

高温对虾夷扇贝体腔液免疫酶活力的影响

贲 月, 郝振林, 丁 君, 常亚青*

(大连海洋大学农业部北方海水增殖重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘要: 在实验室内检测了虾夷扇贝对高温突变的耐受能力及在不同高温水平下的存活与相关免疫酶活力。实验分两个阶段: 实验 I, 15 °C 暂养的虾夷扇贝分别被驯化到 20、22、24 及 26 °C, 检测虾夷扇贝的存活及相关免疫指标。结果表明, 15 ~ 22 °C 处理组虾夷扇贝存活率均大于 85.21%, 且组间无显著差异 ($P > 0.05$), 26 °C 处理组存活率最低, 为 26.33%。随温度升高, 虾夷扇贝体腔液中 T-AOC 和 MDA 含量变化显著 ($P < 0.05$), SOD 活力差异不显著 ($P > 0.05$), CAT 活力随温度升高呈先下降后上升趋势。实验 II, 15 °C 暂养的虾夷扇贝分别被放到 20、22、24 及 26 °C, 并在 1、2、4、8、12、24、48 和 96 h 时检测其存活和相关免疫指标。结果显示, 经 96 h 胁迫, 15 ~ 24 °C 处理组间虾夷扇贝的存活率无显著差异 ($P > 0.05$), 且均大于 82.29%, 但 26 °C 处理组虾夷扇贝在经 12 h 胁迫后, 其存活率降为 0。2 龄虾夷扇贝在 8、12、24、48 和 96 h 半致死温度 (LT_{50}) 分别为 27.52、24.41、24.37、24.24 和 23.81 °C。

关键词: 虾夷扇贝; 高温胁迫; 过氧化氢酶; 超氧化物歧化酶; 总抗氧化能力; 丙二醛

中图分类号: S 917.4

文献标志码: A

虾夷扇贝 (*Mizuhopecten yessoensis* Jay) 为大型冷水性双壳贝类, 主要分布于俄罗斯、日本以及朝鲜北部海域^[1], 并于 20 世纪 80 年代初由日本青森县引入我国, 现已在辽宁、山东等地进行规模化养殖, 是我国北方沿海地区重要的养殖经济贝类之一^[2]。近年来, 虾夷扇贝出现了大规模死亡现象, 特别在夏季, 死亡率明显增加, 给经营者带来巨大的经济损失^[3-5], 而海洋生物的生长、繁殖及免疫能力等都与海水温度密切相关^[6-7], 所以有学者认为, 虾夷扇贝死亡率的增加可能与夏季海水温度过高有关^[8], 但目前对虾夷扇贝的研究主要集中在遗传结构的分析和杂交育种的选择方面^[9], 而关于高温对虾夷扇贝影响的研究鲜见报道。

贝类是一种体温调节能力极弱的变温动物, 其体温主要依赖于周围环境温度, 所以环境温度的变化会对贝类机体的生理状况产生影响, 进而影响其整个机体的抗氧化酶活力。当水温超出贝

类的适温范围时, 其体内就会产生大量的活性氧自由基, 进而生成丙二醛 (malondialdehyde, MDA), 对机体造成损伤^[10]。过氧化氢酶 (catalase, CAT) 和超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 是生物体内抗氧化反应机制的重要成员, 具有清除和平衡细胞内活性氧自由基的作用, 是检测贝类免疫防御能力的重要指标^[11-12]。总抗氧化能力 (total antioxidant capacity, T-AOC) 是生物体对外来刺激的应激能力, 是衡量机体抗氧化系统功能状态的综合性指标^[13]。因此, 检测和分析生物体内 CAT、SOD、T-AOC 与 MDA 含量的变化可以较为准确地反映出生物体的氧化应激能力^[14-15]。

本研究拟通过检测虾夷扇贝在高温下的耐受能力及在不同高温水平下的存活率与相关免疫酶活力的变化规律, 筛选出与温度密切相关的指标, 以期对耐高温型虾夷扇贝新品系的培育及健康养殖提供技术参考。

收稿日期: 2012-08-22 修回日期: 2013-03-22

资助项目: 国家海洋公益行业科研专项 (201205031); 国家“九四八”项目 (2011-G12); 国家“八六三”高新技术研究发展计划 (2012AA10A410); 辽宁省教育厅项目 (L2011118); 浙江海洋学院“海洋渔业科学与技术”省重中之重学科资助 (20110202)

