

都安县玉米籽粒重金属累积特征与健康风险评价

吴 洋^{1,2}, 杨 军¹, 周小勇^{1*}, 雷 梅¹, 徐 婷^{1,3}, 宋 波³

(1.中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.桂林理工大学环境科学与工程学院, 广西 桂林 541004)

摘 要:采集广西都安瑶族自治县 19 个乡镇 64 片玉米种植区中玉米, 分析和评价了其重金属超标状况和人体健康风险, 为当地的粮食安全生产提供科学依据。结果表明, 都安县玉米籽粒中 Pb 和 Zn 均超标, 其超标率分别为 7.81% 和 4.69%, 总超标率为 10.9%; 都安县部分玉米对 Pb 的富集能力较高, 在高岭、地苏和东庙三个乡镇需关注玉米 Pb 污染风险。玉米籽粒健康风险评价结果表明, 都安县玉米中重金属对人体的高危商和高危指数均小于 1, 尚未对人体健康构成威胁。

关键词:玉米; 重金属; 累积特征; 健康风险; 都安瑶族自治县

中图分类号: X820.4 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2015)11-2048-07 doi:10.11654/jaes.2015.11.002

Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy metals in Corn Kernel in Du'an Yao Autonomous County

WU Yang^{1,2}, YANG Jun¹, ZHOU Xiao-yong^{1*}, LEI Mei¹, XU Ting^{1,3}, SONG Bo³

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Earlier studies have found serious heavy metal pollution in soils collected from Du'an Yao Autonomous County in Guangxi Zhuang Autonomous Region, which has resulted in heavy metal contamination of rice in this area. However, heavy metal contamination in another main crop corn was not documented yet. Here we collected corn and soil samples from 64 planting zones distributed in 19 towns in the County to investigate concentrations of heavy metals including cadmium (Cd), arsenic (As), nickel (Ni), zinc (Zn), chromium (Cr), copper (Cu) and lead (Pb). The potential health risk for local residents was assessed. Lead and Zn content in 7.81% and 4.69% of corn samples was higher than the limits of the National Food Health Standard, respectively, with total 10.9% of corn samples exceeding the standards. According to the Hazard Index (HI), the health risks of corn consumption to people in Du'an County was still at low level, implying that corn could be planted in Du'an County because of its low accumulating ability for heavy metals. However, the potential risk of lead pollution in Gaoling, Disu, and Dongmiao towns should be controlled.

Keywords: corn; heavy metal; accumulation characteristics; health risk; Du'an Yao Autonomous County

近年来, 我国农田土壤重金属污染日益严重, 土壤重金属可通过根系进入植物体内, 并通过食物链传递到动物和人体, 严重威胁人类健康^[1-2], 因此开展农田污染土壤的安全生产具有重要意义。广西壮族自治区

区玉米生产和消费居全国第二位^[3], 仅次于水稻产量和消费量, 是桂西北农民的主要粮食来源^[4], 玉米质量的好坏直接关系到当地粮食安全和人体健康。

目前, 对于广西河池市刁江流域农田土壤和植物重金属污染的研究较多, 如研究发现长期受矿业活动影响的南丹县, 农田土壤受到不同程度的污染^[5-6]; 刁江上游地区水稻籽粒中 Cd 和 Pb 含量分别平均超标 3.3 倍和 3.9 倍^[7], 下游两岸水稻也存在 Cd、As 超标情况^[8], 且下游的污灌区内小白菜 Pb 含量全部超

收稿日期: 2015-04-20

基金项目: 环保公益性行业科研专项(201309032); 广西自然科学基金重大项目(2013GXNSFEA053002); 北京市科学计划项目(Z131100003113008)

