

磷对不同辣椒品种镉积累、化学形态及生理特性的影响

张晓璟¹, 刘吉振², 徐卫红^{1*}, 陈贵青¹, 王慧先¹, 张海波¹, 韩贵琪¹, 曾红军¹, 蓝春桃¹, 熊治庭³, 魏松庆¹

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 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 ($10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 污染下, 叶面喷施不同磷浓度(0、0.3%、0.5%)对不同品种辣椒生长、抗氧化酶活性及辣椒体内 Cd 形态和积累量的影响. 结果表明, 喷磷后, 辣椒果实、根和叶干重和植株总干重、Cd 含量及积累量在 2 个品种之间的差异均达到了显著水平. 适量喷施磷增加了世纪朝天椒果实及植株总干重, 但降低了艳椒 425 的果实及植株总干重. 喷磷使 2 个品种辣椒叶 CAT 活性先增加, 然后下降, 随磷水平增加, 艳椒 425 叶 SOD 和 POD 活性呈上升趋势, 世纪朝天椒叶 SOD 和 POD 活性则呈下降趋势. 辣椒果实中 Cd 的形态以 $F_{\text{NaCl}} > F_{\text{HAC}} > F_{\text{E}} > F_{\text{r}} > F_{\text{HC}} > F_{\text{W}}$. 喷磷明显降低了艳椒 425 中乙醇提取态、盐酸提取态和残渣态及 Cd 提取总量, 但增加了世纪朝天椒中离子水提取态、醋酸盐提取态、残渣态及 Cd 提取总量. 辣椒中 Cd 积累量以根 > 茎 > 叶 > 果实. 喷施 0.3% 和 0.5% 磷使艳椒 425 果实 Cd 积累量和植株的 Cd 积累总量分别较对照降低了 47.7%、58.5% 和 5.5%、13.1%, 喷施 0.5% 的磷使朝天椒果实 Cd 的积累量也降低了 23.6%.

关键词:磷镉交互; 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(2011)04-1171-06

Effect of Phosphor on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium, and Physiological Characterization in Different Varieties of *Capsicum annuum* L.

ZHANG Xiao-jing¹, LIU Ji-zhen², XU Wei-hong¹, CHEN Gui-qing¹, WANG Hui-xian¹, ZHANG Hai-bo¹, HAN Gui-qi¹, ZENG Hong-jun¹, LAN Chun-tao¹, XIONG Zhi-ting³, WEI Song-qing¹

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, 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 Phosphor (P) levels (0, 0.3% and 0.5%) on the plant growth, activities of antioxidant enzymes, accumulation and chemical forms of cadmium (Cd) in *Capsicum annuum* L. when exposed to Cd ($10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). The results showed that dry weights of leaf, fruit, roots and total dry weights of plant, and concentration and accumulation of Cd significantly differed between two varieties of *Capsicum annuum* L. Dry weights of fruit and total plant of Chaotianjiao increased by P (0.3% and 0.5%), while that of Yanjiao425 was inhibited. Activities of catalase (CAT) were increased at first, and then reduced in the presence of P; Activities of superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD) of Chaotianjiao increased with increasing levels of P, but activities of SOD and POD of Yanjiao425 decreased with increasing levels of P. Chemical forms of Cd in fruit of *Capsicum annuum* L. were in order of $F_{\text{NaCl}} > F_{\text{HAC}} > F_{\text{E}} > F_{\text{r}} > F_{\text{HC}} > F_{\text{W}}$, The total extractable Cd, ethanol-extractable Cd, hydrochloric acid-extractable Cd and residual Cd in fruit of Yanjiao425 obviously decreased in the presence of P compared to the control, while the total extractable Cd, water-extractable Cd, acetic acid-extractable Cd and residual Cd in fruit of Chaotianjiao increased. Cadmium accumulations of *Capsicum annuum* L. were in order of roots > stew > leaf > fruit. Cadmium accumulations in fruit and plant of Yanjiao425 were decreased by 47.7% and 58.5%, 5.5% and 13.1% in the presence of 0.3% and 0.5% P when exposed to Cd, and Cd accumulations in fruit and plant of Chaotianjiao were decreased by 23.6% in the presence of 0.3% P.

