



刘俊秀, 朱正阳, 王甦, 王利利, 毛雪飞, 臧连生, 邸宁. 重金属镉在番茄及其害虫西花蓟马中的积累与传递 [J]. 环境昆虫学报, 2023, 45 (3): 673–681.

重金属镉在番茄及其害虫西花蓟马中的积累与传递

刘俊秀^{1,2}, 朱正阳¹, 王甦¹, 王利利¹,
毛雪飞³, 臧连生^{2*}, 邸宁^{1*}

(1. 北京市农林科学院植物保护研究所, 北京 100097; 2. 吉林农业大学生物防治研究所/天敌昆虫应用技术工程研究中心, 长春 130118;
3. 中国农业科学院农业质量标准与检测技术研究所, 北京 100098)

摘要: 重金属镉 (Cd) 是农田土壤中的重要污染源, 可在植物和植食性昆虫中积累与传递。本文采用水培法, 研究了不同浓度的 Cd 在番茄 *Solanum lycopersicum* 不同组织和在其重要害虫西花蓟马 *Frankliniella occidentalis* 体内的积累量。结果表明, 随着水培营养液中 Cd 浓度的增加, 番茄植株的根、茎和叶中 Cd 含量呈增长趋势。根中 Cd 的积累量远高于茎和叶, 当水培溶液中 Cd 含量为 20 mg/L 时, 根、茎和叶中的积累量分别达 $19\,333.67 \pm 233.38$ 、 122.67 ± 6.84 和 147.33 ± 2.96 mg/Kg (干重)。随着 Cd 浓度的增加, 番茄根、茎和叶的鲜重和干重均显著下降。西花蓟马取食 Cd 处理的番茄叶片后, 体内 Cd 显著积累, 最高达 1.95 ± 0.36 mg/Kg。同时, Cd 积累量的提高进一步影响了以番茄叶片为食的西花蓟马的适合度, 降低了其存活率。除对照外, 番茄茎-叶的转移系数和叶片对 Cd 的富集系数均大于 1, 叶片表现出较强的富集能力。而在所有的试验浓度处理中, 西花蓟马对 Cd 的富集系数和转移系数均小于 1, 表明 Cd 未在其体内产生生物放大作用。研究结果明确了 Cd 在番茄各组织及其害虫中的积累和传递水平, 为揭示重金属在农业生态系统食物链中的富集效应提供了基础数据。

关键词: 镉; 植物; 害虫; 积累; 传递

中图分类号: Q968.1; S433

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2023) 03-0673-09

Accumulation and transfer of cadmium in tomato and its pest *Frankliniella occidentalis*

LIU Jun-Xiu^{1,2}, ZHU Zheng-Yang¹, WANG Su¹, WANG Li-Li¹, MAO Xue-Fei³, ZANG Lian-Sheng^{2*}, DI Ning^{1*} (1. Institute of Plant Protection, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 2. Institute of Biological Control, Jilin Agricultural University/Engineering Research Center of Natural Enemy Insects, Changchun 130118, China; 3. Institute of Quality Standard and Testing Technology for Agro-products of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100098, China)

Abstract: Heavy metal cadmium (Cd) is one of the major contaminants in farmlands, and it could accumulate and transfer in plants and herbivores. The accumulation of Cd in different tissues of tomato and its important pest western flower thrips *Frankliniella occidentalis* were tested using hydroponics with different Cd concentrations in this study. The results showed that Cd contents in roots, stems and leaves of tomato seedlings increased with the increase of the Cd concentration in hydroponic solutions. The

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (31901945); 北京市农林科学院博士后科研基金 (2021-zz-014)

作者简介: 刘俊秀, 女, 1998 年生, 内蒙古人, 硕士研究生, 研究方向为昆虫与植物相互作用, E-mail: 1641178767@qq.com

* 共同通讯作者 Author for correspondence: 臧连生, 男, 博士, 研究员, 研究方向为害虫生物防治, E-mail: lsz0415@163.com; 邸宁, 女, 博士, 副研究员, 研究方向为昆虫与植物相互作用, E-mail: ento88@163.com

收稿日期 Received: 2022-04-17; 接受日期 Accepted: 2022-10-11

accumulation of Cd in roots was much higher than that in stems and leaves. When the concentration of Cd in hydroponics solution was 20 mg/L, the accumulation amount of Cd in roots, stems and leaves reached up to $19\,333.67 \pm 233.38$, 122.67 ± 6.84 and 147.33 ± 2.96 mg/Kg dry weight, respectively. At the same time, with the increase of Cd concentration in hydroponic solutions, fresh weight and dry weight of tomato roots, stems and leaves decreased significantly. After feeding on tomato leaves treated with Cd, *F. occidentalis* accumulated significant amount of Cd with up to 1.95 ± 0.36 mg/Kg. Meanwhile, the concentration increase of Cd treatment further affected the fitness of *F. occidentalis* feeding on tomato leaves and reduced their survival rates. Except for CK, bio-accumulation factor of tomato leaves and transfer coefficients of stems to leaves were greater than 1, indicating that leaves had strong enrichment ability. Bio-accumulation factor of *F. occidentalis* and transfer coefficients of leaves to *F. occidentalis* were less than 1, showing that Cd did not have bio-magnification effects in thrips from the treatment concentrations in this work. This study clarified the accumulation and transfer levels of Cd in tomato tissues and pests, and provided basic data for revealing the enrichment effect of heavy metals in agricultural ecosystem and food chain.

