

DOI: 10.12264/JFSC2021-0222

温度对中间球海胆幼胆生存、生长和行为的影响

郑定发, 王慧妍, 丁靖芸, 孙江南, 赵冲, 常亚青

大连海洋大学, 农业农村部北方海水增养殖重点实验室, 辽宁 大连 116023

摘要: 底播增殖是一种提高中间球海胆(*Strongylocentrotus intermedius*)产量的有效方法。底播增殖受到多种内在和外在因素的影响, 其中温度发挥着十分重要的作用, 因此确定中间球海胆适宜增殖温度范围至关重要。本实验将大(23.29±0.27) mm、小(18.78±0.19) mm 两种规格的中间球海胆放置在 3 个温度环境下(10 °C、15 °C、20 °C)养殖 6 周, 观察并测定其生存、生长和行为。实验结果表明, 3 个温度条件均不会造成海胆死亡。20 °C 组的两种规格海胆摄食量显著高于 15 °C 和 10 °C 组($P<0.01$)。10 °C、15 °C 组小规格海胆的觅食时间显著大于 20 °C 组($P<0.01$), 觅食距离显著小于 20 °C 组($P<0.05$)。在趋光实验中, 20 °C 组小规格海胆的运动时间显著大于 15 °C 组($P<0.01$); 运动路程显著小于 15 °C、10 °C 组($P<0.05$)。在避光实验中, 两规格海胆 20 °C 组的运动时间均显著大于 15 °C、10 °C 组($P<0.05$), 运动路程均显著小于 15 °C、10 °C 组($P<0.01$); 15 °C、10 °C 组两种规格海胆口器咬合频率显著大于 20 °C 组($P<0.01$)。15 °C、10 °C 组两种规格海胆的壳径、壳高、体重、性腺重、肠重、口器长、口器重、壳重、壳压力均大于 20 °C 组; 15 °C、10 °C 组两种规格海胆的口器长/壳径、壳高/壳径均大于 20 °C 组。综上所述, 在 10 °C 和 15 °C 的水温下, 中间球海胆均表现出显著更好的行为和生长, 10~15 °C 是中间球海胆幼胆底播增殖的适宜增殖温度范围, 在该环境下放流中间球海胆幼胆预期能够提升底播增殖生产效率。

关键词: 中间球海胆; 温度; 底播增殖; 生长; 行为

中图分类号: S968

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2022)02-0264-10

中间球海胆(*Strongylocentrotus intermedius*)目前主要分布在日本海、朝鲜半岛和中国东北部等地区的潮间带和潮下岩礁区^[1], 具有生长速度快、个体大、性腺色泽佳等优点^[2], 是经济海胆种类中的佳品, 有很高的经济价值^[3]。然而, 过度捕捞^[4]以及落后的资源增殖和管理技术^[2]导致我国中间球海胆养殖产量无法满足日益增长的市场需求^[2]。目前, 资源增殖是扩大中间球海胆养殖规模、提高产量的关键, 对满足市场需求、保护近乎枯竭的海胆资源具有重要意义^[5]。

底播增殖是中间球海胆资源增殖的重要方式之一。它通过在养殖海域放流幼胆(15~25 mm)增

加种群数量, 进而增大海区海胆资源量, 扩大经济效益^[6]。温度是影响海胆生长发育和适应性最主要的环境因素和制约因子^[7-10], 对海胆生理^[11]、生长^[12]、被捕食^[13]和行为^[14]可产生显著影响。这些研究结果支持海胆对温度敏感^[15]这一结论。因此, 寻找使底播增殖的中间球海胆具有最佳的行为和生长表现的合适的温度范围, 对优化底播增殖技术非常重要。

常亚青等^[2]发现中间球海胆在 10~22 °C 的水温中均能正常生存。本研究通过研究大、小两种规格的中间球海胆在 3 种温度环境(10 °C、15 °C 和 20 °C)下养殖 6 周后, 其生存、生长和行为等

收稿日期: 2021-05-18; **修订日期:** 2021-09-16.

基金项目: 辽宁省重大科技攻关项目(2017203003); 辽宁省高等学校创新人才支持计划项目。

作者简介: 郑定发(1994-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水产增养殖, E-mail: 562632865@qq.com; 共同第一作者: 王慧妍(2000-), 女, 本科生, 研究方向为海洋生物学, E-mail: 1244351501@qq.com

通信作者: 赵冲, 博士, 副研究员, 从事海胆行为学和底播增殖研究, E-mail: chongzhao@dlou.edu.cn; 常亚青, 博士, 教授, 从事海胆遗传育种和增养殖研究, E-mail: changlab@hotmail.com

方面的表现,来判断中间球海胆适宜的增殖温度范围,为中间球海胆底播增殖和海胆资源可持续利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 海胆

实验所使用的中间球海胆幼胆购买于大连某养殖场,运至大连海洋大学农业农村部北方海水增殖重点实验室的室内水槽(1 t)中暂养。暂养水温为室温(12℃),保持水槽内供氧充足(大于7 mg/L),每3天投喂一次裙带菜(*Undaria pinnatifida*),更换水槽中二分之一的海水。

1.2 实验设计

大(23.29±0.27) mm、小(18.78±0.19) mm两种规格的实验海胆分别在10℃、15℃、20℃的控温水槽(长×宽×高:775 mm×470 mm×375 mm;大连汇新钛设备有限公司,中国)中进行养殖。每组设置3个重复组。实验前在各个水槽中放置适量挑选过的礁石,以模拟中间球海胆的底栖生活环境^[16]。利用控温水槽使水温以每天0.5℃的变温速度由室温(12℃)转变为实验温度(10℃、15℃、20℃)。

两种规格海胆在3个温度环境下养殖6周,定期投喂饲料,每2~3 d收集粪便,更换海水,并保持充分供氧和适宜光照。养殖期间使循环水溶

氧值保持在8.11~11.07 mg/L。养殖6周后,每个水槽内随机选取10只海胆进行行为实验、体性状测量和组织重量测量。

1.3 死亡率

养殖期间定期观察各个水槽中是否有海胆死亡,及时记录数据。实验结束后计算海胆的死亡率。

$$\text{死亡率(\%)} = \frac{\text{死亡的海胆数目}}{\text{初始海胆总数}} \times 100\%$$

1.4 摄食量

养殖期间定期投喂与每组海胆相同重量的裙带菜。每次投喂前取出上一次残留饲料,去除多余的水分后称重,再进行下一次的投喂。摄食量的计算公式为:

$$\text{摄食量(g)} = \frac{\text{投喂饲料重量(g)} - \text{残留饲料重量(g)}}{\text{海胆数目}}$$

1.5 口器咬合实验

口器咬合体现了海胆的摄食能力^[17]。口器咬合实验是指测定5 min内海胆在充满海带碎的琼脂凝胶上的口器咬合频率,即牙齿从张开到闭合的次数^[18]。海带琼脂凝胶是由2 g海带粉、3 g琼脂粉置于100 mL海水中加热,混合均匀后倒入塑料隔间(长×宽×高:4.5 cm×4.5 cm×4 cm,图1A)^[18]制成。每个水槽随机选取10只海胆放入隔间,控