作者简介: 吴 洋(1989—), 男, 湖南石门人, 硕士研究生, 主要从事环境风险评价。E-mail: wuy.12s@igsrr.ac.cn

* 通信作者: 周小勇 E-mail: zhouxxy@igsrr.ac.cn

标^[9]。都安瑶族自治县(简称“都安县”)隶属广西壮族自治区河池市,处于刁江流域下游,是河池市农业生产大县,然而对都安县农产品重金属质量状况的研究较少,主要涉及水稻和小白菜等少数几种作物,缺少对主要农作物——玉米重金属质量状况的报道。本研究旨在调查都安县玉米籽粒中重金属污染状况,研究都安县玉米重金属累积程度,评价其健康风险,为广西都安县玉米安全生产提供科学依据,这对保障粮食生产和人体健康具有重要的现实意义,也对农业可持续发展具有重要的指导意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

都安县位于广西壮族自治区中部偏西,东经 107°46′~108°31′,北纬 23°48′~24°35′,地处云贵高原向广西过渡的斜坡地带,地势西北高、东南低。全县地形复杂,以喀斯特山地为主,中部海拔高,多为山地,东西海拔低,多为平原或丘陵,是生态环境较差、资源环境保护与社会经济发展矛盾的地区之一^[10]。都安县经济以农业为主,农业人口占总人口的 96.04%^[11],耕地面积为 4.3 万 hm^2 ,常年种植面积约占耕地面积的 53%。玉米是都安县的主要粮食作物之一,常年种植面积 2.3 万 hm^2 ,产量约 $5.7 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[12]。都安县境内无矿业活动,但地苏、安阳、龙湾、九渡等乡镇部分农田存在污水灌溉的现象^[5,8]。

1.2 样品采集与分析

2014 年 7 月,在都安县选取 64 片具有代表性的面积在 10 hm^2 以上的玉米种植区(图 1),每片种植区采集 3~4 个成熟玉米样品,同时用 GPS(map60CSx, 中国)确定样品的地理位置。玉米籽粒用超纯水(Milli-Q, 美国)洗净,90 °C 杀青,65 °C 烘干。玉米籽粒重金属采用 $\text{HNO}_3\text{--HClO}_4$ 消解^[13]。As 含量用原子荧光仪(科创海光 AFS-9800, 中国)测定,其他重金属含量用连续光源吸收光谱仪(耶拿 contrAA700, 德国)测定^[13],其中 Cd、Cr、Ni、Pb 用连续光源吸收光谱仪的石墨炉测定。

1.3 质量控制

每批玉米籽粒样品消解时添加 2 个植物标准样品(GBW-07603)和空白作分析质量控制,土壤样品消解时添加 2 个土壤成分分析标准物质(GBW-07405)和空白作分析质量控制,测定偏差控制在 $\pm 10\%$ 以内,选 10% 的样品做重复测试,相对误差在 $\pm 5\%$ 以内。

