

# 根际土-辣椒系统中重金属的分布 及食品安全风险评价

王大州<sup>1,2</sup>, 林 剑<sup>1,\*</sup>, 王大霞<sup>3</sup>, 余晓真<sup>4</sup>, 白建军<sup>4</sup>, 戴 凯<sup>4</sup>

(1. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 贵州省分析测试研究院, 贵阳 550002; 4. 贵州师范大学, 贵阳 550001)

**摘 要:**采集整株辣椒及其根际土壤,并将植株分为根、茎和果实三部分,分别测定铬、砷、镉、汞和铅的含量。探讨了五种重金属元素在根际土-辣椒系统中的分布规律,并评估了人群食用辣椒导致五种重金属元素暴露的健康风险。结果显示,辣椒果实中 Cr、As、Cd、Hg 和 Pb 五种重金属含量(干重)分别为 0.30~9.93、0.01~0.03、0.01~0.13、0.01~0.09 和 0.01~0.58 mg/kg;在根际土与辣椒果实间,重金属的累计富集系数为 Cd>Hg>Cr>Pb>As,Cd 和 Hg 表现出较强的富集能力。虽然辣椒果实中各重金属的含量平均值均低于《农产品安全质量:无公害蔬菜安全要求》(GB 18406.1-2001)限值要求,但贵州居民通过食用辣椒途径摄入重金属 Cr 和 As 占其临时性每周人体可耐受摄入量比例相对较高,食用辣椒摄入 Cr 和 As 造成的食品安全风险应引起关注。

**关键词:**根际土;辣椒;重金属;健康风险

中图分类号:S511 文献标识码:A 文章编号:1672-9250(2014)04-0546-04

重金属是环境中的持久性污染物,通过积累、迁移和转化影响农田土壤的良性物质循环,土壤的重金属污染会造成食物链重金属污染,从而危及人体健康<sup>[1]</sup>。近年来我国对蔬菜中的重金属污染报道较多<sup>[2-5]</sup>,蔬菜中重金属的富集及其对人体健康危害已引起广泛关注<sup>[6-8]</sup>。其中,铬、砷、镉、汞和铅对人体健康危害最为突出<sup>[9]</sup>。辣椒(*Capsicum annuum* L.)营养价值高,富含辣椒素、辣椒红素、β-胡萝卜素、大量的维生素 C 等多种营养成分<sup>[10]</sup>,作为鲜菜、调味蔬菜和药用植物被广泛应用。目前针对重金属在辣椒中的富集与迁移特征研究较多<sup>[11-13]</sup>,但对人群因食用辣椒摄入重金属造成的健康风险研究较少。我国辣椒生产居世界首位,主要分布在湖南、四川、贵州等省。在贵州,年人均消费干辣椒量达 2.5 kg 以上<sup>[14]</sup>,但人群食用辣椒的重金属暴露剂量及其健康风险缺乏认识。本文以贵州省典型辣椒种植基地辣椒为研究对象,研究辣椒中重金属铬、砷、镉、汞和铅富集特征及其膳食暴露风险,为西南地区辣椒种植和食用安全管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

贵州省遵义县是“全国无公害农产品示范基地县”,是贵州省重要的辣椒生产基地。该地区属丘陵和山地过渡地带,总体地势北高南低,山脉呈垄岗状,与槽谷相间平行排列,山地和高原占优势,丘陵、盆地和河谷坝地比重较小。区内受亚热带季风影响,气候温和湿润,冬无严寒、夏无酷暑,雨量充沛,平均年均气温 15.3 °C,无霜期长达 285 d 左右,年平均降雨量 1116.2 mm,雨热同季。主要土壤类型为黄壤、黄棕壤、红黄壤、石灰土、水稻土等土类,均适宜辣椒栽培。

本研究中采集的土壤和辣椒样品来自该县的辣椒生产基地,网格布点法采样,采集整株辣椒及其根系土壤各 30 份,辣椒品种为真椒 1 号,株高约 55 cm,植株开展度 40 cm,辣椒果实为长牛角形。

### 1.2 样品的前处理与测定

对于根际土壤样品,首先经自然风干后,用木棒

收稿日期:2013-11-15;改回日期:2013-12-03

基金项目:贵州省农业攻关项目(黔科合 NY 字[2011]3026 号)

第一作者简介:王大州(1984-),男(土家族),硕士研究生,主要从事环境科学研究。E-mail: wangdazhou@mail.gyig.ac.cn.

