



高温对缢蛏生理代谢和抗氧化水平的影响

李 春¹, 刘 琦², 陈宇宽¹, 袁 立¹, 牛东红^{1*}

1. 上海海洋大学, 上海市水产动物良种创制与绿色养殖协同创新中心, 上海 201306; 2. 三门县水产技术推广站, 浙江 台州 317100

摘要:

【目的】探究高温胁迫对贝类的影响。

【方法】实验以缢蛏为研究对象, 设置胁迫时间为 72 h 的对照组 (24 °C) 和高温组 (28 °C、32 °C) 比较实验, 分别在 0、6、12、24、48 和 72 h 取样, 测定并统计各时间点缢蛏存活率、耗氧率和排氨率, 检测高温对缢蛏肝胰腺和鳃组织中超氧化物歧化酶 (SOD) 活性和丙二醛 (MDA) 含量的影响。

【结果】高温 28、32 °C 组缢蛏在 72 h 内存活率分别为 27.80%±4.15% 和 20.00%±2.69%, 显著低于对照组 85.60%±1.60%; 温度升高, 缢蛏耗氧率、排氨率也随之增大, 并在 32 °C 达到最大值; 肝胰腺和鳃组织中 SOD 活性和 MDA 含量随着温度的升高而增加, 随着时间的延长呈先上升后下降的趋势。

【结论】急性高温胁迫下, 缢蛏生理代谢活动加剧, 但仍保持一定的存活率和抗氧化能力。本研究结果为进一步选育缢蛏耐高温新品系提供了数据参考。

关键词: 缢蛏; 高温; 存活率; 生理代谢; 抗氧化水平

第一作者: 李春, 从事贝类种质资源与遗传育种方面研究, E-mail: 3132087175@qq.com



通信作者: 牛东红, 从事贝类遗传育种与健康养殖等方面研究, E-mail: dhniu@shou.edu.cn

资助项目: 国家重点研发计划 (2019YFD0900700); 国家自然科学基金 (31472278); 省政策引导类计划 (苏北科技专项) (SZ-LYG202125)

收稿日期: 2023-05-31

修回日期: 2023-08-03

文章编号: 1000-0615(2025)06-069107-09
中图分类号: S 917.4
文献标志码: A

作者声明本文无利益冲突

©《水产学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)
Copyright © Editorial Office of Journal of Fisheries of China (CC BY-NC-ND 4.0)

由于干旱、潮汐、降雨和人类活动等因素, 近岸潮间带海水温度波动幅度较大, 生活在此的贝类等生物容易受到影响。在适温范围内, 温度升高, 贝类的代谢水平升高; 超出适温范围后贝类代谢则出现异常^[1], 包括影响血细胞的运输和酶活性等^[2], 短时间内可提高机体免疫力, 但随着时间延长会对细胞造成损伤^[3]。研究表明, 菲律宾蛤仔 (*Ruditapes philippinarum*)、香港牡蛎 (*Crassostrea hongkongensis*) 等在适宜的温度范围内摄食活动有所增强, 而其摄食的有机碳原主要用于生理代谢消耗能量^[4-6]。此外, 温度对虾夷扇贝 (*Patinopecten yessoensis*)、文蛤 (*Meretrix petechialis*)、马氏珠母贝 (*Pinctada fucata martensii*) 等贝类的耗氧率及排氨率影响显著, 在适温范围内耗氧率和排氨率随温度升高而升高^[7-9]。

缢蛏 (*Sinonovacula constricta*) 主要栖息于河口附近和沿海滩涂中, 海水温度波动会对其存活造成影响。当外界温度升高时, 缢蛏在呼吸排泄方面会做出适应性的调整, 耗氧率、排氨率等指标会发生一定的



变化^[10]。当高温胁迫达到一定耐受性范围或区间时, 会引起缢蛏体内抗氧化免疫反应, 其抗氧化防御系统会做出响应以降低高温对机体造成的损伤^[11]。目前高温胁迫对缢蛏在生理、氧化应激影响的研究较少, 因此, 本实验以缢蛏为研究对象, 分析了缢蛏高温胁迫条件下的存活能力、生理代谢和抗氧化水平, 旨在进一步解析缢蛏高温耐受性的生理机制以及为培育缢蛏耐高温新品系提供参考资料。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验所用缢蛏取自浙江台州市三门县苗种繁育基地, 缢蛏平均壳长 (3.37±0.24) cm。缢蛏在室内长方体塑料盆中 (48 cm×37 cm×20 cm) 暂养 7 d, 暂养时用加热棒控制温度为 24 °C, 期间定时投喂牟氏角毛藻 (*Chaetoceros muelleri*), 藻水盐度为 18, 密度为 3×10⁵~8×10⁵ 个/mL。

1.2 实验设计

实验设置 1 个对照组 (温度 24 °C) 和 2 个高温组 (温度 28 °C、32 °C), 各设 3 个平行组, 每个平行组分别放置 60 只缢蛏, 静水充气, 实验持续 72 h。实验期间每天 8:00 和 20:00 各换水 1 次, 换水量为 100%。分别在实验开始后第 6、12、24、48 和 72 小时, 采用室内静水法测定缢蛏的耗氧率和排氨率。通过实时控温的加热棒进行温度调节。盐度使用精密数字盐度仪 (MASTER-α, ATAGO) 测定。盐水用专用的生化海水结晶 (浙江省盐业集团台州市盐业配送有限公司) 配制。

