,将存活率进行反正弦函数转化。用 Tukey 法进行多重比较, $P \geq 0.05$ 为组间差异不显著, $0.01 \leq P < 0.05$ 为组间差异显著, $P < 0.01$ 为组间差异极显著。

2 结果

2.1 饵料对刺巨藤壶幼虫发育的影响

2.1.1 中肋骨条藻对刺巨藤壶幼虫发育的影响

中肋骨条藻能够培养刺巨藤壶无节幼虫至金星幼虫阶段(图 1)。 5×10^4 个/mL 密度组中的幼虫只能发育到 VI 期无节幼虫阶段,无法发育到金星幼虫,其 VI 期无节幼虫的存活率仅 6.00%;其它各组均高达 60.00% 以上。金星幼虫的存活率在 10×10^4 个/mL 组仅 2.33%,而 80×10^4 个/mL 组的高达 41.33%。经过单因素方差分析表明,骨条藻密度对刺巨藤壶 VI 期无节幼虫存活率($F = 33.835$, $P = 0.000$)和金星幼虫存活率($F = 14.833$, $P = 0.001$)有极显著影响。经过多重比较,VI 期无节幼虫的存活率除 5×10^4 个/mL 组外其它各组间未表现出明显差异($P \geq 0.420$)。金星幼虫存活率在 10×10^4 个/mL 组和 20×10^4 个/mL 组($P = 0.165$)、 20×10^4 个/mL 组和 40×10^4 个/mL 组($P = 0.154$)、 40×10^4 个/mL 和 80×10^4 个/mL 组($P = 0.513$)之间的存活率无显著差异。

随着骨条藻密度的增加,VI 期无节幼虫和金星幼虫发育时间渐缩短(图 2)。 5×10^4 个/mL 组的 VI 期无节幼虫发育最慢长达 11 d, 40×10^4 个/mL 和 80×10^4 个/mL 密度组的幼虫发育最快只需 4 d。到达金星幼虫阶段的时间, 10×10^4 个/mL 组和 20×10^4 个/mL 密度组发育较慢分别需 12 d 和 11 d; 40×10^4 个/mL 组和 80×10^4 个/mL 密度组发育较快,分别需 7 d 和 6 d。

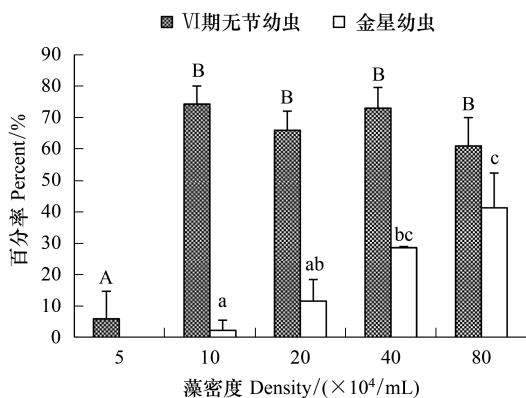


图 1 中肋骨条藻密度对刺巨藤壶 VI 期无节幼虫和金星幼虫存活率的影响

Fig.1 Effect of *Skeletonema costatum* density on survival percent of naupliar VI and cyprids in *Megagbalanus volcano*

不同大写字母和小写字母分别表示实验组之间 VI 期无节幼虫和金星幼虫存活率差异显著($P < 0.05$)

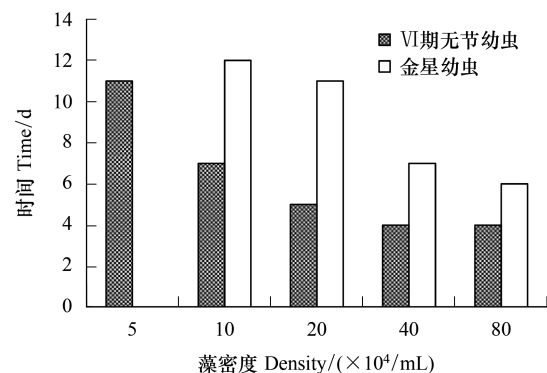


图 2 中肋骨条藻密度对刺巨藤壶 VI 期无节幼虫和金星幼虫发育时间的影响

Fig.2 Effect of *Skeletonema costatum* density on development time of naupliar VI and cyprids in *Megagbalanus volcano*

在不同骨条藻密度培养的金星幼虫体长见表 1。低密度 10×10^4 个/mL 组的金星幼虫体长最短,高密度 80×10^4 个/mL 组的最长。总的来看,随着骨条藻密度的增大,金星幼虫的体长增加。经单因素方差分析表明藻密度对金星幼虫体长有极显著影响 ($F=39.387, P=0.000$)。经过多重比较,各密度组间金星幼虫体长均有极显著差异 ($P<0.01$)。

总之,综合几个观察指标,中肋骨条藻培养刺巨藤壶幼虫的适宜密度是 40×10^4 个/mL 和 80×10^4 个/mL。

表 1 中肋骨条藻密度对刺巨藤壶金星幼虫体长的影响

Table 1 Effect of *Skeletonema costatum* density on cypris length of *Megagbalanus volcano*

密度 Density/ (10^4 个/mL)	体长 Length/ μm	密度 Density/ (10^4 个/mL)	体长 Length/ μm
10	589.23 ± 15.95^a ($n=7$)	40	647.42 ± 21.08^c
20	625.06 ± 28.68^b	80	681.43 ± 15.31^d

不同小写字母表示实验组之间差异显著 ($P<0.05$)

