

不同 Zn 水平下辣椒体内 Cd 的积累、化学形态及生理特性

陈贵青¹, 张晓璟¹, 徐卫红^{1*}, 刘吉振², 王慧先¹, 郭刘明¹, 陈璐豪¹, 张海波¹, 蓝春桃¹, 曾红军¹, 熊治庭³

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 2. 重庆市农业科学院蔬菜花卉研究所, 重庆 401329; 3. 武汉大学资源环境学院, 武汉 430079)

摘要:采用盆栽试验研究了重金属 Cd ($20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 污染下, 叶面喷施不同浓度 Zn ($0, 100, 200, 400, 600 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 对辣椒生长、叶绿素含量、抗氧化酶活性以及辣椒体内 Cd 形态和积累量的影响。结果表明, 在 $\text{Zn} \leq 400 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内, 辣椒叶、茎、根、果实干重及叶片叶绿素 a、b 含量随 Zn 浓度不断增加而增加; 高量 Zn ($600 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 抑制了辣椒的生长、降低了叶片叶绿素含量。在 $\text{Zn} \leq 400 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内, 辣椒叶 SOD 和 CAT 活性随 Zn 浓度增加而降低, 辣椒叶的超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)活性在 $400 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Zn 时达到最低, 当 $\text{Zn} > 400 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, SOD 和 CAT 活性呈上升趋势。叶面喷施 Zn 使辣椒茎、根及果实中 Cd 含量分别降低了 2.7% ~ 5.4%、7.5% ~ 28.1% 和 7.6% ~ 21.8%。与对照相比较, 叶面喷施 Zn 的辣椒果实 Cd 总提取量、氯化钠提取态 Cd、去离子水提取态 Cd 以及乙醇提取态 Cd 含量分别降低了 7.7% ~ 21.8%、4.11% ~ 23.6%、54.5% ~ 66.8% 和 4.8% ~ 86.7%, 但醋酸提取态和残渣态增加了 28.0% ~ 68.0% 和 12.6% ~ 25.0%。

关键词:镉-锌拮抗; 生理特性; 镉累积; 镉形态; 辣椒

中图分类号: X173 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)07-4657-06

Effect of Different Zinc Levels on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium and Physiological Characterization in *Capsicum annuum* L.

CHEN Gui-qing¹, ZHANG Xiao-jing¹, XU Wei-hong¹, LIU Ji-zhen², WANG Hui-xian¹, GUO Liu-ming¹, CHEN Lu-hao¹, ZHANG Hai-bo¹, LAN Chun-tao¹, ZENG Hong-jun¹, XIONG Zhi-ting³

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. Chongqing Academy of Agricultural Sciences, Chongqing 401329, China; 3. College of Resources and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Pot experiments were carried out to investigate the influence of different zinc (Zn) levels ($0, 100, 200, 400$ and $600 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) on the plant growth, activities of antioxidant enzymes, contents of chlorophyll a and b, accumulation and chemical forms of cadmium (Cd) in *Capsicum annuum* L. when exposed to Cd ($20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). The results showed that dry weights of leaf, stem, fruit and root and contents of chlorophyll a and b in *Capsicum annuum* L. were increased by Zn ($\leq 400 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$), while inhibited by high Zn ($600 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$). Activities of superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT) were reduced by Zn ($\leq 400 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$), the lowest activities of SOD and CAT were recorded in $400 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Zn, but activities of SOD and CAT were increased when $\text{Zn} > 400 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$. Cadmium concentrations in stem, fruit and root of *Capsicum annuum* L. were decreased by 2.7% ~ 5.4%, 7.5% ~ 28.1% and 7.6% ~ 21.8% in the presence of Zn when exposed to Cd. The total extractable Cd, NaCl-extractable Cd, water-extractable Cd and ethanol-extractable Cd in fruit were reduced by 7.7% ~ 21.8%, 4.11% ~ 23.6%, 54.5% ~ 66.8% and 4.8% ~ 86.7% in the presence of Zn, while acetic acid-extractable Cd and residual Cd were increased by 28.0% ~ 68.0% and 12.6% ~ 25.0%.

Key words: antagonism of Cd and Zn; physiological characterization; Cd accumulation; Cd fractions; *Capsicum annuum* L.