Key words: Cadmium; plant; pest; accumulation; transmission

土壤重金属污染是世界各国面临的重要环境问题之一,在我国形势也十分严峻。重金属能够通过工业废水排放 (Di *et al.*, 2016)、污水灌溉和农膜、含重金属的化学投入品使用等途径进入农业生态系统 (Naccarato *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2021), 进而被植物吸收并在植物-昆虫食物链中传递积累, 对我国农田生态系统和粮食安全造成了严重影响 (宋伟等, 2013; 环境保护部和国土资源部, 2014)。其中, 镉 (Cd) 可在土壤中长期存在, 具有强生物毒性和快速迁移的特点, 是对农作物和生态环境危害极大的重金属 (Naikoo *et al.*, 2019b; Hussain *et al.*, 2021)。据统计, 我国有 2.786×10^9 m² 的农业土壤存在 Cd 污染 (Xue *et al.*, 2017), 而种植于 Cd 污染土壤中的谷物和蔬菜, 其 Cd 含量分别达到 0.008 ~ 0.062 mg/kg 和 0.007 ~ 0.021 mg/kg (Song *et al.*, 2017)。Cd 沿食物链的生物传递可能会对植物 (Godinho *et al.*, 2018; 彭鸥等, 2019)、节肢动物 (吴国星等, 2010)、哺乳动物 (Zhu *et al.*, 2020) 甚至人类 (宋雯等, 2016) 造成非常不利的影响。

土壤中的 Cd 被植物根系吸收后, 通过激活活性氧 (ROS)、改变 Na⁺/K⁺ 浓度及 ATP 酶活性、影响植物细胞壁合成等方式抑制植物生长, 甚至导致植物死亡 (Howladar, 2014; Giusto and Ferrari, 2014; Lei *et al.*, 2019; Di *et al.*, 2020)。如 Cd 胁迫使水稻内自由基累积, 形成脂质过氧化物丙二醛 (MDA), 导致新陈代谢紊乱 (史静等, 2013), 显著降低水稻的产量和每株穗

数、每穗总粒数、结实率、粒重等经济性状以及不同生育期的地上部干物质重量 (程旺大等, 2005)。目前, 关于重金属污染对植物影响的研究主要集中于大田粮食作物 (如水稻、玉米等) (张珂等, 2019; Hussain *et al.*, 2021), 而有关重金属对果蔬的生长及品质的影响研究较少, 且主要集中于健康风险评价 (吴雪等, 2020; 董俊文等, 2022)。因此, 研究不同 Cd 污染环境下的果蔬作物各器官对 Cd 的富集、转运特征可为农田环境重金属的治理提供更为全面的理论基础。

作为生物多样性的的重要组成部分, 植食性昆虫是农田生态系统中食物链和食物网的重要环节, 并在重金属的传递与累积过程中起到重要的媒介作用 (丁平等, 2012; 陈瑾等, 2020; 黄江南等, 2021)。植食性昆虫取食富含 Cd 的植物, 会对其体重、存活率 (Jiang *et al.*, 2017)、繁殖力、卵孵化率 (Chen *et al.*, 2022)、发育历期 (Winter *et al.*, 2012) 等产生不利影响。长期重金属胁迫会提高害虫对其他逆境 (如杀虫剂等) 的耐受性 (陈瑾, 2018; 王莹, 2018), 导致害虫种群暴发的可能性增大。此外, 植食性昆虫对植物中的 Cd 具有生物放大作用 (Naikoo *et al.*, 2021a; 2021b), 可能会破坏农业生态系统中的营养级关系、生态相互作用及功能 (Dar *et al.*, 2015; 2017)。

番茄 *Solanum lycopersicum* 是我国种植面积最大的蔬果作物之一 (辛竹琳等, 2022), Cd 在土壤或种植基质中的积累, 对其生产造成严重威胁

(索琳娜等, 2016; 吴雪等, 2020; 杨佳敏等, 2021)。已有研究表明, Cd 可抑制番茄种子的发芽势、根的伸长、幼苗株高和干物质积累(丁海东等, 2006), 而番茄叶片对 Cd 的富集系数和转移系数均大于 1, 表现出较强的富集能力(赖秋羽等, 2019)。植物内的重金属富集可能会对其上的植食性昆虫、甚至更高营养级的天敌昆虫产生负面作用(Naikoo *et al.*, 2021ab)。西花蓟马 *Frankliniella occidentalis* 是番茄的主要害虫之一, 不仅取食叶片、果实, 还会传播多种植物病毒, 对番茄生产造成不可估计的损失(杨帆等, 2011)。然而, 由于西花蓟马体型小, 研究者往往忽略重金属在其体内的积累效应。生产中常释放小花蝽属天敌防控番茄上的西花蓟马(张帆等, 2015), 而重金属可以在食物链中逐级传递并积累在天敌体内, 进而可能影响其防治效果(Naikoo *et al.*, 2021ab)。

因此, 为明确重金属在植物及植食性害虫体内的富集水平和传递规律, 本研究以番茄-西花蓟马为研究系统, 通过水培番茄的方式, 探究了不同浓度的 Cd 处理对番茄不同组织、西花蓟马体内的积累效应和食物链间的转移系数的影响, 明确了 Cd 沿食物链传递对害虫西花蓟马存活的影响, 以期 Cd 的生物传递和富集提供基础数据, 为建立害虫防控策略提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试植物及水培和处理

将番茄(千禧, 农友种苗中国有限公司)种子于 26℃ 下浸泡催芽 48 h, 待种子长出根后挑取长势一致的幼苗, 放入定植篮(上直径 3.5 cm, 下直径 2.1 cm, 高 3.5 cm)内后移栽在水培苗盘(61.0 cm × 42.0 cm × 15.0 cm)中。水培方法参考邸宁等(2014), 具体为水培营养液为霍格兰营养液(采菊东篱农业科技)。将番茄植株置于无虫温室中进行生长, 环境条件为光周期 16 L:8 D, 温度白天 26 ± 1℃, 夜晚 18 ± 1℃, 相对湿度 50% ± 5%。

移栽两周后, 挑取长势一致的番茄植株, 放入 Cd 浓度分别为 0 (CK)、2.5 (T1)、5 (T2)、10 (T3) 和 20 (T4) mg/L 的培养液中培养至 4 ~ 5 叶期备用。所用重金属 Cd 为 CdSO₄ (纯度 > 99%, 上海麦克林生化科技有限公司)。

1.2 供试昆虫

西花蓟马: 来自北京市农林科学院植物保护研究所应用昆虫研究实验室长期饲养种群。使用扁豆 *Lablab purpureus* 作为食物来源进行饲养, 并置于塑料长方体饲养盒(24.8 cm × 18.0 cm × 9.0 cm)中, 饲养盒上方具有 120 目纱网制作的通风孔(18.0 cm × 9.0 cm)。西花蓟马于培养箱(三洋 MLR-351H, 日本三洋电器有限公司), 温度为 26 ± 1℃、相对湿度为 65% ± 5%、光周期为 16 L:8 D 内饲养。