2.1.2 牟氏角毛藻对刺巨藤壶幼虫发育的影响

牟氏角毛藻能够培养刺巨藤壶无节幼虫至金星幼虫阶段(图 3)。 5×10^4 个/mL 密度组中的幼虫只能发育到 VI 期无节幼虫阶段,无法发育到金星幼虫阶段。VI 期无节幼虫的存活率 5×10^4 个/mL 组仅 15.00%,而 80×10^4 个/mL 组高达 74.67%。金星幼虫的存活率 10×10^4 个/mL 组仅 5.33%,而 80×10^4 个/mL 组高达 43.67%。经过单因素方差分析表明,角毛藻密度对刺巨藤壶 VI 期无节幼虫存活率 ($F=95.439, P=0.000$) 和金星幼虫存活率 ($F=49.634, P=0.000$) 有极显著影响。经过多重比较,VI 期无节幼虫存活率 5×10^4 个/mL 组和 10×10^4 个/mL 组与各组间均有极显著差异 ($P<0.01$), 20×10^4 个/mL 组和 40×10^4 个/mL 组 ($P=0.188$)、 40×10^4 个/mL 组和 80×10^4 个/mL 组之间的存活率无显著差别 ($P=0.852$)。金星幼虫的存活率在 10×10^4 个/mL 组和 20×10^4 个/mL 组与其它组间均有极显著差异 ($P<0.01$),而 40×10^4 个/mL 和 80×10^4 个/mL 密度组之间的存活率无显著差异 ($P=0.419$)。

随着角毛藻密度的增加,VI 期无节幼虫和金星幼虫发育时间渐缩短(图 4)。 5×10^4 个/mL 组的 VI 期无节幼虫发育时间长达 10 d,而 40×10^4 个/mL 组和 80×10^4 个/mL 组发育最快只需 5 d。金星幼虫发育时间 10×10^4 个/mL 组的长达 12 d,而 80×10^4 个/mL 组的发育最快只需 7 d。

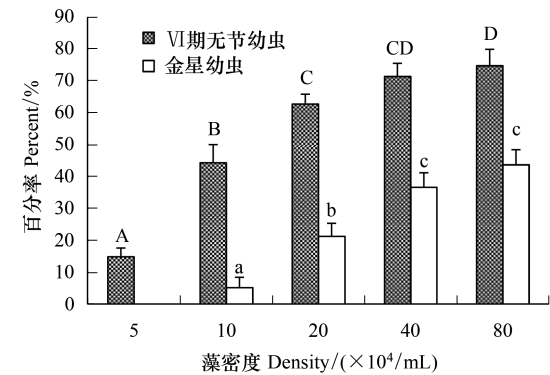


图 3 牟氏角毛藻密度对刺巨藤壶 VI 期无节幼虫和金星幼虫存活率的影响
Fig.3 Effect of *Chaetoceros muelleri* density on survival percent of naupliar VI and cyprids in *Megagbalanus volcano*

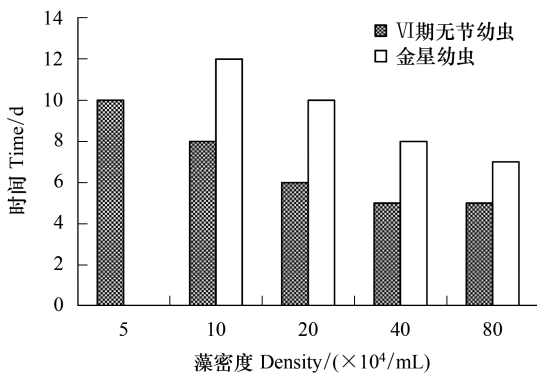


图 4 牟氏角毛藻密度对刺巨藤壶 VI 期无节幼虫和金星幼虫发育时间的影响
Fig.4 Effect of *Chaetoceros muelleri* density on development time of naupliar VI and cyprids in *Megagbalanus volcano*

牟氏角毛藻密度对刺巨藤壶金星幼虫体长的影响见表 2。低密度 10×10^4 个/mL 组的金星幼虫体长最短,高密度 80×10^4 个/mL 组的最长。总之,随着角毛藻密度的增大,金星幼虫的体长增加。经单因素方差分析表

明角毛藻密度对金星幼虫体长有极显著影响 ($F=26.613, P=0.000$)。经过多重比较表明, 10×10^4 个/mL 组和 20×10^4 个/mL 组的金星幼虫体长与其它各组间均有极显著差异 ($P < 0.01$), 而 40×10^4 个/mL 组和 80×10^4 个/mL 组间的金星幼虫体长没有显著差异。

总之, 综合几个观察指标, 牟氏角毛藻培养刺巨藤壶幼虫的适宜密度是 40×10^4 个/mL 和 80×10^4 个/mL。

表 2 牟氏角毛藻密度对刺巨藤壶金星幼虫体长的影响

Table 2 Effect of *Chaetoceros muelleri* density of on cypris length of *Megagobalanus volcano*

密度 Density/ (10^4 个/mL)	体长 Length/ μm	密度 Density/ (10^4 个/mL)	体长 Length/ μm
10	580.05 ± 33.56^a ($n=12$)	40	654.08 ± 32.62^c
20	620.33 ± 31.17^b	80	668.39 ± 21.20^c

2.1.3 亚心形扁藻对刺巨藤壶幼虫发育的影响

亚心形扁藻能够培养刺巨藤壶无节幼虫至金星幼虫阶段 (图 5)。 2.5×10^4 个/mL 和 5×10^4 个/mL 低密度组的幼虫只能发育到 VI 期无节幼虫阶段; 其它 3 个高密度组的幼虫可以发育至金星幼虫阶段。VI 期无节幼虫的存活率在 15×10^4 个/mL 组高达 84.33%。但各密度组 VI 期无节幼虫变态至金星幼虫的存活率显著下降; 金星幼虫存活率最高为 20×10^4 个/mL 组仅 14.33%。经单因素方差分析表明, 扁藻密度对刺巨藤壶 VI 期无节幼虫 ($F=32.035, P=0.000$) 和金星幼虫的存活率 ($F=14.347, P=0.005$) 有极显著影响。经过多重比较, 2.5×10^4 个/mL 组和 5×10^4 个/mL 组间的 VI 期无节幼虫存活率未表现出明显差异 ($P=0.147$), 10×10^4 个/mL 组、 15×10^4 个/mL 组和 20×10^4 个/mL 组 ($P \geq 0.329$) 三组间也没有显著差异。 10×10^4 个/mL 组的金星幼虫存活率与其它两个密度组间有显著差异, 15×10^4 个/mL 组与 20×10^4 个/mL 组间的存活率无显著差异 ($P=0.173$)。