镉(Cd)位于元素周期系第ⅡB族,是自然界中广泛存在的一种重金属微量元素^[1]。土壤中的Cd主要来源于人为活动,如采矿、冶炼、电镀及基础化工行业的废水、废气、废渣,含Cd的化肥、农药以及农用污泥也是土壤Cd污染的重要来源。我国每年由工业废弃物排放到环境中的Cd总量就达680 t,全国约24.1%的菜地样本中Cd含量超过国家土壤环境质量二级标准^[2]。郊区菜园土壤、蔬菜Cd污染

的问题在我国大中城市均存在,而且日趋严重^[3-6]。Cd不但是蔬菜重金属污染的主要种类之一^[7],而

收稿日期:2009-09-14;修订日期:2009-11-19

基金项目:现代农业产业技术体系建设专项;国家自然科学基金项目(20477032);重庆市自然科学基金项目(CSTC, 2009BB7246)

作者简介:陈贵青(1985~),女,硕士研究生,主要研究方向为植物营养与农产品安全研究, E-mail: chenguiqing3807@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: xuwei_hong@163.com

且 Cd 污染已经成为限制我国蔬菜产品质量和发展无公害蔬菜的主要因素之一。

Cd 污染土壤的治理方法包括工程法、植物修复和农艺调控方法等^[8]。工程法成本均较为昂贵,而且还会破坏土壤结构及微生物区系,也容易引起“二次污染”。土壤重金属植物修复和农艺调控近年来得到了特别的重视。但自然界中已发现的绝大多数重金属超富集植物往往生长周期长、生物量少、植株矮小,因而限制了其对污染土壤重金属的移除效率,也不利于大面积的机械化操作。Cd 污染治理的农艺调控措施,一类是以降低土壤 Cd 有效性为目的,通过调节土壤 pH、有机质、土壤阳离子代换量(CEC)、质地、CaCO₃ 等因素,改变土壤 Cd 活性,降低其生物有效性,减少从土壤向作物的转移。如在被 Cd 污染的土壤上施用石灰、有机肥都是降低植物吸收 Cd 有效措施等。另一类通过喷施某种物质来抑制 Cd 吸收或转移到作物中的 Cd 污染农艺调控方法——叶面控制技术,此类方法近年来已逐渐受到研究者的关注^[9,10]。叶面控制技术的原理是利用 Cd 的吸附迁移受竞争性阳离子 Zn²⁺、Pb²⁺、Cu²⁺、Fe²⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 等与 Cd²⁺ 的拮抗效应来抑制 Cd 吸收或转移到作物中,从而达到降低 Cd 在可食部位的含量。

蔬菜如辣椒、小白菜等对 Cd 有较强富集作用^[11,12]。据农业部农产品质量安全监督检验测试中心(重庆)调查检测结果显示,重庆市郊区辣椒果实中 Cd 的含量范围在 0~2 mg·kg⁻¹,超标率超过了 50%。李非里等^[12]报道贵阳某市郊菜园辣椒果实超标率达到 90%。辣椒 Cd 超标不仅影响辣椒口感、降低其营养价值和品质,而且会影响人体健康。辣椒产品中的 Cd 含量超标也大大地限制了无公害辣椒的生产和辣椒产品的出口。植物中 Cd 与 Zn 的相互作用早就被人们所关注,多数研究表明 Zn、Cd 在植物共存时,表现出一定拮抗作用^[9,13-15]。但也有相反报道^[1]。目前采用喷施 Zn 来抑制辣椒 Cd 吸收或转移的研究还鲜见报道。为了进一步探讨 Zn、Cd 的相互关系以及叶面控制技术对辣椒 Cd 吸收和 Cd 向可食部位(果实)转移的影响,本研究选取了重庆地区主栽加工型辣椒品种,采用盆栽试验模拟 Cd 污染的土壤条件,分析了叶面喷施不同浓度 Zn 对辣椒生长、生理特性、Cd 的积累及化学形态的影响,以期蔬菜 Cd 污染的合理防治提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试作物为辣椒(*Capsicum annuum* L.),品种世农朝天椒,由重庆农业科学院蔬菜花卉所提供。土壤为酸性菜园土,采自西南大学农场。土壤全 N、有机质分别为 0.97、28.0 g·kg⁻¹,有效 N、有效 P、速效 K、有效 Zn 分别为 72.5、29.0、106.7、0.059 mg·kg⁻¹,pH 为 4.9,Cd 未检测出。

1.2 试验方法

试验于 2009 年 3 月 16 日~7 月 23 日在西南大学资源环境学院玻璃房内进行。试验共设 5 个 Zn 浓度,即 0、100、200、400、600 μmol·L⁻¹。模拟土壤 Cd 污染的浓度为 20 mg·kg⁻¹。所用 Zn 和 Cd 分别为 ZnSO₄·7H₂O 和 CdCl₂·2.5H₂O。将 4 kg 经过 Cd 处理的过 40 目筛的风干土装入塑料盆内(直径×高=30 cm×25 cm),放置 2~3 周后,进行辣椒幼苗移栽,每钵 2 株。移栽后 40 d,开始进行叶面喷施 Zn 的营养液。每隔 4 d 喷施一次,共喷 7 次,每次喷施 100 mL·pot⁻¹,以去离子水为对照处理。肥底 P、K 分别为 100 和 150 mg·kg⁻¹,以 NH₄H₂PO₄ 和 KCl 加入,N 为 180 mg·kg⁻¹,以 NH₄H₂PO₄ 和尿素形式加入。试验所用的药品、肥料均采用分析纯。共设 3 次重复,随机排列。培养期间土壤水分保持田间持水量 60%。培养 125 d 后收获,植株在 105℃ 下杀酶 15 min,在 60℃ 下烘干至恒重。

