

铜胁迫对铜锈环棱螺致死率、富集性、CAT 和 SOD 的影响

南旭阳, 戴灵鹏 (温州大学生命与环境科学学院, 浙江 温州 325027)

摘要: 以浙江省温州市瓯海茶山某河内的铜锈环棱螺 (*Bellamya aeruginosa*) 为研究对象, 研究了铜胁迫下铜对铜锈环棱螺的致死效应、铜锈环棱螺对铜的富集性、铜对铜锈环棱螺肝胰腺过氧化氢酶 (CAT) 和超氧化物歧化酶 (SOD) 活性的影响。结果表明, 铜锈环棱螺对较低浓度 Cu^{2+} ($1.0, 2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 具有一定的抵抗能力, 而在较高浓度 Cu^{2+} ($4.0 \sim 8.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 胁迫下, 则出现较高的死亡率。当 $\rho(\text{Cu}^{2+})$ 为 $0.2 \sim 0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 随着染毒时间的增加和染毒剂量的加大, 铜锈环棱螺对铜的富集性也在增强, 但当 $\rho(\text{Cu}^{2+})$ 为 $1.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 铜锈环棱螺对铜的富集量却随染毒时间的增加而呈下降趋势。在铜胁迫下, 铜锈环棱螺肝胰腺 CAT 和 SOD 活性受到较大影响。

关键词: 铜; 铜锈环棱螺; 富集性; CAT; SOD

中图分类号: X171.5; X958 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2011)05-0067-05

Effect of Copper Stress on Lethal Rate, Cu Enrichment, CAT and SOD Activities of *Bellamya aeruginosa*. NAN Xu-yang, DAI Ling-peng (School of Life and Environment Science, Wenzhou University, Wenzhou 325027, China)

Abstract: Effects of copper on lethal rate and Cu enrichment of *Bellamya aeruginosa* and CAT and SOD activities in the hepatopancreas of *Bellamya aeruginosa* under Cu stress were studied. *Bellamya aeruginosa* was collected from a river in Chashan of Ou Hai, Wenzhou City, Zhejiang Province. Results show that *Bellamya aeruginosa* was quite capable of tolerating low concentrations of Cu^{2+} (1.0 and $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), but showed a relatively high lethal rate when $\rho(\text{Cu}^{2+})$ was in the range from 4.0 to $8.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. When $\rho(\text{Cu}^{2+})$ was $0.2 \sim 0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, *Bellamya aeruginosa* enhanced its Cu enrichment with its exposure to the toxicant getting longer and the toxicant higher in dosage. However, when $\rho(\text{Cu}^{2+})$ reached $1.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, its Cu enrichment declined with the duration of its exposure. Cu stress significantly affected CAT and SOD activities in the hepatopancreas of *Bellamya aeruginosa*.

Key words: copper; *Bellamya aeruginosa*; accumulation; CAT; SOD

随着大量未经处理的城市垃圾、工业和生活污水等不断进入水体, 水体悬浮物和沉积物中重金属含量急剧升高, 对生态环境构成了极大的威胁。铜锈环棱螺 (*Bellamya aeruginosa*) 俗称螺蛳, 是我国最为常见的淡水底栖生物, 主要生活在水草茂盛的河流、湖泊、水库、池塘内, 是鱼类及人类的食物之一, 其极易受到水体污染的影响, 从而影响包括人类在内的其他生物的健康, 同时也是水体环境污染的重要指示生物之一。

过氧化氢酶 (CAT) 是催化过氧化氢分解成氧和水的酶, 存在于绝大多数生物细胞体内, 特别在肝脏中以高浓度存在。超氧化物歧化酶 (SOD) 是生物体内重要的抗氧化酶, 广泛分布于各种生物体内, 如动物、植物、微生物等。SOD 具有特殊的生理活性, 是生物体内清除自由基的首要物质。SOD 在生物体内的水平高低是指示衰老与死亡的直观指标。CAT 和 SOD 活性变化能在分子水平上提示不良环境因子对生物带来的伤害, 因此可作为毒物的敏感指示指标^[1]。

