

重金属污染对昆虫生长发育的影响

孙虹霞, 刘 颖, 张古忍*

(中山大学有害生物控制与资源利用国家重点实验室/昆虫学研究所, 广州 510275)

摘要: 重金属污染已经成为一个全球性的环境问题, 对生物多样性和人类健康构成了严重威胁。作为全球生物多样性的的重要组成部分, 昆虫因重金属污染而受到的潜在影响同样引起了人们的普遍关注。过量重金属可对昆虫的生长发育产生影响。环境中的重金属可通过昆虫的呼吸、表皮和摄食等途径进入昆虫体内, 进入昆虫体内的过量重金属不仅能引起昆虫细胞超微结构的变化和遗传物质的改变, 还可诱导昆虫细胞凋亡并影响细胞的活力和增殖。但昆虫能将过量的重金属以金属颗粒形式储存在具消化、存储或分泌功能的器官中, 也能将其转运至溶酶体中解毒。同时, 金属结合蛋白和抗氧化酶在昆虫对重金属的解毒过程中具有重要作用。

关键词: 重金属; 污染; 昆虫; 生长发育; 细胞; 解毒

中图分类号: Q965.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 0454-6296(2007)02-0178-08

Effects of heavy metal pollution on insects

SUN Hong-Xia, LIU Ying, ZHANG Gu-Ren* (State Key Laboratory for Biological Control/Institute of Entomology, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Heavy metal pollution has become a global environmental problem and severely threatened the biological diversity and people's health. More and more attention has been paid to the potential effects of heavy metal pollution on insects as one of the important groups of global biological diversity. The accumulation of heavy metals in insects may influence their development. It has been demonstrated that insects could be contaminated by respiration, ion absorbing through integument and food intake. Excessive metal accumulation in insects could not only cause cell ultrastructure variations and genetic homeostasis alteration, but also induce cell apoptosis and influence cell viability and proliferation. But, heavy metals can be stored in insect organs with digestive, storage or excretory function in form of "granules", and be transported into lysosomes to detoxify. Moreover, metallothionein and antioxidant enzymes also play important roles in the process of detoxification.

Key words: Heavy metal; pollution; insects; development; cell; detoxification

随着工业化和城市化的迅速发展, 重金属污染已经成为一个全球性的环境问题 (Warchałowska-Słiwa *et al.*, 2005)。重金属污染不仅加速了生态环境的恶化, 对生物多样性构成威胁, 还能通过作物的吸收在食物链各环节间转移和积累, 并对生态平衡以及机体正常的生理生化代谢和遗传发育产生影响, 最终威胁着人类的身体健康。因此, 重金属污染对环境特别是对人类健康造成的影响已引起了人们的普遍关注 (王宏宾等, 2005)。昆虫作为全球生物多样性的的重要组成部分, 重金属污染对其影响同样

也引起了人们的关注。

近 10 年来, 有关重金属污染对昆虫类群影响的文献报道明显增多 (表 1)。涉及弹尾目、双翅目、鳞翅目、鞘翅目、膜翅目、同翅目和半翅目昆虫, 涉及的重金属包括 Cd、Zn、Cu、Pb、Hg、Ni 和 As 等。

1 重金属污染对昆虫生长发育的影响

一般情况下, 昆虫在抵御过量重金属胁迫中常会消耗大量的能量, 并降低对食物的消耗、吸收和同

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (2006CB102001); 广东省基础研究团队项目 (E039254)

作者简介: 孙虹霞, 女, 1978 年 12 月生, 博士研究生, 从事昆虫生物技术研究, E-mail: sunhu9951@sina.com

* 通讯作者 Author for correspondence, E-mail: zhanggr@mail.sysu.edu.cn

收稿日期 Received: 2006-05-17; 接受日期 Accepted: 2006-12-23

表 1 近 10 年来重金属污染对昆虫影响的重要报道

Table 1 Reports concerning the effects of heavy metal pollution on insects in the last decade

