

# 亚硝酸盐暴露对红耳龟与中华条颈龟幼体的慢性毒性效应

张杰<sup>1</sup>, 洪美玲<sup>1\*</sup>, 廖广桥<sup>1</sup>, 史海涛<sup>1, 2\*</sup>, 李闯<sup>1</sup>, 胡茂柜<sup>1</sup>

(1. 海南师范大学生命科学院, 海口 571158; 2. 中国科学院成都生物研究所, 成都 610041)

**摘要:** 对比研究了亚硝酸盐 4 个浓度  $\text{NaNO}_2$  (0, 100, 200, 500 mg/L) 暴露对红耳龟 (平均体重  $13.89 \text{ g} \pm 1.67 \text{ g}$ ,  $n=224$ ) 和中华条颈龟 (平均体重  $13.12 \text{ g} \pm 1.83 \text{ g}$ ,  $n=236$ ) 机体慢性毒性效应的影响。结果表明, 红耳龟各暴露组肠中亚硝酸盐含量均低于中华条颈龟, 且胁迫 20 d 时差异极显著 ( $P < 0.01$ ); 胁迫 20 d, 40 d 时红耳龟肝中亚硝酸盐含量高于中华条颈龟, 但 60 d 时却明显低于中华条颈龟。同时, 红耳龟肝肠中超氧化物歧化酶 (SOD) 活性始终高于中华条颈龟, 丙二醛 (MDA) 含量始终低于中华条颈龟; 红耳龟暴露 40 d 后肝中 SOD 活性增强, MDA 含量减少, 而中华条颈龟 SOD 活性依旧降低, MDA 含量继续增加, 这说明红耳龟比中华条颈龟具有更强的适应力和耐受力。本研究为红耳龟生态入侵机理研究提供了生理学依据, 为保护物种多样性提供了理论依据。

**关键词:** 亚硝酸盐; 红耳龟; 中华条颈龟; 慢性毒性

**中图分类号:** Q959.6; Q956 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7083(2011)02-0173-05

## Effects of Chronic Ambient Nitrite Exposure in *Trachemys scripta elegans* and *Mauremys sinensis*

ZHANG Jie<sup>1</sup>, HONG Mei-ling<sup>1\*</sup>, LIAO Guang-qiao<sup>1</sup>, SHI Hai-tao<sup>1, 2\*</sup>, LI Chuang<sup>1</sup>, HU Mao-gui<sup>1</sup>

(1. College of Life Sciences Hainan Normal University, Haikou 571158, China;

2. Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** In order to determine the effects of ambient nitrite exposure on turtles, 224 juvenile *Trachemys scripta elegans* (weight =  $13.89 \text{ g} \pm 1.67 \text{ g}$ ) and 236 juvenile *Mauremys sinensis* (weight =  $13.12 \text{ g} \pm 1.83 \text{ g}$ ) were randomly divided into four groups ( $[\text{NO}_2^-]$  0, 100, 200, 500 mg/L) to study the effects of chronic ambient nitrite exposure between the two species. The results showed that nitrite concentration in the intestine was lower in *T. s. elegans* than in *M. sinensis* and it's significantly different when exposed 20 d ( $P < 0.01$ ); nitrite concentration in the liver of *T. s. elegans* was higher at 20 d and 40 d exposure but lower at 60 d exposure. Superoxide dismutase (SOD) activity in the liver and intestine of *T. s. elegans* were higher than those in *M. sinensis*, however malonic dialdehyde (MDA) levels were lower. After being exposed for 40 d, SOD activity increased and MDA levels decreased in the liver and intestine of *T. s. elegans* with time, but for *M. sinensis*, SOD activity still decreased and MDA levels increased. Therefore, these results indicated that adaptation and the anti-stress ability in *T. s. elegans* were stronger than in *M. sinensis*.