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

镉 (Cadmium, Cd) 是自然界中广泛分布的一种重金属微量元素^[1], 在 Cd、Hg、As、Cr、Pb 中, Cd 被列为首位土壤重金属污染物, 在联合国环境规划署提出的 12 种具全球性意义的危险化学物质中也被列为首位^[2,3]. 我国城郊菜园土壤由于长期大量使用磷肥、城市垃圾、污泥及污灌等, Cd 污染问题日趋严重. 我国污灌农田已达到 140 万 hm^2 , 其中 1.4

万 hm^2 耕地受到 Cd 污染, 涉及 11 个省市的 25 个地

收稿日期: 2010-05-09; 修订日期: 2010-06-09

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项 (Nycytx-35-gw16); 国家自然科学基金项目 (20477032); 国家科技支撑计划项目 (2007BAD87B10); 重庆市自然科学基金项目 (CSTC, 2009BB7246)

作者简介: 张晓璟 (1984 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为植物营养与农产品安全, E-mail: xiaojing103115@163.com

* 通讯联系人, E-mail: xuwei_hong@163.com

区^[4]. 由于 Cd 污染具有隐蔽性、潜伏性、长期性和不可逆性, 土壤 Cd 污染的治理已成为国际研究的难点和热点^[5]. 近年来大量研究表明, 植物必需的大量元素和微量元素与 Cd 产生的交互作用能减缓 Cd 的毒害效应. 国内外研究表明磷与镉之间存在拮抗作用^[6]. 改善植物的磷素供应水平, 利用磷酸盐对 Cd 的吸附、磷酸根阴离子诱导的间接吸附作用、Cd 与磷酸根形成磷酸盐沉淀以及 Cd 与磷形成的金属磷酸盐, 可降低植物体内 Cd 的含量^[7,8]. 但也有相反报道^[9]. 可见, 磷镉交互作用与磷、镉的浓度有关^[10]. 此外, 不同的植物、植物部位、温度、光照、水分、营养状况等许多因素都会影响磷镉交互的作用^[11].

辣椒 (*Capsicum annum* L.) 是人们喜食的蔬菜和调味品, 且为 Cd 高富集蔬菜类^[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%. 贵阳某市郊菜园辣椒果实超标率达到 90%^[13]. 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. 目前采用喷施磷来抑制辣椒 Cd 吸收或转移的研究还鲜见报道. 同时, 研究表明辣椒对 Cd 耐性和吸收富集存在基因型差异^[14,15]. 为了进一步探讨磷、Cd 的相互关系以及叶面控制技术对不同辣椒品种 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, 分析了叶面喷施磷对辣椒不同品种生长、生理特性、Cd 的积累及化学形态的影响, 以为蔬菜 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 annum* L.), 品种艳椒 425、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 和有机质分别为 0.97 g·kg⁻¹ 和 12.6 g·kg⁻¹, 有效 N、有效 P 和速效 K 分别为 76.4、54.7 和 60.0 mg·kg⁻¹, pH 为 5.7, Cd 未检测出.

1.2 试验方法

试验于 2009-03-20~2009-08-28 在重庆市农科院蔬菜花卉研究所塑料大棚内进行. 试验共设 3 个磷浓度, 即 0、0.3%、0.5% (KH₂PO₄). 模拟土壤

Cd 污染的浓度为 10 mg·kg⁻¹. 所用 Cd 为 CdCl₂·2.5H₂O. 将 4 kg 经过 Cd 处理过的 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, 开始进行叶面喷施磷的营养液. 每隔 4 d 喷施 1 次, 共喷 7 次, 每次喷施 100 mL·钵⁻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 148 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]. 高锰酸钾滴定法测定过氧化氢酶 (CAT) 活性^[17]; 过氧化物酶 (POD) 活性采用愈创木酚法测定^[18]; 氮蓝四唑 (NBT) 还原法测定超氧化物歧化酶 (SOD) 活性^[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, 将 4 次提取液(共 150 mL)混合, 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 生物量