1.3 样品采集

实验开始后分别在第 0、6、12、24、48、72 小时取样, 每个平行组在各时间点随机取 6 只缢蛏, 取其鳃和肝胰腺组织。采集的样本首先放入液氮中, 再转至 -80 °C 冻存待用。本研究获得了上海海洋大学水产与生命学院实验动物管理和使用伦理委员会批准, 实验过程中操作人员严格遵守上海海洋大学水产与生命学院伦理规范, 并按照上海海洋大学水产与生命学院伦理委员会制定的规章制度执行。

1.4 测定指标及计算公式

超氧化物歧化酶 (SOD) 活性和丙二醛

(MDA) 含量均采用北京索莱宝科技有限公司所生产的试剂盒测定。

采用电子天平 (精确度 0.001 g) 称量体重。存活率为各时间点缢蛏存活个数与前一时间点采样后的存活个数的比值。存活率 (survival rate, R_S)、耗氧率 (oxygen consumption rate, R_O)、排氨率 (ammonia excretion rate, R_N) 和氧氮比 (oxygen nitrogen ratio, $R_{O:N}$) 的计算公式:

$$R_S (\%) = N_S / N_T \times 100\%$$

$$R_O [\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})] = [(\text{DO}_0 - \text{DO}_t) \times V] / (W \times t)$$

$$R_N [\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})] = [(N_t - N_0) \times V] / (W \times t)$$

$$R_{O:N} = (R_O/16) / (R_N/14)$$

式中, N_S 代表各时间点存活个数; N_T 代表前一时间点采样后的存活个数; DO_0 代表实验开始时空白组水中含氧量 (mg/L); DO_t 代表实验结束时实验组水中含氧量 (mg/L); N_0 和 N_t 分别代表实验开始时对照组水中含氮量 (mg/L) 和实验结束时实验组水中含氮量 (mg/L); V 为呼吸瓶中水的体积 (L); W 为缢蛏软体部干重 (g); t 为实验持续时间 (h)。

1.5 统计分析

实验数据用平均值±标准差 (mean±SD) 表示, 利用 SPSS22.0 统计软件进行独立样本 T 检验, 比较检测数据差异的显著性, 以 $P < 0.05$ 为差异显著。

2 结果

2.1 高温对缢蛏存活率的影响

利用单因素方差分析高温对缢蛏存活率的影响, 结果显示, 实验期间高温组比相同时间点对照组的死亡率高, 24 °C 组 (对照组) 缢蛏存活率始终大于高温组, 32 °C 组存活率最小 (表 1)。24 h 后存活率出现明显分化, 24 °C 组存活率为 95.6%, 显著高于 28 °C 组 (86.7%) 和 32 °C 组 (76.7%) ($P < 0.05$), 且 28 °C 组显著高于 32 °C 组 ($P < 0.05$)。72 h 胁迫期内, 32 °C 组缢蛏出现较高的致死率 (80.0%)。胁迫后期, 不同温度组间的存活差异逐渐增大, 温度越高, 存活率的下降越显著 ($P < 0.05$)。

2.2 高温对缢蛏耗氧率和排氨率的影响

在高温胁迫后, 两个高温组之间以及与对照组 (24 °C 组) 之间耗氧率具有显著差异

表 1 缢蛏在不同温度下各时间段的存活率

Tab. 1 Survival rate of *S. constricta* at different temperatures %

时间/h time	24 °C	28 °C	32 °C
0	100.0±0.00	100.0±0.00	100.0±0.00
6	100.0±0.00	100.0±0.00	98.9±1.56
12	98.9±1.56	97.8±1.56	96.7±0.00
24	95.6±1.60	86.7±2.74*	76.7±2.74*
48	92.2±1.56	68.9±1.56*	50.0±2.69*
72	85.6±1.60	27.8±4.15*	20.0±2.69*

注：“*”表示相同时间点不同温度组间存活率存在显著差异 ($P<0.05$)。

Notes: “*” indicates significant differences in survival rate between different temperature groups at the same time point ($P<0.05$).

($P<0.05$)。24 °C 组在 24 h 时耗氧率达到最高；28 °C 组在 12 h 时耗氧率达到最高；32 °C 组在 48 h 时耗氧率达到最高 (图 1-a)。

各时间点两个高温处理组之间及其与对照组 (24 °C 组) 之间排氮率具显著差异 ($P<0.05$)。3 个温度组的排氮率均在 48 h 达到最低 (图 1-b)。

各时间点两个高温处理组之间以及与对照组 (24 °C 组) 之间氧氮比均有显著差异 ($P<0.05$)。3 个温度组的氧氮比均在 48 h 达到最高 (图 1-c)。

