

温度对织锦巴非蛤稚贝生存和生长的影响

吴加莹¹, 戴明珠¹, 刘志刚^{1,2}, 刘晓坤¹

1. 广东海洋大学水产学院, 广东湛江 524088

2. 广东省海产无脊椎动物科技创新中心, 广东湛江 524088

摘要: 采用实验生态学方法, 观察了温度对织锦巴非蛤 (*Paphia textile*) 稚贝生存和生长的影响, 以期为该贝中间培育场地的选择提供科学依据。结果表明: 1) 稚贝的48 h半致死低、高温分别为4.95、33.39 °C; 96 h的半致死低、高温分别为8.68、32.49 °C; 15 d半致死低、高温分别为12.09、31.02 °C; 2) 在持续15 d的实验中, 10 °C时, 稚贝在第10天全部死亡; 32 °C时, 第15天的成活率仅为16.67%; 3) 以稚贝在15 d内50%个体稳定存活的高、低端温度作为生存临界温度, 稚贝适宜生存温度范围为12.09~31.02 °C; 以成活率最高的一组或几组(组间差异不显著)为依据, 稚贝最适生存温度范围为14~28 °C; 4) 以平均日增长达到最佳组的30%所对应的高、低端温度为依据, 稚贝适宜生长温度范围为16.62~31.14 °C; 以平均日增长最高的一组或几组(组间差异不显著)为依据, 最适生长温度范围为24~28 °C, 最适生长温度在适宜生存温度范围内明显偏向高温端。综上, 推测织锦巴非蛤稚贝适宜在南方海区潮下带水温不超过31 °C的海底底播中培。

关键词: 织锦巴非蛤; 稚贝; 半致死温度; 适宜温度; 最适温度; 成活率; 日增长

中图分类号: S 917.4

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of temperature on survival and growth of *Paphia textile* juveniles

WU Jiaying¹, DAI Mingshu¹, LIU Zhigang^{1,2}, LIU Xiaokun¹

1. College of Fisheries, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China

2. Guangdong Marine Invertebrate Science and Technology Innovation Center, Zhanjiang 524088, China

Abstract: In this study, we observed the effects of temperature on the survival and growth of *Paphia textile* juveniles by using experimental ecological methods, so as to provide references for the selection of the intermediate breeding site of the juveniles. The results show that: 1) The 48 h semi-lethal low and high temperatures were 4.95 and 33.39 °C, respectively; the semi-lethal low and high temperatures at 96 h were 8.68 and 32.49 °C, respectively; the 15 d semi-lethal low and high temperatures were 12.09 and 31.02 °C, respectively. 2) At 10 °C, the juveniles all died on the 10th day, and at 32 °C, the survival rate of the juveniles on the 15th day was only 16.67%. 3) Taking the high and low temperatures of 50% of individuals which survived stably within 15 d as the critical temperature for survival, we found that the suitable survival temperature range of the juveniles was 12.09–31.02 °C. Based on the group or groups with the highest survival rate (No significant differences between groups), the most suitable survival temperature range of juveniles was 14–28 °C. 4) Based on the high and low temperatures corresponding to the average daily growth of 30% of the optimal group, the suitable growth temperature range of juveniles was 16.62–31.14 °C. Based on the group or groups with the highest average daily growth (No significant differences between groups), the most suitable growth temperature range of juveniles was 24–28 °C, and the optimal growth temperature was obviously biased towards the

收稿日期: 2022-05-31; 修回日期: 2022-07-21

基金项目: 2019 广西创新驱动发展专项资金(桂科 AA19254032-3); 南海经济动物物种创新与利用创新团队(2021KCXTD026)

作者简介: 吴加莹(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为贝类遗传育种与增养殖。E-mail: 1374030650@qq.com

通信作者: 刘志刚(1963—), 男, 教授, 研究方向为贝类遗传育种与增养殖。E-mail: Liuzg919@126.com

high temperature side within the suitable survival temperature range. In conclusion, it is inferred that *P. textile* juvenile is suitable for underwater bottom sowing in the southern sea area with a subtidal water temperature below 31 °C.

Keywords: *Paphia textile*; Juvenile mollusk; Semi-lethal temperature; Suitable temperature; Optimal temperature; Survival rate; Daily growth

织锦巴非蛤 (*Paphia textile*) 隶属软体动物门、瓣鳃纲、帘蛤目、帘蛤科、巴非蛤属, 其贝壳长卵圆形, 表面平滑呈淡褐色, 内面中央紫红色, 营底埋式生活, 常栖息在浅海沙底、潮下带^[1]。织锦巴非蛤营养丰富、滋味鲜美, 历来有“花甲王”的美誉, 是巴非蛤中经济价值较高的大型品种, 在中国主要分布于广东、广西、海南、福建和台湾等南部沿海地区^[1-2]。近年来, 由于海洋生态环境恶化和无节制采捕, 该贝野生资源量逐年衰减, 而市场需求居高不下, 其人工增养殖技术越来越受到重视^[3]。随着研发力度的不断加大, 织锦巴非蛤的中间培育和养殖技术迈入新阶段, 已探索出海上中培等多种苗种中培模式^[4], 成为我国近年来海洋人工增养殖的重要品种之一^[2]。