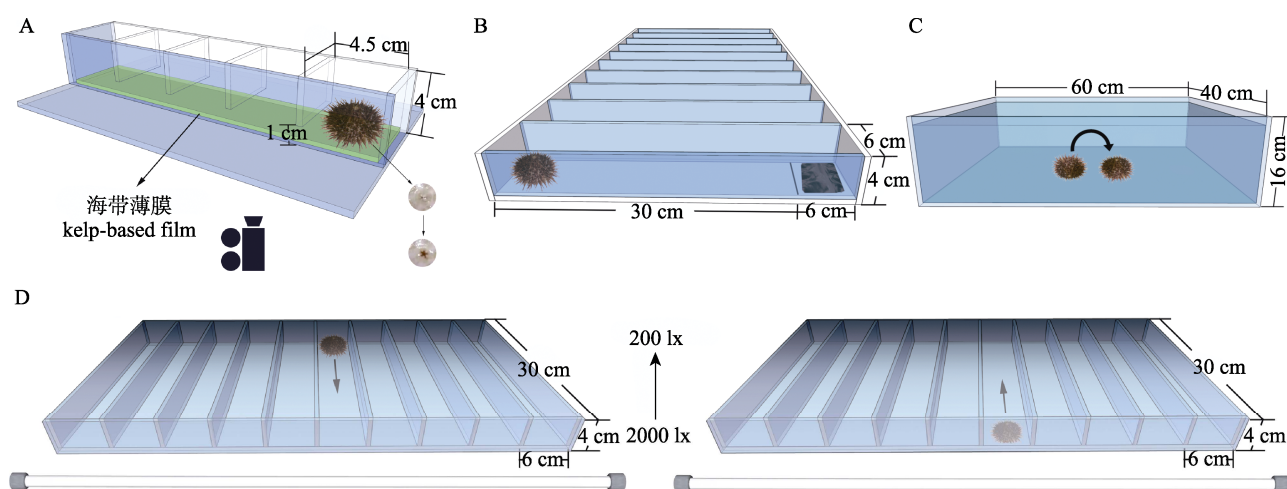


图1 中间球海胆口器咬合(A),觅食行为(B),翻正行为(C),趋光行为和避光行为(D)实验模式图

Fig. 1 Diagrams showing Aristotle's lantern reflex (A), foraging behavior (B), righting behavior (C) and phototaxis (D) of *Strongylocentrotus intermedius*

制海水温度与实验温度一致,利用数码相机(Legria HF20; Canon, 东京, 日本)记录 5 min 内海胆口器咬合频率。按上述实验方法用不同海胆重复 3 次实验。每次结束实验后,更换 1 次海水。以每组 10 只海胆的平均值作为每组海胆的口器咬合频率($n=3$)。

1.6 觅食行为

为了观察海胆的觅食行为,本研究设计了一个含有 10 条独立轨道的塑料装置(轨道长 $\times$ 宽 $\times$ 高: 30 cm $\times$ 6 cm $\times$ 4 cm, 图 1B)。轨道的终点放上海带(*Laminaria japonica*) (长 $\times$ 宽: 6 cm $\times$ 6 cm)。每组随机选取 10 只海胆,分别放置于 10 条轨道起始处,水浴控制海水温度与实验温度一致。利用数码相机(Legria HF20; Canon, 东京, 日本)测定海胆的觅食时间(海胆第一次到达海带处的时间)。若 15 min 内未到达终点,则觅食时间记为 900 s。利用软件 ImageJ (version 1.51 n)计算 15 min 内海胆的觅食路程。按上述实验方法用不同海胆重复 3 次实验。每次结束实验后,更换一次海水。以每组 10 只海胆平均值作为每组海胆的觅食时间和觅食路程($n=3$)。

1.7 翻正行为

翻正时间是指海胆从口面朝上的状态恢复到正常状态所需要的时间^[19]。从每个水槽中随机选取 10 只海胆,将海胆以口器面朝上的状态放进一个大水槽(长 $\times$ 宽 $\times$ 高: 60 cm $\times$ 40 cm $\times$ 16 cm, 图 1C)中,海水温度与实验温度一致,观察 5 min 内海胆的翻正情况。海胆翻正行为所花时间若超出 5 min,则翻正时间记为 300 s。按上述实验方法用不同海胆重复 3 次实验。每次结束实验后,更换 1 次海水。以每组 10 只实验海胆翻正时间的平均值作为每组的海胆翻正时间($n=3$)。

1.8 趋光行为和避光行为

为探究中间球海胆的趋光行为和避光行为,本研究设计了一个含有 10 条独立轨道的塑料装置(轨道长 $\times$ 宽 $\times$ 高: 30 cm $\times$ 6 cm $\times$ 4 cm, 图 1D),以可调节光强的日光灯为唯一光源。在趋光实验中将日光灯放置在终点位置,调节日光灯使起始位置光强为 200 lx, 终点位置光强为 2000 lx; 避光实验中日光灯放置于起始位置。各组随机选取 10 只海胆放置在起始位置,用数码相机(Legria

HF20; Canon, 东京, 日本)分别记录海胆在趋光、避光实验中第一次到达终点的时间,若 15 min 内未到达终点,则运动时间记录为 900 s; 使用软件 ImageJ (version 1.51 n)计算海胆的运动路程。按上述实验方法用不同海胆重复 3 次实验。每次结束实验后,更换一次海水。以每组 10 只实验海胆的运动时间和路程的平均值作为每组海胆在趋光和避光实验下的运动时间和路程($n=3$)。