2.3 高温对缢蛏抗氧化水平的影响

经 72 h 高温胁迫，缢蛏肝胰腺 SOD 活性随着胁迫时间呈现升高的趋势，28 和 32 °C 组 SOD 活性均在第 24 小时达最高，随后逐渐下降；鳃组织 SOD 活性时间呈升高趋势，28 和 32 °C 组分别在第 48 和 72 小时 SOD 活性到达

最高值 (图 2-b)。肝胰腺和鳃组织 SOD 活性高温处理组 (28 和 32 °C 组) 均显著升高，且趋势一致，肝胰腺较鳃组织反应更迅速。

肝胰腺 MDA 含量随时间呈升高的趋势，28 和 32 °C 组 MDA 含量均在第 24 小时达最高值，随后逐渐降低 (图 2-c)；鳃组织 MDA 含量随时间呈升高趋势，28 和 32 °C 组均在第 6 小时 MDA 含量到达最高值，随后逐渐降低 (图 2-d)。经 72 h 高温胁迫，缢蛏肝胰腺和鳃组织 MDA 含量高温处理组 (28 和 32 °C 组) 均会显著升高，其趋势大致一致，鳃比肝胰腺组织反应更迅速。

3 讨论

贝类养殖中，温度是影响生存的重要因素之一，与贝类生长存活、生理状态以及种类的遗传性均有一定关联^[12]。贝类通常随外界环境变化做出生理补偿性反应，存活率、耗氧率、排氮率以及抗氧化酶活性与温度呈明显相关性^[13]。本实验通过缢蛏在不同温度下的存活率、呼吸代谢和抗氧化酶活性的变化，发现缢蛏具有一定的高温耐受性，这对缢蛏在高温环境下的生存、耐高温品系的选育具有一定参考价值。

3.1 高温对缢蛏存活率的影响

在贝类养殖中，温度是影响海水贝类存活的重要因子之一^[14]。华贵栉孔扇贝 (*Chlamys nobilis*) 存活的最适温度范围为 15~30 °C，其幼贝比成贝更加耐受温度变化的影响^[15]。文蛤稚贝在 24~27 °C 范围内最适宜生长，在 17.0~33.5 °C

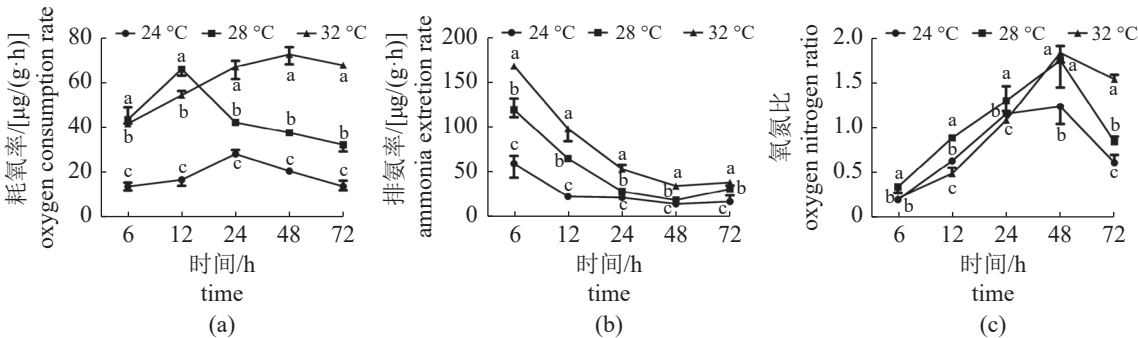


图 1 不同温度对缢蛏耗氧率 (a)、排氮率 (b) 和氧氮比 (c) 的影响

不同字母表示相同时间点不同温度组之间存在显著差异 ($P<0.05$)，下同。

Fig. 1 Effects of temperature on oxygen consumption rate (a), ammonia excretion rate (b) and oxygen nitrogen ratio (c) of *S. constricta*

Different letters at the same time point indicate significant differences among different temperature groups ($P<0.05$), the same below.

