

重金属 Ni^{2+} 连续胁迫导致其在斜纹夜蛾体内积累并降低存活率

孙虹霞 舒迎花 唐文成 王祺 周强 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. * 联系人, E-mail: zhanggr@mail.sysu.edu.cn)

摘要 在人工饲料中添加不同浓度的 Ni^{2+} , 采用等离子体原子发射光谱仪检测 Ni^{2+} 在连续 3 个世代植食性昆虫斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* Fabricius 六龄幼虫、蛹和成虫体内的积累, 并通过单头饲养评价了 Ni^{2+} 积累对不同世代斜纹夜蛾幼虫存活率、化蛹率与成虫羽化率的影响。结果表明, Ni^{2+} 可在六龄幼虫、蛹和雌雄成虫体内积累, 积累量随幼虫胁迫世代数的增加而增加; 同时也随幼虫饲料中 Ni^{2+} 浓度的增加而增加, 并表现出显著的剂量-反应关系。变态后, 蛹和成虫体内的 Ni^{2+} 显著低于幼虫体内的 Ni^{2+} 浓度, 过量的 Ni^{2+} 可随化蛹所蜕皮排出体外。同时, 不同世代斜纹夜蛾幼虫存活率、化蛹率与成虫羽化率均随 Ni^{2+} 胁迫浓度的增加而降低。

关键词 重金属 Ni^{2+} 斜纹夜蛾 积累 存活率

镍(Ni)是常见重金属污染元素之一, 是珠江三角洲近 40% 农田土壤重金属污染的第二大污染物, 土壤中的 Ni^{2+} 浓度最高可达 110 mg/kg^[1]。过量的 Ni^{2+} 可在蔬菜中积累, 并对蔬菜产生毒性效果, 当蔬菜中的 Ni^{2+} 含量达到 10~30 mg/kg 时, 就会对蔬菜产生毒害作用^[2]。但植物中积累的过量 Ni^{2+} 是否对植食性昆虫产生影响, 却较少报道。

有限的文献只集中在 Ni^{2+} 污染对少数昆虫种群及相关生态指标的研究上。过量的 Ni^{2+} 可在鞘翅目的 *Chrysolina pardalina* (Fabricius)^[3]、弧斑叶甲 *Chrysomela lapponica* (L)^[4]、鳞翅目的舞毒蛾 *Lymantria dispar* (L)^[5]、拟紫毛顶蛾 *Eriocrania semipurpurella* (Stephens)^[6]、秋白尺蛾 *Epirrita autumnata* (Borkhausen)^[7] 以及毛翅目的 *Stenopsyche marmorata* (Navas)^[8] 等昆虫体内积累, 并可随 *C. pardalina* 的蜕皮以及 *E. semipurpurella* 的粪便排出体外。此外, 虽然 *E. autumnata* 的幼虫密度和存活率与其距污染源的呈负相关, 但其体内的酚氧化酶活性和包囊反应都有所增加以抵御 Ni^{2+} 的胁迫作用^[7,9]; 然而, *C. lapponica* 幼虫体内的酯酶活性与对照则无显著差异, 且成虫体内酶活性显著低于对照, 表明昆虫对 Ni^{2+} 胁迫反应存在种属特异性。然而, 目前的研究结果多来自直接从污染环境中所采集的实验材料^[6,10], 而在实验室可控条件下, 重金属胁迫的时间则相对较短^[11], 因

此, 一些重金属的积累特性和累积的毒性效应常被忽略, 并可能或高或低估计某些重金属元素对植食性昆虫的影响程度^[12]。

斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* Fabricius (鳞翅目: 夜蛾科) 是重要的植食性昆虫, 对多种作物尤其是蔬菜构成严重威胁。本研究以斜纹夜蛾幼虫为材料, 通过在斜纹夜蛾幼虫人工饲料中添加不同浓度的 Ni^{2+} , 研究了斜纹夜蛾幼虫连续 3 代取食含 Ni^{2+} 的人工饲料后, Ni^{2+} 在斜纹夜蛾不同世代 6 龄幼虫及蛹、成虫体内的积累及对幼虫存活率、化蛹率和羽化率等生长发育指标的影响, 为进一步分析 Ni^{2+} 长期胁迫对斜纹夜蛾所产生的各种影响提供依据。