从表 1 可知, 喷施磷后, 辣椒果实、根、叶及总干重在 2 个品种之间的差异达到了显著水平. 在重金属 Cd 污染下, 喷施磷减少了艳椒 425 的果实、叶、根及总干重, 以果实干重下降幅度最大, 降低了

表 1 不同磷水平对辣椒生长的影响

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

磷水平/%	果实(干重)/g·钵 ⁻¹		根(干重)/g·钵 ⁻¹		茎(干重)/g·钵 ⁻¹		叶(干重)/g·钵 ⁻¹		总干生/g·钵 ⁻¹	
	艳椒 425	世纪朝天椒	艳椒 425	世纪朝天椒	艳椒 425	世纪朝天椒	艳椒 425	世纪朝天椒	艳椒 425	世纪朝天椒
0	8.30	5.88	3.10	2.21	13.82	11.96	11.43	9.93	36.65	29.98
0.3	4.59	7.19	2.78	2.30	14.64	13.53	8.74	13.55	30.75	36.57
0.5	4.01	5.11	2.69	1.51	14.21	12.31	11.23	11.55	32.14	30.48
LSD _{0.05}										
品种	0.447		0.138		1.562		0.776		1.525	
磷水平	0.365		0.113		1.276		0.634		1.245	
品种 × 磷水平	0.279		0.080		0.902		0.448		1.127	

44.7%和51.7%,喷施磷使茎干重略有增加,分别为5.9%和2.8%;喷施磷增加了世纪朝天椒茎、叶及总干重.其中,喷施0.3%的磷还使果实、根干重分别增加22.3%和4.1%,但喷施0.5%的磷使果实和根干重分别减少13.1%和31.7%.

2.2 抗氧化酶

生物代谢产生的自由基对生物膜有伤害作用, CAT、SOD及POD等抗氧化酶对逆境诱导产生的活性氧清除相关,逆境中它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1~3可见,在Cd污染下,喷施磷2个品种辣椒叶CAT活性表现出相同的变化趋势,即随磷水平增加,CAT活性先增加,然后下降.随磷水平增加,艳椒425叶SOD和POD活性呈上升趋势,但世纪朝天椒叶SOD和POD活性呈下降趋势.

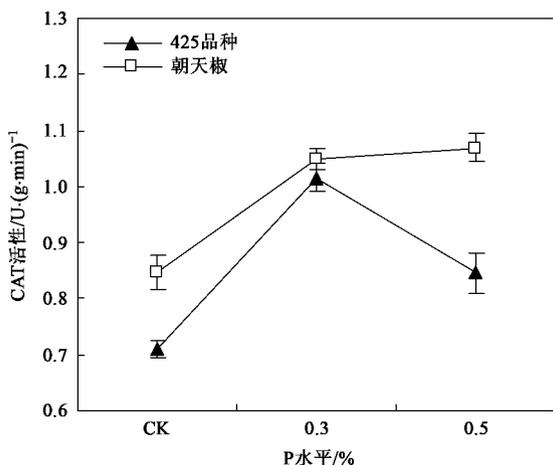


图 1 P对辣椒不同品种叶CAT活性的影响

Fig. 1 Influence of P on activity of SOD in different varieties of *Capsicum annuum* L.