1.9 体性状和组织重量

体性状的测量包括海胆的体重、壳径、壳高、壳重、壳厚、口器长和口器重。组织重量性状包括海胆的性腺重和肠道重(大规格海胆)。在 6 周实验后,从各组中随机选取 10 只海胆进行体性状测量和组织重量测量。重量测量使用电子天平(JJ1000, G&G Co.), 尺寸测量采用游标卡尺(IP67 16EW, Mahr Co., 德国),并利用压力仪(济南试金公司, 中国)测量大规格中间球海胆的壳压力。按上述方法重复 3 次实验。以每组 10 只实验海胆数据的平均值作为每组海胆的性状数据和组织重量($n=3$)。

1.10 数据分析

数据分析前采用 Levene's test 和 Kolmogorov-Smirnov test 检验对所有数据进行正态分布和方差齐性检验。摄食量采用单因素重复度量方差分析方法进行统计; 实验中所有海胆的行为实验数据和体尺数据采用单因素方差分析方法进行分析。当方差分析有显著差异时,采用 LSD 方法进行两两比较。当 $P<0.05$ 时,认为具有显著的统计学差异。本实验所有数据分析均采用 SPSS 20.0 统计软件进行,数据用平均值 $\pm$ 标准差($\bar{x} \pm SD$)表示。

2 结果与分析

2.1 温度对海胆存活的影响

在探究不同温度对中间球海胆影响的养殖实验中,各实验组大、小两个规格的海胆均并未发现死亡个体。

2.2 温度对海胆行为的影响

2.2.1 觅食行为 由图 2 可知, 20 $^{\circ}\text{C}$ 组小规格海胆的觅食时间极显著大于 15 $^{\circ}\text{C}$ 组($P<0.001$)和 10 $^{\circ}\text{C}$

组 ($P<0.01$), 且觅食路程极显著小于 15 °C 组 ($P<0.001$), 显著小于 10 °C 组 ($P<0.05$)。大规格海胆在 3 个温度下(10 °C、15 °C、20 °C)的觅食时间和觅食路程均无显著差异($P>0.05$)。

2.2.2 趋光行为和避光行为 趋光实验中, 20 °C 组小规格海胆运动时间极显著大于 15 °C 组 ($P<0.01$); 运动路程极显著小于 15 °C 组 ($P<0.01$), 显著小于 10 °C 组 ($P<0.05$)。大规格海胆在趋光实验中行为

在各组间无显著差异($P>0.05$)(图 3A, 3C)。

在避光实验中, 20 °C 组小规格海胆的运动时间极显著大于 15 °C 组 ($P<0.001$), 显著大于 10 °C 组 ($P<0.05$), 运动路程极显著小于 15 °C 组 ($P<0.001$)。20 °C 组大规格海胆运动时间极显著大于 15 °C 组 ($P<0.001$)和 10 °C 组 ($P<0.01$), 且运动路程极显著小于 15 °C 组 ($P<0.001$)和 10 °C 组 ($P<0.01$)(图 3B, 3D)。

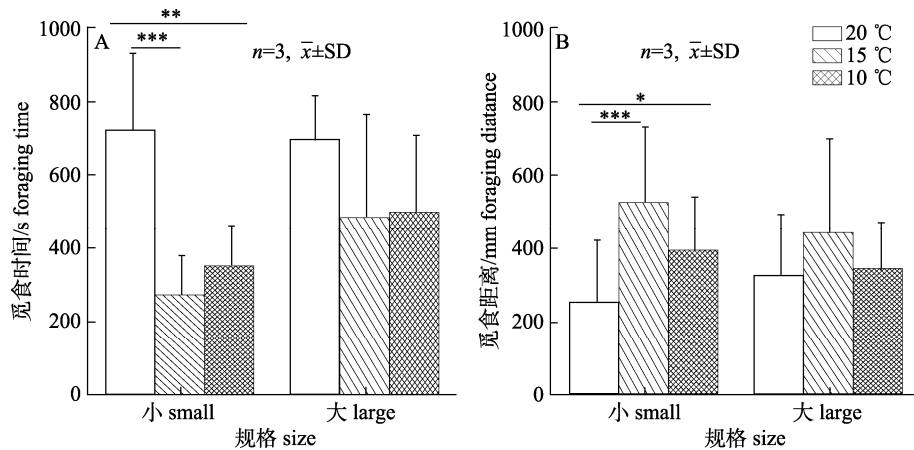


图 2 中间球海胆在不同水温条件下觅食时间(A)和觅食路程(B)

*表示差异显著 ($P<0.05$), **和***分别表示差异极显著 ($P<0.01$, $P<0.001$).

Fig. 2 Foraging time (A) and foraging distance (B) of *Strongylocentrotus intermedius* under different water temperatures
* refers to significant difference ($P<0.05$), ** and ***refer to extremely significant difference at 0.01 and 0.001 level, respectively.

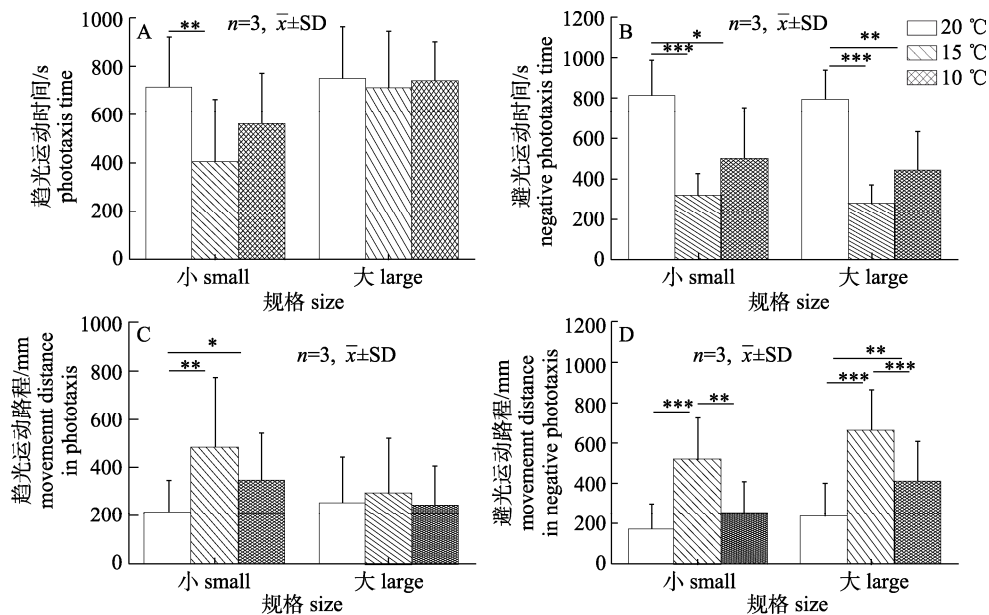


图 3 不同温度下中间球海胆趋光运动时间(A), 避光运动时间(B), 趋光运动路程(C)和避光运动路程(D)

*表示差异显著 ($P<0.05$), **和***表示差异极显著 ($P<0.01$, $P<0.001$).