有关重金属对软体动物的影响, 国内外已有较多研究。马陶武等^[2-3] 研究表明在镉污染沉积物的慢性胁迫下铜锈环棱螺的壳长增长率和肾脏中金属硫蛋白 (MT) 含量均受到较大影响, 而较高铅污染水平 ($\geq 246 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) 会使铜锈环棱螺的繁殖力显著下降。熊昫青等^[4] 发现铜锈环棱螺体内 CAT 对重金属污染物的反应快速灵敏。李学鹏等^[5] 则发现泥蚶 (*Tegillarca granosa*) 体内的重金属含量能真实地反映水环境的污染状况。张少娜等^[6] 指出紫贻贝体内 As、Hg、Cd、Pb 等含量随着外部水体重金属浓度的增加而增加。有研究表明在重金属污染条件下, 大个体河蚶 (*Corbicula fluminea*) 体内 Cu 含量明显高于小个体; 不同季节河蚶对 Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、Ni 等累积量大小的总体趋势是夏季 > 春、秋季, 且对 Cu 的富集系数明显高于对 Cd 的富集系

收稿日期: 2011-05-03

基金项目: 国家自然科学基金 (30800159); 温州市科技发展计划 (S2006A012)

数^[7-9]。DUCROT 等^[10]和 CALABRESE 等^[11]研究表明 Zn 污染沉积物可以降低鱼盘螺 (*Valvata piscinalis*) 的壳长增长率,而低含量 Cd 能显著提高其生长速率。

但有关重金属铜对铜锈环棱螺各种生理指标影响的综合研究还鲜见报道。为了进一步了解重金属对淡水软体动物的危害,并进而探讨淡水软体动物在环境污染监测和评价中的作用,笔者以铜为目标毒物,以浙江省温州市瓯海茶山某河内铜锈环棱螺作为研究对象,研究铜胁迫对铜锈环棱螺体内铜的富集、CAT 和 SOD 活性的影响以及致死效应等。

1 材料与方 法

1.1 仪器与试剂

WFX-120 型原子吸收分光光度计(北京瑞利分析仪器公司);KDN-04 消化炉(上海洪纪仪器设备有限公司);752N 紫外可见分光光度计(上海精密科学仪器有限公司);TGL-16G 台式高速离心机(上海安亭科学仪器厂);pHS-3BW 微机型酸度计(上海理达仪器厂);BS210S 分析天平(北京赛多利斯天平有限公司);CAT 和 SOD 试剂盒均购自南京建成生物工程研究所;其他化学试剂均采用国产分析纯或优级纯。

1.2 试验动物

铜锈环棱螺:采自浙江省温州市瓯海茶山某河道,经物种鉴定后选鲜活、无损伤且体形和大小相似个体为试验材料,螺壳长为(20.56 ± 2.73) mm,体质量为(2.03 ± 0.52) g。

1.3 试验方法

1.3.1 预培养

染毒前先将铜锈环棱螺外表用去离子水洗干净,清除附着物,在曝气(去氯)2 d 的自来水中暂养 72 h,以便清除铜锈环棱螺体内废物。

1.3.2 致死效应试验

根据预备试验结果设置 $\rho(\text{Cu}^{2+})$ 为 1.0、2.0、4.0、6.0、8.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 5 个浓度梯度,并设 1 个空白对照。在不同浓度处理液中各放入 20 只经预培养的铜锈环棱螺进行试验。试验期间观察铜锈环棱螺的生理状况,若发现死亡个体则随时捞出。记录各组铜锈环棱螺在 24、48、72 h 内的死亡(以腹足剧烈萎缩并逐渐痉挛变僵、无针刺反应为死亡标准)数,计算死亡率,重复 3 次。

1.3.3 富集试验

在 $\rho(\text{Cu}^{2+})$ 分别为 0、0.2、0.4、0.8、1.6 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 5 个浓度梯度溶液中各放入 50 只已经标记

(用记号笔在螺外壳上画记号)好的铜锈环棱螺。分别于试验 2、4、6、8 d 时在每个浓度烧杯中随机取 3 个受试个体称量,取其肉,采用酸溶法[V(硝酸):V(双氧水) = 4:1]消解处理样品后再用 WFX-120 型火焰原子吸收仪测定溶液中铜含量^[12]。