1 材料和方法

() 斜纹夜蛾幼虫的饲养。斜纹夜蛾系中山大学昆虫学研究所养虫室人工饲料^[13]饲养。在人工饲料中添加不同浓度的 Ni^{2+} , 并以此连续 3 代饲喂斜纹夜蛾幼虫。重金属 Ni^{2+} 来源于 NiCl_2 , 将 NiCl_2 添加在人工饲料^[13]中, 使 Ni^{2+} 终浓度分别为 1, 5, 10, 20 和 40 mg/kg。以不添加 NiCl_2 饲料饲养的斜纹夜蛾为对照。以第 1 代幼虫化蛹后, 羽化成虫所产的卵作为第 2 代虫源, 第 3 代依此类推。每天为饲养的幼虫更换饲料, 直至获得第 3 代成虫。所有的昆虫均在 (26 ± 1) , 16 L : 8 D, 湿度为 $(75 \pm 5)\%$ 条件下饲养。

() 仪器与试剂. IRIS Advantage (HR) 等离子体原子发射光谱仪(ICP)购自美国 ThermoJarrell Ash Corporation. 浓硝酸和高氯酸均为广州试剂一厂生产的分析纯试剂.

() 组织材料的收集. 分别收集连续3个世代六龄末幼虫、第1天所化蛹、羽化第1天的雌雄虫各30头以及150头幼虫化蛹时所蜕下的皮. 全部材料经双蒸水清洗后,放入30 mm × 50 mm 称量瓶中,并置于4℃冰箱中备用.

() Ni²⁺浓度的检测. 将同一世代内收集到的虫体置于120℃烘箱干燥4 h后,立即放入干燥器中冷却. 称量0.1 g干燥并混匀的虫体进行消化. 先将材料放入50 mL安培瓶中,再加入6 mL浓硝酸,置于电炉上消化. 待棕色气体消失冒白烟后移开安培瓶,自然冷却后加入1 mL高氯酸继续消化. 待棕色气体消失,得到透明溶液后取下安培瓶,冷却后用定性滤纸过滤,去离子水定容至10 mL. 以浓硝酸和高氯酸为空白对照,用等离子体原子发射光谱仪测定各个样品的Ni²⁺含量,每个处理3个重复.

() Ni²⁺胁迫对斜纹夜蛾不同虫态存活率的影响. 将卵分装于直径为12 cm的消毒培养皿中,平均每皿200粒卵左右,并在其孵化后,每天更换含不同Ni²⁺浓度的新鲜饲料. 至三龄末,将每个世代长势均一的40头三龄幼虫转至塑料胶卷盒中单头饲养,每天更换饲料并观察记录其存活情况;同时记录在不同浓度Ni²⁺胁迫下能成功化蛹和羽化的虫数. 以第1代幼虫化蛹后,羽化成虫所产的卵作为第2代虫源,第3代依此类推.

() 数据分析. 重金属Ni²⁺在斜纹夜蛾不同发育阶段中的浓度按如下公式计算:

$$\text{Ni}^{2+} \text{ 浓度} = (C \times 10) / W,$$

其中, C为ICP测得的浓度(mg/L); W为所称取样品的干重(g);

表1 斜纹夜蛾连续3代幼虫取食含不同Ni²⁺浓度的人工饲料后6龄幼虫体内的Ni²⁺含量(mg/kg)^{a)}

| 饲料中 Ni ²⁺ 浓度/mg·kg ⁻¹ | 第1代 | 第2代 | 第3代 |
|---|-----------------|-----------------|----------------|
| 0 | 1.167±0.318Ad | 1.133±0.285Ab | 1.600±0.153Ad |
| 1 | 2.633±0.762Ad | 2.867±0.524Ab | 3.767±0.524Ad |
| 5 | 4.467±1.545Bd | 5.967±2.018Bb | 13.733±2.655Ac |
| 10 | 12.500±2.937Ac | 22.067±1.225Ab | 21.600±3.323Ac |
| 20 | 30.2667±0.754Ab | 43.467±11.086Aa | 52.067±5.653Ab |
| 40 | 44.833±3.088Aa | 54.233±6.929Aa | 62.300±1.311Aa |

a) 同一行中不同的大写字母表示六龄幼虫体内的Ni²⁺浓度在不同世代间存在显著差异;同一列中不同的小写字母表示同一世代6龄幼虫体内的Ni²⁺浓度差异显著(P < 0.05),表2,表3同

幼虫存活率(%) = (6龄末幼虫数/40)×100%;

化蛹率(%) = (蛹数/6龄末幼虫数)×100%;

羽化率(%) = (成虫数/蛹数)×100%.