\* 通讯作者:林剑,男,学士,研究员。E-mail: linjian@vip.gyig.ac.cn.

压碎,剔除土壤中的植物根系物、砾石及其它杂物,过 2 mm 孔径筛,用 4 分法缩分土壤样品至大约 100 g,用玛瑙研钵研磨至全部过 0.1 mm 孔径筛,密封保存备用。辣椒植株先用水冲洗去除泥沙,再用去离子水冲洗 3 遍。辣椒植株按根、茎、辣椒果实(含辣椒籽)分切,并分别用纸袋包装,于 70 °C 烘箱中烘干至恒质量后,粉碎并全部过 0.6 mm 孔径筛,密封保存备用。

### 1.3 测试方法

根际土壤和植物中重金属元素分析方法:准确称取 100 mg 制备好的样品,加入 5 mL 硝酸(优级纯),加盖后在沸腾的水浴中加热振荡 3 h,移至 50 mL 容量瓶定容至刻线保存备用。As、Hg 采用原子荧光法(AFS-230E,北京海光仪器公司)测定,Cd、Pb、Cr 采用石墨炉-原子吸收光谱仪(AAS Vario 6, Analytik Jena AG)测定。

分析测试过程中,土壤样中 Cd 以国标 GSS-5 作为标准参考物质,As、Pb、Cr 以国标 GSS-2 作为标准参考物质,Hg 以国标 GSS-3 作为标准参考物质,植物样中重金属以国标 GBW07602、GBW07603(灌木枝叶)作为参考物质进行质量控制。每批样品中随机抽取 10%~15% 样品用作内检,每批检测样品中,标准样品检测结果相对标准偏差 RSD 均小于 10%,内检样品合格率大于 90%。

## 2 结果与讨论

### 2.1 根际土-辣椒系统中重金属含量特征

对土壤样、辣椒植株各部分中重金属元素的测定结果见表 1。

由表 1 可知:

(1)研究区根际土中 Cr、As、Cd、Hg 和 Pb 五种

重金属含量均达到了《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995)(pH<6.5)中的二级标准值,满足无公害食品的土壤环境质量要求。

(2)辣椒植株各部分中 Cr、As、Cd、Hg 和 Pb 等 5 种重金属元素平均含量趋势为根系>茎>果实。由于《农产品安全质量 无公害蔬菜安全要求》(GB 18406.1-2001)中重金属的限量值是以果实鲜重表示的,新鲜辣椒按平均含水率按 80% 计,则换算为干辣椒中 Cr、As、Cd、Hg 和 Pb 重金属元素限量值分别为 2.5、2.5、0.25、0.05 和 1 mg/kg。结果显示,虽然辣椒果实中各重金属的含量平均值均低于限量值,但个别样品中 Cr 和 Hg 的含量(干重)有超标现象,超标率分别为 33.3% 和 23.3%。

### 2.2 根际土-辣椒系统中重金属的迁移特征

不同重金属元素在根际土-辣椒系统中迁移特性不同,分别用富集系数 BCF、TF1、TF2 来表示重金属在根际土-辣椒系统中的迁移性能。BCF 为辣椒根系中重金属含量/根际土壤中重金属含量,值越大,说明重金属从根际土中进入辣椒根系中的迁移能力越强;TF1 为辣椒茎中重金属含量/辣椒根系中重金属含量,表示重金属在根-茎之间的迁移能力;TF2 为辣椒果实中重金属含量/辣椒茎中重金属含量,表示重金属在茎-果实之间的迁移能力。用累计富集系数 B(B=BCF×TF1×TF2),即辣椒果实中重金属含量/土壤中重金属含量,表示辣椒果实中重金属相对于土壤的富集系数。各重金属在根际土-辣椒系统中的迁移情况见图 1。

