

铅胁迫对甜菜夜蛾连续五代生殖力的影响研究*

钱媛媛** 苏宏华 程禹铭 杨益众***

(扬州大学园艺与植物保护学院, 扬州 225009)

摘要 【目的】甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* 是蔬菜等作物上的主要害虫, 而蔬菜地常会遭到重金属的污染和侵蚀。本文系统探究了重金属铅对甜菜夜蛾多个世代生殖力的影响, 为评价重金属污染对昆虫等生物的长期累积效应提供依据。【方法】人工饲料中添加一定量的 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 溶液, 配制成浓度为 0 (CK)、0.3、4.8、76.8 mg/kg 的 Pb^{2+} 饲料连续饲养甜菜夜蛾 5 个世代, 研究不同浓度的铅胁迫对该虫生殖力的系统影响。【结果】随着饲养世代的延续和铅浓度的增加, 会使甜菜夜蛾的雌雄比出现分化, 且呈现浓度优势现象。特别是饲养到第 3、4 代, 高浓度铅胁迫后, 甜菜夜蛾的雌性比达到 60% 以上, 与对照比差异显著; 甜菜夜蛾的生殖腺指数、产卵量和卵的孵化率也与工人饲料中铅的浓度及饲养世代数密切相关: 总的表现为饲养世代数越长、铅浓度越大, 该虫的生殖腺指数越小、产卵量越少、卵的孵化率越低。以最高浓度 (76.8 mg/kg) 的铅处理甜菜夜蛾 5 个世代为例, 生殖腺指数仅是对照组的 60.4%, 产卵量与卵的孵化率分别是对照处理的 60.5% 和 46.2%。【结论】铅胁迫对甜菜夜蛾生殖力影响的程度与重金属浓度及污染的世代数有关。

关键词 甜菜夜蛾, 铅胁迫, 生殖腺指数, 产卵量, 卵的孵化率

Effect of lead stress on the fecundity of five successive generations of the beet armyworm

QIAN Yuan-Yuan** SU Hong-Hua CHENG Yu-Ming YANG Yi-Zhong***

(School of Horticulture and Plant Protection, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract 【Objectives】To understand the effect of lead on the fecundity of the beet armyworm. 【Methods】the effects of different concentrations of dietary lead (0, 0.3, 4.8, 76.8 mg/kg) on the fecundity of five successive generations of the beet armyworm were measured and compared. 【Results】Increased lead concentration affected the sex ratio of later generations, especially the 3rd and 4th generations in which the proportion of female offspring reached 50% at high dietary lead concentrations, significantly higher than in the control. The production gland index, number of eggs and hatching rate were also highly correlated with lead concentration and generation; the more generations and the higher the lead concentration, the smaller the production gland index, the lower the number of eggs produced and the lower the hatching rate. Compared to the control group, the high lead (76.8 mg/kg) treatment group had significantly reduced gonad and oviposition indices. The gonad index was just 60.4% that of the control, whereas the number of eggs laid and the hatching rate were 60.5% and 6.2% those of the corresponding control group. 【Conclusion】The effect of dietary lead on the fecundity of the beet armyworm increased with the lead content of the diet and generation.

Key words beet armyworm, lead stress, production gland index, egg number, egg hatching rate

*资助项目 Supported projects: 国家重大专项 (2016ZX08012-004); 上海市科委专项 (沪农科 2014-732); 江苏省重点研发计划 (BE2017379-3)

**第一作者 First author, E-mail: 1181392199@qq.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: zyzyang@yzu.edu.cn

收稿日期 Received: 2017-01-12, 接受日期 Accepted: 2017-03-11

随着经济的发展,工业化程度的提升,越来越多的重金属(比如铅 Pb^{2+})通过各种途径被释放到河流、土壤等环境中,进而被植物吸收后在体内富积,并在不同营养级间传递。昆虫是重要的植食者,也是自然界中最大的生物类群,在重金属的累积与传递过程中起着重要的介体与预警作用。