Fig. 3 Phototaxis time (A), negative phototaxis time (B), movement distance in positive phototaxis (C) and movement distance in negative phototaxis (D) of *Strongylocentrotus intermedius* under different water temperatures
* refers to significant difference ($P<0.05$), ** and ***refer to extremely significant difference at 0.01 and 0.001 level, respectively.

2.2.3 口器咬合频率 20 ℃组小规格海胆的口器咬合频率极显著低于 15 ℃组($P<0.001$)和 10 ℃组($P<0.01$)。20 ℃组大规格海胆的口器咬合频率极显著低于 15 ℃组($P<0.01$)和 10 ℃组($P<0.001$)(图 4)。

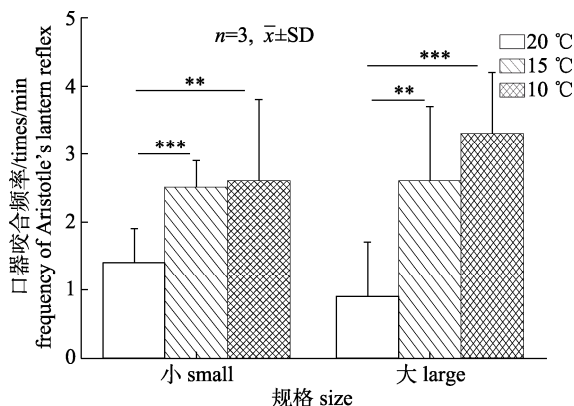


图 4 不同温度下中间球海胆的口器咬合频率

和*表示为差异极显著($P<0.01$, $P<0.001$)。

Fig. 4 Aristotle's lantern reflex of *Strongylocentrotus intermedius* at different water temperatures

** and *** refer to extremely significant difference at 0.01 and 0.001 level, respectively.

2.2.4 翻正行为 大、小规格海胆翻正时间在各温度组(10 ℃、15 ℃、20 ℃)间无显著差异($P>0.05$)(图 5)。

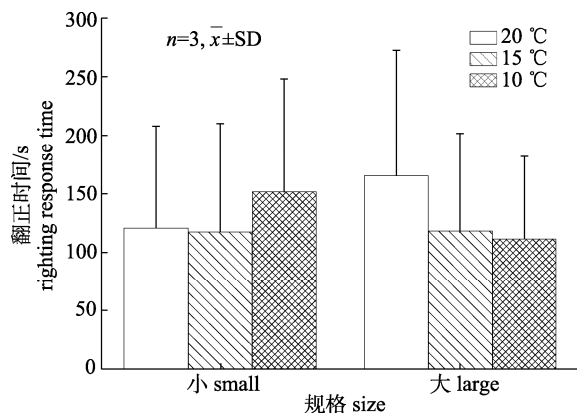


图 5 不同温度下中间球海胆的翻正时间

Fig. 5 Righting response time of *Strongylocentrotus intermedius* at different water temperatures

2.2.5 摄食量 在 3 种温度环境下(10 ℃、15 ℃、20 ℃), 两种规格海胆的摄食量变化趋势相同, 20 ℃组海胆的摄食量极显著大于 15 ℃组($P<0.001$), 15 ℃组海胆摄食量极显著大于 10 ℃组($P<0.001$)(图 6)。

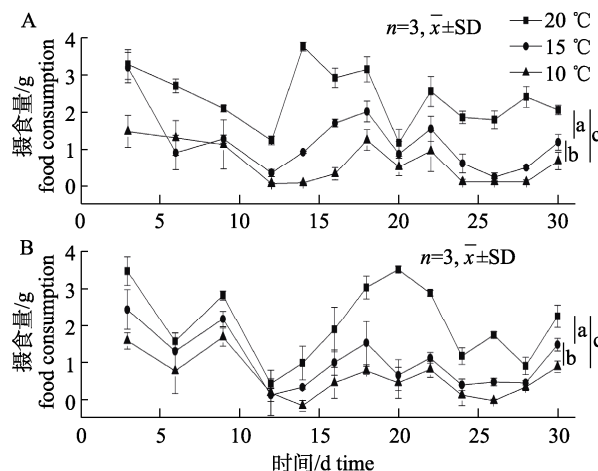


图 6 不同温度下小规格(A)和大规格(B)中间球海胆的摄食量
摄食量用重复度量分析方法进行测量. 图中不同字母表示
整个实验过程摄食量不同温度间差异显著($P<0.05$).

Fig. 6 Food consumption of small (A) and large size (B) *Strongylocentrotus intermedius* under different water temperatures

Food consumption was measured using a repeat metric analysis method. Different letters indicate significant differences in food consumption among different temperature treatment groups over the course of the experiment ($P<0.05$).

2.3 温度对海胆生长的影响

2.3.1 壳径、壳高、壳高/壳径和体重 20 ℃组大、小规格海胆的壳径、体重均极显著小于 15 ℃组($P<0.001$)和 10 ℃组($P<0.001$)(图 7A、D)。20 ℃组大、小规格海胆的壳高均极显著小于 15 ℃组($P<0.001$)(图 7B)。

20 ℃组小规格海胆的壳高/壳径极显著大于 15 ℃组($P<0.001$)和 10 ℃组($P<0.01$), 且 15 ℃组显著大于 10 ℃组($P<0.05$)。20 ℃组大规格海胆的壳高/壳径显著大于 15 ℃组($P<0.05$), 极显著大于 10 ℃组($P<0.01$)(图 7C)。

2.3.2 组织重量 如图 8 所示, 20 ℃组大规格海胆的性腺重和肠重均极显著小于 15 ℃组和 10 ℃组($P<0.001$)。

2.3.3 口器长、口器重和口器长/壳径 20 ℃组小规格海胆的口器长极显著小于 15 ℃组($P<0.001$), 20 ℃大规格组海胆的口器长极显著小于 15 ℃组($P<0.01$)(图 9A)。20 ℃组小规格海胆的口器重极显著小于 15 ℃组($P<0.001$)和 10 ℃组($P<0.01$); 20 ℃组大规格海胆的口器重极显著小于 15 ℃组和 10 ℃组($P<0.01$)(图 9B)。