目 Order	种类 Species	重金属元素 Heavy metal	文献 References
弹尾目 Collembola	跳虫 <i>Folsomia candida</i> (Willem)	Cd,Cu,Pb	Bongers <i>et al.</i> , 2004 ; Sørensen and Holmstrup, 2005
	<i>Orchesella cincta</i> (L.)	Cd	Hensbergen <i>et al.</i> , 1999, 2000 ; Sterenborg and Roelofs, 2003
	<i>Proisotoma minuta</i> (Tullberg)	Cd,Zn,Cu,Pb	Nursita <i>et al.</i> , 2005
	<i>Tetradontophora bielensis</i> (Waga)	Zn,Pb,Cd	Pawert <i>et al.</i> , 1996
	伊蚊 <i>Aedes C6/36</i> 细胞系	Cu,Hg,Cd	Braeckman <i>et al.</i> , 1997 ; Raes <i>et al.</i> , 2000
双翅目 Diptera	摇蚊 <i>Chironomus</i>	Cd,Zn,Cu,Pb,Hg,Ni	Gillis <i>et al.</i> , 2002 ; Martinez <i>et al.</i> , 2003 ; Mousavi <i>et al.</i> , 2003 ; Hayford and Ferrington, 2005
	潜蝇 <i>Chromatomyia milii</i> (Kaltenbach)	Cd	Scheirs <i>et al.</i> , 2006
	致倦库蚊 <i>Culex quinquefasciatus</i> (Say)	Cd,Cu,Zn	Sarkar <i>et al.</i> , 2004
	果蝇 <i>Drosophila</i>	Cd,Zn,Cu,Pb	Uysal, 1997 ; Shirley and Sibly, 1999 ; Selvaraj <i>et al.</i> , 2005
	丝光绿蝇 <i>Lucilia cuprina</i> (Wiedemann)	As,Hg	Joshi and Tiwari, 2000
	家蝇 <i>Musca domestica</i> (L.)	Cd,Zn,Cu,Pb	Tylko <i>et al.</i> , 2005
	伏蝇 <i>Phormia regina</i> (Meig.)	Cd	Nascarella <i>et al.</i> , 2003
	新陆原伏蝇 <i>Protophormia terraenovae</i> (Robineau-Desvoidy)	Pb	Kwartimikov and Lavchieva-Nacheva, 1999
	鳞翅目 Lepidoptera 蝶类成虫 Adult butterflies	Cd,Zn,Cu	Mulder <i>et al.</i> , 2005
	家蚕 <i>Bombyx mori</i> (L.)	Cu,Cd	Prince <i>et al.</i> , 2000
鳞翅目 Lepidoptera	秋白尺蛾 <i>Epirrita autumnata</i> (Borkhausen)	Cu,Ni	van Ooik <i>et al.</i> , 2007
	拟紫毛顶蛾 <i>Eriocrania semipurpurella</i> (Stephens)	Cu,Ni	Kozlov <i>et al.</i> , 2000
	舞毒蛾 <i>Lymantria dispar</i> L.	Zn,Cu,Ni	Bischof, 1996 ; Bagatto and Shorthouse, 1996
	甘蓝夜蛾 <i>Mamestra brassicae</i> (L.)	Cu,Pb	Huckova <i>et al.</i> , 1996
	阿波罗绢蝶 <i>Parnassius apollo</i> (Linnaeus)	Cd	Fred and Brommer, 2005
	鞘翅目 Coleoptera 弧斑叶甲 <i>Chrysomela lapponica</i> (L.)	Ni,Cu	Zvereva <i>et al.</i> , 2003
	甘蔗根蛀虫 <i>Diaprepes abbreviatus</i> (L.)	Cu	Lapointe <i>et al.</i> , 2004
	<i>Poecilus cupreus</i> (L.)	Zn,Cd	Wilczek <i>et al.</i> , 2003
	<i>Pterostichus oblongopunctatus</i> (F.)	Cd,Zn,Cu,Pb	Stone <i>et al.</i> , 2002 ; Migula <i>et al.</i> , 2004
	直翅目 Orthoptera 绿纹螳 <i>Aiolopus thalassinus</i> (Fabr.)	Hg,Cd,Pb	Devkota and Schmidt, 1999b ; Devkota and Schmidt, 2000
直翅目 Orthoptera	泣黑背蝗 <i>Eyprepocnemis plorans</i> (Charp.)	Hg	Devkota and Schmidt, 1999a
	东亚飞蝗 <i>Locusta migratoria</i> (L.)	Cu,Cd	Crawford <i>et al.</i> , 1996
	中华稻蝗 <i>Oxya chinensis</i> (Thunberg)	Cd	Li <i>et al.</i> , 2005
	菱蝗 <i>Tetrix tenuicornis</i> (L.)	Cd,Zn,Cu,Pb	Warchałowska-Śliwa <i>et al.</i> , 2005
	膜翅目 Hymenoptera 意大利蜜蜂 <i>Apis mellifera</i> L.	Pb,Cd,Zn	Leita <i>et al.</i> , 1996
	蜜蜂群体 Colonies of honey bees	Pb,Cd,Zn	Conti and Botre, 2001
	<i>Coptera occidentalis</i> (Muesebeck)	Cu,Pb,Cd	Kazimirova and Ortel, 2000
	赤林蚁 <i>Formica</i> s. str.	As,Ni,Cu,Pb,Cd,Zn,Hg	Eeva <i>et al.</i> , 2004
	同翅目 Homoptera 甘蓝蚜 <i>Brevicoryne brassicae</i>	Cu,Pb	Görür, 2006
	麦长管蚜 <i>Sitobion avenae</i> (Fabricius)	Zn	Winder <i>et al.</i> , 1999
半翅目 Hemiptera	<i>Lethocerus niloticum</i> (Stål)	湖泊污染 Lake pollution	Sorour, 2001
	<i>Oncopeltus fasciatus</i> (Dallas)	Cd	Cervera <i>et al.</i> , 2005

化率,昆虫体内碳水化合物、脂类和蛋白质的代谢以及细胞的正常生理功能也会因此受到严重影响(Tylko *et al.* , 2005)。这种影响一般表现为昆虫发育历期改变,化蛹率、体重、繁殖力、产卵量、卵孵化率等降低,死亡率升高,种群数量下降等(Ruohomaki *et al.* , 1996 ; Mousavi *et al.* , 2003 ; Hayford and Ferrington, 2005)。但由于重金属作用特性和昆虫种类的差异,常有不同效应的发生。

土壤昆虫和水生昆虫直接暴露在重金属含量较

高的环境中,因此,可将其作为重金属污染和环境检测的指示物种,也可以作为模式生物用来研究重金属胁迫对昆虫产生的细胞和分子毒性效应。不同的是,土壤昆虫如弹尾目类对重金属污染常表现出较高的耐受性(Hasegawa and Takeda, 1995) ;而在特定的水体环境中,水生昆虫的生长发育常受到严重影响,如昆虫的蜕皮过程被完全抑制,某些身体部位的正常发育受到严重干扰,如口器畸形、表皮超微结构变化及蜕皮时间和发育历期延长等,并最终影响其

繁殖和种群动态。目前,已有的研究多集中在弹尾目和双翅目昆虫种群动态的变化等方面(Mousavi *et al.*, 2003; Hayford and Ferrington, 2005; Nursita *et al.*, 2005)。

重金属的污染可在植物中累积并通过食物链的转运对植食性昆虫的生长发育产生影响。已经研究的昆虫类群主要集中在鳞翅目、膜翅目、直翅目以及少量的鞘翅目(如叶甲)和同翅目(如蚜虫)昆虫中。通常,它们受重金属胁迫的程度与寄主植物体内重金属含量显著相关。在 Cu、Ni 污染的矿区中,秋白尺蛾 *Epirrita autumnata* (Borkhausen) 幼虫密度和存活率,叶蜂 *Gilpinia frutetorum* (Fabricius) 和 *Microdiprion pallipes* (Fallén) 所结茧的长度、宽度和重量等都随距污染源距离的增加而增加(Heliovaara and Vaisanen, 1989; Ruohomaki *et al.*, 1996)。同时,其受重金属胁迫的程度也与重金属的迁移程度有关。污泥中高浓度的 Cu、Zn、Cd 和 Pb 对椰菜幼苗的显著影响能导致其取食者——粉纹夜蛾 *Trichoplusia ni* (Hübner) 幼虫和蛹的死亡率升高,且卵到成虫的发育历期显著延长;但高浓度重金属对生长在污泥中的玉米及其取食者——黑面叶蝉 *Graminella nigrifrons* (Forbes) 的生长发育则无显著影响(Larsen *et al.*, 1994)。

