

# 重金属 $\text{Ni}^{2+}$ 对亚洲玉米螟生长发育和生殖行为的影响

曹红妹, 郑丽霞, 魏洪义\*

(江西农业大学农学院, 南昌 330045)

**摘要:** 【目的】探索农田重金属  $\text{Ni}^{2+}$  污染对植食性昆虫潜在的影响。【方法】在人工饲料中添加不同浓度(1, 5, 10, 15 和 20 mg/kg)的重金属  $\text{Ni}^{2+}$ , 以不添加重金属的人工饲料为对照, 实验室条件下饲养亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis* (Guenée) 初孵幼虫, 系统观察其各项生长发育和生殖行为指标参数。【结果】 $\text{Ni}^{2+}$  对亚洲玉米螟幼虫期、蛹期、化蛹率和羽化率有抑制作用; 对亚洲玉米螟雌蛹重有促进作用, 但随  $\text{Ni}^{2+}$  浓度的升高而逐渐减弱; 低浓度  $\text{Ni}^{2+}$  (1 ~ 10 mg/kg) 对雄蛹重有促进作用, 高浓度  $\text{Ni}^{2+}$  (15 ~ 20 mg/kg) 对雄蛹重有抑制作用。随着  $\text{Ni}^{2+}$  浓度的增加, 亚洲玉米螟雌蛾平均求偶持续时间逐渐减小; 1 mg/kg  $\text{Ni}^{2+}$  浓度下雌蛾求偶率及求偶高峰期出现的时间与对照组基本一致, 其余 4 个  $\text{Ni}^{2+}$  浓度都对雌蛾求偶行为产生影响且表现为求偶高峰期出现的时间提前, 最高求偶率均小于 100%。5 mg/kg  $\text{Ni}^{2+}$  对亚洲玉米螟雄蛾定向行为有促进作用, 其余浓度则表现为抑制作用。 $\text{Ni}^{2+}$  对亚洲玉米螟雌蛾的产卵量和卵孵化率均产生了显著的抑制作用。【结论】重金属  $\text{Ni}^{2+}$  对亚洲玉米螟的生长发育和生殖行为产生了影响。

**关键词:** 亚洲玉米螟; 重金属; 镍离子; 生长发育; 求偶行为; 定向行为; 产卵量; 卵孵化率

中图分类号: Q968 文献标识码: A 文章编号: 0454-6296(2015)06-0650-08

## Effects of heavy metal $\text{Ni}^{2+}$ on the development and reproductive behavior of *Ostrinia furnacalis* (Lepidoptera: Pyralidae)

CAO Hong-Mei, ZHENG Li-Xia, WEI Hong-Yi\* (College of Agronomy, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

**Abstract:** 【Aim】 This study aims to explore the potential impacts of heavy metal nickel ( $\text{Ni}^{2+}$ ) in polluted farmlands on herbivorous insects. 【Methods】 Neonate larvae of the Asian corn borer (ACB), *Ostrinia furnacalis* (Guenée), were fed with the artificial diet containing heavy metal  $\text{Ni}^{2+}$  at different concentrations (1, 5, 10, 15 and 20 mg/kg) or without any heavy metal (as the control) under laboratory conditions. The parameters of development and reproductive behaviors were systematically investigated. 【Results】 Heavy metal  $\text{Ni}^{2+}$  exhibited inhibitory effects on the larval and pupal duration, pupation rate and emergence rate of *O. furnacalis*. However,  $\text{Ni}^{2+}$  promoted the female pupal weight, and this promoting effect gradually decreased with the increasing  $\text{Ni}^{2+}$  concentrations. The pupal weight of male larvae exposed to the low concentrations of  $\text{Ni}^{2+}$  (1–10 mg/kg) was higher than that of the control, while the pupal weight of male larvae exposed to the high concentrations of  $\text{Ni}^{2+}$  (15–20 mg/kg) was lower than that of the control. The average calling duration of female adults gradually declined with the  $\text{Ni}^{2+}$  concentration. The calling rate of female adults exposed to  $\text{Ni}^{2+}$  and their calling peak time were basically similar to those of the control group, but were affected by the four higher concentrations. In the treatments of the four higher concentrations, the calling peak time appeared earlier and the highest calling rate of female adults was less than 100%.  $\text{Ni}^{2+}$  at the concentration of 5 mg/kg had the promoting effects

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划课题(2012BAD14B14)

作者简介: 曹红妹, 女, 1989 年生, 江西九江人, 硕士研究生, 研究方向为昆虫化学生态及害虫综合防治, E-mail: 1056562610@qq.com

\* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: hywei@jxau.edu.cn

收稿日期 Received: 2015-01-26; 接受日期 Accepted: 2015-04-26

on the orientation behavior of male adults, while the remaining four concentrations of  $\text{Ni}^{2+}$  exhibited the inhibitory effects. All the concentrations of  $\text{Ni}^{2+}$  showed the significantly inhibitory effects on the oviposition and egg hatchability of *O. furnacalis*. 【Conclusion】 The development and reproductive behaviors of *O. furnacalis* are affected by the heavy metal  $\text{Ni}^{2+}$ , and there exists a dose-response relationship that the partial indicator parameters change with the increasing  $\text{Ni}^{2+}$  concentrations (except 5 mg/kg).