**Key words:** nitrite; *Trachemys scripta elegans*; *Mauremys sinensis*; chronic toxicity

目前, 红耳龟 *Trachemys scripta elegans* 已在多个国家造成生物入侵危害 (Newberry 1984; Da Silva & Blasco 1995; Moll 1995)。我国几乎所有的宠物市场上都能见到有红耳龟出售 (徐婧等, 2006), 且在我国台湾地区已经造成入侵危害 (Chen 2006), 被列为世界最危险的 100 个外来入侵物种之一 (IUCN,

2001)。红耳龟竞争和耐受逆境的能力强, 严重危害土著龟的生存和繁殖, 甚至导致其灭绝 (Perez-Santigosa et al., 2008; 史海涛等, 2009)。中华条颈龟 *Mauremys sinensis* 广布于海南省且已大规模人工养殖 (龚世平等, 2005)。本研究以中华条颈龟为参照, 对比环境胁迫因子对二者的慢性毒性效应。

收稿日期: 2010-07-05 接受日期: 2010-09-12

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 30910103916); 国家大学生创新性实验计划项目 (No. 081165804)

作者简介: 张杰 (1986~), 男, 2006级本科生, 生物科学专业, 从事室内龟类养殖工作, E-mail: zhangjie9860129@126.com

\* 通讯作者 Corresponding author E-mail: haitao-sh@263.net

致谢: 海南师范大学生命科学院傅丽容老师和汪继超老师在实验中提出了宝贵意见; 刘宇翔、贺斌、廖英、吕冰、邓娇、陈义、梁茜茜和岳维维等同学在实验和论文修改中给予了大力帮助, 在此一并感谢。

在众多的环境胁迫因子中,水中氮污染尤为显著,其中亚硝酸盐使血液中的亚铁血红蛋白被氧化成高铁血红蛋白,从而抑制血液的载氧能力和影响自身免疫功能,严重时会导致个体缺氧而窒息死亡(Hilmy, 1987;周显青等, 2003;黄翔鹤等, 2006;洪美玲, 2007)。研究证实亚硝酸盐胁迫将破坏机体内活性氧代谢平衡而产生过多活性氧和氧自由基,机体处于应激状态下后加剧脂质过氧化而产生大量丙二醛(MDA),从而对机体造成活性氧损伤,而超氧化物歧化酶(SOD)可清除活性氧自由基使机体免受活性氧伤害(洪美玲, 2007)。在评价机体免疫能力的众多指标中,抗氧化酶在机体行使免疫功能时发挥着相当大的作用,可用作评价机体免疫状况的好坏,现已成为评价生物体健康状况的重要指标(Fridovich, 1995; Pedrajas et al., 1996)。因此,本研究选择SOD和MDA作为机体氧化损伤的评价指标。本文旨在对比红耳龟和中华条颈龟对慢性亚硝酸盐暴露的耐受性,探究其对龟类的毒性机理,其结果可为了

解红耳龟的生态入侵机制提供生理学依据,为保护物种多样性奠定理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料及处理

实验所用个体均购自海口市东山镇龟鳖养殖场,饲养 15天后,挑选健康活泼的红耳龟(平均体重  $13.89 \text{ g} \pm 1.67 \text{ g}$   $n=224$ )和中华条颈龟(平均体重  $13.12 \text{ g} \pm 1.83 \text{ g}$   $n=236$ )均分为 4 个大组[以  $\text{NaNO}_2$  调制为  $100 \text{ mg/L}$  ( $C_1$ )、 $200 \text{ mg/L}$  ( $C_2$ )、 $500 \text{ mg/L}$  ( $C_3$ ) 3 个梯度,对照组 ( $C_0$ )加入等体积的自来水],瓦片为隐蔽场所,每池加静置自来水 20 L。每日 0 点各投喂定量的配合饲料,8 h 后取出剩余饲料,隔天换水,换水量 100%,光照为室内自然光照。每日采用重氮偶氮比色法测量水中亚硝酸盐的含量 1~2 次,并及时向水中加入  $\text{NaNO}_2$  以达到所需浓度;每次换水后立即测量亚硝酸盐浓度并及时调整浓度(表 1)。在此条件下持续实验处理 60 d