目前, 国内外有关织锦巴非蛤的研究报道较少, 主要集中于环境胁迫、生态适应、形态分类、生理特性以及人工育苗技术等方面, 如干露胁迫对织锦巴非蛤耗氧率的影响^[5]; 织锦巴非蛤稚贝对不同盐度的适应性^[1]; 我国东南沿海 5 个织锦巴非蛤群体 11 个形态性状的比较^[2]; 织锦巴非蛤不同组织及性别总类胡萝卜素含量研究^[6]。邹杰等^[3]研究表明, 苗种培育是提高织锦巴非蛤养殖成活率不可或缺的一环, 蛤种规格在人工培育阶段得到了提升, 其养殖成活率比自然放养的成活率提高 5%~30%。

温度是海水贝类人工培育中的重要影响因素, 一些学者^[7-10]研究了不同温度条件下贝类的存活及生长发育情况, 如 Struan 等^[7]报道了悬浮培养中放养密度和温度对海扇贝 (*Placopecten magellanicus*) 生长的耦合影响, 发现温度和生长速率之间存在显著的非线性相互作用; 司和等^[11]研究了温度和盐度对波纹巴非蛤 (*P. undulata*) 胚胎、幼虫及稚贝发育的影响; 刘越^[12]探究了虾夷扇贝 (*Patinopecten yessoensis*) 对温度、饥饿胁迫的应答机制, 指出饥饿和高温会对贝类的生理和免疫功能产生较大影响。目前国内外有关人工培育过程中温度对织锦巴非蛤稚贝生存和生长影响的研究尚未见报道。织锦巴非蛤苗种底播养殖成活率低可能与该贝的温度适应性有关, 弄清温度对其存活与生长的影响, 可为

其养殖场地的选择提供参考依据。因此, 在实验室严格控温的条件下, 本文研究了织锦巴非蛤稚贝在不同温度下的存活和生长情况, 旨在探索该贝稚贝期生存和生长的适宜与最适宜温度, 为织锦巴非蛤在南方海域人工中培和推广养殖提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验所用织锦巴非蛤稚贝为湛江市雷州市覃斗镇贝类育苗场以北部湾北海的织锦巴非蛤为亲本繁育的人工苗种, 于 2022 年 1 月 6 日, 选择壳缘无损、大小相对均匀、活力好、壳面纹织明显的稚贝, 用双层塑胶袋充氧打包运输回广东海洋大学贝类遗传与育种实验室。

其他材料: 海水、浓缩拟微球藻 (*Nannochloropsis gaditana*)、暂养箱、烧杯、稚贝养殖网兜、充氧机、充气管、散气石、电子天平、游标卡尺、滤纸、镊子、电子温度计、光学盐度计、pH 计、低温恒温槽 (型号: DC-0520, 上海坤诚科学仪器有限公司)、溶解氧检测试剂盒 (杭州陆恒生物科技有限公司)、胶头吸管、小型手抄网、筛网、光学显微镜、血球计数板等。

1.2 实验方法

1.2.1 稚贝暂养

稚贝从育苗场运回实验室后, 先置于塑料箱暂养以消除应激反应。暂养期间保持不间断微充气, 定时定量投喂浓缩拟微球藻液, 保证水体藻细胞密度大于 1×10^4 个·mL⁻¹ 且稚贝摄食后不产生明显假粪; 每天吸除污物, 100% 换水 1 次, 待稚贝恢复活力即结束暂养, 开始做预实验。实验期间海水自然水温 20~22 °C、盐度 31‰~32‰、pH 7.80~8.00、溶解氧 (DO) 质量浓度 >6.0 mg·L⁻¹。

实验前, 稚贝需经过筛分, 使规格均匀一致, 以减少组间变异系数, 减少实验误差。预实验结束后, 96 h 温度实验开始前, 从暂养的稚贝中随机抽取 30 个个体进行测量, 平均壳长为 (3.66±0.28) mm, 平均壳高为 (2.64±0.23) mm, 平均体质量为 (7.0±0.3) mg; 15 d 温度实验开始前, 同法测量

30个稚贝,平均壳长为(3.90±0.04) mm,平均壳高为(2.96±0.03) mm,平均体质量为(8.6±0.4) mg。

1.2.2 96 h 温度实验

预实验发现稚贝在低温4℃下21 h内100%死亡、高温36℃下19 h内100%死亡,据此,实验在4~9℃、31~36℃范围内以1℃为梯度各设置6个实验组,同时设置一个常温对照组(20~22℃),每组设3个平行,观察稚贝在48、96 h的半致死温度。实验容器为1 000 mL烧杯,内装800 mL常温常盐过滤海水,在自动控温水槽中进行水浴控温,控温精度±0.1℃,各组温度均经过严格校正。为避免温度突变对稚贝造成不可逆转的生理伤害,各实验组初始水温均为常温状态,中间温度渐变速率为以1℃/4 h,30~36℃范围内以1℃/5 h,9~4℃范围内以1℃/4 h的速率升温或降温并使各组达到预设温度,然后分别开始实验计时。实验期间每日等温换水50%,其他管理方法同暂养。每日定期统计死亡稚贝数及相应死亡时间。死亡稚贝以贝壳开口,壳内肉体腐烂或显微镜检鳃丝停止摆动,重新放入常温海水中不能恢复为标准。

