

基于聚类分析法筛选低镉累积辣椒品种

刘峰^{1,2}, 弭宝彬^{1,2,*}, 魏瑞敏¹, 邹学校², 周火强^{1,2}, 汪端华^{1,2},
戴雄泽^{1,2,*}

(¹湖南省蔬菜研究所, 长沙 410125; ²湖南省农业科学院, 长沙 410125)

摘要: 为评价重金属镉(Cd)污染地区辣椒种植的安全性, 通过Cd污染土壤盆栽和小区试验研究了71个辣椒品种对Cd累积的差异, 并探讨土壤中Cd含量对辣椒中Cd含量的影响, 以期获得辣椒安全种植的土壤Cd含量值并筛选出低Cd累积辣椒品种资源。结合盆栽试验和小区试验结果, 初步认为在土壤Cd含量低于0.58 mg·kg⁻¹时, 湘辛8号、长研201、长辣7号、星秀朝天椒和博辣9号中Cd含量均低于国家现行标准GB 2762-2012。还考察了湘研15号辣椒不同坐果时期Cd含量的变化, 发现在不同坐果时期对Cd的含量存在明显差异, 因此在辣椒育种过程中应同时考虑辣椒采摘时间对Cd积累的影响。

关键词: 辣椒; 镉; 累积规律

中图分类号: S 641.3

文献标志码: A

文章编号: 0513-353X (2017) 05-0979-08

Screening Out of Cd-pollution-safe Pepper Cultivars by Clustering Analysis

LIU Feng^{1,2}, MI Baobin^{1,2,*}, WEI Ruimin¹, ZOU Xuexiao², ZHOU Huoqiang^{1,2}, WANG Duanhua^{1,2},
and DAI Xiongze^{1,2,*}

(¹Hunan Research Institute of Vegetables, Changsha 410125, China; ²Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410125, China)

Abstract: To assess the security of pepper cultivation in Cd contaminated soil effectively and efficiently, the variation of Cd content in 71 pepper genotype materials and the effect of Cd concentration in Cd contaminated farmland soil on Cd content in peppers were investigated through pot and field experiments in detail in the hope of obtaining a threshold value of Cd concentration in farmland soil when planting peppers and screening out Cd-pollution-safe pepper cultivars. It was found that Xiangxin 8, Changyan 201, Changla 7, Xingxiu Chaotianjiao and Bola 9 were potential to be Cd-pollution-safe pepper cultivars grown in the farmland soil with a Cd concentration lower than 0.58 mg·kg⁻¹, and Cd contents in the 5 pepper cultivars met the requirements of the National Food Safety Standard of China (GB2762-2012). Furthermore, the influence of pepper bearing period on Cd content in Xiangyan 15 was also investigated, founding that the Cd contents in peppers displayed significant variability in different bearing periods; therefore, the effect of bearing period should also be considered in pepper breeding.

Keywords: pepper; cadmium; accumulated rule

收稿日期: 2016-12-15; **修回日期:** 2017-04-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31470105); 湖南省重大科技攻关项目

* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: mibaobin@126.com; xiongzdai@126.com)

镉 (Cd) 是一种具有极高生物毒性的重金属元素, 主要以采矿、电镀、大气沉降及施用劣质磷肥、杀虫剂等方式进入土壤和水体中 (Rosén et al., 2012)。过去 50 年间, 在全球范围内 Cd 的人为排放量已超过 2.2×10^7 kg (He et al., 2014)。Cd 在土壤—植物系统中表现出较强的迁移能力, 且有明显的植物富集作用, 可通过食物链进入人体, 影响人类健康 (黄志亮, 2012)。另外, Cd 污染土壤还会严重影响作物的生长发育, 从而影响作物产量和品质 (Das et al., 1997; Zhang et al., 2014; 张迪 等, 2015)。有研究表明人类摄入的 Cd 约 70% 来自蔬菜 (贾锐鱼 等, 2012)。

目前关于低 Cd 积累辣椒 (*Capsicum annuum* L.) 品种筛选的研究鲜有报道。本研究中以湖南地区代表性的辣椒品种为试验材料, 采用盆栽试验和田间小区试验考察了 71 个辣椒品种对重金属 Cd 的累积差异, 获得辣椒安全种植的土壤 Cd 含量阈值, 期望筛选出低 Cd 辣椒品种资源, 并明确不同坐果时期辣椒中 Cd 含量的变化, 为辣椒吸收 Cd 的品种差异研究提供理论依据, 也为 Cd 污染农田辣椒的安全生产提供科学依据及技术指导。