表 1 各实验组水溶液中所测得亚硝酸盐浓度  
Table 1 Ambient nitrite concentration in the experimental groups ( $\bar{x} \pm s$ )

种龟 Species	亚硝酸盐浓度 Ambient nitrite concentration			
	$C_0$	$C_1$	$C_2$	$C_3$
红耳龟 <i>T. s. elegans</i>	$0.87 \pm 5.72$	$106.44 \pm 12.37$	$200.23 \pm 20.40$	$493.50 \pm 45.96$
中华条颈龟 <i>M. sinensis</i>	$2.37 \pm 8.29$	$116.72 \pm 56.08$	$180.23 \pm 25.29$	$481.87 \pm 20.62$

实验处理第 20 d、40 d、60 d 从两物种的 4 个大组中各随机取 15 只个体,取样前 48 h 不投喂食物。采用  $-20^\circ\text{C}$  低温冷冻麻醉 8~10 min 后,称取个体体重;冰上解剖取出肝脏、肠(除去肠中内容物),将肠与肝脏分别放入 1.5 mL 离心管中并标记贮存于  $-20^\circ\text{C}$  冰箱中。

### 1.2 指标测定

肠和肝脏匀浆液制备:取适量肠和肝脏(约 0.1 g),分别加入 1 mL 蒸馏水,冰浴匀浆,冷冻离心 15 min(控温  $4^\circ\text{C}$ 、转速 4000 rpm),取上清液备用。

SOD 活性测定采用丁秀云等(1996)的连苯三酚自氧化法,酶活单位定义:每毫克蛋白每分钟抑制连苯三酚自氧化速率达 50% 的酶量定义为 1 个酶活单位 ( $\text{Umg}^{-1} \cdot \text{pmt}^{-1}$ )。

MDA 含量的测定采用硫代巴比妥(TBA)法(Buege & Aust, 1978),结果计算:丙二醛的浓度 ( $\text{nmol/mg} \cdot \text{pmt}$ ) =  $(f/F) \times 10 / [Pr]$ 。其中:  $f$  和  $F$  分别为由样液和标准应用液测得的光密度;  $[Pr]$  为组织匀浆液中蛋白浓度。

组织匀浆液中蛋白浓度的测定参照 Bradford (1976)方法,以牛血清蛋白(BSA)为标准蛋白;组织匀浆液中亚硝酸盐含量的测定方法采用重氮偶氮比色法测量(洪美玲, 2007)。

### 1.3 数据处理

数据用 Excel 2003 和 SPSS 16.0 软件进行处理,所有实验数据均以  $\bar{x} \pm s$  表示。采用单因素方差分析(One-way ANOVA),同一采样时间点不同亚硝酸盐浓度处理组与对照组之间的比较采用 LSD 法进行;同一采样时间点相同处理的两物种间用  $t$  检验,差异显著临界值为 0.05。

## 2 结果与分析

### 2.1 慢性亚硝酸盐暴露对红耳龟与中华条颈龟肠和肝中亚硝酸盐含量的影响

不同暴露组在各取样时间点亚硝酸盐含量变化见表 2。当亚硝酸盐浓度为  $500 \text{ mg/L}$  时,实验个体肝肠中亚硝酸盐含量显著高于对照组 ( $P < 0.05$ ),且暴露浓度越高肝肠中亚硝酸盐含量越高。

随暴露时间的延长,各暴露组肠中亚硝酸盐含量均先增后减,红耳龟各暴露组均低于中华条颈龟,且胁迫 20 d时二者肠中亚硝酸盐含量差异极显著 ( $P < 0.01$ );红耳龟各暴露组肝中亚硝酸盐含量均递