1.3 测定方法

土壤基本理化性质按常规方法测定^[16]。叶绿素含量采用丙酮提取法测定^[17];高锰酸钾滴定法测定 CAT 活性^[17];氮蓝四唑(NBT)光还原法测定 SOD 活力^[18]。将烘干植株样品在研钵中研碎,经 HNO₃-HClO₄ 法消煮,用原子吸收分光光度计(Perkin Elmer SIMMA 6000,Norwalk,USA)测定不同部位 Cd 含量。

辣椒果实中 Cd 形态采用连续浸取法浸取 Cd^[19],即准确称取 2.000 g 鲜样,置于烧杯中,加入 37.5 mL 提取剂,使样品保持浸透状态,并在 30℃ 恒温箱中放置过夜(约 17~18 h),次日回收提取液,再加入同体积的同样提取液,浸取 2 h 后再回收提取液,重复 2 次,即在 24 h 内提取 4 次,集 4 次提取液(共 150 mL)于烧杯中,提取液经蒸干硝化后测定 Cd 的含量。提取剂及提取顺序为 80% 乙醇(F_E :提取硝酸盐、氯化物为主的无机盐以及氨基酸盐)、去离子水(F_W :提取水溶性有机酸盐、重金属一代磷酸盐)、1 mol·L⁻¹氯化钠溶液(F_{NaCl} :提取果胶盐,与蛋白质结合态或呈吸着态的重金属)、2% 醋酸(F_{HAC} :难溶性重金属磷酸盐,包括二代磷酸盐)、0.6 mol·L⁻¹盐酸(F_{HCl} :提取草酸盐)。

本研究所列结果为 3 次重复的测定值,数据采用 SPSS12.0 统计软件进行方差分析和多重比较。

2 结果与分析

2.1 对辣椒生长的影响

从表 1 可知,在重金属 Cd 污染下,随 Zn 浓度的升高,辣椒根、茎、叶、果实干重以及株高、根长均随

Zn 浓度增加而增加,在 Zn 浓度 $400 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时达到最大,其中根、茎、叶、果实干重以及总干重分别较对照增加了 18.8%、35.6%、77.9%、62.0% 和 45.3%;当 Zn 浓度达到 $600 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,辣椒根、茎、叶、果实干重以及株高、根长又开始下降。除根以外,喷施 Zn 的各处理辣椒植株茎、叶、果实干重均高于对照处理。

表 1 不同 Zn 浓度对辣椒生长的影响¹⁾

Table 1 Effects of different Zn levels on the growth of *Capsicum annuum* L.

Zn 水平 / $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	株高 /cm	根长 /cm	植株干重/ $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$				
			果实	根	茎	叶	总干重
0	$30.1 \pm 1.14\text{c}$	$4.36 \pm 0.23\text{b}$	$2.66 \pm 0.15\text{b}$	$1.18 \pm 0.07\text{bc}$	$1.63 \pm 0.23\text{b}$	$1.71 \pm 0.21\text{c}$	$7.18 \pm 0.25\text{d}$
100	$31.81 \pm 1.44\text{b}$	$5.18 \pm 0.35\text{ab}$	$3.08 \pm 0.28\text{a}$	$1.29 \pm 0.13\text{b}$	$2.57 \pm 0.19\text{ab}$	$2.03 \pm 0.23\text{b}$	$8.97 \pm 0.40\text{c}$
200	$34.19 \pm 1.87\text{a}$	$5.24 \pm 0.27\text{ab}$	$3.10 \pm 0.21\text{a}$	$1.33 \pm 0.10\text{b}$	$2.63 \pm 0.16\text{ab}$	$2.65 \pm 0.27\text{a}$	$9.71 \pm 0.28\text{b}$
400	$34.24 \pm 3.52\text{a}$	$5.43 \pm 0.39\text{a}$	$3.16 \pm 0.12\text{a}$	$1.60 \pm 0.15\text{a}$	$2.90 \pm 0.31\text{a}$	$2.77 \pm 0.18\text{a}$	$10.43 \pm 0.58\text{a}$
600	$33.85 \pm 1.81\text{ab}$	$4.55 \pm 0.19\text{b}$	$2.50 \pm 0.11\text{b}$	$1.02 \pm 0.08\text{c}$	$1.64 \pm 0.40\text{b}$	$2.37 \pm 0.22\text{ab}$	$7.53 \pm 0.33\text{d}$