样品中的Ni²⁺浓度数据经lg(x + 1)转换后,采用SAS软件包 [14]进行方差分析,并进行多重比较,以阐明对照与处理间以及各个处理间差异的显著性. 对不同处理中的重金属浓度与斜纹夜蛾幼虫饲料中的Ni²⁺浓度进行线性回归分析,以了解组织中的含量与饲料中Ni²⁺浓度之间的关系. 幼虫存活率、化蛹率和羽化率经arcsin x转换,采用SAS软件包进行卡方检验,以比较同一世代不同Ni²⁺浓度胁迫对不同虫态存活率的影响.

2 结果和分析

2.1 Ni²⁺在斜纹夜蛾六龄幼虫体内的积累

检测结果表明(表1),斜纹夜蛾六龄幼虫体内的Ni²⁺含量随人工饲料中Ni²⁺浓度的升高而增加,二者间表现出显著的剂量-反应关系(图1). 除第2代幼虫外,幼虫体内的Ni²⁺浓度在高浓度(10, 20, 40 mg/kg)处理之间都存在显著差异性,并显著大于对照和低浓度(1, 5 mg/kg)处理虫体. 此外,第3代幼虫体内

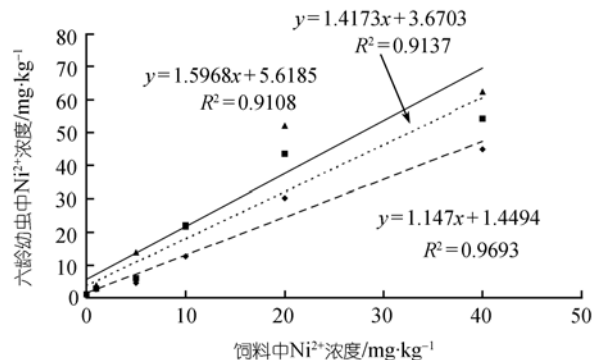


图1 连续3个世代六龄幼虫体内的Ni²⁺含量与幼虫食物中Ni²⁺含量的线性回归分析, □和▲分别为第1, 2和3代的实测值

的 Ni^{2+} 浓度在低浓度(1, 5 mg/kg)处理间也存在显著差异性。

幼虫虫体内的 Ni^{2+} 浓度也随幼虫取食世代数的增加而升高(表 1)。然而, 只有当饲料中 Ni^{2+} 浓度为 5 mg/kg 时, 第 3 代 6 龄幼虫体内的 Ni^{2+} 浓度才显著高于第 1 和第 2 代中的浓度。

2.2 斜纹夜蛾蛹和幼虫化蛹蜕皮中的 Ni^{2+} 含量

变态后, 蛹中的 Ni^{2+} 浓度明显低于幼虫体内的 Ni^{2+} 浓度(表 1 和 2)。在对照和 1 mg/kg Ni^{2+} 处理下, 第 1 和第 2 代蛹中都没有检测到 Ni^{2+} , 第 3 代则检测到 Ni^{2+} 的存在; 然而, 蛹中的 Ni^{2+} 浓度仍随幼虫饲料中 Ni^{2+} 浓度的增加而增加(表 2), 并存在显著的剂量-反应关系(图 2), 且当幼虫饲料中 Ni^{2+} 浓度为 40 mg/kg 时, 蛹中的 Ni^{2+} 浓度显著高于其他处理中的浓度。

蛹中的 Ni^{2+} 浓度也随胁迫世代数的增加而增加, 且当食物中 Ni^{2+} 浓度为 10, 20 和 40 mg/kg 时, 第 3 代蛹中的 Ni^{2+} 浓度都显著高于第 1 和 2 代中的浓度。

在幼虫化蛹所蜕皮中也检测到高浓度的 Ni^{2+} (表 2), 同样与幼虫饲料中的 Ni^{2+} 浓度有显著的剂量-反应关系(图 3), 表明幼虫可将部分过量的 Ni^{2+} 转移至

