

铁对番茄镉积累及其化学形态的影响

周 坤¹, 刘 俊¹, 徐卫红^{1,*}, 张明中¹, 江 玲¹, 杨 芸¹, 王崇力¹,
张进忠¹, 熊治庭²

(¹西南大学资源环境学院, 重庆 400715; ²武汉大学资源环境学院, 武汉 430079)

摘 要: 采用番茄盆栽试验研究了在重金属 Cd ($10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 污染条件下, 叶面喷施不同浓度 (0、200 和 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) Fe ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 对番茄 ‘4641’ 和 ‘渝粉 109’ 生长、光合特性、抗氧化酶活性及番茄体内 Cd 形态和积累量的影响。结果表明, 喷施 Fe 后, 番茄果实、根、茎、叶干质量和植株总干质量, 以及 Cd 含量和积累量在 2 个品种之间的差异达到了显著水平。Fe 处理显著增加了 2 个番茄品种的果实、根、茎、叶及植株总干质量。随 Fe 浓度增加, 番茄叶片 P_n 、 G_s 和 T_r 以及 ‘渝粉 109’ POD 活性、‘4641’ 叶 CAT 活性先增加, 然后降低; 而叶片 C_i 以及 ‘渝粉 109’ 叶 SOD 活性则先下降然后回升。番茄果实中各形态 Cd 含量的顺序为: 残渣态 Cd (F_R) > 盐酸提取态 Cd (F_{HCl}) > 乙醇提取态 Cd (F_E) > 氯化钠提取态 Cd (F_{NaCl}) > 乙酸提取态 Cd (F_{HAc}) > 去离子水提取态 Cd (F_W)。适量的 Fe ($200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 减少了番茄果实中各形态 Cd 含量, 但高量 Fe ($400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 增加了 ‘4641’ 果实中 F_{HCl} 、 F_R 以及 ‘渝粉 109’ 果实中 F_E 、 F_{NaCl} 、 F_R 和 Cd 总提取量。番茄各部位 Cd 积累量的顺序为: 叶 > 茎 > 果实 > 根。叶面喷施 Fe ($200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 使番茄叶、茎、根和果实中的 Cd 含量相比对照处理分别降低了 7.1%~21.9%、35.6%~50.4%、13.1%~37.0% 和 2.8%~8.2%。供试 2 个番茄品种, 无论喷 Fe 与否, 果实 Cd 含量、果实 Cd 积累量和植株 Cd 总积累量均为 ‘4641’ < ‘渝粉 109’。

关键词: 番茄; 铁镉交互; 抗氧化酶; 镉累积; 镉形态

中图分类号: S 641.2

文献标志码: A

文章编号: 0513-353X (2013) 11-2269-11

Effect of Iron on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Tomato

ZHOU Kun¹, LIU Jun¹, XU Wei-hong^{1,*}, ZHANG Ming-zhong¹, JIANG Ling¹, YANG Yun¹, WANG Chong-li¹, ZHANG Jin-zhong¹, and XIONG Zhi-ting²

(¹College of Resources and Environmental Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; ²College of Resources and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Pot experiments were carried out to investigate the influence of different iron (Fe) levels (0, 200 and $400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) on the plant growth, activities of antioxidant enzymes, accumulation and chemical forms of cadmium (Cd) in tomato when exposed to Cd ($10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). The results showed that dry weights of fruit, roots, stem, leaf and plant, and concentrations and accumulation of Cd significantly differed between two varieties of tomato. Dry weights of fruit, roots, stem, leaf and plant increased in the

收稿日期: 2013-04-26; **修回日期:** 2013-09-18

基金项目: 国家现代农业产业技术体系建设专项资金项目 (CARS-25-C-05); 国家自然科学基金项目 (20477032); 国家科技支撑计划项目 (2007BAD87B10)

* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: xuwei_hong@163.com)

presence of Fe. Photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s) and transpiration rate (T_r) in both varieties, and activity of peroxidase (POD) in ‘Yufen109’, and activity of catalase (CAT) in ‘4641’ increased at first, and then decreased with increasing levels of Fe, while intercellular carbon dioxide concentration (C_i) in both varieties, activity of superoxide dismutase (SOD) in ‘Yufen109’ decreased at first, and then increased with increasing levels of Fe. The contents of chemical forms of Cd in fruit of tomato were in order of residual Cd (F_R) > hydrochloric acid-extractable Cd (F_{HCl}) > ethanol-extractable Cd (F_E) > sodium chloride-extractable Cd (F_{NaCl}) > acetic acid-extractable Cd (F_{HAc}) > deionized water-extractable Cd (F_W). All chemical forms of Cd significantly decreased after the application of adequate Fe ($200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) compared to the control. However, F_{HCl} and F_R of ‘4641’, and the total extractable Cd, F_E , F_{NaCl} and F_R of ‘Yufen109’ increased at $400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Fe treatment. Cadmium accumulations in tomato were in order of leaf > stem > fruit > roots. Cadmium concentrations in leaf, stem, roots and fruit of both varieties decreased by 7.1% – 21.9%, 35.6% – 50.4%, 13.1% – 37.0% and 2.8% – 8.2% in the presence of Fe when exposed to Cd, respectively. Cadmium concentrations, and Cd accumulation in fruit and plant were in order of ‘4641’ < ‘Yufen109’ in the presence or absence of Fe.

Key words: tomato; antagonism of iron and cadmium; activities of antioxidant enzymes; Cd accumulation; Cd fractions

镉 (Cadmium, Cd) 是自然界中广泛存在的一种重金属微量元素 (Xu et al., 2010), 被列为首位土壤重金属污染物 (Satarug et al., 2003; Wei & Zhou, 2006)。Cd 被广泛应用于电镀工业、化工工业、电子业和核工业等领域, “三废” 排放, 以及农业生产过程中污灌、施肥等行为使得土壤 Cd 污染日趋加重 (Radotic et al., 2000)。据统计, 全世界每年向环境中释放的 Cd 达 30 000 t 左右, 其中 82% ~ 94% 的 Cd 进入到土壤中。中国镉污染面积达 3.85 万 hm^2 , 占重金属超标面积的 56.9% (李永华 等, 2012)。郊区菜园土壤 Cd 污染问题在大中城市均存在 (宋波 等, 2006); 约 24.1% 的菜地样本 Cd 含量超过国家土壤环境质量二级标准 (曾希柏 等, 2007)。Fe 是植物必需的营养元素之一, 与叶绿素的形成有关, 还是许多氧化—还原酶催化部分的组分, 参与植物光合作用、呼吸作用等许多重要生命活动 (Chien et al., 2001)。作物中铁和镉的交互作用一直是研究者关注的热点问题。研究显示, Fe 能减少作物对 Cd 的吸收 (Chlopecka & Adriano, 1997; Shao et al., 2007)。但也存在相反报道 (张燕, 2006)。