1 材料与amp;方法

1.1 试验材料

采用 71 个辣椒品种为试验材料, 包括线椒 32 份, 泡椒 12 份, 羊角椒 9 份, 牛角椒 13 份, 螺丝椒 3 份和朝天椒 2 份 (表 1)。

1.2 盆栽试验

盆栽试验用土取自长沙县北山镇矿场附近, 取土深度 1 ~ 20 cm, 并将土样均匀混合, 风干后破碎, 过 2 mm 筛备用。土样为红壤土, pH 5.36, 含有机质 $22.60 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $182.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮 $1.29 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效磷 $143.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全磷 $0.49 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $130.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cd $0.39 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

试验于 2014 年 4 月在湖南省蔬菜研究所连栋塑料大棚内进行。选择圆形塑料盆, 下底径约 35 cm, 高约 40 cm, 上径 40 cm, 底部设有排水孔。采用非金属工具将制备好的土壤装入内盆, 虚土厚度约 35 cm。

2014 年 6 月中旬每个品种挑选生长状况相近的 3 盆, 每盆选择同一成熟度 (开花后 30 d) 的门椒和对椒 3 ~ 5 个, 对其 Cd 含量进行检测。

另外, 选取湘研 15 号辣椒研究开花后 5 ~ 60 d 不同坐果时期 Cd 含量的变化情况。

1.3 小区试验

小区试验用土取自湖南省蔬菜研究所高桥试验基地耕种层, 红壤土, pH 4.39, 有机质 $24.20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $131.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮 $1.320 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效磷 $34.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全磷 $0.56 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $150.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cd 未检出。取一定量供试土壤放入小区试验用水泥栽培池内, 根据风干土壤用量人工添加氯化镉溶液模拟不同程度 Cd 污染土壤。

据国内蔬菜用地 Cd 污染情况田间调查 (Wang et al., 2001) 和现有文献报道 (Wang et al., 2014), 中国蔬菜用地分为 Cd 轻度污染 ($0.30 \sim 0.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、中度污染 ($0.60 \sim 1.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和重度污染 ($> 1.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。本试验据此设置 3 个污染水平, 灌水保持土壤完全在水中平衡 4 个月应用于小区试验, 平衡过程中栽培池上加盖防水油布, 风干土壤中最终总 Cd 含量分别为 0.58、1.04 和 $2.47 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

利用盆栽试验结果, 对 71 个辣椒品种进行聚类分析, 然后根据聚类分析结果并结合不同品系辣椒全覆盖的原则选取 13 个品种用于小区试验, 种植于水泥沟渠栽培池。小区试验于 2015 年 4 月在湖南省蔬菜研究所高桥试验基地连栋大棚进行。每个栽培池长 28 m, 宽 1 m, 高 0.4 m, 控制土厚 30 cm 左右, 水泥沟渠两边各有约 10 cm 的突出。每个 Cd 水平处理每个品种种植 3 个小区, 每个小区种植 30 株, 株距约为 40 cm, 行距约为 45 cm, 完全随机重复, 采用膜下滴灌, 正常栽培管理。

1.4 Cd 含量测试方法

辣椒果实中 Cd 含量的检测参照 GB/T 5009.15-2014 石墨炉原子吸收光谱测定法进行检测, 将检测样品清洗干净后打成匀浆, 消化后, 在原子吸收分光光度计 228.8 nm 波长处进行检测。土壤中 Cd 含量的测定委托湖南省农业科学院农化检测中心进行。

采用 DPS 数据处理软件对试验结果进行统计聚类分析。

2 结果与分析

2.1 不同辣椒品种 Cd 含量分析

在低 Cd 含量盆栽土壤条件下, 同一辣椒类型中不同品种对 Cd 的累积差异较为明显 (表 1)。对线椒类型而言, 最高 Cd 含量值为最低 Cd 含量值的近 3 倍, 最高含量为 $61.22 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (博辣 2 号), Cd 含量最少的为博辣 9 号, Cd 含量为 $21.18 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 15.63% 的线椒品种果实 Cd 含量超过国家现行标准 GB 2762-2012 ($< 50 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。牛角椒、泡椒、羊角椒、朝天椒、螺丝椒等类型中, 不同品种之间也表现出较大差异; 71 份供试辣椒品种中果实 Cd 含量超标率为 18.31%, 其中 Cd 含量最高的为湘研 812, 达到 $63.04 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 最低的为博辣 9 号。不同辣椒类型之间 Cd 含量没有显著差异。

