DOI：10.13718/j.cnki.xdzk.2015.11.004

外源锌对不同品种番茄光合特性、品质及镉积累的影响①

谢文文[1]，　周　坤[1]，　徐卫红[1]，　熊仕娟[1]，
陈　蓉[1]，　江　玲[1]，　王崇力[1]，　杨　芸[1]，
熊治庭[2]，　王正银[1]，　谢德体[1]

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： 采用土培试验研究了在重金属 Cd 污染条件(10 mg/kg)下，叶面喷施 Zn(Zn 浓度为 0，200，400 μmol/L)对 2 个番茄(*Solanum lycopersicum* Mill.)品种(“4641”和“渝粉 109”)生长、光合特性、品质及番茄体内 Cd 形态和积累量的影响. 结果表明，随 Zn 浓度增加，2 个番茄品种的果实、根、茎、叶干重及植株总干质量均呈上升趋势. 2 个品种叶片净光合速率和气孔导度及“渝粉 109”叶片蒸腾速率随 Zn 浓度增加呈现先增后降趋势；叶片胞间 CO_2 浓度及“4641”叶片蒸腾速率随 Zn 处理浓度的增加而显著降低. 随着喷 Zn 浓度的增加，2 个番茄品种果实内氨基酸质量比、“4641”品种的果实 Vc 质量比和“渝粉 109”品种的果实内硝酸盐质量比均显著下降，“渝粉 109”果实的 Vc 质量比则显著增加；2 个品种果实的还原糖质量分数随 Zn 浓度增加呈现先升后降趋势. 低 Zn(200 μmol/L)减少了番茄果实各形态 Cd 质量比和 Cd 总提取量，但高 Zn(400 μmol/L)反而增加了“渝粉 109”果实中 F_E 质量比，以及增加了 2 个品种中 F_{NaCl}，F_{HCl}，F_R 和总提取量. 与对照处理相比，随喷 Zn 浓度的增加，“4641”和“渝粉 109”叶、茎、根和果实 Cd 质量比分别减少了 18.81%～21.55%和 16.64%～20.15%，31.09%～35.76%和 29.00%～36.71%，31.19%～26.13%和 40.12%～41.81%，5.32%～11.73%和 4.35%～12.73%. 比较 2 个番茄品种，无论是否喷 Zn，果实中 Cd 质量比及 Cd 积累量“4641”都高于“渝粉 109”，植株 Cd 总积累量以“渝粉 109”高于“4641”.

关　键　词： 外源锌；光合特性；番茄品质；镉累积；镉形态

中图分类号：S641.2　　**文献标志码：A**　　**文章编号：** 1673-9868(2015)11-0022-08

镉(Cd)是元素周期表 II B 族中一个危险的重金属元素，广泛的分布于自然界中[1-2]. 有资料表明，全世界平均每年排放 Cd 为 100 万 t，我国 Cd 污染耕地达 3.85 万 hm^2，涉及 11 个省市的 25 个地区[3]. 菜地是利用强度大、投入和产出高、受人类活动影响大的一类农业土壤，菜地土壤 Cd 污染问题在各区域均存在，曾希柏等人[4]报道全国约 24.1%的菜地样本 Cd 超标，东部地区较为严重，工矿/污灌区菜地的 Cd 质量比最高. 王丽慧等人指出菜园土壤普遍存在 Cd 质量比超标情况，种植的蔬菜不能达到无公害蔬菜标准[5]. 此外，高浓度的 Cd 也会抑制蔬菜植物细胞分裂和伸长，影响组织蛋白质合成，降低光合作用，从而影响蔬菜的生长发育和品质[6].

① 收稿日期：2014-07-02
基金项目：现代农业产业技术体系建设专项(Nycytx-35)；国家自然科学基金项目(20477032)；国家科技支撑计划项目(2007BAD87B10).
作者简介：谢文文(1989-)，女，山东菏泽人，硕士研究生，主要从事植物营养与环境生态的研究.

目前，土壤中Cd污染治理一般通过工程技术、生物修复技术、调节土壤pH值、增施有机肥降低土壤Cd质量比，也可利用竞争性阳离子与Cd^{2+}的拮抗效应来降低农作物对Cd的吸收[7-10]. 吕选忠等人[9]研究发现生菜叶面喷Zn使Cd吸收量降低37.01%，陈贵青等人[10]研究表明叶面喷Zn降低了辣椒体内Cd质量比，且随Zn浓度增加，果实Cd质量比呈下降趋势. 但研究者们就Zn,Cd之间的交互作用并未达成共识[11]. 研究表明番茄(*Solanum lycopersicum* Mill.)对Cd耐性和吸收富集存在基因型差异[12]. 但Zn对不同番茄品种果实中Cd的化学形态的影响以及Zn对Cd污染土壤上番茄品质的影响鲜有报道. 为此，本研究采用土培试验研究了叶面喷施Zn对2个番茄品种(“4641”和“渝粉109”)光合特性、果实品质及植株的Cd积累量和果实中Cd的化学形态的影响，为Cd污染菜地蔬菜生产提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试作物为番茄(*Solanum lycopersicum* Mill.)，番茄幼苗由重庆市农业科学院蔬菜花卉所提供，品种为“4641”和“渝粉109”，供试土壤为灰棕紫泥，采自重庆市九龙坡区白市驿蔬菜基地. 全N的质量比为1.21 g/kg，有机质的质量比为33.3 g/kg，碱解N的质量比为110.8 mg/kg、有效P的质量比为10.6 mg/kg，速效K的质量比为104.6 mg/kg，土有效Zn的质量比为1.9 mg/kg，Cd的质量比小于0.005 mg/kg，pH值为6.9，CEC为20.7 cmol/kg.

