

doi: 10.3969/j.issn.2095-0780.2015.04.015

## 干露胁迫对日本囊对虾抗氧化酶活性的影响

段亚飞, 董宏标, 王芸, 张真真, 李卓佳, 张家松  
(中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业部南海渔业资源开发利用重点实验室,  
农业部水产品加工重点实验室, 广东 广州 510300)

**摘要:** 研究了干露胁迫对日本囊对虾(*Marsupenaeus japonicus*)抗氧化酶活性的影响。结果显示, 与对照组相比, 4个实验组的对虾均于干露胁迫5 h后出现大量死亡, 而低温湿润组对虾成活率高于其他实验组; 随干露胁迫时间的增加, 4个实验组对虾肝胰腺中谷胱甘肽过氧化物酶(GPx)、过氧化氢酶(CAT)和超氧化物歧化酶(SOD)活性呈现先升高后降低的趋势, 但低温干燥(DG)和常温湿润(CS)组GPx活性在胁迫早期有显著降低现象( $P < 0.05$ ); 谷胱甘肽-S转移酶(GST)和过氧化物酶(POD)活性显著降低( $P < 0.05$ ); 丙二醛(MDA)含量呈现先降低后升高的趋势。结果表明, 干露胁迫显著诱导日本囊对虾氧化应激反应, GPx、CAT、SOD和MDA可作为其应答干露胁迫反应的监测指标。适量的低温湿润条件可提高对虾干法运输的成活率, 该条件下体质量约10 g的日本囊对虾在干露胁迫10 h内具有较高的成活率。

**关键词:** 日本囊对虾; 干露; 抗氧化酶; 成活

**中图分类号:** S 917.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095-0780-(2015)04-0102-07

## Effect of desiccation on antioxidant enzyme activities of kuruma shrimp (*Marsupenaeus japonicus*)

DUAN Yafei, DONG Hongbiao, WANG Yun, ZHANG Zhenzhen, LI Zhuojia, ZHANG Jiasong

(Key Lab. of South China Sea Fishery Resources Exploitation & Utilization, Ministry of Agriculture; Key Lab. of Aquatic Product Processing, Ministry of Agriculture; South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China)

**Abstract:** We investigated the effect of desiccation on antioxidant enzyme activities of kuruma shrimp (*Marsupenaeus japonicus*). The results show that many shrimps died in the four treatment groups in 5 h after desiccation, and wet and low temperature improved the survival rate of shrimps significantly. Compared with the control, the activities of glutathione peroxidase (GPx), catalase (CAT) and superoxide dismutase (SOD) in hepatopancreas of the four treatment groups increased firstly and then decreased gradually, but GPx activities in the low temperature and dry (DG) and the normal temperature and wet (CS) groups decreased significantly at the beginning of the experiment ( $P < 0.05$ ). The activities of glutathione S-transferase (GST) and peroxidase (POD) decreased significantly ( $P < 0.05$ ). The contents of malondialdehyde (MDA) decreased firstly and then increased gradually. These results indicate that the response to oxidative stress of *M. japonicus* could be induced by desiccation. GPx, CAT, SOD and MDA were all sensitive to desiccation and could be regarded as monitor indices for desiccation in *M. japonicus*. It is beneficial to keep appropriate low and wet temperature during the transportation of *M. japonicus* without water, and the shrimps of average body weight of about 10 g would have a higher survival rate under such condition after 10-hour desiccation.

**收稿日期:** 2014-12-29; **修回日期:** 2015-01-29

**资助项目:** 国家科技支撑计划项目(2011BAD13B10); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(中国水产科学研究院南海水产研究所)资助项目(2014TS15, 2012YD02); 广东省海洋渔业科技推广专项(A201101E02, A201208H01, A201201B04)

**作者简介:** 段亚飞(1989-), 男, 研究实习员, 从事虾类健康养殖技术研究。E-mail: duanxf@yeah.net

**通信作者:** 张家松(1971-), 男, 副研究员, 从事水产工程化养殖技术研究。E-mail: jiasongzhang@hotmail.com

**Key words:** *Marsupenaeus japonicus*; desiccation; antioxidant enzyme; survival

日本囊对虾(*Marsupenaeus japonicus*)俗称花虾、竹节虾等,隶属于甲壳纲、十足目、对虾科、对虾属,是暖水性经济虾类,广泛分布于中国东南沿海,是中国沿海地区重要的经济养殖虾类<sup>[1]</sup>。因具有个体大、肉质鲜美、抗病力强和适应性广等特点,其养殖面积不断扩大<sup>[2]</sup>。研究表明,日本囊对虾能够适应低溶解氧环境,且在离水后暴露于空气中仍有较高的忍受力 and 成活率,耐干性较强,易干活运销<sup>[3]</sup>。