蔬菜吸收积累重金属 Cd 的能力不仅在种间差异显著, 而且在品种间也表现出显著性差异 (李德明 等, 2004; 孙建云和沈振国, 2007; 陈贵青 等, 2010)。研究表明番茄对 Cd 耐性和吸收富集存在基因型差异 (朱芳 等, 2006)。为了进一步探讨铁、镉的相互关系以及叶面喷施 Fe 对不同番茄品种 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 2 个主栽番茄品种, 采用盆栽试验模拟 Cd 污染的土壤条件, 分析了叶面喷施 Fe 对番茄不同品种生长、生理特性、Cd 的积累及化学形态的影响, 以期对蔬菜 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

供试番茄 (*Solanum lycopersicum* Mill.) 品种为 ‘4641’ 和 ‘渝粉 109’, 由重庆市农业科学院

蔬菜花卉所提供。供试土壤采自重庆市九龙坡区白市驿蔬菜基地。土壤全 N 和有机质分别为 1.21 和 $33.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效 N、有效 P 和速效 K 分别为 110.8、10.6 和 $104.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 6.9, CEC $20.7 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, 未检出 Cd。

1.2 试验方法

试验于 2012 年 3 月 10 日—7 月 9 日在西南大学资源环境学院玻璃温室进行。共设 3 个 Fe 浓度, 即 0、200 和 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。模拟土壤 Cd 污染的浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。所用 Fe、Cd 分别为 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 。将 5 kg 经过 Cd 处理过 40 目筛的风干土装入塑料盆内 (直径 25 cm, 高 17 cm), 平衡 2~3 周后, 进行番茄幼苗移栽, 每钵 1 株。在番茄开花期叶面喷施 Fe 的营养液。每隔 5 d 喷施 1 次, 共喷 7 次, 每次每钵喷 100 mL, 以喷去离子水为对照处理。肥底 P、K 分别为 100 和 $150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 以 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 和 KCl 的形式加入, N 为 $180 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 以 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 和尿素的形式加入。试验所用的药品、肥料均采用分析纯。每个处理设置 3 次重复, 共 18 钵, 随机排列。培养期间土壤水分含量保持为田间最大持水量的 60%。每次浇水前先用土壤水分速测仪测定土壤的含水量, 3 次测量取平均, 然后计算所需的补水量。从第 1 次结果开始记产, 培养 120 d 后收获, 植株各部位分别在 105°C 下杀酶 15 min, 在 60°C 下烘干至恒重。

1.3 测定方法

土壤基本理化性质采用常规方法测定 (鲁如坤, 2000)。土样经 $\text{HCl} - \text{HNO}_3 - \text{HClO}_4$ 消解后, 用原子吸收分光光度计 (Perkin Elmer SIMMA 6000, Norwalk, USA) 测定土 Cd 含量。番茄叶过氧化氢酶 (CAT) 活性采用高锰酸钾滴定法测定 (李合生, 2000); 过氧化物酶 (POD) 活性采用愈创木酚法测定 (张志良, 2002); 超氧化物歧化酶 (SOD) 活性采用氮蓝四唑 (NBT) 还原法测定 (张志良, 2002)。用便携式光合测定系统 (Li-6400, LI-COR, USA) 测定番茄叶片净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s)、胞间 CO_2 浓度 (C_i) 和蒸腾速率 (T_r)。将烘干的样品在研钵中研碎, 经 $\text{HNO}_3 - \text{HClO}_4$ 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, 镉的检测限为 $0.005 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

番茄果实中各 Cd 形态分级采用连续浸取法浸取 Cd (Alarcón et al., 1998)。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°C 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。将 4 次提取液 (共 150 mL) 混合, 经电热板蒸至近干后加入适量 $\text{HNO}_3 - \text{HClO}_4$ 混合酸 (4:1, 体积比) 消煮澄清后用 10% 硝酸定容, 然后用原子吸收分光光度计 (Perkin Elmer SIMMA 6000, Norwalk, USA) 测定 Cd 含量, 镉的检测限为 $0.005 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。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)、 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 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)、 $0.6 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐酸 (F_{HCl} , 提取草酸盐)。

本研究所列结果为 3 次重复的平均值, 数据采用 SPSS 12.0 统计软件进行方差分析和多重比较。

2 结果与分析

2.1 生物量

从表 1 可知, 番茄果实、根、茎、叶及总干质量在 2 个品种间和 Fe 浓度处理间的差异达到了显

著水平。在重金属 Cd 污染下, 与对照相比, 除 ‘渝粉 109’ 的 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理外, 喷施 Fe 显著增加了 2 个番茄品种的果实、根、茎、叶及总干质量, 增幅分别为 20.4%~48.6%、13.3%~56.0%、16.0%~63.1%、9.9%~16.8%和 21.6%~40.3%。番茄果实、根、茎、叶及总干质量均在 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Fe 处理最高。比较 2 个品种, 未喷 Fe 时, 果实干质量为 ‘4641’ > ‘渝粉 109’, 但喷 Fe 后, 果实干质量为 ‘渝粉 109’ > ‘4641’。

表 1 不同 Fe 浓度处理对番茄单株干质量的影响

Table 1 Effects of different Fe levels on dry weights of tomato

g

品种 Variety	Fe / ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	果实 Fruit	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	总和 Total
‘4641’	0	$28.0 \pm 0.1 \text{ c}$	$2.73 \pm 0.12 \text{ c}$	$20.3 \pm 0.3 \text{ b}$	$13.1 \pm 0.2 \text{ c}$	$64.2 \pm 0.7 \text{ c}$
	200	$37.4 \pm 0.3 \text{ a}$	$4.26 \pm 0.19 \text{ a}$	$33.1 \pm 0.4 \text{ a}$	$15.3 \pm 0.2 \text{ a}$	$90.1 \pm 0.9 \text{ a}$
	400	$33.7 \pm 0.6 \text{ b}$	$3.78 \pm 0.10 \text{ b}$	$31.3 \pm 0.5 \text{ a}$	$14.4 \pm 0.1 \text{ b}$	$83.2 \pm 0.7 \text{ b}$
‘渝粉 109’ ‘Yufen 109’	0	$25.9 \pm 0.5 \text{ b}$	$2.41 \pm 0.07 \text{ c}$	$35.0 \pm 0.2 \text{ c}$	$15.7 \pm 0.3 \text{ b}$	$79.0 \pm 0.8 \text{ c}$
	200	$38.5 \pm 0.3 \text{ a}$	$3.50 \pm 0.05 \text{ a}$	$45.7 \pm 0.7 \text{ a}$	$18.3 \pm 0.2 \text{ a}$	$106.0 \pm 1.5 \text{ a}$
	400	$37.4 \pm 0.5 \text{ a}$	$2.73 \pm 0.08 \text{ b}$	$40.6 \pm 0.4 \text{ b}$	$15.3 \pm 0.2 \text{ b}$	$96.1 \pm 1.2 \text{ b}$

2.2 光合特性

从图 1 和图 2 可以看出, 2 种番茄叶片净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s) 和蒸腾速率 (T_r) 均在喷 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Fe 处理时有所增加, 而喷施更高浓度的 Fe ($400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$), 相比喷 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Fe 处理反而降低; 胞间 CO_2 浓度 (C_i) 则在喷 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Fe 时比对照显著降低。无论喷施 Fe 与否, ‘4641’ 的叶 P_n 、 G_s 、 C_i 和 T_r 值明显高于 ‘渝粉 109’。