1.2.3 15 d 温度实验

根据96 h半致死温度实验结果,实验温度范围设置为10~32℃;此外,根据实验稚贝对高低温敏感程度的差异,在10~22℃范围内以4℃为梯度设置10、14、18、22℃4个温度组,在24~32℃范围内以2℃为梯度,设置24、26、28、30、32℃5个温度组,每组设3个平行。稚贝放入烧杯后,按1℃/4 h温度渐变速率使水温达到预设温度,实验周期15 d,过程管理同96 h温度实验。实验结束时对全部个体各性状进行测量。

1.3 指标测定与数据处理

1.3.1 指标测定

稚贝存活和生长指标公式如下:

$$R_s = (N_1/N_0) \times 100\% \quad (1)$$

$$P = (P_x/P_m) \times 100\% \quad (2)$$

$$R_{BWG} = (W_1 - W_0) / t \quad (3)$$

$$R_{LG} = (L_1 - L_0) / t \quad (4)$$

$$R_{HG} = (H_1 - H_0) / t \quad (5)$$

式中: R_s 为成活率; N_1 为实验结束存活数; N_0 为实验开始个体总数; P 为相对成活率; P_x 为实验组平均成活率; P_m 为最佳组平均成活率; R_{BWG} 为体质量平均日增长; R_{LG} 为壳长平均日增长; R_{HG} 为壳高平均日增长; W_1 、 L_1 、 H_1 、 W_0 、 L_0 、 H_0 分别

为实验结束时及实验开始时稚贝的体质量、壳长、壳高; t 为实验时间。

体质量的测量使用电子天平(精确度0.1 mg),壳长、壳高的测量使用电子数显游标卡尺(精确度0.01 mm),测量前用滤纸轻轻吸干贝壳表面水分。死亡稚贝的体质量、壳长、壳高视为与初始体质量、壳长、壳高相等,平均日增长视为0^[13]。

1.3.2 半致死温度界定

稚贝半致死温度(LT₅₀)采用两点法^[14]计算,公式为:

$$LT_{50} = T_1 + [(P_1 - 50\%) / (P_1 - P_2)] \times (T_2 - T_1) \quad (6)$$

式中: T_1 、 T_2 分别为成活率接近50%的高、低端温度; P_1 、 P_2 为相应的相对成活率。

1.3.3 适宜及最适宜生存温度界定

以15 d内50%个体稳定存活、不再出现死亡的高、低端温度作为生存临界温度,两端临界温度区间则为该稚贝生存适宜温度范围^[13]。最适生存温度为经多重比较,成活率最高,与其他实验组有显著差异的一个或无显著差异($P>0.05$)的几个实验组对应的温度^[15]。

1.3.4 适宜及最适宜生长温度界定

以实验期间体质量、壳高和壳长平均日增长最高的组为标准,按该组平均日增长的30%所对应的高、低端温度作为适宜生长临界温度,两临界温度区间则为该贝类的适宜生长温度范围^[13,15]。临界温度(Critical temperature)的计算采用两点法:

$$T_c = T_1 + [(R_1 - pR_m) / (R_1 - R_2)] (T_2 - T_1) \quad (7)$$

式中: T_c 为临界温度; p 为30%; R_m 为最佳组的平均日增长; R_1 、 R_2 为与 pR_m 相邻的高、低端平均日增长; T_1 、 T_2 分别为相应的实验温度。生长最适温度界定同生存最适温度,适宜和最适生长温度范围为壳长、壳高和体质量这3个指标的适宜或最适生长温度的重叠部分。

1.3.5 数据处理

实验数据以“平均值±标准差($\bar{x} \pm SD$)”表示。用Excel 2019软件处理测定指标。采用SPSS 22.0软件对数据作单因素方差分析,通过Duncan's多重比较法检验不同处理间的差异显著性。

2 结果

2.1 织锦巴非蛤稚贝 48、96 h 半致死温度

温度对织锦巴非蛤稚贝成活率的影响显著($P<0.05$)。4℃组稚贝在48 h内全部死亡,5℃组

稚贝在 96 h 内全部死亡, 35 °C 组稚贝在 48 h 内全部死亡, 34 °C 组稚贝在 96 h 内接近全部死亡 (表 1)。稚贝 48 h LT_{50} 低温端介于 4~5 °C, 高温端介于 33~34 °C, 采用两点法, 求得稚贝 48 h

LT_{50} 低、高温分别为 4.95、33.39 °C; 稚贝 96 h LT_{50} 低温端介于 8~9 °C, 高温端介于 32~33 °C, 采用两点法, 求得稚贝 96 h LT_{50} 低、高温分别为 8.68、32.49 °C。

表1 织锦巴非蛤稚贝在不同温度下48、96 h的成活率
Table 1 Survival rates of *P. textile* juveniles at 48th and 96th hour at different temperatures