研究发现,一些生物的生殖系统对重金属铅的污染反应敏感,常常会出现生殖障碍,诸如不育、死胎、后代发育迟缓、功能性障碍等,甚至形态异常、早期肿瘤,其毒害作用不仅直接影响当代接触者,甚至还会波及到后代(徐世清和李艳梅,2011)。迄今,重金属铅对水生生物和脊椎动物生殖力的影响研究较多,而对昆虫的研究较少。甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* Hübner 是一种世界性害虫,寄主多达 100 种以上,主要危害甘蓝、花椰菜、白菜、萝卜等十字花科蔬菜及豆科和葫芦科的 30 余种蔬菜。研究显示,土壤中的重金属 Pb 可通过蔬菜这样的食物链传递到甜菜夜蛾体内(胡蒙蒙,2013)。

本论文用含有不同浓度 Pb^{2+} 的人工饲料连续饲养甜菜夜蛾 5 个世代,系统研究重金属铅对其生殖力的影响,以了解昆虫等无脊椎动物的繁殖力对铅污染后的反应及影响程度,同时也为昆虫作为环境污染的指示生物提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

甜菜夜蛾虫源由中国农业科学院植物保护研究所提供。

饲养条件:甜菜夜蛾在 LED 光照恒温培养箱中进行饲养。设定温度为 (26 ± 1) °C,相对湿度为 60%~70%,光周期 L:D=14:10。

1.2 含不同浓度 Pb^{2+} 人工饲料的配制

参照李腾武等(2001)配制的甜菜夜蛾人工饲料称取 1 000 g,置于饲料盒中,吸取一定量的 $Pb(NO_3)_2$ 溶液加入其中,搅拌均匀,配置成 Pb^{2+} 浓度分别为 0.3、4.8、76.8 mg/kg 的重金属铅饲料,以加入等量超纯水的人工饲料作为对照。

1.3 铅对甜菜夜蛾繁殖的影响

在 6 孔板内用含不同浓度(0、0.3、4.8、76.8 mg/kg)的 Pb^{2+} 饲料单头饲养甜菜夜蛾幼虫,每天更换饲料,化蛹羽化后的甜菜夜蛾雌雄单独配对,放入带有产卵纸的养虫笼内,每天更换 5% 的蜂蜜水棉球和产卵纸,收集所产卵块,统计产卵量,观察卵的孵化率。各处理第 1 代幼虫化蛹、羽化后成虫所产的卵作为各处理的第 2 代虫源,依此类推,直至第 5 代成虫羽化止。

1.4 铅对甜菜夜蛾卵巢发育的影响

甜菜夜蛾卵巢在羽化后 2~3 d 发育最充分(马俊等,2000)。据此在甜菜夜蛾羽化后 60 h 用 CO_2 将雌蛾麻醉,称其体重,再用水漂洗后在 $0.02\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ PBS 缓冲液(NaCl 8.0 g、KCl 0.2 g、 KH_2PO_4 0.2 g、 Na_2HPO_4 3.0 g,加水定容至 500 mL)中进行解剖,获得甜菜夜蛾卵巢小管,切断牵连卵巢的组织后用镊子轻轻将卵巢管拉出体外,再用滤纸小心吸去表面水分,称量卵巢鲜重,计算生殖腺指数(Ohtomi and Sakata, 2006)。

生殖腺指数(GSI)(%) = (生殖腺重 ÷ 虫体重) × 100。

1.5 试验数据的统计分析

将甜菜夜蛾卵的孵化率、生殖腺指数等百分率经反正弦平方根转换后进行单因素方差分析,再以 Tukey 法进行差异显著性比较。DPSv7.05 版本统计软件进行统计分析,并以 Office 办公软件 Excel 和 Word 为辅助工具。

2 结果与分析

2.1 铅胁迫对甜菜夜蛾雌性比的影响

研究发现,随着饲养世代的延续,甜菜夜蛾的雌雄比开始出现分化,且呈现浓度优势现象。总的表现为较高浓度的铅刺激提高了雌蛾比例。第 1 代和第 2 代,最高浓度(76.8 mg/kg)铅处理后,甜菜夜蛾的雌性比上升,但与对照相比没有显著差异($P>0.05$);到了第 3 代,该处

理的甜菜夜蛾雌雄比已显著高于对照处理 ($F=8.60, df=3, 11, P=0.007$), 雌蛾比达到 60%, 到了第 4 代, 较高浓度的铅处理 (4.8 mg/kg) 也显著提高了甜菜夜蛾的雌雄比, 与其它处理和对照均存在显著差异 ($F=29.39, df=3, 11,$