干露是指水产动物短时间或长时间离开水而成活的一种状态<sup>[4]</sup>,而这一状态是日本囊对虾养殖和运输等过程中常见的现象。养殖过程中日本囊对虾的潜沙习性,会导致其因换水过程或池塘渗漏而受到干露胁迫。此外,日本囊对虾活体干运过程中也会遭受不同程度的干露胁迫。研究表明,干露胁迫会扰乱甲壳类的机体渗透压,降低机体代谢能力,影响其蜕皮和生长<sup>[5-6]</sup>。此外,干露胁迫还会降低甲壳类血蓝蛋白结合氧气的的能力,降低其耗氧率,从而造成低氧胁迫,损坏机体正常的免疫功能<sup>[7-9]</sup>。

对虾缺乏获得性免疫系统,主要依靠各种类型的非特异性免疫因子来识别异己,抵抗环境胁迫和各种病原感染<sup>[10]</sup>。对虾抗氧化酶系统主要包括过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)和谷胱甘肽过氧化物酶(GPx)等,在清除机体因环境胁迫产生的多余活性氧方面具有重要作用<sup>[11]</sup>。近年来,关于干露胁迫对甲壳类非特异性免疫影响的研究已见相关报道<sup>[8,12-13]</sup>。不同条件干露胁迫下,脊尾白虾(*Exopalaemon carinicauda*)HSP70和铁蛋白基因表达量显著上调,在干露胁迫中发挥抗氧化作用<sup>[14]</sup>。姜娜等<sup>[8]</sup>研究表明,随干露胁迫时间的增加,三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)肝胰腺总抗氧化能力(T-AOC)水平显著降低。然而,目前关于干露胁迫对日本囊对虾抗氧化酶活性影响的研究未见报道,而其耐干性机制研究和监测指标的筛选则尤为重要。该研究通过测定不同条件下干露胁迫对日本囊对虾抗氧化酶活性的影响,旨在探讨日本囊对虾应答干露胁迫的生理学特征,以期为日本囊对虾活体干运和耐干露机理研究提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

健康日本囊对虾取自中山衍生水产养殖有限公司,体长( $9.56 \pm 0.35$ )cm,体质量( $10.65 \pm 0.34$ )g。暂养于200 L的PVC桶中,每桶30尾,暂养1周。养殖水温25℃,盐度16,pH为8.5,持续充氧,每天换水1/3,投喂配合饲料。

### 1.2 干露胁迫实验

实验于封闭无风的实验室中进行,空调控制室温为25℃。随机挑选暂养1周的健康日本囊对虾分为5组:对照组(DZ)、低温干燥组(DG)、常温干燥组(CG)、低温湿润组(DS)和常温湿润组(CS),每组40尾,每组3个平行。常温指对虾在实验过程中始终处于25℃的环境中;低温指对虾在实验过程中始终处于5~8℃的环境中;干燥指用纱布擦拭对虾体表,使其表面无水分存在;湿润指通过及时向对虾体表喷洒海水的方式,使其表面始终有层水雾,周围湿度为70%~75%。

DZ组:对虾在暂养海水中持续充氧养殖。DG组:将对虾置于解剖盘中进行干露,解剖盘底部放置冰袋,使对虾处于低温状态。CG组:用纱布将对虾体表面水分吸干,常温条件下置于解剖盘中进行干露。DS组:将对虾置于解剖盘中,解剖盘底部放置冰袋,使对虾处于低温状态;向对虾体表面喷洒海水,使对虾始终处于湿润状态。CS组:常温条件下将对虾置于解剖盘中,向对虾体表面喷洒海水,使对虾始终处于湿润状态。

观察各组的对虾成活情况,死亡以对虾侧翻、触碰不动,置于海水中沉底为标准,计算累计成活率。各组分别于干露胁迫后第0、第0.5、第1、第3和第6小时取肝胰腺组织,用于抗氧化酶活性的测定,每个时间点取6尾。

### 1.3 样品制备

取肝胰腺组织于预冷的 $8.6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 生理盐水中进行漂洗,去除组织液,滤纸拭干,称质量后置于离心管中。按照 $m(\text{组织}, \text{g}) : V(\text{生理盐水}, \text{mL}) = 1 : 10$ 加入预冷的 $8.6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 生理盐水进行超声粉碎。将制备好的10%组织匀浆液于 $2000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心10 min,取上清液于 $-80 \text{ }^\circ\text{C}$ 保存备用,用于组织酶活性的测定。