**Key words:** *Ostrinia furnacalis*; heavy metal;  $\text{Ni}^{2+}$ ; development; calling behavior; orientation behavior; fecundity; egg hatchability

镍(Ni)是生物必需的微量元素之一,也是具有潜在毒性的元素。如土壤中微量的  $\text{Ni}^{2+}$  可以刺激植物生长,过量的  $\text{Ni}^{2+}$  能阻滞植物生长发育,导致植物生长不良,对植物造成危害,甚至死亡(刘艳, 2007)。 $\text{Ni}^{2+}$  可以在植物体内积蓄,当积蓄超出正常含量的植物进入食物链时,就会影响动物乃至人类的健康(Cheng, 2003)。作为重金属的重要种类之一,关于  $\text{Ni}^{2+}$  对昆虫的生长发育的影响已有相关研究报道。如孙虹霞等(2007)发现,斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* (Fabricius) 的6龄幼虫、蛹及雌雄成虫体内的  $\text{Ni}^{2+}$  积累量随胁迫世代和  $\text{Ni}^{2+}$  浓度的增加而增加并表现出显著的剂量-反应关系;同时,不同世代斜纹夜蛾幼虫的存活率、化蛹率及成虫羽化率均随着  $\text{Ni}^{2+}$  胁迫浓度的增加而降低。 $\text{Ni}^{2+}$  可在植物中积累并通过食物链的转运对植食性昆虫的生长发育产生影响。通常,这些植食性昆虫受  $\text{Ni}^{2+}$  胁迫的程度与寄主植物体内重金属含量显著相关。如  $\text{Ni}^{2+}$  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、宽度及重量等均随距污染源距离的增加而增加(Heliövaara and Väisänen, 1989; Ruohomaki *et al.*, 1996)。

$\text{Ni}^{2+}$  不仅会影响蛾类昆虫的生长发育而且对蛾类昆虫的免疫力也会产生影响。例如在  $\text{Ni}^{2+}$  的胁迫作用下,蛾类昆虫体内的组织化学、生化和生理反应会发生特定的变化来防御  $\text{Ni}^{2+}$  的危害,在变化的过程中又常会间接影响能量代谢从而降低其免疫力,影响个体活性。具体表现指标为:昆虫血淋巴中能量物质总糖、血淋巴中热量值、蛋白质和脂肪的含量(孙虹霞等, 2010)。实验证明,  $\text{Ni}^{2+}$  胁迫对斜纹夜蛾幼虫血淋巴的能量物质含量及热量值的影响与能量物质的种类、虫体的发育阶段和  $\text{Ni}^{2+}$  胁迫世代等都有一定的联系(孙虹霞等, 2010)。

$\text{Ni}^{2+}$  对蛾类昆虫生殖行为的影响如何呢? 迄今为止,这个问题还未见有关研究的报道。因此,本研

究以亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis* (Guenée) 为材料,将不同浓度的  $\text{Ni}^{2+}$  添加到人工饲料中,在实验条件下,系统研究重金属  $\text{Ni}^{2+}$  对亚洲玉米螟生殖行为及生长发育的影响,以期揭示农田重金属  $\text{Ni}^{2+}$  污染对植食性昆虫可能产生的影响,为重金属污染地区虫害测报提供理论依据,也为进一步分析  $\text{Ni}^{2+}$  对亚洲玉米螟生理生化和遗传变异的影响提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试虫源

亚洲玉米螟 *O. furnacalis* 来自中国农业科学院植物保护研究所玉米螟组,孵化后在室内用人工饲料饲养建立种群。饲养条件:温度保持在  $25 \pm 1^\circ\text{C}$ ,相对湿度 60% ~ 70%,光周期 14L: 10D。选其中一代成虫产卵,将孵化出的幼虫作为实验用虫。

### 1.2 重金属试剂

氯化镍( $\text{NiCl}_2$ ),溶于蒸馏水中制成母液,配成系列梯度浓度(梯度比值为 1:10),置于冰箱中备用。

### 1.3 试虫处理

参考相关文献报道(许桂芬和白羽军, 2007; 金波和马辰, 2013; 张继荣等, 2013; 沈洪艳等, 2014)确定镍的浓度范围及浓度梯度,配制含有镍的人工饲料。选取个体大小一致、生长发育正常的亚洲玉米螟初孵幼虫接入含不同浓度镍的人工饲料和对照正常饲料中取食,每个浓度设 4 组,每组 30 头初孵幼虫。处理后 24, 48 和 72 h 时各观察一次存活情况,以触动虫体无反应者为死亡个体。最终确定幼虫死亡率在 10% ~ 30% 之间的浓度(1, 5, 10, 15 和 20 mg/kg)为实验浓度。

### 1.4 亚洲玉米螟生长发育测定

将同一天孵化的亚洲玉米螟初孵幼虫接入配好的含 1, 5, 10, 15 和 20 mg/kg  $\text{Ni}^{2+}$  和对照(不添加  $\text{Ni}^{2+}$ )的人工饲料(乔利等, 2008),并用 500 mL 塑料养虫盒饲养,每个处理饲养 3 盒,每盒饲养密度

100 ~ 150 头,每天更换不同处理的新鲜饲料。每个处理的孵化幼虫生长至老熟幼虫时各挑取 200 头到 24 孔板中,作为生长发育测试研究对象,每处理 50 头幼虫为一重复,重复 4 次。每天观察记录亚洲玉米螟的发育进度,最终统计以下生长发育参数:幼虫历期、蛹重、蛹历期、成虫寿命、化蛹率和羽化率。

### 1.5 亚洲玉米螟雌蛾求偶行为的观察

求偶行为的观察在暗室内进行(光周期为 14L:10D,温度  $25 \pm 1^\circ\text{C}$ ,相对湿度 60% ~ 70%)。判断雌蛾正在求偶的标准是产卵器外伸,持续暴露其性信息素腺体。暗期开始前 1 h 左右将新羽化的雌蛾单头置于 200 mL 的塑料杯内,并将塑料杯置于单个培养皿上,杯内放入浸有 10% 蔗糖水的脱脂棉球,以供雌蛾补充营养。暗期开始后,每隔 30 min,通过红光手电筒照明,观察记录塑料杯内雌蛾的求偶情况,直至暗期结束,求偶行为观察持续时间为暗期开始到暗期结束期间的 10 h。每处理 10 头雌蛾为一重复,重复 3 次,连续观察 6 个暗期。

### 1.6 亚洲玉米螟雄蛾定向行为的观察

定向行为的观察在暗室内的风洞装置中进行(光周期为 14L:10D,温度  $25 \pm 1^\circ\text{C}$ ,相对湿度 60% ~ 70%)。风洞为圆形,有机玻璃制,长 2 m,半径 0.5 m,风速为 0.3 m/s。风洞实验在亚洲玉米螟雌蛾求偶高峰期进行,以 10 头正常雌蛾为诱源。记录单头测试雄虫 3 min 内对气味源的识别反应,包括反应与否、反应时间、飞行方向、飞行距离及降落接近或至信息素源与否。每处理每重复测试 15 头,重复 3 次。