$P=0.001$), 雌蛾占比高达 64% 左右; 但到了第 5 代各处理间的雌雄比与对照又无差异 ($P>0.10$), 较低浓度铅处理 (0.3 mg/kg) 的甜菜夜蛾雌雄比连续 5 代与对照相比均无显著差异 ($P>0.05$) (图 1)。

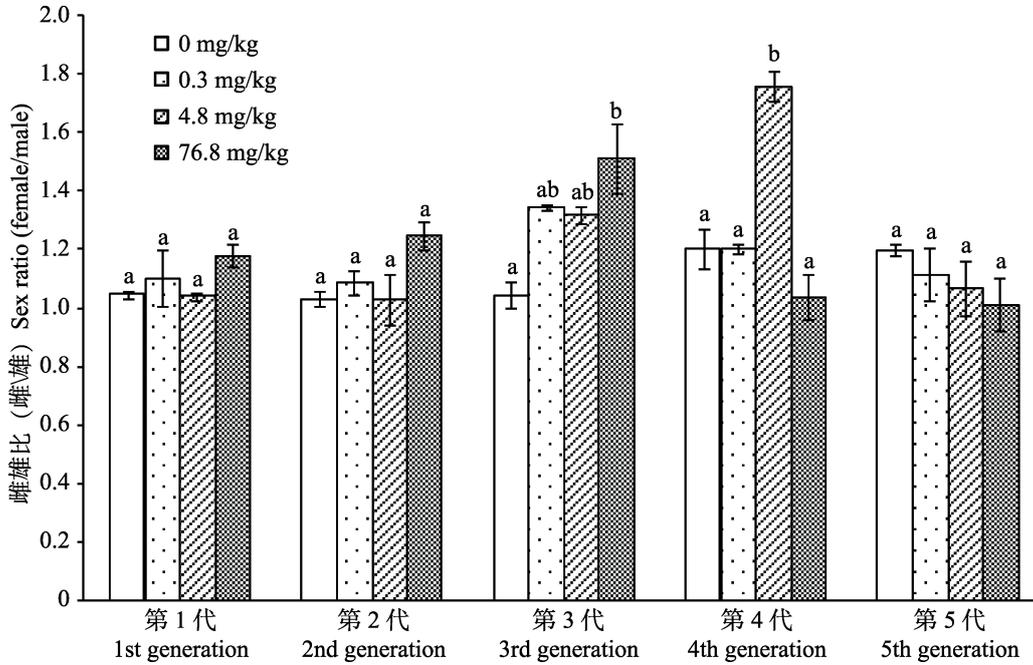


图 1 不同浓度的 Pb²⁺胁迫对连续 5 代甜菜夜蛾成虫雌雄比的影响
 Fig. 1 Effect of different concentrations of lead on sex ratio of *Spodoptera exigua*

柱上标有不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。下同。

Histograms with different letters indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