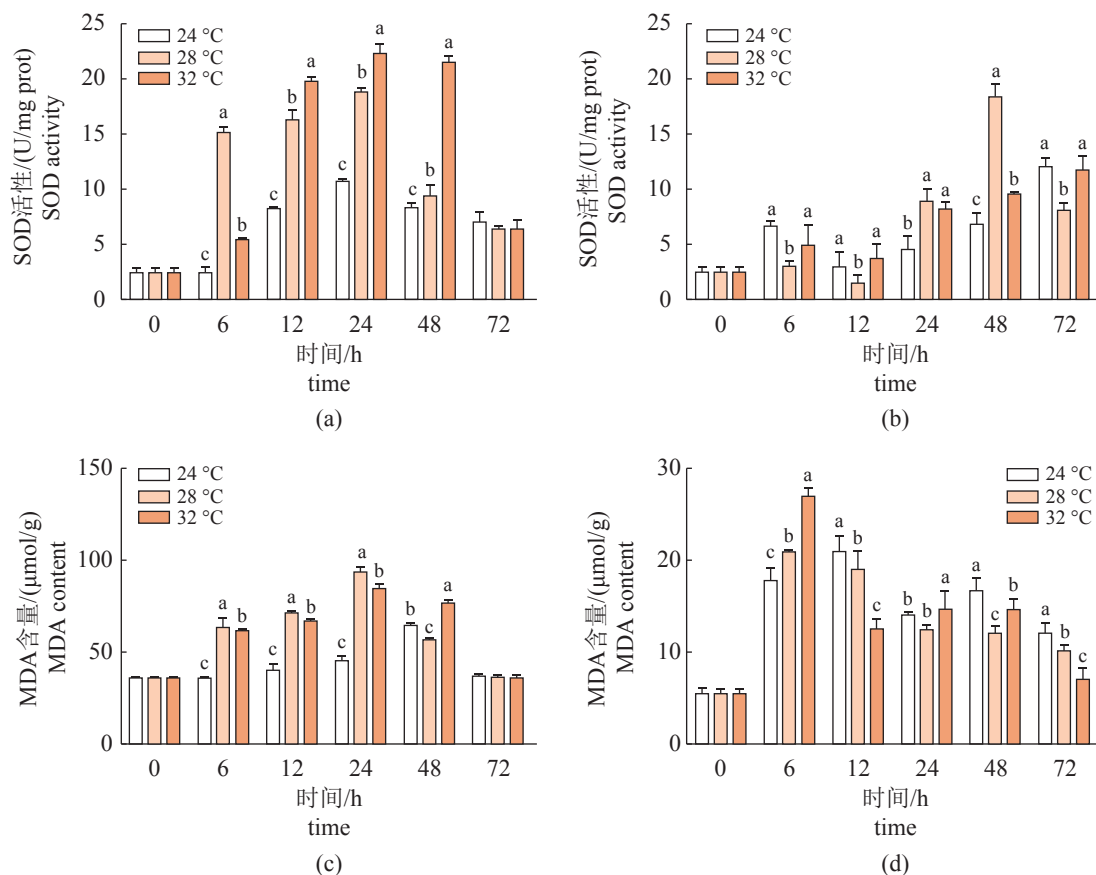


图2 不同温度对缢蛏肝胰腺和鳃组织 SOD 活性、MDA 含量的影响

(a) 肝胰腺 SOD 活性; (b) 鳃组织 SOD 活性; (c) 肝胰腺 MDA 含量; (d) 鳃组织 MDA 含量。

Fig. 2 Effects of temperature on SOD activity and MDA content in hepatopancreas and gill tissues of *S. constricta*

(a) the SOD activity in hepatopancreas; (b) the SOD activity in gill; (c) the MDA content in hepatopancreas; (d) the MDA content in gill.

范围内仍能保持较好的生长状态, 在 36.1 °C 下仍能在 20 d 内保持 50 % 的存活率^[16]。本研究发现, 缢蛏在 32 °C 高温胁迫 24 h 后具有高达 76.7 % 的存活率, 72 h 后仍具有 20 % 的存活率, 说明缢蛏具备一定的高温耐受性。研究发现, 潮间带生活的海洋贝类温度耐受性一般都比潮下带的更强, 因为潮间带海水温度波动幅度比潮下带大^[17-19]。据此推断缢蛏在长期的环境适应中可能形成了一定的温度耐受能力, 但是这种耐受能力相对有限, 容易受到潮间带气候变化的影响^[20-21]。也有研究表明, 适当的温度驯化方式可以提高贝类在高温环境下的存活率。本研究中, 胁迫实验后期高温组 (28、32 °C 组) 与对照组 (24 °C 组) 缢蛏存活率数据差异显著, 缢蛏在 32 °C 下死亡速率最快且该温度下缢蛏的耐受性显著降低, 说明缢蛏对高温的耐受具有一定的极限。

3.2 高温对缢蛏耗氧率、排氨率和氧氮比的影响

贝类是变温动物, 生活水域温度的提高会使它们产生应激反应, 此时则会通过调节自身新陈代谢水平来适应或抵抗外界高温环境的刺激^[7,9]。研究表明, 高温对贝类的耗氧、排氨等生理机能造成一定的影响^[22-25]。耗氧率是与水生生物呼吸代谢相关的一项重要指标, 水温升高会加快机体消耗氧气的速率, 提高机体的代谢水平, 相应的耗氧率也随之升高^[26]。研究表明, 虾夷扇贝随着温度的升高耗氧率升高, 但环境温度超过其温度耐受上限后, 耗氧率又会下降^[7]。在文蛤中同样发现, 温度升高其耗氧率随之增大^[8]。但温度升高若超出了贝类的耐受范围, 代谢也同样会受到抑制^[27]。本实验中, 温度升高缢蛏耗氧率随之升高, 在一定时间内

其代谢水平升高。排氨率作为水生生物生理代谢相关的一项指标^[28], 可以用来判断贝类受外界环境因子影响的程度以及机体代谢水平的变化^[29-30]。马氏珠母贝在 13~28 °C, 排氨率随着温度的升高而升高^[9]。本研究中相同胁迫时间下, 与对照组相比, 温度升高排氨率整体水平也升高, 随着时间增加, 排氨率显著下降, 缢蛏代谢强度下降, 能量消耗减少。综上表明, 急性高温胁迫下, 缢蛏可通过调节自身代谢抵抗外界环境温度刺激。温度与耗氧率和排氨率呈正相关, 缢蛏代谢水平增加, 对能量的消耗也增加。