重金属在植物花等组织中的积累可对传粉昆虫如蜜蜂产生影响。不同地点意大利蜜蜂 *Apis mellifera* L. 的平均重量、蜂数、蜂蜜量以及工蜂内的 As、Cd 含量都存在显著差异,并与花粉和蜜露中的重金属含量有特定的关联(Bromenshenk *et al.*, 1991)。但蜜蜂对过量重金属有一定调节能力(Conti and Botre, 2001),并可作为环境重金属污染监测的指示生物(张凤杰等, 2004)。

重金属对昆虫的胁迫也可通过食物链的传递对天敌昆虫产生影响。如 Zn^{2+} 对斜纹夜蛾幼虫的胁迫可间接地影响其幼虫寄生蜂——双斑侧沟茧蜂 *Microplitis bicoloratus* (Chen) 的寄生率、发育历期、羽化率和成虫寿命等(夏端等, 2006)。一般情况下,重金属对寄生性天敌的影响与寄主体内的重金属含量以及转移程度有特定的联系。由于地中海实蝇 *Ceratitis capitata* (Wiedemann) 体内过量的重金属会随蜕皮和化蛹排出体外(Kazimirova and Ortel, 2000),故其蛹寄生蜂 *Coptera occidentalis* (Muesebeck) 不能区分对照和处理的寄主蛹,寄生率在所有处理中不存在显著差异,且寄生蜂的发育历期和雌雄比也未受影响(Kazimirova *et al.*, 1997)。捕食性天敌

体内受重金属影响的程度与其捕食量有一定关联,如捕食性步甲 *Bembidion lampros* (Herbst) 体内积累 Zn 的量与其捕食的麦长管蚜 *Sitobion avenae* (Fabricius) 量显著正相关(Winder *et al.*, 1999)。

2 重金属污染对昆虫影响的机理

2.1 进入昆虫体内的途径

环境中的重金属可通过昆虫的呼吸、表皮和摄食等途径进入昆虫体内而对昆虫的生长发育等产生影响。通过取食方式进入昆虫体内的重金属常在中肠上皮细胞中积累,上皮细胞具有阻止重金属进入昆虫体内的作用(Ballen-Dufrancais, 2002)。果蝇 *Drosophila* 幼虫和黄粉甲 *Tenebrio molitor* (L.) 中肠上皮细胞中的 Cd 可随蜕皮和变态作用排出体外(Maroni and Watson, 1985; Linqvist and Block, 1995)。但是,一些昆虫的中肠上皮细胞并不能完全阻止重金属离子进入昆虫体内,重金属常通过中肠上皮细胞基底进入血淋巴,由血淋巴将过量的重金属排出体外或通过血液循环转运至其他具有分泌或存储功能的器官如脂肪体、马氏管和附性腺中沉积(Ballen-Dufrancais, 2002)。通过呼吸或表皮进入体内的重金属也能通过血淋巴转运至其他组织如中肠等积累,但其具体机制尚待进一步研究。

2.2 对昆虫细胞的影响

过量的重金属可损害昆虫细胞和组织的正常功能。当重金属离子尤其是二价离子跨膜转运至细胞内时,扰乱了细胞内外离子的平衡,并对细胞膜的极性、pH 稳定性、渗透性以及细胞内环境的稳态造成影响。高浓度 Pb 的胁迫可改变家蝇 *Musca domestica* (L.) 中肠上皮细胞膜的通透性并诱导大量的离子如 Na^+ 、 Cl^- 的内流。此外,重金属离子的氧化还原作用还可影响质膜上离子通道和离子泵的功能(Tylko and Kilarski, 2003)。类似的是,重金属对机体离子平衡的影响也与不同组织类型、组织生理屏障以及不同重金属的生理功能、毒性、作用剂量和时间有关(Tylko *et al.*, 2005)。

一般情况下,进入细胞的重金属离子可与细胞内化合物作用而产生大量的自由基,这些自由基可通过阻断生物分子的功能基或改变生物分子构象等作用,对细胞的超微结构和功能造成一定的损害,并表现在多个水平上。如受 Cd 胁迫的弹尾目昆虫 *Tetradontophora bielensis* (Waga) 中肠细胞中,随着 Cd 浓度的增高,粗面内质网、胞质、膜的结构和微绒

毛都会发生相应改变(Pawert *et al.*, 1996)。此外,受重金属严重污染的水体内的桂花蝉属昆虫 *Lethocerus niloticum* (Stål)的马氏管数目也有所增加,上皮细胞质中存在大量的裂解区,线粒体呈不规则状和多型性;细胞核和染色质发生浓缩(Sorour, 2001)。

重金属胁迫也可对昆虫细胞的遗传物质产生影响。如 Pb 可诱导果蝇多线染色体发生断裂、半断裂、溢痕并形成发卡结构(Uysal, 1997) 染色体 G 内多有高频率的异位配对、倒位和缺失等现象发生(Michailova *et al.*, 1998) 且核仁形成区的活性在高浓度金属的胁迫下也会降低甚至消失。而染色体 G 中的巴尔比亚尼环 Ba、Bb 和 Bc (Balbiani rings BRa, BRb, BRc)活性的变化常作为重金属污染的指示者(Aziz *et al.*, 1991)。

重金属胁迫对昆虫细胞结构的影响最终可对细胞的活力和增殖造成影响,并诱导细胞的凋亡。通常,随着胁迫浓度的增加,细胞凋亡率逐渐增加(Raes *et al.*, 2000; Xia *et al.*, 2005),而细胞活力会逐渐下降,并存在显著的剂量-反应关系(Braeckman *et al.*, 1997)。

2.3 昆虫对重金属的解毒机制

重金属污染在对昆虫生长发育和生理机能产生影响的同时,昆虫也发展出独特的解毒机制以减少过量重金属的危害,并维持机体内环境的稳态。近年来,随着 X-射线电子探针微分析、电子能量散失分析仪、波长色散谱、组织化学以及超微结构研究方法的发展与应用,在昆虫对重金属的解毒机制研究方面有了较大的进展。

2.3.1 昆虫对过量重金属的储存:(1) 金属颗粒:根据其生理起源和生化组分,金属颗粒可分为 A、B、C 和 D 4 类。一些研究者认为,这些金属以离子形式通过特定的膜通道如 Ca^{2+} 通道进入细胞内,在内质网-高尔基复合体内与机体物质相互作用形成特定的颗粒状物质;其也可在内质网-高尔基复合体内结合在糖胺聚糖等物质上形成,但其具体机制还有待于进一步探讨(Ballen-Dufrancais, 2002)。重金属的这种储存方式多见于陆生节肢动物,并对陆生动物具有重要的进化意义(Hopkin, 1990)。(2) 溶酶体 重金属也可被转运至溶酶体中进行解毒。一般情况下,重金属进入溶酶体的频率低于金属颗粒或其他陆生无脊椎动物溶酶体的发生频率。但由于金属硫蛋白的协同作用,其发生速率显著高于金属颗粒的形成。通常,含丰富金属颗粒细胞中的溶酶体