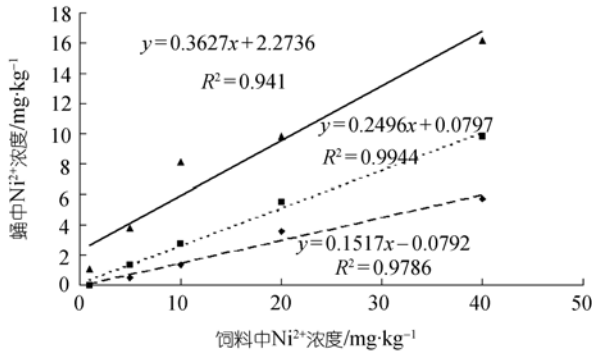


图 2 连续 3 个世代蛹内的 Ni^{2+} 含量与幼虫食物中 Ni^{2+} 含量的线性回归分析, 和 分别为第 1, 2 和 3 代的实测值

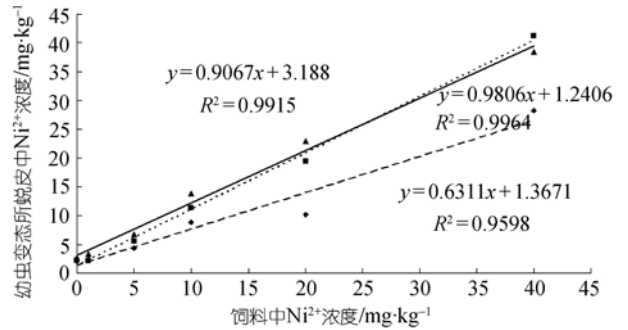


图 3 连续 3 个世代幼虫变态所蜕皮中的 Ni^{2+} 含量与幼虫食物中 Ni^{2+} 含量的线性回归分析, 和 分别为第 1, 2 和 3 代的实测值

所蜕皮中, 从而减少过量重金属对蛹的危害作用。取食 Ni^{2+} 浓度为 40 mg/kg 的饲料后, 幼虫所蜕皮中的 Ni^{2+} 浓度显著高于其他处理幼虫所蜕皮中的浓度。

2.3 Ni^{2+} 在斜纹夜蛾成虫体内的积累

成虫体内的 Ni^{2+} 浓度又略低于蛹中的浓度(表 2 和 3)。成虫体内的 Ni^{2+} 浓度也随幼虫胁迫时间以及幼虫饲料中 Ni^{2+} 浓度的增加而增加; 雌虫体内的浓度略低于雄虫体内的 Ni^{2+} 浓度, 但两者间差异不显著。除第 3 代雌虫外, 幼虫受 40 mg/kg Ni^{2+} 胁迫后, 成虫体内的 Ni^{2+} 含量显著高于受其他浓度 Ni^{2+} 胁迫后虫体内的量。成虫体内的 Ni^{2+} 浓度与幼虫饲料中的 Ni^{2+} 浓度也存在显著的剂量-反应关系(图 4 和 5)。当幼虫饲料中 Ni^{2+} 浓度(1 mg/kg)很低时, 连续 3 个世代雌雄成虫体内均没有 Ni^{2+} 的检出。当幼虫饲料 Ni^{2+} 浓度超过 5 mg/kg 时, 第 3 代雌雄成虫体内的 Ni^{2+} 浓度高于第 2 代, 以第 1 代最低。

2.4 Ni^{2+} 胁迫对斜纹夜蛾不同虫态存活率的影响

随 Ni^{2+} 胁迫浓度的增加, 幼虫存活率、化蛹率以及成虫羽化率均有所下降(表 4)。经卡方分析, Ni^{2+} 胁迫下的第 1 代幼虫存活率和羽化率与对照相比未见

表 2 斜纹夜蛾连续 3 代幼虫取食含不同 Ni^{2+} 浓度的人工饲料后蛹内和幼虫化蛹蜕皮中的 Ni^{2+} 含量(mg/kg)

| 饲料中 Ni^{2+} 浓度/mg·kg ⁻¹ | 蛹内 Ni^{2+} 含量 | | | 幼虫化蛹蜕皮中 Ni^{2+} 含量 | | |
|--------------------------------------|-----------------|---------------|----------------|----------------------|-----------------|-----------------|
| | 第 1 代 | 第 2 代 | 第 3 代 | 第 1 代 | 第 2 代 | 第 3 代 |
| 0 | - | - | - | 2.067±0.285Ab | 2.300±0.265Ac | 2.733±0.145Ac |
| 1 | - | - | 1.067±0.318d | 2.467±0.338Ab | 2.133±0.338Ac | 3.333±0.623Ac |
| 5 | 0.500±0.116Ab | 1.333±0.219Ab | 3.767±1.556Acd | 4.367±0.296Ab | 5.567±0.578Ac | 6.767±1.619Ac |
| 10 | 1.333±0.348Bb | 2.733±0.524Bb | 8.133±2.503Abc | 8.867±0.285Ab | 11.367±1.214Abc | 13.867±4.013Abc |
| 20 | 3.567±0.797Bab | 5.467±1.217Bb | 9.800±0.854Ab | 10.167±0.867Bb | 19.433±1.241Ab | 22.967±3.072Ab |
| 40 | 5.733±1.279Ba | 9.833±2.200Ba | 16.167±1.468Aa | 28.233±5.487Aa | 41.167±6.940Aa | 38.367±6.648Aa |