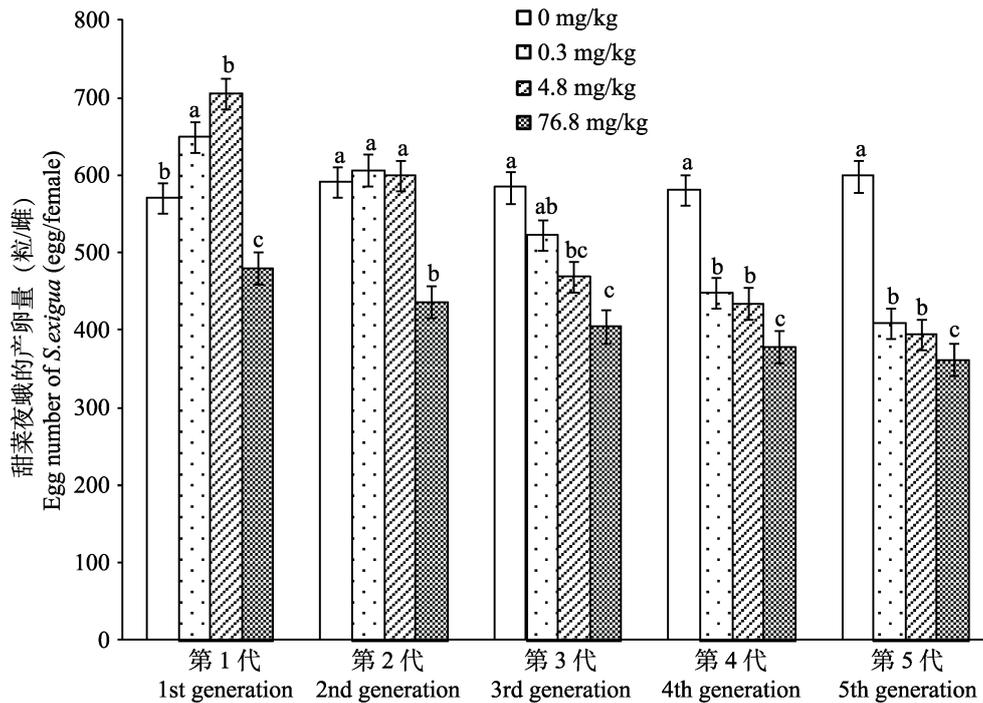
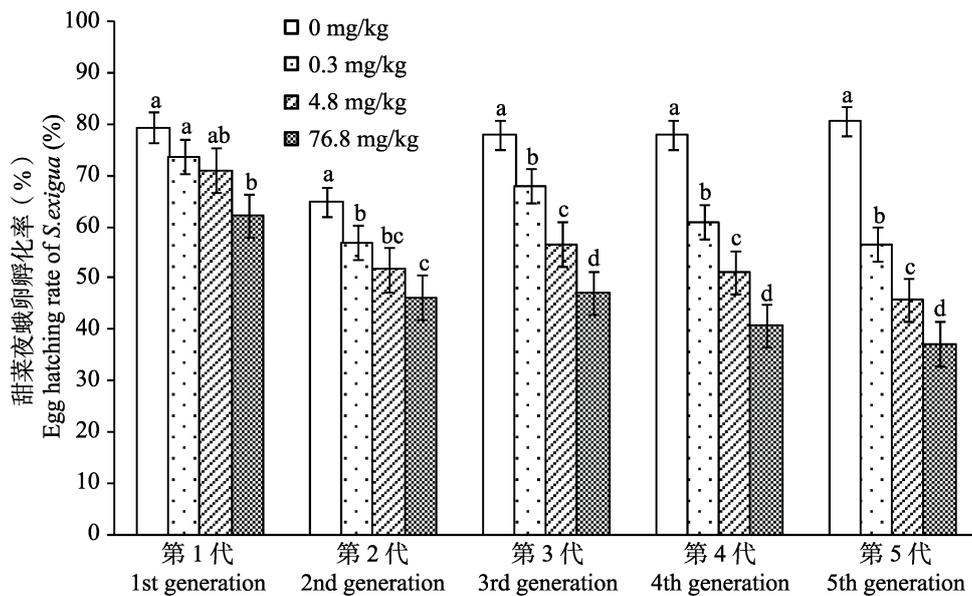
2.2 铅胁迫对甜菜夜蛾单雌产卵量的影响

研究发现, 甜菜夜蛾在较低浓度 (0.3 mg/kg) 的铅胁迫下, 短时间内能提高甜菜夜蛾的产卵量, 如第 1 代甜菜夜蛾的产卵量比对照多 80 粒左右, 但随着世代延续和铅浓度的提高均表现为抑制产卵。如第 4 代和第 5 代, 不管是低浓度还是高浓度的铅处理均显著降低甜菜夜蛾的产卵量, 且与对照存在显著差异 ($F_4=19.22, df=3, 119, P=0.001; F_5=32.23, df=3, 119, P=0.001$), 铅浓度为 4.8 mg/kg 和 76.8 mg/kg 两个处理组的单雌产卵量与对照相比均下降明显, 其中高浓度处理组 (76.8 mg/kg) 的产卵量连续 5 个世代都比对照显著降低 ($F_1=14.97, df=3, 119, P=0.001; F_2=12.08, df=3, 119, P=0.001; F_3=13.41, df=3, 119, P=0.001; F_4=19.22,$