3.3 高温对缢蛏抗氧化水平的影响

大量研究表明, 高温对贝类的抗氧化酶活性以及抗氧化防御体系具有重要的影响^[31-35]。高温可能会导致机体自由基代谢紊乱^[36-37], 机体产生大量活性氧 (ROS), ROS 大量累计进而对机体造成氧化损伤^[38-39]。SOD 可以将超氧化物通过催化反应转化成过氧化氢 (CAT), 从而达到清除自由基的目的, 因此 SOD 在机体的氧化应激调节中发挥重要作用^[40-41]; MDA 作为过氧化终产物之一, 其含量的高低反映了细胞膜脂质过氧化反应 (LP) 的程度, 同时反映了细胞膜受到自由基攻击损伤的程度^[42-44]; 二者的变化可以用来判断机体在胁迫环境下的抗氧化能力。

研究表明, 虾夷扇贝、栉孔扇贝 (*C. farrieri*)、皱纹盘鲍 (*Haliotis discus hannai*) 在温度升高后, 肝胰腺 SOD 活性和 MDA 含量都呈现升高的趋势^[1,10,13]。本研究发现, 28 和 32 °C 高温组的 SOD 活性和 MDA 含量与 24 °C 对照组相比显著升高, 且各组随胁迫时间的延长, 二者均呈现升高的趋势, 说明高温会造成缢蛏的氧化应激反应。方佳琪等^[39]认为, 缢蛏不同组织中 SOD 活性和 MDA 含量均随胁迫温度的升高而升高, 但在同一胁迫温度下, 肝胰腺中的 MDA 积累相对较少。本研究中, 高温组缢蛏肝胰腺 SOD 活性达最高值明显早于鳃组织, 且上调程度更明显, MDA 含量达最高值时间晚于鳃组织, 但上调幅度更明显, 说明高温可能首先刺激缢蛏的鳃组织, 再对肝胰腺造成更剧烈的氧化损伤。江天棋等^[10]认为, SOD、CAT 等抗氧化酶在机体应对温度胁迫的过程中有着不同

的作用, 可以保持自身抗氧化水平的平衡、减轻机体的氧化损伤; 当高温胁迫超过缢蛏的耐受范围达到某个临界点时, 机体会产生不可逆的氧化损伤, 会对缢蛏的生理活动造成影响。

综上所述, 急性高温胁迫下缢蛏生理代谢活动加剧, 但仍具有一定的存活率和抗氧化能力, 表现出一定的高温耐受性, 表明缢蛏在高温条件下具备一定的选育潜力, 为进一步培育缢蛏耐高温新品系提供了参考资料。

参考文献 (References):

- [1] 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.
Jiang W W, Fang J G, Li J Q, et al. Effects of temperature change on physiological and biochemical activities of *Haliotis discus hannai* Ino[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2017, 24(2): 220-230 (in Chinese).
- [2] Matozzo V, Chinellato A, Munari M, et al. First evidence of immunomodulation in bivalves under seawater acidification and increased temperature[J]. PLoS One, 2012, 7(3): e33820.
- [3] 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.
Si H, Song Z M, Tang X M, et al. Effect of temperature and salinity on development of embryo, larvae and juveniles of calm *Paphia undulata*[J]. Fisheries Science, 2018, 37(2): 255-258 (in Chinese).
- [4] 廖文崇, 朱长波, 张汉华, 等. 水温对香港巨牡蛎摄食和代谢的影响 [J]. 广东农业科学, 2011, 38(1): 7-11.
Liao W C, Zhu C B, Zhang H H, et al. Effect of water temperature on the feeding and metabolic physiology of *Crassostrea hongkongensis*[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2011, 38(1): 7-11 (in Chinese).
- [5] 陈丽梅, 任一平, 徐宾铎. 环境因子对胶州湾移植底播菲律宾蛤仔滤水率的影响 [J]. 南方水产, 2007, 3(2): 30-35.
Chen L M, Ren Y P, Xu B D. Effects of environmental factors on the clearance rate of the transplant enhanced Manila clam (*Ruditapes philippinarum*) in the Jiaozhou Bay[J]. South China Fisheries Science, 2007, 3(2): 30-35 (in Chinese).
- [6] 何苗, 周凯, 么宗利, 等. 饵料浓度、温度对缢蛏能量代谢的影响 [J]. 海洋学报, 2017, 39(8): 129-135.
He M, Zhou K, Yao Z L, et al. Effects of algae concentration and temperature on energy metabolism of *sinonovacula constricta*[J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(8): 129-135 (in Chinese).
- [7] 郝振林, 丁君, 贲月, 等. 高温对虾夷扇贝存活率、耗氧率和