温度 Temperature/°C	实测平均成活率 Actual measured average survival rate/%		相对平均成活率 Relative average survival rate/%	
	48 h	96 h	48 h	96 h
4	0.00±0.00 ^d	0.00±0.00 ^d	0	0
5	52.76±3.48 ^c	0.00±0.00 ^d	52.76	0
6	70.77±8.48 ^b	1.11±1.92 ^d	70.77	1.15
7	72.55±8.60 ^b	2.26±1.96 ^d	72.55	2.34
8	95.49±4.87 ^a	27.92±2.93 ^c	95.49	28.88
9	96.67±3.33 ^a	57.92±3.08 ^b	96.67	59.91
20~22	100.00±0.00 ^a	96.67±3.33 ^a	100.00	100.00
31	88.62±5.31 ^b	81.76±3.21 ^b	88.62	84.58
32	84.44±5.09 ^c	78.89±1.92 ^b	84.44	81.61
33	62.89±8.63 ^d	16.55±3.01 ^c	62.89	17.12
34	29.63±9.80 ^e	2.47±2.14 ^d	29.63	2.55
35	0.00±0.00 ^f	0.00±0.00 ^d	0	0
36	0.00±0.00 ^f	0.00±0.00 ^d	0	0

注: 常温对照组温度为 20~22 °C; 低温组与高温组各自做显著性分析; 同列不同小写字母表示各组之间差异显著 ($P<0.05$), 下表同此。

Note: The temperature in the control group is 20~22 °C. The significance of low temperature group and high temperature group was analyzed respectively. Different lowercase letters within the same column indicate significant differences between the groups ($P<0.05$). The same case in the following tables.

2.2 温度对织锦巴非蛤稚贝生存的影响

2.2.1 适宜生存温度

在 10 °C 下, 稚贝第 3 天开始出现死亡, 第 8 天成活率为 50.00%, 第 10 天全部死亡; 14 °C 组 15 d 内死亡极少; 30 °C 组 15 d 内死亡极少; 但 32 °C 下, 稚贝在第 8 天开始出现死亡, 第 15 天成活率仅为 16.67% (表 2)。由此可见, 织锦巴非蛤稚贝在 10 和 32 °C 下只具有短时间的耐受力, 无法长期存活。根据表 3, 采用两点法, 求得 15 d 的 LT_{50} , 低温端为 12.09 °C, 高温端为 31.02 °C。因此, 织锦巴非蛤稚贝适宜的生存温度范围为 12.09~31.02 °C。

2.2.2 最适生存温度

14、18、22、24、26、28 °C 温度组稚贝成活率均高于 94%, 且这 6 个组经 Duncan's 多重比较法分析无显著性差异, 可得织锦巴非蛤稚贝最适生

存温度范围为 14~28 °C (表 3)。

2.3 温度对织锦巴非蛤稚贝生长的影响

2.3.1 对稚贝体质量、壳长、壳高平均日增长的影响

织锦巴非蛤稚贝在 10~32 °C 的体质量、壳长、壳高平均日增长见图 1、图 2。单因素方差分析结果显示温度对织锦巴非蛤稚贝的生长影响显著 ($P<0.05$)。稚贝体质量、壳长、壳高平均日增长最高组别对应的温度依次是 26、24、24 °C, 对应的平均日增长依次为 $(0.3626 \pm 0.0579) \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $(0.0365 \pm 0.0053) \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $(0.0234 \pm 0.0022) \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。体质量平均日增长最大时的温度高于壳长和壳高平均日增长达到最高时的温度, 而且壳长平均日增长明显高于壳高平均日增长。但根据显著性分析, 在 24~28 °C 3 个性状平均日增长无显著差异 ($P>0.05$)。

2.3.2 适宜生长温度范围

采用两点法求得: 体质量适宜生长温度介于

表2 实验周期内不同温度下织锦巴非蛤稚贝每天死亡情况
Table 2 Daily death of *P. textile* juveniles at different temperatures during experimental period

时间 Time	死亡个数 Number of deaths								
	10 °C	14 °C	18 °C	22 °C	24 °C	26 °C	28 °C	30 °C	32 °C
第1天 1 st day	0	0	0	0	0	0	0	0	0
第2天 2 nd day	0	0	0	0	0	0	0.33	0.33	0
第3天 3 rd day	0.33	0	0.33	0	0	0.33	0.33	0.33	0
第4天 4 th day	0	0	0	0	0	0	0	0	0
第5天 5 th day	0.33	0	0	0.33	0	0.33	0	0	0
第6天 6 th day	1.33	0	0	0	0	0	0	0	0
第7天 7 th day	3.33	0	0	0	0	0.33	0	0.67	0
第8天 8 th day	9.67	0.33	0	0	0	0	0	0.33	0.67
第9天 9 th day	13.00	0	0	0	0	0.33	0	0.33	0
第10天 10 th day	2	0	0	0	0	0	0.33	0.67	2.67
第11天 11 th day	0	0	0	0.33	0	0.33	0	0.33	0.33
第12天 12 th day	0	1	0	0	0	0	0	1.67	4.67
第13天 13 th day	0	0.33	0	0	0	0	0	0.33	4.67
第14天 14 th day	0	0	0	0.33	0	0	0	0	5.33
第15天 15 th day	0	0	0	0	0.33	0	0	0	6.67
累计死亡个数 Cumulative mortality/个	30.00±0.00	1.67±2.08	0.33±0.58	1.00±1.00	0.33±0.58	1.67±0.58	1.00±1.00	5.00±1.00	25.00±1.00

注：上述每天对应的死亡数为各温度组3个平行组死亡数量的平均值，累积死亡个数为3个平行组的平均值±标准差。

Note: The number of deaths per day is the average of the number of deaths in the three parallel groups for each temperature group, and the cumulative number of deaths is the $\bar{X} \pm SD$ of the three parallel groups.