数量相对较少,且溶酶体的结构常呈不规则状(Ballen-Dufrancais, 2002)。

2.3.2 昆虫对重金属的解毒器官与解毒作用:昆虫的消化道、马氏管、脂肪体、体壁和生殖腺都具有储存过量重金属的功能。中肠柱形细胞内的金属颗粒可沉积胞内过量的金属离子,使细胞免受重金属的毒害作用,但双翅目昆虫中肠细胞中不含金属颗粒物质而由溶酶体起主要解毒作用(Errais *et al.*, 1989)。

过量的重金属还可通过中肠上皮细胞并经由血淋巴的转运作用积累在马氏管、脂肪体和回肠等组织中。在蚂蚁中肠、马氏管和脂肪体中、在蜜蜂成虫脂肪体和马氏管中以及东亚飞蝗 *Locusta migratoria* (Meyen) 脂肪体中都可检测到重金属颗粒物质(Jeantet *et al.*, 1977; Raes *et al.*, 1988) 此外,舍蝇 *M. domestica vicina* 马氏管中的溶酶体对 Fe、Zn 和 Cu,果蝇前、后部的马氏管的溶酶体对 Zn 等都具有储存和解毒功能(Sohal *et al.*, 1977; Martoja, 1983; Schofield *et al.*, 1997)。然而,蟑螂的中肠细胞不具备重金属储存功能,过量重金属可穿过中肠上皮细胞进入回肠和马氏管中(Ballen-Dufrancais, 2002)。

过量重金属在昆虫细胞内的分布常与元素周期表有一定关系,硬金属如 Ca、Mg 和 Mn 首先被储存于金属颗粒中,软金属 Hg、Ag 主要分布于溶酶体中,而过渡金属 Zn 和 Cd 则可以两种形式储存在细胞内。但其分布主要取决于重金属的特性以及昆虫的种属特异性。

2.3.3 金属结合蛋白在昆虫对重金属解毒中的作用:昆虫体内的金属硫蛋白(metallothionein)、热激蛋白(heat shock proteins)以及金属结合蛋白等也在重金属解毒中发挥着重要作用,目前的研究多集中在金属硫蛋白上。金属硫蛋白是一类广泛存在于生物体内的低分子量、富含半胱氨酸的金属结合蛋白,具有组织特异性、可诱导性等特点,对重金属的解毒、耐受性以及细胞内氧化还原电位的维持有独特的作用(Vašák, 2005)。

昆虫常通过金属硫蛋白基因的复制而增加金属硫蛋白表达量以提高昆虫在重金属胁迫环境中的存活率。如在受 Cd、Cu、Zn 胁迫的致倦库蚊 *Culex quinquefasciatus* (Say) 幼虫,具 Cd 耐受性的弹尾目 *O. cincta*,以及具 Cu、Cd 抗性的果蝇体内都有高水平的金属硫蛋白 mRNA 表达(Sterenborg and Roelofs, 2003; Sarkar *et al.*, 2004)。目前还只在弹尾目和双翅目昆虫体内分离到金属硫蛋白基因(Hensbergen *et*

al., 1999), 但已在多种昆虫, 如棕尾别麻蝇中纯化到金属硫蛋白(吴国星等, 2006)。进一步研究表明, 金属硫蛋白基因的转录主要依赖于转录因子 MTF-1 (zinc finger transcription factor-1) (Selvaraj et al., 2005), 且果蝇和哺乳类动物的 MTF-1 之间有较高的同源性(Zhang et al., 2001; Egli et al., 2003)。

金属颗粒、溶酶体和金属硫蛋白常在重金属解毒过程中共同发挥作用 (Gillis et al., 2002; Sterenborg and Roelofs, 2003)。金属颗粒中多包含与金属硫蛋白相关联的 S^{2-} ; 而金属硫蛋白也常以聚合形式进入溶酶体并在重金属的解毒中起重要作用 (Bouqueneau et al., 1985)。

2.3.4 抗氧化酶在昆虫对重金属解毒中的作用: 抗氧化酶在昆虫的防御中具有重要作用, 并可作为重金属污染的重要指示因子。昆虫体内的自由基可通过各种抗氧化酶如超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶 (catalase, CAT)、羧酸酯酶 (carboxylesterases, CarE) 和谷胱甘肽 S-转移酶 (glutathione S-transferase, GST) 等的作用而清除。GST 和 CarE 在步甲 *Pterostichus oblongopunctatus* 与 *Poecilus cupreus* (L.)、非特异性单酯酶在大蜡螟 *Galleria mellonella* (L.) 对重金属的解毒中都发挥着重要的作用 (Polek and Fric, 1988; Stone et al., 2002; Wilczek et al., 2003)。但抗氧化酶的活性具种属特异性和高度可变性 (Zvereva et al., 2003; Migula et al., 2004; Li et al., 2005; 王慧等, 2006)。

3 问题与展望

3.1 研究方法上的不足

在评估重金属毒性对昆虫生长发育影响的研究中, 重金属毒性测试时间的长短对试验结果具有重要意义 (Crouau et al., 1999)。短期毒理测试虽较快、简便、费用低, 但忽略了一些化合物的积累特性和累积的毒性效应, 同时未能观察到重金属胁迫对昆虫种群动力学等方面的影响, 故短期测试可能忽略了重要的生态毒理学现象。如豌豆蚜 *Acyrtosiphon pisum* (Harris) 在 Cd 胁迫的初期阶段死亡率较低并与对照无显著差别, 但 22 天后其死亡率增加且显著高于对照, 因此, 短期毒理测试可能过高或过低估计了重金属的生态毒性 (Laskowski, 2001)。昆虫可将大量的重金属离子通过变态等过程排出体外, 但在卵中也常有重金属的存在; 同时, 虽然部分