1.3.4 CAT 与 SOD 活性测定

在分别培养 2、4、6、8 d 后,每处理组(0、0.2、0.4、0.8、1.6 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)各取 3 个铜锈环棱螺用锤子敲破螺壳,从内脏团中分离出肝胰腺,称量,立即放入液氮中保存备用。取冷冻的肝胰腺样品按 1:4 ($\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$) 比例加入 0.01 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、pH 7.4 的 Tris-HCl 缓冲液(用 0.000 1 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ EDTA-2Na、0.01 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 蔗糖和 8 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 混合而成),用玻璃匀浆器在冰浴中制成匀浆,4 $^{\circ}\text{C}$ 、10 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下离心 10 min,取适量上清液(200 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)稀释成 10 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的匀浆液置于液氮中保存,用于测定 SOD 和 CAT 活性^[13]。SOD 活性采用羟胺法测定,CAT 活性采用紫外分光光度法测定,具体操作和计算按试剂盒说明书进行。CAT 活性单位 $\mu\text{kat} \cdot \text{mg}^{-1}$ (其中 1 $\text{kat} = 1 \text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$) 表示每 1 mg 组织蛋白 1 s 内分解 1 $\mu\text{mol} \text{H}_2\text{O}_2$ 的量。SOD 活性单位定义为:每 1 mg 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 个酶活性单位,以 $\text{u} \cdot \text{mg}^{-1}$ 表示。

试验相关数据采用 SPSS 13.0 软件进行统计分析,以平均值 ± 标准差表示,先对试验数据进行正态分布检验,再分别利用单因素方差分析法(ANOVA)和多重比较检验法(LSD 与 SNK)进行组间差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 铜对铜锈环棱螺的致死效应

由表 1 可知,当 $\rho(\text{Cu}^{2+})$ 为 1.0 和 2.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,铜锈环棱螺均静栖于试验容器内,除 2.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组 72 h 时少数个体出现麻痹型“假死”状外,其余个体活动状况基本无变化。但当 $\rho(\text{Cu}^{2+})$ 为 4.0、6.0 和 8.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,绝大部分个体迅速进入麻痹型“假死”状。在试验 48 h 内,大部分个体表现为露出腹足在容器内作缓慢移动,继而在容器中央聚集或附于容器壁作逃逸状。随着染毒时间的延长,受试个体在容器内的迁移能力明显减弱,吐水现象相对较少,对外界刺激反应也变得较为迟钝。 $\rho(\text{Cu}^{2+})$ 为 4.0、6.0、8.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组均出现死亡个体,且死亡率随着染毒时间和毒物浓度的增大而逐渐增大,表现出一定的时间效应和剂量效应。

表1 铜对铜锈环棱螺的致死效应

Table 1 Effect of copper on lethal rate of *Bellamya aeruginosa*

$\rho(\text{Cu}^{2+}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	不同时间(h)内平均死亡率/%		
	24	48	72
0(对照)	0	0	0
1.0	0	0	0
2.0	0	0	0
4.0	8.33 ± 1.53	15.00 ± 2.65	21.67 ± 2.52
6.0	16.67 ± 4.04	23.33 ± 2.52	36.67 ± 3.79
8.0	26.67 ± 4.73	35.00 ± 6.24	53.33 ± 4.16

2.2 铜锈环棱螺体内铜的累积效应

2.2.1 处理时间对铜锈环棱螺体内铜累积效应的影响

由图1可知,由于铜锈环棱螺原先栖息的河水及相应的底泥中本来就存在少量铜[河水中为(0.0061 ± 0.0008) mg · L⁻¹,底泥中为(37.42 ± 2.18) mg · kg⁻¹],所以对照(0 mg · L⁻¹)组铜锈环棱螺体内也含有一定量的铜,但含量基本上维持在1.21 ~ 1.26 mg · g⁻¹之间。而 $\rho(\text{Cu}^{2+})$ 为0.2 ~ 0.8 mg · L⁻¹各处理组铜锈环棱螺体内铜含量则随处理时间的增加而出现较明显的累积效应。同时还可发现,在处理时间较短(前6 d)条件下,铜锈环棱螺体内铜含量虽然随着时间增长而增加,但增加量较小,至试验8 d时增加幅度却有较大提高。但就 $\rho(\text{Cu}^{2+})$ 为1.6 mg · L⁻¹处理组而言,除试验4 d时比2 d时铜锈环棱螺体内铜含量略有增加外,试验6、8 d时则出现随处理时间的增加铜含量逐渐减少的趋势。