### 1.7 亚洲玉米螟产卵量及孵化率的测定

取食含镍饲料幼虫羽化的存活成蛾(简称镍雌蛾、镍雄蛾)和取食对照正常饲料的成蛾(正常雌蛾、正常雄蛾)形成 4 种处理组合:镍雌蛾 × 镍雄蛾、镍雌蛾 × 正常雌蛾、正常雄蛾 × 镍雌蛾及正常雌蛾 × 正常雄蛾。将各组合当日羽化的每对雌雄蛾放入编号的保鲜袋(50 cm × 40 cm)中,袋内放入 1 个蘸有 10% 蔗糖水的脱脂棉球作为成虫补充营养。每种交配组合方式配对 10 对,重复 3 次。每天更换保鲜袋,直至雌蛾死亡,记录产卵量和卵孵化量。

### 1.8 数据处理

采用 SPSS17.0 软件进行统计分析。对照与处理组间及各处理组间差异的显著性采用 Duncan 氏多重比较法进行检验,显著水平设为  $P = 0.05$ 。孵化率、化蛹率、羽化率、求偶率、交配成功率以及定向行为反应中的反应率、定向率、半程率、降落接近信

息素源率和降落至信息素源率均经平方根反正弦转换后再进行统计分析。

## 2 结果

### 2.1 不同浓度 $\text{Ni}^{2+}$ 对亚洲玉米螟生长发育的影响

$\text{Ni}^{2+}$  对亚洲玉米螟幼虫和蛹的发育速度有抑制作用。随着人工饲料中  $\text{Ni}^{2+}$  浓度的增加,亚洲玉米螟幼虫和蛹历期均显著大于对照组(表 1)。其中 1 mg/kg  $\text{Ni}^{2+}$  饲养组中幼虫和蛹期在 5 个浓度中最短,20 mg/kg  $\text{Ni}^{2+}$  饲养组中的幼虫和蛹期在 5 个浓度中最长,5 mg/kg 和 10 mg/kg  $\text{Ni}^{2+}$  浓度饲养的幼虫期、蛹期无显著差异。

随着人工饲料中  $\text{Ni}^{2+}$  浓度的增加,亚洲玉米螟雌蛹和雄蛹受到不同的影响。这种影响具体表现为: $\text{Ni}^{2+}$  浓度升高对亚洲玉米螟的雌蛹重具有逐渐减小的促进作用;低浓度(1 ~ 10 mg/kg)  $\text{Ni}^{2+}$  对雄蛹重有促进作用,高浓度(15 ~ 20 mg/kg)  $\text{Ni}^{2+}$  对雄蛹重有抑制作用。在 5 个  $\text{Ni}^{2+}$  浓度饲养组中雌蛹重均显著大于对照组,1 mg/kg 浓度下的雌蛹重值最大为 0.071 g,随着  $\text{Ni}^{2+}$  浓度的增加雌蛹重逐渐减少;雄蛹重以 5 mg/kg 浓度下的 0.047 g 为最大,并与对照组存在显著差异,1 mg/kg 和 10 mg/kg 浓度下的雄蛹重值均大于对照组但差异不显著,15 mg/kg 和 20 mg/kg 的雄蛹重值之间无显著差异,但都显著小于对照组。

$\text{Ni}^{2+}$  对亚洲玉米螟幼虫化蛹率和蛹羽化率具有显著的抑制作用。亚洲玉米螟的化蛹率和羽化率都随着人工饲料中  $\text{Ni}^{2+}$  浓度的增加而减少。5 个浓度处理下的化蛹率和羽化率均显著小于对照,其中以 20 mg/kg  $\text{Ni}^{2+}$  对亚洲玉米螟的化蛹率和羽化率的抑制作用最为显著,分别为 92.82% 和 80.23%,与对照组相比分别降低了 5.61% 和 15.22%。

### 2.2 不同浓度 $\text{Ni}^{2+}$ 对亚洲玉米螟雌蛾求偶行为的影响

**2.2.1 求偶率:**亚洲玉米螟幼虫取食含重金属  $\text{Ni}^{2+}$  的人工饲料后,存活雌蛾的求偶率受到一定的影响(图 1, 2),具体影响表现为 2 个方面,即:存活雌蛾求偶高峰期持续的时间段发生改变,最高求偶率小于 100%。从求偶高峰期持续的时间段来看(图 1),各浓度下各暗期的存活雌蛾求偶高峰期持续的时间段与对照组并未都保持一致,例如,与在第 1 个暗期中对照组雌蛾求偶高峰期出现的时间及持续时间段为暗期开始后的第 8 ~ 9.5 小时(共 2.0 h)相比,

表 1 不同 Ni<sup>2+</sup> 浓度下亚洲玉米螟生长发育指标参数Table 1 Developmental parameters of *Ostrinia furnacalis* fed with the artificial diet containing different concentrations of Ni<sup>2+</sup>

Ni <sup>2+</sup> 浓度 (mg/kg) Ni <sup>2+</sup> concentration	幼虫历期 (d) Larval duration	化蛹率 (%) Pupation rate	蛹重 Pupal weight (g)		蛹历期 (d) Pupal duration	羽化率 (%) Emergence rate
			雌 Female	雄 Male		
0 (CK)	16.34 ± 0.06 d	98.43 ± 0.96 a	0.061 ± 0.009 d	0.047 ± 0.001 b	6.36 ± 0.05 e	95.45 ± 1.31 a
1	17.04 ± 0.01 c	97.63 ± 0.95 b	0.071 ± 0.001 a	0.047 ± 0.001 b	7.25 ± 0.07 d	86.80 ± 2.00 c
5	17.84 ± 0.10 b	97.03 ± 1.29 b	0.067 ± 0.014 b	0.053 ± 0.001 a	7.52 ± 0.06 c	92.90 ± 3.85 b
10	17.56 ± 0.08 b	95.10 ± 2.35 c	0.068 ± 0.001 b	0.046 ± 0.001 b	7.42 ± 0.06 c	88.65 ± 1.86 c
15	17.92 ± 0.09 ab	92.88 ± 0.45 d	0.063 ± 0.001 c	0.043 ± 0.001 c	8.04 ± 0.06 b	82.80 ± 1.62 d
20	18.04 ± 0.11 a	92.82 ± 2.03 d	0.063 ± 0.001 c	0.042 ± 0.001 c	8.61 ± 0.04 a	80.23 ± 2.69 d

表中数据为平均值 ± 标准误 (样本重复 n = 4); 同列数据后字母不相同表示经 Duncan 氏多重比较检验差异显著 ( $P < 0.05$ )。Values in the table are means ± SE (sample replicates n = 4), and those in the same column followed by different letters are significantly different ( $P < 0.05$ , ANOVA followed by Duncan's new multiple range test).