根据果实 Cd 含量聚类分析结果 (图 1), 在 0.06 分类距离上可将 71 个辣椒品种分为 4 类。第 I 类: 低累积 (Cd 含量 $< 30 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 共 15 个品种; 第 II 类: 较低累积 (Cd 含量 $30 \sim 50 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 共 46 个品种; 第 III 类: 较高累积 (Cd 含量 $51 \sim 60 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 共 6 个品种; 第 IV 类: 高累积 (Cd 含量 $> 60 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 共 4 个品种。

结合不同品系辣椒全覆盖原则, 从 4 类品种群中选出 13 个品种用于小区试验。其中 Cd 低累积类群型中选取湘辛 8 号 (X24)、长研 201 (Y9)、长辣 7 号 (X30)、星秀朝天椒 (C2) 和博辣 9 号 (X32) 共 5 个品种, Cd 平均含量为 $25.77 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; Cd 较低累积类型中选取湘研 15 号 (N4)、福湘丽王 (P7)、兴蔬皱皮辣 (L2) 和博辣 8 号 (X20) 4 个品种, 其 Cd 平均含量为 $40.98 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 上述两个品种群 Cd 含量均低于国家现行标准 GB 2762-2012 规定的 $50 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的安全标准; 较高累积类型中选取兴蔬 201 (Y2) 和兴蔬羽燕 (N2) 2 个品种, 其 Cd 含量均值为 $55.03 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 高累积类型中选取兴蔬 19 (Y1) 和博辣 2 号 (X1) 2 个品种, 均值为 $62.05 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均超出 $50 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的标准限值。

表 1 不同辣椒品种在轻度 Cd 污染 (0.39 mg · kg⁻¹) 土壤盆栽试验中果实的 Cd 含量
Table 1 The Cd contents of different pepper cultivars planted in Cd-contaminated soil with a 0.39 mg · kg⁻¹
Cd concentration through pot experiments