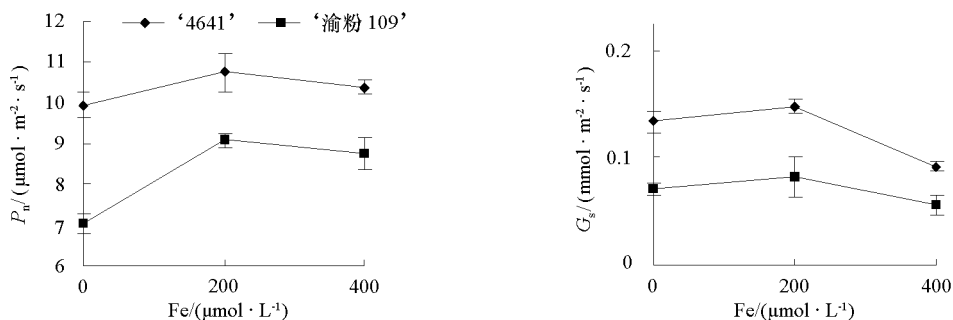
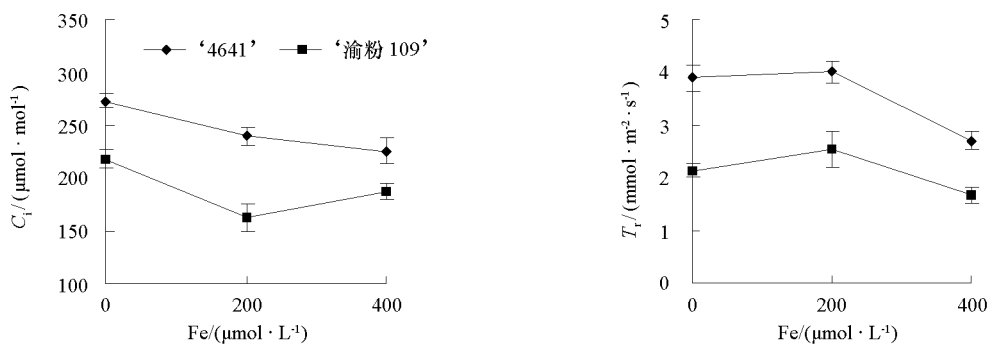


图 1 不同浓度 Fe 处理对番茄叶片净光合速率和气孔导度的影响

Fig. 1 Effect of different Fe levels on net photosynthetic rate and stomatal conductance of tomato leaves

图 2 不同浓度 Fe 处理对番茄叶片胞间 CO_2 浓度和蒸腾速率的影响Fig. 2 Effect of different Fe levels on intercellular CO_2 concentration and transpiration rate of tomato leaves

2.3 抗氧化酶

重金属 Cd 胁迫会导致植物产生大量的自由基。植物体内的 CAT、SOD 及 POD 等抗氧化酶在逆境中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(王兴明 等,2006)。在 Cd 污染条件下喷施 Fe, 2 个品种番茄叶 CAT 活性表现出不同的变化趋势(图 3)。

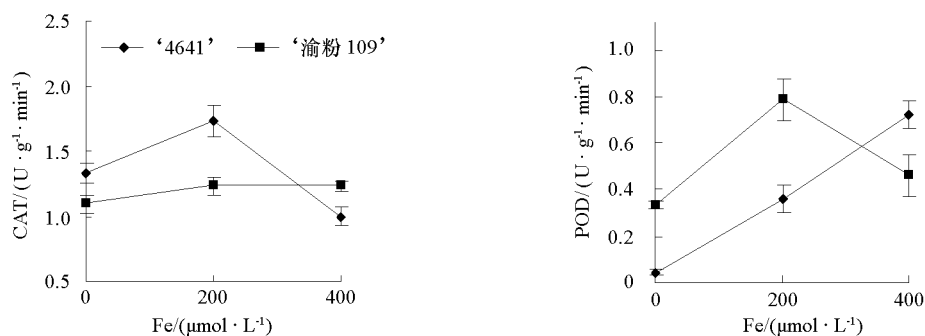


图 3 不同浓度 Fe 处理对番茄叶 CAT 和 POD 活性的影响

Fig. 3 Influence of Fe levels on activity of CAT and POD in tomato leaves

‘4641’叶 CAT 在 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Fe 处理时最高, 在 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Fe 处理时下降; 而‘渝粉 109’叶 CAT 活性则随 Fe 浓度增加而增加。与对照相比, 喷施 Fe 后, ‘4641’叶 POD 活性随喷施 Fe 浓度的增加逐渐上升, ‘渝粉 109’叶 POD 活性则在喷施 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Fe 处理时达到最大值, 然后在 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Fe 时下降(图 3)。(‘4641’叶 SOD 活性随 Fe 浓度增加逐渐增加; 而‘渝粉 109’叶 SOD 活性则在喷施 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Fe 时比对照降低, 然后在 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Fe 处理时有所上升, 但仍然低于对照处理(图 4)。

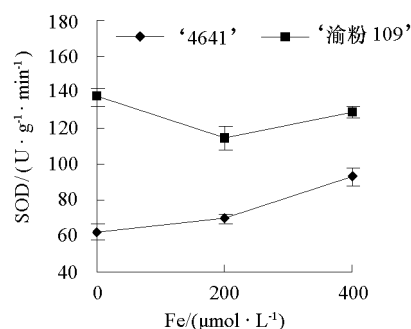


图 4 不同浓度 Fe 处理对番茄叶 SOD 活性的影响

Fig. 4 Influence of Fe levels on activity of SOD in tomato leaves

2.4 果实中不同形态 Cd 含量

由表 2 可知, 番茄果实中 Cd 的提取总量及各形态 Cd 含量在 2 个品种间和 Fe 浓度处理间差异达到显著水平。各形态 Cd 含量的顺序如下: $F_R > F_{HCl} > F_E > F_{NaCl} > F_{HAc} > F_W$ 。其中, 残渣态 Cd (F_R) 平均含量为 $1.121 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 所占 Cd 提取总量的 55.7%; 盐酸提取态 Cd (F_{HCl}) 平均含量为 $0.303 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占 Cd 提取总量的 15.1%。二者均为活性偏低形态 Cd, 其平均含量之和为 $1.424 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占 Cd 提取总量的 70.8%(表 2)。活性较高的去离子水提取态 (F_W) 和乙醇提取态 (F_E) 平均含量分别为 $0.088 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占 Cd 提取总量的 4.4%和 7.4%, 二者平均含量之和为 $0.238 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占 Cd 提取总量的 11.8%。试验中发现, 除‘渝粉 109’的 F_{HCl} 和 F_R 外, 喷施 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Fe 能减少 2 个品种果实中各形态 Cd 含量。但随 Fe 浓度的增加, 各形态 Cd 表现出不同的变化趋势。如随 Fe 浓度增加, ‘4641’果实中 F_E 、 F_W 和醋酸提取态 Cd (F_{HAc}) 含量逐渐降低, 分别较对照减少了 79.7%~100%、88.7%~100%和 56.8%~62.7%; 而 2 个品种果实 Cd 总提取量, 以及‘渝粉 109’果实中各形态 Cd (除 F_{HCl} 外)、‘4641’果实中氯化钠提取态 Cd (F_{NaCl})、 F_{HCl} 和 F_R 含量则在 200