- 排氨率的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2013, 28(2): 138-142.
- Hao Z L, Ding J, Ben Y. Effect of high temperature on survival, oxygen consumption and ammonia-N excretion in Yesso scallop *Mizuhopecten yessoensis*[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2013, 28(2): 138-142 (in Chinese).
- [8] 王盛青, 尤宏争, 邵蓬, 等. 温度和盐度对文蛤耗氧率、排氨率、滤食率的影响[J]. 经济动物学报, 2016, 20(2): 69-73,77.
- Wang S Q, You H Z, Shao P, *et al.* Effect of temperature and salinity on oxygen consumption rate, ammonia excretion rates and ingestion rate of *Meretrix meretrix*[J]. Journal of Economic Animal, 2016, 20(2): 69-73,77 (in Chinese).
- [9] 栗志民, 刘志刚, 谢丽, 等. 体重和温度对马氏珠母贝耗氧率和排氨率的影响[J]. 广东海洋大学学报, 2009, 29(6): 23-27.
- Li Z M, Liu Z G, Xie L, *et al.* Effects of body weight and temperature on oxygen consumption rate and ammonia excretion rate of *Pinctada martensii* (Dunker)[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2009, 29(6): 23-27 (in Chinese).
- [10] 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.
- Jiang T Q, Zhang Y, Jiang Y Z, *et al.* Effects of heat stress on feeding, metabolism and related enzyme activities of *Mytilus coruscus*[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(9): 3048-3056 (in Chinese).
- [11] 郝爽, 张敏, 方佳琪. 缢蛏在急性温度胁迫下的氧化应激响应及生理代谢变化[J]. 上海海洋大学学报, 2021, 30(2): 214-221.
- Hao S, Zhang M, Fang J Q. Study on oxidative stress response and physiological metabolism of *Sinonovacula constricta* under acute temperature stress[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2021, 30(2): 214-221 (in Chinese).
- [12] 张柯馨, 曹楚畑, 刘志刚, 等. 钝缢锦蛤 (*Tapes dorsatus*) 稚贝的温度和盐度耐受性研究[J]. 海洋学报, 2022, 44(4): 57-64.
- Zhang K X, Cao C T, Liu Z G, *et al.* Study on temperature and salinity tolerance of *Tapes dorsatus* juveniles[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(4): 57-64 (in Chinese).
- [13] 郝振林, 唐雪娇, 丁君, 等. 不同高温水平对虾夷扇贝存活率、耗氧率和体腔液免疫酶活性的影响[J]. 生态学杂志, 2014, 33(6): 1580-1586.
- Hao Z L, Tang X J, Ding J, *et al.* Survival rate, oxygen consumption rate and immune enzymatic activity of *Mizuhopecten yessoensis* at high temperature[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(6): 1580-1586 (in Chinese).
- [14] 李炼星, 杜文俊, 王成东, 等. 缢蛏家系生长和耐热、耐高温性能的对比研究[J]. 上海海洋大学学报, 2016, 25(4): 515-521.
- Li L X, Du W J, Wang C D, *et al.* Comparative analysis of growth and heat tolerance, salt tolerance traits among *Sinonovacula constricta* families[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2016, 25(4): 515-521 (in Chinese).
- [15] 刘志刚, 刘建勇, 杨博. 温度与盐度对华贵栉孔扇贝幼贝存活与生长的互作效应研究[J]. 海洋科学, 2011, 35(10): 75-80.
- Liu Z G, Liu J Y, Yang B. Interactions of temperature and salinity to the survival and growth of *Chlamys nobilis* (Reeve)[J]. Marine Sciences, 2011, 35(10): 75-80 (in Chinese).
- [16] 曹伏君, 刘志刚, 罗正杰. 海水盐度、温度对文蛤稚贝生长及存活的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(10): 2545-2550.
- Cao F J, Liu Z G, Luo Z J. Effects of sea water temperature and salinity on the growth and survival of juvenile *Meretrix meretrix* Linnaeus[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(10): 2545-2550 (in Chinese).
- [17] Hawkins S J, Sugden H E, Mieszkowska N, *et al.* Consequences of climate-driven biodiversity changes for ecosystem functioning of North European rocky shores[J]. Marine Ecology Progress Series, 2009, 396: 245-259.
- [18] Helmuth B, Harley C D G, Halpin P M, *et al.* Climate change and latitudinal patterns of intertidal thermal stress[J]. Science, 2002, 298(5595): 1015-1017.
- [19] Lima F P, Gomes F, Seabra R, *et al.* Loss of thermal refugia near equatorial range limits[J]. Global Change Biology, 2016, 22(1): 254-263.
- [20] Stillman J H, Somero G N. A comparative analysis of the upper thermal tolerance limits of eastern Pacific porcelain crabs, genus *Petrolisthes*: influences of latitude, vertical zonation, acclimation, and phylogeny[J]. Physiological and Biochemical Zoology, 2000, 73(2): 200-208.
- [21] Somero G N. The physiology of climate change: how potentials for acclimatization and genetic adaptation will determine 'winners' and 'losers'[J]. Journal of Experimental Biology, 2010, 213(6): 912-920.
- [22] 卢王梯, 司圆圆, 陈兴汉, 等. 温度对近江牡蛎稚贝耗氧和排氨的影响[J]. 江西水产科技, 2020(6): 9-12.
- Lu W T, Si Y Y, Chen X H, *et al.* Effects of temperature on oxygen consumption and ammonia excretion of oyster larvae[J]. Jiangxi Fishery Sciences and Technology, 2020(6): 9-12 (in Chinese).