由图 1 可见,辣椒根部对重金属的富集能力是 Cd>As>Cr>Pb>Hg。结果显示,Cd 的富集能力最强,其 BCF 值介于 0.03~4.83 之间;在辣椒根部和茎之间,其重金属的迁移能力是 Cd>Hg>As

表 1 辣椒根际土、植株中重金属含量

Table 1 Heavy metal contents in the rhizospheric soils and plants

mg/kg

样品类型		测试项目				
		Cr	As	Cd	Hg	Pb
根际土(n=30)	均值±标准差	69.7±27.6	6.2±1.8	0.2±0.1	0.2±0.1	16.9±5.1
	范围	31.6~123	0.63~10.6	0.04~0.3	0.04~0.3	1.9~22.9
根(n=30)	均值±标准差	15.3±8.5	3.5±2.5	0.2±0.2	0.05±0.03	4.2±1.9
	范围	5.1~41.1	0.9~10.8	0.04~0.8	0.02~0.1	1.8~8.7
茎(n=30)	均值±标准差	1.5±0.2	0.2±0.1	0.2±0.1	0.02±0.004	0.6±0.2
	范围	1.1~2	0.02~0.5	0.07~0.5	0.01~0.03	0.1~1.1
果实(n=30)	均值±标准差	1.5±1.1	0.009±0.006	0.05±0.04	0.04±0.02	0.01±0.02
	范围	0.3~3.9	0.01~0.02	0.01~0.1	0.01~0.09	0.001~0.1
《土壤环境质量标准》二级(pH<6.5)		150	40	0.3	0.3	250
无公害蔬菜限值 <sup>[15]</sup> (干重计*)		2.5	2.5	0.25	0.05	1

\* 本蔬菜样品含水率按 80% 计。

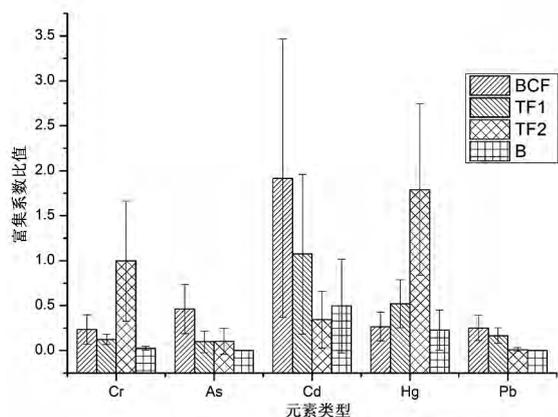


图1 重金属在根际土-辣椒系统中的迁移情况

Fig. 1 Translocation of heavy metals in the rhizospheric soil-capsicum system

$>Pb > Cr$ , 迁移能力最强的是 Cd, 其 TF1 值为  $0.15 \sim 2.51$ ; 在辣椒茎与果实之间, 其重金属的迁移能力是  $Hg > Cr > Cd > As > Pb$ , 迁移能力最强的是 Hg, 其 TF2 值为  $0.44 \sim 3.40$ ; 在根际土与辣椒果实间, 重金属的累计富集系数 B 为  $Cd > Hg > Cr > Pb > As$ , 与冯恭衍等<sup>[7]</sup>的报道的结果基本一致。其值分别为  $0.02 \sim 2.01$ ,  $0.04 \sim 1.02$ ,  $0.003 \sim 0.06$ ,  $0.000045 \sim 0.0034$ ,  $0.00004 \sim 0.0026$ , 即辣椒果实对 Cd 的吸收较其他重金属高。

### 2.3 食用辣椒的重金属暴露健康风险评估

世界卫生组织 (WHO) 建议的总铬参考摄入量分别为每人  $200 \sim 500 \mu\text{g}/\text{d}$ <sup>[16]</sup>, 从健康角度出发, 本文以最小值  $200 \mu\text{g}/\text{d}$  作为参照; 专门针对敏感人群的临时性每周人体可耐受摄入量 (Provisional Tolerable weekly Intake, PTWI), 砷每日摄入量为  $0.05 \mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw})$ , PTWI 为  $0.35 \mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw})$ ; 镉的 PTWI 为  $6.7 \sim 8.3 \mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw})$ ; 总汞的 PTWI 为  $5 \mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw})$ <sup>[17]</sup>; 铅的 PTWI 为  $25 \mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw})$ 。