$\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Fe 处理时最低, 然后在 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Fe 处理时回升。即高量 Fe ($400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 反而增加了‘4641’果实中 F_{HCl} 、 F_{R} 以及‘渝粉 109’果实中 F_{E} 、 F_{NaCl} 、 F_{R} 和总提取量。喷施 Fe 使‘渝粉 109’果实中 F_{HCl} 含量较对照增加了 18.4%~30.6%。

表 2 不同浓度 Fe 处理对番茄果实中不同形态 Cd 含量的影响

Table 2 Effects of different Fe levels on contents of different chemical forms of Cd in tomato

($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

品种 Variety	Fe/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	F_{E}	F_{W}	F_{NaCl}	F_{HAc}	F_{HCl}	F_{R}	总提取量 Total
‘4641’	0	$0.345 \pm 0.032 \text{ a}$	$0.115 \pm 0.045 \text{ a}$	$0.334 \pm 0.038 \text{ a}$	$0.220 \pm 0.029 \text{ a}$	$0.232 \pm 0.043 \text{ b}$	$0.839 \pm 0.028 \text{ b}$	$2.085 \pm 0.073 \text{ a}$
	200	$0.070 \pm 0.003 \text{ b}$	$0.013 \pm 0.004 \text{ b}$	$0.088 \pm 0.099 \text{ c}$	$0.095 \pm 0.007 \text{ b}$	$0.193 \pm 0.028 \text{ c}$	$0.819 \pm 0.032 \text{ b}$	$1.278 \pm 0.031 \text{ c}$
	400	$<0.001 \pm 0.000 \text{ c}$	$<0.001 \pm 0.000 \text{ c}$	$0.225 \pm 0.063 \text{ b}$	$0.082 \pm 0.004 \text{ c}$	$0.312 \pm 0.045 \text{ a}$	$1.104 \pm 0.067 \text{ a}$	$1.723 \pm 0.039 \text{ b}$
‘渝粉 109’	0	$0.170 \pm 0.026 \text{ a}$	$0.229 \pm 0.056 \text{ a}$	$0.222 \pm 0.034 \text{ a}$	$0.167 \pm 0.016 \text{ a}$	$0.310 \pm 0.051 \text{ c}$	$1.239 \pm 0.044 \text{ b}$	$2.337 \pm 0.073 \text{ a}$
‘Yufen 109’	200	$0.140 \pm 0.017 \text{ b}$	$<0.001 \pm 0.000 \text{ c}$	$0.134 \pm 0.015 \text{ b}$	$0.138 \pm 0.011 \text{ b}$	$0.367 \pm 0.042 \text{ b}$	$1.380 \pm 0.035 \text{ a}$	$2.159 \pm 0.056 \text{ b}$
	400	$0.174 \pm 0.021 \text{ a}$	$0.172 \pm 0.015 \text{ b}$	$0.233 \pm 0.028 \text{ a}$	$0.157 \pm 0.023 \text{ a}$	$0.405 \pm 0.037 \text{ a}$	$1.346 \pm 0.030 \text{ ab}$	$2.487 \pm 0.055 \text{ a}$

注: F_{E} : 乙醇提取态 Cd; F_{W} : 去离子水提取态 Cd; F_{NaCl} : 氯化钠提取态 Cd; F_{HAc} : 醋酸提取态 Cd; F_{HCl} : 盐酸提取态 Cd; F_{R} : 残渣态 Cd。

Note: F_{E} stands for ethanol-extractable Cd; F_{W} stands for deionized water-extractable Cd; F_{NaCl} stands for sodium chloride-extractable Cd; F_{HAc} stands for acetic acid-extractable Cd; F_{HCl} stands for hydrochloric acid-extractable Cd; F_{R} stands for residual Cd.

2.5 番茄植株各部位 Cd 含量和积累量

由表 3 可见, 番茄各部位 Cd 含量和积累量在 2 个品种间和 Fe 浓度间的差异均达到显著水平。番茄各部位 Cd 含量的顺序为: 叶 > 根 > 茎 > 果实。除‘渝粉 109’的 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Fe 处理果实 Cd 含量外, 叶面喷施 Fe 使番茄叶、茎、根和果实中的 Cd 含量不同程度降低。两个番茄品种叶、茎、根和果实中的 Cd 含量降低幅度分别为 14.1%~21.9%和 7.1%~21.9%、35.7%~47.2%和 35.6%~50.4%、24.0%~37.0%和 13.1%~13.7%、2.8%~8.2%和 4.3%。试验中还发现, 番茄叶、茎、根和果实 Cd 含量均在 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Fe 处理时最低, $400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Fe 处理时有所回升。

表 3 不同浓度 Fe 处理对番茄植株 Cd 含量的影响

Table 3 Effects of different Fe levels on Cd concentrations in tomato

($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

品种 Variety	Fe/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	叶 Leaf	茎 Stem	根 Root	果实 Fruit
‘4641’	0	$116.0 \pm 1.1 \text{ a}$	$41.3 \pm 0.5 \text{ a}$	$68.6 \pm 0.5 \text{ a}$	$5.72 \pm 0.11 \text{ a}$
	200	$90.6 \pm 0.9 \text{ c}$	$21.8 \pm 0.3 \text{ c}$	$43.2 \pm 0.4 \text{ c}$	$5.25 \pm 0.09 \text{ b}$
	400	$99.6 \pm 0.7 \text{ b}$	$26.6 \pm 0.2 \text{ b}$	$52.1 \pm 0.5 \text{ b}$	$5.56 \pm 0.14 \text{ ab}$
‘渝粉 109’	0	$131.7 \pm 2.1 \text{ a}$	$51.0 \pm 0.3 \text{ a}$	$63.4 \pm 0.9 \text{ a}$	$6.35 \pm 0.17 \text{ ab}$
‘Yufen 109’	200	$102.8 \pm 1.1 \text{ c}$	$25.3 \pm 0.2 \text{ c}$	$54.7 \pm 0.3 \text{ b}$	$6.08 \pm 0.05 \text{ b}$
	400	$122.3 \pm 1.7 \text{ b}$	$32.8 \pm 0.4 \text{ b}$	$55.1 \pm 0.4 \text{ b}$	$6.55 \pm 0.36 \text{ a}$