1.2 试验方法

盆栽试验于2012年3月10日—2012年7月9日在西南大学资源环境学院玻璃房内. 喷施Zn浓度为0,200和400 μmol/L($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$) 3个水平，以喷去离子水为对照处理. 模拟土壤Cd污染的浓度为10 mg/kg($CdCl_2 \cdot 2.5H_2O$). 在直径25 cm、高17 cm的塑料盆内，将Cd以溶液的形式(每盆100 mL)与过40目筛的5 kg风干土混合均匀，放置2～3周后，进行番茄幼苗移栽，每钵1株. 所有处理均施N 200 mg/kg，P_2O_5 100 mg/kg，K_2O 150 mg/kg. N,P,K分别以尿素、磷酸二氢铵、氯化钾为肥源. 用土壤水分速测仪测定3次土壤含水量，取平均值，然后计算所需的补水量，根据补水量浇灌去离子水使土壤湿度达到田间最大持水量的60%. 在开花期开始叶面喷施Zn的营养液，每隔4 d喷施1次，分7次完成，每钵每次喷施100 mL. 试验设置3次重复，随机排列. 从第一次结果开始记产，培养120 d后全部收获，植株在105 ℃下杀酶15 min，在60 ℃下烘干至恒质量.

1.3 测定项目及方法

土壤全N、有机质、碱解N、有效P和速效K、pH、CEC 、有效Zn等均采用鲁如坤报道的方法测定(2000)[13]. 土壤Cd含量采用HCl-HNO_3-$HClO_4$消解，用原子吸收分光光度计(Perkin Elmer SIMMA 6000，Norwalk，USA)测定[13].

番茄叶片的气孔导度(G_s)、胞间CO_2质量比(C_i)、净光合速率(P_n)和蒸腾速率(T_r)用便携式光合测定系统(Li-6400，LI-COR，USA)测定. 番茄果实硝酸盐质量比采用紫外分光光度法[13]、Vc质量比采用2，6-二氯酚滴定法[13]、还原糖质量分数采用3，5-二硝基水杨酸显色-分光光度法[13]、游离氨基酸质量比用茚三酮显色-分光光度法测定[13]. 番茄各部位Cd质量比采用HNO_3-$HClO_4$消煮，用原子吸收分光光度计(Perkin Elmer SIMMA 6000，Norwalk，USA)测定，Cd的检测限为0.005 mg/kg. 番茄果实中各Cd形态分级参照吕选忠等的研究方法，采用连续浸取法浸取Cd[9].

本研究所列结果为3次重复的平均值，数据采用SPSS 21.0统计软件进行分析.

2 结果与分析

2.1 不同Zn浓度对番茄生物量的影响

由表1可知，在重金属Cd污染下，与对照处理相比，叶面喷Zn的2个番茄品种，其果实、根、茎、叶及总干质量均呈上升趋势. 除“渝粉109”的根外，当Zn浓度达到200 μmol/L时，番茄各部位生物量及总干

质量均达到最大水平，且果实、根、茎、叶及总干质量的增幅分别为 14.38%～53.92%，7.03%～32.64%，28.17%～51.89%，4.30%～21.86%和 16.67%～45.16%. 比较两个品种番茄，未喷 Zn 与喷 Zn 以后比较，果实干质量“4641”均大于“渝粉 109”.

表 1　不同 Zn 浓度对番茄生物量的影响

Zn 浓度/(μmol·L^{-1})		“4641”			“渝粉 109”		
		0	200	400	0	200	400
植株干质量/(g·盆$^{-1}$)	果实	31.30±0.72a	35.80±113b	34.11±1.39bc	20.42±0.72a	31.41±0.72b	30.10±0.72bc
	根	3.13±0.15a	3.35±0.31b	3.07±0.19a	2.39±0.09a	3.17±0.23b	3.53±0.14c
	茎	25.2±0.42a	32.3±0.28b	31.2±0.43bc	31.8±0.87a	48.3±0.51b	47.7±0.91b
	叶	15.35±0.33a	16.01±0.26a	15.08±0.19a	15.6±0.25a	19.01±0.45b	18.64±0.33b
	总干质量	74.98±1.38a	87.46±1.92b	83.45±0.93b	70.19±0.89a	101.88±1.62b	99.97±2.15b

注：a，b，c 表同一个品种不同 Zn 浓度之间差异具有统计学意义($p\leqslant0.05$).