类型	编号	品名	Cd/ ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	类型	编号	品名	Cd/ ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
Type	No.	Cultivar name	($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Type	No.	Cultivar name	($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
线椒 Line pepper	X1	博辣 2 号 Bola 2	61.22 ± 1.95	羊角椒	Y1	兴蔬 19 号 Xingshu 19	62.87 ± 2.77
	X2	博辣 4 号 Bola 4	61.22 ± 2.26	Cavel	Y2	兴蔬 201 Xingshu 201	55.92 ± 2.46
	X3	湘辣 2 号 Xiangla 2	57.05 ± 3.66	pepper	Y3	湘研娇龙 Xiangyan Jiaolong	47.19 ± 1.9
	X4	博辣红艳 Bola Hongyan	55.59 ± 2.16	Y4	博辣 1 号 Bola 1	46.33 ± 2.15	
	X5	博辣红帅 Bola Hongshuai	50.52 ± 1.68	Y5	博辣红星 Bola Hongxing	45.19 ± 2.13	
	X6	博辣娇红 Bola Jiaohong	46.82 ± 1.16	Y6	辛香 2 号 Xinxiang 2	40.35 ± 2.03	
	X7	博辣瑞美 Bola Ruimei	46.33 ± 2.05	Y7	胜世皇冠 Shengshi Huangguan	33.56 ± 1.91	
	X8	博辣红牛 Bola Hongniu	45.81 ± 2.19	Y8	湘研 158 Xianyan 158	32.08 ± 3.01	
	X9	湘辣 1 号 Xiangla 1	45.35 ± 1.96	Y9	长研 201 Changyan 201	28.64 ± 1.85	
	X10	兴蔬 6 号 Xingshu 6	44.66 ± 0.99	牛角椒	N1	珍玉 Zhenyu	57.21 ± 3.46
	X11	博辣 6 号 Bola 6	44.66 ± 2.28	Cattle horn	N2	兴蔬羽燕 Xingshu Yuyan	54.13 ± 2.36
	X12	博辣玲珑 Bola Zhenlong	42.91 ± 2.07	pepper	N3	兴蔬 215 Xingshu 215	50.72 ± 2.28
	X13	博辣红秀 Bola Hongxiu	41.93 ± 3.05	N4	湘研 15 号 Xiangyan 15	48.77 ± 2.47	
	X14	兴蔬 301 Xingshu 301	40.94 ± 1.88	N5	丰抗 21 Fengkang 21	48.12 ± 1.63	
	X15	湘妃 Xiangfei	40.38 ± 2.88	N6	湘研青翠 Xianyan Qingcui	43.89 ± 1.99	
	X16	博辣皇妃 Bola Huangfei	40.14 ± 1.19	N7	湘研 5 号 Xiangyan 5	38.87 ± 3.10	
	X17	博辣红玉 Bola Hongyu	39.96 ± 2.10	N8	湘研 1 号 Xiangyan 1	37.22 ± 1.96	
	X18	湘辣 4 号 Xiangla 4	38.51 ± 2.38	N9	兴蔬 16 号 Xingshu 16	37.19 ± 0.89	
	X19	博辣红秀 Bola Hongxiu	35.16 ± 1.93	N10	湘辣 166 Xiangla 166	30.61 ± 1.77	
	X20	博辣 8 号 Bola 8	35.10 ± 0.96	N11	兴蔬嫩辣 Xingshu Nenla	29.89 ± 2.46	
	X21	长辣 4 号 Changla 4	32.86 ± 2.80	N12	长研 968 Changyan 968	29.63 ± 1.56	
	X22	长辣 5 号 Changla 5	32.06 ± 0.68	N13	湘研珍丽 Xiangyan Zhenli	28.14 ± 2.50	
	X23	博辣 5 号 Bola 5	31.11 ± 1.51	螺丝椒	L1	旋美 Xuanmei	48.70 ± 2.70
	X24	湘辛 8 号 Xiangxin 8	30.64 ± 1.78	Screw	L2	兴蔬皱皮椒 Xingshu Zhoupila	38.45 ± 1.98
	X25	湘辣 16 号 Xiangla 16	29.14 ± 1.57	pepper	L3	七字螺 Qiziluo	23.18 ± 1.82
	X26	旋妃 Xuanfei	27.65 ± 1.64	朝天椒	C1	长星 5 号 Changxing 5	35.06 ± 1.93
	X27	湘辣 7 号 Xianla 7	26.16 ± 1.39	Pod pepper	C2	星秀 Xingxiu	22.19 ± 1.02
	X28	湘辣 17 号 Xiangla 17	26.09 ± 1.43				
	X29	湘辣 10 号 Xiangla 10	25.24 ± 1.29				
	X30	长辣 7 号 Changla 7	24.17 ± 1.82				
	X31	兴蔬绿燕 Xingshu Lüyan	22.16 ± 1.60				
	X32	博辣 9 号 Bola 9	21.18 ± 1.80				
泡椒	P1	湘研 812 Xiangyan 812	63.04 ± 2.79				
Pickled pepper	P2	湘研 802 Xiangyan 802	56.24 ± 2.65				
	P3	福相佳玉 Fuxiang Jiayu	50.07 ± 2.26				
	P4	长星 4 号 Changxing 4	47.80 ± 2.46				
	P5	湘研美玉 Xiangyan Meiyu	44.21 ± 2.10				
	P6	大果 99 Daguo 99	42.91 ± 1.97				
	P7	福湘丽王 Fuxiang Liwang	41.60 ± 2.04				
	P8	福湘探春 Fuxiang Tanchun	39.92 ± 1.86				
	P9	福湘碧秀 Fuxiang Bixiu	35.02 ± 1.80				
	P10	福湘 5 号 Fuxiang 5	34.89 ± 1.63				
	P11	福湘锦绣 Fuxiang Jinxiu	33.50 ± 0.22				
	P12	福湘秀丽 Fuxiang Xiuli	33.34 ± 0.91				