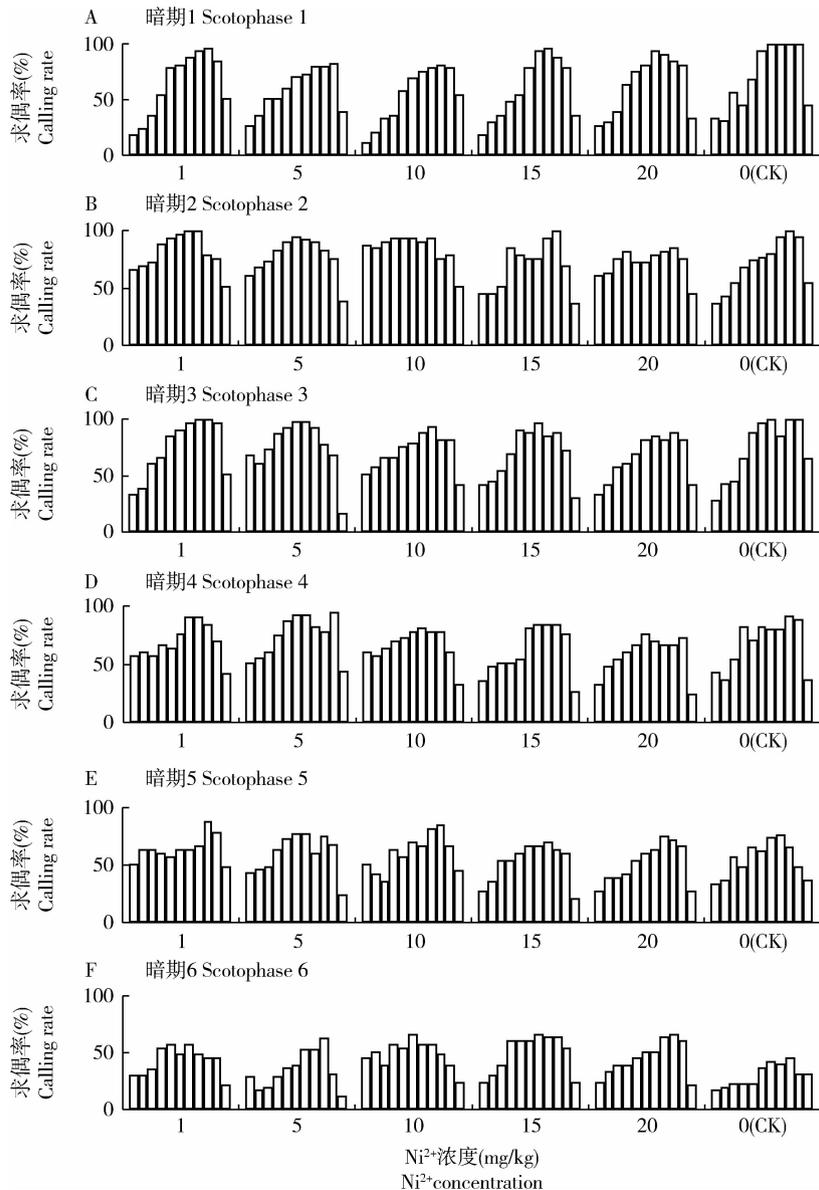
图 1 不同 Ni<sup>2+</sup> 浓度下亚洲玉米螟雌蛾求偶率

Fig. 1 Calling rate of female adults of *Ostrinia furnacalis* fed with the artificial diet containing different concentrations of Ni<sup>2+</sup>. 柱形图表示进入暗期后第 5 - 10 h 的求偶率, 即: 第 1 根柱子表示暗期第 5 小时的求偶率, 第 2 根柱子表示暗期第 5.5 小时的求偶率, 以此类推, 每 30 min 记录 1 次。Bars represent the female calling rate from the 5th to 10th hour after the initiation of scotophase, the 1st bar indicates the calling rate at the 5th hour of the dark period, the 2nd indicates the calling rate at the 5.5th hour of the dark period, ..., and so on, recording in a 30 min interval throughout the 10 h scotophase.

1~20 mg/kg 浓度下的雌蛾求偶高峰期出现的时间依次为暗期开始后的第 9, 9.5, 8.5 和 8 小时, 持续时间均仅为 0.5 h; 从最高求偶率来看, 与对照组雌蛾在 6 个暗期中最高求偶率为 100% 相比(图 2), 10 和 20 mg/kg 浓度下的雌蛾最高求偶率最低, 均为 93.9%, 5 和 15 mg/kg 浓度下的存活雌蛾最高求偶

率均为 97.6%。

另一方面, 在第 1-6 个暗期, 对照组和  $\text{Ni}^{2+}$  各个浓度下的雌蛾求偶率都表现为依次减少的趋势, 但在第 6 个暗期(图 1),  $\text{Ni}^{2+}$  对亚洲玉米螟的求偶率的影响最显著,  $\text{Ni}^{2+}$  各个浓度下的雌蛾求偶率显著高于对照组。