2.2　不同 Zn 浓度对番茄光合特性的影响

由表 2 可以看出，2 种番茄叶片净光合速率和气孔导度在 Zn 浓度为 200 μmol/L 时达到最大，当 Zn 浓度达到 400 μmol/L 时，相比喷施 200 μmol/L 的 Zn 处理均下降，且“渝粉 109”叶片净光合速率及气孔导度均显著低于对照处理. 2 种番茄叶片胞间 CO_2 质量比均随 Zn 处理浓度的增加而降低，在 400 μmol/L 的 Zn 处理下，“渝粉 109”显著低于对照. 随喷 Zn 浓度增加，“4641”叶片蒸腾速率显著降低，当 Zn 浓度达到 400 μmol/L 时，与对照处理相比，其蒸腾速率降低速度达到极显著水平；“渝粉 109”叶片蒸腾速率在 Zn 浓度为 200 μmol/L 时达到最大，在 Zn 浓度增加到 400 μmol/L 则显著低于对照处理. 无论喷 Zn 与否，“4641”的叶片净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 质量比和蒸腾速率均明显高于“渝粉 109”.

表 2　不同 Zn 浓度对番茄光合特性的影响

Zn 浓度/(μmol·L^{-1})	“4641”			“渝粉 109”		
	0	200	400	0	200	400
叶片净光合速率/(μmol·m^{-2}·s^{-1})	10.09±0.31b	10.93±0.23a	10.13±0.48b	7.597±0.10a	8.18±0.25a	5.57±0.19b
气孔导度/(mmol·m^{-2}·s^{-1})	0.135±0.007a	0.143±0.011a	0.130±0.005b	0.084±0004b	0.097±0.002a	0.059±0.001c
胞间 CO_2 质量比/(mg·kg^{-1})	273.7±17.6a	263.0±24.3b	257.0±13.9c	253.7±9.2a	237.0±12.7b	225.3±12.3c
蒸腾速率/(g·m^{-2}·h^{-1})	4.00±0.12a	3.65±0.25ab	3.30±0.18b	2.487±0.09b	2.733±0.102a	1.593±0.05c

注：a，b，c 代表同一个品种不同 Zn 浓度之间差异具有统计学意义($p\leqslant0.05$).

2.3　不同 Zn 浓度对番茄果实品质的影响

由表 3 可知，在 Cd 污染条件下，叶面喷施不同浓度 Zn 对 2 个番茄品质的影响各不相同. 叶面喷 Zn 后，2 个番茄品种果实氨基酸质量比及“渝粉 109”果实硝酸盐质量比较对照处理(未喷 Zn 处理)显著下降. 与对照处理相比，“4641”和“渝粉 109”果实氨基酸质量比下降幅度分别为 39.88%～34.89%、15.49%～53.10%，当 Zn 浓度为 200 μmol/L 时，“4641”果实氨基酸质量比最低，当喷 Zn 浓度达到 400 μmol/L 时，“渝粉 109”果实氨基酸质量比处于最低水平. 比较 2 个品种，未喷 Zn 时和喷 Zn 浓度为 200 μmol/L 时，番茄果实氨基酸的质量比均为“渝粉 109”大于“4641”；在高 Zn 浓度(400 μmol/L)下，“4641”果实的氨基酸的质量比高于“渝粉 109”. 喷 Zn 对“4641”果实硝酸盐质量比影响不大；与对照相比，“渝粉 109”果实内硝酸盐质量比降低幅度为 24.21%和 38.23%.

本研究随着喷 Zn 浓度的增加，2 个番茄品种果实还原糖质量分数和“4641” 果实 Vc 的质量比均表现为先升高后降低，在 Zn 浓度为 200 μmol/L 时，均达到最高水平；在高 Zn 浓度下(400 μmol/L)，“4641”果实还原糖的质量分数和 Vc 的质量比均显著低于对照处理. “渝粉 109”果实 Vc 的质量比随 Zn 浓度的升高而增加，增幅为 7.30%和 11.14%. 未喷 Zn 时，“渝粉 109”果实所有处理的 Vc 的质量比均低于“4641”果实未喷锌时 Vc 的质量比. 果实还原糖的质量分数为“4641”大于“渝粉 109”，但喷 Zn 以后，果实还原糖的质量分数以“渝粉 109”大于“4641”.