在贵州, 年人均干辣椒消费量为  $2.5 \text{ kg}$  以上<sup>[14]</sup>, 每人每周消费干辣椒约为  $47.9 \text{ g}$ 。则每人每周摄入重金属的量可按公式:  $PWI = C \times IR / bw$  计算, 其中: PWI 为每周重金属摄入量 ( $\mu\text{g}$ ); C 为辣椒果实中重金属的含量 ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ); IR 为摄入速率 ( $\text{g}/$

周); bw 为人体体重, 取  $60 \text{ kg}$ 。则贵州居民每周重金属摄入量: Cr 为  $0.24 \sim 3.13 \mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw})$ , As 为  $0.008 \sim 0.016 \mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw})$ , Cd 为  $0.008 \sim 0.104 \mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw})$ , Hg 为  $0.008 \sim 0.07 \mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw})$  和 Pb 为  $0.0008 \sim 0.007 \mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{bw})$ 。分别占其 PTWI 的  $1.2\% \sim 13.4\%$ ,  $2.3\% \sim 4.6\%$ ,  $0.1\% \sim 1.6\%$ ,  $0.2\% \sim 1.4\%$ ,  $0.003\% \sim 0.03\%$ 。计算结果表明, 食用辣椒摄入的 Cr 和 As 占其 PTWI 的比例相对较高。

人体摄入过量的 Cr 将导致中毒, 铬化合物可以通过皮肤、黏膜、消化道和呼吸道等途径侵入人体, 并在人体内分泌腺、心、胰和肺中积聚, 引起人体慢性中毒<sup>[18]</sup>; 摄入过量的 As 将导致中毒<sup>[19]</sup>, 主要表现为皮炎、鼻炎、咽喉炎、胃肠炎, 肝病、肾病、心脑血管疾病、肢端坏疽、恶性疣状增生等临床病症。因此, 辣椒中 Cr 和 As 的暴露风险值得关注。

## 3 结论

1) 研究区辣椒根际土中 Cr、As、Cd、Hg 和 Pb 五种重金属含量均满足了无公害食品的土壤环境质量要求, 辣椒植株各部分中五种重金属含量从高到低依次为根系  $>$  茎  $>$  果实, 但辣椒果实个别样品中重金属 Cr 和 Hg 的含量 (干重) 超出《农产品安全质量: 无公害蔬菜安全要求》(GB 18406.1-2001) 中重金属的限量值, 超标率分别为  $33.3\%$  和  $23.3\%$ 。

2) 在根际土与辣椒果实间, 重金属的累计富集系数 B 为  $Cd > Hg > Cr > Pb > As$ , 其值分别为  $0.02 \sim 2.01$ ,  $0.04 \sim 1.02$ ,  $0.003 \sim 0.06$ ,  $0.000045 \sim 0.0034$ ,  $0.00004 \sim 0.0026$ , 辣椒果实对 Cd 的富集较其他重金属高。

3) 贵州居民通过食用辣椒果实途径摄入重金属 Cr、As、Cd、Hg 和 Pb 的量分别占其 PTWI 的  $1.2\% \sim 13.4\%$ ,  $2.3\% \sim 4.6\%$ ,  $0.1\% \sim 1.6\%$ ,  $0.2\% \sim 1.4\%$ ,  $0.003\% \sim 0.03\%$ , 其 Cr 和 As 占其 PTWI 的比例相对较高。因此, 食用辣椒摄入 Cr 和 As 进而造成的食品安全风险应引起重视, 对《农产品安全质量: 无公害蔬菜安全要求》(GB 18406.1-2001) 辣椒中重金属限值合理性有待进一步探讨。

## 参 考 文 献

- [1] Tegen I, Fung I. Modeling of mineral dust in the atmosphere: Sources, transport, and optical thickness[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1994, 99(D11): 22897-22914.
- [2] Chen T B, Song B, Zheng Y M, et al. A survey of arsenic concentrations in vegetables and soils in Beijing and the poten-