1) 表中小写字母不同表示锌水平之间差异达 0.05% 的显著水平 ($p < 0.05$), 下同

2.2 不同 Zn 浓度对辣椒生理生化的影响

2.2.1 叶绿素含量影响

试验结果表明(表 2),与对照处理相比,叶面喷施 Zn 的辣椒,其叶片的叶绿素 a、b 以及总量均呈上升趋势,其中 $400 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Zn 处理的辣椒叶片叶绿素 a、b 以及总量上升幅度最大,较对照分别增加 30.7%、18.8% 和 27.2%;而在高浓度 Zn ($600 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 下,辣椒叶片叶绿素 a、b 以及总量则下降。

表 2 不同 Zn 浓度对辣椒叶片叶绿素含量
(以鲜重计)及组成的影响

Table 2 Effects of different Zn levels on chlorophyll content and its composition in leaf of *Capsicum annuum* L.

Zn 水平 / $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	叶绿素 a / $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	叶绿素 b / $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	叶绿素总量 / $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$
0	$0.884 \pm 0.014\text{d}$	$0.357 \pm 0.001\text{b}$	$1.241 \pm 0.006\text{d}$
100	$1.128 \pm 0.012\text{b}$	$0.322 \pm 0.002\text{c}$	$1.450 \pm 0.019\text{b}$
200	$1.134 \pm 0.032\text{b}$	$0.357 \pm 0.004\text{b}$	$1.491 \pm 0.003\text{b}$
400	$1.155 \pm 0.028\text{a}$	$0.424 \pm 0.007\text{a}$	$1.579 \pm 0.026\text{a}$
600	$1.080 \pm 0.015\text{c}$	$0.230 \pm 0.003\text{d}$	$1.380 \pm 0.013\text{c}$

2.2.2 抗氧化酶活性影响

生物代谢产生的自由基对生物膜有伤害作用, SOD 和 CAT 等抗氧化酶对逆境诱导产生的活性氧清除相关,逆境中他们将组成植物体内活性氧清除剂系统,有效清除植物体内的自由基和过氧化物^[20]。由图 1 和图 2 可见,在 $\text{Zn} \leq 400 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内,辣椒叶 SOD 和 CAT 活性随 Zn 浓度增加而降低,辣椒叶 SOD 和 CAT 活性在 $400 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Zn 时

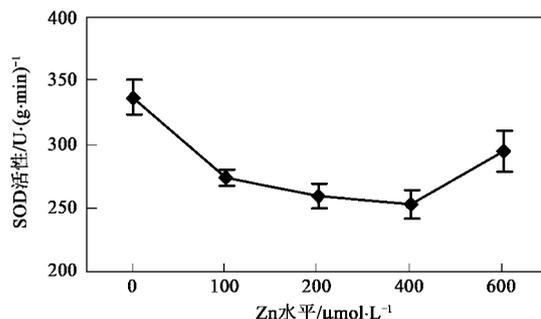


图 1 不同 Zn 浓度对辣椒 SOD 活性的影响

Fig. 1 Influence of different Zn levels on activity of SOD in *Capsicum annuum* L.

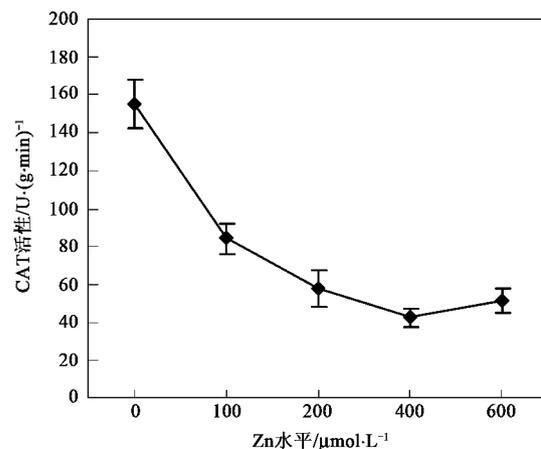


图 2 不同 Zn 浓度对辣椒 CAT 活性的影响

Fig. 2 Influence of different Zn levels on activity of CAT in *Capsicum annuum* L.

达到最低,当 $Zn > 400 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, SOD 和 CAT 活性呈现上升趋势.