表 3 斜纹夜蛾连续 3 代幼虫取食含不同 Ni²⁺浓度的人工饲料后成虫体内的 Ni²⁺含量(mg/kg)

| 饲料中 Ni ²⁺ 浓度/mg·kg ⁻¹ | 雄虫 | | | 雌虫 | | |
|---|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|
| | 第 1 代 | 第 2 代 | 第 3 代 | 第 1 代 | 第 2 代 | 第 3 代 |
| 0 | - | - | - | - | - | - |
| 1 | - | - | - | - | - | - |
| 5 | 0.333±0.088Bb | 1.333±0.318Bc | 2.467±0.437Ab | 0.333±0.088Ad | 1.167±0.555Ab | 1.833±0.536Ab |
| 10 | 1.233±0.260Bb | 1.967±0.120Bc | 6.533±0.727Aa | 1.133±0.088Bc | 1.767±0.578Bb | 4.933±0.869Aab |
| 20 | 3.233±0.811Ab | 5.333±0.996Ab | 7.467±1.588Aa | 2.767±0.120Bb | 3.967±0.639ABb | 5.433±0.684Aab |
| 40 | 6.567±1.179Ba | 8.533±0.296Ba | 9.733±0.285Aa | 6.167±0.233Aa | 10.033±1.979Aa | 7.867±1.994Aa |

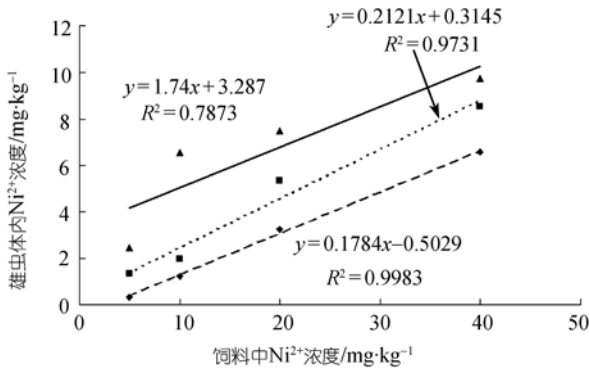


图 4 连续 3 个世代雄虫体内的 Ni²⁺含量与幼虫食物中 Ni²⁺含量的线性回归分析, 和 分别为第 1, 2 和 3 代的实测值

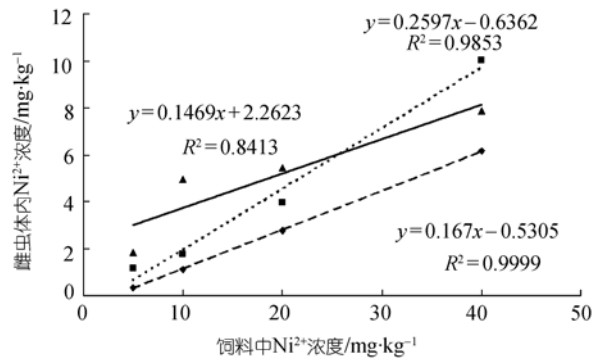


图 5 连续 3 个世代雌虫体内的 Ni²⁺含量与幼虫食物中 Ni²⁺含量的线性回归分析, 和 分别为第 1, 2 和 3 代的实测值

表 4 斜纹夜蛾连续 3 代幼虫取食含不同 Ni²⁺浓度的人工饲料后幼虫存活率、化蛹率和羽化率(%)

| 饲料中 Ni ²⁺ 浓度/mg·kg ⁻¹ | 幼虫存活率 | | | 化蛹率 | | | 羽化率 | | |
|---|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| | 第 1 代 | 第 2 代 | 第 3 代 | 第 1 代 | 第 2 代 | 第 3 代 | 第 1 代 | 第 2 代 | 第 3 代 |
| 0 | 95.00 | 100.00 | 92.50 | 97.37 | 97.50 | 100.00 | 97.29 | 97.44 | 94.59 |
| 1 | 90.00 | 97.50 | 85.00 | 97.22 | 87.18 | 97.06 | 94.28 | 94.12 | 90.91 |
| 5 | 85.00 | 95.00 | 87.50 | 97.06 | 86.84 | 97.14 | 93.94 | 90.91 | 88.24 |
| 10 | 87.50 | 95.00 | 82.50 | 94.29 | 81.58 | 84.85 | 90.91 | 87.10 | 75.00 |
| 20 | 85.00 | 87.50 | 77.50 | 91.18 | 80.00 | 77.42 | 90.32 | 89.29 | 70.83 |
| 40 | 87.50 | 80.00 | 75.00 | 82.86 | 81.25 | 70.77 | 86.21 | 92.31 | 66.67 |