番茄单株各部位 Cd 积累量的顺序为叶 > 茎 > 果实 > 根, 其中叶、茎积累量分别为植株 Cd 总积累量的 53.3%和 34.9%, 根和果实的 Cd 积累量分别为植株 Cd 总积累量的 5.6%和 6.2% (表 4)。随 Fe 处理浓度的增加, ‘4641’叶、茎、根的 Cd 积累量, ‘渝粉 109’的茎、果实 Cd 积累量以及 2 个品种植株总 Cd 积累量表现为先降低, 在 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Fe 处理时最低, 然后在 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Fe 处理时增加; ‘4641’果实的 Cd 积累量和‘渝粉 109’根的 Cd 积累量则表现为先增加, 在 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Fe 处理时最高, 然后在 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Fe 处理时降低。而‘渝粉 109’果实的 Cd 积累量随 Fe 浓度增加而升高。比较供试 2 个番茄品种, 无论是否喷施 Fe, 果实的 Cd 含量和 Cd 积累量, 以及植株 Cd 总积累量均为‘4641’ < ‘渝粉 109’。

表 4 不同浓度 Fe 处理对番茄 Cd 积累的影响
Table 4 Effects of different Fe levels on accumulation of Cd in tomato

品种 Variety	Fe / ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	Cd 积累量 / ($\text{mg} \cdot \text{plant}^{-1}$)		Cd accumulation		Cd 全量 / ($\text{mg} \cdot \text{plant}^{-1}$) Total plant
		叶 Leaf	茎 Stem	根 Root	果实 Fruit	
‘4641’	0	$1.53 \pm 0.03 \text{ a}$	$0.839 \pm 0.006 \text{ a}$	$0.187 \pm 0.005 \text{ b}$	$0.160 \pm 0.007 \text{ c}$	$2.71 \pm 0.02 \text{ a}$
	200	$1.39 \pm 0.03 \text{ c}$	$0.722 \pm 0.003 \text{ b}$	$0.184 \pm 0.003 \text{ b}$	$0.196 \pm 0.009 \text{ a}$	$2.49 \pm 0.04 \text{ c}$
	400	$1.44 \pm 0.04 \text{ b}$	$0.833 \pm 0.007 \text{ a}$	$0.197 \pm 0.007 \text{ a}$	$0.187 \pm 0.003 \text{ b}$	$2.65 \pm 0.02 \text{ b}$
‘渝粉 109’	0	$2.06 \pm 0.05 \text{ a}$	$1.785 \pm 0.025 \text{ a}$	$0.153 \pm 0.003 \text{ b}$	$0.164 \pm 0.005 \text{ c}$	$4.16 \pm 0.05 \text{ a}$
‘Yufen 109’	200	$1.88 \pm 0.03 \text{ b}$	$1.155 \pm 0.014 \text{ c}$	$0.192 \pm 0.004 \text{ a}$	$0.235 \pm 0.007 \text{ b}$	$3.46 \pm 0.01 \text{ c}$
	400	$1.88 \pm 0.02 \text{ b}$	$1.333 \pm 0.009 \text{ b}$	$0.151 \pm 0.005 \text{ b}$	$0.245 \pm 0.005 \text{ a}$	$3.60 \pm 0.03 \text{ b}$

3 讨论

本试验条件下, 在 Cd 污染 ($10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ Cd}$) 的土壤上, 对 2 个番茄品种, 叶面喷施低浓度 Fe 显著提高了果实、叶、茎、根及总干质量 (表 1)。说明 Fe 与 Cd 的拮抗效应能缓解 Cd 对番茄生长的抑制。同时, Fe 作为植物必需的营养元素之一, 是一些重要的氧化—还原酶催化部分的组分 (如固氮酶中铁蛋白和钼铁蛋白等), 作为重要的电子传递体或催化剂, 参与光合作用、呼吸作用等许多生命活动, 促进了植株的生长, 增强了植物的抗逆能力, 在一定程度上缓解 Cd 的毒害作用 (Chien et al., 2001)。但本试验中发现, 喷施 Fe 浓度过大 ($400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 时, 番茄生物量和产量下降。可能是植物体内积累了过量的铁以及铁化合物会诱发多种活性自由基, 导致脂质的过氧化和膜的损伤 (Sinha et al., 1997), 影响了番茄生长。另外, 也可能是高量 Fe 与 Cd 的协同效应一定程度加重了 Cd 对番茄的毒害作用 (Siedlecka & Krupa, 1999)。可见, 铁镉交互作用与 Fe 浓度有关。供试 2 个番茄品种, 未喷 Fe 时, ‘4641’ 的果实干质量明显高于 ‘渝粉 109’, 说明该品种对 Cd 污染环境的耐性更强; 喷 Fe 后, ‘渝粉 109’ 的果实干质量明显高于 ‘4641’, 可见, ‘渝粉 109’ 对 Fe 的反应更为敏感, Fe 与 Cd 的拮抗效应有效地减缓 Cd 对其生长的毒害作用, 从而获得了更高的产量。

植物体内的 Fe 是叶绿素的合成的必须营养元素, 与植物体光合作用密切相关。净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s)、胞间 CO_2 浓度 (C_i) 和蒸腾速率 (T_r) 是光合作用的重要指标, 代表植物吸收 CO_2 的能力和制造碳水化合物能力强弱 (欧志英 等, 2003)。本试验中发现, 与对照相比, 喷施 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Fe}$ 使 2 个番茄品种叶片 P_n 、 G_s 和 T_r 明显增加。说明低 Fe ($200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 对增加作物光合作用和蒸腾作用有利, 从而有助于作物的正常生长发育。此结果与喷施 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Fe}$ 时番茄干质量的迅速增加是相一致的。但喷施 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Fe}$ 时, 番茄 P_n 、 G_s 以及 T_r 均表现下降趋势, 显示高浓度 Fe 抑制了植株光合作用和蒸腾作用。该结果与章艺等 (2007)、蔺冬梅 (2010) 报道一致。本研究还发现, 随 Fe 浓度增加, C_i 先下降, 在 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Fe}$ 处理时最低, 然后在 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Fe}$ 处理时上升。原因可能是低 Fe 增强了番茄叶肉细胞光合速率, 进入叶肉细胞间隙的 CO_2 大量用于光合作用, 从而使叶片细胞间 CO_2 浓度有所降低。显示高 Fe 引起的光合速率降低并非气孔因素, 可能与叶片细胞光合活性、RUBP 羧化酶活性或者是卡尔文循环等原因有关 (Farquhar & Sharkey, 1982)。本试验条件下, 无论加 Fe 与否, ‘4641’ 的叶 P_n 、 G_s 、 C_i 和 T_r 值明显高于 ‘渝粉 109’, 显示在 Cd 污染条件下不同番茄品种的 P_n 、 G_s 、 C_i 和 T_r 存在显著差异, ‘4641’ 吸收 CO_2 的能力和制造碳水化合物能力较 ‘渝粉 109’ 更强。