实验前, 参照 Zhang 等(2014)的方法获得龄期一致的西花蓟马成虫。将新鲜扁豆放入成虫饲养箱中 6 h 后取出, 置于新的养虫盒中饲养。观察到成虫羽化后, 取羽化 72 h 的雌成虫备用。

1.3 重金属 Cd 对番茄不同组织干重、鲜重和含水量的影响

按照 1.1 中的方法准备 Cd 处理的番茄植株, 并分别剪取番茄根、茎、叶组织, 称取鲜重后在 105℃ 烘箱(WGL-125B, 天津市泰斯特仪器有限公司)中杀青后于 70℃ 烘至恒重, 称取干重。每个处理 3 个重复。按照以下公式计算各处理含水量:

$$\text{含水量}(\%) = (\text{鲜重} - \text{干重}) / \text{鲜重} \times 100$$

1.4 重金属 Cd 在番茄不同组织的积累量

按照 1.1 中的方法准备 Cd 处理的番茄植株, 并分别剪取番茄根、茎、叶组织。利用消解法, 参照邸宁(2017)使用电感耦合等离子体质谱仪(Agilent 7900 ICP-MS, 安捷伦科技中国有限责任公司)测量 Cd 的含量。每个处理 3 个重复。

1.5 西花蓟马中 Cd 的积累量

用顶部有通风孔(长 12 cm, 宽 8 cm)且底部有直径 2.5 cm 圆孔的塑料盒(外径: 长 16.7 cm × 宽 12.3 cm × 高 12 cm, 底部: 长 14 cm × 宽 9.5 cm)罩住番茄植株, 将 200 头西花蓟马雌成虫接至不同处理的番茄植株上, 使其取食 10 d 后, 随机挑取 50 头雌成虫放入 1.5 mL 离心管, 每个离心管中放入 2 颗玛瑙珠(直径 2 mm), 于 25℃ 环境下在 50 Hz 的多样品组织研磨仪(Tissuelyser-192L, 上海净信实业发展有限公司)研磨成粉, 随后每个离心管内加入 100 μL DEPC 水, 摇匀后取出玛瑙珠用于 Cd 含量检测。

西花蓟马中 Cd 含量的测试采用直接进样汞 Cd 测试仪(AA2288, 长沙开元仪器有限公司), 仪器条件(A 道、B 道总电流 40 mA, A 道辅阴极电

流 20 mA, B 道辅助阴极电流 0 mA, 负高压 210/270 V, 空气流量 300 mL/min, 氩气流量 700 mL/min)。标准曲线相关性系数为 0.9965。每个处理 3 个生物学重复, 每个样品 3 个机械重复, 测试时吸取 20 μ L 混合均匀的研磨液。

1.6 西花蓟马的存活率

按照 1.1 中的方法准备好番茄植株, 在第四片叶子上固定侧面带有直径 0.5 cm 圆孔的小叶笼(上直径 6.2 cm, 下直径 5.2 cm, 高 2.3 cm, 圆孔用 180 目纱网封住), 每个小叶笼内接入 20 头同时羽化的西花蓟马雌成虫, 48 h 后记录其存活数量。每个处理 10 个重复。

1.7 重金属 Cd 的转移系数和富集系数

按照以下公式计算 Cd 在番茄各部位间和番茄-害虫间的转移系数 (Dar *et al.*, 2017):

转移系数 = 后一营养级 (组织) 干重中的 Cd 浓度 / 前一营养级 (组织) 干重中的 Cd 浓度。

按照以下公式计算重金属在番茄各组织间和害虫中的富集系数 (Aront *et al.*, 2006):

富集系数 = 各个组织中 Cd 浓度 / 营养液中 Cd 浓度。

1.8 数据分析

使用 SPSS 23.0 对 Cd 处理后番茄植株根、茎、叶的干鲜重、Cd 含量以及西花蓟马的 Cd 含量进行单因素方差分析 (one way ANOVA, $P < 0.05$),

并进行多重比较 (Duncan's 新复极差法, $P < 0.05$)。其中番茄含水量和西花蓟马的存活率数据进行了反正弦转换。

2 结果与分析

2.1 不同 Cd 浓度处理对番茄根茎叶鲜重和干重的影响

2.1.1 不同 Cd 浓度处理下番茄根茎叶的鲜重

与对照相比, 随着 Cd 浓度的升高, 番茄根、茎、叶的鲜重均呈显著下降趋势 (图 1-a, 根 $F = 106.924$, $df = 4, 14$, $P < 0.001$; 茎 $F = 197.585$, $df = 4, 14$, $P < 0.001$; 叶 $F = 381.754$, $df = 4, 14$, $P < 0.001$), Cd 处理浓度越高鲜重越低。对照组番茄根、茎、叶的鲜重为 T4 处理组的 2 倍以上 (图 1-a)。

2.1.2 不同 Cd 浓度处理下番茄根茎叶的干重

与对照相比, 随着处理组 Cd 浓度的升高, 番茄根、茎、叶的干重均呈下降趋势 (图 1-b, 根 $F = 17.561$, $df = 4, 14$, $P < 0.001$; 茎 $F = 13.304$, $df = 4, 14$, $P = 0.001$; 叶 $F = 45.710$, $df = 4, 14$, $P < 0.001$)。对照组番茄各组织干重显著高于 Cd 处理组, 均达 T4 处理组番茄根、茎、叶干重的 2 倍以上 (图 1-b)。

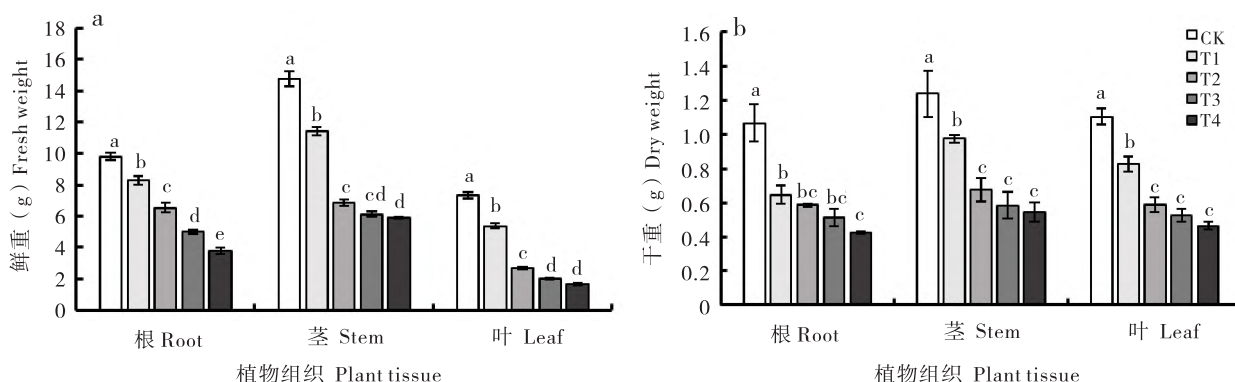


图 1 不同 Cd 浓度对番茄各组织干、鲜重的影响

Fig. 1 Effects of different Cd concentrations on the fresh weight and dry weight of different tomato tissues