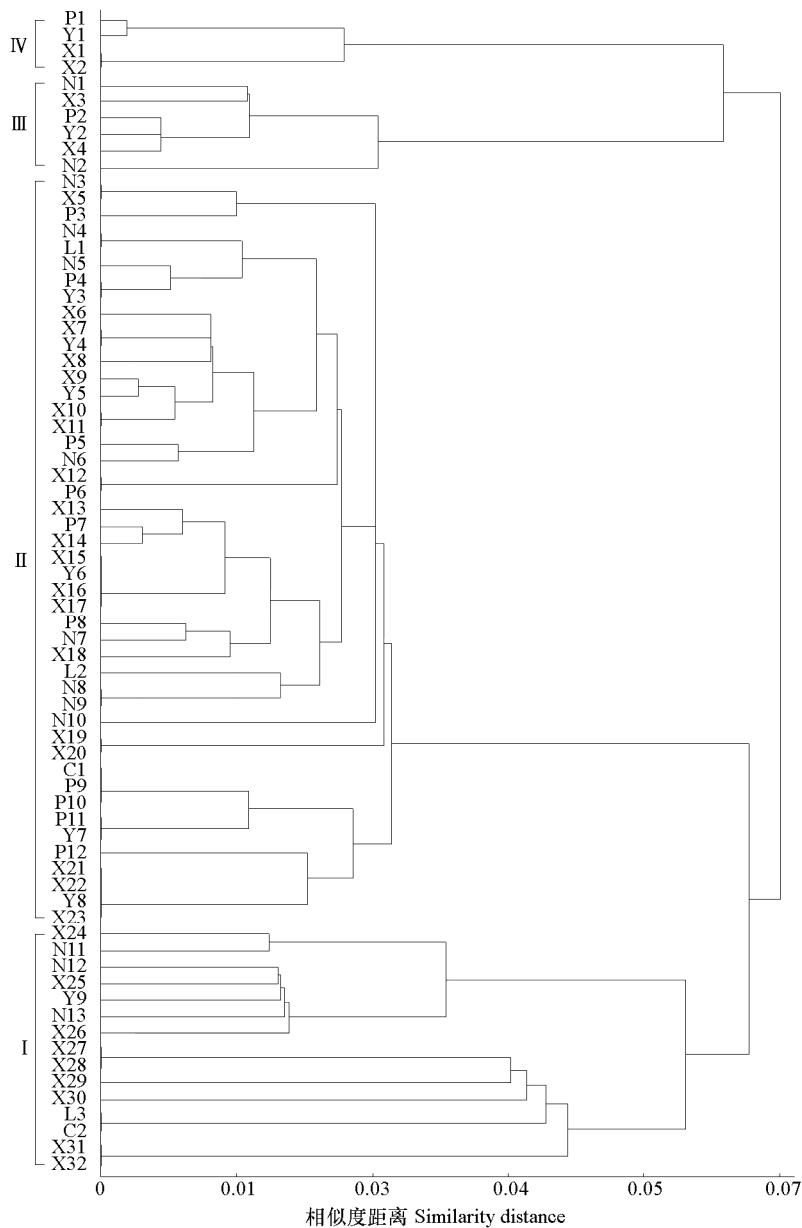


图 1 不同辣椒品种 Cd 含量聚类分析

土壤 Cd 含量 $0.39 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。编号的品种名见表 1。

Fig. 1 The clustering analysis results of different pepper cultivars based on Cd contents in peppers

Cd content in soil was $0.39 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Corresponding cultivar names of No. are shown in Table 1.

小区试验中, 在 $0.58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的低 Cd 污染下, 13 个辣椒品种的 Cd 含量均在 $50 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的安全范围内 (图 2); 当土壤 Cd 增加到 $1.04 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 辣椒中 Cd 含量明显增加, 其 Cd 含量均超过安全浓度值, L2 (兴蔬皱皮椒) 达到 $107.77 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 超过安全标准 2 倍以上; 当土壤 Cd 继续增加至 $2.47 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 辣椒果实 Cd 含量均超过了 $100 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 含量最高的为 N4 (湘研 15 号), Cd 含量达到 $229.27 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 含量最低的为 N2 (兴蔬羽燕), Cd 含量为 $135.83 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