显著差异, 只有 40 mg/kg Ni²⁺胁迫下的化蛹率显著低于对照。至第 2 代, 受 20 和 40 mg/kg Ni²⁺胁迫的幼虫存活率显著低于对照, 且 40 mg/kg Ni²⁺胁迫下的幼虫存活率也显著低于低浓度 Ni²⁺(1, 5, 10 mg/kg)胁迫下的幼虫存活率; 高浓度 Ni²⁺(10, 20, 40 mg/kg)胁迫下的化蛹率都显著低于对照, 但各浓度胁迫下的羽化率与对照未见显著性差异。随胁迫时间的延长, 只有受 40 mg/kg Ni²⁺胁迫的第 3 代幼虫的存活率显著低于对照; 类似于第 2 代, 高浓度 Ni²⁺(10, 20, 40 mg/kg)胁迫下的化蛹率都显著低于对照, 但受 20 和 40 mg/kg Ni²⁺胁迫的幼虫化蛹率也显著低于低浓度 Ni²⁺(1, 5 mg/kg)胁迫下的幼虫化蛹率; 同时, 高浓度

Ni²⁺(10, 20, 40 mg/kg)胁迫下的羽化率也都显著低于对照, 但幼虫受 20 和 40 mg/kg Ni²⁺胁迫的羽化率只显著低于幼虫受 1 mg/kg Ni²⁺胁迫的羽化率。

3 讨论和结论

斜纹夜蛾幼虫经连续 3 个世代取食含过量重金属 Ni²⁺的饲料后, 过量的 Ni²⁺能在斜纹夜蛾幼虫体内积累, 且积累量随胁迫世代数和食物中 Ni²⁺浓度的增加而增加。幼虫体内的 Ni²⁺含量与食物中的 Ni²⁺浓度存在显著的剂量-反应关系, 这与 Ni²⁺污染对秋白尺蛾 *E. autumnata* (Borkhausen)、叶蜂 *Gilpinia frute-torum* (Fabricius)和 *Microdiprion pallipes* (Fallén)等的

研究结果类似 [7,15], 这些昆虫体内的 Ni^{2+} 含量与寄主植物体内的金属含量正相关。

斜纹夜蛾幼虫在化蛹时, 能通过蜕下的皮排出体内积累的部分 Ni^{2+} , 从而减少蛹中的重金属含量。双翅目、膜翅目和其他鳞翅目等昆虫都有相似特点 [16-18]。羽化后, 成虫体内的 Ni^{2+} 浓度又有所下降, 这可能又通过蛹壳带走部分积累的 Ni^{2+} 。但雄虫体内的 Ni^{2+} 浓度略高于雌虫体内的浓度, 而积累在聚集叶蜂 *Gilpinia socia* (Klug) 和欧洲新松叶蜂 *Neodiprion sertifer* (Geoffroy) 雄虫体内的 Ni^{2+} 浓度也略高于雌虫体内的浓度 [19]。Niu 等人 [20] 的研究表明, 舍蝇 *Musca domestica vinica* (Macquart) 羽化后, 成虫能将体内过量的 Cd 排出体外以利于其交配和产卵, Cd^{2+} 浓度在成虫羽化后的 6 d 内呈减少趋势, 但本研究只检测了羽化第 1 天成虫体内的 Ni^{2+} 含量, 雌虫是否能增加产卵量以减少 Ni^{2+} 的危害作用还需进一步研究。

连续胁迫导致 Ni^{2+} 在不同世代幼虫、蛹和成虫体内的积累量呈增加趋势。重金属在昆虫体内的积累量常与重金属胁迫时间的长短显著相关。只受 Cd 胁迫 1 d 的黄粉甲 *Tenebrio molitor* (L.) 在每次蜕皮后其体内的 Cd 含量都有所下降, 并在化蛹时几乎检测不到 Cd 的存在; 而在长期胁迫下, *T. molitor* 体内的 Cd 虽在变态后有所下降, 但其体内的 Cd 含量与食物中的量存在显著相关性并随胁迫时间的延长而增加 [21]。