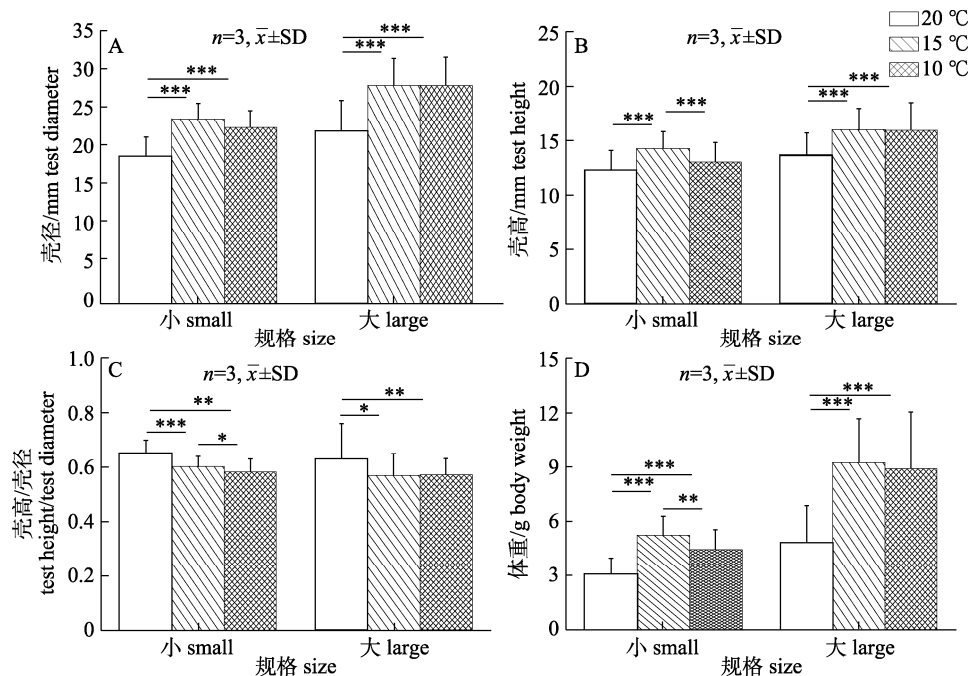


图 7 中间球海胆在不同温度条件下的壳径(A)、壳高(B)、壳高/壳径(C)以及体重(D)

*表示差异显著($P<0.05$), **和***表示差异极显著($P<0.01$, $P<0.001$).

Fig. 7 Test diameter (A), test height (B), test height/test diameter (C) and body weight (D) of *Strongylocentrotus intermedius* at different water temperatures

* refers to significant difference ($P<0.05$), ** and *** refer to extremely significant difference at 0.01 and 0.001 level, respectively.

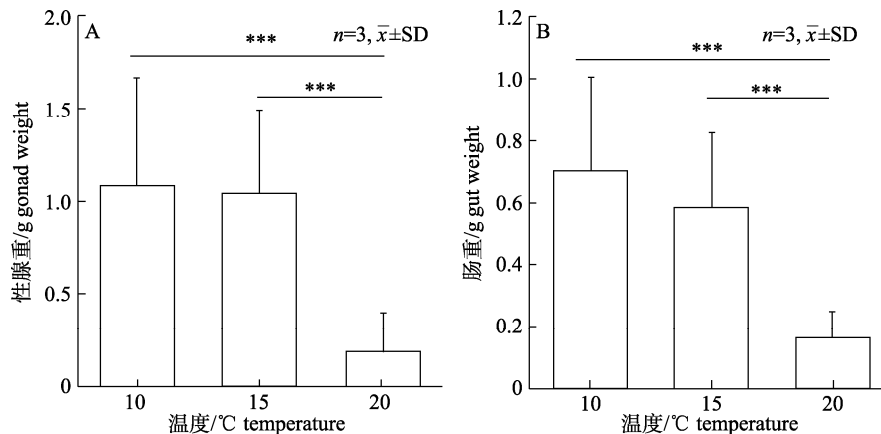


图 8 大规格中间球海胆在不同温度条件下的性腺重(A)和肠重(B)

***表示差异极显著($P<0.001$).

Fig. 8 Gonad (A) and gut (B) weights of large size *Strongylocentrotus intermedius* at different water temperatures

*** refers extremely significant difference ($P<0.001$).

20 °C组小规格海胆的口器长/壳径极显著大于 10 °C组($P<0.01$); 20 °C组大规格海胆的口器长/壳径极显著大于 15 °C组和 10 °C组($P<0.001$)(图 9C)。

2.3.4 壳重、壳厚、壳压力 20 °C组大、小规格海胆的壳重均极显著小于 15 °C组和 10 °C组

($P<0.001$)(图 10A)。20 °C组大规格海胆的壳压力显著小于 15 °C组($P<0.05$)(图 10C)。

20 °C组小规格海胆的壳厚极显著大于 10 °C组($P<0.001$), 20 °C组大规格海胆的壳厚极显著小于 10 °C组($P<0.001$)。15 °C组与 20 °C组的两种规格海胆壳厚无显著性差异($P>0.05$)(图 10B)。

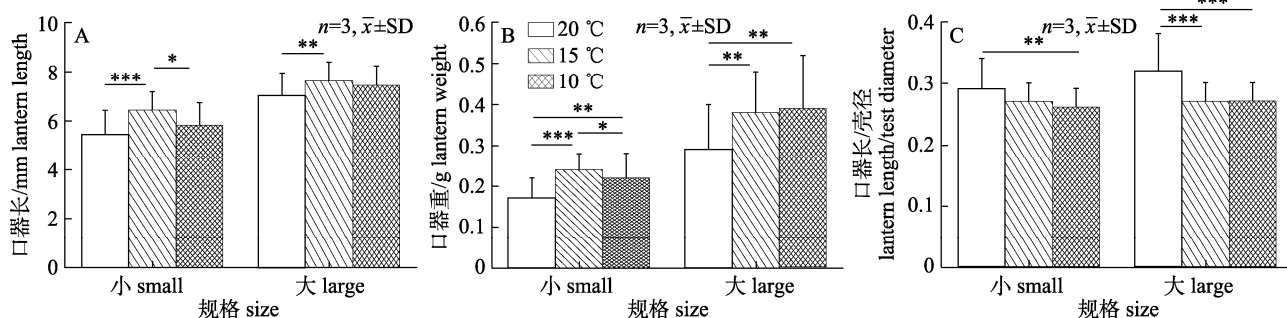


图 9 不同温度下中间球海胆的口器长(A)、口器重(B)和口器长/壳径(C)

*表示差异显著($P<0.05$), **和***表示差异极显著($P<0.01$, $P<0.001$).