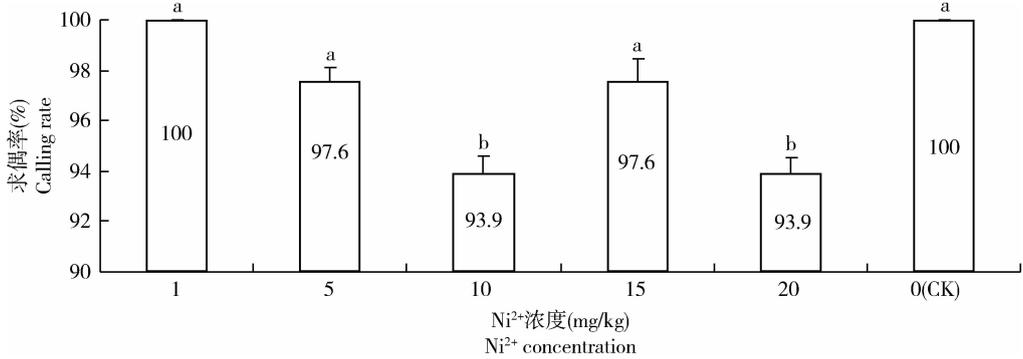


图 2 不同  $\text{Ni}^{2+}$  浓度下亚洲玉米螟雌蛾最高求偶率

Fig. 2 The highest calling rate of female adults of *Ostrinia furnacalis* fed with the artificial diet containing different concentrations of  $\text{Ni}^{2+}$

图中数据为平均值  $\pm$  标准误; 柱上不同小写字母表示经 Duncan 氏多重比较检验差异显著 ( $P < 0.05$ )。Data in the figure are means  $\pm$  SE. Bars marked by different lowercase letters indicate significant difference at the 0.05 level by Duncan's new multiple range test.

**2.2.2 求偶持续时间:** 亚洲玉米螟存活雌蛾的求偶持续时间受到  $\text{Ni}^{2+}$  的影响(表 2)。从 1~20 mg/kg, 随着人工饲料中  $\text{Ni}^{2+}$  浓度的增加, 各个浓度的亚洲玉米螟雌蛾最长平均求偶持续时间逐渐减小。与对照组雌蛾最长平均求偶持续时间为 4.89 h, 并且出现在第 3 个暗期相比, 各个浓度的最长平均求偶持续时间依次为 5.67, 5.51, 5.03, 4.33 和 4.15 h, 都提前在第 2 个暗期出现。

$\text{Ni}^{2+}$  对亚洲玉米螟存活雌蛾的求偶持续时间的影响在第 1, 2, 3 和 6 个暗期中表现得最为显著。其中第 1, 2 和 3 个暗期中的求偶持续时间受  $\text{Ni}^{2+}$  影响后与对照组都存在显著差异, 并且第 1 和 3 个

暗期的求偶持续时间都小于对照组; 第 2 个暗期中低浓度  $\text{Ni}^{2+}$  (1~10 mg/kg) 延长求偶持续时间, 高浓度  $\text{Ni}^{2+}$  (15~20 mg/kg) 缩短求偶持续时间。在第 6 个暗期,  $\text{Ni}^{2+}$  各个浓度下的亚洲玉米螟雌蛾平均求偶持续时间都高于对照组, 这一结果与前述图 2 的第 6 个暗期中  $\text{Ni}^{2+}$  各个浓度下的雌蛾求偶率显著高于对照组的情况一致, 这很可能是由于亚洲玉米螟在取食含  $\text{Ni}^{2+}$  饲料后, 一定程度上影响了雌蛾的活力, 求偶行为发生紊乱。在前 5 个暗期中, 均以 20 mg/kg 浓度下的雌蛾平均求偶持续时间最少, 与对照组存在显著性差异。因此, 可以推测高浓度  $\text{Ni}^{2+}$  (20 mg/kg) 对亚洲玉米螟求偶行为具有抑制作用。

表 2 不同  $\text{Ni}^{2+}$  浓度下亚洲玉米螟雌蛾平均求偶持续时间

Table 2 Average calling duration of female adults of *Ostrinia furnacalis* fed with the artificial diet containing different concentrations of  $\text{Ni}^{2+}$

$\text{Ni}^{2+}$ 浓度 (mg/kg)	暗期 1 (h)	暗期 2 (h)	暗期 3 (h)	暗期 4 (h)	暗期 5 (h)	暗期 6 (h)
$\text{Ni}^{2+}$ concentration	Scotophase 1	Scotophase 2	Scotophase 3	Scotophase 4	Scotophase 5	Scotophase 6
0(CK)	4.63 $\pm$ 0.33 a	4.60 $\pm$ 0.37 c	4.89 $\pm$ 0.36 a	4.44 $\pm$ 0.44 a	3.21 $\pm$ 0.36 c	1.81 $\pm$ 0.34 c
1	3.73 $\pm$ 0.36 b	5.67 $\pm$ 0.34 a	4.50 $\pm$ 0.30 ab	4.23 $\pm$ 0.38 a	3.88 $\pm$ 0.41 b	2.56 $\pm$ 0.25 ab
5	3.70 $\pm$ 0.42 b	5.51 $\pm$ 0.39 a	4.56 $\pm$ 0.40 b	4.40 $\pm$ 0.35 a	4.44 $\pm$ 0.34 a	1.88 $\pm$ 0.26 c
10	3.39 $\pm$ 0.34 c	5.03 $\pm$ 0.37 b	4.59 $\pm$ 0.46 b	4.36 $\pm$ 0.45 a	3.68 $\pm$ 0.46 b	2.92 $\pm$ 0.27 a
15	3.52 $\pm$ 0.35 b c	4.33 $\pm$ 0.38 d	4.08 $\pm$ 0.34 ac	4.33 $\pm$ 0.40 a	3.24 $\pm$ 0.44 c	2.14 $\pm$ 0.32 b
20	3.08 $\pm$ 0.30 c	4.15 $\pm$ 0.39 d	3.41 $\pm$ 0.24 d	3.33 $\pm$ 0.35 b	2.24 $\pm$ 0.39 d	1.89 $\pm$ 0.31 c

表中数据为平均值  $\pm$  标准误 (样本重复  $n=3$ ); 同列数据后字母不相同表示经 Duncan 氏多重比较检验差异显著 ( $P < 0.05$ )。表 3 同。Data in the table are means  $\pm$  SE (sample replicates  $n=3$ ), and those in the same column followed by different letters are significantly different ( $P < 0.05$ , ANOVA followed by Duncan's new multiple range test). The same for Tables 3.