通信作者: 常亚青, E-mail: yqchang@dlou.edu.cn

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验材料取自大连獐子岛渔业集团底播养殖 2 龄虾夷扇贝,壳长(94.87 ± 5.23) mm,壳高(95.65 ± 6.28) mm,湿重(106.53 ± 2.07) g,软体部干重为(4.34 ± 0.56) g。潮湿状态下运送到大连海洋大学农业部北方海水增养殖重点实验室,暂养于可控温独立循环品字形水槽内(大连汇新海洋科技发展有限公司制造)。暂养温度为(15 ± 1) $^{\circ}\text{C}$,海水盐度为 30 左右,每天定时定量向水槽内投喂螺旋藻粉和鼠尾藻粉,并每 2 天全量换水 1 次。暂养 7 d 后,挑选活力较强的健康个体进行实验。

1.2 实验仪器与试剂

DC-1006 型低温恒温槽,D-78564 型台式冷冻离心机,酶标仪,计时器。用一次性 1 mL 注射器抽取虾夷扇贝闭壳肌内的血窦血液,注入冰浴的 2 mL 离心管中,4 $^{\circ}\text{C}$ 下 4 500 r/min 离心 10 min 后,取上清液保存于 -80 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱中备用。实验用 CAT 试剂盒、SOD 试剂盒、T-AOC 试剂盒及 MDA 试剂盒等均购自南京建成生物工程研究所。

1.3 实验方法

缓慢升温实验 设 15(对照组)、20、22、24 和 26 $^{\circ}\text{C}$ 5 个温度梯度,每个温度梯度设 3 个平行,每个平行放 10 只虾夷扇贝。将在 15 $^{\circ}\text{C}$ 暂养的虾夷扇贝分别驯化到 20、22、24 及 26 $^{\circ}\text{C}$ (升温幅度为 1 $^{\circ}\text{C}/\text{d}$),达到相应实验温度后暂养 14 d,待其适应环境后,分别抽取各处理组虾夷扇贝闭壳肌内的血窦血液进行各项免疫指标的测定。每天记录虾夷扇贝死亡数量。

高温胁迫实验 将在 15 $^{\circ}\text{C}$ 暂养的虾夷扇贝分别放入 20、22、24 和 26 $^{\circ}\text{C}$ 4 个温度梯度的水槽中,每个温度梯度设置 3 个平行,每个平行内放 12 只虾夷扇贝,并在 1、2、4、8、12、24、48 和 96 h 时,分别抽取虾夷扇贝闭壳肌内的血窦血液进行各项免疫指标的测定。每天记录虾夷扇贝死亡数量。

1.4 数据处理

所有实验数据用 Excel 2003 和 SPSS 16.0 进行处理。

2 结果

2.1 存活率

26 $^{\circ}\text{C}$ 处理组存活率最低,为 26.33%,15 $^{\circ}\text{C}$ 处理组存活率最高,为 100% (图 1)。另外,15~

22 $^{\circ}\text{C}$ 处理组存活率均大于 85.21%,且组间无显著差异($P > 0.05$)。拟合存活率与温度之间的关系式为 $S = -0.0543T^2 + 0.1397T + 0.908$ ($R^2 = 0.9868$)。

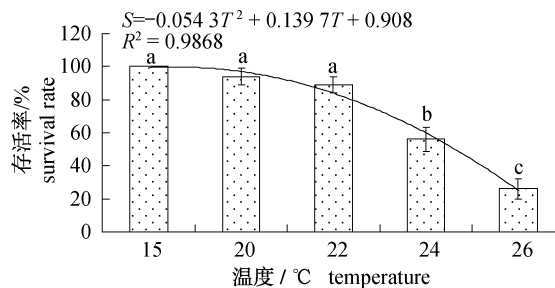


图 1 温度缓变与虾夷扇贝存活率之间的关系

数轴上的不同字母表示差异显著($P < 0.05$),相同字母表示差异不显著($P > 0.05$),下同。

Fig. 1 The changes in survival rate of *M. yessoensis* exposed to different slow temperature changes

The different letters in the axes mean significant differences ($P < 0.05$), the same ones mean no significant differences ($P > 0.05$), the same as following.