表3 织锦巴非蛤稚贝在不同温度下15 d的成活率
Table 3 Survival rates of *P. textile* juveniles at 15th day at different temperatures

温度 Temperature/ °C	实测平均成活率 Measured average survival rate/%	相对平均成活率 Relative average survival rate/%
10	0.00±0.00 ^d	0
14	94.45±6.94 ^a	95.51
18	98.89±1.92 ^a	100.00
22	96.67±3.34 ^a	97.75
24	98.89±1.92 ^a	100.00
26	94.44±1.93 ^a	95.50
28	96.67±3.34 ^a	97.76
30	83.33±3.36 ^b	84.27
32	16.67±3.34 ^c	16.86

16.45~31.14 °C，壳长适宜生长温度介于16.62~31.34 °C，壳高适宜生长温度介于16.37~31.30 °C。

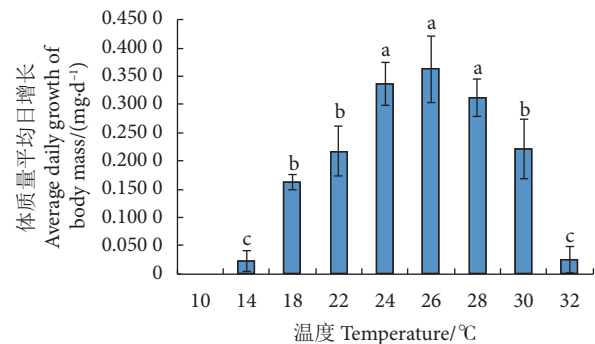


图1 不同温度下织锦巴非蛤稚贝的体质量平均日增长
注：10 °C 组稚贝全部死亡，平均日增长视为0，不参与显著性分析；方柱上不同字母表示各组之间差异显著 ($P < 0.05$)；图2 同此。

Fig. 1 Average daily growth of body mass of *P. textile* juveniles at different temperatures

Note: All the juveniles in the 10 °C group died, and the average daily growth was regarded as zero, not involved in the significance analysis; Different letters on the bars indicate significant differences between the groups ($P < 0.05$). The same case in Fig. 2.

综合评判织锦巴非蛤稚贝适宜生长温度范围为16.62~31.14 °C。

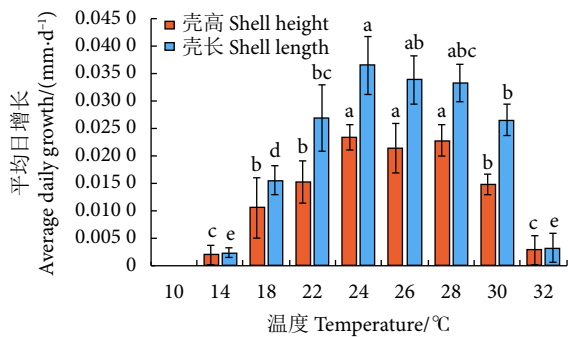


图2 不同温度下织锦巴非蛤稚贝的壳高和壳长平均日增长

Fig. 2 Average daily growth of shell height and length of *P. textile* juveniles at different temperatures

2.3.3 最适宜生长温度范围

经多重比较分析, 24、26、28 °C 组稚贝体质量、壳长及壳高平均日增长均无显著差异, 因此织锦巴非蛤稚贝最适宜生长温度范围为 24~28 °C。最适宜生长温度在适宜生存温度 12.09~31.02 °C 范围内明显偏向高温端。

3 讨论

外界环境中的理化因子如温度、盐度、溶解氧、氨氮、pH、光照、生物因子等对贝类的生存、生长有不同程度的影响^[16-17]。温度是影响机体存活、生长的主要因素之一, 决定了生物生存的空间范围。贝类属于变温动物, 对温度变化敏感, 多项研究发现温度对贝类摄食行为、免疫功能、排泄、同化率、耗氧率、性别诱导、繁殖与孵化率、潜沙行为有显著影响^[18-22]。本研究表明, 温度对织锦巴非蛤稚贝的生存与生长同样具有显著影响 ($P < 0.05$)。适宜的生存和生长温度能保证织锦巴非蛤稚贝的成活和生长, 而在最适宜生存温度和生长温度下, 织锦巴非蛤稚贝能获得最高成活率和最快生长速度, 从而可缩短养殖时间、降低种苗成本和提高养殖效益。海区水温条件是影响贝类推广养殖成功与否的重要因素, 某些新品种推广不成功, 很多情况下不是新品种品质问题, 而是新品种所处海区温度不适宜, 有时即使温度处于适宜范围, 成活率得到保障, 但若最适温度范围在一年内的存在时间短, 也会影响养殖效果。最适宜温度范围在一年中占比越高, 养殖效益越好。

本研究中, 织锦巴非蛤稚贝 48 h、96 h 和 15 d 的 LT_{50} (低/高) 分别为 4.95 °C/33.39 °C、8.68 °C/32.49 °C 和 12.09 °C/31.02 °C, 与张柯馨等^[23]报道的钝缀锦蛤 (*Tapes dorsatus*) 在 48、96、144 和