## 2.3 不同浓度 Ni<sup>2+</sup> 对亚洲玉米螟雄蛾定向行为的影响

从结果(表3)分析可以看出,除 5 mg/kg 浓度的 Ni<sup>2+</sup> 对亚洲玉米螟雄蛾定向行为的各项指标表现出促进作用外,其他浓度的 Ni<sup>2+</sup> 对亚洲玉米螟雄蛾的定向行为有抑制作用。与对照组相比,在各个

Ni<sup>2+</sup> 浓度中 5 mg/kg Ni<sup>2+</sup> 浓度下的亚洲玉米螟雄蛾定向行为的各项指标值均显著大于对照组,其他 4 个浓度的反应率、定向率、半程率和降落至信息素源率都表现为随着 Ni<sup>2+</sup> 浓度升高而降低且都小于对照组;平均反应时间随着 Ni<sup>2+</sup> 浓度升高而延长。

表3 不同 Ni<sup>2+</sup> 浓度下亚洲玉米螟雄蛾定向行为

Table 3 Orientation behavior of male adults of *Ostrinia furnacalis* fed with the artificial diet containing different concentrations of Ni<sup>2+</sup>

Ni <sup>2+</sup> 浓度(mg/kg) Ni <sup>2+</sup> concentration	反应率(%) Reaction rate	定向率(%) Directional rate	平均反应时间(s) Average response time	半程率(%) Halfway to the pheromone source	降落接近信息素源率(%) Approaching the pheromone source	降落至信息素源率(%) Landing to the pheromone sources
0(CK)	79.50 ± 4.79 ab	69.81 ± 6.50 b	17.71 ± 1.38 c	62.73 ± 4.91 b	5.24 ± 1.03 b	54.23 ± 8.35 b
1	72.72 ± 3.19 b	72.55 ± 4.82 b	28.00 ± 1.26 b	52.90 ± 4.89 c	3.80 ± 0.58 c	49.10 ± 6.39 c
5	84.98 ± 2.70 a	80.49 ± 3.21 a	17.61 ± 0.78 c	67.73 ± 8.74 a	6.32 ± 0.49 a	60.68 ± 6.19 a
10	64.54 ± 3.45 bc	62.74 ± 2.49 c	37.97 ± 2.28 a	36.90 ± 7.29 d	0	34.90 ± 5.17 cd
15	58.90 ± 4.61 bc	58.82 ± 2.95 d	38.77 ± 1.83 a	27.46 ± 3.71 e	0	27.46 ± 3.71 d
20	54.90 ± 3.87 c	45.10 ± 4.59 e	42.57 ± 2.44 a	19.46 ± 2.76 f	0	19.46 ± 2.76 e

## 2.4 不同浓度 Ni<sup>2+</sup> 对亚洲玉米螟繁殖力的影响

### 2.4.1 产卵量: 重金属 Ni<sup>2+</sup> 对亚洲玉米螟存活雌蛾的产卵量产生了明显的抑制作用(表4),雌、雄个体单方或双方取食含重金属 Ni<sup>2+</sup> 饲料受到影响后,都会使雌蛾产卵量下降,与对照组产卵量之间有显著性差异。Ni<sup>2+</sup> 浓度越高产卵量越少,1 mg/kg 浓度下的 3 种组合处理与 5 mg/kg 浓度下对应的组合

处理之间的产卵量基本一致;5 个浓度中以 20 mg/kg 浓度下的 3 种组合处理产卵量最少。此外,1 mg/kg 和 5 mg/kg 浓度下雌蛾单方取食 Ni<sup>2+</sup> 的产卵量比雄蛾单方和雌雄双方均取食 Ni<sup>2+</sup> 的产卵量少;10 ~ 20 mg/kg 浓度下的产卵量则都表现为:“镍雄蛾 × 正常雌蛾”处理组合产卵量最大,“正常雄蛾 × 镍雌蛾”处理组合的产卵量最少。

表4 亚洲玉米螟幼虫经 Ni<sup>2+</sup> 处理或未经 Ni<sup>2+</sup> 处理的存活雌蛾产卵量

Table 4 Fecundity of female adults of *Ostrinia furnacalis* from survived larvae after exposed or non-exposed to Ni<sup>2+</sup>

Ni <sup>2+</sup> 浓度(mg/kg) Ni <sup>2+</sup> concentration	产卵量(粒/雌) Fecundity (number of eggs laid per female)			
	Ni ♂ × Ni ♀	Ni ♂ × CK ♀	CK ♂ × Ni ♀	CK ♂ × CK ♀
1	179.8 ± 10.7 b	177.2 ± 26.2 b	142.2 ± 31.9 c	247.9 ± 15.5 a
5	180.2 ± 28.9 b	179.5 ± 20.5 b	136.8 ± 31.5 c	247.9 ± 15.5 a
10	133.2 ± 19.8 c	169.2 ± 28.4 b	125.0 ± 11.32 c	247.9 ± 15.5 a
15	129.8 ± 24.3 c	157.3 ± 10.6 b	120.3 ± 23.2 c	247.9 ± 15.5 a
20	91.7 ± 28.8 c	150.0 ± 32.6 b	82.8 ± 28.5 c	247.9 ± 15.5 a

表中数据为平均值 ± 标准误(样本重复 n = 3);同行数据后字母不相同表示经 Duncan 氏多重比较检验差异显著(P < 0.05)。表5同。Data in the table are means ± SE (sample replicates n = 3), and those in the same row followed by different letters are significantly different (P < 0.05, ANOVA followed by Duncan's new multiple range test). The same for Table 5.