经 96 h 胁迫,15~24 $^{\circ}\text{C}$ 各处理组间的虾夷扇贝存活率无显著差异($P > 0.05$),存活率均大于 84.43%,但 26 $^{\circ}\text{C}$ 处理组虾夷扇贝在不同胁迫时间下的存活率却存在显著差异(图 2)。经 4 h 胁迫,其存活率为 88.50%,经 8 h 胁迫,存活率为 63.45%,12 h 胁迫后,存活率为 0($P < 0.05$)。虾夷扇贝在 8、12、24、48 和 96 h 半致死温度(LT₅₀)分别为 26.94、25.43、24.32、24.07 和 23.76 $^{\circ}\text{C}$ 。

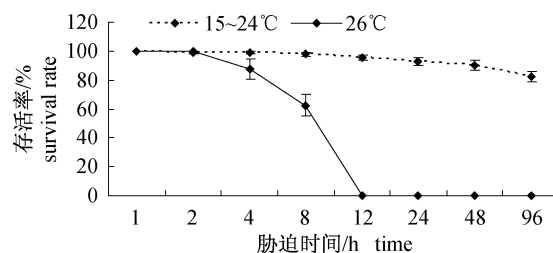


图 2 温度突变与虾夷扇贝存活率之间的关系

Fig. 2 The changes in survival rate of *M. yessoensis* exposed to different abrupt temperature changes

2.2 过氧化氢酶(CAT)

24 $^{\circ}\text{C}$ 时虾夷扇贝 CAT 活力最低,为 0.76 U/mgHb,26 $^{\circ}\text{C}$ 最高,为 1.99 U/mgHb(图 3)。15~22 $^{\circ}\text{C}$ 时,各处理组间 CAT 活力差异不显著($P > 0.05$)。

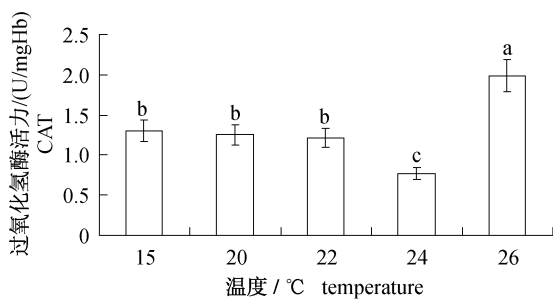


图3 不同温度处理下虾夷扇贝的CAT活力

Fig. 3 The CAT of *M. yessoensis* in different temperature groups

胁迫8 h后,各处理组CAT活力达到最高,其中,24 °C和26 °C处理组与对照组差异极显著($P < 0.01$),且24 °C处理组在胁迫48 h后CAT活力又有上升趋势(图4)。此外,在胁迫12和24 h时,各处理组与对照组相比,CAT活力差异均不显著($P > 0.05$)。

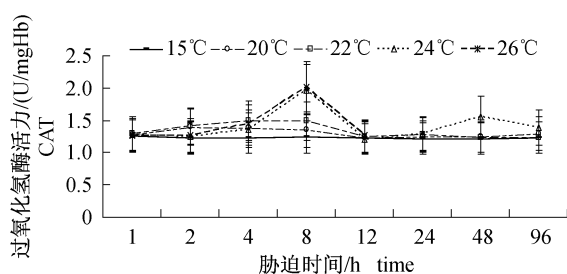


图4 高温胁迫下虾夷扇贝CAT活力的变化

Fig. 4 The changes of CAT in *M. yessoensis* under high temperature stress

2.3 超氧化物歧化酶(SOD)

15 ~ 26 °C各温度处理组间SOD活力差异不显著($P > 0.05$),各处理组的SOD活力在30 ~ 40 U/mL之间波动(图5)。

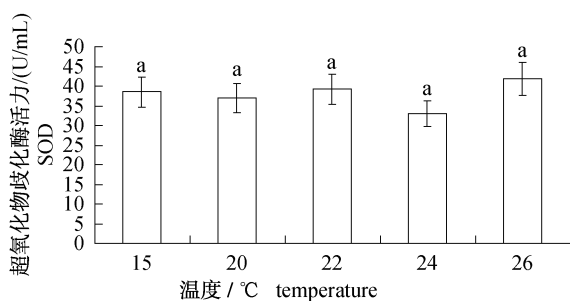


图5 不同温度处理下虾夷扇贝的SOD活力

Fig. 5 The SOD of *M. yessoensis* in different temperature groups

各温度处理组SOD活力与对照组间相比,差异不显著($P > 0.05$)(图6)。其中,20 °C处理组SOD活力在胁迫48和96 h时最高,22 °C处理组在胁迫8 h时达到最高。24 °C处理组和26 °C处理组分别在胁迫24和12 h时SOD活力最低。