2.3 果实Cd形态

由表2可知,辣椒果实中Cd的提取总量及各形态Cd含量在2个品种间差异达到显著水平(除盐酸提取态外).Cd在辣椒果实中主要以氯化钠提取

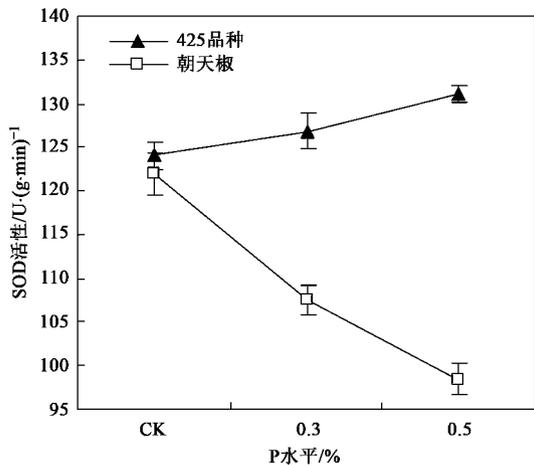


图 2 P对辣椒不同品种叶SOD活性的影响

Fig. 2 Influence of P on activity of SOD in different varieties of *Capsicum annuum* L.

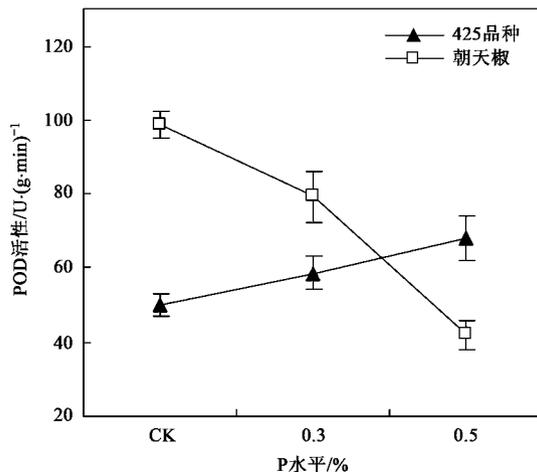


图 3 P对辣椒不同品种叶POD活性的影响

Fig. 3 Influence of P on activity of POD in different varieties of *Capsicum annuum* L.

态存在,含量为8.167 mg·kg⁻¹和9.803 mg·kg⁻¹,平均为9.000 mg·kg⁻¹,所占Cd提取总量的比例为84.6%和89.2%,平均为86.0%;其次是醋酸提取态,含量为0.673 mg·kg⁻¹和0.801 mg·kg⁻¹,平均为

0.729 mg·kg⁻¹,占 Cd 提取总量的比例为 6.1% 和 8.2%,平均为 7.0%;最小的是去离子水提取态和盐酸提取态,含量分别为 0.025 mg·kg⁻¹和 0.179 mg·kg⁻¹、0.086 mg·kg⁻¹和 0.148 mg·kg⁻¹,平均为 0.094 mg·kg⁻¹和 0.123 mg·kg⁻¹,占 Cd 提取总量的比例为 0.3% 和 1.8%、0.9% 和 1.5%,平均为 0.9% 和 1.2% (表 2). 试验发现,喷施 0.3% 和 0.5% 的磷后,艳椒 425 中 Cd 提取总量有所降低,降幅分别为 2.1% 和 1.3%,辣椒果实 Cd 组分中,乙醇提取态、盐酸提取态和残渣态也分别下降了 9.2% 和 37.7%、7.1% 和 34.8%、55.4% 和 52.4%,喷施

0.3% 的磷,去离子水提取态 Cd 和氯化钠提取态 Cd 分别较对照减少了 32.4% 和 1.3%,但喷施 0.5% 的磷后去离子水提取态 Cd 和氯化钠提取态反而增加了 116.2% 和 1.5%;与艳椒 425 不同,喷施 0.3% 和 0.5% 的磷后,世纪朝天椒中 Cd 提取总量反而增加了 4.7% 和 1.0%,辣椒果实 Cd 组分中,除了乙醇提取态下降了 34.4% 和 22.2%,以及喷施 0.5% 的磷后盐酸提取态 Cd 下降了 39.0% 外,其余各形态 Cd 含量均较对照增加,其中以醋酸盐提取态 Cd 和残渣态 Cd 增加最明显,分别较对照提高了 5.6% 和 14.8%、29.8% 和 42.3%.