### 2.4.2 卵孵化率: 重金属 Ni<sup>2+</sup> 对亚洲玉米螟存活雌蛾所产卵的孵化率有显著的抑制作用(表6),5 个 Ni<sup>2+</sup> 浓度下的卵孵化率都显著小于对照组。20 mg/kg 浓度下的 3 种组合处理卵孵化率最小。与产卵量一样,在 5 个浓度的 3 种组合处理中,雌蛾单方取食 Ni<sup>2+</sup> 的卵孵化率比雄蛾单方和雌雄双方取食 Ni<sup>2+</sup> 的卵孵化率都小。

## 3 讨论

环境中的重金属对生物体而言大多属于不利的生态因素(包括生物和非生物因素如食物和栖息地等),而不利的生态因素压力会引起生物体的生态和生理能力发生改变,如食物的摄取率减少,食物转

表 5 亚洲玉米螟幼虫经  $\text{Ni}^{2+}$  处理或未经  $\text{Ni}^{2+}$  处理的存活雌蛾所产卵的孵化率Table 5 Egg hatchability of female adults of *Ostrinia furnacalis* from survived larvae after exposed or non-exposed to  $\text{Ni}^{2+}$ 

$\text{Ni}^{2+}$ 浓度 (mg/kg) $\text{Ni}^{2+}$ concentration	卵孵化率 (%) Egg hatchability			
	$\text{Ni} \delta \times \text{Ni} \text{♀}$	$\text{Ni} \delta \times \text{CK} \text{♀}$	$\text{CK} \delta \times \text{Ni} \text{♀}$	$\text{CK} \delta \times \text{CK} \text{♀}$
1	88.8 ± 0.8 b	85.1 ± 0.3 bc	83.8 ± 0.6 c	95.7 ± 0.5 a
5	86.4 ± 0.6 b	84.1 ± 0.2 bc	82.4 ± 0.6 c	95.7 ± 0.5 a
10	75.6 ± 0.8 b	73.6 ± 1.0 b	70.5 ± 0.7 c	95.7 ± 0.5 a
15	70.8 ± 0.5 b	70.5 ± 0.7 b	70.4 ± 0.8 b	95.7 ± 0.5 a
20	70.4 ± 1.0 b	68.6 ± 0.5 b	68.0 ± 0.8 b	95.7 ± 0.5 a

化率和生长率降低,发育历期延长,产卵量减少,孵化率降低,致死率增加,种群密度增长受到抑制及非对称发展(Vlahović *et al.*, 2009; Mirčić *et al.*, 2013)。生物体具有吸收、积累重金属的功能。当生物吸收、积累的重金属量超过生物体正常所需量时就会抑制昆虫的免疫系统,提高昆虫病原的易感性,最终影响生物体的生长发育和繁殖力(Grześ, 2010; van Ooik and Rantala, 2010)。本实验充分验证了上述结论,即取食含  $\text{Ni}^{2+}$  的人工饲料后,亚洲玉米螟的幼虫期、蛹期、蛹重、化蛹率、羽化率、产卵量及卵孵化率都受到了不同程度的影响,并且这种影响与  $\text{Ni}^{2+}$  的浓度密切相关:除 5 mg/kg  $\text{Ni}^{2+}$  处理外,其余浓度下部分生长发育参数存在随  $\text{Ni}^{2+}$  浓度增加而变化的剂量-反应关系,这一结果也与孙虹霞等(2007)的实验结果一致。

从本实验结果来看,重金属  $\text{Ni}^{2+}$  不仅会影响亚洲玉米螟的生长发育和繁殖力,对亚洲玉米螟雌蛾的求偶行为和雄蛾的定向行为也产生影响。本实验结果发现,重金属  $\text{Ni}^{2+}$  对雌蛾的求偶行为和雄蛾的定向行为的影响与作用浓度也密切相关。例如,与对照组相比,仅有高浓度(20 mg/kg)的  $\text{Ni}^{2+}$  对雌蛾在各个暗期中的求偶持续时间都表现为抑制作用,其他浓度既表现出抑制作用又表现出促进作用,其中 1, 5 和 10 mg/kg 的  $\text{Ni}^{2+}$  对雌蛾在第 2, 5 和 6 个暗期中的求偶持续时间表现为促进作用,而在第 1, 3 和 4 个暗期中表现为抑制作用;而 15 mg/kg 的  $\text{Ni}^{2+}$  对雌蛾的第 5 和 6 个暗期的求偶持续时间表现为促进作用,第 1-4 个暗期中则表现为抑制作用。在雄蛾定向行为方面,除了 5 mg/kg  $\text{Ni}^{2+}$  对其产生促进作用外,其他浓度的  $\text{Ni}^{2+}$  对雄蛾的定向行为均只产生抑制作用。产生这种结果的原因可能是多方面的,首先,求偶行为是通过固有的程序反应向异性传递信息,激发异性兴奋的行为反应,是交配前两性的信息联系;而定向行为则是雄蛾感受雌蛾所释放的性信息素,沿着信息素气迹定向找到雌蛾的行为(杜家纬, 1988)。其次,蛾类昆虫的性信息素通

讯系统对雌蛾的求偶行为和雄蛾的定向行为起着非常重要的作用,并且蛾类昆虫的性信息素通讯系统非常的复杂,具有物种特异性(Costa *et al.*, 1997)。因此,我们推测实验结果中亚洲玉米螟的雌蛾求偶行为和雄蛾定向行为发生改变一方面可能是受到  $\text{Ni}^{2+}$  的影响后,亚洲玉米螟的性信息素通讯系统受到了损坏,并且受损坏的程度与  $\text{Ni}^{2+}$  浓度相关;另一方面也可能是重金属  $\text{Ni}^{2+}$  的作用使得亚洲玉米螟的免疫力受到影响,成虫的活性发生改变,从而求偶行为和定向行为发生改变。然而关于重金属对蛾类昆虫的求偶行为/定向行为的影响研究未见报道,因此  $\text{Ni}^{2+}$  对亚洲玉米螟雌蛾求偶行为及雄蛾定向行为的影响机制有待进一步研究。