192 h 的 LT_{50} 的低温端分别为 5.02、7.68、9.01 和 9.20 °C, 高温端分别为 35.44、34.74、34.43 和 34.25 °C 的结果相似, 但后者耐高温能力更强, 这与两者均生活在北部湾, 但后者可生活至潮间带有关。上述两个品种的共同点在于随着考察时间的延长, 低温端 LT_{50} 上升, 高温端 LT_{50} 下降, 适温范围不断缩小。这可能与生物应对极端温度胁迫能力随着时间的延长而下降有关, 并随着温度逐渐偏离极端, 生存时间逐渐延长。关于极端温度致死的研究, 有研究认为, 低温和高温胁迫使贝类细胞的完整性及细胞器功能受到破坏, 生物体内的酶活性降低, 生化反应速度下降, 甚至导致死亡^[24-25]。李佳凯等^[26]初步探索出织锦巴非蛤 (平均壳长为 44 mm) 的极限高温为 32 °C, 并研究了热休克蛋白基因 *HSP20* mRNA 在 32 °C 高温胁迫中的表达, 发现除闭壳肌和性腺外, 在其他组织 (心脏、消化腺、鳃和外套膜) 中的表达均下调。变温条件下 *HSP20* 基因表达量的变化反映出生物对热胁迫的耐受能力^[27], 热休克蛋白可协助变性蛋白重新恢复天然构象, 降低外界刺激对机体的伤害^[28], 而 32 °C 超过了织锦巴非蛤对高温的适应能力, 导致 *HSP20* 基因表达障碍, 这与本研究实测稚贝在 32 °C 下养殖 15 d 平均成活率仅 16.67% 的结果相似。也有研究认为, 在适温范围内, 大多数贝类的耗氧率随着温度的升高而上升, 然而温度超过其生存临界温度后, 会引起贝类生理机能失调, 组织的氧气供应变得越来越有限, 从有氧代谢向厌氧代谢的转变增加, 耗氧率随之下降, 最终导致死亡^[29], 同时, 高温伴随的病原体增殖也可大大增加贝类死亡率^[30]。

本研究中, 不同温度处理下织锦巴非蛤稚贝的成活率及生长指标的增长表现出相同的趋势。稚贝在适宜生存温度范围内成活率逐渐升高, 在 14~28 °C 达到最高, 继续升温则呈逐渐下降甚至骤然下降的趋势; 在适宜生长温度范围内, 稚贝的体质量、壳长、壳高平均日增长逐渐升高, 在 24~28 °C 内三者平均日增长达到最高值, 继续升温, 3 个指标均表现出下降趋势。本研究发现, 织锦巴非蛤稚贝最适生存及生长温度范围均介于 14~28 °C, 这可能与该温度范围内稚贝的摄食率最佳、消化酶活性最大、耗氧变幅最小有关。摄食行为是影响贝类生长发育形态指标的重要因素。有研究表明温度会影响贝类的摄食率, 在适温范围内, 贝类的摄食率随

着温度的上升而增加,达到最佳水平后则随着温度的继续升高逐渐降低^[31-32]。外界环境温度的变化,不仅会影响消化酶活性,还会对消化酶的分泌量产生显著影响,进而影响生物体的生长^[33]。贝类消化酶活性是反映贝类对食物消化吸收能力的一项重要指标,通常一定温度范围内酶活性随着温度的升高而增强,但超过一定温度后酶活性则随温度的升高而降低^[34]。织锦巴非蛤在水温超过 28 ℃ 后酶活性开始下降,因此生长速度也随之变慢。有研究指出,生物体在耗氧变幅较小的温度范围内生活,其呼吸代谢消耗的能量上升的倍率较少,即体内可贮存的能量更多,这样对生物体生长更有利^[35]。通过观察耗氧率最大值出现的温度,可进一步推断贝类最适宜生长温度范围。刘海娟等^[36]指出在温度范围为 26~33 ℃、22~30 ℃、22~30 ℃ 的 3 个海区,织锦巴非蛤稚贝的成活率分别达 90%、85.5%、83.9%,与本研究稚贝在 22~30 ℃ 的成活率相似。但与本研究水温设置处理不同的是,这 3 个养殖实例在养殖过程中均对稚贝生长速度明显较低的中培筐进行了位置调整,并选择饵料和生长环境更加适宜的地点继续培育,因此在刘海娟等^[36]描述的养殖海区水温条件下,稚贝在面临高温胁迫影响时的整体成活率比本研究高。