减,中华条颈龟各暴露组肝中含量均先减后增,且胁迫 20 d、40 d时红耳龟肝中含量高于中华条颈龟,但 60 d时却明显低于中华条颈龟。

表 2 不同浓度亚硝酸盐胁迫下中华条颈龟和红耳龟肝、肠中亚硝酸盐含量变化 (mg/L·prot)

Table 2 Nitrite level in *M. sinensis* and *T. s. elegans* liver and intestine under different ambient nitrite concentration

亚硝酸盐浓度 Ambient nitrite concentration	亚硝酸盐含量 Nitrite level						
	中华条颈龟 <i>M. sinensis</i>			红耳龟 <i>T. s. elegans</i>			
	胁迫 20 d 20 d-stress	胁迫 40 d 40 d-stress	胁迫 60 d 60 d-stress	胁迫 20 d 20 d-stress	胁迫 40 d 40 d-stress	胁迫 60 d 60 d-stress	
肝 Liver	C <sub>3</sub>	2.52±2.41 <sup>b</sup>	1.68±1.26 <sup>b</sup>	1.81±1.39	2.76±1.45	1.96±0.99 <sup>b</sup>	1.35±0.88
	C <sub>2</sub>	1.76±1.07 <sup>ab</sup>	1.40±1.09 <sup>ab</sup>	1.69±1.57	2.80±1.35	1.55±1.15 <sup>ab</sup>	1.29±0.65
	C <sub>1</sub>	1.65±1.19 <sup>ab</sup>	0.96±0.68 <sup>a</sup>	1.11±0.89	2.58±1.39	1.25±0.67 <sup>a</sup>	1.16±0.68
	C <sub>0</sub>	1.11±0.86 <sup>a*</sup>	0.75±0.80 <sup>a</sup>	1.00±0.76	2.07±0.76	1.19±0.43 <sup>a</sup>	1.11±0.26
肠 Intestine	C <sub>3</sub>	0.61±0.40 <sup>b*</sup>	0.71±0.48 <sup>b</sup>	0.30±0.09	0.21±0.18 <sup>b</sup>	0.69±0.51 <sup>b</sup>	0.40±0.31 <sup>b</sup>
	C <sub>2</sub>	0.60±0.38 <sup>b*</sup>	0.47±0.24 <sup>a</sup>	0.29±0.63	0.15±0.17 <sup>a</sup>	0.28±0.15 <sup>a</sup>	0.26±0.43 <sup>ab</sup>
	C <sub>1</sub>	0.35±0.12 <sup>a**</sup>	0.33±0.20 <sup>a</sup>	0.18±0.12	0.07±0.06 <sup>a</sup>	0.25±0.12 <sup>a</sup>	0.25±0.20 <sup>ab</sup>
	C <sub>0</sub>	0.32±0.15 <sup>a**</sup>	0.30±0.18 <sup>a</sup>	0.11±0.08	0.02±0.09 <sup>a</sup>	0.25±0.12 <sup>a</sup>	0.16±0.11 <sup>a</sup>

注:同一指标中同列的不同字母表示差异显著 Values with different upper letters in the same column of the same indicator mean significant differences "\*\*"表示两物种在相同胁迫时间下同一指标差异显著 ( $P < 0.05$ ), "\*\*"表示两物种间差异极显著 ( $P < 0.01$ ) Asterisk mean significant difference between two species at the same exposure time ( $P < 0.05$ ), two asterisks mean extremely significant difference ( $P < 0.01$ )

表 3 不同浓度亚硝酸盐胁迫下中华条颈龟和红耳龟肝、肠中 SOD 活性 (U/mg·prot) 和 MDA 含量 (nmol/mg·prot) 变化

Table 3 SOD activity and MDA level in *M. sinensis* and *T. s. elegans* liver and intestine under different ambient nitrite concentration