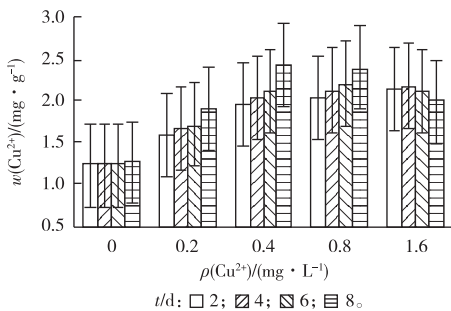


图1 不同处理时间条件下铜锈环棱螺体内铜累积效应

Fig. 1 Cu accumulation in *Bellamya aeruginosa* varying with different treating times

经方差分析(SNK法)发现,Cu²⁺浓度的F = 48.55, P < 0.001,差异极显著。经多重比较(α = 0.05)发现,相同处理时间条件下,对照组(0 mg · L⁻¹)与其他所有处理组间铜锈环棱螺体内铜含量

均差异显著, $\rho(\text{Cu}^{2+})$ 为0.2 mg · L⁻¹处理组与0.4、0.8、1.6 mg · L⁻¹处理组间差异显著,但0.4、0.8、1.6 mg · L⁻¹处理组间差异不显著。试验时间的F = 2.93, P = 0.077 > 0.05,差异不显著。

2.2.2 Cu²⁺浓度对铜锈环棱螺体内铜累积效应的影响

由图1可知,在染毒时间较短(2和4 d)时,铜锈环棱螺对铜累积量均随着处理液 $\rho(\text{Cu}^{2+})$ 的增加而呈上升趋势。但在染毒时间较长(6、8 d)时,最高浓度(1.6 mg · L⁻¹)组铜锈环棱螺对铜累积量却在下降,尤其是在试验8 d时,0.4 mg · L⁻¹处理组达到最高峰,而0.8和1.6 mg · L⁻¹处理组则依次减少,这可能是因为当铜锈环棱螺暴露在铜污染水体中较长时间时,虽然铜锈环棱螺尚未出现死亡,但较长时间的金属胁迫作用已经对铜锈环棱螺的新陈代谢以及相关生理活动产生了一定的抑制,如对细胞膜内外物质的转运速度、方向等产生影响,以至于螺体对铜的累积能力逐渐下降,甚至出现减少趋势,但总累积量依然远高于空白对照组,具体原因有待于进一步研究。

2.3 铜对铜锈环棱螺CAT活性的影响

由表2可知,除 $\rho(\text{Cu}^{2+})$ 为0.2 mg · L⁻¹处理组试验2 d时外,其他各浓度处理组在相同试验时间条件下铜锈环棱螺体内CAT活性总体上均低于空白对照组,而且随着处理时间的增长,酶活性进一步降低。试验8 d时0.2、0.4、0.8、1.6 mg · L⁻¹处理组CAT活性分别比试验前(78.15 μkat · mg⁻¹)下降12.76、47.39、53.78和57.90 μkat · mg⁻¹。而对照组CAT活性在试验2 ~ 8 d内基本不变,与对照组相比,除0.2 mg · L⁻¹处理组2和4 d时外,其他所有处理组均达差异显著(P < 0.05)或极显著水平(P < 0.01或P < 0.001),说明铜胁迫对铜锈环棱螺体内CAT活性有较显著的影响。

由表2还可知, $\rho(\text{Cu}^{2+})$ 为0.2 mg · L⁻¹处理组铜锈环棱螺体内CAT活性在处理时间较短(2 d)时,其活性比处理前(78.15 μkat · mg⁻¹)略有上升,随后则缓慢下降,但与对照组相比降幅并不是很大。而其他浓度(0.4、0.8、1.6 mg · L⁻¹)处理组则均随着处理时间的增加,铜锈环棱螺体内CAT活性呈现较为明显的依次下降趋势,且与对照组相比降幅较大,具有一定的时间效应。