本研究表明,来自北部湾北海的织锦巴非蛤亲本繁育的稚贝,适宜生存温度范围为 12.09~31.02 ℃,适宜生长温度范围为 16.62~31.14 ℃,前者显示该贝的分布可北达粤东地区,但冬季当水温低于 16 ℃ 时几乎不生长;后者显示该贝在北部湾的生长速度更快,全年均可生长。这一结果与已报道的织锦巴非蛤属于北海贝类区系南海热带种^[23],其仅分布于南澳岛至广东、广西大陆沿岸和海南岛及其附近海域^[23-24]的结果相吻合;与栗志民等^[25]报道的北部湾近岸海区水温周年变化范围为 16.1~31.3 ℃,离岸海区水温周年变化范围为 16.0~30.8 ℃ 的研究结果基本一致。织锦巴非蛤在北部湾海底有大量的自然资源分布,证实了上述观点。但织锦巴非蛤在北部湾潮间带较少出现,这可能与该区域夏季滩温高于该稚贝 48 h 的半致死高温(33.39 ℃),或涨潮后水温高于 31 ℃ 有关。该贝适宜生存温度范围为 12.09~31.02 ℃,最适宜生长温度范围为 24~28 ℃,表明该贝偏高温生长,也说明该贝属于狭温偏高温种类。北部湾近岸海区水

温平均为 25.3 ℃,离岸海区水温平均为 25.1 ℃^[25],正好处于最适宜生长的温度范围内,表明北部湾海域具有养殖该贝有利的水温条件。

4 结论

织锦巴非蛤稚贝的 48 h 半致死低、高温分别为 4.95、33.39 ℃; 96 h 半致死低、高温分别为 8.68、32.49 ℃; 15 d 半致死低、高温分别为 12.09、31.02 ℃; 适宜生存温度范围为 12.09~31.02 ℃; 最适宜生存温度范围为 14~28 ℃; 适宜生长温度范围为 16.62~31.14 ℃; 最适宜生长温度范围为 24~28 ℃,最适宜生长温度在适宜生存温度范围内明显偏向高温端。上述结果表明,为保障较高的养殖成活率,该稚贝更适宜在南方海区潮下带水温不超过 31 ℃ 的海底底播中培。

参考文献:

- [1] 栗志民, 刘志刚, 韩伟贤. 织锦巴非蛤稚贝盐度适应性研究 [J]. 海洋科学, 2011, 35(10): 96-102.
- [2] 纪燕如, 林志华, 伍荣聪, 等. 我国东南沿海 5 个织锦巴非蛤地理群体的形态差异分析 [J]. 热带生物学报, 2011, 2(3): 219-225.
- [3] 邹杰, 彭慧婧, 杨家林. 织锦巴非蛤人工种苗培育及浅海养殖实验 [J]. 科学养鱼, 2019(10): 57-58.
- [4] 陈瑞芳, 董兰芳, 许明珠. 广西特色海水养殖品种发展现状与展望 [J]. 广西科学院学报, 2020, 36(3): 237-241.
- [5] 邱清波, 李由明, 吴丽云, 等. 干露对缀锦蛤、文蛤、美女蛤和织锦巴非蛤耗氧率的影响 [J]. 海南热带海洋学院学报, 2018, 25(2): 20-24.
- [6] 赵虹博, 邓素贞, 张静, 等. 从织锦巴非蛤提取总类胡萝卜素的两种前处理方法效果比较 [J]. 海洋科学, 2019, 43(11): 62-67.
- [7] STRUAN C, CAITLIN C, DANA M, et al. The coupled effects of stocking density and temperature on sea scallop (*Placopecten magellanicus*) growth in suspended culture [J]. Aquac Rep, 2021, 20: 100684.
- [8] LUCHIN V A, GRIGORYEVA N I. The effects of water temperature on the timing of spawning and spat settlement of the Yesso scallop (*Mizuhopecten yessoensis* Jay, 1857) in Minonosok Cove (Posyet Bay, Peter the Great Bay, Sea of Japan) [J]. Rus J Mar Biol, 2021, 46(7): 580-589.
- [9] MARSHALL D A, COXE N C, la PEYRE M K, et al. Tolerance of northern Gulf of Mexico eastern oysters to chronic warming at extreme salinities [J]. J Therm Biol, 2021, 100: 103072.
- [10] CAMERON L P, REYMOND C E, MÜLLER-LUNDIN F, et al. Effects of temperature and ocean acidification on the extrapallial fluid pH, calcification rate, and condition factor of the king scallop *Pecten maximus* [J]. J Shellfish Res, 2019, 38(3): 763.
- [11] 司和, 宋志民, 唐贤明, 等. 温度和盐度对波纹巴非蛤胚胎、幼