表 2 不同磷浓度对辣椒果实 Cd 形态含量的影响/mg·kg⁻¹

Table 2 Effects of different P levels on chemical forms of Cd in *Capsicum annuum* L./mg·kg⁻¹

磷水平/%	F_E		F_W		F_{NaCl}		F_{HAC}		F_{HCl}		F_r		总提取量	
	艳椒 425	世纪 朝天椒	艳椒 425	世纪 朝天椒	艳椒 425	世纪 朝天椒	艳椒 425	世纪 朝天椒	艳椒 425	世纪 朝天椒	艳椒 425	世纪 朝天椒	艳椒 425	世纪 朝天椒
0	0.422	0.459	0.037	0.086	9.658	8.167	0.709	0.698	0.141	0.141	0.166	0.104	11.133	9.655
0.3	0.383	0.301	0.025	0.154	9.531	8.636	0.755	0.737	0.131	0.148	0.074	0.135	10.899	10.111
0.5	0.263	0.357	0.080	0.179	9.803	8.178	0.673	0.801	0.092	0.086	0.079	0.148	10.990	9.749
LSD _{0.05}														
品种	0.068		0.007		0.154		0.069		0.031		0.015		0.330	
磷水平	0.056		0.006		0.125		0.056		0.025		0.013		0.270	
品种 × 磷水平	0.040		0.004		0.889		0.397		0.017		0.009		0.190	

2.4 辣椒 Cd 积累量

由表 3 可见,辣椒 Cd 含量以根 > 茎 > 叶 > 果实. 叶面喷施磷使辣椒茎和果实中的 Cd 含量有所降低,Cd 含量降低幅度分别为 1.2%、22.2% 和 5.4%、14.1%. 随磷浓度增加,茎和果实 Cd 含量呈现下降趋势;喷施 0.3% 磷使叶 Cd 含量降低,但 0.5% 磷使叶 Cd 含量增加且大于不喷磷处理(对照). 除了朝天椒的 0.5% 磷处理外,喷施磷使辣椒根的 Cd 含量增加. Cd 主要累积于辣椒茎和根中,其

次是叶,积累最少的是果实. 叶面喷施磷使艳椒 425 果实 Cd 积累量和植株的 Cd 积累总量较对照分别降低了 47.7%、58.5% 和 5.5%、13.1%;但朝天椒除了喷施 0.5% 的磷果实 Cd 的积累量降低了 23.6% 外,喷施磷使朝天椒果实的 Cd 积累量和植株的 Cd 积累总量较对照有所上升. 在不喷施磷处理(对照)中,果实 Cd 的积累量及植株的 Cd 积累总量以艳椒 425 > 朝天椒,喷施磷后,果实 Cd 的积累量及植株的 Cd 积累总量以朝天椒 > 艳椒 425.

表 3 不同磷浓度对辣椒 Cd 积累的影响

Table 3 Effects of different P levels on accumulation of Cd in *Capsicum annuum* L.

磷水平/%	Cd 含量/mg·kg ⁻¹								Cd 积累量/μg·钵 ⁻¹								Cd 全量/mg·钵 ⁻¹	
	叶		茎		根		果实		叶		茎		根		果实		艳椒 425	朝天 椒
0	19.25	50.95	82.07	78.23	182.90	190.23	7.78	5.98	220.0	505.9	1134.2	935.7	567.0	420.4	64.57	35.2	1.986	1.897
0.3	17.17	49.35	77.81	60.90	198.81	205.07	7.36	5.38	150.1	668.7	1139.1	824.1	552.7	471.7	33.78	38.7	1.876	2.003
0.5	20.10	73.08	68.39	77.31	186.37	183.89	6.68	5.27	225.7	844.1	971.8	925.1	501.3	277.7	26.79	26.9	1.726	2.100
LSD _{0.05}																		
品种	4.180		4.490		4.633		0.377		17.835		26.237		13.913		2.227		0.154	
磷水平	3.398		3.666		3.783		0.308		14.563		21.423		11.307		1.189		0.126	
品种 × 磷水平	2.403		3.084		2.649		0.218		10.298		15.148		8.033		1.286		0.089	