Fig. 9 Lantern length (A), lantern weight (B) and lantern length/test diameter (C) of *Strongylocentrotus intermedius* at different water temperatures

* refers to significant difference ($P<0.05$), ** and *** refer to extremely significant difference at 0.01 and 0.001 level, respectively.

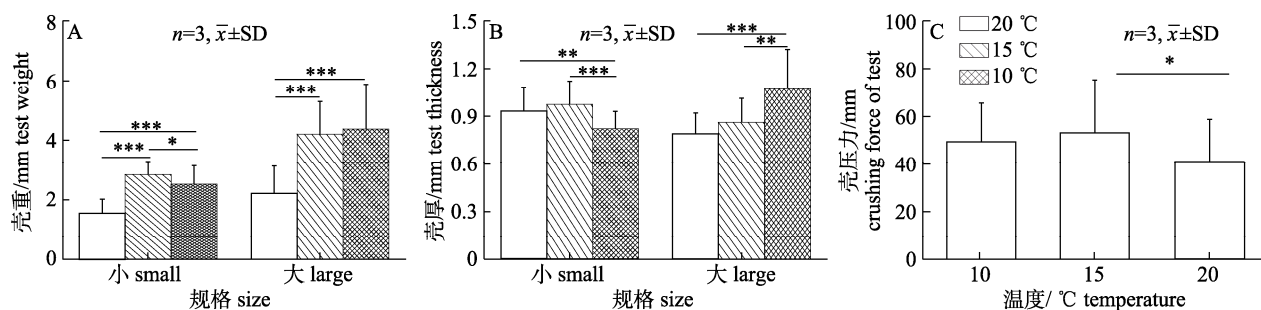


图 10 中间球海胆在不同温度条件下的壳重(A)、壳厚(B)和大规格海胆壳压力(C)

*表示差异显著($P<0.05$), **和***表示差异极显著($P<0.01$, $P<0.001$).

Fig. 10 Test weight (A), test thickness (B) and crushing force of large size test (C) of *Strongylocentrotus intermedius* at different water temperatures

* refers to significant difference ($P<0.05$), ** and *** refer to extremely significant difference at 0.01 and 0.001 level, respectively.

3 讨论

3.1 温度对中间球海胆存活的影响

本实验通过研究中间球海胆在 10 °C、15 °C、20 °C 下不同存活、行为和生长表现来确定其最佳增殖温度。在正式实验前控制养殖温度从暂养水温缓慢转变为实验温度,以防止温度骤变影响海胆在不同温度下的生长状况和行为表型。降低死亡率是海胆进行底播增殖的首要目标^[6], 本研究发现 10 °C、15 °C、20 °C 的水温均能够保证不同规格的中间球海胆正常存活。尤凯等^[20]发现海胆的适宜水温为 8~22 °C, 高绪生等^[7]也证明幼海胆在 0~30 °C 范围内可大量存活, 与本研究结论一致。因此从生存角度来看, 10~20 °C 是中间球海胆增殖可接受的温度范围, 不会造成海胆大量死亡。

3.2 温度对中间球海胆行为的影响

有效觅食是中间球海胆底播增殖的关键, 直接决定了它们在野外的生物量^[21]。在觅食行为实验中, 20 °C 组小规格海胆的觅食时间显著大于 15 °C 组($P<0.001$)和 10 °C 组($P<0.01$), 且觅食路程显著少于 15 °C 组($P<0.001$)和 10 °C 组($P<0.05$)。这与 Zhao 等^[15]发现长期高温增加中间球海胆的觅食时间的研究结果一致。中间球海胆第一次到达海带处的时间(觅食时间)以及运动的总路程(觅食路程)表征着海胆在觅食过程中的主动性^[22]。觅食时间的增加意味着海胆可能暴露在捕食者面前和受到物理干扰的时间更长^[15]; 觅食距离的缩短则不利于海胆寻找能够满足自身营养需求的足够食物。以上结果表明, 中间球海胆在 10~15 °C 下觅食行为更强。探测光对于海洋无脊椎动物寻找食物、庇护所和躲避捕食者发挥重要作用^[23]。无

论是趋光还是避光实验,海胆行为均与觅食行为结果趋势相一致。因此,10~15℃是中间球海胆觅食行为的最佳温度范围。

在口器咬合实验中,20℃组两种规格海胆的口器咬合频率显著低于其他温度组(10℃组、15℃组),这意味着高温削弱了海胆操纵下颌获取食物的能力^[17]。海胆的觅食和口器咬合均是由离散的神经肌肉介导的行为^[17]。温度升高可能影响了海胆神经肌肉功能^[24],导致海胆行为受抑制,降低了觅食和摄食效率^[17]。因此,10~15℃是中间球海胆最佳的摄食温度范围,利于海胆生存。然而,有趣的是,中间球海胆的摄食量在10℃、15℃、20℃的水温中呈逐渐上升趋势。这与常亚青等^[2]发现在10~19℃范围内,19℃组的中间球海胆无论摄食海带、裙带菜或石莼(*Ulva lactuca*),其摄食率均最高的现象一致。这表明20℃时,中间球海胆虽表现出相对较弱的觅食和摄食行为,但摄食量却显著高于其他温度组。

3.3 温度对中间球海胆生长的影响

本研究发现20℃环境下海胆的口器长/壳径最高。这一现象可能是由于海胆为了满足高温下的自身代谢需求^[25-26],口器与壳之间产生了异速增长^[15]。口器的增大有利于增加海胆的摄食能力^[27]。20℃下海胆口器与壳之间显著的异速增长是海胆觅食和摄食行为显著降低条件下依然具有高摄食量的可能原因。

20℃下两种规格海胆的壳径、壳重、壳高、体重、口器长、口器重、性腺重和肠重均小于15℃组和10℃组。这与Zhao等^[15]发现长期生活在高温下的中间球海胆其壳径、体重和壳重显著下降的结论一致。综上,10~15℃水温是中间球海胆底播增殖的最佳温度范围。相较于20℃,10~15℃水温下海胆具有显著更强的觅食和摄食行为和更好的生长发育,有利于底播增殖。