2.4 铜对铜锈环棱螺SOD活性的影响

由表3可知,较低浓度Cu²⁺(0.2 mg · L⁻¹)能够在一定程度上增强SOD活性,铜胁迫2 ~ 8 d过程中,SOD活性分别比暴露前(42.38 u · mg⁻¹)增加

1.01、4.36、6.68 和 4.12 $\mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1}$, 并且当处理时间较短(2~6 d)时,具有一定的时间效应。试验 8 d 时 0.2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组 SOD 活性随时间变化呈现下降趋势,但仍然高于暴露前和对照组。其他浓度

(0.4、0.8 和 1.6 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 处理组 SOD 活性均随着浓度与时间的增加而降低,具有一定的时间效应和剂量效应。

表2 铜对铜锈环棱螺 CAT 活性的影响

Table 2 Effect of copper on CAT activity in *Bellamya aeruginosa*

$\rho(\text{Cu}^{2+})/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	不同试验时间(d)时 CAT 活性/ $(\mu\text{kat} \cdot \text{mg}^{-1})$			
	2	4	6	8
0(对照)	78.10 ± 6.22	78.12 ± 6.55	77.69 ± 7.24	78.05 ± 5.36
0.2	78.41 ± 7.46	77.54 ± 8.49	70.12 ± 6.70*	65.39 ± 7.33*
0.4	72.23 ± 5.93*	53.41 ± 6.79**	44.21 ± 5.92**	30.76 ± 4.75***
0.8	69.52 ± 5.32*	50.87 ± 5.44**	35.25 ± 7.00***	24.37 ± 4.20***
1.6	53.48 ± 6.17**	39.41 ± 6.44**	31.59 ± 5.65***	20.25 ± 3.25***

*、** 和 *** 分别表示相同试验时间条件下处理组与对照组相比 CAT 活性在 $\alpha=0.05$ 、 $\alpha=0.01$ 和 $\alpha=0.001$ 水平上差异显著。

表3 铜对铜锈环棱螺 SOD 活性的影响

Table 3 Effect of copper on SOD activity in *Bellamya aeruginosa*

$\rho(\text{Cu}^{2+})/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	不同试验时间(d)时 SOD 活性/ $(\text{u} \cdot \text{mg}^{-1})$			
	2	4	6	8
0(对照)	42.37 ± 5.26	42.25 ± 3.48	42.16 ± 3.55	42.09 ± 5.48
0.2	43.39 ± 4.22	46.74 ± 6.75	49.06 ± 5.79*	46.50 ± 7.59
0.4	40.57 ± 5.84	38.34 ± 5.67	36.50 ± 5.77*	32.58 ± 4.35*
0.8	37.52 ± 4.22*	33.24 ± 5.25*	31.89 ± 4.27**	27.63 ± 4.22**
1.6	35.38 ± 4.32*	30.56 ± 5.20**	26.63 ± 4.58**	18.73 ± 3.63***

*、** 和 *** 分别表示相同试验时间条件下处理组与对照组相比 SOD 活性在 $\alpha=0.05$ 、 $\alpha=0.01$ 和 $\alpha=0.001$ 水平上差异显著。

从统计分析结果来看,较高浓度(0.8、1.6 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 处理组 SOD 活性与对照组间差异均达显著 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$ 或 $P < 0.001$) 水平。而较低浓度(0.2、0.4 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 处理组则仅个别处理组与对照组间差异达显著水平 ($P < 0.05$)。

3 讨论

研究表明当铜锈环棱螺处于铜胁迫环境下时,在 Cu^{2+} 浓度较低时反应并不强烈,但当 $\rho(\text{Cu}^{2+})$ 超过 4.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,铜锈环棱螺会迅速出现麻痹型“假死”状,在容器中央聚集或附于容器壁作逃逸状,露出腹足在容器内作缓慢移动;随着染毒时间的延长,铜锈环棱螺在容器内的迁移能力明显减弱,吐水现象相对较少,对外界刺激反应也变得较为迟钝,直至出现腹足剧烈萎缩、壳张开等现象。上述结果可为相关水体环境的铜等重金属污染的监测提供有益参考。