3 讨论

本试验条件下,在 Cd 污染土壤上的 2 个辣椒品种对叶面喷施磷的反应不同. 喷施 0.3% 的磷增加了世纪朝天椒果实、叶、茎、根及总干重,但当磷浓度增加到 0.5% 时,果实和根干重降低(表 1). 说明适量的磷与 Cd 的拮抗效应能缓解 Cd 对辣椒生长的抑制,同时,磷作为植物必需的营养元素之一,是植物体内许多重要化合物(如核酸、核蛋白、磷脂、植素、一些酶类等)的组分,同时参与碳水化合物和蛋白质的合成,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^[6]. 但磷浓度过大,反而对辣椒生长不利. 在重金属 Cd 污染($10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ Cd}$)下,喷施磷减少了艳椒 425 的果实、叶、根及总干重,可能 Cd 对艳椒 425 的生长有刺激作用,喷施磷后因磷与 Cd 的拮抗,反而对生长和产量不利,也可能是磷与 Cd 的协同效应加重了 Cd 对该品种的毒害作用,导致生物量和产量降低.

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^[21-23]. 在本试验中,发现朝天椒叶面喷施低浓度磷较 CK 处理能降低 SOD、CAT 这 2 种抗氧化物酶的含量(图 2 和图 3). 这正表明喷施磷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. 该结果与低磷浓度下(0.3% P)朝天椒生长量和产量增加是一致的. 相反,喷施磷使艳椒 425 叶 SOD 和 POD 活性增加,且随磷水平增加,艳椒 425 叶 SOD 和 POD 活性呈上升趋势,可能是磷与 Cd 的协同效应加重了植物遭受 Cd 的毒害作用,此时植株体内的 SOD、CAT 活性上升,以适应不良环境. 该结果与喷施磷艳椒 425 生长量和产量下降趋势一致.

Cd 在辣椒果实中主要以 NaCl 提取态存在,平均含量为 $9.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,所占 Cd 总提取量的比例平均为 86.0%,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,在叶面喷施磷后艳椒 425 果实 Cd 总提取态有所下降,尤其以残渣态及乙醇提取态下降明显(表 2). 表明叶面喷施磷能有效降低辣椒果实中 Cd 的含量,其原

因可能是磷与 Cd 形成不溶性的磷酸盐沉淀,影响 Cd 在植物体内各形态和含量的变化,从而降低 Cd 的生物毒害性^[7]. 但本试验也发现喷施磷后,世纪朝天椒中 Cd 提取总量反而增加了,尤其是醋酸盐提取态和残渣态增加最明显,此结果与 Sparrow 等^[24]报道施磷可促进马铃薯对 Cd 的吸收相似,磷与 Cd 表现出明显的协同效应.

供试 2 个辣椒品种 Cd 主要累积于茎和根中,其次是叶,积累最少的是果实(表 3). 此结果与笔者之前报道有所不同^[25],可能是本试验供试土壤 Cd 污染浓度较低所致. 叶面喷施磷使辣椒茎和果实中的 Cd 含量有所降低,喷施 0.3% 磷使叶 Cd 含量降低,说明适量的磷与 Cd 形成的金属磷酸盐在植物体细胞壁与液泡中的沉淀作用降低了金属离子在植物体内的木质部长距离输送^[11],阻隔了 Cd 从叶、茎向果实转移,从而降低了辣椒可食部位 Cd 含量. 在不喷施磷处理(对照)中,果实 Cd 的积累量及植株的 Cd 积累总量以艳椒 425 > 朝天椒,喷施磷后,果实 Cd 的积累量及植株的 Cd 积累总量以朝天椒 > 艳椒 425,且喷施磷使艳椒 425 的 Cd 积累量较对照明显下降,但朝天椒的 Cd 积累量较对照有所上升. 可见,喷施磷对降低艳椒 425 植株 Cd 的吸收富集的效果更为明显.