海胆壳的硬度对于防御非生物干扰和捕食很重要,决定着海胆的适应性^[17]。本研究发现20℃组海胆的壳压力显著小于15℃组海胆。这表明15℃环境下中间球海胆抗干扰能力更强。此外,海胆壳的塑性表明它们在成长过程中骨骼的灵活性^[28],壳高/壳径的种内差异与栖息地环境相关^[29-30]。在

本研究中发现,生活在20℃环境下的中间球海胆的壳高/壳径均显著高于其他两组,体现了海胆形状对环境压力的适应性^[31]。这与Zhao等^[15]关于长期高温显著增加了中间球海胆的壳高/壳径的实验结论相一致。这还表明与其他两个温度相比,20℃对中间球海胆幼胆造成的环境压力更大,使得20℃组海胆通过发生显著形状变化来适应环境。另外,其缩小的体型将会减少高温对能量的需求,有助于海胆生存^[15]。虽然两种规格海胆在10℃、15℃、20℃3个温度下都能够正常生存,但由于它们对温度的敏感性^[15]以及对水温的耐受能力不同^[7],采取多种方式减轻和抵御环境温度的升高所带来的负面影响^[22],导致海胆在3个温度下的适应性有所差异。

4 结论

本研究结果表明,10~15℃为中间球海胆最适宜的底播增殖温度范围。在此水温下,中间球海胆具有显著更快的生长速度和更活跃的行为,有利于自身的生长发育。本实验揭示了不同温度下中间球海胆生存、生长和行为的变化规律,为中间球海胆底播增殖和资源管理提供了有价值的参考信息。

参考文献:

- [1] Agatsuma Y. *Strongylocentrotus intermedius*[M]//Developments in Aquaculture and Fisheries Science. Amsterdam: Elsevier, 2013: 437-447.
- [2] Chang Y Q, Wang Z C, Wang G J. Effect of temperature and algae on feeding and growth in sea urchin, *Strongylocentrotus intermedius*[J]. Journal of Fisheries of China, 1999, 23(1): 69-76. [常亚青, 王子臣, 王国江. 温度和藻类饵料对虾夷马粪海胆摄食及生长的影响[J]. 水产学报, 1999, 23(1): 69-76]
- [3] Wang Z C, Chang Y Q. Research prospects for marine culture of economic sea urchin[J]. Marine Sciences, 1997, 21(6): 20-22. [王子臣, 常亚青. 经济类海胆增殖研究进展及前景[J]. 海洋科学, 1997, 21(6): 20-22.]
- [4] Andrew N L, Agatsuma Y, Ballesteros E, et al. Status and management of world sea urchin fisheries[M]//Oceanography and Marine Biology, An Annual Review. Los Angeles: CRC Press, 2002, 40: 343-425.
- [5] Sun J N, Chi X M, Yang M F, et al. Light intensity regulates phototaxis, foraging and righting behaviors of the sea urchin

- Strongylocentrotus intermedius*[J]. PeerJ, 2019, 7: e8001.
- [6] Sakai Y, Tajima K I, Agatsuma Y. Stock enhancement of the short-spined sea urchin *Strongylocentrotus intermedius* in Hokkaido, Japan[M]//Stock Enhancement and Sea Ranching. Oxford: Blackwell Publishing, 2004: 465-476.
- [7] Gao X S, Sun M Y, Hu Q M, et al. Influence of temperature on various development stages of the sea urchin, *Strongylocentrotus nudus* A[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1993, 24(6): 634-640. [高绪生, 孙勉英, 胡庆明, 等. 温度对光棘球海胆不同发育阶段的影响[J]. 海洋与湖沼, 1993, 24(6): 634-640.]
- [8] Lawrence J M, Cao X B, Chang Y Q, et al. Temperature effect on feed consumption, absorption, and assimilation efficiencies and production of the sea urchin *Strongylocentrotus intermedius*[J]. Journal of Shellfish Research, 2009, 28(2): 389-395.
- [9] Lemoine N P, Burkepile D E. Temperature-induced mismatches between consumption and metabolism reduce consumer fitness[J]. Ecology, 2012, 93(11): 2483-2489.
- [10] Zhao C, Feng W P, Wei J, et al. Effects of temperature and feeding regime on food consumption, growth, gonad production and quality of the sea urchin *Strongylocentrotus intermedius*[J]. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 2016, 96(1): 185-195.
- [11] Uthicke S, Liddy M, Nguyen H D, et al. Interactive effects of near-future temperature increase and ocean acidification on physiology and gonad development in adult Pacific sea urchin, *Echinometra* sp. A[J]. Coral Reefs, 2014, 33(3): 831-845.
- [12] Wolfe K, Dworjanyn S A, Byrne M. Effects of ocean warming and acidification on survival, growth and skeletal development in the early benthic juvenile sea urchin (*Heliocidaris erythrogramma*)[J]. Global Change Biology, 2013, 19(9): 2698-2707.
- [13] Bodmer M D V, Wheeler P M, Hendrix A M, et al. Interacting effects of temperature, habitat and phenotype on predator avoidance behaviour in *Diadema antillarum*: Implications for restorative conservation[J]. Marine Ecology Progress Series, 2017, 566: 105-115.
- [14] Zhao C, Ji N J, Zhang B L, et al. Effects of covering behavior and exposure to a predatory crab *Charybdis japonica* on survival and HSP70 expression of juvenile sea urchins *Strongylocentrotus intermedius*[J]. PLoS One, 2014, 9(5): e97840.
- [15] Zhao C, Zhang L S, Qi S B, et al. Multilevel effects of long-term elevated temperature on fitness related traits of the sea urchin *Strongylocentrotus intermedius*[J]. Bulletin of Marine Science, 2018, 94(4): 1483-1497.
- [16] Agatsuma Y. Ecology of *Strongylocentrotus nudus*[M]//Developments in Aquaculture and Fisheries Science. Amsterdam: Elsevier, 2001, 32: 347-361.
- [17] Brothers C J, McClintock J B. The effects of climate-induced elevated seawater temperature on the covering behavior, righting response, and Aristotle's lantern reflex of the sea urchin *Lytechinus variegatus*[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2015, 467: 33-38.
- [18] Ding J Y, Zheng D F, Sun J N, et al. Effects of water temperature on survival, behaviors and growth of the sea urchin *Mesocentrotus nudus*: New insights into the stock enhancement[J]. Aquaculture, 2020, 519: 734873.
- [19] Shi D T, Ding J Y, Zhang L L, et al. Effects of UV-B radiation on fitness related behaviors of the sea urchin *Strongylocentrotus intermedius*[J]. Journal of Oceanology and Limnology, 2018, 36(5): 1681-1687.
- [20] You K, Zeng X Q, Liu H, et al. Selectivity and tolerance of sea urchin (*Hemicentrotus pulcherrimus*) to environmental change[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(3): 409-412. [尤凯, 曾晓起, 刘晖, 等. 马粪海胆对环境变化的耐受性与选择性研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(3): 409-412.]
- [21] Agatsuma Y, Takagi S, Inomata E, et al. Process of deterioration of a kelp (*Ecklonia bicyclis* Kjellman) bed as a result of grazing by the sea urchin *Mesocentrotus nudus* (Agassiz) in Shizugawa Bay in northeastern Honshu, Japan[J]. Journal of Applied Phycology, 2019, 31(1): 599-605.
- [22] Zhang L S. Effects of long-term high temperature stress on behaviours, growth and offspring traits of sea urchin *Strongylocentrotus intermedius*[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2017. [张立胜. 长时间升温胁迫对中间球海胆行为、生长及子代性状的影响[D]. 大连: 大连海洋大学, 2017.]
- [23] Kirwan J D, Bok M J, Smolka J, et al. The sea urchin *Diadema africanum* uses low resolution vision to find shelter and deter enemies[J]. Journal of Experimental Biology, 2018, 221(14): jeb176271.
- [24] De Ridder C, Lawrence J M. Food and feeding mechanisms: Echinoidea[M]//Echinoderm Nutrition. Los Angeles: CRC Press, 1982: 57-92.
- [25] Spirlet C, Grosjean P, Jangoux M. Optimization of gonad growth by manipulation of temperature and photoperiod in cultivated sea urchins, *Paracentrotus lividus* (Lamarck) (Echinodermata)[J]. Aquaculture, 2000, 185(1-2): 85-99.
- [26] Ulbricht R J. Effect of temperature acclimation on the metabolic rate of sea urchins[J]. Marine Biology, 1973, 19(4): 273-277.
- [27] Ebert T A, Hernández J C, Clemente S. Annual reversible plasticity of feeding structures: Cyclical changes of jaw allometry in a sea urchin[J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2014, 281(1779): 20132284.
- [28] Johnson A S, Ellers O, Lemire J, et al. Sutural loosening and skeletal flexibility during growth: Determination of drop-like shapes in sea urchins[J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2002, 269(1488): 215-220.
- [29] McPherson B F. Contributions to the biology of the sea urchin