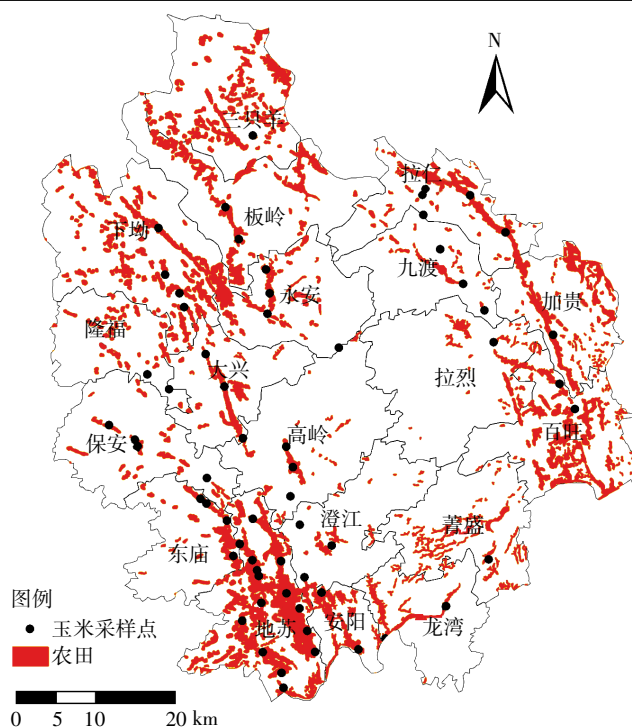


图 1 都安县玉米采样点分布图

Figure 1 Distribution of corn sample points in Du'an County

1.4 重金属污染和健康风险评价

玉米籽粒中 As、Pb、Cd、Cr 含量评价标准参照国家原卫生部颁布的《食品中污染物限量》(GB 2762—2012),Zn 含量评价标准参照《食品中锌限量卫生标准》(GB 13106—1991),Cu 含量评价标准参照《食品中铜限量卫生标准》(GB 15199—1994)。国家食品卫生评价标准没有规定谷物类 Ni 含量限量值,因此参考傅逸根等^[14]提出的限量值($0.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

为了对玉米摄入进行健康风险评价,将摄入量等模型运用到本研究^[15]。

$$ADD = \frac{C_i \times IR \times ED \times EF}{BW \times AT \times 365}$$

$$HQ = \frac{ADD}{RfD}$$

$$HI = HQ_1 + HQ_2 + \dots + HQ_n$$

式中:ADD 为重金属经玉米摄入的平均日摄取量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; C_i 为某重金属含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 参照 USEPA 暴露因子手册和经实地调查,确定该地区人们玉米摄入速率(IR)为 $0.15 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ ^[16],暴露持续时间(ED)为 30 a,暴露频率(EF)为 $365 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$;平均体重(BW)取值 60 kg;生命期望(AT)取值 70 a,并假定烹调过程中不影响重金属的活性和毒性;RfD 为日参考剂量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。HQ 为高危商, $HQ > 1$ 表明某重金属可引起人体的健康风险,健康风险指数越大,表明该重金属对

人体健康风险越大。重金属对人体健康的影响一般是多种元素共同作用的结果,HI 为高危指数,表示多种重金属对人体健康的综合影响。HI≤1 表明没有明显的健康影响;HI>1 表明对人体健康产生影响的可能性大;HI>10 表明存在慢性毒性。

1.5 数据处理与分析

利用 Excel 2013 和 SPSS 20.0 进行数据统计与分析,通过方差分析比较不同乡镇间玉米籽粒重金属含量的差异,用 ArcGIS 9.3 软件制作玉米籽粒重金属含量空间分布图。

2 结果与分析

2.1 玉米重金属含量分析

都安县玉米籽粒重金属含量特征见表 1。玉米籽粒中重金属含量均值均未超过相关国家食品卫生标准,部分点位的玉米出现 Pb 和 Zn 超标情况,超标率分别为 7.81%和 4.69%,重金属总超标率为 10.9%。玉米籽粒 Pb 含量范围 nd~0.717 mg·kg⁻¹,平均含量 0.076 mg·kg⁻¹,最大值是国家食品卫生标准的 3.59 倍;Zn 含量范围 17.5~59.3 mg·kg⁻¹,平均含量 32.1 mg·kg⁻¹,最大值是国家食品卫生标准的 1.19 倍。As、Pb、Cd、Cr 含量变异系数均大于 100%,说明玉米籽粒样品中这些重金属含量差异较大。

表 1 都安县玉米籽粒中重金属含量特征

Table 1 Characteristics of heavy metal content in corn kernel in Du'an County

元素	统计结果/mg·kg ⁻¹				超标率/ 变异系数/	
	最小值	最大值	均值	限量标准	%	%
As	nd	0.234	0.019	0.5	0	170
Pb	nd	0.717	0.076	0.2	7.81	157
Cd	0.002	0.096	0.011	0.1	0	121
Zn	17.5	59.3	32.1	50	4.69	28.7
Cr	nd	0.397	0.090	1.0	0	108
Cu	1.83	8.03	3.21	10	0	31.1
Ni	0.003	0.227	0.060	0.4	0	68.6
合计					10.9	

注:nd 表示为未检出。
Note:nd——Not detected.