昆虫对重金属的长期胁迫可产生耐受性, 但某些昆虫种类对重金属有高度敏感性, 因此, 持续多代研究重金属胁迫对昆虫产生的影响具有更重要的意义。

3.2 研究内容上的不足

国内外就重金属胁迫对昆虫的影响做了大量的研究, 但与其他生物如陆生节肢动物与水生动物相比, 仍需进一步较系统地研究。主要表现在: (1) 现有研究多集中在较为宏观的层次上, 如重金属在生物体内的行为特征, 集中在生物体对重金属的吸收、转运、解毒和抗性以及重金属对昆虫生长发育等的影响; 在微观层次上的研究还有待加强, 如昆虫对重金属污染适应分子机理的研究可为抗重金属污染基因的研究以及利用基因工程技术治理环境污染提供一定的依据; (2) 由于昆虫种属特异性以及重金属作用的多样性, 重金属胁迫对昆虫产生各种影响的具体机制还处于推测阶段, 很多机理和规律还有待进一步研究, 而通过探讨重金属对昆虫生理生化过程, 如繁殖产生影响的机理对研究种群暴发以及保持物种的稳定性方面都具有理论意义; (3) 现有研究多偏重于水生、土壤昆虫以及果蝇等模式昆虫, 对一些可能受间接影响的昆虫如植食性类群关注不够, 因此, 拓宽研究对象对寻求重金属污染的指示生物和标记物以及监测重金属在食物链传递中对人类的潜在威胁中发挥重要作用; (4) 野外调查和实验室研究存在脱节现象, 实验室研究常限于一种或少数几种重金属对昆虫的影响, 而在野外条件下昆虫常受到多种重金属元素的作用, 因此, 实验室研究结果可能过高或过低估计了某些元素的影响程度, 但能在可控条件下深入研究重金属胁迫对昆虫的影响机制; (5) 对重金属影响个体与种群间的互作关系关注不够, 常忽略自然种群中各个体之间的基因流动, 这也是重金属胁迫对昆虫进化影响研究中需注意的问题之一; (6) 在昆虫适应重金属污染过程中, 环境因子对其影响程度的研究还有不足之处。

3.3 展望

昆虫是生物界中最大的一个类群, 在生物多样性和生态平衡中都占有十分重要的地位, 并与人类关系密切。深入研究重金属污染对昆虫产生的生态毒理学效应, 可为进一步研究重金属污染对食物链各个环节的影响提供重要的理论依据。然而, 国内在此方面的研究起步较晚, 仅有的部分工作主要是以家蚕 (朱玉芳等, 2002; 崔勇华和朱玉芳, 2004) 和棕尾别麻蝇等蝇类 (王慧, 2005; 吴国星, 2005) 为对象。因此, 进一步探讨重金属污染对昆虫产生

的影响及其内在机制对保持生态系统的稳定性以及保证人类健康都有积极的作用。

参 考 文 献 (References)

Akrawi NM, Nassori GA, 1991. The effect of chronic toxicity of copper on the activity of Balbiani rings and nucleolar organizing region in the salivary gland chromosomes of *Chironomus ninevah* larvae. *Environ. Pollut.*, 69 :125 – 130.

Ballen-Dufrancais C, 2002. Localization of metals in cells of pterygote insects. *Microsc. Res. Tech.*, 56 :403 – 420.

Bagatto G, Shorthouse JD, 1996. Accumulation of Cu and Ni in successive stages of *Lymantria dispar* L. (Lymantriidae, Lepidoptera) near ore smelters, at Sudbury, Ontario, Canada. *Environ. Pollut.*, 92 :7 – 12.

Bischof C, 1996. Effects of heavy metal stress on free amino acids in the haemolymph and proteins in haemolymph and total body tissue of *Lymantria dispar* larvae parasitized by *Glyptapanteles liparidis*. *Entomol. Exp. Appl.*, 79 :61 – 68.

Bongers M, Rusch B, van Gestel CAM, 2004. The effect of counterion and percolation on the toxicity of lead for the springtail *Folsomia candida* in soil. *Environ. Toxicol. Chem.*, 23 :195 – 199.

Bouqueneau JM, Ballen-Dufrancais C, Jeantet AY, 1985. Storage of Hg in the ileum of *Blatella germanica* : biochemical characterization of metallothionein. *Comp. Biochem. Physiol.*, 80C :95 – 98.

Braeckman B, Raes H, van Hove D, 1997. Heavy-metal toxicity in an insect cell line : Effects of cadmium chloride mercuric and methylmercuric chloride on cell viability and proliferation in *Aedes albopictus* cells. *Cell Biol. Toxicol.*, 13 :389 – 397.

Bromenshenk JJ, Gudatis JL, Carlson SR, Thomas JM, Simmons MA, 1991. Population dynamic of honey bee nucleus colonies exposed to industrial pollutants. *Apidologie*, 22 :359 – 370.

Cervera A, Maymó AC, Martínez-Pardo R, Garcerá MD, 2005. Vitellogenesis inhibition in *Oncopeltus fasciatus* female (Heteroptera : Lygaeidae) exposed to cadmium. *J. Insect Physiol.*, 51 :895 – 911.

Conti ME, Botre F, 2001. Honeybees and their products as potential bioindicators of heavy metals contamination. *Environ Monit. Assess*, 69 :267 – 282.

Crawford LA, Lepp NW, Hodkinson ID, 1996. Accumulation and egestion of dietary copper and cadmium by the grasshopper *Locusta migratoria* R and F (Orthoptera : Acrididae). *Environ. Pollut.*, 92 :241 – 246.

Crouau Y, Chenon P, Gisclard C, 1999. The use of *Folsomia candida* (Collembola, Isotomidae) for the bioassay of xenobiotic substances and soil pollutants. *Appl. Soil Ecol.*, 12 :103 – 111.

Cui YH, Zhu YF, 2004. Accumulation of heavy metals in silkworm and their destruction effects on BmN. *Jiangsu Sericulture*, (4) :1 – 3. [崔勇华, 朱玉芳, 2004. 重金属元素在家蚕体内累积及其对家蚕细胞(BmN)的急性损伤. *江苏蚕业*, (4) :1 – 3]

Devkota B, Schmidt GH, 1999a. Effect of mercury (Hg²⁺) on the life span and development of *Eyprepocnemis plorans* (Charp.) (Orthopteroidea, Caelifera, Acrididae). *Bollettino del Laboratorio di Entomologia Agraria Filippo Silvestri*, (55) :113 – 125.

Devkota B, Schmidt GH, 1999b. Effects of heavy metals (Hg²⁺, Cd²⁺, Pb²⁺) during the embryonic development of acridid grasshoppers (Insecta, Caelifera). *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, 36 :405 – 414.