重金属污染胁迫会影响植物体内活性氧代谢系统的平衡, 产生大量的氧自由基, 引起蛋白质和核酸等生物活性物质变性, 使膜脂过氧化, 由超氧化物歧化酶 (SOD) 和过氧化氢酶 (CAT)、过氧化物酶 (POD) 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 (Rodríguez-serrano et al., 2006)。在本试验中, ‘渝粉 109’ 叶 SOD 活性在 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Fe 处理时最低。表明喷施 Fe 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。相反, ‘渝粉 109’ 叶 POD 活性以及 ‘4641’ 叶 CAT 活性先增加, 在 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Fe 处理时最高。该结果与番茄的生长量和产量随 Fe 浓度变化是一致的。可能是低浓度 Fe 提高了 CAT 和 POD 活性, 以适应不良环境胁迫, 而高浓度 Fe 胁迫使细胞膜系统受到了伤害, 导致 CAT 和 POD 活性降低 (章艺 等, 2005), 此外, Fe 与 Cd 的协同效应可能也加重了植物遭受 Cd 的毒害作用, 反而使植株体内的 CAT 和 POD 活性下降。

在本试验中发现, Cd 在番茄果实中主要以残渣态存在, 平均为 $1.121 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 所占 Cd 提取总量的比例为 55.7% (表 2)。与早前报道重金属在植物体内的化学形态一般以氯化钠态为主的结果不一致 (陈贵青 等, 2010), 与王友保等 (2005) 报道的三叶草和结缕草茎叶中 Cu 的主要形态为残渣态相似。番茄果实中 Cd 含量较高的还有盐酸提取态, 平均为 $0.303 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占 Cd 提取总量的比例为 15.1%。残渣态 Cd 和盐酸提取态 Cd 二者平均含量之和为 $1.393 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占 Cd 提取总量的比例达到了 70.8%。残渣态 Cd 和盐酸提取态 Cd 均为活性偏低形态 Cd。而活性较高的去离子水提取态 Cd 和乙醇提取态 Cd 平均含量之和为 $0.238 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占 Cd 提取总量的比例仅为 11.8%, 从而极大地限制了 Cd 的毒害效应。本试验条件下, 喷施适量的 Fe 减少了 2 个番茄品种果实各形态 Cd 含量和 Cd 总提取量, 铁镉表现出明显的拮抗效应。该结果与 Krupa 等 (1995) 的报道一致。原因可能与铁转运子基因的表达有关, 也可能是由于重金属镉与铁竞争根系吸收运输位点所致 (安志装 等, 2002)。但高量 Fe ($400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 反而较低量 Fe 增加了 ‘4641’ 果实中盐酸提取态 Cd、残渣态 Cd 以及 ‘渝粉 109’ 果实中乙醇提取态 Cd、氯化钠提取态 Cd、残渣态 Cd 和总提取量, 铁镉表现出一定的协同效应 (Stephan & Grun, 1989)。可见, 铁镉交互作用不仅与 Fe 浓度有关, 还与供试作物种类和品种有关。

供试 2 个番茄品种 Cd 主要累积于叶和茎中, 积累较少的是根和果实, 而且 Cd 含量也以叶、茎大于根、果实 (表 3)。可见番茄对 Cd 的转移能力较强。此结果与之前报道番茄 Cd 主要集中在根部 (朱芳 等, 2006) 有所不同。本试验中, 番茄果实干样中 Cd 含量 $> 5.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 除以番茄果实的水分系数 (平均为 16.5), 番茄果实鲜样中 Cd 含量 $> 0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 远远高于国家对蔬菜和水果的 Cd 限量标准 ($\leq 0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ FW), 说明番茄不但对 Cd 有较强的迁移能力, 而且在可食部位对 Cd 也有很强的富集能力, 显示在 Cd 污染较重的地区, 种植番茄可能存在果实产品受 Cd 污染的风险。

叶面喷施适量 Fe 使番茄叶、茎、根和果实中的 Cd 含量不同程度降低。该结果与 Chlopecha 和 Adriano (1997) 以及 Shao 等 (2007) 的报道相似。原因可能是 Fe 供应充足时, 铁转运子基因关闭, Fe 吸收增加, 镉的被动吸收量下降 (Krupa et al., 1995)。此外, 适量的 Fe 与重金属 Cd 竞争根系吸收运输位点可能降低了 Cd 离子在植物体内的木质部长距离输送。但在 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Fe 处理时, 叶、茎、根和果实中的 Cd 含量回升。表现出拮抗和协同并存, 原因可能与 Fe 浓度有关。比较供试 2 个番茄品种, 无论叶面喷 Fe 与否, 果实 Cd 含量和积累量, 以及植株 Cd 总积累量以 ‘4641’ $<$ ‘渝粉 109’。可见, ‘4641’ 比 ‘渝粉 109’ 能更少吸收富集土壤中的 Cd, 而叶面喷施 Fe 对降低 ‘4641’ 植株 Cd 富集的效果也更为显著。

4 结论

(1) 在重金属 Cd 污染 ($10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd) 下, 喷施适量 Fe ($200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Fe) 缓解了 Cd 对供试番茄生长的抑制, 显著增加了 ‘4641’ 和 ‘渝粉 109’ 的果实、根、茎、叶及总干质量; 但喷施

高浓度的 Fe ($400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 番茄果实、根、茎、叶及总干质量反而降低。

(2) 番茄叶片 P_n 、 G_s 和 T_r 以及 ‘渝粉 109’ 叶 POD 活性、‘4641’ 叶 CAT 活性在 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Fe 处理时最高, 然后在 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Fe 处理时降低; 叶片 C_i 以及 ‘渝粉 109’ 叶 SOD 活性则在 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Fe 处理时最低, 然后在 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Fe 处理时回升。

(3) 番茄果实中的 Cd 主要以活性偏低的残渣态和盐酸提取态形式存在, 占 Cd 提取总量的 70.8%。活性较高的去离子水提取态和乙醇提取态 Cd 和仅占 Cd 提取总量的 11.8%。喷施适量的 Fe 减少了番茄果实中各形态 Cd 含量, 但高量 Fe ($400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 增加了 ‘4641’ 果实中盐酸提取态、残渣态 Cd 以及 ‘渝粉 109’ 果实中乙醇提取态、氯化钠提取态、残渣态和 Cd 总提取量。

(4) 叶面喷施适量的 Fe ($200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 能有效降低番茄果实和植株对 Cd 的吸收富集。但过量的 Fe ($400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 反而使番茄叶、茎、根和果实 Cd 含量有所增加。铁镉交互的作用在 2 个番茄品种中表现出拮抗和协同并存。除了植物品种外, 植物部位、Fe 的供应浓度等因素都会影响铁镉之间的交互作用。