### 1.4 酶活性的测定

GPx、谷胱甘肽-S 转移酶(GST)、CAT、过氧化氢酶(POD)和 SOD 活性以及丙二醛(MDA)和组织蛋白含量测定均采用南京建成生物研究所的试剂盒进行。

GPx 活性单位定义为每毫克蛋白质每分钟扣除非酶反应的作用,使反应体系中还原型谷胱甘肽(GSH)浓度降低  $1 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  为 1 个酶活力单位( $\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}$ ); GST 活性单位定义为在  $37\text{ }^{\circ}\text{C}$  条件下,每毫克蛋白反应 1 min 扣除非酶促反应,使反应体系中 GSH 浓度降低  $1 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  为 1 个酶活力单位( $\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}$ ); CAT 活性采用可见光法,每毫克组织蛋白每秒钟分解  $1 \mu\text{mol}$  的  $\text{H}_2\text{O}_2$  的量为 1 个酶活力单位( $\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}$ ); POD 活性单位定义为在  $37\text{ }^{\circ}\text{C}$  条件下,每毫克组织蛋白每分钟催化  $1 \mu\text{g}$  底物的酶量为 1 个酶活力单位( $\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}$ ); SOD 活性采用羟胺法,以每毫克组织蛋白在 1 mL 反应液中 SOD 抑制率达 50% 时所对应的 SOD 量为 1 个酶活力单位( $\text{U}\cdot$

$\text{mg}^{-1}$ ); MDA 摩尔质量浓度采用硫代巴比妥酸(TBA)法,其定义为每毫克组织蛋白中 MDA 的摩尔数( $\text{nmol}\cdot\text{mg}$ ); 组织蛋白的质量浓度测定采用考马斯亮蓝法。

### 1.5 数据分析

所得实验数据均以“平均值  $\pm$  标准差”表示,用 SPSS 11.0 进行方差分析(ANOVA)和多重比较(LSD 法),  $P < 0.05$  表示差异显著。

## 2 结果

### 2.1 干露胁迫对累积成活率的影响

干露胁迫下日本囊对虾的累积成活率见表 1。日本囊对虾干露胁迫第 2 小时, DG 组和 CG 组开始出现死亡现象; 而 DS 组和 CS 组对虾于第 3 小时开始死亡。干露胁迫 5 h 后各组对虾开始出现大量死亡, CG 组在干露胁迫 8 h 内全部死亡, 而 DS 组成活时间最长, 10 h 的累计成活率为 25%。DZ 组对虾则活力正常, 未出现死亡现象。

表 1 干露胁迫下日本囊对虾的累积成活率

Tab. 1 Cumulative survival of *M. japonicus* after desiccation

时间/h time	累积成活率/% cumulative survival				
	对照组(DZ) DZ group	低温干燥(DG) DG group	常温干燥(CG) CG group	低温湿润(DS) DS group	常温湿润(CS) CS group
1	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
2	100.0 <sup>a</sup>	97.5 $\pm$ 0.8 <sup>b</sup>	97.5 $\pm$ 1.1 <sup>b</sup>	100.0 <sup>a</sup>	100.0 <sup>a</sup>
3	100.0 <sup>a</sup>	92.3 $\pm$ 1.1 <sup>b</sup>	87.5 $\pm$ 0.8 <sup>c</sup>	98.5 $\pm$ 0.4 <sup>d</sup>	92.5 $\pm$ 0.7 <sup>b</sup>
4	100.0 <sup>a</sup>	87.5 $\pm$ 0.5 <sup>b</sup>	82.5 $\pm$ 0.6 <sup>c</sup>	95.0 $\pm$ 1.5 <sup>d</sup>	75.0 $\pm$ 0.9 <sup>c</sup>
5	100.0 <sup>a</sup>	75.0 $\pm$ 1.8 <sup>b</sup>	45.0 $\pm$ 1.2 <sup>c</sup>	75.0 $\pm$ 0.8 <sup>b</sup>	62.5 $\pm$ 1.0 <sup>d</sup>
6	100.0 <sup>a</sup>	52.5 $\pm$ 0.9 <sup>b</sup>	25.0 $\pm$ 1.5 <sup>c</sup>	70.0 $\pm$ 2.3 <sup>d</sup>	57.5 $\pm$ 1.3 <sup>c</sup>
8	100.0 <sup>a</sup>	42.5 $\pm$ 0.6 <sup>b</sup>	—	55.3 $\pm$ 1.9 <sup>c</sup>	37.5 $\pm$ 0.8 <sup>d</sup>
10	100.0 <sup>a</sup>	10.0 $\pm$ 1.2 <sup>b</sup>	—	25.0 $\pm$ 1.2 <sup>c</sup>	12.5 $\pm$ 2.1 <sup>b</sup>

注: 与对照组相比, 同一时间内不同字母表示组间差异显著( $P < 0.05$ ), 相同字母表示组间差异不显著( $P > 0.05$ ); 图 1 同此

Note: Compared with the control, different letters indicate significant difference ( $P < 0.05$ ), while the same letters indicate no significant difference ( $P > 0.05$ ) in the same observed period. The same case in the Figure 1.