斜纹夜蛾不同虫态的存活率都随 Ni^{2+} 胁迫浓度的增加而降低。同样, 高浓度的 Cu, Zn, Cd 和 Pb 胁迫也可导致粉纹夜蛾 *Trichoplusia ni* (Hübner) 幼虫和蛹的死亡率升高 [22], 而果蝇 *Drosophila melanogaster* 在 Cd^{2+} 胁迫下, 其存活率也会显著下降 [23]。受 Ni^{2+} 胁迫一代的幼虫存活率、化蛹率和羽化率与对照相比未见显著差异, 但随胁迫时间的延长, 第 2 和第 3 代不同虫态的存活率与对照相比都出现显著差异性; 类似地, 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 d 后其死亡率增加且显著高于对照 [12], 从而表明胁迫时间的长短对实验结果具有重要意义, 短期胁迫可能忽略了 Ni^{2+} 的毒理学效应。再者, Ni^{2+} 对斜纹夜蛾的影响可能也表现为阶段特异性。除第 2 代较高浓度外, 受 Ni^{2+} 胁迫的 3 个世代的幼虫存活率与对照相比都未见显著差异性, 然而化蛹率和羽化率都随胁迫时间的延长而降低, 且受高浓度 Ni^{2+} 胁迫的幼虫化蛹率和羽化率与对照存在显著差异, 这可能由于变态阶段

斜纹夜蛾免疫力和防御能力较低的原因。此外, 在重金属长期胁迫下, 弹尾目昆虫和果蝇对重金属的胁迫能产生一定的耐受性 [23-26]。本研究只检测了 Ni^{2+} 胁迫对连续 3 代不同虫态存活率的影响, 而其能否对 Ni^{2+} 的胁迫产生耐受性还有待于进一步验证。

野外条件下, 土壤中的 Ni^{2+} 可被蔬菜等作物吸收并储存在茎叶等组织中。作为斜纹夜蛾幼虫主要寄主植物的十字花科蔬菜, 其叶中镍含量可高达 30 mg/kg, 对其他植物造成危害的 Ni^{2+} 浓度范围可在 10~40 mg/kg 之间 [2], 本研究所设置的处理浓度均在此范围内。因此, 本研究结果可以在一定程度上揭示, 重金属镍引起的农田土壤污染, 能够通过植食性昆虫的寄主植物间接地对植食性昆虫产生一定的影响。

斜纹夜蛾幼虫连续 3 代取食含 Ni^{2+} 的人工饲料后, Ni^{2+} 能在斜纹夜蛾不同虫态体内积累, 且积累量随胁迫时间的延长而增加, 并存在显著的剂量-反应关系; 同时, Ni^{2+} 胁迫也可对不同虫态的存活率造成影响。然而, Ni^{2+} 胁迫对斜纹夜蛾组织结构的影响以及斜纹夜蛾对过量重金属 Ni^{2+} 的解毒机制等都有待于一步研究。

参 考 文 献

- 1 陈玉娟, 温琰茂, 柴世伟. 珠江三角洲农业土壤重金属含量特征研究. 环境科学研究, 2005, 18(3): 75—77
- 2 Garrido S, Campo G M C, Esteller M V, et al. Heavy metals in soil treated with sewage sludge composting, their effects on yield and uptake of broad bean seeds (*Vicia faba* L). Water Air Soil Pollut, 2005, 166: 303—319 [DOI]
- 3 Przybyłowicz W J, Przybyłowicz J M, Migula P, et al. Functional analysis of metals distribution in organs of the beetle *Chrysolina pardalina* exposed to excess of nickel by Micro-PIXE. Nucl Instrum Methods Phys Res B, 2003, 210: 343—348 [DOI]
- 4 Zverevav E, Serebrov V, Glupov V, et al. 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, 2003, 135: 383—391
- 5 Bagatto G, Shorthouse J D. Accumulation of Cu and Ni in successive stages of *Lymantria dispar* L (Lymantriidae, Lepidoptera) near ore smelters, at Sudbury, Ontario, Canada. Environ Pollut, 1996, 92: 7—12 [DOI]
- 6 Kozlov M V, Haukioja E, Kovnatsky E F. Uptake and excretion of nickel and copper by leaf-mining larvae of *Eriocrania semipurpurella* (Lepidoptera: Eriocraniidae) feeding on contaminated birch foliage. Environ Pollut, 2000, 108: 303—310 [DOI]
- 7 Ruohomaki K, Kaitaniemi P, Kozlov M, et al. Density and performance of *Epirrita autumnata* (Lepidoptera: Geometridae) along three air pollution gradients in northern Europe. J Appl Ecol, 1996,