随着扁藻密度的增加, VI 期无节幼虫和金星幼虫的发育时间渐缩短 (图 6)。 2.5×10^4 个/mL 组的 VI 期无节幼虫发育时间长达 9 d, 15×10^4 个/mL 组和 20×10^4 个/mL 组发育最快只需 6 d。金星幼虫发育时间 10×10^4 个/mL 组的较长需 10 d, 20×10^4 个/mL 组的最短仅 8 d。

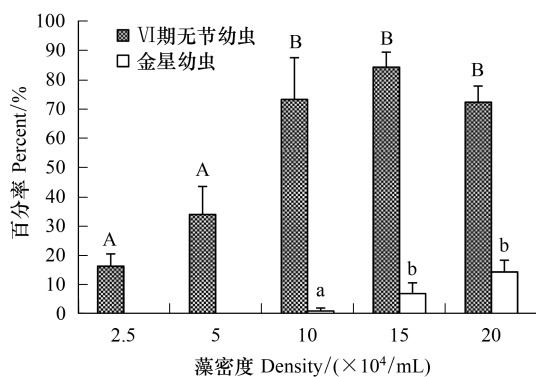


图 5 亚心形扁藻密度对刺巨藤壶 VI 期无节幼虫和金星幼虫存活率的影响

Fig. 5 Effect of *Platymonas subcordiformis* density on survival percent of naupliar VI and cyprids in *Megagobalanus volcano*

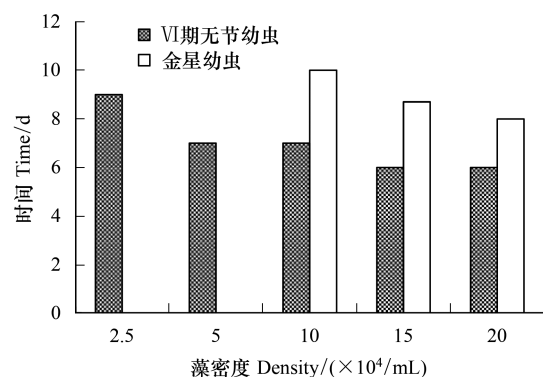


图 6 亚心形扁藻密度对刺巨藤壶 VI 期无节幼虫和金星幼虫发育时间的影响

Fig. 6 Effect of *Platymonas subcordiformis* density on development time of naupliar VI and cyprids in *Megagobalanus volcano*

扁藻密度对刺巨藤壶金星幼虫体长的影响见表 3。经单因素方差分析表明扁藻密度对金星幼虫体长没有影响 ($P > 0.05$), 各组间的体长没有明显差异。总体而言, 用扁藻培养的刺巨藤壶金星幼虫个体较小、存活率低, 亚心形扁藻不是培养刺巨藤壶幼虫的适宜饵料。

2.2 盐度对刺巨藤壶幼虫发育的影响

刺巨藤壶幼虫除了 18 盐度组只能发育到Ⅳ期无节幼虫外,从 22 至 42 各盐度组均能发育到金星幼虫阶段(图 7)。Ⅵ期无节幼虫存活率以 34 盐度组最高为 70.33%,22 盐度组最低为 30.67%。金星幼虫存活率以 30 盐度组最高为 35.67%,42 盐度组最低为 9.67%。经过单因素方差分析表明,盐度对Ⅵ期无节幼虫存活率($F=76.143, P=0.000$)和金星幼虫存活率($F=7.022, P=0.003$)均有极显著影响。经过多重比较,22 和 42 盐度组的Ⅵ期无节幼虫存活率与其它各组间均有显著差异($P<0.05$)。22、38 和 42 盐度组间金星幼虫存活率没有显著差异($P\geq 0.268$),22、26、30、34 和 38 盐度组之间的也无显著差异($P\geq 0.129$),但 42 盐度组与 26、30、34 盐度组间有极显著差异($P\leq 0.01$)。

盐度对Ⅵ期无节幼虫和金星幼虫发育时间的影响不明显(图 8)。各盐度组Ⅵ期无节幼虫发育时间均为 6 d,金星幼虫的发育时间在 8 d 和 8.7 d 之间。

盐度对刺巨藤壶金星幼虫体长的影响见表 4。22 盐度组金星幼虫体长最长,38 盐度组的最短。经方差分析表明盐度对金星幼虫体长有显著影响($F=17.994, P=0.000$)。经过多重比较,22 和 26 盐度组金星幼虫体长没有显著差异($P=0.392$),30、34、38、42 盐度组间的体长也没有显著差异($P\geq 0.199$)。低盐培养下,金星幼虫的体长相对较长。

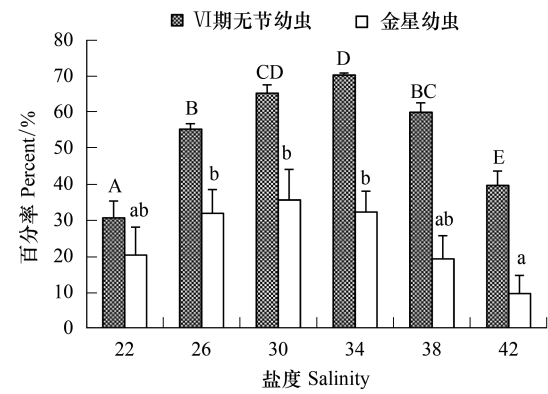


图 7 盐度对刺巨藤壶Ⅵ期无节幼虫和金星幼虫存活率的影响
Fig.7 Effect of salinity on survival percent of naupliar VI and cyprids in *Megagbalanus volcano*

表 3 亚心形扁藻密度对刺巨藤壶金星幼虫体长的影响
Table 3 Effect of *Platymonas subcordiformis* density of on cypris length of *Megagbalanus volcano*