### 2.2 干露胁迫对 GPx 活性的影响

干露胁迫对日本囊对虾肝胰腺中 GPx 活性的影响见图 1-a。与对照组相比, 干露胁迫后第 0.5 小时, DG 组和 CS 组酶活性显著下降, 随后逐渐上升并分别于第 1 和第 3 小时达到最大值, 为对照组的 1.46 倍和 1.65 倍( $P < 0.05$ ); 然后又显著下降。CG 组和 DS 组酶活性于胁迫后 0.5 h 均显著上

升并达到最大值, 分别为对照组的 1.59 倍和 1.40 倍( $P < 0.05$ ), 随后显著下降。

### 2.3 干露胁迫对 GST 活性的影响

干露胁迫对日本囊对虾肝胰腺中 GST 活性的影响见图 1-b。与对照组相比, DG 组于干露胁迫后 0.5 h 酶活性显著下降, 随后于第 3 小时逐渐上升, 并于第 6 小时达到最大值( $P < 0.05$ )。CG 组

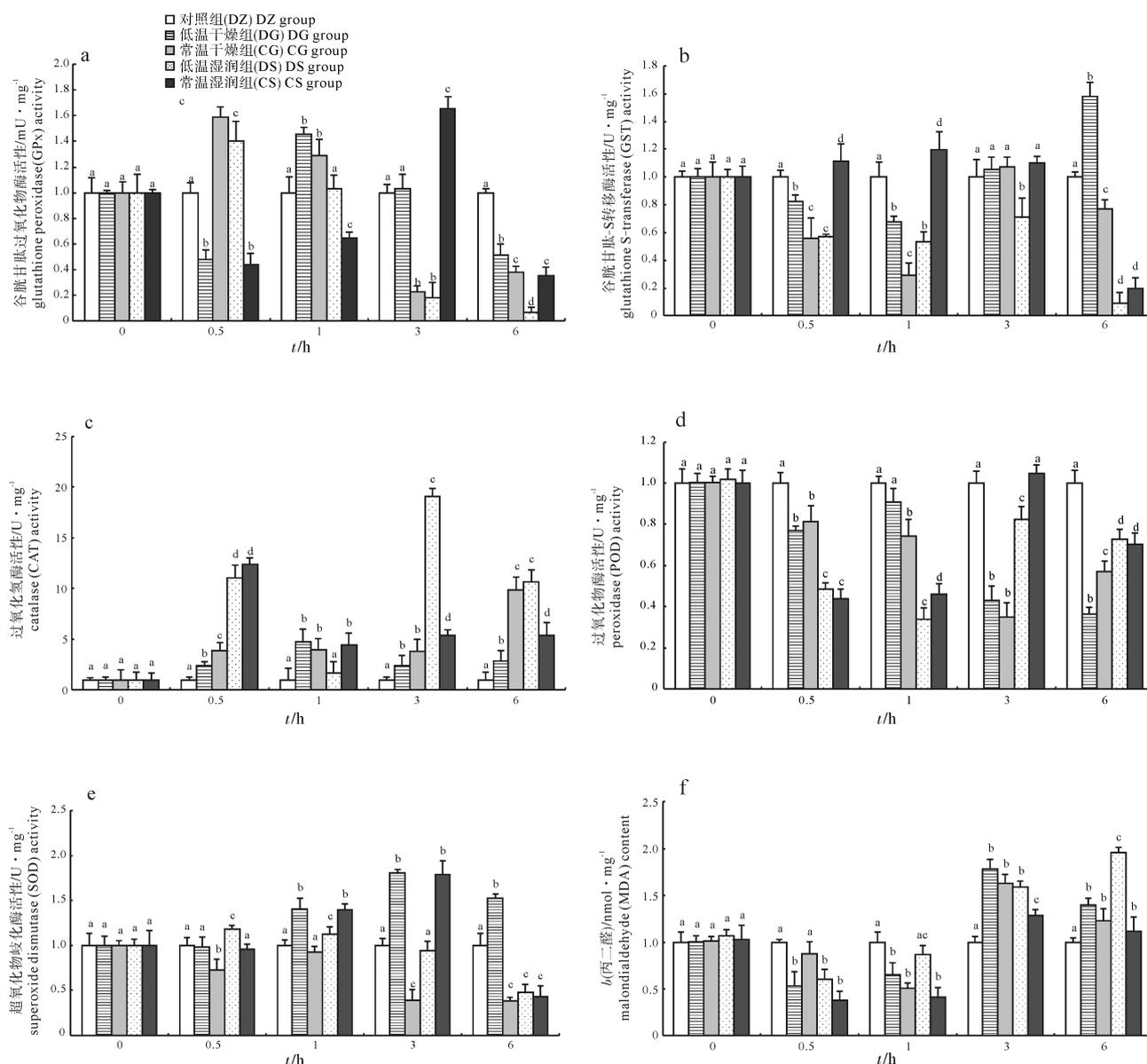


图1 干露胁迫对日本囊对虾肝胰腺谷胱甘肽过氧化物酶、谷胱甘肽-S 转移酶、过氧化氢酶、过氧化物酶和超氧化物歧化酶活性以及丙二醛含量的影响

Fig. 1 GPx, GST, CAT, POD, SOD activities and MDA content in hepatopancreas of *M. japonicus* after desiccation

酶活性于第 0.5 小时开始逐渐下降，并于第 1 小时达到最小值 ( $P < 0.05$ )；虽然第 3 小时略有上升，但差异不显著。DS 组酶活性于第 0.5 小时开始逐渐下降，并显著低于对照组 ( $P < 0.05$ )。CS 组酶活性于第 0.5 ~ 第 3 小时略有上升，但差异不显著，随后于第 6 小时显著降低。

#### 2.4 干露胁迫对 CAT 活性的影响

干露胁迫对日本囊对虾肝胰腺中 CAT 活性的影响见图 1 - c。与对照组相比，DG 组酶活性于第 0.5 小时开始上升，并于第 1 小时达到对照组的 4.75 倍；在第 3 ~ 第 6 小时酶活性略有下降，但仍