表3 不同Zn浓度对番茄果实品质的影响

品种	Zn/(μmol·L^{-1})	氨基酸/(mg·g^{-1})	还原糖/%	Vc/(mg·g^{-1})	硝酸盐/(mg·kg^{-1})
"4641"	0	0.493 3±0.87a	4.20±0.07b	0.116 6 ±0.15a	103.76±2.31a
	200	0.296 5±0.43c	4.71±0.11a	0.120 5 ±0.21a	102.1±1.95a
	400	0.416 9±0.55b	4.17±0.05b	0.103 9 ±0.17b	103.82±2.54a
"渝粉109"	0	0.717 4±078a	3.64±0.04b	0.101 4 ±0.13b	161.73±2.78a
	200	0.467 1±0.31b	5.77±0.12a	0.108 8 ±0.09a	122.58±1.35b
	400	0.336 4±0.24c	5.03±0.09a	0.112 7 ±0.06a	99.90±0.67c

2.4 不同浓度Zn对番茄果实中不同形态Cd质量比的影响

由表4可知，番茄果实中Cd的提取总量及各形态Cd质量比在两个品种间和Zn浓度处理间达到显著水平. Cd在番茄果实中主要以残渣态(F_R)存在，质量比为0.538～1.104 mg/kg，平均质量比为0.814 mg/kg，所占Cd提取总量的比例为52.94%，其次是盐酸提取态(F_{HCl})，质量比为0.167～0.312 mg/kg，平均为0.220 mg/kg，占Cd提取总量的比例为14.29%，最小的为去离子水提取态(F_W)，平均质量比为0.0395 mg/kg，占Cd提取总量的比例为2.57%(表4). 试验还发现，除2个品种果实的F_W、F_{HAc}及"4641"果实的F_E，当喷Zn浓度为200 μmol/L时，两个番茄品种果实Cd总提取量和各形态Cd的质量比均处于最低水平. 但随Zn浓度的增加各形态Cd均表现出不同的变化趋势. "4641"果实Cd分组中F_E,F_W,F_{HAc}的质量比和"渝粉109"果实Cd分组中F_W,F_{HAC}的质量比均随喷Zn浓度的增加而显著下降；而其余形态Cd的质量比和总提取量均在高Zn浓度(400 μmol/L)时反而增加. 当喷Zn浓度为400 μmol/L时，"4641"果实中F_{HCl}和F_R的质量比均较对照增加34.48%～31.59%，"渝粉109"果实中F_E和F_R的质量比均较对照增加2.35%～14.48%. 比较两个番茄品种，在相同处理条件下，"4641"果实中Cd总提取量明显高于"渝粉109".

表4 不同浓度Zn处理对番茄果实中不同形态Cd质量比的影响

Zn浓度/(μmol·L^{-1})	"4641"			"渝粉109"		
	0	200	400	0	200	400
F_E	0.345 ±0.016a	0.070 ±0.003b	<0.001 ±0.000c	0.170 ±0.010a	0.140 ±0.012b	0.174 ±0.013a
F_W	0.115 ±0.014a	0.013 ±0.002b	<0.001 ±0.000c	0.109 ±0.010a	<0.001 ±0.000c	<0.001±0.000b
F_{NaCl}	0.334 ±0.022a	0.088 ±0.011c	0.225 ±0.027b	0.222 ±0.021a	0.134 ±0.010b	0.196 ±0.012a
F_{HAc}	0.220 ±0.010a	0.095 ±0.007b	0.082 ±0.004c	0.167 ±0.013a	0.068 ±0.003b	0.057 ±0.003a
F_{HCl}	0.232 ±0.013b	0.193 ±0.006c	0.312 ±0.009a	0.210 ±0.014c	0.167 ±0.013b	0.205 ±0.011a
F_R	0.839 ±0.016b	0.819 ±0.017b	1.104 ±0.036a	0.739 ±0.016b	0.538 ±0.009a	0.846 ±0.016ab
总提取量	2.085 ±0.032a	1.278 ±0.031c	1.723 ±0.037b	1.617 ±0.027a	1.047 ±0.016b	1.478 ±0.026a

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；a，b，c表同一个品种不同Zn浓度之间差异具有统计学意义($p\leqslant0.05$).

2.5 不同浓度Zn对番茄植株各部位Cd的质量比和积累量的影响

由表5可知，番茄根、茎、叶和果实Cd的质量比及积累量在两个品种及Zn浓度间差异均达显著水平. 番茄Cd的质量比从大到小为：叶，根，茎，果实. 叶面喷施Zn使番茄各部位Cd的质量比较对照均有所降低，随喷Zn浓度的增加，"4641"和"渝粉109"叶、茎、根和果实Cd的质量比降幅分别为18.81%～21.55%和16.64%～20.15%、31.09%～35.76和29%～36.71%、31.19%～26.13%和40.12%～41.81%、5.32%～11.73%和4.35%～12.73%(表5). 本试验还发现，2个番茄品种的叶和"4641"的茎及果实内Cd在Zn浓度为200 μmol/L时质量比最低，随Zn浓度继续增加，Cd质量比呈现增加趋势，但质量比小于不喷Zn处理.

由表5可见，Cd主要累积于番茄叶和茎中，叶、茎积累量分别为植株Cd总积累量的53.93%和35.39%，其次为根和果实. 叶面喷Zn，2个品种叶、茎、根Cd积累量及植株Cd总累积量均随Zn浓度的升高而显著降低，果实中Cd积累量随Zn浓度的升高均表现为先增加，在Zn浓度为200 μmol/L时最高，在400 μmol/LZn处理时则降低，但果实Cd积累量高于未喷Zn处理，较对照增幅分别为8.25%～

36.07%、4.12%～28.69%. 比较 2 个番茄品种，无论是否喷 Zn，果实中 Cd 质量比及 Cd 积累量以“4641”大于“渝粉 109”，植株 Cd 总积累量以“渝粉 109”大于“4641”.