- 33: 773—785[DOI]
- 8 Tochimoto H, Maki T, Afzal M, et al. Accumulation of trace metals in aquatic insect *Stenopsyche marmorata* Navas transferred in streams. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2003, 56: 256—264[DOI]
 - 9 van Ooik T, Rantala M J, Saloniemi I. Diet-mediated effects of heavy metal pollution on growth and immune response in the geometrid moth *Epirrita autumnata*. *Environ Pollut*, 2006, 145: 348—354[DOI]
 - 10 Rokytova L, Kula E, Kodarova L, et al. Feeding of the willow leaf beetle *Lochmaea capreae* L. (Coleoptera, Chrysomelidae) on leaves of birch (*Betula pendula* Roth) contaminated by heavy metals. *J For Sci*, 2004, 50: 109—117[DOI]
 - 11 Crouau Y, Chenon P, Gisclard C. The use of *Folsomia candida* (Collembola, Isotomidae) for the bioassay of xenobiotic substances and soil pollutants. *Appl Soil Ecol*, 1999, 12: 103—111
 - 12 Laskowski R. Why short-term bioassays are not meaningful: Effects of a pesticide (Imidacloprid) and a metal (cadmium) on pea aphid (*Acyrtosiphon pisum* Harris). *Ecotoxicology*, 2001, 10: 177—183[DOI]
 - 13 陈其津, 李广宏, 庞义. 饲养5种夜蛾科昆虫的一种简易人工饲料. *昆虫知识*, 2000, 37(6): 325—327
 - 14 SAS Institute Inc. SAS/STAT User's Guider. Ver 6, 4th ed. Cary, NC: SAS Institute Inc, 1989
 - 15 Heliövaara K, Vaisanen R. Between-species difference in heavy metal levels in four pine Diprionids Hymenoptera along an air pollutant gradient. *Environ Pollut*, 1989, 62: 253—262[DOI]
 - 16 Aoki Y, Suzuki K T. Excretion of Cd and change in the relative ratio of iso-Cd-binding proteins during metamorphosis of fleshfly (*Sarcophaga peregrina*). *Comp Biochem Physiol*, 1984, 78C: 315—317
 - 17 Timmermans K T, Walker P A. The fate of trace metals during metamorphosis of chironomids (Diptera, Chironomidae). *Environ Pollut*, 1989, 62: 73—85[DOI]
 - 18 Lindqvist L. Accumulation of Cd, copper and zinc in five species of phytophagous insects. *Environ Entomol*, 1992, 21: 160—163
 - 19 Heliövaara K, Vaisanen R, Kemppe E, et al. Heavy-metal concentrations in males and females of three pine Diprionids Hymenoptera. *Entomol Fenn*, 1990, 1: 175—179
 - 20 Niu C Y, Jiang Y, Lei C L, et al. Effects of cadmium on housefly: Influence on growth and development and metabolism during metamorphosis of housefly. *Acta Entomol Sin*, 2002, 9: 27—33
 - 21 Lindqvist L, Block M. Excretion of cadmium during moulting and metamorphosis in *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae). *Comp Biochem Physiol*, 1995, 111C: 325—328
 - 22 Larsen K J, Litsch A L, Brewer S R, et al. Contrasting effects of sewage sludge and commercial fertilizer on egg to adult development of two herbivorous insect species. *Ecotoxicology*, 1994, 3: 94—109[DOI]
 - 23 Shirley M D F, Sibly R M. Genetic basis of a between-environment trade-off involving resistance to cadmium in *Drosophila melanogaster*. *Evolution*, 1999, 53: 826—836[DOI]
 - 24 Posthuma L, Van Straalen N M. Heavy metal adaption in terrestrial invertebrates: A review of occurrence, genetics, physiology and ecological consequences. *Comp Biochem Physiol C, Pharmacol Toxicol Endocrinol*, 1993, 106: 11—38
 - 25 Filser J, Wittmann R, Lang A. Response types in Collembola towards copper in the microenvironment. *Environ Pollut*, 2000, 107: 71—78[DOI]
 - 26 Nursita A I, Balwant S, Lees E, et al. The effect of cadmium, copper, lead, and zinc on the growth and reproduction of *Prionotoma minuta* Tullberg (Collembola). *Ecotoxicol Environ Saf*, 2005, 60: 306—314[DOI]