- 虫及稚贝发育的影响 [J]. 水产科学, 2018, 37(2): 255-258.
- [12] 刘越. 虾夷扇贝对温度、饥饿胁迫的应答机制浅析 [J]. 南方农业, 2020, 14(5): 127-128.
- [13] 栗志民, 刘志刚, 姚茹, 等. 温度和盐度对皱纹文蛤幼贝存活与生长的影响 [J]. 生态学报, 2010, 30(13): 3406-3413.
- [14] 刘志刚, 王辉, 栗志民, 等. 墨西哥湾扇贝高起始致死温度的研究 [J]. 中国水产科学, 2007, 14(5): 778-785.
- [15] 刘志刚, 王辉, 栗志民, 等. 温度对不同大小墨西哥湾扇贝生长的影响 [J]. 热带海洋学报, 2007(5): 47-52.
- [16] 张颖雪, 苏洁, 樊景凤, 等. 海水养殖贝类弧菌病流行暴发及其环境影响因素研究进展 [J]. 海洋环境科学, 2020, 39(3): 480-487.
- [17] 刘春胜, 刘小霞, 汪浩, 等. 光照强度和光色对番红砗磲 (*Tridacna crocea*) 氨氮、活性磷酸盐及氧代谢的影响 [J]. 海洋与湖沼, 2018, 49(2): 313-318.
- [18] 黄晓婷, 杨祖晶, 王浩, 等. 侏儒蛤潜沙行为研究 [J]. 中国海洋大学学报 (自然科学版), 2020, 50(9): 64-71.
- [19] 姜妮妮, 方建光, 李加琦, 等. 温度胁迫对皱纹盘鲍生理和生化活动的影响 [J]. 中国水产科学, 2017, 24(2): 220-230.
- [20] 刘旭绪, 张秀梅, 覃乐政, 等. 干露时长及温度对魁蚶幼贝潜沙行为及呼吸代谢的影响 [J]. 中国海洋大学学报 (自然科学版), 2017, 47(3): 19-26.
- [21] WANG Q Z, XIE X, ZHANG M, et al. Effects of temperature and salinity on survival and growth of juvenile ark shell *Anadara broughtonii*[J]. Fish Sci, 2017, 83(4): 619-624.
- [22] SYAZILI A, SYAFIYUDDIN, NIARTININGSIH A, et al. Effect of ocean acidification and temperature on growth, survival, and shell performance of fluted giant clams (*Tridacna squamosa*)[J]. IOP Conf Ser: Earth Environ Sci, 2020, 473(1): 012141.
- [23] 张柯馨, 曹楚焄, 刘志刚, 等. 钝缀锦蛤 (*Tapes dorsatus*) 稚贝的温度和盐度耐受性研究 [J]. 海洋学报, 2022, 44(6): 1-8.
- [24] 江天棋, 张扬, 姜亚洲, 等. 高温胁迫对厚壳贻贝摄食、代谢和相关酶活性的影响 [J]. 生态学杂志, 2020, 39(9): 3048-3056.
- [25] 董莎莎, 聂鸿涛, 闫喜武. 贝类低温胁迫响应机制研究进展 [J]. 大连海洋大学学报, 2019, 34(3): 457-462.
- [26] LI J K, WU X W, TAN J, et al. Molecular cloning of the heat shock protein 20 gene from *Paphia textile* and its expression in response to heat shock[J]. Chin J Oceanol Limnol, 2015, 33(4): 919-927.
- [27] PENG L N, HUANG L B, GUI T Y, et al. Identification and expression profiling of *Hsp20* genes in *Neoporphyra haitanensis*[J]. J Appl Phycol, 2022, 34: 1089-1097.
- [28] 司凯歌. 中华鲟热休克蛋白 *HSP30* 基因和 *HSP70* 家族基因的克隆及其在高温胁迫和细菌感染下的表达分析 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2019: 1-9.
- [29] EYMANN C, GÖTZE S, BOCK C, et al. Thermal performance of the European flat oyster, *Ostrea edulis* (Linnaeus, 1758): explaining ecological findings under climate change[J]. Mar Biol: Inter J Life Oceans Coast Waters, 2020, 167(4): 911-921.
- [30] COFFIN M R S, CLEMENTS J C, COMEAU L A, et al. The killer within: endogenous bacteria accelerate oyster mortality during sustained anoxia[J]. Limnol Oceanogr, 2021, 66(7): 2885-2900.
- [31] 段骄阳, 刘慧, 陈四清, 等. 温度对皱纹盘鲍摄食和耗氧率的影响 [J]. 中国农学通报, 2020, 36(27): 153-157.
- [32] 杨家林, 邹杰, 彭慧婧. 温度、盐度和体质量对钝缀锦蛤滤食率和同化率的影响 [J]. 水产科学, 2019, 38(1): 104-108.
- [33] 李俊辉, 王庆恒, 杜晓东, 等. 温度和 pH 对马氏珠母贝肝胰脏消化酶活力的影响 [J]. 水产科学, 2011, 30(2): 115-117.
- [34] 聂鸿涛, 霍忠明, 侯晓琳, 等. 温度和盐度突变对菲律宾蛤仔斑马蛤耗氧率和排氨率的影响 [J]. 水生生物学报, 2017, 41(1): 121-126.
- [35] 杨小东, 江兴龙, 乐普敏, 等. 南美洲鳗鲡 (*Anguilla rostrata*) 的耗氧率 (ROC)、窒息点 (AP) 和适温范围 (RT) 及对非离子氨 (NIA)、NO₂ 的 LC₅₀ 和 SC 的研究 [J]. 海洋与湖沼, 2019, 50(2): 455-464.
- [36] 刘海娟, 陈瑞芳, 聂振平, 等. 织锦巴非蛤苗种的海区中培方法: CN106719183A [P]. 2017-05-31.
- [37] 谢文海, 谢积慧, 阮桂文, 等. 广西北海不同生境海岸贝类群落调查 [J]. 玉林师范学院学报, 2013, 34(2): 69-77.
- [38] 徐凤山, 张素萍. 中国海产双壳类图志 [M]. 北京: 科学出版社, 2008: 256.
- [39] 栗志民, 刘志刚, 梁春桥, 等. 广东流沙湾近岸和离岸育苗海区养殖环境的调查 [J]. 海洋科学, 2014, 38(1): 46-53.