注: a, 鲜重; b, 干重。CK, 0 mg/L Cd^{2+} ; T₁, 2.5 mg/L Cd^{2+} ; T₂, 5 mg/L Cd^{2+} ; T₃, 10 mg/L Cd^{2+} ; T₄, 20 mg/L Cd^{2+} 。图中数据为平均值 $\pm$ 标准误。不同字母表示各个处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下图同。Note: a, Fresh weight; b, Dry weight. Data in the figure were means $\pm$ SE. Different letters indicated significant differences among treatments ($P < 0.05$). Same below.

2.2 不同 Cd 浓度处理下番茄根茎叶的含水量

各处理组番茄根的含水量差异显著 (图 2, $F = 4.412$, $df = 4, 14$, $P = 0.026$), T₁ 最高, T₄

最低, 其余处理组间无显著差异。各处理组茎的含水量均无显著差异 (图 2, $F = 0.544$, $df = 4, 14$, $P = 0.708$)。随 Cd 处理浓度增加, 叶片含水量呈降

低趋势 ($F = 57.088$, $df = 4, 14$, $P < 0.001$), 由高至低依次为 CK、T1、T2、T3、T4 (图 2)。

2.3 不同 Cd 浓度处理下番茄根茎叶的 Cd 含量

番茄根中 Cd 积累量差异显著 (图 3-a, $F = 155.577$, $df = 4, 14$, $P < 0.001$)。对照组根的积累量基本为 0, 而 T4 处理组番茄根中的积累量达 $19\,333 \pm 233.38$ mg/kg。随着 Cd 浓度的升高, 番茄茎、叶中 Cd 积累量从低到高低依次为 CK、T1、T2、T3、T4。茎中的积累量在 T2 与 T3 之间无显著差异, 其余均存在显著差异 (图 3-b, $F = 106.521$, $df = 4, 14$, $P < 0.001$)。叶中的 Cd 积累量 T1 与 T2 无显著差异, 其余均存在显著差异 (图 3-c, $F = 184.717$, $df = 4, 14$, $P < 0.001$)。随 Cd 浓度升高, 番茄根、茎、叶内的 Cd 积累量也逐渐增加, Cd 在番茄各组织间的积累量排序为根

> 叶 > 茎, 在根内积累量最大, 远远大于茎叶, 最大积累量可达到茎叶的 130 倍以上。

2.4 不同 Cd 浓度处理下西花蓟马成虫的 Cd 含量

随着各处理 Cd 浓度的升高, 西花蓟马体内的 Cd 积累量也逐渐增加, 蓟马体内的 Cd 积累量从低到高低依次为 CK、T1、T2、T3、T4, 且对照组西花蓟马体内的 Cd 积累量显著低于其他 4 个 Cd 处理组 (图 4-a, $F = 9.916$, $df = 4, 14$, $P = 0.002$)。

2.5 不同 Cd 浓度处理下西花蓟马成虫的存活率

随着各处理 Cd 浓度的升高, 西花蓟马成虫的存活率逐渐降低, 除 T1 外, 其他处理的西花蓟马成虫的存活率均显著低于对照组 (图 4-b, $F = 18.288$, $df = 4, 49$, $P < 0.001$)。

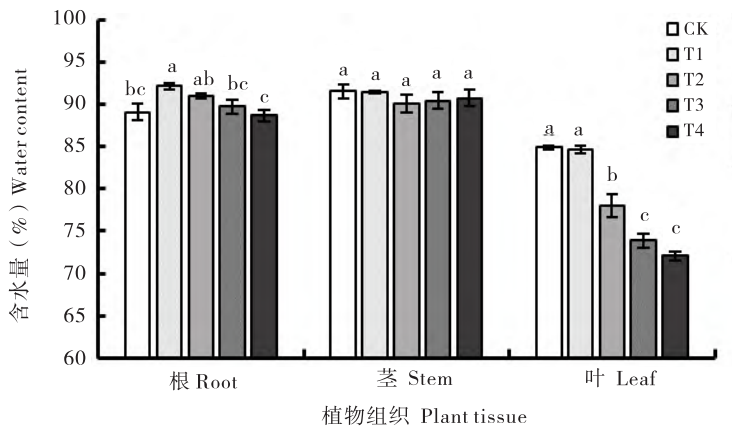


图 2 不同 Cd 浓度对番茄各组织含水量的影响

Fig. 2 Effects of different Cd concentrations on the water content of different tomato tissues

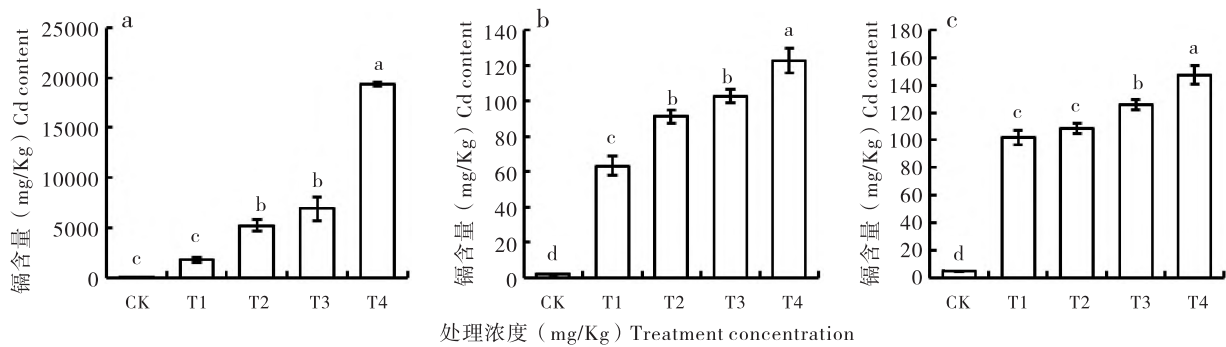


图 3 不同 Cd 浓度对番茄根、茎、叶 Cd 积累的影响

Fig. 3 Effects of different Cd concentrations on Cd accumulation in tomato roots, stem and leaves

注: a, 根镉含量; b, 茎镉含量; c, 叶镉含量。Note: a, Cd accumulation of roots; b, Cd accumulation of stem; c, Cd accumulation of leaves.