- [23] 袁有宪, 曲克明, 陈聚法, 等. 栉孔扇贝对环境变化适应性研究-温度对存活、呼吸、摄食及消化的影响 [J]. 中国水产科学, 2000, 7(3): 24-27.
- Yuan Y X, Qu K M, Chen J F, *et al.* Adaptability of *Chlamys farreri* to environment-effects of temperature on survival, respiration, ingestion and digestion[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2000, 7(3): 24-27 (in Chinese).
- [24] 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.
- Nie H T, Huo Z M, Hou X L, *et al.* Comparison study on the effect of temperature and salinity on oxygen consumption and ammonia excretion in zebra strain and wild *Ruditapes philippinarum*[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2017, 41(1): 121-126 (in Chinese).
- [25] 金春华. 温度和盐度对青蛤耗氧率和排氨率的影响 [J]. 丽水学院学报, 2005, 27(2): 46-51.
- Jin C H. Effects of temperature and salinity on oxygen consumption rate and ammonia excretion rate of *Cyclina sinensis*[J]. Journal of Lishui University, 2005, 27(2): 46-51 (in Chinese).
- [26] Vial M V, Simpfendorfer R W, López D A, *et al.* Metabolic responses of the intertidal mussel *Perumytilus purpuratus* (Lamarck) in emersion and immersion[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1992, 159(2): 191-201.
- [27] 焦海峰, 严巧娜, 郑丹, 等. 温度和盐度对埋栖性双壳类泥蚶 (*Tegillarca granosa*) 呼吸、排泄的影响 [J]. 海洋与湖沼, 2015, 46(6): 1333-1338.
- Jiao H F, Yan Q N, Zheng D, *et al.* Effects of temperature and salinity on oxygen consumption and ammonia excretion of muddy shellfish *Tegillarca granosa*[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2015, 46(6): 1333-1338 (in Chinese).
- [28] 刘勇, 施坤涛, 张少华, 等. 双壳贝类呼吸代谢的研究进展 [J]. 南方水产, 2007, 3(4): 65-69.
- Liu Y, Shi K T, Zhang S H, *et al.* Advancement of respiratory metabolism study in bivalve molluscs[J]. South China Fisheries Science, 2007, 3(4): 65-69 (in Chinese).
- [29] Silvia G J, Antonio U R A, Francisco V O, *et al.* Ammonia efflux rates and free amino acid levels in *Litopenaeus vannamei* postlarvae during sudden salinity changes[J]. Aquaculture, 2004, 233(1-4): 573-581.
- [30] Widdows J. Physiological indices of stress in *Mytilus edulis*[J]. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 1978, 58(1): 125-142.
- [31] 陈炼, 邬婷, 陈炳, 等. 温度对福寿螺抗氧化酶活性和丙二醛含量的影响 [J]. 动物学杂志, 2019, 54(5): 727-735.
- Chen L, Wu T, Chen Y, *et al.* Effects of temperature stress on antioxidant activity and malondialdehyde in *Pomacea canaliculata*[J]. Chinese Journal of Zoology, 2019, 54(5): 727-735 (in Chinese).
- [32] 陈丽梅, 刘利华, 胡宏辉, 等. 温度突变对毛蚶不同组织抗氧化酶活性的影响 [J]. 水产科学, 2019, 38(4): 435-442.
- Chen L M, Liu L H, Hu H H, *et al.* Effect of sudden temperature change on antioxidant enzyme activity in different organs of ark shell *Scapharca subcrenata*[J]. Fisheries Science, 2019, 38(4): 435-442 (in Chinese).
- [33] 薛素燕, 王金叶, 李加琦, 等. 温度对魁蚶能量代谢及抗氧化酶活性的影响 [J]. 水产学报, 2019, 43(3): 573-583.
- Xue S Y, Wang J Y, Li J Q, *et al.* Effects of temperature on energy metabolism and antioxidant enzyme activities of *Scapharca broughtonii*[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(3): 573-583 (in Chinese).
- [34] 曹善茂, 王潇, 刘钢, 等. 温度胁迫对岩扇贝幼贝抗氧化酶活力的影响 [J]. 大连海洋大学学报, 2018, 33(2): 223-227.
- Cao S M, Wang X, Liu G, *et al.* Effects of water temperature on antioxidant enzyme activity of juvenile rock scallop *Crassadoma gigantea*[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2018, 33(2): 223-227 (in Chinese).
- [35] 陈祎宁, 李彩娟, 王国成, 等. 热胁迫对白梭吻鲷组织结构和抗氧化指标的影响 [J]. 水生态学杂志, 2019, 40(4): 115-120.
- Chen Y N, Li C J, Wang G C, *et al.* Effect of heat stress on the histopathological features and antioxidant enzyme activity in the gills of *Sander lucioperca*[J]. Journal of Hydroecology, 2019, 40(4): 115-120 (in Chinese).
- [36] Park H, Ahn I Y, Kim H, *et al.* Analysis of ESTs and expression of two peroxiredoxins in the thermally stressed Antarctic bivalve *Laternula elliptica*[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2008, 25(5): 550-559.
- [37] An M I, Choi C Y. Activity of antioxidant enzymes and physiological responses in ark shell, *Scapharca broughtonii*, exposed to thermal and osmotic stress: effects on hemolymph and biochemical parameters[J]. Comparative Biochemistry and Physiology-Part B: Biochemistry and Molecular Biology, 2010, 155(1): 34-42.
- [38] Lushchak V I, Bagnyukova T V. Temperature increase results