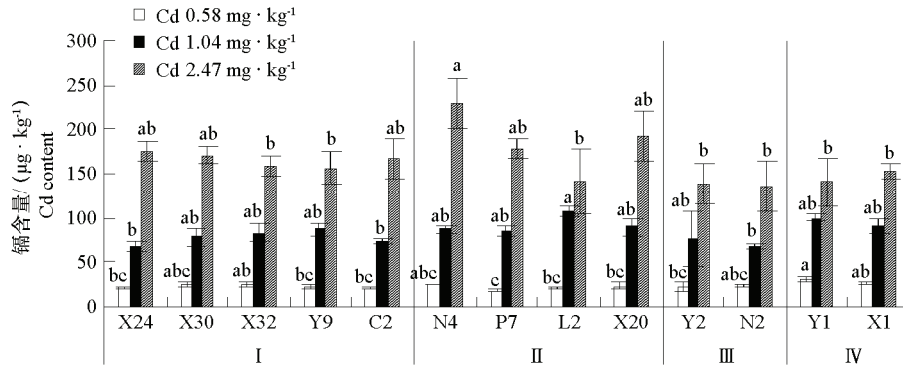


图2 不同辣椒品种在不同程度 Cd 污染 (Cd 0.58、1.04 和 2.47 mg·kg⁻¹) 土壤中果实 Cd 累积情况
 Fig. 2 Cd contents of pepper cultivars in farmland soils containing different Cd concentrations

总体来看, 在低 Cd 污染的盆栽试验中表现低 (第 I 类)、较高 (第 III 类) 和高 (第 IV 类) 积累 Cd 的品种, 在土壤 Cd 增加的小区试验中果实 Cd 含量差异不显著, 而在盆栽试验中较低 (第 II 类) 积累 Cd 的品种在小区试验中 Cd 含量显著增加。

2.2 不同坐果时期辣椒果实中的镉含量

辣椒在不同坐果时期对 Cd 的吸收积累表现为随坐果时间的延长, Cd 含量呈逐步递增, 在开花后 30 d 左右辣椒达到商品成熟后 Cd 含量增加趋势逐步趋于平缓 (图 3)。

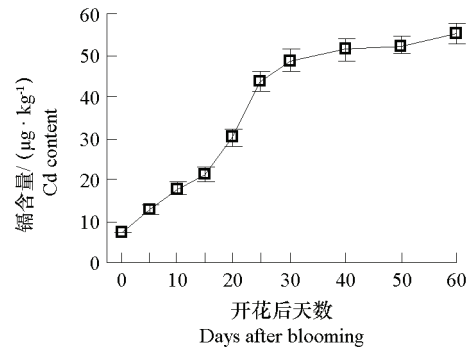


图3 不同坐果时期辣椒中 Cd 含量
 Fig. 3 Cd contents of peppers at different bearing periods

3 讨论

为了达到安全利用重金属污染耕地的同时保证农产品质量安全的目的, 筛选低 Cd 积累品种成为了近年来农业生产的重要方向 (Liu et al., 2008)。多项研究表明, 同种作物不同品种在重金属积累量上存在明显差异 (Wu & Zhang, 2002; Alexander et al., 2006; Han et al., 2014), 因此, 筛选出适于重金属污染土壤中种植的低重金属积累品种是可行的。

在低 Cd 含量土壤条件下 (0.58 mg·kg⁻¹), 小区试验选用的品种群 Cd 含量变化趋势与盆栽试验聚类分析结果类似, 但 Cd 含量数值差异较大, 小区试验 Cd 含量普遍低于盆栽试验时的 Cd 含量, 但均在安全值以下。这与贾彦博等 (2009) 的研究结果一致。这可能与辣椒在盆栽环境下果实生长速度慢, 易于老化有一定关系。另外, 不同辣椒品种在低 Cd 背景值下对 Cd 含量的差异不明显, 可能与适宜的生长环境下辣椒果实发育迅速, 不同类型辣椒达到商品果所需时间差异不明显有关。小区试验中, 随着土壤中 Cd 含量的增加, 辣椒 Cd 含量逐渐增加, 其中盆栽试验聚类分析结果中 Cd 含量较低的品种普遍表现出较高的 Cd 含量, 这与聚类分析分类结果出现了一定的偏差。陈飞 (2009) 的研究发现, 植物对重金属 Cd 的吸收和积累与植物的品种特性有很大的关系 (Florijn et al., 1992;

Florijn & Beusichem, 1993)。张玲等(2002)对不同浓度 Cd 处理下小麦根系的生理生态变化进行研究,发现 Cd 浓度对小麦根系的长度、生物量、体积的影响存在一定的剂量效应,随着 Cd 处理浓度的提高,各指标先上升后下降。还有许多研究也得出了类似结果(Duan et al., 1992; 于方明 等, 2008; 何俊瑜 等, 2011)。本研究中的上述现象可能与这个剂量作用有关系。