2.6 不同 Cd 浓度处理下番茄根 - 茎 - 叶 - 西花蓟马的转移系数和富集系数

不同 Cd 浓度处理下, 随着 Cd 浓度的升高,

根 - 茎、茎 - 叶的转移系数均逐渐降低 (表 1)。根 - 茎的转移系数较低, 转移系数低于 0.94。而由茎 - 叶的转移系数均大于 1, 表明 Cd 从茎到叶

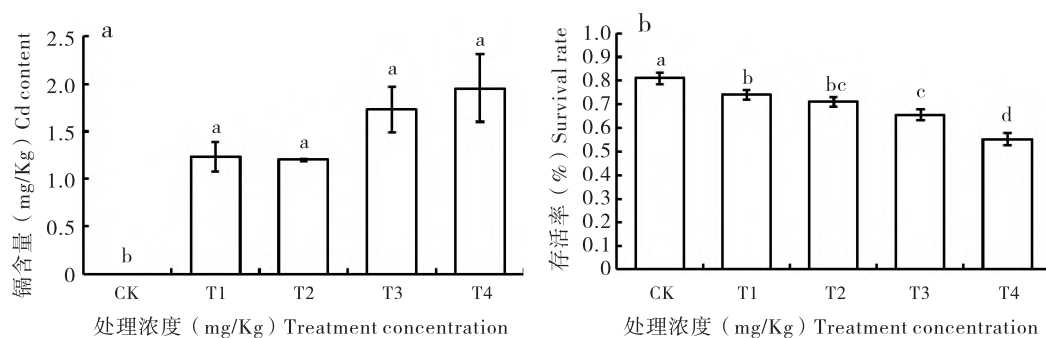


图4 不同Cd浓度对西花蓟马Cd积累量和存活率的影响

Fig. 4 Effects of different Cd concentrations on Cd accumulation and survival rate of *Frankliniella occidentalis*

注: a, 镉积累量; b, 存活率。Note: a, Cd accumulation; b, Survival rate.

片中的传递效率较高。蓟马取食叶片, 而由叶片到蓟马的转移系数为0.01左右, 低于1。随Cd浓度升高, Cd在根、茎、叶、蓟马的富集系数均逐渐降低(表2)。在根中的富集系数最高可达上千倍, 在茎中最高达25倍, 叶中最高达40倍, 而蓟马中的富集系数最大为0.49倍。

表1 重金属Cd的转移系数
Table 1 Transfer coefficients of Cd

处理 Treatment	根-茎 Root-stem	茎-叶 Stem-leaf	叶-西花蓟马 Leaf-F. occidentalis
CK	0.094	2.255	0
T1	0.035	1.608	0.012
T2	0.018	1.189	0.011
T3	0.015	1.225	0.014
T4	0.006	1.201	0.013

表2 重金属Cd的富集系数
Table2 Bio-accumulation factor of Cd

处理 Treatment	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	西花蓟马 F. occidentalis
CK	-	-	-	-
T1	720.00	25.27	40.63	0.49
T2	1 047.33	18.22	21.67	0.24
T3	691.33	10.26	12.57	0.17
T4	966.68	6.13	7.37	0.10

3 结论与讨论

本研究围绕重金属Cd在植物与害虫之间的传

递, 研究了不同浓度的Cd处理对番茄植株生理指标的影响, 并明确了Cd在番茄不同组织的传递和积累, 以及在害虫西花蓟马中的富集效应及对西花蓟马存活的影响。结果表明, 随着Cd处理浓度的增加, 番茄根、茎、叶的干鲜重和含水量均逐渐降低, 而Cd积累量显著升高, 可能是由于Cd抑制了植物的生长发育与营养物质的积累(Dar *et al.*, 2017)。前人研究表明, 在Cd胁迫下, 拟南芥根长变短、叶片变小(张卫娜等, 2016); 花生营养生长被抑制, 叶绿素含量、净光合速率降低, 进而产量下降(高芳等, 2011)。本研究也表明相同时期种植的番茄, Cd处理浓度越高长势越差, 可能是由于生长受抑制, 进而影响了营养物质的积累。

植物的根系作为植物吸收土壤营养的主要器官, 同时也是植物吸收并积累Cd的主要器官, 因而植物根系的Cd吸收能力直接影响到地上部的迁移能力(肖美秀等, 2006; 周静等, 2018; Naikoo *et al.*, 2021a)。本研究表明, 番茄根中Cd的积累量显著高于茎和叶片, 且Cd从营养液到根系的转移系数在整个研究体系中最大, 该趋势与Probst等(2009)、Naikoo等(2019a)和Dar等(2017)的报道相一致。虽然番茄的地上部分Cd的含量较低, 但是Cd的毒性作用并未被削弱, 因为番茄茎和叶片的物质积累被显著抑制。尤其当Cd由茎向叶片转移时, 其转移系数远大于1, 表明叶片能够显著富集Cd。而叶片是植物最重要的器官之一, Cd的显著积累直接影响了植物的光合作用, 进而降低了其干重和鲜重。