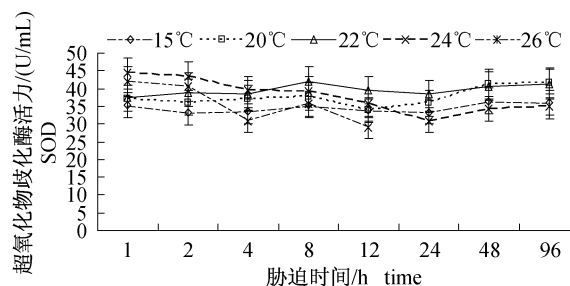


图6 高温胁迫下虾夷扇贝SOD活力变化

Fig. 6 The changes of SOD in *M. yessoensis* under high temperature stress

2.4 总抗氧化能力(T-AOC)

15 °C处理组T-AOC最高,为0.58 U/mL。随温度升高,T-AOC下降,20 ~ 24 °C各处理组间T-AOC差异不显著($P > 0.05$),26 °C时,T-AOC又上升,达到0.48 U/mL(图7)。

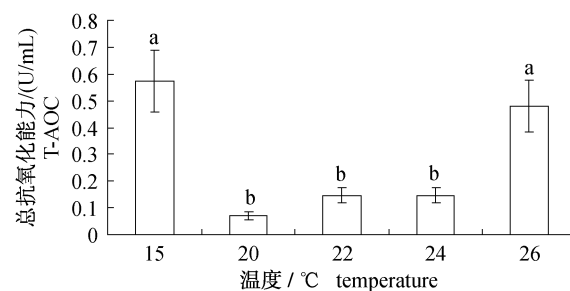


图7 不同温度处理下虾夷扇贝的T-AOC水平

Fig. 7 The T-AOC of *M. yessoensis* in different temperature groups

胁迫8 h后,22 ~ 26 °C处理组虾夷扇贝T-AOC达到最高,与对照组差异显著($P < 0.05$)。胁迫12 h后,20 °C处理组虾夷扇贝T-AOC开始下降,但在胁迫48 h后又有上升趋势,最终在胁迫96 h时达到最高值(图8)。另外,在胁迫2,4 h时,各处理组与对照组T-AOC差异不显著($P > 0.05$)。

2.5 丙二醛(MDA)

15 ~ 24 °C各处理组MDA含量较低,且差异不显著($P > 0.05$)。26 °C处理组MDA含量最高,为74.89 nmol/mg prot(图9)。

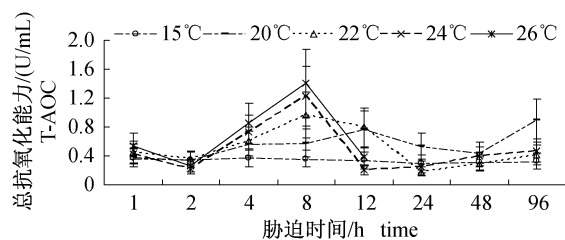


图 8 高温胁迫下虾夷扇贝 T-AOC 的变化

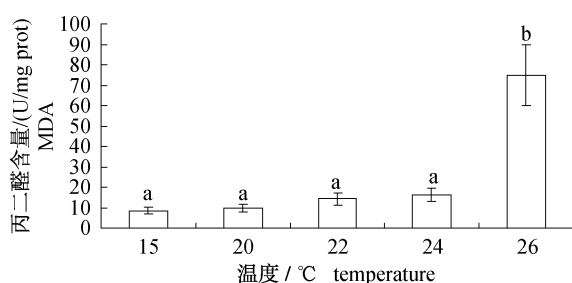
Fig. 8 The changes of T-AOC in *M. yessoensis* under high temperature stress

图 9 不同温度处理下虾夷扇贝的 MDA 含量

Fig. 9 The MDA of *M. yessoensis* in different temperature groups

经 96 h 胁迫,各处理组 MDA 含量与对照组相比变化不显著 ($P > 0.05$)。其中,22 °C 处理组在胁迫 8 h 时,MDA 含量达到最高,26 °C 处理组在胁迫 12 h 时达到最高,24 °C 处理组在 96 时 MDA 含量升高(图 10)。