综合盆栽试验和小区试验结果,初步将湘辛 8 号、长研 201、长辣 7 号、星秀朝天椒和博辣 9 号作为辣椒 Cd 低累积品种资源,其安全种植的土壤 Cd 含量 $< 0.58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

重金属低累积农作物品种的筛选已经成为粮食安全生产的一种重要手段,但是到目前为止,有关低累积作物品种的筛选标准还没有统一明确的规定。有研究者强调筛选过程必须经过盆栽试验和野外污染土壤试验,并使其可食用部分的重金属含量低于地下部的 1/100(聂发辉, 2005)。还有学者认为只要在保证农作物产量的情况下使作物可食用部分的重金属含量符合国家标准即可(郭晓方等, 2010)。本研究中发现辣椒果实中 Cd 含量随果实发育时间增加而增高,表明作物对重金属的积累存在着明显的时间差异,因此认为在 Cd 低积累辣椒筛选过程中,明确不同坐果时期的吸收规律具有重要意义。在以后的筛选中,应注重选择果实发育速度快,成品期短,产量高的辣椒品种,以期实现辣椒的安全生产。

References

- Alexander P D, Alloway B J, Dourado A M. 2006. Genotypic variations in the accumulation of Cd, Cu, Pb and Zn exhibited by six commonly grown vegetables. *Environmental Pollution*, 144 (3): 736 - 745.
- Chen Fei. 2009. Physiological and molecular mechanism of cadmium uptake and translocation in barely [Ph. D. Dissertation]. Zhejiang: Zhejiang University. (in Chinese)
- 陈 飞. 2009. 大麦镉吸收与运转机制的研究 [博士论文]. 杭州: 浙江大学.
- Das P, Samantaray S, Rout G R. 1997. Studies on cadmium toxicity in plants: a review. *Environmental Pollution*, 98 (1): 29 - 36.
- Duan C A, Wang H, Qu Z. 1992. Studies on the effects of heavy metals on the contents of nucleic acids and activities of Nu-cleases in the root tips of *Vicia faba*. *Environmental Science*, 5: 1 - 7.
- Florijn P J, Beusichem M L V. 1993. Uptake and distribution of cadmium in maize inbred lines. *Plant & Soil*, 150 (1): 25 - 32.
- Florijn P J, Nelemans J A, Beusichem M L V. 1992. The influence of the form of nitrogen nutrition on uptake and distribution of cadmium in lettuce varieties. *Journal of Plant Nutrition*, 15: 2405 - 2416.
- Guo Xiao-fang, Wei Ze-bin, Qiu Jin-rong, Wu Qi-tang, Zhou Jian-li. 2010. Differences between corn cultivars in accumulation and translocation of heavy metals. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 26 (4): 367 - 371. (in Chinese)
- 郭晓方, 卫泽斌, 丘锦荣, 吴启堂, 周建利. 2010. 玉米对重金属累积与转运的品种间差异. *生态与农村环境学报*, 26 (4): 367 - 371.
- Han L N, Xu J, Zhang C, Song Z, Wang J, Liu Z Q. 2014. Genotypic variation of Cd^{2+} flux and its relationship with Cd accumulation in rice plant. *Journal of Agro-Environment Science*, 33 (1): 37 - 42.
- He Jun-yu, Ren Yan-fang, Wang Yang-yang, Li Zhao-jun. 2011. Root morphological and physiological responses of rice seedling with different tolerance to cadmium stress. *Acta Ecologica Sinica*, 31 (2): 522 - 528. (in Chinese)
- 何俊瑜, 任艳芳, 王阳阳, 李兆君. 2011. 不同耐性水稻幼苗根系对镉胁迫的形态及生理响应. *生态学报*, 31 (2): 522 - 528.
- He S, Wu Q, He Z. 2014. Synergetic effects of DA-6/GA₃ with EDTA on plant growth, extraction and detoxification of Cd by *Lolium perenne*. *Chemosphere*, 117: 132 - 138.
- Huang Zhi-liang. 2012. Screening of low Cd-accumulation vegetable cultivars and research on it's properties of Cd-accumulation and physiology [M. D. Dissertation]. Wuhan: Huazhong Agricultural University. (in Chinese)
- 黄志亮. 2012. Cd 低积累蔬菜品种筛选及其 Cd 积累与生理生化特性研究 [硕士论文]. 武汉: 华中农业大学.