2.2 不同乡镇的玉米籽粒重金属含量分布

玉米籽粒重金属含量等级图如图 2 所示。都安县玉米籽粒重金属超标点主要出现在高岭、澄江、保安、东庙等乡镇。Pb 超标出现在高岭、地苏和东庙三个乡镇,最大值出现在高岭镇(0.717 mg·kg⁻¹);Zn 超标出

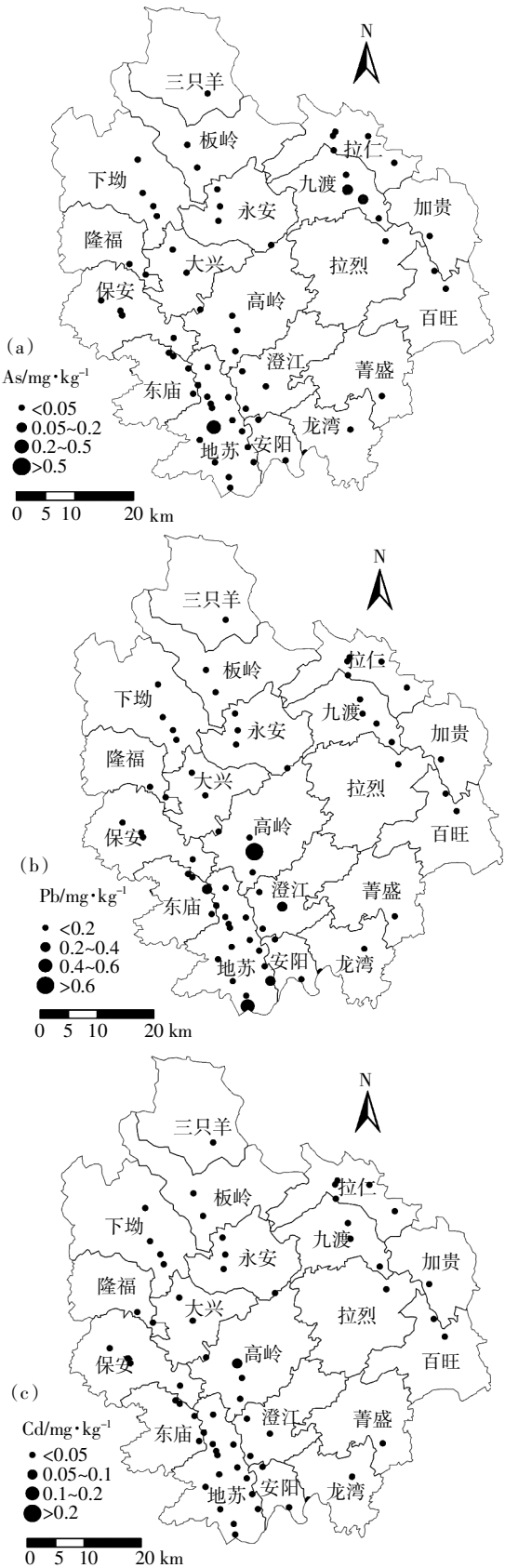
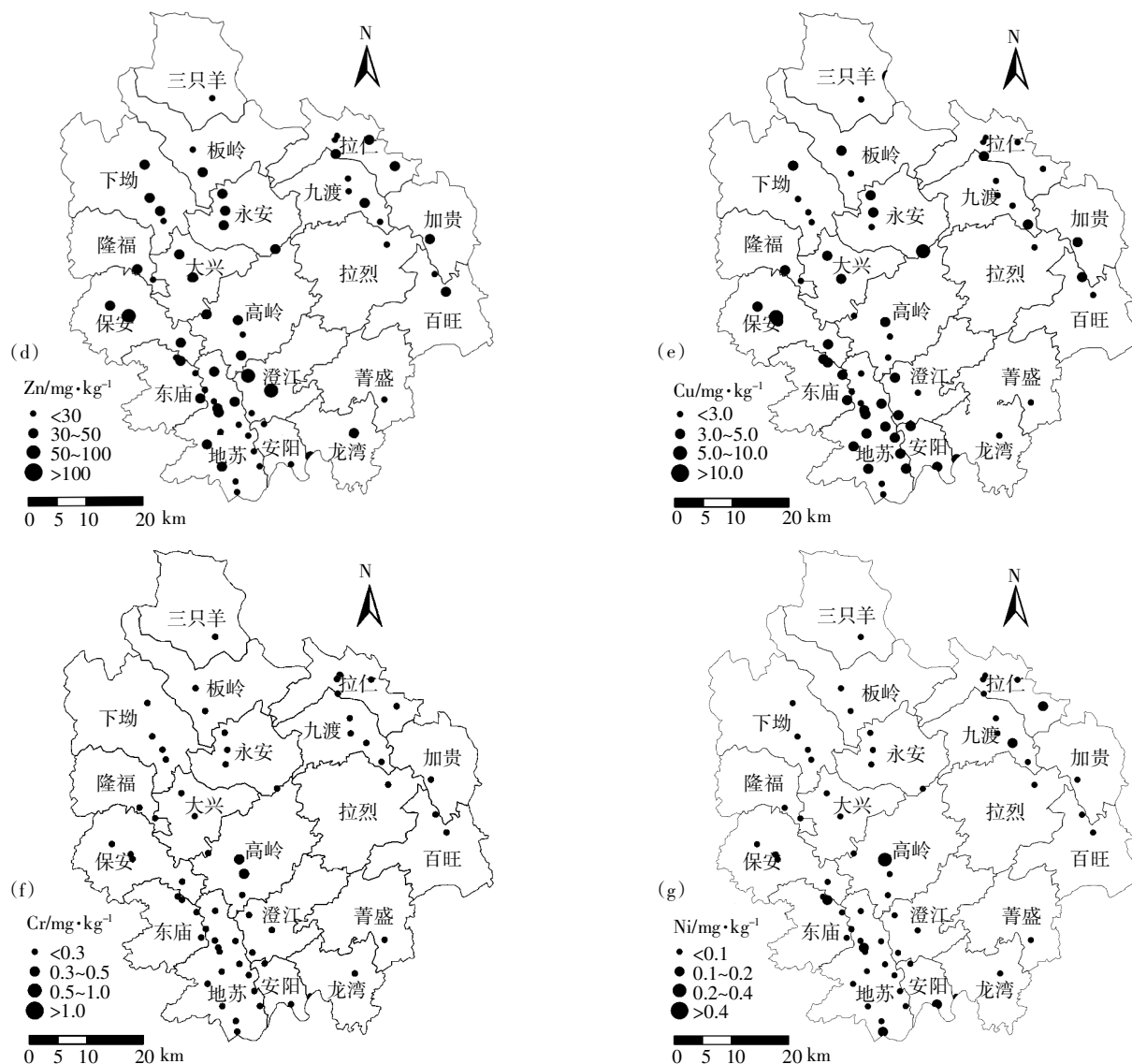