密度 Density/(10 ⁴ 个/mL)	体长 Length/μm
10	560.70±23.59 ^a (n=3)
15	556.47±39.56 ^a
20	552.56±35.24 ^a

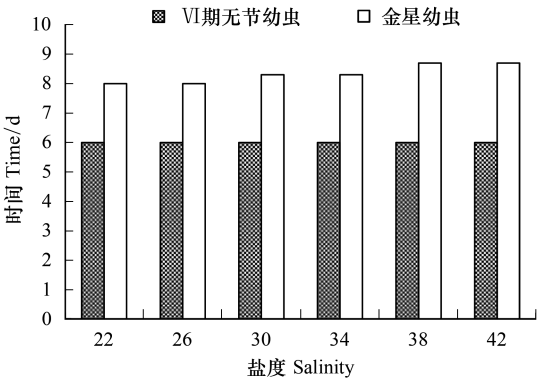


图 8 盐度对刺巨藤壶Ⅵ期无节幼虫和金星幼虫发育时间的影响
Fig.8 Effect of salinity on development time of naupliar VI and cyprids in *Megagbalanus volcano*

表 4 盐度对刺巨藤壶金星幼虫体长的影响

Table 4 Effect of salinity on cypris length of *Megagbalanus volcano*

盐度 Salinity	体长 Length/μm	盐度 Salinity	体长 Length/μm	盐度 Salinity	体长 Length/μm
22	688.40±32.29 ^a	30	637.12±31.78 ^b	38	613.45±22.28 ^b
26	668.68±29.02 ^a	34	619.37±41.12 ^b	42	619.37±34.90 ^b

2.3 温度对刺巨藤壶幼虫发育的影响

14℃组中的刺巨藤壶幼虫只能发育到Ⅲ期无节幼虫阶段,34℃组仅发育到Ⅴ期无节幼虫阶段,18—30℃各温度组无节幼虫均能发育至金星幼虫阶段(图 9)。各温度组Ⅵ期无节幼虫的存活率均达到 70.00%以上,以 22℃的存活率最高为 86.67%。金星幼虫的存活率 22℃时最高为 50.67%,30℃时的最低仅 9.67%。经过方

差分析表明,温度对Ⅵ期无节幼虫($F=4.401, P=0.042$)和金星幼虫存活率($F=13.945, P=0.002$)均有显著影响。经过多重比较,18℃和22℃组间的Ⅵ期无节幼虫存活率有显著差异,18℃、26℃、30℃各组间的没有明显差异($P\geq 0.473$),22℃、26℃、30℃各组间的也没有明显差异($P\geq 0.090$)。30℃组金星幼虫存活率与其它各组间的均有显著差异,其它3个温度组间的存活率无显著差异($P\geq 0.134$)。

随着温度的提高,Ⅵ期无节幼虫和金星幼虫发育时间均缩短(图10)。以18℃组的幼虫发育最慢,Ⅵ期无节幼虫和金星幼虫发育时间分别需要9 d和14 d;以30℃组的幼虫发育最快,Ⅵ期无节幼虫和金星幼虫发育时间分别需要5 d和7.3 d。

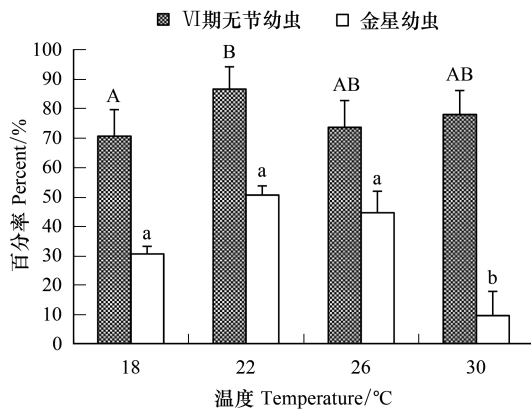


图9 温度对刺巨藤壶Ⅵ期无节幼虫和金星幼虫存活率的影响

Fig.9 Effect of temperature on survival percent of naupliar VI and cyprids in *Megagbalanus volcano*

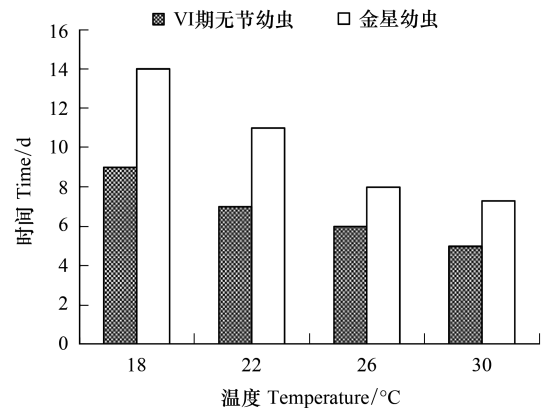


图10 温度对刺巨藤壶Ⅵ期无节幼虫和金星幼虫发育时间的影响

Fig.10 Effect of temperature on development time of naupliar VI and cyprids in *Megagbalanus volcano*

温度对刺巨藤壶金星幼虫体长的影响见表5。18℃组的金星幼虫体长最长,30℃组的最短。经单因素方差分析表明盐度对金星幼虫体长有极显著影响($F=18.751, P=0.000$)。经过多重比较,18℃组和其它各温度组间的金星幼虫体长有极显著差异($P<0.01$),其它3个温度组间的没有显著差异($P\geq 0.178$)。低温培养下,金星幼虫的体长相对较长。