亚硝酸盐浓度 Ambient nitrite concentration	超氧化物歧化酶活性 SOD activity						
	中华条颈龟 <i>M. sinensis</i>			红耳龟 <i>T. s. elegans</i>			
	胁迫 20 d 20 d-stress	胁迫 40 d 40 d-stress	胁迫 60 d 60 d-stress	胁迫 20 d 20 d-stress	胁迫 40 d 40 d-stress	胁迫 60 d 60 d-stress	
肝 Liver	C <sub>3</sub>	4.75±4.56 <sup>**</sup>	4.00±6.54 <sup>b</sup>	3.84±3.52 <sup>b</sup>	10.90±4.82	4.46±3.25	5.05±5.71 <sup>b</sup>
	C <sub>2</sub>	8.29±6.19	7.95±6.07 <sup>ab</sup>	6.49±4.00 <sup>ab</sup>	11.25±10.89	6.91±5.51	7.76±6.72 <sup>ab</sup>
	C <sub>1</sub>	8.89±8.75	8.34±5.84 <sup>ab</sup>	7.52±5.20 <sup>ab</sup>	9.52±2.61	7.91±4.92	8.36±5.32 <sup>ab</sup>
	C <sub>0</sub>	6.56±2.78 <sup>**</sup>	9.73±7.64 <sup>a</sup>	8.68±4.78 <sup>a</sup>	14.40±6.09	8.11±4.18	10.89±5.51 <sup>a</sup>
肠 Intestine	C <sub>3</sub>	2.88±2.08	2.33±1.33 <sup>b</sup>	0.27±0.85 <sup>b</sup>	3.51±2.61	2.91±7.08	0.43±7.20
	C <sub>2</sub>	3.48±3.10	2.39±0.73 <sup>b</sup>	1.31±2.72 <sup>b</sup>	3.72±2.46	3.21±7.64	1.69±5.66
	C <sub>1</sub>	4.20±2.35	2.54±1.08 <sup>b</sup>	2.06±3.59 <sup>a</sup>	4.63±3.66	3.49±5.16	2.43±3.03
	C <sub>0</sub>	4.36±3.31	4.43±3.60 <sup>a</sup>	4.10±3.35 <sup>a</sup>	4.69±4.87	4.85±5.45	4.27±5.58

  

亚硝酸盐浓度 Ambient nitrite concentration	丙二醛含量 MDA level						
	中华条颈龟 <i>M. sinensis</i>			红耳龟 <i>T. s. elegans</i>			
	胁迫 20 d 20 d-stress	胁迫 40 d 40 d-stress	胁迫 60 d 60 d-stress	胁迫 20 d 20 d-stress	胁迫 40 d 40 d-stress	胁迫 60 d 60 d-stress	
肝 Liver	C <sub>3</sub>	2.60±0.82 <sup>**</sup>	3.13±1.85 <sup>b</sup>	3.96±1.34 <sup>b**</sup>	1.38±0.51	2.29±1.38 <sup>b</sup>	1.21±0.53
	C <sub>2</sub>	2.57±1.14 <sup>**</sup>	3.05±4.08 <sup>ab</sup>	3.29±0.62 <sup>ab**</sup>	1.35±0.64	2.26±1.15 <sup>b</sup>	1.18±0.74
	C <sub>1</sub>	2.30±0.97 <sup>**</sup>	2.36±1.85 <sup>ab</sup>	3.10±0.73 <sup>a**</sup>	1.28±0.50	1.72±0.71 <sup>ab</sup>	0.96±0.33
	C <sub>0</sub>	2.16±0.68 <sup>**</sup>	2.25±1.23 <sup>a</sup>	2.81±0.56 <sup>a**</sup>	1.25±0.41	1.54±0.50 <sup>a</sup>	0.92±0.47
肠 Intestine	C <sub>3</sub>	3.48±1.56 <sup>**</sup>	3.88±2.60 <sup>*</sup>	5.47±3.04 <sup>*</sup>	2.04±0.94	2.15±0.63	3.52±1.47 <sup>b</sup>
	C <sub>2</sub>	3.14±1.27 <sup>**</sup>	3.31±2.60	5.36±2.79 <sup>*</sup>	1.99±0.32	2.09±0.52	3.50±1.12 <sup>b</sup>
	C <sub>1</sub>	3.13±0.97 <sup>**</sup>	3.25±3.22	5.36±3.18 <sup>*</sup>	1.98±0.36	2.05±0.45	3.14±0.65 <sup>b</sup>
	C <sub>0</sub>	3.05±0.41 <sup>**</sup>	3.23±3.74	5.27±3.81 <sup>*</sup>	1.97±0.40	1.98±0.62	2.61±0.51 <sup>a</sup>