- Jia Rui-yu, Lin You-hong, Chen Yi-guo, Fan Xiao-lei. 2012. Analysis of heavy-metal contamination of vegetables in vegetable plot of Xi'an suburb. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 32 (4): 485 - 489. (in Chinese)
贾锐鱼, 林友红, 陈一国, 范晓蕾. 2012. 西安市近郊菜园蔬菜重金属现状调查及评价. *西安科技大学学报*, 32 (4): 485 - 489.
- Jia Yan-bo, Mao Hong-qian, Ni Wei-hong, Zhu Shun-da, Huang Ling-yun. 2009. The effect on cadmium uptake and accumulation of vegetable under cadmium pollution. *Guangdong Trace Element Science*, 16 (1): 25 - 30. (in Chinese)
贾彦博, 毛红茜, 倪伟红, 朱顺达, 黄凌云. 2009. 镉污染对蔬菜镉吸收和积累的影响. *广东微量元素科学*, 16 (1): 25 - 30.
- Liu Chuan-ping, Li Fang-bai, Luo Chun-ling, Liu Xin-ming, Wang Shi-hua, Liu Tong-xu, Li Xiang-dong. 2008. Foliar application of two silica sols reduced cadmium accumulation in rice grains. *Journal of Hazardous Materials*, 161 (2 - 3): 1466 - 1472.
- Nie Fa-hui. 2005. New comprehensions of hyper accumulator. *Ecology and Environmental Sciences*, 14 (1): 136 - 138. (in Chinese)
聂发辉. 2005. 关于超富集植物的新理解. *生态环境学报*, 14 (1): 136 - 138.
- Rosén K, Eriksson J, Vinichuk M. 2012. Uptake and translocation of ¹⁰⁹Cd and stable Cd within tobacco plants (*Nicotiana sylvestris*). *Journal of Environmental Radioactivity*, 113: 16 - 20.
- Wang Q, Dong Y, Cui Y, Liu X. 2001. Instances of soil and crop heavy metal contamination in China. *Soil & Sediment Contamination An International Journal*, 10 (5): 497 - 510.
- Wang L, Xu Y, Sun Y, Liang X, Lin D. 2014. Identification of pakchoi cultivars with low cadmium accumulation and soil factors that affect their cadmium uptake and translocation. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 8 (6): 877 - 887.
- Wu F B, Zhang G P. 2002. Genotypic differences in effect of Cd on growth and mineral concentrations in barley seedlings. *Bulletin of Environmental Contamination & Toxicology*, 69: 219 - 227.
- Yu Fang-ming, Qiu Rong-liang, Tang Ye-tao, Ying Rong-rong, Zhou Xiao-yong, Zhao Xuan, Hu Peng-jie, Zeng Xiao-wen. 2008. Effects of cadmium on the growth and nitrogen metabolism in *Brassica chinensis*. *Environmental Science*, 29 (2): 506 - 511. (in Chinese)
于方明, 仇荣亮, 汤叶涛, 应蓉蓉, 周小勇, 赵璇, 胡鹏杰, 曾晓雯. 2008. Cd对小白菜生长及氮素代谢的影响研究. *环境科学*, 29 (2): 506 - 511.
- Zhang B, Shang S, Jabeen Z, Zhang G. 2014. Involvement of ethylene in alleviation of Cd toxicity by NaCl in tobacco plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 101: 64 - 69.
- Zhang Di, Hu Xue-yu, Yin Jun, Zhang Yang-yang, Chen Wei. 2015. Cadmium accumulation and vegetable quality of edible parts of stem vegetables growing in suburban farmlands. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 21 (2): 188 - 194. (in Chinese)
张迪, 胡学玉, 殷俊, 张阳阳, 陈威. 2015. 城郊农业生态系统中茎菜类蔬菜对重金属Cd的累积特征及品质表现. *应用与环境生物学报*, 21 (2): 188 - 194.
- Zhang Ling, Li Jun-mei, Wang Huang-xiao. 2002. Physiological and ecological responses of wheat (*Triticum aestivum* L.) root to cadmium stress. *Chinese Journal of Soil Science*, 33 (1): 61 - 65. (in Chinese)
张玲, 李俊梅, 王焕校. 2002. 镉胁迫下小麦根系的生理生态变化. *土壤通报*, 33 (1): 61 - 65.