3 讨论

3.1 饵料种类和密度对刺巨藤壶幼虫发育的影响

饵料、盐度和温度等多种生态因子影响海洋无脊椎动物幼虫的生长发育和变态,其中最重要的因子是饵料。合适的饵料是动物培养的关键,只有找到合适的饵料才有可能在室内进行动物的人工培养^[4,7-8]。蔓足类的生活史包括无节幼虫和金星幼虫2个幼虫阶段,金星幼虫阶段是不摄食的,因而无节幼虫的摄食经历决定了金星幼虫的能量储备以及随后的募集成败^[2,9]。在实践中,培养各种蔓足类幼虫适宜的微藻不同。曹文浩等认为旺盛期的亚心形扁藻是培养网纹藤壶幼虫的适宜饵料^[11]。冯丹青等用牟氏角毛藻可将白脊藤壶(*B. albicostatus*)幼虫培养至金星幼虫阶段^[22]。Desai等用角毛藻(*C. calcitrans*)培养纹藤壶幼虫的效果比中肋骨条藻的好^[7]。Nasrolahi等用角毛藻(*C. calcitrans*)和小球藻可以培养致密纹藤壶(*A. improvisus*)幼虫到金星幼虫阶段;而四尾栅藻(*Scenedesmus quadricauda*)不合适培养致密纹藤壶幼虫,可能是因为它表面有刺的形态妨碍了幼虫的摄食^[8]。Nunes等用5种微藻培养*M. azoricus*的无节幼虫,结果表明等鞭金藻(*T-Isochrysis*

表5 温度对刺巨藤壶金星幼虫体长的影响

Table 5 Effect of temperature on cypris length of *Megagbalanus volcano*

温度 Temperature /℃	体长 Length/μm
18	666.57±27.04 ^a
22	625.41±29.17 ^b
26	611.48±32.69 ^b
30	607.27±21.77 ^b

sp.) 和一种骨条藻的效果较好、杜氏盐藻 (*Dunaliella* sp.) 效果一般、而角毛藻 (*C. calcitrans*) 和拟衣藻 (*Chloromonas* sp.) 效果最差^[20]。Franco 等的结果表明玛氏骨条藻 (*S. marinoi*) 培养有柄类指茗荷 (*Pollicipes pollicipes*) 无节幼虫的效果较肩突四鞭藻 (*Tetraselmis suecica*) 好, 而用球等鞭金藻 (*I. galbana*) 培养的幼虫不能发育到金星幼虫阶段^[23]。Thiyagarajan 等进一步指出不同饵料(纤细角毛藻 *C. gracilis*、硅限制的纤细角毛藻、假微型海链藻 *Thalassiosira pseudonana* 和中肋骨条藻) 培养的纹藤壶金星幼虫的营养指标如三酰甘油 (TAG)/DNA 的比值不同, 而金星幼虫 TAG/DNA 的比值越高, 其附着变态能力越强^[9]。

绿藻、金藻和硅藻 3 个门的微藻在海洋动物的培养中被广泛使用。微藻饵料的营养价值取决于很多因素, 藻类营养成分的含量和比例(脂肪酸成分、氨基酸成份、碳水化合物水平、必要维生素等) 决定了微藻的食用价值^[4,7,20]。而微藻的大小、形状和藻链的长度均会影响它的沉降率, 进而影响蔓足类幼虫的摄食和消化效率^[24-25]。随着蔓足类幼虫的发育, 游泳附肢刚毛间的距离渐增大, 晚期幼虫比早期幼虫可以摄食更大的饵料颗粒^[25], 如致密纹藤壶早期无节幼虫用小球藻的效果比角毛藻的好, 而晚期幼虫则相反^[8]。因此, 不同微藻的饵料效果不同, 不同的蔓足类及同一种蔓足类不同的发育阶段适宜的微藻也不同。

本实验中所用的 3 种微藻均能成功培养刺巨藤壶无节幼虫发育到金星幼虫阶段, 但用中肋骨条藻和牟氏角毛藻培养的刺巨藤壶金星幼虫存活率和金星幼虫体长都比用亚心型扁藻培养的高得多。因此, 中肋骨条藻和牟氏角毛藻是培养刺巨藤壶无节幼虫适宜的饵料, 而亚心型扁藻并不是合适的饵料。3 种微藻细胞大小、形态、营养价值等的不同, 导致了刺巨藤壶无节幼虫产生了选择性的差异。牟氏角毛藻细胞小、壁薄、多数营单个生活, 大小为 3.5×4.6 — $4.6 \times 9.2 \mu\text{m}$, 也有 2—3 个细胞相连组成群体生活; 中肋骨条藻其细胞大小为 4 — $15 \mu\text{m}$, 呈圆柱形, 褐色, 藻体由几个到几十个细胞靠壳面相连成链状; 扁藻为绿藻门、具鞭毛, 长为 11 — $14 \mu\text{m}$, 宽 7 — $9 \mu\text{m}$ ^[26]。如上所述, 虽然有多种微藻可作为蔓足类幼虫的饵料, 除少量报道扁藻可用于蔓足类幼虫的培养外^[11-13,27], 用于蔓足类幼虫培养的微藻普遍为硅藻类的角毛藻和骨条藻^[4-6,10,28-30]。角毛藻和骨条藻同属硅藻门, 富含二十二碳六烯酸 (DHA)、二十碳五烯酸 (EPA) 等高不饱和脂肪酸, 是蔓足类适宜的饵料^[7,24,31]。本实验用高密度扁藻培养的刺巨藤壶 VI 期无节幼虫的存活率均高达 70% 以上, 但金星幼虫阶段的存活率急剧下降。扁藻比 2 种硅藻大, 虽然藻类大小是影响幼虫摄食效率的一个因素, 但蔓足类晚期幼虫比早期幼虫可以摄食更大的饵料颗粒^[25], 藻类大小显然不是影响刺巨藤壶幼虫摄食扁藻的一个原因。对蔓足类来说, 从 VI 期无节幼虫变态为金星幼虫是一个敏感时期^[23], 只有最终能培养到金星幼虫阶段的饵料才是合适的饵料。本文认为扁藻可能含有某种对幼虫发育不利且具有累积效应的成分, 或是缺少某些营养要素, 最后导致 VI 期无节幼虫变态为金星幼虫的比例很低。因此, 扁藻不是培养刺巨藤壶幼虫合适的饵料。混合藻类往往具有更好的饵料效果^[20,23], 今后, 可以在单种藻类结果的基础上进一步进行两种及以上混合藻类的实验, 以寻找到更加有效的饵料配比。