$df=3, 119, P=0.001; F_5=32.23, df=3, 119, P=0.001$) (图 2)。

2.3 铅胁迫对甜菜夜蛾后代卵孵化率的影响

随着铅处理浓度的上升和饲养世代的延续, 甜菜夜蛾后代的卵孵率均呈明显下降趋势 (图 3)。高浓度 (76.8 mg/kg) 处理组, 甜菜夜蛾连续 5 代的卵孵率均显著低于对照 ($F_1=6.61, df=3, 119, P=0.004; F_2=21.48, df=3, 119, P=0.001; F_3=28.57, df=3, 119, P=0.001; F_4=43.95, df=3, 119, P=0.001; F_5=72.13, df=3, 119, P=0.001$), 特别是第 5 代, 处理组卵的孵化率仅为对照组的 46.2%。铅浓度为 4.8 mg/kg 和 0.3 mg/kg 两个处理组, 从第 2 代开始卵孵率显著低于对照。研究还发现, 即使是最低浓度 (0.3 mg/kg) 的铅刺激甜菜夜蛾后, 卵的孵化率也基本呈逐代下降趋势。

图 2 不同浓度的 Pb^{2+} 胁迫对连续 5 代甜菜夜蛾产卵量的影响Fig. 2 Effect of different concentrations of lead on egg number of *Spodoptera exigua*图 3 不同浓度的 Pb^{2+} 胁迫对连续 5 代甜菜夜蛾卵孵化率的影响Fig. 3 Effect of different concentrations of lead on egg hatching rate of *Spodoptera exigua*

2.4 铅胁迫对甜菜夜蛾雌蛾生殖腺指数的影响

与单雌产卵量相似, 甜菜夜蛾在低浓度的铅胁迫后, 短时间内能增加雌蛾卵巢重量, 如 0.3 mg/kg 和 4.8 mg/kg 两个处理, 第 1、2 代的生殖腺指数均比对照组高。但随着饲养世代的延续抑制作用开始显现: 如 0.3 mg/kg 处理第 4 代

和第 5 代的生殖腺指数与对照相比均显著下降 ($F_4=8.66$, $df=3, 119$, $P=0.001$, $F_5=14.57$, $df=3, 119$, $P=0.001$), 4.8 mg/kg 处理第 3 代的生殖腺指数也明显下降。同时, 卵巢发育与铅浓度也密切相关。如最高浓度处理组 (76.8 mg/kg) 各代的生殖腺指数均显著低于对照 ($P<0.01$) (表 1)。

表 1 不同浓度的 Pb^{2+} 胁迫下甜菜夜蛾雌蛾 5 个世代的生殖腺指数 (%)Table 1 The production gland index of *Spodoptera exigua* of five generations in different concentration of lead (%)

饲料中铅的浓度 (mg/kg) Concentration of lead in artificial diet (mg/kg)	0	0.3	4.8	76.8
第 1 代 1st generation	2.88 ± 0.09 b	3.28 ± 0.15 ab	3.57 ± 0.15 a	2.43 ± 0.12 c
第 2 代 2nd generation	2.99 ± 0.09 a	3.07 ± 0.13 a	3.03 ± 0.28 a	2.21 ± 0.11 b
第 3 代 3rd generation	2.95 ± 0.10 a	2.64 ± 0.11 ab	2.37 ± 0.25 bc	2.05 ± 0.10 c
第 4 代 4th generation	2.94 ± 0.08 a	2.27 ± 0.09 b	2.20 ± 0.25 b	1.92 ± 0.10 c
第 5 代 5th generation	3.03 ± 0.09 a	2.07 ± 0.08 b	1.99 ± 0.24 b	1.83 ± 0.09 b

表中数据为平均数 ± 标准误, 数字后标有不同小写字母示同一世代不同浓度间差异显著 ($P < 0.05$)。

Data in the table are mean ± SD, and followed by different letters in the same generation and between different concentration of lead indicate significant difference at 0.05 level ($P < 0.05$).