2.3 不同 Zn 浓度对辣椒果实 Cd 形态的影响

本试验条件下, Cd 在辣椒果实中主要以氯化钠提取态存在, 含量为 $19.392 \sim 25.374 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均为 $23.257 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 所占镉提取总量的比例为 $76.52\% \sim 79.45\%$, 平均为 77.58% , 其次是醋酸提取态, 含量为 $1.670 \sim 2.805 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均为 $2.395 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占 Cd 提取总量的比例为 $5.04\% \sim 10.81\%$, 平均为 8.14% , 最小的是去离子水提取态, 含量为

$0.249 \sim 1.866 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均为 $0.771 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占 Cd 提取总量的比例为 $0.83\% \sim 5.63\%$, 平均为 2.53% (表 3). 试验还发现, 随 Zn 浓度的增加, 辣椒中 Cd 提取总量逐渐降低, 降低幅度为 $7.7\% \sim 21.8\%$. 辣椒果实 Cd 组分中, 以氯化钠提取态 Cd、去离子水提取态 Cd 以及 80% 乙醇提取态 Cd 随 Zn 浓度的增加呈下降趋势, 降幅分别为 $4.11\% \sim 23.6\%$ 、 $54.5\% \sim 66.8\%$ 和 $54.8\% \sim 86.7\%$. 但醋酸提取态 Cd 和残渣态 Cd 随 Zn 浓度的增加反而增加了 $28.0\% \sim 68.0\%$ 和 $12.6\% \sim 25.0\%$.

表 3 不同 Zn 浓度对辣椒果实 Cd 形态含量的影响¹⁾

Table 3 Effects of different Zn levels on chemical forms of Cd in *Capsicum annuum* L.

Zn 水平 / $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	F_E		F_W		F_{NaCl}		F_{HAC}		F_{HCl}		F_r		总提取量 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
	/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	/%	/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	/%	/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	/%	/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	/%	/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	/%	/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	/%	
0	$1.866 \pm 0.083\text{a}$	$5.63 \pm 0.27\text{a}$	$1.645 \pm 0.043\text{a}$	$4.96 \pm 0.08\text{a}$	$25.374 \pm 0.361\text{a}$	$76.52 \pm 0.27\text{ab}$	$1.670 \pm 0.032\text{b}$	$5.04 \pm 0.14\text{d}$	$1.598 \pm 0.060\text{c}$	$4.82 \pm 0.12\text{b}$	$1.007 \pm 0.017\text{b}$	$3.04 \pm 0.02\text{c}$	$33.160 \pm 1.062\text{a}$
100	$0.524 \pm 0.007\text{c}$	$1.71 \pm 0.06\text{c}$	$0.574 \pm 0.016\text{d}$	$1.87 \pm 0.02\text{c}$	$24.33 \pm 0.207\text{b}$	$79.45 \pm 0.51\text{a}$	$2.137 \pm 0.041\text{b}$	$6.98 \pm 0.08\text{c}$	$1.923 \pm 0.058\text{a}$	$6.28 \pm 0.17\text{a}$	$1.134 \pm 0.054\text{ab}$	$3.70 \pm 0.05\text{b}$	$30.623 \pm 0.963\text{b}$
200	$0.373 \pm 0.022\text{cd}$	$1.24 \pm 0.07\text{cd}$	$0.546 \pm 0.020\text{d}$	$1.81 \pm 0.03\text{c}$	$23.635 \pm 0.211\text{b}$	$78.43 \pm 0.97\text{a}$	$2.647 \pm 0.028\text{a}$	$8.78 \pm 0.08\text{b}$	$1.773 \pm 0.019\text{b}$	$5.88 \pm 0.13\text{a}$	$1.163 \pm 0.091\text{ab}$	$3.86 \pm 0.09\text{b}$	$30.137 \pm 1.656\text{b}$
400	$0.249 \pm 0.017\text{d}$	$0.83 \pm 0.08\text{d}$	$0.895 \pm 0.012\text{b}$	$2.99 \pm 0.08\text{b}$	$23.554 \pm 0.319\text{b}$	$78.77 \pm 0.58\text{a}$	$2.717 \pm 0.054\text{a}$	$9.09 \pm 0.29\text{b}$	$1.274 \pm 0.027\text{d}$	$4.26 \pm 0.16\text{c}$	$1.213 \pm 0.007\text{ab}$	$4.06 \pm 0.01\text{b}$	$29.902 \pm 1.784\text{b}$
600	$0.843 \pm 0.068\text{b}$	$3.25 \pm 0.24\text{b}$	$0.748 \pm 0.009\text{c}$	$2.88 \pm 0.06\text{b}$	$19.392 \pm 0.208\text{c}$	$74.75 \pm 1.30\text{b}$	$2.805 \pm 0.058\text{a}$	$10.81 \pm 0.11\text{a}$	$0.894 \pm 0.033\text{e}$	$3.45 \pm 0.19\text{d}$	$1.259 \pm 0.043\text{a}$	$4.85 \pm 0.04\text{a}$	$25.941 \pm 1.252\text{c}$