目前, 文献报道了另 2 种巨藤壶幼虫的培养。在一种巨藤壶 (*M. coccopoma*) 幼虫培养中成功使用纤细角毛藻作为饵料^[32], 本实验结果与此一致。但本文结果和 Nunes 等的结果相比有很大不同^[20], 他认为等鞭金藻和骨条藻是 *M. azoricus* 幼虫合适的饵料而角毛藻不是合适的饵料。本实验中也曾采用湛江叉鞭金藻培养刺巨藤壶无节幼虫(结果没有显示), 但效果很差, 幼虫不能发育到金星幼虫阶段。Nunes 分析角毛藻的大小 ($4 \times 8 \mu\text{m}$) 与等鞭金藻的大小 (5 — $6 \mu\text{m}$) 相近, 但在没有充气的条件下角毛藻沉降速率快, 不利于幼虫的摄食; 骨条藻虽与角毛藻同为硅藻, 也有下沉的不利因素, 但为链状且较大 ($7 \times 16 \mu\text{m}$), 从而不影响幼虫的摄取^[20]。本实验因为在烧杯中进行, 水体小, 幼虫的密度低, 同时为避免充气后幼虫可能会粘附在壁上影响计数, 本结果是在没有充气的条件下取得的。后续实验可在充气的条件下进行, 藻类不会下沉且分布会更加均匀, 更有利于幼虫的摄食, 可能会得到不同的结果。本实验与 Nunes 的实验都是在没有充气的条件下进行, 金藻和角毛藻在两种巨藤壶表现出不同饵料效果的原因仍需作进一步的分析。

饵料的密度也会影响幼虫的存活率、发育速度和幼虫的大小; 一般随着藻密度的增加, 存活率上升, 发育速率加快, 培养的幼虫更大, 营养物质积累更多。如角毛藻和小球藻的密度对纹藤壶幼虫的发育速度、无节幼

虫的大小和营养状况(以 RNA 含量为指标)均有影响^[4,8]。West 等认为食物密度对象牙纹藤壶无节幼虫的大小没有影响但对金星幼虫的大小仍有影响^[10]。Thiyagarajan 等的结果表明 4 种微藻除了骨条藻外纹藤壶金星幼虫的 TAG/DNA 比值也与藻密度相关^[9]。金星幼虫是蔓足类由浮游生活向固着生活的转变阶段,金星幼虫的作用是寻找、探究合适的基质并最终附着完成变态。有许多物理、化学和生物的因子影响金星幼虫的附着和变态,其中金星幼虫的营养状态和能量储备是决定其变态能否成功的关键因子^[1-3,33]。合适的藻类和密度培养得到的金星幼虫个体比较大,显微镜下可见大量油滴,运动活泼,具有很高的 RNA 含量或 TAG/DNA 含量,最终附着变态的比例显著提高^[4,9,23]。

同样,在本实验中,3 种微藻的密度均影响刺巨藤壶幼虫的发育速度和存活率;高密度组幼虫的发育时间短、存活率高,低密度组幼虫发育速率降低甚至不能完成发育。中肋骨条藻低密度 10×10^4 个/mL 组金星幼虫的发育时间需要 12 d,存活率仅 2.33%;高密度 80×10^4 个/mL 组金星幼虫的发育时间仅需要 6 d,存活率高达 41.33%。牟氏角毛藻低密度 10×10^4 个/mL 组金星幼虫的发育时间需要 12 d,存活率仅 5.33%;高密度 80×10^4 个/mL 组金星幼虫的发育时间仅需 7 d,存活率高达 43.67%。除亚心形扁藻培养的金星幼虫大小不受藻密度影响外(比其它 2 种藻培养的小得多),用中肋骨条藻和牟氏角毛藻培养的金星幼虫大小均受藻密度的影响,高密度藻培养的金星幼虫体长比低密度的长。综合几个观察指标,中肋骨条藻和牟氏角毛藻培养刺巨藤壶幼虫的适宜密度是 40×10^4 个/mL 和 80×10^4 个/mL。本实验用适宜密度的中肋骨条藻和牟氏角毛藻培养的刺巨藤壶金星幼虫个体大,油滴多,质量更高;用亚心形扁藻培养的金星幼虫个体明显小,油滴也少,质量较差。

3.2 盐度对刺巨藤壶幼虫发育的影响

海水盐度是影响蔓足类分布的关键因素^[5-6,29-30,34-36]。一些低盐种类如泥藤壶(*B. uliginosus*)和白脊藤壶(*B. albicostatus*)广泛分布于我国沿海河口等咸淡水交汇水域;而三角藤壶、红巨藤壶、钟巨藤壶(*M. tintinnabulum tintinnabulum*)、日本笠藤壶(*Tetraclita japonica*)等高盐种类则只分布于海水盐度较高的区域^[14]。很多研究表明在室内培养蔓足类幼虫合适的盐度往往与成体分布海域的盐度相吻合。如网纹纹藤壶和鳞笠藤壶(*T. squamosa squamous*)当水体中的盐度 ≤ 18 ,会严重阻滞发育甚至导致其死亡;当盐度 ≥ 24 时,这 2 种藤壶幼虫的成活率虽不会随盐度改变发生显著变化,但盐度为 30 的水体更有利于网纹藤壶幼虫的发育^[12]。这一特性与它们分布位置不同相一致,网纹藤壶主要分布在潮间带至潮下带,鳞笠藤壶主要分布在无遮蔽海岸或湾口附近的潮间带。在 7—36 盐度范围内致密纹藤壶无节幼虫均能发育至金星幼虫,以 7—24 盐度金星幼虫存活率更高,说明致密纹藤壶更适应低盐的水体;这与致密纹藤壶是广盐性种,多适应在咸淡水域中有关^[34]。