References

- Alarcón A L, Madrid R, Romojaro F, Molina E. 1998. Calcium forms in leaves of muskmelon plants grown with different calcium compounds. *Journal of Plant Nutrition*, 21 (9): 1897 - 1912.
- An Zhi-zhuang, Wang Xiao-chang, Shi Wei-ming, Yan Wei-dong, Cao Zhi-hong. 2002. Plant physiological responses to the interactions between heavy metal and nutrients. *Soil and Environmental Sciences*, 11 (4): 392 - 396. (in Chinese)
- 安志装, 王校常, 施卫明, 严蔚东, 曹志洪. 2002. 重金属与营养元素交互作用的植物生理效应. *土壤与环境*, 11 (4): 392 - 396.
- Chen Gui-qing, Zhang Xiao-jing, Xu Wei-hong, Liu Ji-zhen, Wang Hui-xian, Guo Liu-ming, Chen Lu-hao, Zhang Hai-bo, Lan Chun-tao, Zeng Hong-jun, Xiong Zhi-ting. 2010. Effect of different zinc levels on accumulation and chemical forms of cadmium, and physiological characterization in *Capsicum annuum* L. *Chinese Journal of Environmental Science*, 31 (7): 247 - 252. (in Chinese)
- 陈贵青, 张晓璟, 徐卫红, 刘吉振, 王慧先, 郭刘明, 陈璐豪, 张海波, 蓝春桃, 曾红军, 熊治庭. 2010. 不同 Zn 水平下辣椒体内 Cd 的积累、化学形态及生理特性. *环境科学*, 31 (7): 247 - 252.
- Chien H F, Wang J W, Lin C C, Kao C H. 2001. Cadmium toxicity of rice leaves is mediated through lipid peroxidation. *Plant Growth Regulation*, 33 (3): 205 - 213.
- Chlopecka A, Adriano D C. 1997. Influence of zeolite, apatite and Fe-oxide on Cd and Pb uptake by crops. *The Science of the Total Environment*, 207 (2 - 3): 195 - 206.
- Farquhar G D, Sharkey T D. 1982. Stomatal conductance and photosynthesis. *Ann Rev Plant Physiol*, 33: 317 - 345.
- Krupa Z, Siedlecka A, Mathis P. 1995. Cd/Fe interaction and its effects on photosynthetic capacity of primary bean leaves. In: *Proceedings of the Xth International Photosynthesis Congress*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 4: 621 - 624.
- Li De-ming, Zhu Zhu-jun, Qian Qiong-qiu. 2004. Investigation of genotypic difference of cadmium contents in shoots of *Brassica campestris* ssp. *chinensis*. *Acta Horticulturae Sinica*, 31 (1): 97 - 98. (in Chinese)
- 李德明, 朱祝军, 钱琼秋. 2004. 白菜镉积累基因型差异研究. *园艺学报*, 31 (1): 97 - 98.
- Li He-sheng. 2000. Principle and technology of plant physiology and biochemistry experiment. Beijing: Higher Education Press: 165 - 167. (in Chinese)
- 李合生. 2000. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社: 165 - 167.
- Li Yong-hua, Qian Bao-yun, Liu Cai-feng, Zhang Zheng, Shi Gang-rong. 2012. Responses of photosynthetic and spectral properties to cadmium toxicity in leaves of castor bean. *Journal of Huaibei Normal University: Natural Science*, 33 (1): 56 - 62. (in Chinese)
- 李永华, 钱宝云, 刘彩凤, 张 铮, 石刚荣. 2012. 蓖麻叶片光合和光谱特征对镉毒害的响应. *淮北师范大学学报: 自然科学版*, 33 (1): 56 - 62.
- Lin Dong-mei. 2010. Studies on the effect of excess iron in the pea seedlings [M. D. Dissertation]. Lanzhou: Lanzhou University. (in Chinese)
- 蔺冬梅. 2010. 过量铁胁迫对豌豆幼苗毒害作用的研究 [硕士论文]. 兰州: 兰州大学.
- Lu Ru-kun. 2000. Soil agro-chemical analysis. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press: 12 - 22, 107 - 195, 335 - 336. (in Chinese)

- 鲁如坤. 2000. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社: 12 - 22, 107 - 195, 335 - 336.
- Ou Zhi-ying, Peng Chang-lian, Yang Cheng-wei, Lin Gui-zhu, Duan Jun, Wen Xue. 2003. High efficiency photosynthetic characteristics in flag leaves of super high-yielding rice. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 11 (1): 1 - 6. (in Chinese)
- 欧志英, 彭长连, 阳成伟, 林桂珠, 段 俊, 温 学. 2003. 超高产水稻剑叶的高效光合特性. *热带亚热带植物学报*, 11 (1): 1 - 6.
- Radotic K, Ducic T, Mutavdzic D. 2000. Changes in peroxidase activity and isoenzymes in spruce needles after exposure to different concentrations of cadmium. *Environ Exp Bot*, 44 (2): 105 - 113.
- Rodríguez-serrano M, Romero-puertas M C, Zabalza A, Corpas F J, Gómez M, Del Río L A, Sandalio L M. 2006. Cadmium effect on oxidative metabolism of pea (*Pisum sativum* L.) roots. Imaging of reactive oxygen species and nitric oxide accumulation *in vivo*. *Plant, Cell and Environment*, 29 (8): 1532 - 1544.
- Satarug S, Baker J R, Urbenjapol S, Haswell-Elkins M, Reilly P E, Williams D J, Moore M R. 2003. A global perspective on cadmium pollution and toxicity in non- occupationally exposed population. *Toxicology Letters*, 137 (1 - 2): 65 - 83.
- Siedlecka A S, Krupa Z. 1999. Cd/Fe interaction in higher plants - Its consequences for the photosynthetic apparatus. *Photosynthetica*, 36 (3): 321 - 331.
- Sinha S, Gupta M, Chandra P. 1997. Oxidative stress induced by iron in *Hydrilla verticillata* (L.f.) Royle: Response of antioxidants. *Ecotoxicol Environ Saf*, 38 (3): 286 - 291.
- Shao G S, Chen M X, Wang W X, Mou R X, Zhang G P. 2007. Iron nutrition affects cadmium accumulation and toxicity in rice plants. *Plant Growth Regulation*, 53: 33 - 42.
- Song Bo, Gao Ding, Chen Tong-bin, Huang Ze-chun, Zheng Yuan-ming, Lei Mei, Zheng Guo-di, Yang Jun, Liao Xiao-yong. 2006. A survey of chromium concentrations in vegetables and soils in Beijing and the potential risks to human health. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 26 (10): 1707 - 1715. (in Chinese)
- 宋 波, 高 定, 陈同斌, 黄泽春, 郑袁明, 雷 梅, 郑国砥, 杨 军, 廖晓勇. 2006. 北京市菜地土壤和蔬菜铬含量及其健康风险评估. *环境科学学报*, 26 (10): 1707 - 1715.
- Stephan U W, Grun M. 1989. Physiological disorders of the Nicotianamine-auxotroph tomato mutant *chloronerva* at different levels of iron nutrition II. Iron deficiency response and heavy metal metabolism. *Biochemie und Physiologie der Pflanzen*, 185 (3 - 4): 189 - 200.
- Sun Jian-yun, Shen Zhen-guo. 2007. Effects of Cd stress on photosynthetic characteristics and nutrient uptake of cabbages with different Cd-tolerance. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 18 (11): 2605 - 2610. (in Chinese)
- 孙建云, 沈振国. 2007. 镉胁迫对不同甘蓝基因型光合特性和养分吸收的影响. *应用生态学报*, 18 (11): 2605 - 2610.
- Wang Xing-ming, Tu Jun-fang, Li Jing, Wang Li-long, Liu Deng-yi. 2006. Effects of Cd on rape growth and antioxidant enzyme system. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 17 (1): 102 - 106. (in Chinese)
- 王兴明, 涂俊芳, 李 晶, 王立龙, 刘登义. 2006. Cd 处理对油菜生长和抗氧化酶系统的影响. *应用生态学报*, 17 (1): 102 - 106.
- Wang You-bao, Zhang Li, Shen Zhang-jun, Li Jing, Liu Deng-yi. 2005. Chemical forms of heavy metals in the soils and plants of copper tailings yard. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 16 (12): 2418 - 2422. (in Chinese)
- 王友保, 张 莉, 沈章军, 李 晶, 刘登义. 2005. 铜尾矿库区土壤与植物中重金属形态分析. *应用生态学报*, 16 (12): 2418 - 2422.
- Wei S H, Zhou Q X. 2006. Phytoremediation of cadmium-contaminated soils by *Rorippa globosa* using two-phase planting. *Environmental Science and Pollution Research*, 13 (3): 151 - 155.
- Xu W H, Li Y R, He J P, Ma Q F, Zhang X J, Chen G Q, Wang H X, Zhang H B. 2010. Cd uptake in rice cultivars treated with organic acids and EDTA. *Journal of Environmental Sciences*, 22 (3): 441 - 447.
- Zeng Xi-bai, Li Lian-fang, Mei Xu-rong. 2007. Heavy metal content in soils of vegetable-growing lands in China and source analysis. *Scientia Agricultura Sinica*, 40 (11): 2507 - 2517. (in Chinese)
- 曾希柏, 李莲芳, 梅旭荣. 2007. 中国蔬菜土壤重金属含量及来源分析. *中国农业科学*, 40 (11): 2507 - 2517.
- Zhang Yan. 2006. Effect of iron supply on cadmium uptake by cucumber seedling [M. D. Dissertation]. Beijing: China Agricultural University. (in Chinese)
- 张 燕. 2006. 铁营养状况对黄瓜吸收镉的影响 [硕士论文]. 北京: 中国农业大学.
- Zhang Yi, Liu Peng, Shi Feng, Chen Run-xing, Zhu Shu-ying. 2007. Influence of excessive Fe^{2+} on photosynthesis of soybean leaves. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 29 (4): 438 - 442. (in Chinese)