显著高于对照组 ( $P < 0.05$ )。CG 组酶活性于第 0.5 小时后逐渐上升，并于第 6 小时达到最大值，为对照组的 9.9 倍 ( $P < 0.05$ )。DS 组酶活性于第 0.5 小时显著上升，并于第 3 小时达到最大值，为对照组的 19 倍；第 1 小时的酶活性虽然有下降趋势，但差异不显著 ( $P > 0.05$ )。CS 组酶活性于第 0.5 小时显著上升，为对照组的 12.34 倍；随后呈下降趋势，但仍显著高于对照组 ( $P < 0.05$ )。

#### 2.5 干露胁迫对 POD 活性的影响

干露胁迫对日本囊对虾肝胰腺中 POD 活性的影响见图 1 - d。与对照组相比，DG 组酶活性于第

0.5 小时显著下降, 随后于第 1 小时略有上升, 但差异不显著; 第 3 ~ 第 6 小时又显著下降 ( $P < 0.05$ )。CG 组酶活性于第 0.5 小时开始显著下降, 并于第 3 小时达到最小值; 第 6 小时略有上升, 但与对照组差异不显著 ( $P > 0.05$ )。DS 组酶活性于第 0.5 ~ 第 1 小时显著下降, 随后于第 3 小时略有上升, 但仍显著低于对照组 ( $P > 0.05$ )。CS 组酶活性于第 0.5 ~ 第 1 小时显著下降, 随后逐渐上升并于第 3 小时达到最大值, 但与对照组差异不显著 ( $P > 0.05$ ); 第 6 小时又显著下降 ( $P > 0.05$ )。

## 2.6 干露胁迫对 SOD 活性的影响

干露胁迫对日本囊对虾肝胰腺中 SOD 活性的影响见图 1-e。与对照组相比, DG 组酶活性于第 1 小时开始逐渐上升, 并于第 3 小时达到对照组的 1.81 倍; 在第 6 小时略有下降, 但仍显著高于对照组 ( $P < 0.05$ )。CG 组酶活性于第 0.5 小时显著下降, 第 1 小时略有上升, 但差异不显著; 随后于第 3 ~ 第 6 小时显著下降 ( $P < 0.05$ )。DS 组酶活性于第 0.5 ~ 第 1 小时显著上升, 随后逐渐下降, 并于第 6 小时显著低于对照组 ( $P < 0.05$ )。CS 组酶活性于第 1 小时显著上升, 并于第 3 小时达到最大值, 为对照组的 1.79 倍, 随后于第 6 小时显著下降 ( $P < 0.05$ )。