表 5　不同浓度 Zn 处理对番茄 Cd 积累的影响

Zn 浓度/(μmol·L^{-1})		“4641”			“渝粉 109”		
		0	200	400	0	200	400
Cd 质量比/(mg·kg^{-1})	叶	124.4 ±2.0a	101.0 ±2.4b	103.7 ±1.7b	121.1 ±2.7a	95.0 ±2.2b	96.7 ±1.3b
	茎	43.1 ±1.2a	29.7 ±0.7b	30.6 ±0.5b	42.5 ±1.2a	27.3 ±0.6b	26.9±0.9b
	根	85.5 ±1.8a	53.7 ±0.8b	51.2±1.3b	70.8 ±1.7a	52.3 ±1.3b	41.2 ±0.9c
	果实	6.20 ±0.12a	5.87 ±0.06b	5.93 ±0.09ab	5.97 ±0.09a	5.27 ±0.09b	5.21 ±0.05b
Cd 积累量/(mg·株$^{-1}$)	叶	1.910 ±0.038a	1.616±0.028b	1.563 ±0.045b	1.890 ±0.029a	1.807±0.029b	1.803 ±0.023b
	茎	1.086 ±0.024a	0.959±0.014b	0.953 ±0.017b	1.351 ±0.026a	1.319 ±0.020b	1.282 ±0.017b
	根	0.268 ±0.009a	0.180 ±0.005b	0.157 ±0.006c	0.169 ±0.007a	0.166 ±0.005a	0.146 ±0.006b
	果实	0.194 ±0.006c	0.210 ±0.005bc	0.202 ±0.006bc	0.122 ±0.004c	0.166 ±0.003b	0.157 ±0.006ab
Cd 全量/(mg·株$^{-1}$)		3.458 ±0.044a	2.965±0.040c	2.876 ±0.064cb	3.531 ±0.036a	3.419 ±0.032bc	3.387 ±0.027c

注：a，b，c 表同一个品种不同 Zn 浓度之间差异具有统计学意义($p \leqslant 0.05$).

3　讨　论

本试验条件下，在 Cd 污染(10 mg/kg)的土壤上叶面喷施低浓度 Zn 增加了植株各部位干质量(表 1). 可能是 Zn 是植物必需营养元素，参与生长素与蛋白质的合成，提高光合作用效率，增强了植物的抗逆能力，在一定程度上缓解 Cd 的毒害作用[10,14-15]. 本试验中，喷施的 Zn 由 $ZnSO_4$ 提供，番茄生物量的增加，S 可能也有一定贡献. 此外，锌镉拮抗可能也降低了 Cd 对番茄生长的不良影响. 但试验也发现，Zn 浓度过大(大于 400 μmol/L)，番茄的干质量开始下降，“4641”的根干重甚至低于对照处理. 该结果与早期郭世荣等人[16]、李珊等人[17]的报道类似. 可能是由于 Zn、Cd 协同作用导致番茄受到双重毒害[18]；高浓度的 Zn 与其他养分起拮抗作用，抑制了根系在土壤中总的分布，使植物对矿质养分的吸收量降低，限制了番茄的生长水平[19]. 喷 Zn 以后，两个品种果实干质量较对照分别增加了 14.38%～53.92%和 8.95%～47.55%，可见，“渝粉 109”对 Zn 的反应更为敏感.

Zn 是叶绿素合成的前提物质，同时又是植物碳酸酐酶(CA)的组成成分，碳酸酐酶具有催化 CO_2 的水合作用，提高叶肉细胞中 CO_2 的容量[20-21]. 本试验发现，2 个番茄品种净光合速率、气孔导度和“渝粉 109”的蒸腾速率在 Zn 浓度为 200 μmol/L 时较对照显著增加(表 2)，可见，低 Zn(200 μmol/L)促进了作物光合作用和蒸腾作用，有助于光合产物的合成. 该结果与番茄的干重随 Zn 浓度变化是一致的. 但高浓度 Zn(400 μmol/L)时，净光合速率、气孔导度和蒸腾速率降低. 早前田在军等人[22]研究结果也报道适量施 Zn 可以增加玉米叶片中碳酸酐酶(CA)的质量比，进而提高光合速率，但过量的 Zn 可能抑制了叶片细胞光合活性、RUBP 羧化酶活性或卡尔文循环反而降低了光合速率[23]. 本研究还发现，高浓度 Zn 降低了 2 个品种番茄胞间 CO_2 质量比，原因可能是高浓度的 Zn 使细胞膜透性增加，导致胞间 CO_2 通过扩散作用进入叶肉细胞.