Devkota B, Schmidt GH, 2000. Life span and fecundity of *Aiolopus thalassinus* exposed to dietary heavy metals (Hg²⁺, Cd²⁺, Pb²⁺). *Boll. Zool.*, 32 :119 – 134.

Eeva T, Sorvari J, Koivunen V, 2004. Effects of heavy metal pollution on red wood ant (*Formica* s. str.) populations. *Environ. Pollut.*, 132 :533 – 539.

Egli D, Selvaraj A, Yepiskoposyan H, Zhang B, Hafen E, Georgiev O, Schaffner W, 2003. Knockout of ‘metal-responsive transcription factor’ MTF-1 in *Drosophila* by homologous recombination reveals its central role in heavy metal homeostasis. *EMBO J.*, 22 :100 – 108.

Errais N, Silar P, Cadic-Jacquier A, Mokdad-Gargouri R, Wegnez M, 1989. The metallothionein system of *Drosophila melanogaster*. *UCLA Sym. Mol. Cell Biol. New Ser.*, 98 :91 – 99.

Fred MS, Brommer JE, 2005. The decline and current distribution of *Parnassius apollo* (Linnaeus) in Finland ;the role of Cd. *Ann. Zool. Fenn.*, 42 :69 – 79.

Gillis PL, Diener LC, Reynoldson TB, Dixon DG, 2002. Cadmium-induced production of a metallothionein like protein in *Tubifex tubifex* (Oligochaeta) and *Chironomus riparius* (Diptera) : Correlation with reproduction and growth. *Environ. Toxicol. Chem.*, 21 :1 836 – 1 844.

Görür G, 2006. Developmental instability in cabbage aphid (*Brevicoryne brassicae*) populations exposed to heavy metal accumulated host plants. *Ecol. Indic.*, 6 :743 – 748.

Hasegawa M, Takeda H, 1995. Changes in feeding attributes of four collembolan population during the decomposition process of pine needles. *Pedobiologia*, 39 :155 – 169.

Hayford BL, Ferrington LC, 2005. Biological assessment of Cannon Creek, Missouri by use of emerging Chironomidae (Insecta : Diptera). *J. Kans. Entomol. Soc.*, 78 :89 – 99.

Heliovaara K, Vaisanen R, 1989. Between-species difference in heavy metal levels in four pine Diprionids Hymenoptera along an air pollutant gradient. *Environ. Pollut.*, 62 :253 – 262.

Hensbergen PJ, Donker MH, van Velzen MJM, Roelofs D, van de Schors RC, Hunziker PE, van Straalen NM, 1999. Primary structure of a cadmium-induced metallothionein from the insect *Orchesella cincta* (Collembola). *Eur. J. Biochem.*, 259 :197 – 203.

Hensbergen PJ, van Velzen MJM, Nugroho RA, Donker MH, van Straalen NM, 2000. Metallothionein-bound cadmium in the gut of the insect *Orchesella cincta* (Collembola) in relation to dietary cadmium exposure. *Biochem. Physiol. C*, 125 :17 – 24.

Hopkin SP, 1990. Critical concentrations, pathways of detoxification and cellular ecotoxicology of metals in terrestrial arthropods. *Func. Ecol.*, 4 :321 – 327.

Huckova A, Kazimirova M, Slovak M, 1996. Heavy metal-affected changes in haemolymph histamine concentration in the cabbage moth, *Mamestra brassicae* (Lepidoptera, Noctuidae). *Biologia (Bratislava)*, 51 :571 – 574.