## 2.7 干露胁迫对 MDA 质量摩尔浓度的影响

干露胁迫对日本囊对虾肝胰腺中  $b(\text{MDA})$  的影响见图 1-f。与对照组相比, DG 组  $b(\text{MDA})$  于第 0.5 ~ 第 1 小时显著下降, 随后于第 3 小时显著上升, 为对照组的 1.78 倍; 在第 6 小时略有下降, 但仍显著高于对照组 ( $P < 0.05$ )。CG 组  $b(\text{MDA})$  于第 1 小时显著下降, 随后逐渐上升至第 3 小时达到最大值; 第 6 小时略有下降, 但仍显著高于对照组 ( $P < 0.05$ )。DS 组  $b(\text{MDA})$  于第 0.5 小时显著下降, 随后逐渐上升并于第 6 小时达到最大值, 为对照组的 1.96 倍 ( $P < 0.05$ )。CS 组  $b(\text{MDA})$  于第 0.5 ~ 第 1 小时显著下降, 随后于第 3 小时显著上升; 在第 6 小时与对照组差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

## 3 讨论

### 3.1 干露胁迫对日本囊对虾成活率的影响

干露条件下水产动物所处的环境更为复杂多变, 多种环境胁迫因子间的联合作用引发的机体应激反应更为强烈, 对其成活会造成严重影响<sup>[8]</sup>。离水干露条件下水生动物的成活率受多种环境因素

的影响, 如温度和湿度等<sup>[15]</sup>。OMORI 等<sup>[16]</sup>研究表明, 蟹类的耐干露时间取决于其鳃部的保水能力和机体对低含水量的耐受性, 同时干露条件会造成低氧胁迫, 阻碍水生动物的呼吸机制。三疣梭子蟹幼体在 20 °C 干露条件下更易成活<sup>[4]</sup>。在 20 °C 和 24 °C 的温度下, 干露 24 h 后刺参 (*Apostichopus japonicus*) 全部死亡<sup>[17]</sup>。该研究中, 低温条件下对虾的成活率高于常温条件, 可能与水生动物耗氧量随温度的升高而增大有关, 表明适量低温有助于提高日本囊对虾在干法运输中的成活率。低温环境下, 对虾鳃丝表面的水分蒸发相对较慢, 有利于对虾成活; 而常温环境下对虾鳃丝表面水分蒸发较快, 鳃丝粘连, 因不能正常摄取氧气而加速死亡<sup>[14]</sup>。

在干露胁迫对天津厚蟹 (*Helice tientsinensis*) 水分代谢和死亡率的影响研究中发现, 其耐干露时间与环境相对湿度呈正相关<sup>[18]</sup>。低温湿润状态可明显提高虾蛄 (*Oratosquilla oratoria*) 离水干露的成活率<sup>[19]</sup>, 而相似的结果在脊尾白虾中也有所体现<sup>[14]</sup>。该研究中 DS 组对虾成活时间最长, 其次为常温 CS 组, 表明湿润环境可以提高对虾鳃丝对空气中氧气的摄取, 从而有效减缓低氧胁迫, 提高对虾耐干露能力。

### 3.2 干露胁迫对日本囊对虾抗氧化酶活性的影响

环境胁迫条件下, 动物机体会产生过量的活性氧如超氧阴离子自由基 ( $\text{O}_2^- \cdot$ )、羟自由基 ( $\cdot\text{OH}$ ) 和过氧化氢 ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) 等, 对其生理机能和免疫功能造成损害<sup>[20]</sup>。虾类在长期的进化过程中, 体内形成了一套抗氧化酶系统, 如 CAT、SOD 和 GPx 等, 用于清除体内多余的活性氧, 保护机体免受氧化损伤。肝胰腺是虾类消化和代谢中心, 其组织内抗氧化酶活性处于较高水平。因此, 该研究以日本囊对虾肝胰腺抗氧化酶活性变化作为评价指标, 以探讨干露胁迫对日本囊对虾免疫功能的影响。