本试验中，随着喷 Zn 浓度的增加，2 个番茄品种果实内氨基酸的质量比和“渝粉 109”果实内硝酸盐的质量比较对照显著下降. 该结果与杨凤娟等人、魏成熙等人报道一致[15,24]. 原因可能是硝酸还原酶是植物体内氮素代谢的关键性酶，对重金属比较敏感，它将 NO_3^- 还原成 NO_2^- 后，氮素才能参与体内的其他代谢活动[25]，低浓度的 Zn 增加了硝酸还原酶的活性，促进植物对硝酸盐的同化吸收，减少硝酸盐在植物体内的累积. 植物体内游离氨基酸的质量比与 RNase 活性呈极显著负相关，低浓度 Zn 显著提高 RNase 的活性[26]. Cd 与 DNA 结合，刺激了 DNA 的活性，增加蛋白质的合成[27]，也是氨基酸的质量比减少的一个重要原因. 2 个品种番茄果实内 Vc 和还原糖质量分数均表现为先增后降，该结果与杨凤娟等[15]报道相似. 可能是由于低浓度的 Zn(200 μmol/L)可以提高维生素酶的活性，使得番茄果实内 Vc 的质量比增加；同时 Zn

可以提高番茄光合速率，有机物的合成量增加，运输至果实的糖分也会增多. 而高 Zn 浓度下，Zn,Cd 协同效应加重了重金属胁迫，破坏细胞内酶及代谢作用，影响了作物正常的光合作用，使其体内光合同化产物积累量减少或无足够的同化物转化形成其他糖类物质[17,27]，因此 Vc 的质量比和还原糖的质量分数降低.

在本试验条件下，Cd 在番茄果实中主要以残渣态(F_R)存在，平均质量比为 0.814mg/kg，所占 Cd 提取总量的比例为 52.94%(表 5)，与早前报道重金属在辣椒果实内的化学形态一般以氯化钠态为主的结果不一致[10]，但与刘俊等人[12]的报道相似. 其次是盐酸提取态(F_{HCl})，平均为 0.220 mg/kg，占 Cd 提取总量的比例为 14.29%. 残渣态 Cd 和盐酸提取态 Cd 均为活性偏低形态 Cd，占 Cd 提取总量的比例达到了 67.19%；而活性较高的去离子水提取态 Cd 和乙醇提取态 Cd 占 Cd 提取总量的比例仅为 12.31%，说明 Cd 胁迫下进入番茄果实中的 Cd 主要以蛋白质结合态或吸附态等迁移活性较弱的形态存在，从而极大地限制了 Cd 的毒害效应. 低浓度的 Zn 减少了 2 个番茄品种果实各形态 Cd 质量比和 Cd 总提取量，锌镉表现出明显的拮抗效应. 该结果与吕选忠等人[9]的报道相似. 可能是由于 Zn^{2+} 与 Cd^{2+} 的吸收和运输过程中共用细胞质上的同一个转运子，两者同时存在时，可以互相竞争进入生物细胞上的结合位点[9]. 但高浓度 Zn(400 μmol/L)反而较低浓度 Zn 增加了“渝粉 109”果实中乙醇提取态 Cd 及 2 个品种氯化钠提取态 Cd、盐酸提取态 Cd、残渣态 Cd 和总提取量，锌镉表现出一定的协同效应. 叶海波等人[28]研究结果也表明 Zn 处理浓度的提高能促进东南景天根系对 Cd 的吸收和 Cd 从根部向地上部的转运. 可见，锌镉交互作用不仅与 Zn 浓度有关，还与供试作物种类和品种有关.

2 个品种番茄，Cd 主要累积于番茄叶和茎中，其次为根和果实，质量比从大到小依次为：叶，根，茎，果实(表 5). 可见番茄对 Cd 的转移能力较强. 此结果与朱芳等人[29]番茄 Cd 主要集中在根部的报道有所不同. 本试验中，番茄果实中 Cd 质量比大于 5.0mg/kg，远远高于国家对蔬菜和水果的 Cd 限量标准(小于等于 0.05 mg/kg)，可见，重金属 Cd 在番茄果实中是极易富集的，因此在 Cd 污染严重的土壤上种植番茄，对其品质是十分不利的. 叶面喷施适量 Zn(200 μmol/L)使番茄各部位 Cd 质量比均有所降低. 该结果与朱波等人[18]、刘俊等人[12]的研究结果相似. 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，加入 Zn 后，Cd 的竞争能力减弱，更多的 Zn 仍能与 Zn 酶结合而使 Zn 酶保持原有的活性，使其免遭 Cd 毒害. 但在 400 μmol/L Zn 处理时，叶、茎、果实中的 Cd 含量回升. 原因可能与 Zn 浓度有关，也可能是“稀释效应”所致. 该结果表明，Zn,Cd 交互是协同和拮抗作用矛盾过程的统一体. 此外，无论是否喷 Zn，果实中 Cd 质量比及 Cd 积累量以“4641”大于“渝粉 109”，植株 Cd 总积累量以“渝粉 109”大于“4641”，可见，“4641”植株较“渝粉 109”吸收富集土壤中的 Cd 少，但转运至果实中的 Cd 比“渝粉 109”多，可能带来更大的食用风险.