- tial risks to human health[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(3): 297-310.
- [3] Chen J. Rapid urbanization in China: A real challenge to soil protection and food security[J]. *Catena*, 2007, 69(1): 1-15.
- [4] 卢瑛, 龚子同, 张甘霖, 等. 南京城市土壤重金属含量及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(1): 123-126.
- [5] 和莉莉, 李冬梅, 吴钢. 我国城市土壤重金属污染研究现状和展望[J]. *土壤通报*, 2008, 39(5): 1210-1216.
- [6] Millis P R, Ramsey M H, John E A. Heterogeneity of cadmium concentration in soil as a source of uncertainty in plant uptake and its implications for human health risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2004, 326(1): 49-53.
- [7] 冯恭衍, 张炬, 吴建平. 宝山区蔬菜重金属污染研究[J]. *上海交通大学学报: 农业科学版*, 1993, 11(1): 43-60.
- [8] 宋波, 高定, 陈同斌. 北京市菜地土壤和蔬菜铬含量及其健康风险评估[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(10): 1707-1715.
- [9] Rubio C, Hardisson A, Reguera J I, *et al.* Cadmium dietary intake in the Canary Islands, Spain[J]. *Environmental Research*, 2006, 100(1): 123-129.
- [10] 谢建华, 叶文武, 庞杰, 等. 辣椒的深加工技术研究进展[J]. *辣椒杂志*, 2004, 2(2): 28-31.
- [11] 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特征[J]. *生态与农村环境学报*, 2007, 23(4): 52-56.
- [12] 姚春霞, 陈振楼, 张菊, 等. 上海市浦东新区土壤及蔬菜重金属现状调查及评价[J]. *土壤通报*, 2005, 36(6): 884-887.
- [13] 李秀兰, 胡雪峰. 上海郊区蔬菜重金属污染现状及累积规律研究[J]. *化学工程师*, 2005, 116(5): 36-38.
- [14] 余文中, 姜虹, 杨红, 等. 贵州辣椒[J]. *辣椒杂志*, 2005, 3: 1-4.
- [15] GB 18406.1-2001, 农产品安全质量: 无公害蔬菜安全要求.
- [16] FDA. Food labeling reference daily intakes, final rule. *Federal Register* [OL]. <http://www.gpoaccess.gov/fr/retrieve.html>, 1995.
- [17] World Health Organization. Safety evaluation of certain food additives and contaminants[R]. 2002, 48.
- [18] 马伯琨. 职业性铬危害及诊断[J]. *化工劳动保护(工业卫生与职业病分册)*, 1987, 30(4): 31-33.
- [19] 马恒之. 无机砷: 人类危险之谜[J]. *地方病译丛*, 14(4): 39-44.

## Distribution of Heavy Metals in the Rhizospheric Soil-Capsicum System and Risk Assessment

WANG Da-zhou<sup>1,2</sup>, LIN Jian<sup>1,\*</sup>, WANG Da-xia<sup>3</sup>, YU Xiao-zhen<sup>4</sup>, BAI Jian-jun<sup>4</sup>, DAI Kai<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Guizhou Academy of Instrumental Analysis, Guiyang 550002, China; 4. Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

**Abstract:** The contents of heavy metals such as chromium, mercury, arsenic, cadmium and lead in the samples of whole capsicum plants and rhizospheric soils were determined. The distribution characteristics of the five heavy metals in the rhizosphere soil-capsicum system were discussed, and the health risk through capsicum consumption was assessed. The results showed that the concentrations of Cr, As, Cd, Hg and Pb in pepper fruit (dry weight) were within the ranges of 0.30~9.93, 0.01~0.03, 0.01~0.13, 0.01~0.09, and 0.01~0.58 mg/kg, respectively. The cumulative enrichment coefficient between soil and fruit followed a decreasing order of Cd>Hg>Cr>Pb>As, and Cd and Hg showed significant enrichment in pepper fruit. Although the average contents of heavy metals in pepper fruit were lower than the safe limits of (GB 18406.1-2001), the exposure of Cr and As through routine pepper consumption may impose a potential health risk on the local consumers in Guizhou Province, and such induced health risk should be concerned in food management.

**Key words:** rhizospheric soil; capsicum; heavy metal; health risk