3 结论与讨论

前人研究发现, 重金属对昆虫个体发育和种群增长的影响呈现剂量效应: 表现为低浓度促进、高浓度抑制。对于昆虫种群的生长发育, 低浓度的重金属处理导致幼虫存活率显著提高, 幼虫增重, 发育速率加快, 甚至雌成虫的寿命延长; 而高浓度的处理则导致幼虫与蛹历期延长, 成虫寿命缩短, 幼虫、蛹及羽化的成虫体重降低, 呼吸速率下降; 幼虫、蛹和成虫的存活率随金属离子浓度的升高而降低 (孙虹霞等, 2007a, 2007b, 2008, 2010; Agnieszka, 2008; 张育平, 2011; Huang *et al.*, 2012; 胡蒙蒙等, 2014)。在昆虫种群增长方面, 低浓度的重金属刺激能促进种群增长, 高浓度处理却导致后代数量显著减少, 内禀增长率 (r_m) 和净繁殖速率 (R_0) 降低, 种群翻倍时间 (DT) 延长 (Huang *et al.*, 2012; Gao *et al.*, 2012; Su *et al.*, 2014)。重金属对自然界中包括昆虫在内的无脊椎动物群落的影响也是如此, 远离 (无重金属污染) 和靠近 (重金属重度污染) 重金属污染源采样点的物种丰富度 (Species richness) 与群落丰度 (Abundance) 都显著低于中间采样点 (轻-中度重金属污染) (Eeva *et al.*, 2010; Zvereva and Mikhaid, 2010; Babin-Fenske *et al.*, 2011)。由此可见, 环境中低、高浓度的重金属污染可以促进昆虫生长发育与种群增长向两个相反的方向

向发展。本文研究结果也显示, 在高浓度铅胁迫或长期、多代的铅胁迫条件下, 与甜菜夜蛾生殖力有关的参数指标也基本表现为低浓度和短时间的铅污染能促进甜菜夜蛾生殖力的提高, 高浓度、多世代的铅胁迫, 则抑制了甜菜夜蛾的生殖力。当然, 高浓度的铅刺激为什么会诱导甜菜夜蛾雌性比例上升, 个中原因有待深入探讨。

调查发现, 上海市郊蔬菜中重金属铅平均含量已达到 0.542 mg/kg, 对照国家食品安全标准 (GB2762-2005), 超标率为 38.12% (张焕焕, 2015); 广东东莞市、陕西西安市、天津市和浙江丽水市蔬菜中铅含量均超标 (梁巧玲等, 2013; 张焕焕, 2015)。本研究以国家食品安全标准 (GB2762-2005) 中规定的对球茎类蔬菜中 Pb 含量标准 (0.3 mg/kg) 作为甜菜夜蛾人工饲料中铅的最低浓度, 以本课题组前人的研究结果为参照 (胡蒙蒙等, 2014), 设置梯度为超标 16 倍、包括对照在内的 4 个浓度梯度 (0、0.3、4.8、76.8 mg/kg), 通过幼虫期全龄添食不同浓度梯度的 $Pb(NO_3)_2$ 对甜菜夜蛾进行铅暴露, 连续胁迫 5 个世代, 系统研究铅对雌蛾生长发育的影响。结果表明在高浓度铅胁迫或长期、多代的铅胁迫下, 与甜菜夜蛾生殖力有关的参数指标均出现了大幅度波动。由此说明重金属污染对像甜菜夜蛾这样的无脊椎动物的影响也是明显的。当然, 在自然界中, 像铅污染浓度达到 76.8 mg/kg 的土壤类型目前还不是太多, 但是从已有的研究材料

看,昆虫体内富集重金属的能力和耐受力是很强的,表现为植食性昆虫(3.17~20.04 mg/kg) < 杂食性昆虫(1.45~48.72 mg/kg) < 肉食性昆虫(3.68~56.27 mg/kg)(张仲胜等, 2009), 这暗示较低浓度的重金属污染对昆虫的表现影响也许很难显现。当然在今后的研究设计中,以0.3 mg/kg为基限,设计4倍或8倍的系列浓度再进行系统探讨,会使研究结果更加贴近实际。

生殖腺指数(GSI)是反映某种生物性成熟度的一个重要指标,常用来衡量卵巢发育的程度。本研究发现,低浓度(0.3 mg/kg)的铅处理,短时间内能使甜菜夜蛾卵巢增重,产卵量提高,但随着多代刺激后抑制作用开始显现;高浓度(4.8 mg/kg、76.8 mg/kg)处理显著降低生殖腺指数、产卵量降低。在铅胁迫下,甜菜夜蛾后代卵的孵化率亦随着铅处理浓度的上升和世代的延续而线性下降。胡蒙蒙等(2014)研究发现,低浓度的 Pb^{2+} 胁迫促进甜菜夜蛾的种群增长,高浓度胁迫后种群增长衰退;随着重金属的持续胁迫,其种群衰退更明显。而这种种群增长或受抑的原因主要与甜菜夜蛾幼虫的死亡率、化蛹率和羽化率上升或下降有关。本文研究指出,较高浓度的铅胁迫还能影响甜菜夜蛾的生殖腺指数和产卵量及卵的孵化率。由此可见,重金属Pb对甜菜夜蛾种群增长的影响涉及多个方面。然而,对甜菜夜蛾产卵量与卵孵化率的影响是由于前期幼虫发育受阻产生的后效应、还是由于重金属能直接对成虫的卵巢发育过程产生影响,还有待于深入分析;铅刺激是抑制了甜菜夜蛾的卵巢发育、还是过度促进了该虫的卵巢发育,也值得深入研究。