4 小 结

1) 在 Cd 污染(10 mg/kg)的土壤上叶面喷施低浓度 Zn，明显降低了 Cd 对 2 个番茄品种生长的抑制；但喷施高浓度的 Zn(400 μmol/L)，除“渝粉 109”根外，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“渝粉 109”的 T_r 在 200 μmol/L Zn 处理时最高，然后在 400 μmol/L Zn 处理时降低；叶片 C_i 则随 Zn 浓度的升高而增加.

3) 随着喷 Zn 浓度的增加，2 个番茄品种果实内氨基酸的质量比和“渝粉 109”果实内硝酸盐的质量比较对照显著下降；“渝粉 109”的 Vc 的质量比随喷 Zn 浓度的升高而增加；2 个品种番茄还原糖质量分数和“4641”Vc 的质量比在低 Zn 浓度(200 μmol/L)最高，然后在 400 μmol/L Zn 处理时降低.

4) Cd 在番茄果实中主要以残渣态(F_R)存在，所占 Cd 提取总量的比例为 52.94%，其次是盐酸提取态(F_{HCl})，占 Cd 提取总量的比例为 14.29%；活性较高的去离子水提取态 Cd 和乙醇提取态 Cd 占 Cd 提取总量的比例仅为 12.31%；喷施适量的 Zn 减少了 2 个番茄品种果实各形态 Cd 含量和 Cd 总提取量，但高浓度 Zn(400 μmol/L)反而较低浓度 Zn 增加了“渝粉 109”果实中乙醇提取态 Cd 及 2 个品种氯化钠提取态 Cd、盐酸提取态 Cd、残渣态 Cd 和总提取量.

5）2 个品种番茄，Cd 主要累积于番茄叶和茎中，分别为植株 Cd 总积累量的 53.93％和 35.39％，其次为根和果实. Cd 的质量比从大到小依次为：叶，根，茎，果实. 叶面喷 Zn，2 个品种叶、茎、根 Cd 积累量及植株 Cd 总累积量均随 Zn 浓度的升高而显著降低，果实中 Cd 积累量随 Zn 浓度的升高均表现为先增后降趋势，在 Zn 浓度为 200 μmol/L 时果实中 Cd 积累量达到最高值.

参考文献：

[1] 袁祖丽，马新明，韩锦峰，等. 镉污染对烟草叶片超微结构及部分元素含量的影响 [J]. 生态学报，2005，25(11)：2919－2927.

[2] SATARUG S，BAKER J R，URBENJAPOL S，et al. A Global Perspective on Cadmium Pollution and Toxicity in Non-Occupationally Exposed Population [J]. Toxicology Letters，2003，137(1－2)：65－83.

[3] 周　坤，刘　俊，徐卫红，等. 铁对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响 [J]. 园艺学报，2013，40(11)：111－122.

[4] 曾希柏，李莲芳，梅旭荣. 中国蔬菜土壤重金属含量来源分析 [J]. 中国农业科学，2007，40(11)：2507－2517.

[5] 王丽慧，王翠红，叶丽丽，等. 城郊蔬菜地土壤铅和镉污染研究进展 [J]. 湖南农业科学，2009，(5)：50－52，57.

[6] 方华为. 不同品种蔬菜对镉的吸收及根系形态特征研究[D]. 武汉：华中农业大学，2011.

[7] MCGRATH S P，LOMBI E，GRAY C W，et al. Field Evaluation of Cd and Zn Phytoextraction Potential by the Hyperaccumulators *Thlaspi caerulescens* and *Arabidopsis halleri* [J]. Environmental Pollution，2006，141(1)：115－125.

[8] SORIAL M E，ABD EL-FATTAH M A. Alleviation of the Adverse Effects of Lead and Cadmium on Growth and Chemical Changes of Pea Plant by Phosphorus and Calcium Treatments [J]. Journal of Pest Control and Environmental Sciences，2001，9(1)：161－194.

[9] 吕选忠，宫象雷，唐　勇. 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] 陈贵青，张晓璟，徐卫红，等. 不同 Zn 水平下辣椒体内 Cd 的积累、化学形态及生理特性 [J]. 环境科学，2010，31(7)：1657－1662.

[11] XUE Qi，HARRISON H C. Effects of Soil Zinc，pH and Cultivar Uptake in Leaf Lettuce (*Lactuca sativa* L. var. crispa) [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis，1991，22(9－10)：975－991.

[12] 刘　俊，周　坤，徐卫红，等. 不同浓度外源铁对番茄生理特性、镉积累及化学形态的影响 [J]. 环境科学，2013，34(10)：4126－4131.

[13] 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.

[14] 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，2008，17(1)：102－106.

[15] 杨凤娟，刘世琦，王秀峰，等. 锌对大蒜生理生化指标及营养品质的影响 [J]. 土壤肥料，2005(1)：35－38.