一般来说, 植食性昆虫偏好含水量低的植物(Di *et al.*, 2018)。随Cd处理浓度的升高, 叶片含水量显著降低, 而由于昆虫对Cd污染植物的盲

目选择性 (Hladun *et al.*, 2015; 邸宁, 2017), 会增加昆虫取食 Cd 积累叶片的几率。本研究发现, Cd 从番茄叶片转移到西花蓟马的体内时, 转移系数小于 1, 表明西花蓟马取食 Cd 积累的番茄叶片后, 该重金属并未在其体内产生生物放大作用。然而, 随 Cd 处理浓度的增高, 西花蓟马体内显著积累 Cd, 增加了种群受到 Cd 毒性作用的风险。生物对重金属 Cd 的富集也与暴露时间有关。本研究使西花蓟马取食含 Cd 的番茄叶片的时间为 10 d, 且该害虫只能接触到茎和叶片, 这也可能是本研究所转移系数较低的原因。不同的是, Naikoo 等 (2021a) 将黑豆蚜 *Aphis fabae* 放入 Cd 污染的蚕豆植株上取食 21 d 后, 发现 Cd 由蚕豆到黑豆蚜的转移系数高于 1, 表明黑豆蚜显著富集 Cd。有大量报道表明昆虫取食含 Cd 植物后, Cd 在昆虫中表现为生物放大作用 (Green *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2017; Dar *et al.*, 2017)。由此可见, 植食性害虫取食被 Cd 污染的植物叶片后, 其积累和富集该重金属的水平受不同暴露时间和不同的昆虫种类的影响。本研究结果验证了西花蓟马会通过取食 Cd 污染的番茄被动的积累 Cd 的假设。生产中, 西花蓟马不仅在番茄苗期为害, 在开花期和坐果期爆发的几率更大, 若该害虫长期于 Cd 污染的番茄上取食, 其富集量可能会显著增加。当释放天敌进行西花蓟马的防控时, 天敌体内被动积累重金属 Cd 的几率加大, 将不利于天敌的持续控害 (Dar *et al.*, 2017)。

本研究明确了 Cd 由营养液到番茄根, 根到茎, 茎到叶片, 叶片到害虫西花蓟马体内的转移和富集情况, 发现随 Cd 处理浓度的增加, 植物的干、鲜物质积累以及西花蓟马存活量显著降低, 且植物各组织和害虫体内的 Cd 积累量显著增加。该结果为 Cd 的生物传递和富集提供了研究基础, 为番茄生产中需注意重金属的危害和害虫及天敌的潜在影响提供了理论支撑。为进一步揭示 Cd 对番茄物质积累影响的原因, 还需对其光合作用效率等生理生化指标进行测定。同时, 也需对 Cd 经由番茄-西花蓟马-天敌食物链对天敌的毒性效应进行更为系统的研究。

参考文献 (References)

Arnot JA, Gobas FAPC. A review of bioconcentration factor (BCF) and bioaccumulation factor (BAF) assessments for organic chemicals in aquatic organisms [J]. *Environmental Reviews*, 2006, 14 (4):

257-297.

- Chen J. Mechanism of Lead Stress Affecting on the Insecticidal Tolerance of Crop Pest *Spodoptera litura* [D]. Guangzhou: South China Agricultural University Master Thesis, 2018. [陈瑾. 铅胁迫对作物害虫斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* 耐药性的影响机理 [D]. 广州: 华南农业大学硕士论文, 2018]
- Chen J, Wang JW, Shu YH. Review on the effects of heavy metal pollution on herbivorous insects [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31 (5): 1773-1782. [陈瑾, 王建武, 舒迎花. 重金属污染影响植食性昆虫的研究进展 [J]. 应用生态学报, 2020, 31 (5): 1773-1782]
- Chen YM, Huang JG, Wei JQ, *et al.* Low-level cadmium exposure influences rice resistance to herbivores by priming jasmonate signaling [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2022, 194: 104741.
- Cheng WD, Yao HG, Zhang GP, *et al.* Effect of cadmium on growth and nutrition metabolism in rice [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38 (3): 528-537. [程旺大, 姚海根, 张国平, 等. 镉胁迫对水稻生长和营养代谢的影响 [J]. 中国农业科学, 2005, 38 (3): 528-537]
- Dar MI, Khan FA, Green ID, *et al.* The transfer and fate of Pb from sewage sludge amended soil in a multi-trophic food chain: A comparison with the labile elements Cd and Zn [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22: 16133-16142.
- Dar MI, Green ID, Naikoo MI, *et al.* Assessment of biotransfer and bioaccumulation of cadmium, lead and zinc from fly ash amended soil in mustard-aphid-beetle food chain [J]. *Science of Total Environment*, 2017, 584: 1221-1229.
- Di N. The Impact of Copper, Cadmium, Lead and Selenium on Individual of *Apis mellifera* L. (Hymenoptera: Apidae) [D]. Yangling: Northwest University of Agriculture and Forestry Doctoral Thesis, 2017. [邸宁. 铜、镉、铅和硒对意大利蜜蜂 (*Apis mellifera* L.) 个体和种群健康的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学博士论文, 2017]
- Di N, Hladun KR, Zhang K, *et al.* Laboratory bioassays on the impact of cadmium, copper and lead on the development and survival of honeybee (*Apis mellifera* L.) larvae and foragers [J]. *Chemosphere*, 2016, 152: 530-538.
- Di N, Zhang K, Zhang F, *et al.* Polyculture and monoculture affect the fitness, behavior and detoxification metabolism of *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) [J]. *Frontiers in Physiology*, 2018, 9: 1392.
- Di N, Zhang K, Hladun KR, *et al.* Joint effects of cadmium and copper on *Apis mellifera* foragers and larvae [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 2020, 237: 108839.
- Di N, Zhang XZ, Zhang K, *et al.* Influences of indole-3-acetic acid (IAA) spraying on *Solanum lycopersicum* plants and the infesting *Bemisia tabaci* (Gennadius) biotype B (Hemiptera: Aleyrodidae) whiteflies [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2014, 57 (7): 824-830. [邸宁, 张献忠, 张凯, 等. 喷施吲哚-3-乙酸 (IAA) 对番茄及其上 B 型烟粉虱的影响 [J]. 昆虫学报, 2014,