1) F_E 为乙醇提取态, F_W 为去离子水提取态, F_{NaCl} 为氯化钠提取态, F_{HAC} 为醋酸提取态, F_{HCl} 为盐酸提取态, F_r 为残渣态 (提取总量减去其余形态提取量); % 为各形态 Cd 所占 Cd 总提取量的百分比

2.4 不同 Zn 浓度对辣椒 Cd 积累的影响

由表 4 可见, 辣椒 Cd 含量以果实 > 根 > 茎 > 叶. 除叶外, 叶面喷施 Zn 使辣椒根、茎、果实中的镉含量有所降低, Cd 含量降低幅度分别为 $2.7\% \sim 5.4\%$ 、 $7.5\% \sim 28.1\%$ 、 $7.6\% \sim 21.8\%$. 随 Zn 浓度增加, 果实 Cd 含量呈现下降趋势; 根、茎 Cd 含量在 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Zn 时达到最低, 随 Zn 浓度继续增加,

根、茎 Cd 含量呈现增加趋势, 但含量小于不喷 Zn 处理 (对照). Cd 主要累积于辣椒根和果实中, 其次是叶, 积累最少的是茎. 除了茎的 100 、 200 和 $600 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Zn 处理, 以及根和果实的 $600 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Zn 处理外, 叶面喷施 Zn 使辣椒 Cd 积累量较对照有所上升. 除 $600 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Zn 处理的全量 Cd 降低了 10% 外, 其余处理的全量 Cd 也较对照有所增加.

表 4 不同 Zn 浓度对辣椒 Cd 积累的影响

Table 4 Effects of different Zn levels on accumulation of Cd in *Capsicum annuum* L.

Zn 水平 / $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	Cd 含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$				Cd 积累量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$				Cd 全量 / $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
	叶	茎	根	果实	叶	茎	根	果实	
0	$10.20 \pm 1.06\text{a}$	$13.88 \pm 0.57\text{a}$	$24.12 \pm 0.08\text{a}$	$47.37 \pm 0.36\text{a}$	$2.71 \pm 0.04\text{c}$	$1.64 \pm 0.03\text{b}$	$3.93 \pm 0.01\text{c}$	$4.88 \pm 0.01\text{c}$	$13.16 \pm 0.13\text{c}$
100	$10.18 \pm 0.47\text{a}$	$9.98 \pm 0.65\text{c}$	$22.82 \pm 0.14\text{b}$	$43.75 \pm 1.02\text{b}$	$3.14 \pm 0.03\text{b}$	$1.29 \pm 0.01\text{d}$	$5.86 \pm 0.08\text{b}$	$5.68 \pm 0.06\text{a}$	$15.97 \pm 0.24\text{b}$
200	$11.34 \pm 0.76\text{a}$	$11.38 \pm 0.28\text{bc}$	$22.91 \pm 0.05\text{b}$	$43.05 \pm 0.55\text{bc}$	$3.52 \pm 0.01\text{a}$	$1.51 \pm 0.02\text{c}$	$6.02 \pm 0.05\text{a}$	$5.49 \pm 0.01\text{b}$	$16.55 \pm 0.27\text{b}$
400	$11.13 \pm 0.51\text{a}$	$11.62 \pm 0.21\text{bc}$	$23.32 \pm 0.36\text{ab}$	$42.72 \pm 1.08\text{c}$	$3.51 \pm 0.07\text{a}$	$1.86 \pm 0.01\text{a}$	$6.76 \pm 0.10\text{a}$	$5.42 \pm 0.03\text{b}$	$17.57 \pm 0.32\text{a}$
600	$11.06 \pm 0.99\text{a}$	$12.84 \pm 0.73\text{ab}$	$23.48 \pm 0.28\text{ab}$	$37.06 \pm 0.54\text{d}$	$2.77 \pm 0.01\text{c}$	$1.31 \pm 0.02\text{d}$	$3.85 \pm 0.02\text{c}$	$4.06 \pm 0.05\text{d}$	$11.98 \pm 0.09\text{d}$

3 讨论

本试验条件下, 在 Cd 污染土壤上叶面喷施 Zn

能有效促进辣椒生长, 在 $\leq 400 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内, 随叶面喷施 Zn 浓度的增加, 辣椒根、茎、叶、果实的干重也不断升高 (表 1). 说明 Zn 与 Cd 的拮抗效应能