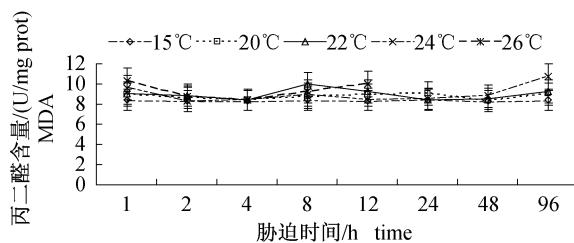


图 10 高温胁迫下虾夷扇贝 MDA 的含量变化

Fig. 10 The changes of MDA in *M. yessoensis* under high temperature stress

3 讨论

3.1 存活

早期文献记载,15 °C 为虾夷扇贝最适生长温度,而 23 °C 为其耐温上限,超过 23 °C 时虾夷扇贝基本处于不摄食状态直至死亡^[16]。本研究发现,缓慢升温实验中,24 °C 与 26 °C 处理组虾夷扇贝的存活率最低,分别为 54.43% 和 26.33%,其余

处理组存活率均大于 85%。高温胁迫实验中,从 15 °C 突变至 20 °C、22 °C 和 24 °C 时,经 96 h 胁迫后虾夷扇贝存活率均大于 84.43%,但从 15 °C 突变至 26 °C 时死亡数量显著增加。参照生物毒性实验方法计算可知,96 h 虾夷扇贝的半致死温度为 23.76 °C,与早期文献报道的基本一致。徐东等^[8]对壳长 56.3 mm、湿重 21.994 g、软体部干重 0.935 g 的虾夷扇贝进行实验时发现,温度达到 25 °C 时,虾夷扇贝未出现死亡现象,但摄食率非常低。分析认为,本研究结果与徐东等^[8]的研究结果存在差异可能与实验材料规格不同有关。本实验所用虾夷扇贝壳长 (94.87 ± 5.23) mm,壳高 (95.65 ± 6.28) mm,湿重 (106.53 ± 2.07) g,软体部干重为 (4.34 ± 0.56) g,个体较大。此外,袁有宪等^[17]通过实验也发现,个体小的栉孔扇贝 (*Chlamys farreri*) 比个体大更耐高温。关于极限高温下,虾夷扇贝的规格对其存活率的影响有待于进一步研究。

3.2 免疫指标

温度是影响水生动物生理活动最重要的环境因素之一,因此温度变化能直接影响生物体的免疫防御能力^[18]。在本缓慢升温实验中,虾夷扇贝体腔液中 CAT 和 SOD 活力变化趋势相似,均在 15 ~ 22 °C 时变化不显著,24 °C 时下降,26 °C 时又上升。这一变化趋势与徐冬冬等^[19]报道的不同高温条件下褐牙鲆 (*Paralichthys olicaceus*) 抗氧化酶活性的变化趋势相似。开始随温度升高,褐牙鲆肝脏内的 CAT 和 SOD 活力变化不显著,后随温度继续升高,CAT 和 SOD 活力呈下降趋势。但在本研究中,当温度升高至 26 °C 时,虾夷扇贝体腔液中的 CAT 和 SOD 活力回升,而褐牙鲆肝脏内的 CAT 和 SOD 活力并无回升迹象。分析认为,出现这一现象的原因可能与实验材料物种不同且免疫酶来源于组织不同有关。

MDA 为脂质过氧化产物,其含量的高低反映了机体的过氧化程度^[20]。有研究报道,一般情况下,机体内的 MDA 含量与 SOD、CAT 等抗氧化酶活力成负相关^[20],但也有学者认为生物体内的 MDA 含量并不总是与抗氧化酶活力成负相关^[21-22]。本研究发现,虾夷扇贝体腔液中的 MDA 含量在 15 ~ 24 °C 时处于较低水平,且不同温度处理组间差异不显著,但当温度升至 26 °C 时,MDA 含量显著上升。可见本研究结果与后者