- 57 (7): 824–830]
- Ding HD, Qi NM, Zhu WM, *et al.* Effects of Cd, Zn stress on the growth, contents of proline and GSH of tomato seedlings [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14 (2): 53–55. [丁海东, 齐乃敏, 朱为民, 等. 镉、锌胁迫对番茄幼苗生长及其脯氨酸与谷胱甘肽含量的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2006, 14 (2): 53–55]
- Ding P, Zhuang P, Li ZA, *et al.* Transfer characteristics of cadmium in soil-vegetable-insect food chain [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23 (11): 3116–3122. [丁平, 庄萍, 李志安, 等. 镉在土壤-蔬菜-昆虫食物链的传递特征 [J]. 应用生态学报, 2012, 23 (11): 3116–3122]
- Dong JW, Gao PP, Sun HX, *et al.* Characteristics and health risk assessment of cadmium, lead, and arsenic accumulation in leafy vegetables planted in a greenhouse [J]. *Environmental Science*, 2022, 43 (1): 481–489. [董俊文, 高培培, 孙洪欣, 等. 设施叶菜类蔬菜重金属镉、铅和砷累积特征及健康风险评价 [J]. 环境科学, 2022, 43 (1): 481–489]
- Gao F, Lin YJ, Zhang JL, *et al.* Effects of cadmium stresses on physiological characteristics, pod yield, and seed quality of peanut [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37 (12): 2269–2276. [高芳, 林英杰, 张佳蕾, 等. 镉胁迫对花生生理特性、产量和品质的影响 [J]. 作物学报, 2011, 37 (12): 2269–2276]
- Giusto A, Ferrari L. Biochemical responses of ecological importance in males of the austral South America amphipod *Hyaella curvispina* Shoemaker, 1942 exposed to waterborne cadmium and copper [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, 100: 193–200.
- Godinho DP, Serrano HC, Da Silva AB, *et al.* Effect of cadmium accumulation on the performance of plants and of herbivores that cope differently with organic defenses [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 1723.
- Green ID, Diaz A, Tibbett M. Factors affecting the concentration in seven spotted ladybirds (*Coccinella septempunctata* L.) of Cd and Zn transferred through the food chain [J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158: 135–141.
- Hladun KR, Di N, Liu TX, *et al.* Metal contaminant accumulation in the hive: Consequences for whole colony health and brood production in the honey bee (*Apis mellifera* L.) [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2016, 35: 322–329.
- Howladar SM. A novel *Moringa oleifera* leaf extract can mitigate the stress effects of salinity and cadmium in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, 100: 69–75.
- Huang JN, Chen YM, Huang Y, *et al.* The effect of heavy metal accumulation on plant and herbivore interaction: A review [J]. *Journal of Agriculture*, 2021, 11 (5): 42–45. [黄江南, 陈雨萌, 黄越, 等. 重金属积累影响植物和植食性昆虫互作的研究进展 [J]. 农学学报, 2021, 11 (5): 42–45]
- Hussain B, Ashraf MN, Shafeeq-ur-rahman, *et al.* Cadmium stress in paddy fields: Effects of soil conditions and remediation strategies [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 754: 142188.
- Jiang RF, Ma DY, Zhao FJ, *et al.* Cadmium hyperaccumulation protects *Thlaspi caerulescens* from leaf feeding damage by thrips (*Frankliniella occidentalis*) [J]. *New Phytologist*, 2005, 167: 805–814.
- Lai QY, Wei SH, Dai HP, *et al.* Response of photosynthetic characteristics and fluorescence parameters of tomato to Cd in soil [J]. *China Environmental Science*, 2019, 39 (11): 4737–4742. [赖秋羽, 魏树和, 代惠萍, 等. 番茄光合荧光特性及其镉吸收对土壤镉污染的响应 [J]. 中国环境科学, 2019, 39 (11): 4737–4742]
- Lei GJ, Sun L, Sun Y, *et al.* Jasmonic acid alleviates cadmium toxicity in *Arabidopsis* via suppression of cadmium uptake and translocation [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2019, 62 (2): 218–227.
- MEP, MLR. Report on the national general survey of soil contamination [J]. *China Environmental Protection Industry*, 2014, 5: 10–11. [环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报 [J]. 中国环保产业, 2014, 5: 10–11]
- Naccarato A, Tassone A, Cavaliere F, *et al.* Agrochemical treatments as a source of heavy metals and rare earth elements in agricultural soils and bioaccumulation in ground beetles [J]. *Science of Total Environment*, 2020, 749: 141438.
- Naikoo MI, Dar MI, Khan FA, *et al.* Trophic transfer and bioaccumulation of lead along soil-plant-aphid-ladybird food chain [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019a, 26: 23460–23470.
- Naikoo MI, Khan FA, Noureldeen A, *et al.* Biotransfer, bioaccumulation and detoxification of nickel along the soil-faba bean-aphid-ladybird food chain [J]. *Science of the Total Environment*, 2021a, 785: 147226.
- Naikoo MI, Raghieb F, Dar MI, *et al.* Response of *Vicia faba* L. to cadmium toxicity: Effect on plant growth, photosynthetic pigments and yield characteristics [J]. *Journal of Environmental Biology*, 2019b, 33 (1): 31–37.
- Naikoo MI, Raghieb F, Dar MI, *et al.* Uptake, accumulation and elimination of cadmium in a soil-Faba bean (*Vicia faba*) – Aphid (*Aphis fabae*) – Ladybird (*Coccinella transversalis*) food chain [J]. *Chemosphere*, 2021b, 279: 130522.
- Peng O, Li DY, Liu ST, *et al.* Effects of cadmium stress on rice growth and correlation between bleeding sap and cadmium content in rice [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35 (1): 76–82. [彭鸥, 李丹阳, 刘寿涛, 等. 镉胁迫对水稻生长发育的影响及伤流液与稻米镉含量的相关性研究 [J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35 (1): 76–82]
- Probst A, Liu HY, Fanjul M, *et al.* Response of *Vicia faba* L. to metal toxicity on mine tailing substrate: Geochemical and morphological changes in leaf and root [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2009, 66: 297–308.
- Si J, Pan GX, Xia YS, *et al.* Effects of Cd on different rice growth and antioxidant enzyme system [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22 (5): 832–837. [史静, 潘根兴, 夏运生, 等. 镉胁迫对两品种水稻生长及抗氧化酶系统的影响 [J]. 生态环境学报, 2013, 22 (5): 832–837]