- Jeanet AY, Ballan-Dufrançais C, Martoja R, 1977. Insects resistance to mineral pollution. importance of spherocrystal in ionic regulation. *Rev. Ecol. Biol. Soc.*, 14 : 563 – 582.
- Joshi A, Tiwari PK, 2000. Chromosomal responses of blowfly *Lucilia cuprina* to heat and heavy metal stress. *Genetica (Dordrecht)*, 109 : 211 – 218.
- Kazimirova M, Ortel J, 2000. Metal accumulation by *Ceratitis capitata* (Diptera) and transfer to the parasitic wasp *Coptera occidentalis* (Hymenoptera). *Environ. Toxicol. Chem.*, 19 : 1 822 – 1 829.
- Kazimirova M, Slovak M, Manova A, 1997. Host-parasitoid relationship of *Ceratitis capitata* (Diptera : Tephritidae) and *Coptera occidentalis* (Hymenoptera : Proctotrupoidea : Diapriidae) under host heavy metal stress. *Eur. J. Entomol.*, 94 : 409 – 420.
- Kozlov MV, Haukioja E, Kovnatsky EF, 2000. Uptake and excretion of nickel and copper by leaf-mining larvae of *Eriocrania semipurpurella* (Lepidoptera : Eriocraniidae) feeding on contaminated birch foliage. *Environ. Pollut.*, 108 : 303 – 310.
- Kwartimikov MA, Lavchieva-Nacheva GV, 1999. The effect of lead intoxication on the haemocytes of *Protophormia terraenovae* R. D. adults (Diptera : Calliphoridae). *Acta Zoologica Bulgarica*, 51 : 95 – 102.
- Larsen KJ, Litsch AL, Brewer SR, Taylor DH, 1994. Contrasting effects of sewage sludge and commercial fertilizer on egg to adult development of two herbivorous insect species. *Ecotoxicology*, 3 : 94 – 109.
- Laskowski R, 2001. Why short-term bioassays are not meaningful : Effects of a pesticide (Imidacloprid) and a metal (cadmium) on pea aphid (*Acyrtosiphon pisum* Harris). *Ecotoxicology*, 10 : 177 – 183.
- Lapointe SL, Weathersbee AA III, Doostdar H, Mayer RT, 2004. Effect of dietary copper on larval development of *Diaprepes abbreviatus* (Coleoptera : Curculionidae). *Fla. Entomol.*, 87 : 25 – 29.
- Leita L, Muhlbachova G, Cesco S, Barbattini R, Mondini C, 1996. Investigation of the use of honey bees and honey bee products to assess heavy metals contamination. *Environ. Monit. Assess*, 43 : 1 – 9.
- Lindqvist L, Block M, 1995. Excretion of cadmium during moulting and metamorphosis in *Tenebrio molitor* (Coleoptera : Tenebrionidae). *Comp. Biochem. Physiol.*, 111C : 325 – 328.
- Li LJ, Liu XM, Guo YP, Ma EB, 2005. Activity of the enzymes of the antioxidative system in cadmium-treated *Oxya chinensis* (Orthoptera, Acridoidae). *Environ. Toxicol. Pharmacol.*, 20 : 412 – 416.
- Maroni G, Watson D, 1985. Uptake and binding of cadmium, copper, and zinc by *Drosophila melanogaster*. *Insect Biochem.*, 15 : 55 – 63.
- Martinez EA, Moore BC, Schaumlöffel J, Dasgupta N, 2003. Morphological abnormalities in *Chironomus tentans* exposed to cadmium- and copper-spiked sediments. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 55 : 204 – 212.
- Martoja R, 1983. Toxicological effects and storage of cadmium and mercury in an insect *Locusta migratoria* Orthoptera. *J. Invertebr. Pathol.*, 42 : 17 – 32.
- Michailova P, Petrova N, Sella G, Ramella L, Bovero S, 1998. Structural-functional rearrangements in chromosome G in *Chironomus riparius* (Diptera, Chironomidae) collected from a heavy metal-polluted area near Turin, Italy. *Environ. Pollut.*, 103 : 127 – 134.
- Migula P, Laszczyca P, Augustyniak M, Wilezek G, Rozpedek K, Kafel A, Woloszyn M, 2004. Antioxidative defence enzymes in beetles, from a metal pollution gradient. *Biologia (Bratislava)*, 59 : 645 – 654.
- Mousavi SK, Primicerio R, Amundsen PA, 2003. Diversity and structure of Chironomidae (Diptera) communities along a gradient of heavy metal contamination in a subarctic watercourse. *Sci. Total Environ.*, 307 : 93 – 110.
- Mulder C, Aldenberg T, de Zwart D, van Wijnen HJ, Breure AM, 2005. Evaluating the impact of pollution on plant-Lepidoptera relationships. *Environmetrics*, 16 : 357 – 373.
- Nascarella MA, Stoffolano JG, Stanek EJ III, Kostecki PT, Calabrese EJ, 2003. Hormesis and stage specific toxicity induced by cadmium in an insect model, the queen blowfly, *Phormia regina* Meig. *Environ. Pollut.*, 124 : 257 – 262.
- Nursita AI, Singh B, Lees E, 2005. The effects of cadmium, copper, lead, and zinc on the growth and reproduction of *Proisotoma minuta* Tullberg (Collembola). *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 60 : 306 – 314.
- Pawert M, Triebekom R, Gröff S, Berkus M, Schulz J, Köhler HR, 1996. Cellular alterations in collembolan midgut cells as a marker of heavy metal exposure : ultrastructure and intracellular metal distribution. *Sci. Total Environ.*, 181 : 187 – 200.
- Polek B, Fric F, 1988. Effects of cadmium on non-specific monoesterase activity and protein pattern in *Galleria mellonella* and *Agrotis segetum* larvae. *Biologia (Bratislava)*, 43 : 169 – 174.
- Prince WSPM, Senthilkumar P, Subburam V, 2001. Mulberry-silkworm food chain – a template to assess heavy metal mobility in terrestrial ecosystems. *Environ. Monit. Assess*, 69 : 231 – 238.
- Raes H, Bohyn W, Jacobs F, 1988. Study on the detoxification of lead by the honey bee (*Apis mellifera* L.). *Actes Colloq. Insect Soc.*, 4 : 95 – 111.
- Raes H, Braeckman BP, Criel GRJ, Rzeznik U, Vanfleteren JR, 2000. Copper induces apoptosis in *Aedes C6/36* cells. *J. Exp. Zool.*, 286 : 1 – 12.
- Ruohoaki K, Kaitaniemi P, Kozlov M, Tammaru T, Haukioja E, 1996. Density and performance of *Epirrita autumnata* (Lepidoptera : Geometridae) along three air pollution gradients in northern Europe. *J. Appl. Ecol.*, 33 : 773 – 785.
- Sarkar S, Duttgupta A, Mal TK, 2004. Effects of heavy metals on population growth and metallothionein gene expression in the mosquito *Culex quinquefasciatus*, from Calcutta, India. *Environ. Pollut.*, 127 : 183 – 193.
- Scheirs J, Vandevyvere I, Wollaert K, Blust R, de Bruyn L, 2006. Plant-mediated effects of heavy metal pollution on host choice of a grass miner. *Environ. Pollut.*, 143 : 138 – 145.
- Schofield RMS, Postlethwait JH, Lefevre HW, 1997. MeV-ion microprobe analyses of whole *Drosophila* suggest that zinc and copper accumulation is regulated storage not deposit excretion. *J. Exp. Biol.*, 200 : 3 235 – 3 243.
- Selvaraj A, Balamurugan K, Yepiskoposyan H, Zhou H, Egli D, Georgiev O, Thiele D, Schaffner W, 2005. Metal-responsive transcription factor (MTF-1) handles both extremes, copper load and copper starvation, by activating different genes. *Genes Dev.*, 19 : 891 – 896.
- Shirley MDF, Sibly RM, 1999. Genetic basis of a between-environment trade-off involving resistance to cadmium in *Drosophila melanogaster*. *Evolution*, 53 : 826 – 836.

Sohal RS, Peters PD, Hall TA, 1977. Origin, structure, composition and age-dependence of mineralized dense bodies (concretions) in the midgut epithelium of the adult housefly, *Musca domestica*. *Tissue Cell*, 9 : 87 – 102.

Sørensen TS, Holmstrup M, 2005. A comparative analysis of the toxicity of eight common soil contaminants and their effects on drought tolerance in the collembolan *Folsomia candida*. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 60 : 132 – 139.

Sorour J, 2001. Ultrastructure variations in *Lethocerus niloticum* (Insecta : Hemiptera) caused by pollution in lake Mariut, Alexandria, Egypt. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 48 : 268 – 274.

Sterenborg I, Roelofs D, 2003. Field-selected cadmium tolerance in the springtail *Orchesella cincta* is correlated with increased metallothionein mRNA expression. *Insect Biochem. Mol. Biol.*, 33 : 741 – 747.

Stone D, Jepson P, Laskowski R, 2002. Trends in detoxification enzymes and heavy metal accumulation in ground beetles (Coleoptera : Carabidae) inhabiting a gradient of pollution. *Comp. Biochem. Physiol. C, Pharmacol. Toxicol. Endocrinol.*, 132C : 105 – 112.