SOD、CAT 和 GPx 具有清除生物体内活性氧自由基、保护细胞免受氧化损伤的作用。3 种酶之间具有协同作用, SOD 首先将生物体内的  $\text{O}_2^- \cdot$  歧化为  $\text{H}_2\text{O}_2$  和  $\text{O}_2$ , 然后 CAT 和 GPx 将  $\text{H}_2\text{O}_2$  分解为水和分子氧<sup>[21]</sup>。GPx 在细胞内广泛分布, 而 CAT 主要存在于过氧化物酶体。研究表明, 与 CAT 相比, GPx 与  $\text{H}_2\text{O}_2$  的亲和能力更强。当细胞内  $\text{H}_2\text{O}_2$  水平较低时, 有机过氧化物首选与 GPx 作用; 当  $\text{H}_2\text{O}_2$  含量较高时, 才会扩散进入过氧化物酶体与 CAT 作用<sup>[22]</sup>。田相利等<sup>[17]</sup>研究了干露胁迫对刺参

体壁非特异性免疫酶活性的影响,结果表明,SOD和CAT活性随温度的升高呈现出先上升后下降,说明干露初期机体通过提高抗氧化酶活性来清除机体产生的活性氧,但胁迫后期大量活性氧不能及时清除而反过来抑制了抗氧化酶的活性。该研究中随着干露胁迫时间的增加,SOD的酶活性基本处于下降趋势,可能是因活性氧导致细胞膜氧化性损伤,细胞活性发生改变,抗氧化系统机能异常,从而使得SOD活性下降。4个实验组的CAT酶活性均随干露胁迫时间的增加而上升,表明机体内的CAT处于清除活性氧的应激状态。DS组的CAT活性在第3小时显著高于其他实验组,表明低温可以有效降低日本囊对虾的胁迫反应。该研究结果表明,SOD和CAT在清除干露胁迫产生的氧自由基,保护细胞免受氧化损伤方面发挥了重要作用。该研究中CAT酶活性始终处于高水平状态,而GPx酶活性则相对较低,推测可能是 $H_2O_2$ 含量过高引起过氧化物酶体裂解,CAT渗出导致其表现出较高的活力,而GPx和SOD因不能及时清除 $H_2O_2$ 而导致其酶活性受到抑制。该研究结果表明,GPx、CAT和SOD对干露胁迫的反应较为敏感,可以作为其监测指标。GST是一类与肝脏解毒有关的酶,具有消除体内过氧化物和解毒的双重功能,其酶活力的大小对生物机体肝脏的早期损伤诊断具有一定的价值<sup>[20]</sup>。POD可以降解有机质在代谢过程中产生的过氧化物,防止氧自由基对细胞生物膜的破坏,其含量维持在一定水平以去除机体内产生过多的ROS,保持机体ROS平衡<sup>[23]</sup>。该研究中CG和DS组的GST和POD酶活性在整个干露胁迫进程中处于较低水平,可能是对虾在干露胁迫作用下受到了氧化胁迫所致,机体内过多的活性氧可能使日本囊对虾肝胰腺细胞受到损坏,严重抑制了GST和POD酶活性。该结果表明,GST和POD在清除干露胁迫产生的氧自由基过程中发挥的作用不明显。MDA是脂类过氧化作用的最终分解产物,可以反映机体内脂质过氧化的程度,间接地反映出细胞损伤的程度<sup>[24]</sup>。该研究中干露胁迫初期,各实验组的MDA含量出现短暂的下降趋势,表明干露胁迫对机体产生了一定的毒性作用,诱导机体肝胰腺抗氧化酶系统清除机体产生的活性氧;但在干露胁迫后期,各实验组的MDA含量急剧上升,表明机体内集聚的活性氧加剧了膜质过氧化,使膜结构和功能遭到破坏,引发代谢紊乱,导致机体抗氧化系统

受损。

综上所述,干露胁迫对日本囊对虾肝胰腺抗氧化酶活性有显著影响。日本囊对虾肝胰腺GPx、CAT、SOD和MDA对干露胁迫的反应较为敏感,可以作为免疫反应的监测指标。该研究中不同的生化指标对干露胁迫的响应表现出不同的变化趋势,可能与酶的种类和功能、环境条件改变、虾的种类及规格等因素有关,还需在分子和蛋白水平进行更为深入的研究。日本囊对虾干法运输过程中保持适量的低温湿润环境可以有效降低干露胁迫反应,该条件下体质量约10g的日本囊对虾在干露胁迫10h内具有较高的成活率;而在常温干燥状态下干露胁迫会加速对虾死亡。