- 章 艺, 刘 鹏, 史 锋, 陈润兴, 朱淑颖. 2007. 高 Fe^{2+} 对大豆叶片光合作用的影响. 中国油料作物学报, 29 (4): 438 - 442.
- Zhang Yi, Liu Peng, Shi Feng, Chen Xu-wei. 2005. Effect of excessive Fe^{2+} on leaf cells ultrastructure of soybean. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 11 (1): 87 - 91. (in Chinese)
- 章 艺, 刘 鹏, 史 锋, 陈旭微. 2005. 过量 Fe^{2+} 对大豆叶肉细胞超微结构的影响. 植物营养与肥科学报, 11 (1): 87 - 91.
- Zhang Zhi-liang. 2002. Guidance of plant physiology experiments. Beijing: Higher Education Press: 154 - 155. (in Chinese)
- 张志良. 2002. 植物生理学实验指导. 北京: 高等教育出版社: 154 - 155.
- Zhu Fang, Fang Wei, Yang Zhong-yi. 2006. Variations of Cd absorption and accumulation of 36 *Lycopersicon esculentum* cultivars. Acta Ecologica Sinica, 26 (12): 4071 - 4081. (in Chinese)
- 朱 芳, 方 炜, 杨中艺. 2006. 番茄吸收和积累 Cd 能力的品种间差异. 生态学报, 26 (12): 4071 - 4081.

信 息

中国园艺学会第十二次全国会员代表大会暨 学术年会在成都召开

中国园艺学会第十二次全国会员代表大会暨学术年会于 2013 年 10 月 20—22 日在成都召开。中国园艺学会理事长方智远院士、名誉理事长朱德蔚先生、中国工程院束怀瑞院士和吴明珠院士出席会议, 四川省农业厅副厅长蒋天宝、彭州市市长杜洵到会并致辞。来自各高等院校、科研院所、技术推广部门、相关企业 600 余名代表参加了会议。

开幕式由中国园艺学会副理事长杜永臣主持, 中国园艺学会理事长方智远做第十一届理事会工作报告, 杜永臣副理事长做第十一届理事会财务报告。与会代表听取报告后一致认为, 4 年来中国园艺学会在中国科协的领导下、在有关部门的大力支持下, 经过各位理事和全体会员的共同努力, 在学术交流、国际合作、编辑出版、举荐人才、组织建设和承担中国科协项目等方面均取得了较好的成绩, 为繁荣我国园艺科技, 提高园艺科技水平, 促进科技创新, 推动园艺产业发展方面发挥了积极作用。代表们对本届理事会工作表示满意, 审议通过了第十一届理事会工作报告和财务报告。在开幕式上颁发了 2013 年度“华耐园艺科技奖”, 方智远理事长和北京华耐农业发展有限公司总经理贾俊先生为获奖团队颁发了奖状和奖牌。

会议期间还进行了广泛的学术交流。第 29 届国际园艺大会执行董事罗宾·罗伯茨博士介绍了 2014 年第 29 届国际园艺大会的有关情况。美国康涅狄格大学/南京农业大学园艺学院李义教授、中国科学院华南植物园主任黄宏文研究员、四川省农业科学院院长李跃进研究员分别就“用转基因植物生产非转基因的食品, 用非转基因手段达到转基因的效率”、“中国迁地栽培植物志及植物引种驯化”、“不断发展壮大的四川园艺产业”主题分别做了大会报告。会议还分果树、蔬菜、观赏园艺和西甜瓜, 4 个专业组进行了学术交流, 有 96 位代表在分组会上进行了交流。

会议根据中国科协和民政部关于全国学会召开会员代表大会及理事会换届工作办法和本会章程, 经过民主程序, 以无记名投票方式选举产生了中国园艺学会第十二届理事会, 选举出理事 220 名。同时召开了第十二届一次全体理事会议, 选举产生了由 94 人组成的中国园艺学会第十二届常务理事会。杜永臣当选为第十二届理事长; 王有年、韩振海、孙日飞、邹学校、刘君璞、张显、包满珠、张启翔当选为副理事长; 孙日飞兼任秘书长。由第十二届理事长杜永臣提议相重扬、朱德蔚、方智远为中国园艺学会名誉理事长, 该提议得到全体与会代表热烈鼓掌通过。

在闭幕式上, 方智远院士表示感谢各位理事和广大会员在他担任理事长期间给予的支持, 希望新一届理事会把学会工作做得更好。杜永臣理事长对本次会议做了总结, 并表示新一届理事会将继续发扬优良传统, 解放思想、开拓创新, 充分发挥园艺学会在学术交流、人才举荐、科学普及等方面的作用, 努力办好学报, 加强国际交流与合作, 为促进园艺科技进步, 园艺人才队伍不断壮大积极工作, 组织广大园艺工作者为实现园艺强国之梦做出应有的贡献。

全体代表对彭州市人民政府和种都种业有限公司为会议做的大量服务工作表示感谢。

中国园艺学会办公室 2013 年 10 月