同表 2

## 2.2 慢性亚硝酸盐暴露对红耳龟与中华条颈龟肝和肠中 SOD 活性和 MDA 含量的影响

由表 3 可知,同一取样时间点肝肠中 SOD 活性

均随暴露浓度增加而减弱。胁迫 20 d 后,中华条颈龟肝中 500 mg/L 暴露组显著低于对照组 ( $P < 0.05$ ),肠中 200 mg/L、500 mg/L 暴露组均显著低于

对照组 ( $P < 0.05$ ); 而红耳龟仅胁迫 60 d 时肝中 500 mg/L 暴露组显著低于对照组 ( $P < 0.05$ )。随暴露时间的延长, 中华条颈龟各暴露组肝肠中 SOD 活性均呈递减; 红耳龟各暴露组肠中 SOD 活性也呈递减, 但均高于中华条颈龟。红耳龟肝中 SOD 活性先减后增, 且胁迫 20 d 时各组 SOD 活性均高于中华条颈龟, 其中 500 mg/L 暴露组差异极显著 ( $P < 0.01$ ); 胁迫 40 d 时各组 (除 500 mg/L 外) SOD 活性均低于中华条颈龟, 而到胁迫 60 d 时各组 SOD 活性又均高于中华条颈龟。

由表 3 还可知, 各暴露组 MDA 含量均随暴露浓度增加而增加。胁迫 20 d 以后, 中华条颈龟肝中 500 mg/L 暴露组 MDA 含量显著高于对照组 ( $P < 0.05$ )。而红耳龟胁迫 40 d 时, 当暴露浓度高于 200 mg/L 时, 肝中 MDA 含量显著高于对照组 ( $P < 0.05$ ); 胁迫 60 d 时, 肠中各暴露组均显著高于对照组 ( $P < 0.05$ )。随暴露时间的延长, 中华条颈龟各暴露组肝肠中 MDA 的含量均不断累积。红耳龟各暴露组肠中含量亦不断累积; 肝中含量却先增后减, 当胁迫 60 d 时, 肝中各组含量为同一暴露组内各取样时间点的最小值。同时红耳龟肝肠中各暴露组 MDA 含量均低于中华条颈龟, 且胁迫 20 d 时肝肠和 60 d 时肝中各组含量均呈极显著差异 ( $P < 0.01$ ), 胁迫 60 d 时肠中各组 和 40 d 时肠中 500 mg/L 暴露组含量差异显著 ( $P < 0.01$ ), 其余各对应组间差异均不显著。

### 3 讨论

研究证实淡水龟类体内各组织中抗氧化酶的活性相比其他变温动物 (尤其是虾蟹等水生生物) 表现得更强, 这保证了龟类可以阻止或缓解因胁迫而迅速产生的大量活性氧对机体造成的危害 (Willmore et al., 1997), 同时龟类对于因无氧呼吸生成的乳酸而引起的中毒将采取两种途径调节: 一是通过背甲甲壳释放的钙和镁碳酸盐加以缓冲, 二是将产生的大部分乳酸储存在背甲甲壳中 (Jackson, 2004), 由此保证了龟类更强的耐受力。在本研究中红耳龟和中华条颈龟所设置的亚硝酸盐浓度相对于韩英等 (2007) 对鲤鱼 *Cyprinus carpio* 和洪美玲 (2007) 对中华绒螯蟹 *Eriocheir sinensis* 实验时要高约 50 多倍, 但其在胁迫条件下与鲤鱼和中华绒螯蟹相比, SOD 的活性相对较高和 MDA 的含量偏低, 即表现出较强的清除活性氧的能力。