相似,分析认为,这可能是由于细胞在代谢过程中发生了某种程度的改变所致,而非氧化应激的结果。

T-AOC水平的高低能够反应机体抗氧化酶系统和非酶促系统对外界刺激的应激能力^[23]。在本研究的缓慢升温实验中,虾夷扇贝体腔液中的T-AOC水平呈先下降后上升趋势。15℃时,虾夷扇贝体腔液中的T-AOC水平较高,但当温度升至20~24℃时,T-AOC显著降低。推断认为,当水温为20~24℃时,机体会为抵御活性氧自由基的生成而消耗组织或细胞中大量的酶或非酶物质,从而导致T-AOC水平降低。但当温度升至26℃时,此时已超过虾夷扇贝的适温上限,其存活率显著降低,而存活下来的个体可能会在一定程度上通过调节自身抗氧化能力来避免受到更大的氧化损伤,故26℃时,T-AOC水平又升高。

宋林生等^[24]研究发现温度骤升会严重中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)影响机体的免疫防御能力,使机体抗氧化酶活力发生显著变化,导致自由基代谢异常。在本研究的高温胁迫实验中发现,经96h胁迫,虾夷扇贝体腔液中SOD和MDA含量变化不显著,而CAT和T-AOC水平变化显著,且CAT和T-AOC水平均在胁迫8h时显著增加,之后恢复到对照组水平。推断这一变化趋势可能是由于急性温度胁迫导致机体内活性氧自由基瞬间增多,迫使虾夷扇贝体内的抗氧化酶快速响应,从而打破了机体原有的抗氧化防御机制,进而机体通过一系列变化形成新的机制来维持体内活性氧自由基的平衡^[25],所以会出现本研究中的变化趋势。

参考文献:

- [1] 常亚青. 贝类增殖学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- [2] 常亚青, 陈晓霞, 丁君, 等. 虾夷扇贝(*Patinopecten yessoensis*)5个群体的遗传多样性[J]. 生态学报, 2007, 27(3): 1145-1152.
- [3] Li H, Toubiana M, Monfort P, et al. Influence of temperature, salinity and *E. coli* tissue content on immune gene expression in mussel: Results from a 2005 - 2008 survey [J]. *Developmental and Comparative Immunology*, 2009, 33(9): 974-979.
- [4] Malham S K, Cotter E, O' Keeffe S, et al. Summer mortality of the Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, in the Irish Sea: The influence of temperature and nutrients on health and survival [J]. *Aquaculture*, 2009, 287(1-2): 128-138.
- [5] Cotter E, Malham S K, O' Keeffe S, et al. Summer mortality of the Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, in the Irish Sea: The influence of growth, biochemistry and gametogenesis [J]. *Aquaculture*, 2010, 303(1-4): 8-21.
- [6] Moullac L G, Haffner P. Environmental factors affecting immune responses in Crustaceans [J]. *Aquaculture*, 2000, 191(1-3): 121-131.
- [7] Fearman J, Moltshaniwskyj N A. Warmer temperatures reduce rates of gametogenesis in temperate mussels, *Mytilus galloprovincialis* [J]. *Aquaculture*, 2010, 305(1-4): 20-25.
- [8] 徐东, 张继红, 王文琪, 等. 温度变化对虾夷扇贝耗氧率和排氨率的影响[J]. 中国水产科学, 2010, 17(5): 1101-1106.
- [9] 于瑞海, 包振民, 王昭萍, 等. 栉孔扇贝×虾夷扇贝的杂交技术[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2006, 36(1): 85-88, 56.
- [10] 朱选, 曹俊明, 赵红霞, 等. 饲料中添加谷胱甘肽对草鱼组织中谷胱甘肽沉积和抗氧化能力的影响[J]. 中国水产科学, 2008, 15(1): 160-166.
- [11] 孙虎山, 李光友. 栉孔扇贝血淋巴中超氧化物歧化酶和过氧化氢酶活性及其性质的研究[J]. 海洋与湖沼, 2000, 31(3): 259-265.
- [12] 王好, 庄平, 章龙珍, 等. 盐度对点篮子鱼的存活、生长及抗氧化防御系统的影响[J]. 水产学报, 2011, 35(1): 66-73.
- [13] 吴伟, 聂凤琴, 瞿建宏, 等. 2,2',4,4'-四溴联苯醚对鲫鱼离体肝脏组织的氧化胁迫[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(5): 1005-1009.
- [14] Finaud J, Lac G, Filaire E. Oxidative stress: relationship with exercise and training [J]. *Sports Medicine*, 2006, 36(4): 327-358.
- [15] Aksu I, Topcu A, Camsari U M, et al. Effect of acute and chronic exercise on oxidant-antioxidant equilibrium in rat hippocampus, prefrontal cortex and striatum [J]. *Neuroscience Letters*, 2009, 452(3): 281-285.
- [16] 王如才, 王召萍, 张建忠. 海水贝类增殖学[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1993: 155-204.
- [17] 袁有宪, 陈聚法, 曲克明. 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.
- [18] Le M C, Troutaud D, Deschaux P. Different effects of temperature on specific and nonspecific immune defences in fish [J]. *Journal of Experimental*