缓解 Cd 对辣椒生长的抑制。此外 Zn 作为植物必需的营养元素之一,可提高光合作用效率,同时参与蛋白质的合成,促进了辣椒植株的生长,增强了植物的抗逆能力,从而在一定程度上缓解 Cd 的毒害作用^[21]。本试验中,喷施的 Zn 由 ZnSO₄ 提供,在 ≤400 μmol·L⁻¹ 范围内辣椒的生长和干物质积累的增加, S 可能也有一定贡献。当 Zn 浓度达到 600 μmol·L⁻¹ 时,虽然辣椒生长量仍高于对照,但由于 Zn 过量导致辣椒遭受到 Cd 和 Zn 双重毒害,使得该处理的辣椒较其他 Zn 处理的生物量有明显降低。

叶绿素是植物进行光合作用的色素,其含量高是判断植物光合作用强弱的一个重要生理指标^[22]。叶面喷施 Zn (≤400 μmol·L⁻¹) 提高了辣椒叶片的叶绿素 a、b 以及总量,增加了光合作用强度,提高了光合产物的合成量,从而增加了辣椒的生物量。但高浓度 Zn (600 μmol·L⁻¹) 下,叶绿素 a、b 以及总量则呈下降趋势,说明高浓度 Zn 对植物光合作用是不利的。此结果与辣椒植株干重的变化趋势一致。

重金属污染会导致植物体内产生大量活性氧自由基,引起蛋白质和核酸等生物活性物质变性、膜质过氧化,由超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)等组成的抗氧化系统能够清除氧自由基,可使细胞免受由重金属引起的氧化胁迫伤害^[23-25]。在本试验中,发现叶面喷施低浓度 Zn 较 CK 处理能降低 SOD、CAT 这 2 种抗氧化物酶的含量(图 1 和图 2)。这正表明喷施 Zn 能降低植物体内活性氧自由基,从而导致清除自由基酶含量下降以期恢复正常活性水平。该结果与低 Zn 浓度下(≤400 μmol·L⁻¹)辣椒生长量增加以及植株叶具有较高叶绿素含量是一致的。当喷施的 Zn 浓度过高,由于植物遭受到来自 Zn 和 Cd 复合污染的毒害作用,此时植株体内的 SOD、CAT 活性又上升,以适应不良环境^[23]。

叶面喷施 Zn 不仅降低了辣椒根、茎、果实中的 Cd 含量,且随 Zn 浓度增加,果实 Cd 含量呈现明显的下降趋势。原因可能是 Zn 与 Cd 的拮抗效应,阻隔了 Cd 从叶向果实转移,从而降低了辣椒可食部位 Cd 含量。这也是 Cd 在叶中含量反而较对照有所增加的原因所在。从试验还可发现,辣椒根和果实是 Cd 的主要积累器官,其次是叶,茎 Cd 积累最少。可见重金属 Cd 在辣椒果实中是极易富集的。由于辣椒主要以果实为可食器官,因此在 Cd 污染土壤上生产辣椒,对其品质是十分不利的。试验结果还显

示,虽然 Zn 能有效降低果实中 Cd 的含量,但叶面喷施 Zn 使辣椒果实中的 Cd 积累量较对照有所增加(除 600 μmol·L⁻¹ Zn 处理外),就其原因可能是喷施 Zn 后促进了辣椒生长以及果实生物量的明显增加,从而导致了果实中 Cd 积累量的增加。

Cd 在辣椒果实中主要以氯化钠提取态存在,平均含量为 23.257 mg·kg⁻¹,所占 Cd 总提取量的比例平均为 77.58%,这主要是因为 Cd 对蛋白质或其它有机化合物中巯基有很强的亲和力,因此在作物体内,Cd 常与蛋白质相结合^[19]。本试验条件下,在叶面喷施 Zn 后辣椒果实 Cd 总提取态显著下降,尤其以蛋白质形态存在的 Cd 含量及可溶性 Cd 含量下降明显(表 3)。表明叶面喷施 Zn 能有效降低辣椒果实中 Cd 的含量,其原因可能是 Zn 与 Cd 为同族元素,它们有着非常相近的化学性质,Cd 与 Zn 可以互相竞争进入生物细胞上的结合位点^[9],从而影响 Cd 在植物体内各形态和含量的变化。但本试验也发现醋酸浸提态 Cd 和残渣态 Cd 含量呈上升趋势,其原因有待进一步研究。

4 结论

(1) Zn 与 Cd 在辣椒中存在着竞争作用,当 Zn 大量存在时,促进了辣椒生长,缓解了 Cd 对辣椒生长的不利影响,降低了重金属 Cd 引起的氧化胁迫,提高了辣椒叶片叶绿素 a、b 以及总量,但高浓度 Zn (600 μmol·L⁻¹) 使叶绿素 a、b 以及总量降低,SOD 和 CAT 活性有所回升,且对辣椒生长不利。