红耳龟肝中 SOD 活性在前期递减, MDA 含量在前期递增, 而在实验后期 SOD 活性递增, MDA 含量递减, 这可能是红耳龟在一定时间内适应了亚硝酸盐胁迫后机体抗氧化系统得以恢复所致, 这与 Willmore 等 (1997) 对红耳龟的研究结果一致, 由此可说明红耳龟具有较强的适应力。这一结果也表明红耳龟在暴露 40 d 后其清除活性氧的能力得到提高, 而中华条颈龟清除活性氧的能力却随暴露时间推移继续降低, 两相比较即表明了红耳龟较中华条颈龟具有更强的解毒能力和适应力。

有欧洲学者对红耳龟与当地土著种欧洲池龟 *Emys orbicularis* 和地中海石龟 *Maurmys leprosa* 进行对比实验, 发现红耳龟相对于土著种表现出更强的竞争力 (Pleguezuelos 2002; Cadi & Joly, 2003, 2004)。Polo-Cavia 等 (2009) 的研究表明地中海石龟因害怕红耳龟而有意躲避, 从而避免因竞争上的劣势被红耳龟攻击。本研究中红耳龟肝中亚硝酸盐含量高于中华条颈龟, 但红耳龟肝肠中 SOD 活性高于中华条颈龟, MDA 含量仍显著低于中华条颈龟, 均表明亚硝酸盐胁迫对红耳龟机体的破坏较中华条颈龟要弱, 说明红耳龟的生存竞争力和耐受力均强于土著种中华条颈龟。究其原因可能是在亚硝酸盐胁迫下, 机体的活性氧代谢平衡被破坏, 导致体内处于缺氧甚至无氧状态 (周显青等, 2003), 但红耳龟在体内处于缺氧甚至无氧状态时可通过降低代谢率等自身固有代谢途径来调节并保证自身所需能量, 从而维持机体正常运行 (McDonagh et al., 2004), 因此红耳龟表现出较强的抗氧化力和耐受力, 这从生理学角度说明了红耳龟具有更强的耐受力和适应力。

综上所述, 红耳龟肝肠中 SOD 活性始终高于中华条颈龟, MDA 含量始终低于中华条颈龟, 且暴露 40 d 后红耳龟肝中 SOD 活性增强, MDA 含量减少, 而中华条颈龟 SOD 活性依旧降低, MDA 含量继续增加, 说明红耳龟确实具有更强的适应力和耐受力。

### 4 参考文献

- 丁秀云, 李光友, 翟玉梅, 等. 1996. 皱纹盘鲍经诱导后血淋巴中一些因子变化的研究 [J]. 海洋与湖沼, 27(4): 362~367.
- 龚世平, 符有利, 汪继超, 等. 2005. 海南淡水龟类贸易现状与管理建议 [J]. 生物多样性, 13(3): 239~247.
- 韩英, 张辉, 王琨. 2007. 亚硝态氮对鲤鱼种血液 SOD 及 GSH-Px 的影响 [J]. 淡水渔业, 37(1): 66~68.
- 洪美玲. 2007. 水中亚硝酸盐和氨氮对中华绒螯蟹幼体的毒性效应及维生素 E 的营养调节 [D]. 华东师范大学博士论文: 26~99.