- in oxidative stress in goldfish tissues. 1. Indices of oxidative stress[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part C: Toxicology & Pharmacology*, 2006, 143(1): 30-35.
- [39] 方佳琪, 张敏, 郑凯, 等. 急性温度胁迫对缢蛏不同组织脂质过氧化及抗氧化生理响应的影响 [J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(2): 226-233.
- Fang J Q, Zhang M, Zheng K, *et al.* Effects of acute temperature stress on lipid peroxidation and antioxidant physiological responses of different tissues of razor clam *Sinonovacula constricta*[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(2): 226-233 (in Chinese).
- [40] Anju A, Jeswin J, Thomas P C, *et al.* Molecular cloning, characterization and expression analysis of cytoplasmic Cu/Zn-superoxid dismutase (SOD) from pearl oyster *Pinctada fucata*[J]. *Fish & shellfish immunology*, 2013, 34(3): 946-950.
- [41] Meng L X, Li Q, Xu C X, *et al.* Hybridization improved stress resistance in the Pacific oyster: evidence from physiological and immune responses[J]. *Aquaculture*, 2021, 545: 737227.
- [42] Dimitrova M S, Tishinova V, Velcheva V. Combined effect of zinc and lead on the hepatic superoxide dismutase-catalase system in carp (*Cyprinus carpio*)[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part C: Pharmacology, Toxicology and Endocrinology*, 1994, 108(1): 43-46.
- [43] 李大鹏, 刘松岩, 谢从新, 等. 水温对中华鲟血清活性氧含量及抗氧化防御系统的影响 [J]. *水生生物学报*, 2008, 32(3): 327-332.
- Li D P, Liu S Y, Xie C X, *et al.* Effects of water temperature on serum content of reactive oxygen species and antioxidant defense system in Chinese sturgeon, *Acipenser sinensis*[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2008, 32(3): 327-332 (in Chinese).
- [44] 亢玉静, 郎明远, 赵文. 水生生物体内抗氧化酶及其影响因素研究进展 [J]. *微生物学杂志*, 2013, 33(3): 75-80.
- Kang Y J, Lang M Y, Zhao W. Advance in antioxidant enzymes and its effect factors in aquatic organisms[J]. *Journal of Microbiology*, 2013, 33(3): 75-80 (in Chinese).

Effects of high temperature on the physiological metabolism and antioxidant levels of *Sinonovacula constricta*

LI Chun¹, LIU Qi², CHEN Yukuan¹, YUAN Li¹, NIU Donghong^{1*}

1. Shanghai Aquatic Animal Breeding and Green Breeding Cooperative Innovation Center,
Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Sanmen County Aquatic Technology Promotion Station, Taizhou 317100, China

Abstract: Due to factors such as drought, tides, rainfall and human activities, the temperature of seawater in the nearshore intertidal zone fluctuates greatly, and the organisms such as shellfish living there are susceptible. Therefore, in order to explore the effect of high temperature stress on shellfish, the razor clam (*Sinonovacula constricta*) was used as the model organism in this study. The control group (24 °C) and the high temperature groups (28 °C, 32 °C) with a stress time of 72 hours were set up to start the comparative experiments. The survival rate, oxygen consumption rate and ammonia excretion rate of the *S. constricta* were sampled at 0, 6, 12, 24, 48 and 72 h, respectively. The activity of superoxide dismutase (SOD) and the content of malondialdehyde (MDA) in the hepatopancreas and gill of them were determined at the same time. The results showed that the survival rate of *S. constricta* at 28 and 32 °C were 27.80%±4.15% and 20.00%±2.69%, respectively, which were significantly lower than that at 24 °C 85.60%±1.60%. With the increase of temperature, the oxygen consumption rate and ammonia excretion rate of *S. constricta* also increased, and reached the maximum value at 32 °C. SOD activity and MDA content in the hepatopancreas and gill tissues increased with the increase of temperature, and showed a trend of first increasing and then decreasing with the extension of time. The results demonstrated that under acute high temperature stress, the physiological metabolic activities of *S. constricta* intensified, but still maintained a certain survival rate and antioxidant capacity. The study can provide a data reference for the cultivation of new strains of *S. constricta* with high temperature resistance.

Key words: *Sinonovacula constricta*; high temperature; survival rate; physiological metabolism; antioxidant level

Corresponding author: NIU Donghong. E-mail: dhniu@shou.edu.cn.

Funding projects: National Key Research and Development Program of China (2019YFD0900700); National Natural Science Foundation of China (31472278); Provincial Policy Guidance Type Program (North Jiangsu Science and Technology Special Project) (SZ-LYG202125)