甜菜夜蛾现已成为长江中下游地区蔬菜等作物上的重要害虫,一旦暴发,对蔬菜作物的产量和品质的影响将是灾难性的,甚至影响到城市居民的“菜篮子”。由于大多数露天蔬菜作物是生长在极易被污染的土壤环境中,一旦生长蔬菜的土壤被重金属污染,甜菜夜蛾就很容易成为积蓄与传递这些污染物的重要介体。为此,本文采用人工饲养中添加重金属的方法饲喂甜菜夜蛾多个世代,检测对该虫生殖力参数的影响。通过

检测被重金属污染的昆虫以及昆虫被污染的程度,作为环境污染的指示物,两者之间如何关联还有待进一步阐明。研究还发现,低剂量和1、2个世代的铅刺激,难以判断对甜菜夜蛾的生殖力参数有明显的影 响,甚至出现促进该虫种群增长的假象。这说明低浓度的重金属污染对昆虫种群增长的影响是一个长期累积的过程,需要多个世代的连续检测。

参考文献 (References)

- Agnieszka JB, Ryszard L, 2008. Effects of nickel and temperature on the ground beetle *Pterostichus oblongopunctatus* (Coleoptera: Carabidae). *Ecotoxicology*, 17(3): 189–198.
- Babin-Fenske J, Anand M, 2011. Patterns of insect communities along a stress gradient following decommissioning of a Cu-Ni smelter. *Environmental Pollution*, 159(10): 3036–3043.
- Eeva T, Rainio K, Suominen O, 2010. Effects of pollution on land snail abundance, size and diversity as resources for pied flycatcher, *Ficedula hypoleuca*. *Science Total Environment*, 408(19): 4165–4169.
- Gao H, Zhao H, Du C, 2012. Life table evaluation of survival and reproduction of the aphid, *Sitobion avenae*, exposed to cadmium. *Journal of Insect Science*, 12(44): 44.
- Hu MM, 2013. Accumulation and excretion activities of lead and cadmium in *Spodoptera exigua* (Hübner) and the effect on the population increase. Master dissertation. Yangzhou: Yangzhou University. [胡蒙蒙, 2013. Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 在甜菜夜蛾体内的积累与排泄及对种群增长的影响. 硕士学位论文. 扬州: 扬州大学.]
- Hu MM, Cai WC, Su HH, 2014. Accumulation of lead in *Spodoptera exigua* (Hübner) and its impact on the population. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25(4): 1145–1150. [胡蒙蒙, 蔡文宸, 苏宏华, 2014. Pb^{2+} 在甜菜夜蛾体内的积累及对种群的影响. 应用生态学报, 25(4): 1145–1150.]
- Huang D, Kong J, Seng Y, 2012. Effects of the heavy metal Cu^{2+} on growth, development, and population dynamics of *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae). *Journal Economic Entomology*, 105(1): 288–294.
- Li TW, Yang CZ, He JX, 2001. The artificial diet and the mass rearing method of *Spodoptera exigua*. *Entomological Knowledge*, 38(5): 383–386. [李腾武, 杨崇珍, 何将绪, 2001. 甜菜夜蛾人工饲料及饲养技术研究. 昆虫知识, 38(5): 383–386.]
- Liang QL, Yang H, Zhao L, 2013. Analysis of heavy metal contents in vegetables of Lishui Suburb and the health hazard. *Northern*