- Biology,1998,21(2):165-168.
- [19] 徐冬冬,楼宝,詹炜,等. 高温胁迫对褐牙鲆生长及肝脏抗氧化酶活性的影响[J]. 水产学报,2010,34(7):1099-1105.
- [20] 张喆,马胜伟,王贺威,等. 十溴联苯醚(BDE-209)对菲律宾蛤仔外套膜抗氧化酶活性的影响[J]. 生态学杂志,2013,32(1):122-128.
- [21] 叶继丹,韩友文,赵吉伟,等. 唑乙醇对鲤肝胰脏抗氧化酶系统的影响[J]. 水产学报,2004,28(3):231-235.
- [22] Martinez-Alvarez R M,Hidalgo M C,Domezain A, et al. Physiological changes of sturgeon *Acipenser naccarii* caused by increasing environmental salinity[J]. The Journal of Experimental Biology,2002,205(23):3699-3706.
- [23] 胡俊茹,王安利,曹俊明. 维生素 E 和硒互作对凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)抗氧化系统的调节作用[J]. 海洋与湖沼,2010,41(1):68-74.
- [24] 宋林生,季延宾,蔡中华,等. 温度骤升对中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)几种免疫化学指标的影响[J]. 海洋与湖沼,2004,35(1):74-77.
- [25] 孙学亮,邢克智,陈成勋,等. 急性温度胁迫对半滑舌鳎血液指标的影响[J]. 水产科学,2010,29(7):387-392.

Effects of high temperature on the immuno-enzymetic activity in coelomic fluid of *Mizuhopecten yessoensis*

BEN Yue, HAO Zhenlin, DING Jun, CHANG Yaqing*

(Key Laboratory of Mariculture & Stock Enhancement in North China's Sea, Ministry of Agriculture, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

Abstract: In this study, we tested the high temperature mutation tolerance, survival and immune enzyme activity under different high temperature levels of *Mizuhopecten yessoensis*. There are two stages in our laboratory experiments. Firstly, we transferred *M. yessoensis* from the rearing temperature (15 °C, control temperature) to 20, 22, 24 and 26 °C, and then we tested the survival and related immune indicators of *M. yessoensis*. The survival of *M. yessoensis* was not affected by temperature from 15 °C to 22 °C with survival rate exceeding 85.21%, and there is no significant difference in different groups ($P > 0.05$), *M. yessoensis* exposed to 26 °C were significantly affected by temperature, with a survival rate of 26.33%. With the temperature rising, the T-AOC and MDA content in the body cavity fluid of *M. yessoensis* significantly changed ($P < 0.05$). The CAT vitality would rise after the initial drop with the rise of temperature. There were no significant differences among different groups, SOD vitality ($P > 0.05$). Secondly, we abruptly transferred scallops from the rearing temperature (15 °C, control temperature) to 20, 22, 24 and 26 °C levels, and examined related immune indexes at 1, 2, 4, 8, 12, 24, 48 and 96 h. The results showed that, the survival of *M. yessoensis* was not affected by temperature from 15 °C to 24 °C during the 96-h exposure periods with survival rate exceeding 82.29%. *M. yessoensis* exposed to 26 °C were significantly affected by temperature, with a survival rate of 0% after 12 h. The 8, 12, 24, 48 and 96 h lethal temperature for 50% (LT_{50}) were 27.52, 24.41, 24.37, 24.24 and 23.81 °C respectively.

Key words: *Mizuhopecten yessoensis*; high temperature stress; catalase (CAT); superoxide dismutase (SOD); total antioxidant capacity (T-AOC); malondialdehyde (MDA)

Corresponding author: CHANG Yaqing. E-mail: yqchang@dlou.edu.cn