试验发现,当铜锈环棱螺暴露在 Cu^{2+} 胁迫环境中的时间相同时,在较低浓度范围(0.2~0.8 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 内其对铜的富集量随着处理时间的增加而增加,并在处理时间达 8 d 时,其富集量有较大提高。而在较高浓度(1.6 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 条件下,铜锈环棱螺

对铜的富集水平却随处理时间的增加而呈下降趋势。尤其是在 $\rho(\text{Cu}^{2+})$ 为 0.4~0.8 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内,铜锈环棱螺对铜表现出较强的富集能力,这可能预示着 $\rho(\text{Cu}^{2+})$ 为 0.4~0.8 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 是铜锈环棱螺受胁迫的阈值范围。

CAT 和 SOD 都是生物体内重要的酶,两者协调一致可以有效地清除活性氧,SOD 和 CAT 常作为指示污染胁迫的重要生物标志物^[14]。该试验结果表明,铜对铜锈环棱螺肝胰腺 CAT 活性有较大的影响,除低浓度(0.2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 处理组短时间(2 d)时 CAT 活性与对照组相比略微增强外,其他所有处理组均随着处理时间、处理浓度的增加而降低,具有较为明显的时间效应和剂量效应,这与熊昫青等^[4] 的研究结果相似。绝大部分浓度处理组与对照组间 CAT 活性差异均达显著或极显著水平。0.2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组铜锈环棱螺肝胰腺 SOD 活性与对照组相比均出现增强现象:试验 2~6 d 时 SOD 活性随处理时间的延长而增加,具有一定的时间效应;当处理时间达 8 d 时,SOD 活性虽然有所下降,但仍然高于对照组:表现出与 CAT 活性较不一致的效应。这与李君等^[15] 有关 Cd、Pb 单一及联合作用均显著降低大鼠肾脏 SOD 活性的结论,以及马陶武等^[3] 有关铅对

铜锈环棱螺 SOD 等影响的研究结果也有一定差异。这说明重金属对生物体内各种酶的影响途径、机理极其复杂,不同的金属、不同生物、不同的组织器官、不同的染毒途径及作用时间等都有可能影响酶的活性。

铜锈环棱螺的滤食生活特点和特殊的生活环境使其极易受到重金属的污染和毒害,其对重金属有较强的生物累积能力。由于铜锈环棱螺分布广泛,并被鱼类以及人类等大量食用,从而可通过食物链对人类产生较大影响。从笔者的试验结果来看,水体环境中铜胁迫对铜锈环棱螺的生理功能确实具有较大的危害影响,应引起注意。另外,对铜锈环棱螺在生物监测中的应用也可以做进一步的研究。

参考文献:

- [1] ALMEIDA E A, MIYAMOTO S, BAINY A C D, *et al.* Protective Effect of Phospholipid Hydroperoxide Glutathione Peroxidase (PH-GPx) Against Lipid Peroxidation in Mussels *Perna perna* Exposed to Different Metals[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, 49(5/6): 386 - 392.
- [2] 马陶武,周科,朱程,等.铜锈环棱螺对镉污染沉积物慢性胁迫的生物标志物响应[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(8): 1750 - 1756.
- [3] 马陶武,朱程,周科,等.铜锈环棱螺对铅污染沉积物慢性胁迫的繁殖响应和氧化应激反应敏感性[J]. *生态学报*, 2009, 29(10): 5350 - 5357.
- [4] 熊昫青,由文辉.苏州河底泥对铜锈环棱螺(*Bellamya aeruginosa*) SOD和CAT的影响[J]. *华东师范大学学报:自然科学版*, 2002(4): 96 - 101.
- [5] 李学鹏,励建荣,段青源,等.泥蚶对重金属铜、铅、镉的生物富集动力学[J]. *水产学报*, 2008, 32(4): 592 - 600.
- [6] 张少娜,孙耀,宋云利,等.紫贻贝(*Mytilus edulis*)对4种重金属的生物富集动力学特性研究[J]. *海洋与湖沼*, 2004, 35(5): 438 - 445.
- [7] 孙平跃,王斌.季节变化和个体大小对河蚬积累重金属的影响[J]. *海洋通报*, 2004, 23(2): 19 - 24.
- [8] 李丽娜,陈振楼,许世远,等.长江口滨岸带河蚬的时空分布特征及其指示作用[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(5): 883 - 886.
- [9] 曾丽璇,陈桂珠,余日清,等.水环境中Ca和Cu污染对监测生物河蚬积累效应的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2004, 23(5): 964 - 967.
- [10] DUCROT V, COGNAT C, MONS R, *et al.* Development of Rearing and Testing Protocols for a New Freshwater Sediment Test Species: The Gastropod *Valvata piscinalis* [J]. *Chemosphere*, 2006, 62(8): 1272 - 1281.
- [11] CALABRESE E J. Hormesis: Why It Is Important to Toxicology and Toxicologists [J]. *Environmental Toxicology & Chemistry*, 2008, 27(7): 1451 - 1474.
- [12] 邓勃.原子吸收光谱分析的原理、技术和应用[M].北京:清华大学出版社, 2004: 427 - 428.
- [13] 周科,马陶武,朱程,等.2,2',4,4'-四溴联苯醚(BDE-47)污染沉积物对铜锈环棱螺肝脏的SOD、CAT和EROD活性的影响[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(8): 1666 - 1673.
- [14] GERACITANO L, MONSERRAT J M, BIANCHINI A. Physiological and Antioxidant Enzyme Responses to Acute and Chronic Exposure of *Laeonereis acuta* (Polychaeta Nereididae) to Copper [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2002, 277(2): 145 - 156.
- [15] 李君,潘家荣,魏益民.铅镉联合作用对大鼠肾脏脂质过氧化影响[J]. *中国公共卫生*, 2007, 23(8): 957 - 958.

作者简介:南旭阳(1970—),男,浙江乐清人,副教授,硕士,主要从事生理生态学方面的研究。E-mail: nxy@wzu.edu.cn; nanxuyang405@sohu.com

欢迎订阅 2012 年《土壤学报》

《土壤学报》系中国科学院主管、中国土壤学会主办、科学出版社出版的学术性期刊。主要刊登土壤科学各分支学科及相关领域(如植物营养科学、肥料科学、环境科学、国土资源和农业可持续发展等)的最新研究成果,包括学术论文、研究简报、综述与专论、问题讨论等。主要读者对象为土壤学及相关学科的科技人员、高等院校师生和各级决策与管理干部。

《土壤学报》系中国期刊方阵期刊、中文核心期刊、中国科技核心期刊、中国百种杰出学术性期刊、中国科学评价中心权威期刊、江苏省双十佳期刊。该刊是中国科学引文数据库(CSCD)、中国科技论文与引文数据库(CSTPCD)、中国期刊全文数据库(CJFD)、中国学术期刊文摘(CSA)、中国科技期刊精品数据库等国内重要数据库和文摘的来源期刊,并被CA、CAB Abstracts系列及FAO Agris AGRINDEX等国际检索系统收录。该刊影响因子、总被引频次连续多年居全国农业科技期刊前列。

《土壤学报》为双月刊,大16开,192页,逢单月11日出版,国内外公开发行。每期定价60.00元,全年定价360.00元。国内统一刊号:CN 32-1119/P,国际标准刊号:ISSN 0564-3929。国内邮发代号:2-560,国外发行代号:BM45。订购处:全国各地邮局。总发行:科学出版社;地址:北京东黄城根北街16号;邮政编码:100717;电话:010-64034563;E-mail: journal@espg.net。国外发行:中国国际图书贸易总公司(北京399信箱);邮政编码:100044。如漏订,可向本刊编辑部补订。编辑部地址:南京市北京东路71号中国科学院南京土壤研究所《土壤学报》编辑部;邮政编码:210008;电话:025-86881237, 86881238, 86881257;传真:025-86881237;网址: <http://pedologica.issas.ac.cn>; E-mail: actapedo@issas.ac.cn。