(2) 叶面喷施 Zn,可以有效地降低植株茎、根、果实 Cd 含量及果实中 Cd 的总提取量。随 Zn 浓度的增加,辣椒果实中 Cd 氯化钠提取态、去离子水提取态、80% 乙醇提取态以及提取总量显著降低,提取总量最大降低幅度达 21.77%。由于 Zn 促进了辣椒生物量的增加,辣椒果实全量 Cd 较对照有所增加。

参考文献:

- [1] 徐卫红,王宏信,刘怀,等. Zn、Cd 单一及复合污染对黑麦草根分泌物及根际 Zn、Cd 形态的影响[J]. 环境科学, 2007, 28 (9): 2089-2095.
- [2] 曾希柏,李莲芳,梅旭荣. 中国蔬菜地土壤重金属含量及来源分析[J]. 中国农业科学, 2007, 40(11): 2507-2517.
- [3] 宋波,陈同斌,郑袁明,等. 北京市菜地土壤和蔬菜镉含量及其健康风险分析[J]. 环境科学学报, 2006, 26 (8): 1343-1353.
- [4] 吴新民,李恋卿,潘根兴,等. 南京市不同功能城区土壤中重金属 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的污染特征[J]. 环境科学, 2003, 24 (3): 105-111.
- [5] 李其林,黄昀,骆东奇. 重庆市蔬菜基地土壤中重金属含量及

- 污染特征[J]. 土壤与环境, 2000, 9(4):270-273.
- [6] 师荣光,周启星,刘凤枝,等. 天津郊区土壤-蔬菜系统中 Cd 的积累特征及污染风险[J]. 中国环境科学, 2008, 28(7):634-639.
- [7] Makino T, Sugahara K, Sakurad Y *et al.* Remediation of cadmium contamination in paddy soils by washing with chemicals: Selection of washing chemicals [J]. Environmental Pollution, 2006, 144(1):2-10.
- [8] Li P, Wang X X, Zhang T L *et al.* Effects of several amendments on rice growth and uptake of copper and cadmium from a contaminated soil [J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, 20(4):449-455.
- [9] 吕选忠,宫象雷,唐勇,等. 叶面喷施锌或硒对生菜吸收镉的拮抗作用研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(5):868-870.
- [10] 周青,黄晓华,彭方晴,等. 镧-甘氨酸配合物对镉伤害小白菜的影响[J]. 环境科学, 1999, 20(1):91-94.
- [11] 于方明,仇荣亮,汤叶涛,等. Cd 对小白菜生长及氮素代谢的影响研究[J]. 环境科学, 2008, 29(2):506-511.
- [12] 李非里,刘丛强,杨元根,等. 贵阳市郊菜园土-辣椒体系中重金属的迁移[J]. 生态与农村环境学报, 2007, 23(4):52-56.
- [13] Herren T, Feller U. Transport of cadmium via xylem and phloem in maturing wheat shoots: Comparison with the translocation of zinc, strontium and rubidium [J]. Annals of Botany, 1997, 80:623-628.
- [14] Chakravarty B, Srivastava S. Effect of cadmium and zinc interaction on metal uptake and regeneration of tolerant plants in linseed [J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 1997, 61:45-50.
- [15] 朱波,汪涛,王艳强,等. 锌、镉在紫色土中的竞争吸附[J]. 中国环境科学, 2006, 26(增刊):73-77.
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000. 12-22, 107-195, 335-336.
- [17] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2000. 165-167.
- [18] 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社, 2002. 154-155.
- [19] Alarcón A L, Madrid R, Romojaro F *et al.* Calcium forms in leaves of muskmelon plants grown with different calcium compounds [J]. Journal of Plant Nutrition, 1998, 21(9):1897-1912.
- [20] 王兴明,涂俊芳,李晶,等. Cd 处理对油菜生长和抗氧化酶系统的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(1):102-106.
- [21] 宋正国,徐明岗,刘平,等. 锌对土壤有效性的影响及其机制[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3):889-893.
- [22] 刘登义,王友保,张徐祥,等. 污灌对小麦幼苗生长及活性氧代谢的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(10):1319-1322.
- [23] 李文一,徐卫红,何建平,等. 难溶态锌、镉对香根草抗氧化酶活性及锌、镉吸收的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1):122-126.
- [24] 徐卫红,王宏信,李文一,等. 重金属富集植物黑麦草对 Zn 的响应[J]. 水土保持学报, 2006, 20(3):43-46.
- [25] Rodríguez-serrano M, Romero-puertas M C, Zabalza A *et al.* Cadmium effect on oxidative metabolism of pea (*Pisum sativum* L.) roots. Imaging of reactive oxygen species and nitric oxide accumulation *in vivo* [J]. Plant, Cell and Environment, 2006, 29(8):1532-1544.