- 黄翔鹤, 李长玲, 郑莲, 等. 2006. 亚硝酸盐氮对凡纳滨对虾毒性和抗病相关因子影响 [J]. 水生生物学报, 30(4): 466~471.
- 史海涛, 龚世平, 梁伟, 等. 2009. 控制外来物种红耳龟在中国野生环境蔓延的态势 [J]. 生物学通报, 44(4): 1~3.
- 徐婧, 周婷, 叶存奇, 等. 2006. 龟类外来种的入侵隐患及其防治措施 [J]. 四川动物, 25(2): 420~422.
- 周显青, 牛翠娟, 孙儒泳. 2003. 维生素 C 和酸应激对中华鳖幼鳖血清补体 C3 和 C4 含量的影响 [J]. 动物学报, 49(6): 769~774.
- Braford MM. 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein using the principle of protein-dye binding [J]. Anal Biochem, 2: 248~254.
- Buege JA, Aust SD. 1978. Microsomal lipid peroxidation [J]. Methods Enzymol 52: 302~310.
- Cadi A, Joly P. 2003. Competition for basking places between the endangered European pond turtle (*Emys orbicularis galloitalica*) and the introduced red-eared slider (*Trachemys scripta elegans*) [J]. Can J Zool 81: 1392~1398.
- Cadi A, Joly P. 2004. Impact of the introduction of the red-eared slider (*Trachemys scripta elegans*) on survival rates of the European pond turtle (*Emys orbicularis*) [J]. Biodiv Conserv 13: 2511~2518.
- Chen TH. 2006. Distribution and status of the introduced red-eared slider (*Trachemys scripta elegans*) in Taiwan [A]. In: Koike F, Clout MN, Kawamichi M, et al. Assessment and control of biological invasion risk [M]. Published by Shokadoh book Sellers Japan & the World Conservation Union (IUCN), Switzerland: 187~195.
- Fridovich I. 1995. Superoxide radical and superoxide dismutases [J]. Annu Rev Biochem Eng 64: 97~112.
- Hilny AM. 1987. Acute and chronic toxicity of nitrite to *Clarias lajea* [J]. Comp Biochem Physiol 86(2): 247~254.
- Jackson DC. 2004. Surviving extreme lactic acidosis: the role of calcium lactate formation in the anoxic turtle [J]. Respir Physiol Neurobiol 144(2-3): 173~178.
- McDonagh JC, Callister RJ, Favron ML, et al. 2004. Resistance to disuse atrophy in a turtle hindlimb muscle [J]. J Comp Physiol A, 190: 321~329.
- Moll EO. 1995. The turtle *Trachemys scripta* and the pet trade [J]. Aliens 2: 3.
- Newberry R. 1984. The American red-eared terrapin in South Africa [J]. African Wildlife 38: 186~189.
- Pedrajas JR, Peinado J, Lopez-Barea J. 1996. Oxidative stress in fish exposed to model xenobiotics: Oxidatively modified forms of Cu<sup>2+</sup> Zn-superoxide dismutase as potential biomarkers [J]. Chem Biol Interact 98: 267~282.
- Perez-Santigosa N, Diaz-Paniagua C, Hidalgo-Vila J. 2008. The reproductive ecology of exotic *Trachemys scripta elegans* in an invaded area of southern Europe [J]. Aquatic Conserv: Mar Freshw Ecosyst 18: 1302~1310.
- Pleguezuelos JM. 2002. Las especies introducidas de Anfibios y Reptiles [A]. In: Pleguezuelos JM, Marquez R, Lizana M (eds). Atlas Libro Rojo de los Anfibios y Reptiles de Espana [M]. Madrid: AHE-MMA: 501~532.
- Polo-Cavia N, Lopez P, Martin J. 2009. Interspecific differences in chemosensory responses of freshwater turtles: consequences for competition between native and invasive species [J]. Biol Invasions 11: 431~440.
- Silva DE, Blasco M. 1995. *Trachemys scripta elegans* in southwestern Spain [J]. Herpetological Review, 26: 133~134.
- Willmore WG, Storey KB. 1997. Antioxidant systems and anoxia tolerance in a freshwater turtle *Trachemys scripta elegans* [J]. Molecular and Cellular Biochemistry 170: 177~185.