4 结论

(1)在重金属 Cd 污染($10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ Cd}$)下,叶面喷施适量的磷能缓解 Cd 对世纪朝天椒生长的抑制,增加了植株茎、叶及总干重,但喷施磷反而减少了艳椒 425 的果实、叶、根及总干重.

(2)叶面喷施低量磷增加了 2 个辣椒品种叶 CAT 活性,但高量磷却降低了 CAT 活性,随磷水平增加,艳椒 425 叶 SOD 和 POD 活性呈上升趋势,但世纪朝天椒叶 SOD 和 POD 活性呈下降趋势.

(3)辣椒果实中 Cd 的形态以 $F_{\text{NaCl}} > F_{\text{HAC}} > F_{\text{E}} > F_{\text{r}} > F_{\text{HC}} > F_{\text{W}}$. 喷施磷明显降低了艳椒 425 中 Cd 提取总量,但世纪朝天椒中 Cd 提取总量反而增加,其中以醋酸盐提取态 Cd 和残渣态 Cd 增加较为明显.

(4)辣椒中 Cd 积累量以根 > 茎 > 叶 > 果实. 叶面喷施磷能有效降低艳椒 425 果实和植株对 Cd 的吸收富集,但却增加了朝天椒果实和植株对 Cd 的吸收富集. 磷镉交互的作用在 2 个辣椒品种中表现出拮抗和协同并存. 同时,除了植物品种外,植物部位、磷的供应水平等因素都会影响磷镉交互的作用.

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] 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] Wei S H, Zhou Q X. Phytoremediation of cadmium-contaminated soils by *Rorippa globosa* using two-phase planting [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2006, **13**(3): 151-155.
- [4] 陈怀满. 土壤-植物系统中的重金属污染[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [5] 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.
- [6] Sajwan K S, Paramasivam S, Richardson J P, *et al.* Phosphorus alleviation of cadmium phytotoxicity [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2002, **25**(9): 2027-2034.
- [7] Tu C, Zheng C R, Chert H M. Effect of applying chemical fertilizers on forms of lead and cadmium in red soil [J]. *Chemosphere*, 2000, **41**(1-2): 133-138.
- [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] Sparrow L A, Salardini A A, Bishop A C. Field studies of cadmium in potatoes (*Solanum tuberosum* L.) I. Effects of lime and phosphorus on cv. Russet Burbank [J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1993, **44**(4): 845-853.
- [10] 姜慧敏. 外源磷对镉、锌复合污染土壤修复的机理研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2006.
- [11] 徐小萍. 磷对镉胁迫下蚕豆根尖细胞的影响[D]. 成都: 四川师范大学, 2007.
- [12] Liu H, Probst A, Liao B. Metal contamination of soils and crops affected by the Chenzhou lead/zinc mine spill (Hunan, China) [J]. *Science of the Total Environment*, 2005, **339**(1/3): 153-166.
- [13] 李非离, 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.
- [14] León A M, Palma J M, Corpas F J, *et al.* Antioxidative enzymes in cultivars of pepper plants with different sensitivity to cadmium [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2002, **40**(10): 813-820.
- [15] Antonious G F, Kochhar T S. Mobility of heavy metals from soil into hot pepper fruits: A Field Study [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2009, **82**(1): 59-63.
- [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] Xu W H, Li W Y, Singh B, *et al.* Effects of insoluble Zn, Cd and EDTA on the growth, activities of antioxidant enzymes and uptake of Zn and Cd in *Vetiveria zizanioides* [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(2): 186-192
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Sparrow L A, Salardini A A, Bishop A C. Field studies of cadmium in potatoes (*Solanum tuberosum* L.) I. Effects of lime and phosphorus on cv. Russet Burbank [J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1993, **44**(4): 845-853.
- [25] 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.