Tylko G, Banach Z, Borowska J, Niklińska M, Pyza E, 2005. Elemental changes in the brain, muscle, and gut cells of the housefly, *Musca domestica*, exposed to heavy metals. *Microsc. Res. Tech.*, 66 : 239 – 247.

Tylko G, Kilarski W, 2003. Effects of Cu^{2+} , CrO_4^{2-} , Co^{2+} , and Pb^{2+} on the monovalent ion content of goldfish (*Carassius auratusgibelio*) tissue studies by X-ray macroanalysis. *Folia Biol.*, 51 : 125 – 128.

Uysal H, 1997. Induction of chromosomal aberrations in polytene chromosomes of *Drosophila melanogaster* by lead acetate. *Cytologia (Tokyo)*, 62 : 213 – 217.

van Ooik T, Rantala MJ, Saloniemi I, 2007. Diet-mediated effects of heavy metal pollution on growth and immune response in the geometrid moth *Epirrita autumnata*. *Environ. Pollut.*, 145 : 348 – 354.

Vašák M, 2005. Advances in metallothionein structure and functions. *J. Trace Elem. Med. Biol.*, 19 : 13 – 17.

Wang HB, Shu WS, Lan CY, 2005. Ecology for heavy metal pollution : recent advances and future prospects. *Acta Ecol. Sin.*, 25(3) : 596 – 605. [王宏斌, 束文圣, 蓝崇钰, 2005. 重金属污染生态学研究现状与展望. *生态学报*, 25(3) : 596 – 605]

Wang H, 2005. Effects of Heavy Metals Cu^{2+} and Cd^{2+} Stress on Antioxidant Enzyme System of Several Fly Species. Hangzhou : MSc Dissertation, Zhejiang University. [王慧, 2005. 重金属 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 胁迫对几种蝇类抗氧化酶系统的影响. 杭州 : 浙江大学硕士学位论文]

Wang H, Wu GX, Ye GY, Hu C, Cheng JA, 2006. Accumulation of copper and cadmium and their effects on the antioxidant enzymes in *Boettcherisca peregrine* exposed to copper and cadmium. *J. Zhejiang Univer. (Agric. & Life Sci.)*, 32(1) : 77 – 81. [王慧, 吴国星, 叶恭银, 胡萃, 程家安, 2006. 铜和镉在棕尾别麻蝇体内的积累及其对三种抗氧化酶活性的影响. *浙江农业大学学报(农业与生命科学版)*, 32(1) : 77 – 81]

Warchałowska-Śliwa E, Niklińska M, Görllich A, Michailova P, Pyza E, 2005. Heavy metal accumulation, heat shock protein expression and cytogenetic changes in *Tetrix tenuicornis* (L.) (Tetrigidae, Orthoptera) from polluted areas. *Environ. Pollut.*, 133 : 373 – 381.

Wilczek G, Kramarz P, Babczynska A, 2003. Activity of carboxylesterase and glutathione S-transferase in different life-stages of carabid beetle (*Poecilus cupreus*) exposed to toxic metal concentrations. *Comp. Biochem. Physiol. C, Pharmacol. Toxicol. Endocrinol.*, 134C : 501 – 512.

Winder L, Merrington G, Green I, 1999. The tri-trophic transfer of Zn from the agricultural use of sewage sludge. *Sci. Total Environ.*, 229 : 73 – 81.

Wu GX, 2005. Responses of Flesh Fly (*Boettcherisca peregrina*) to Heavy Metals and its Adaptation Mechanism. Hangzhou : PhD Dissertation, Zhejiang University. [吴国星, 2005. 棕尾别麻蝇对重金属的反应及适应机制的研究. 杭州 : 浙江大学博士学位论文]

Wu GX, Li K, Ye GY, Hu C, Cheng JA, 2006. Isolation, purification and characterization of metallothionein from *Boettcherisca peregrine* (Diptera : Sarcophagidae). *Acta Entomol. Sin.*, 49(1) : 22 – 28. [吴国星, 李凯, 叶恭银, 胡萃, 程家安, 2006. 棕尾别麻蝇金属硫蛋白的分离纯化及性质分析. *昆虫学报*, 49(1) : 22 – 28]

Xia Q, Hu XJ, Shu YH, Sun HX, Zhang GR, 2006. Survival of *Microplitis bicoloratus* Chen on larvae of *Spodoptera litura* Fabricius stressed by heavy metal zinc. *Acta Entomol. Sin.*, 49(3) : 387 – 392. [夏嫄, 胡新军, 舒迎花, 孙虹霞, 张古忍, 2006. 在受重金属 Zn^{2+} 胁迫的斜纹夜蛾幼虫寄主上双斑侧沟茧蜂的生存和发育. *昆虫学报*, 49(3) : 387 – 392]

Xia Q, Sun HX, Hu XJ, Shu YH, Zhang GR, 2005. Apoptosis of *Spodoptera litura* larval hemocytes induced by heavy metal zinc. *Chinese Science Bulletin*, 50(24) : 2 856 – 2 860.

Zhang B, Egli D, Georgiev O, Schaffner W, 2001. The *Drosophila* homolog of mammalian zinc finger factor MTF-1 activates transcription in response to heavy metals. *Mol. Cell. Biol.*, 21 : 4 505 – 4 514.

Zhang FJ, Fan JG, Zhang YW, Zou DM, 2004. Research on indicators in detecting heavy metals pollution in environment. *Liaoning Agricultural Sciences*, 3 (3) : 31 – 33. [张凤杰, 范俊岗, 张玉伟, 邹德明, 2004. 环境重金属污染检测研究的指示物. *辽宁农业科学*, 3 (3) : 31 – 33]

Zhu YF, Wu K, Cui YH, Zheng XJ, Xu YX, Wang HQ, 2002. Effects of cadmium and lead on cocoon quality and DNA of blood cell in silkworm (*Bombyx mori*). *Agro-Environmental Protection*, 21 (6) : 502 – 504. [朱玉芳, 吴康, 崔勇华, 郑小坚, 许雅香, 汪宏其, 2002. 镉铅对家蚕茧质及血细胞 DNA 损伤的影响. *农业环境保护*, 21 (6) : 502 – 504]

Zvereva E, Serebrov V, Glupov V, Dubovskiy I, 2003. Activity and heavy metal resistance of non-specific esterases in leaf beetle *Chrysomela lapponica* from polluted and unpolluted habitats. *Comp. Biochem. Physiol. C, Pharmacol. Toxicol. Endocrinol.*, 135C : 383 – 391.

(责任编辑：黄玲巧)