#### 参考文献:

- [1] 谭树华,王桂忠,李少菁. 中国沿海日本囊对虾线粒体16S rRNA基因序列变异及遗传分化[J]. 生态学报, 2009, 29(12): 6805-6810.
- [2] 蔡晓鹏,游欣欣,曾凡荣,等. 中国沿海日本囊对虾5个地理群体间形态差异比较分析[J]. 中国水产科学, 2010, 17(3): 478-486.
- [3] 庄志猛,孔杰,石拓,等. 日本对虾野生和养殖群体遗传多样性的RAPD分析[J]. 自然科学进展, 2011, 11(3): 250-255.
- [4] 姜令绪,刘群,王仁杰,等. 三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)幼体不同干露温度下死亡率的研究[J]. 海洋与湖沼, 2012, 43(1): 127-131.
- [5] CARLSON B E, ROWE M P. Temperature and desiccation effects on the antipredator behavior of *Centruroides vittatus* (Scorpiones: Buthidae)[J]. J Arachnol, 2009, 37, 321-330.
- [6] HAUPT P, BROUWER S, BRANCH G A, et al. Effects of exposure to air on the escape behaviour and haemolymph chemistry of the South African Cape lobster, *Jasus lalandii*[J]. Fish Res, 2006, 81(2/3): 210-218.
- [7] ALLEN B J, RODGERS B, TUAN Y H, et al. Size-dependent temperature and desiccation constraints on performance capacity: implications for sexual selection in a fiddler crab[J]. J Exp Mar Biol Ecol, 2012, 438: 93-99.
- [8] 姜娜,王芳,路允良,等. 干露对三疣梭子蟹抗氧化和应激能力的影响[J]. 水产学报, 2014, 38(12): 1996-2004.
- [9] SILBIGER N, MUNGUIA P. Carapace color change in *Uca pugilator* as a response to temperature[J]. J Exp Mar Biol Ecol, 2008, 355(1): 41-46.
- [10] 段亚飞,张家松,董宏标,等. 副溶血弧菌对斑节对虾非特异性免疫酶活性的影响[J]. 水产学报, 2014, 38(9): 1557-1564.
- [11] 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.

- [12] 陈百尧, 伏光辉, 安健, 等. 干露下三疣梭子蟹家系间血淋巴免疫因子活性差异分析[J]. 上海海洋大学学报, 2013, 22(2): 194-199.
- [13] 高焕, 阎斌伦, 陈百尧, 等. 干露温度对三疣梭子蟹非特异免疫指标的影响[J]. 水产科学, 2013, 32(5): 280-283.
- [14] 王琦, 李健, 李吉涛, 等. 干露胁迫对脊尾白虾(*Exopalaemon carinicauda*) HSP70 和 ferritin 基因表达的影响[J]. 海洋与湖沼, 2013, 44(2): 409-414.
- [15] 潘英, 陈锋华, 李斌, 等. 管角螺对几种环境因子的耐受性试验[J]. 水产科学, 2008, 27(11): 567-569.
- [16] OMORI K, IRAWAN B, KIKUTANI Y. Studies on the salinity and desiccation tolerances of *Helice tridens* and *Helice japonica* (Decapoda: Grapsidae) [J]. *Hydrobiologia*, 1998, 386(1): 27-36.
- [17] 田相利, 何瑞鹏, 钱圆, 等. 干露胁迫对刺参体壁非特异性免疫的影响[J]. 河北渔业, 2014(7): 21-35.
- [18] 平洪领, 李玉全. 干露对天津厚蟹水分代谢和死亡率的影响[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(18): 4377-4380.
- [19] 张义浩, 梅文嚷, 王春琳, 等. 活虾蛄离水干露试验[J]. 浙江水产学院学报, 1996, 15(1): 43-45.
- [20] DUAN Y F, LIU P, LI J T, et al. Expression profiles of selenium dependent glutathione peroxidase and glutathione S-transferase from *Exopalaemon carinicauda* in response to *Vibrio anguillarum* and WSSV challenge [J]. *Fish Shellfish Immunol*, 2013, 35(3): 661-670.
- [21] 时少坤, 王瑞旋, 王江勇, 等. 盐度胁迫对近江牡蛎几种免疫因子的影响[J]. 南方水产科学, 2013, 9(3): 26-30.
- [22] 王芸, 李正, 李健, 等. 绿原酸对凡纳滨对虾抗氧化系统及抗低盐度胁迫的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5704-5713.
- [23] 张涛, 黄建华, 温为庚, 等. WSSV<sup>+</sup> 斑节对虾的血清免疫相关酶对人工感染 WSSV 粗提液的反应[J]. 南方水产科学, 2013, 9(1): 35-42.
- [24] 彭士明, 施兆鸿, 高权新, 等. 增加饲料中 V<sub>C</sub> 质量分数对银鲳血清溶菌酶活性及组织抗氧化能力的影响[J]. 南方水产科学, 2013, 9(4): 16-21.