本研究在 22—42 盐度范围内刺巨藤壶无节幼虫均能发育至金星幼虫,各盐度梯度幼虫发育时间相差不大,金星幼虫的存活率以 26—34 盐度的最高。这与本种分布在低潮区或潮下带有关,对盐度适应的范围相对窄些也高些。这个结论进一步说明培养蔓足类幼虫合适的盐度往往与成体分布海域的盐度相吻合。在低盐条件下(22、26)培养的刺巨藤壶金星幼虫体长较其它高盐度的长,而致密纹藤壶无节幼体在高盐条件下更长^[34]。两者的结果说明在过高或过低的盐度环境中个体的大小会增加。面对调节渗透压的压力,海洋动物会通过形态、行为或生理等方面作出相应的适应调整^[34],致密纹藤壶是在高盐下个体更长,而刺巨藤壶是低盐下个体更长。

3.3 温度对刺巨藤壶幼虫发育的影响

除盐度外,温度也是影响蔓足类生长发育、繁殖及其分布状况的关键因素。温度降低会延缓幼虫发育,降低变态率,类似现象在三角藤壶^[6]、篱藤壶(*Elminius modestus*)^[29]、纹藤壶^[6,30]、象牙纹藤壶^[37]和巨藤壶(*M. coccopoma*)^[32]等均有报道。

网纹纹藤壶幼虫发育及附着的适宜温度为 18—30℃,12℃ 低温对其发育影响不大但不能附着^[13]。网纹纹藤壶为热带亚热带暖水种,调查表明在网纹纹藤壶终年均可繁殖附着的湛江港海域其全年水温约为 17—30℃^[38],这与上述结果显示的网纹纹藤壶金星幼虫附着所需的温度状况基本一致。随着温度的上升,龟足

(*Capitulum mitella*) 幼虫发育时间从 24℃ 的 11 d 缩短为 30℃ 的 7 d; 幼虫可在 21—33℃ 发育, 而适宜的温度是 24—30℃^[39-40]。这与龟足分布海区繁殖期的水温是 19.5—27.2℃、3 次繁殖高峰期水温均高于 25℃ 相吻合^[41]。温度也显著影响指茗荷幼虫的发育速度, 随着温度提高, 发育时间缩短; 高温和低温条件下金星幼虫存活率较低, 存活率以 15℃ 和 20℃ 的较高, 这与分布海域其繁殖季节的温度相一致^[23]。因此, 室内培养蔓足类幼虫合适的温度往往与成体分布海域繁殖季节的温度相一致。

在本实验中温度对刺巨藤壶幼虫发育时间和存活率有显著影响。在一定的温度范围内, 随温度的上升发育时间缩短, 18℃ 时金星幼虫发育时间长达 14 d, 而 30℃ 时仅需 7.3 d。在过低 (14℃) 或过高 (34℃) 的温度幼虫均不能完成发育, 在 18—30℃ 无节幼虫均能培养至金星幼虫, 但以 22℃ 和 26℃ 的金星幼虫存活率最高。温度同样会影响个体的大小。在 20℃ 培养的纹藤壶金星幼虫比 30℃ 的金星幼虫小^[4], 来自 Helgoland 岛篱藤壶的 VI 期无节幼虫个体在低温培养下更大^[29], 而本结果同样在低温 (18℃) 培养的刺巨藤壶金星幼虫体长更长。综合而言, 刺巨藤壶幼虫培养的适宜温度是 22—26℃。这也与其分布在热带和亚热带海域低潮区或潮下带相关。

参考文献 (References):

- [1] 严涛, 黎祖福, 胡煜峰, 李鑫渲, 曹文浩, 罗文佳, 程志强. 中国沿海无柄蔓足类研究进展. 生态学报, 2012, 32(16): 5230-5241.
- [2] Anil A C, Khandeparker L, Desai D V, Baragi L V, Gaonkar C A. Larval development, sensory mechanisms and physiological adaptations in acorn barnacles with special reference to *Balanus amphitrite*. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2010, 392(1/2): 89-98.
- [3] Thiagarajan V. A review on the role of chemical cues in habitat selection by barnacles; new insights from larval proteomics. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2010, 392(1/2): 22-36.
- [4] Anil A C, Desai D, Khandeparker L. Larval development and metamorphosis in *Balanus amphitrite* Darwin (Cirripedia; Thoracica): significance of food concentration, temperature and nucleic acids. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2001, 63(2): 125-141.
- [5] Anil A C, Chiba K, Okamoto K, Kurokura K. Influence of temperature and salinity on larval development of *Balanus amphitrite*: implications in fouling ecology. Marine Ecology Progress Series, 1995, 118(1/3): 159-166.
- [6] Thiagarajan V, Harder T, Qian P Y. Combined effects of temperature and salinity on larval development and attachment of the subtidal barnacle *Balanus trigonus* Darwin. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2003, 287(2): 223-236.
- [7] Desai D V, Anil A C. The impact of food type, temperature and starvation on larval development of *Balanus amphitrite* Darwin (Cirripedia; Thoracica). Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2004, 306(1): 113-137.
- [8] Nasrolahi A, Sari A, Saifabadi S, Malek M. Effects of algal diet on larval survival and growth of the barnacle *Amphibalanus* (= *Balanus*) *improvisus*. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 2007, 87(5): 1227-1233.
- [9] Thiagarajan V, Harder T, Qian P Y. Relationship between cyprid energy reserves and metamorphosis in the barnacle *Balanus amphitrite* Darwin (Cirripedia; Thoracica). Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2002, 280(1/2): 79-93.
- [10] West T L, Costlow J D. Size regulation in larvae of the crustacean *Balanus eburneus* (Cirripedia; Thoracica). Marine Biology, 1987, 96(1): 47-58.
- [11] 曹文浩, 王春忠, 胡煜峰, 张慧, 严涛. 饵料对网纹藤壶幼虫发育和附着的影响. 热带海洋学报, 2014, 33(4): 47-50.
- [12] 曹文浩, 严瑾, 丰美萍, 韩帅帅, 林明晴. 盐度对中国东南沿海两种常见藤壶幼虫发育的影响. 热带海洋学报, 2018, 37(6): 85-91.
- [13] 严瑾, 林明晴, 曹文浩, 林岳光, 邹立. 温度对网纹藤壶幼虫发育和附着的生物学效应. 热带海洋学报, 2020, 39(5): 55-61.
- [14] 曹文浩, 严涛, 李静, 陈如江, 杨天笑, 刘永宏. 中国沿海污损性无柄蔓足类生态特点概述. 广西科学院学报, 2010, 26(1): 67-73.
- [15] 刘瑞玉, 任先秋. 中国动物志: 无脊椎动物 第四十二卷(甲壳动物亚门, 蔓足下纲, 围胸总目). 北京: 科学出版社, 2007: 513-515.
- [16] Kamino K, Odo S, Maruyama T. Cement proteins of the acorn barnacle, *Megabalanus rosa*. Biological Bulletin, 1996, 190(3): 403-409.
- [17] Kamino K. Molecular design of barnacle cement in comparison with those of mussel and tubeworm. The Journal of Adhesion, 2010, 86(1): 96-110.
- [18] López D A, López B A, Pham C K, Isidro E J, De Girolamo M. Barnacle culture: background, potential and challenges. Aquaculture Research, 2010, 41(10): e367-e375.
- [19] Pham C K, De Girolamo M, Isidro E J. Recruitment and growth of *Megabalanus azoricus* (Pilsbry, 1916) on artificial substrates: first steps towards commercial culture in the Azores. Arquipelago. Life and Marine Sciences, 2011, 28: 47-56.
- [20] Nunes C, Rodeia J, Paulino B, Isidro E, De Girolamo M. Larval rearing of the giant Azorean barnacle, *Megabalanus azoricus* (Pilsbry, 1916):