- Song W, Chen BM, Liu L. Soil heavy pollution of cultivated land in China [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20 (2): 293–298. [宋伟, 陈百明, 刘琳. 中国耕地土壤重金属污染概况 [J]. 水土保持研究, 2013, 20 (2): 293–298]
- Song W, Li YQ, Lv K, *et al.* Survey and dietary exposure assessment of cadmium in milled rice in Jiangsu Province [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35 (5): 886–893. [宋雯, 李优琴, 吕康, 等. 江苏省稻米镉含量调查及其膳食暴露评估 [J]. 农业环境科学学报, 2016, 35 (5): 886–893]
- Song Y, Wang Y, Mao WF, *et al.* Dietary cadmium exposure assessment among the Chinese population [J]. *PLoS ONE*, 2017, 12: 0177978.
- Suo LN, Liu BC, Zhao TK, *et al.* Evaluation and analysis of heavy metals in vegetable field of Beijing [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32 (9): 179–186. [索琳娜, 刘宝存, 赵同科, 等. 北京市菜地土壤重金属现状分析与评价 [J]. 农业工程学报, 2016, 32 (9): 179–186]
- Wang XM, Zhang C, Qiu BL, *et al.* Biotransfer of Cd along a soil – plant – mealybug – ladybird food chain: A comparison with host plants [J]. *Chemosphere*, 2017, 168: 699–706.
- Wang Y. The Mechanism of Insecticide Resistance Influenced by Heavy Metal Copper in *Spodoptera litura* [D]. Yangling: Fujian Agriculture and Forestry University Master Thesis, 2018. [王莹. 重金属铜影响斜纹夜蛾耐药性的机制探究 [D]. 杨凌: 福建农林大学硕士论文, 2018]
- Winter TR, Borkowski L, Zeier J, *et al.* Heavy metal stress can prime for herbivore – induced plant volatile emission [J]. *Plant, Cell and Environment*, 2012, 35 (7): 1287–1298.
- Wu GX, Zhu JY, Gao X, *et al.* Study on accumulation and excretion of dietary cadmium and copper by *Boettcherisca Peregrine* (Diptera: Sarcophagidae) [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2010, 32 (3): 347–352. [吴国星, 朱家颖, 高熹, 等. 重金属镉与铜在棕尾别麻蝇体内的积累和排泄研究 [J]. 环境昆虫学报, 2010, 32 (3): 347–352]
- Wu X, Fang B, Yue XM, *et al.* The research progress of vegetable Cd contamination and physiological blocking agents of Cd [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2020, 43 (6): 988–997. [吴雪, 方波, 悦晓孟, 等. 蔬菜重金属 Cd 污染现状及生理阻隔剂研究进展 [J]. 南京农业大学学报, 2020, 43 (6): 988–997]
- Xiao XM, Lin WX, Chen XX, *et al.* The relation between the law of Cd distribution in rice and the Cd – tolerance [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22 (2): 379–381. [肖美秀, 林文雄, 陈祥旭, 等. 镉在水稻体内的分配规律与水稻镉耐性的关系 [J]. 中国农学通报, 2006, 22 (2): 379–381]
- Xin ZL, Cui YJ, Yang XW, *et al.* Current situation of global vegetable industry and research progress of vegetable breeding development path in China [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2022, 20 (9): 3122–3132. [辛竹琳, 崔彦娟, 杨小微, 等. 全球蔬菜产业现状及中国蔬菜育种发展路径研究进展 [J]. 分子植物育种, 2022, 20 (9): 3122–3132]
- Xue, SG, Shi LZ, Wu C, *et al.* Cadmium, lead, and arsenic contamination in paddy soils of a mining area and their exposure effects on human HEPG2 and keratinocyte cell – lines [J]. *Environmental Research*, 2017, 156: 23–30.
- Yang F, Liu WX, Zhang GA, *et al.* Research advances on transmission of tomato spotted wilt virus by *Frankliniella occidentalis* (Pergande) [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2011, 33 (2): 241–249. [杨帆, 刘万学, 张国安, 等. 西花蓟马传播番茄斑萎病毒研究进展 [J]. 环境昆虫学报, 2011, 33 (2): 241–249]
- Yang JM, Bao HXGDL, Wan JY, *et al.* Screening of tomato cultivars in cadmium – polluted areas and study on their antioxidant capacity [J]. *China Journal of Biotechnology*, 2021, 37 (1): 242–252. [杨佳敏, 贺希格都楞, 万家悦, 等. 镉污染地区番茄品种的筛选及其抗氧化能力 [J]. 生物工程学报, 2021, 37 (1): 242–252]
- Zhao FJ, Tang Z, Song JJ, *et al.* Toxic metals and metalloids: Uptake, transport, detoxification, phytoremediation and crop improvement for safer food [J]. *Molecular Plant*, 2022, 15 (1): 27–44.
- Zhang F, Li S, Xiao D, *et al.* Progress in pest management by natural enemies in greenhouse vegetables in China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48 (17): 3463–3476. [张帆, 李姝, 肖达, 等. 中国设施蔬菜害虫天敌昆虫应用研究进展 [J]. 中国农业科学, 2015, 48 (17): 3463–3476]
- Zhang K, Di N, Ridsdill SJ, *et al.* Does a multi – plant diet benefit a polyphagous herbivore? A case study with *Bemisia tabaci* [J]. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 2014, 152: 148–156.
- Zhang K, Li MM, Liu DQ, *et al.* Effect of cadmium stress on seed germination and seedling growth of wheat and maize [J]. *Seed*, 2019, 38 (5): 90–94. [张珂, 厉萌萌, 刘德权, 等. 镉胁迫对小麦、玉米种子萌发及幼苗生长的影响 [J]. 种子, 2019, 38 (5): 90–94]
- Zhang WN, Chen ZJ, Wu XJ, *et al.* Effects of cadmium on plant root growth by laser confocal microscopy technique [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2016, 43 (8): 69–73, 193. [张卫娜, 陈中健, 吴秀菊, 等. 应用激光共聚焦显微技术检测镉对植物根系生长的影响 [J]. 广东农业科学, 2016, 43 (8): 69–73, 193]
- Zhou J, Yang Y, Meng JG, *et al.* Cadmium accumulation and translocation efficiency of rice under different cadmium – polluted soils [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37 (1): 89–94. [周静, 杨洋, 孟桂元, 等. 不同镉污染土壤下水稻镉富集与转运效率 [J]. 生态学杂志, 2018, 37 (1): 89–94]
- Zhu QQ, Li XH, Ge RS. Toxicological effects of cadmium on mammalian testis [J]. *Frontiers in Genetics*, 2020, 11: 527.