- hin *Tripneustes ventricosus*[J]. Bulletin of Marine Science, 1965, 15(1): 228-244.
- [30] Lewis J B, Storey G S. Differences in morphology and life history traits of the echinoid *Echinometra lucunter* from different habitats[J]. Marine Ecology Progress Series, 1984, 15: 207-211.
- [31] Zhao C, Zhang L L, Shi D T, et al. Carryover effects of short-term UV-B radiation on fitness related traits of the sea urchin *Strongylocentrotus intermedius*[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 164: 659-664.

Effects of water temperature on survival, behavior, and growth of small sea urchin (*Strongylocentrotus intermedius*)

ZHENG Dingfa, WANG Huiyan, DING Jingyun, SUN Jiangnan, ZHAO Chong, CHANG Yaqing

Key Laboratory of Mariculture and Stock Enhancement in North China's Sea, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Dalian Ocean University, Dalian 116023, China

Abstract: Stock enhancement is an effective method to achieve high production of the sea urchin *Strongylocentrotus intermedius*. This process is affected by various internal and external factors, among which temperature plays an important role. Temperature significantly affects the feeding and metabolism of *S. intermedius*, thereby regulating survival and growth. Temperature change, as an important stress factor, affects the behaviors of *S. intermedius*. These behaviors can effectively protect *S. intermedius* from the effects of environmental factors. The righting response, frequency of Aristotle's lantern reflex, foraging behavior, positive phototaxis behavior, and negative phototaxis behavior reflect the behavioral functions of *S. intermedius* for foraging and self-protection against predators. Additionally, they are the most important adaptation-related characteristics for increasing the population size of *S. intermedius*. Therefore, it is essential to determine the optimal temperature range for stock enhancement of *S. intermedius*.

In this study, *S. intermedius* were placed in temperature-controlled tanks. Stones were collected locally and placed in the tanks to simulate the benthic environment of *S. intermedius*. We placed large [(23.29±0.27) mm] and small [(18.78±0.19) mm] *S. intermedius* in three temperature environments (10 °C, 15 °C, and 20 °C) for 6 weeks to observe the changes in their survival, growth and behaviors, to reveal the effects of different temperatures on *S. intermedius*. Growth referred to the change in body traits (test diameter, test weight, test height, crushing force of test, test thickness, body weight, lantern length, and lantern weight) and tissue weight (gonad weight and gut weight) of *S. intermedius* after 6 weeks. Behaviors included righting response, frequency of Aristotle's lantern reflex, foraging behavior, positive phototaxis, and negative phototaxis.

There was no mortality during the experiment. This indicates that 10–20 °C is an acceptable temperature range for the survival of *S. intermedius*. The food consumption of sea urchins in the 20 °C group was significantly higher than that in the other two temperature groups for both body sizes ($P<0.001$). Test diameter, test weight, test height, crushing force of test, body weight, lantern length, lantern weight, gonad weight, and gut weight of different sizes were significantly lower in sea urchins exposed to 20 °C than to 10 °C and 15 °C. Therefore, 10 °C and 15 °C were within the most suitable temperature range for optimal growth and development of sea urchins. Moreover, the frequency of Aristotle's lantern reflex, phototaxis, negative phototaxis, and foraging behaviors of *S. intermedius* exposed to 15 °C was significantly greater than that at 20 °C. This suggests that *S. intermedius* exhibits better behavior in this environment. In summary, the present study investigated the changes in survival, growth, and behaviors of *S. intermedius* at different water temperatures and found that 10–15 °C is appropriate for behavior and growth of *S. intermedius*. Releasing juvenile *S. intermedius* at 10–15 °C will maximize the benefit of stock enhancement. The present study provides valuable information for stock enhancement and resource management of *S. intermedius*.

Key words: *Strongylocentrotus intermedius*; temperature; stock enhancement; growth; behavior

Corresponding author: ZHAO Chong, E-mail: chongzhao@dlou.edu.cn; CHANG Yaqing, E-mail: changlab@hotmail.com