- Horticulture*, (12): 21–24. [梁巧玲, 杨晖, 赵鹂, 2013. 丽水市郊蔬菜重金属含量及健康风险分析. *北方园艺*, (12): 21–24.]
- Ma J, Bai LY, Chen YN, 2000. Studies on the bionomics and thermal constant of beet armyworm *Spodoptera exigua* (Hübner). *Acta Phytophylacica Sinica*, 27(3): 215–220. [马骏, 柏连阳, 陈永年, 2000. 甜菜夜蛾生态学特性研究. *植物保护学报*, 27(3): 215–220.]
- Ohtomi J, Sakata R, 2006. Reproductive biology of the grenadier *Coelocinchus jordani* (Gadiformes, Macrouridae) in Kagoshima Bay, southern Japan. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 72(2): 210–216.
- Su HH, Hu MM, Harvey-samuel T, Yang YZ, 2014. Accumulation and excretion of cadmium in three successive generations of *Spodoptera exigua* (Hübner) and impact on the population increase. *Journal Economic Entomology*, 107(1): 223–229.
- Sun HX, Liu Y, Zhang GR, 2007. Effects of heavy metal pollution on insects. *Acta Entomologica Sinica*, 50(2): 178–185. [孙虹霞, 刘颖, 张古忍, 2007a. 重金属污染对昆虫生长发育的影响. *昆虫学报*, 50(2): 178–185.]
- Sun HX, Shu YH, Tang WC, Wang Q, Zhou Q, Zhang GR, 2007. Ni²⁺ continuous stress resulting in *Spodoptera litura* in vivo accumulation and reduced survival. *Chinese Science Bulletin*, 52(12): 1413–1418. [孙虹霞, 舒迎花, 唐文成, 王祺, 周强, 张古忍, 2007b. 重金属 Ni²⁺连续胁迫导致其在斜纹夜蛾体内积累并降低存活率. *科学通报*, 52(12): 1413–1418.]
- Sun HX, Xia Q, Zhou Q, Zhang GR, 2008. Accumulation and excretion of nickel in *Spodoptera litura* Fabricius larvae fed on diets with Ni²⁺. *Acta Entomologica Sinica*, 51(6): 569–574. [孙虹霞, 夏婧, 周强, 张古忍, 2008. 斜纹夜蛾幼虫对食物中重金属 Ni²⁺的积累与排泄. *昆虫学报*, 51(6): 569–574.]
- Sun HX, Xia Q, Tang WC, Zhang GR, Dang Z, 2010. Regulation of energy reserves in the hemolymph of *Spodoptera litura* Fabricius larvae under nickel stress. *Acta Entomologica Sinica*, 53(4): 361–368. [孙虹霞, 夏婧, 唐文成, 张古忍, 党志, 2010. Ni²⁺胁迫对斜纹夜蛾幼虫血淋巴中能量物质水平的适应性调节. *昆虫学报*, 53(4): 361–368.]
- Xu SQ, Li YM, 2010. Effects of heavy metal lead on activity of glutathione S-transferase and glutathione peroxidase and on expression of related genes in tissues of *Bombyx mori*. *Science of Sericulture*, 37(3): 425–434. [徐世清, 李艳梅, 2010. 重金属铅暴露对家蚕组织 GSTs 和 GSH-Px 酶活力及基因表达的影响. *蚕业科学*, 37(3): 425–434.]
- Zhang HH, 2015. Pollution effects of heavy metals in dry deposition on soil-vegetable system in suburban Shanghai. Master dissertation. Shanghai: East China Normal University. [张焕焕, 2015. 上海市郊大气重金属干沉降对土壤—叶菜系统的污染效应. 硕士学位论文. 上海: 华东师范大学.]
- Zhang YP, Zhang G, Wang Y, Yang HM, 2011. Cadmium and chromium accumulation in the tissues of the Chinese rice grasshopper, *Oxya chinensis*. *Journal of Agro-Environment Science*, 30(12): 2440–2445. [张育平, 孙鸽, 王跃, 杨慧敏, 2011. 重金属镉和铬在中华稻蝗(*Oxya chinensis*)体内的组织分布. *农业环境科学学报*, 30(12): 2440–2445.]
- Zhang ZS, Wang QC, Lv XG, 2009. Heavy metal contents in insects collected from the huludao city suffering pollution by zinc smelting and chlor-alkali production. *Environmental Science*, 30(7): 2077–2081. [张仲胜, 王起超, 吕宪国, 2009. 锌冶炼-氯碱复合污染区昆虫中的重金属. *环境科学*, 30(7): 2077–2081.]
- Zvereva LE, Mikhail VK, 2010. Responses of terrestrial arthropods to air pollution: a meta-analysis. *Environmental Science Pollution Res.*, 17(2): 297–311.