[16] 郭世荣，赵鸿钧，乐　波，等. 甘蓝施用锌肥试验研究初报 [J]. 中国蔬菜，1994(4)：36－37.

[17] 李　珊，程　舟，杨晓伶，等. 镉与锌复合污染对栝楼幼苗生理特性的影响 [J]. 西北植物学报，2007，27(6)：1191－1196.

[18] 朱　波，青长乐，牟树森. 紫色土 Zn，Cd 复合污染生态效应研究 [J]. 应用生态学报，1997，8(6)：639－644.

[19] FOY C D，CHANEY R L，WHITE M C. The Physiology of Metal Toxicity in Plants [J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology，1978，29(1)：511－566.

[20] 马虹霞. 锌对干旱胁迫下青花菜幼苗叶片生理生化和光合特性的影响[D]. 兰州：甘肃农业大学，2008.

[21] 欧志英，彭长连. 高浓度二氧化碳对植物影响的研究进展 [J]. 热带亚热带植物学报，2003，11(2)：190－196.

[22] 田在军，杨克军，张树远，等. 施用锌肥对玉米的形态和生理生化特性的影响 [J]. 黑龙江八一农垦大学学报，2008，20(1)：24－27.

[23] FARQUHAR G D，SHARKEY T D. Stomatal Conductance and Photosynthesis [J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology，1982，33(4)：317－345.

[24] 魏成熙，张　旭. 土壤锌铅镉污染对小白菜硝酸盐含量的影响 [J]. 西南农业大学学报：自然科学版，2005，27(4)：436－438.

[25] 徐勤松，施国新. 镉及镉、锌共同作用对水芹菜部分生理特性的影响 [J]. 南京师大学报：自然科学版，2000，23(4)：97－100.

[26] 施木田，陈如凯. 锌硼营养对苦瓜叶片碳氮代谢的影响 [J]. 植物营养与肥料学报，2004，10(2)：198－201.
[27] 王宏信，徐卫红，刘吉振，等. 土壤中锌镉复合污染及其植物效应研究进展 [J]. 微量元素与健康研究，2005，22(6)：50－53.
[28] 叶海波，杨肖娥，何　冰，等. 东南景天对锌镉复合污染的反应及其对锌镉吸收和积累特性的研究 [J]. 农业环境科学学报，2003，22(5)：513－518.
[29] 朱　芳，方　炜，杨中艺. 番茄吸收和积累Cd能力的品种间差异 [J]. 生态学报，2006，26(12)：4071－4081.

Effects of Exogenous Zinc on Photosynthetic Characteristics, Fruit Quality and Cadmium Accumulation in Tomato

XIE Wen-wen[1], ZHOU Kun[1], XU Wei-hong[1], XIONG Shi-juan[1], CHEN Rong[1], JIANG Ling[1], WANG Chong-li[1], YANG Yun[1], XIONG Zhi-ting[2], WANG Zheng-yin[1], XIE De-ti[1]

1. *School of Resources and Environmental Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;*
2. *College of Resources and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China*

Abstract: Pot experiments were carried out to investigate the influences of different zinc (Zn) levels (0, 200 and 400 μmol/L) on plant growth, photosynthetic characteristics, quality indices and accumulation and chemical forms of cadmium (Cd) in 2 (*Solanum lycopersicum* Mill.) tomato varieties ("4641" and "Yufen109") exposed to Cd (10 mg/kg). The dry weight of fruit, roots, stem and leaf of the 2 varieties and the total dry mass of the plant increased with increasing Zn level. Photosynthetic rate (P_n) and stomatal conductance (G_s) in both varieties and transpiration rate (T_r) in "Yufen109" increased at first, and then decreased with increasing levels of Zn, while intercellular carbon dioxide concentration (C_i) in both varieties and transpiration rate (T_r) in "4641" decreased significantly with increasing Zn level. The concentration of amino acids in both varieties, Vc in "4641"and nitrate in "Yufen109" decreased significantly with increasing Zn level, while Vc in "Yufen109" decreased significantly. The concentration of reducing sugars in both varieties increased at first, and then decreased with increasing Zn level. All chemical forms of Cd and the total extractable Cd decreased at low concentration of Cd (200 μmol/L); however, F_E of "Yufen109" and F_{NaCl}, F_{HCl} and F_R, and total extractable Cd in both varieties increased at high concentration of Zn (400 μmol/L). Compared with the control treatment, Cd concentration in leaf, stem, roots and fruit of the two varieties decreased by 18.81%～21.55% and 16.64%～20.15%, 31.09%～35.76% and 29.00%～36.71%, 31.19%～26.13% and 40.12%～41.81%, and 5.32%～11.73% and 4.35%～12.73%, respectively, with increasing Zn level. Whether Zn was sprayed or not, Cd concentration and Cd accumulation in fruit were in the order of "4641">"Yufen109 ", while total Cd accumulation in the plant was in the order of "Yufen109 ">"4641".

Key words: exogenous zinc; photosynthetic characteristics; tomato quality; Cd accumulation; Cd fraction

责任编辑　潘春燕