- feeding trials, larval development and settlement on artificial substrata. *Aquaculture Research*, 2017, 48(6): 2812-2826.
- [21] 周欢, 林岗, 饶小珍. 刺巨藤壶精子的发生及其超微结构. *热带海洋学报*, 2020, 39(3): 98-105.
- [22] 冯丹青, 柯才煊, 卢昌义, 李少菁. 白脊藤壶 (*Balanus albicostatus*) 应用于天然海洋防污产物筛选模型的研究. *海洋与湖沼*, 2008, 39(4): 395-400.
- [23] Franco S C, Aldred N, Cruz T, Clare A S. Effects of culture conditions on larval growth and survival of stalked barnacles (*Pollicipes pollicipes*). *Aquaculture Research*, 2017, 48(6): 2920-2933.
- [24] Brown M R, Jeffrey S W, Volkman J K, Dunstan G A. Nutritional properties of microalgae for mariculture. *Aquaculture*, 1997, 151(1/4): 315-331.
- [25] Stone C J. A comparison of algal diets for cirripede nauplii. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1989, 132(1): 17-40.
- [26] 邱楚雯, 王韩信. 饵料藻类的研究进展. *水产科技情报*, 2018, 45(3): 127-132.
- [27] 刘健, 何进金, 于久芬, 王永元. 藤壶 (*Balanus amphitrite* Darwin.) 幼虫室内培养条件的研究. *海洋科学*, 1978, 2(2): 41-47.
- [28] Harder T, Thiagarajan V, Qian P Y. Combined effect of cyprid age and lipid content on larval attachment and metamorphosis of *Balanus amphitrite* Darwin. *Biofouling*, 2001, 17(4): 257-262.
- [29] Harms J. Effects of temperature and salinity on larval development of *Elminius modestus* (Crustacea, Cirripedia) from Helgoland (North Sea) and New Zealand. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 1986, 40(4): 355-376.
- [30] Qiu J W, Qian P Y. Tolerance of the barnacle *Balanus amphitrite* to salinity and temperature stress: effects of previous experience. *Marine Ecology Progress Series*, 1999, 188: 123-132.
- [31] 蒋霞敏, 郑亦周. 14 种微藻总脂含量和脂肪酸组成研究. *水生生物学报*, 2003, 27(3): 243-247.
- [32] Crickenberger S, Walther K, Moran A L. Lower thermal limits to larval development do not predict poleward range limits of the introduced tropical barnacle *Megabalanus coccopoma*. *Invertebrate Biology*, 2017, 136(1): 37-49.
- [33] 饶小珍, 林岗, 许友勤. 藤壶金星幼虫附着变态机制. *生态学报*, 2013, 33(16): 4846-4856.
- [34] Nasrolahi A, Farahani F, Saifabadi S J. Effect of salinity on larval development and survival of the Caspian Sea barnacle, *Balanus improvisus* Darwin (1854). *Journal of Biological Sciences*, 2006, 6(6): 1103-1107.
- [35] Anil A C, Kurian J. Influence of food concentration, temperature and salinity on the larval development of *Balanus amphitrite*. *Marine Biology*, 1996, 127: 115-124.
- [36] Nasrolahi A, Pansch C, Lenz M, Wah M. Being young in a changing world: how temperature and salinity changes interactively modify the performance of larval stages of the barnacle *Amphibalanus improvisus*. *Marine Biology*, 2012, 159(2): 331-340.
- [37] Scheltema R S, Williams I P. Significance of temperature to larval survival and length of development in *Balanus eburneus* (Crustacea: Cirripedia). *Marine Ecology-Progress Series*, 1982, 9: 43-49.
- [38] 严岩, 严文侠, 董钰. 湛江港污损生物挂板试验. *热带海洋*, 1995, 14(3): 81-85.
- [39] 张殿彩, 饶小珍, 林岗, 林小端, 陈宁. 温度对龟足胚胎和幼虫发育的影响. *福建师范大学学报: 自然科学版*, 2009, 25(3): 94-100.
- [40] 饶小珍, 林岗, 张殿彩, 陈寅山, 许友勤. 温度、盐度对龟足胚胎发育和幼虫生长的联合影响. *生态学报*, 2010, 30(23): 6530-6537.
- [41] 林岗, 邱文仁, 齐秋贞. 福州沿海龟足的繁殖附着与生长. *海洋学报*, 1994, 16(6): 108-115.