综上所述,在亚洲玉米螟幼虫标准人工饲料中添加不同浓度的重金属  $\text{Ni}^{2+}$ ,其生长发育和生殖行为均会受到影响,所受影响包括抑制作用和促进作用两个方面,抑制作用主要表现在对亚洲玉米螟幼虫期、蛹期、化蛹率和羽化率具有抑制作用;亚洲玉米螟雌蛾最高平均求偶持续时间逐渐缩短;最高求偶率都小于 100%;雄蛾定向行为受到抑制;亚洲玉米螟存活雌蛾的产卵量和卵孵化率均显著下降。促进作用表现为:亚洲玉米螟的雌蛹重具有逐渐减小的促进作用,低浓度  $\text{Ni}^{2+}$  (1 ~ 10 mg/kg) 对雄蛹重有促进作用。并且发现除 5 mg/kg  $\text{Ni}^{2+}$  浓度外,部分参数表现出随  $\text{Ni}^{2+}$  浓度增加而变化的剂量-反应关系。但是出现这种现象的原因、重金属  $\text{Ni}^{2+}$  抑制或促进亚洲玉米螟生长发育和生殖行为的作用机制以及亚洲玉米螟对重金属  $\text{Ni}^{2+}$  胁迫的抵御机制尚有待于进一步研究。

## 参考文献 (References)

- Cheng SP, 2003. Heavy metal pollution in China: origin, pattern and control. *Environmental Science and Pollution Research International*, 10(3): 192-198.
- Costa FG, Viera C, Francescoli G, 1997. Male sexual behavior elicited by a hybrid pheromone: a comparative study on *Lycosa thorelli*, *L. carbonelli*, and their hybrid progeny (Araneae: Lycosidae).

- Canadian Journal of Zoology*, 75: 1845 – 1856.
- Du JW, 1988. Insect Sex Pheromone and Its Application. China Forestry Press, Beijing. 113 – 115. [杜家纬, 1988. 昆虫信息素及其应用. 北京: 中国林业出版社. 113 – 115]
- Grześ IM, 2010. Ants and heavy metal pollution – a review. *European Journal of Soil Biology*, 46(6): 350 – 355.
- Heliövaara K, Väisänen R, 1989. Between-species difference in heavy metal levels in four pine diprionids (Hymenoptera) along an air pollutant gradient. *Environmental Pollution*, 62: 253 – 261.
- Jin B, Ma C, 2013. Determination and contamination assessment of heavy metal nickel in medicinal and edible Chinese medicinal materials. *Traditional Chinese Drug Research & Clinical Pharmacology*, 24(2): 180 – 183. [金波, 马辰, 2013. 茯苓等 10 种药食同源药材中重金属镍含量测定及评价. 中药新药与临床药理, 24(2): 180 – 183]
- Liu Y, 2007. Ecological Risk Assessment of Contamination Soil by Nickel. MSc Thesis, Beijing Forestry University, Beijing. [刘艳, 2007. 重金属镍污染土壤的生态风险评价. 北京: 北京林业大学硕士学位论文]
- Mirčić D, Blagojević D, Perić-Mataruga V, Ilijin L, Mrdaković M, Vlahović M, Lazarević J, 2013. Cadmium effects on the fitness-related traits and antioxidative defense of *Lymantria dispar* L. larvae. *Environmental Science and Pollution Research International*, 20(1): 209 – 218]
- Qiao L, Zheng JW, Cheng WN, Li YP, 2008. Impact of 4 different artificial fodders on life span of Asian corn borer, *Ostrinia furnacalis* (Guenée). *Journal of Northwest Agricultural & Forestry University (Natural Science Edition)*, 36(5): 109 – 112. [乔利, 郑坚武, 成卫宁, 李怡萍, 2008. 不同饲料配方对亚洲玉米螟生长发育和繁殖的影响. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 36(5): 109 – 112]
- Ruohomaki 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. *Journal of Applied Ecology*, 33(4): 773 – 785.
- Shen HY, Zhang HY, Liu L, Zhang YF, Zhou Y, Zheng Y, Zheng J, Zhu LY, 2014. Bio-toxicity and bioavailability of metal-spiked freshwater sediments to benthic invertebrates. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 34(1): 272 – 280. [沈洪艳, 张红燕, 刘丽, 张彦峰, 周煜, 郑军, 祝凌燕, 2014. 淡水沉积物中重金属对底栖生物毒性及其生物有效性研究. 环境科学学报, 34(1): 272 – 280]
- Sun HX, Shu YH, Tang WC, Wang Q, Zhou Q, Zhang GR, 2007. Ni<sup>2+</sup> continuous stress led to the accumulation of heavy metals in the body and reduce the survival rate of *Spodoptera litura*. *Chinese Science Bulletin*, 52(12): 1413 – 1418. [孙虹霞, 舒迎花, 唐文成, 王祺, 周强, 张古忍, 2007. 重金属 Ni<sup>2+</sup> 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, 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, 夏嫄, 唐文成, 张古忍, 党志, 2010. Ni<sup>2+</sup> 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]
- Van Ooik T, Rantala MJ, 2010. Local adaptation of an insect herbivore to a heavy metal contaminated environment. *Annales Zoologici Fennici*, 47(3): 215 – 222.
- Vlahović M, Lazarević J, Perić-Mataruga V, Ilijin L, Mrdaković M, 2009. Plastic responses of larval mass and alkaline phosphatase to cadmium in the gypsy moth larvae. *Exotoxicology and Environmental Safety*, 72(4): 1148 – 1155.
- Xu GF, Bai YJ, 2007. Heavy metal pollution in soil of vegetable production base in Harbin city. *Heilongjiang Environment Journal*, 31(1): 31 – 33. [许桂芬, 白羽军, 2007. 哈尔滨市蔬菜生产基地土壤重金属污染状况评价. 黑龙江环境通报, 31(1): 31 – 33]
- Zhang JR, Yin C, Li XF, 2013. Determination of Cu, Zn, Pb, Cd and Ni in activated sludge by atomic absorption spectrometry. *China Water & Waste Water*, 29(4): 91 – 93. [张继荣, 印成, 李显芳, 2013. 原子吸收光谱法测定活性污泥中 Cu, Zn, Pb, Cd, Ni. 中国给水排水, 29(4): 91 – 93]

(责任编辑: 赵利辉)