图 2 都安县玉米籽粒重金属含量空间分布图

Figure 2 Spatial distribution of heavy metal content in corn kernel in Du'an County



续图 2 都安县玉米籽粒重金属含量空间分布图

Continue figure 2 Spatial distribution of heavy metal content in corn kernel in Du'an County

现在保安乡和澄江乡。虽然都安县玉米籽粒 As、Cd、Cr 没有出现超标情况,但是九渡、地苏、高岭、澄江等乡镇的部分样品含量较高。全县 95%玉米籽粒 As 含量低于 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均值为 $0.019 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,但在九渡乡和地苏乡部分样品 As 含量高于 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。玉米籽粒中 Cd、Cr 最大值都分布在高岭镇,均高出平均值 4 倍以上。

都安县粮食种植区主要集中在地苏、东庙、保安、下坳、永安、大兴、高岭、澄江、安阳、拉仁、九渡等乡镇,利用方差分析对比这些乡镇中玉米籽粒重金属含量状况见表 2。在 11 个乡镇中玉米籽粒 Cd、Pb、Cr、Zn 含量存在差异。高岭镇玉米籽粒中 Cd、Cr 含量明显高于其他乡镇($P < 0.05$):Cd 平均含量为 $0.042 \text{ mg} \cdot$

kg^{-1} ,高出其他乡镇 1.1~13 倍;Cr 平均含量为 $0.261 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,高出其他乡镇 1.6~11.4 倍。此外,高岭镇玉米籽粒中 Pb 平均含量为 $0.246 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,明显高于保安、下坳、永安、拉仁、九渡 5 个乡镇($P < 0.05$);澄江乡玉米籽粒 Zn 平均含量 $46.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,明显高于地苏、东庙、下坳、高岭、安阳、拉仁、九渡 7 个乡镇($P < 0.05$)。

2.3 健康风险评价

都安县玉米籽粒中 As、Pb、Cd、Ni、Cr、Cu、Zn 的健康风险评价如表 3 所示。都安县玉米籽粒中 7 种重金属的高危商(HQ)均小于 1,说明玉米籽粒中不同重金属对人体健康未构成威胁;同时,高危指数(HI)均小于 1,说明食用都安县玉米对人体健康不

表2 都安县部分乡镇玉米籽粒重金属含量
Table 2 Heavy metal content of corn kernel in some townships in Du'an County

乡镇	样品数量	重金属含量/mg·kg ⁻¹						
		As	Pb	Cd	Zn	Cr	Cu	Ni
地苏	14	0.028a	0.094ab	0.011a	27.5a	0.093a	3.14a	0.057a
东庙	5	0.004a	0.103ab	0.020a	30.0a	0.070a	3.51a	0.071a
保安	4	0.013a	0.001a	0.005a	37.3ab	0.021a	4.23a	0.029a
下坳	4	0.009a	0.032a	0.004a	30.2a	0.064a	2.63a	0.041a
永安	4	0.014a	0.002a	0.009a	38.7ab	0.061a	3.74a	0.041a
大兴	3	0.020a	0.129ab	0.006a	39.7ab	0.037a	3.35a	0.050a
高岭	3	0.021a	0.246b	0.042b	29.7a	0.261b	2.78a	0.105a
澄江	3	0.009a	0.118ab	0.006a	46.9b	0.099a	3.56a	0.047a
安阳	3	0.022a	0.078ab	0.003a	30.1a	0.097a	3.21a	0.071a
拉仁	6	0.016a	0.036a	0.009a	32.7a	0.023a	3.50a	0.071a
九渡	4	0.053a	0.031a	0.010a	26.9a	0.091a	2.74a	0.069a

注:同列中不同字母表示显著差异($P<0.05$)。

Note: Different letters within a column indicate significant difference ($P<0.05$).

表3 都安县玉米籽粒健康风险评价结果
Table 3 Health risk assessment of corn kernel in Du'an County

乡镇	$HQ \times 10^{-2}$							HI
	As	Pb	Cd	Zn	Cr	Cu	Ni	
地苏	9.57	2.79	1.11	9.49	3.22	8.15	0.297	0.346
东庙	1.51	3.06	2.10	10.4	2.41	9.10	0.368	0.289
保安	4.54	0.028	0.509	12.9	0.742	11.0	0.152	0.298
下坳	2.94	0.94	0.424	10.4	2.21	6.81	0.211	0.240
永安	4.68	0.067	0.912	13.4	2.11	9.69	0.215	0.311
大兴	4.85	3.83	0.663	13.7	1.27	8.68	0.258	0.352
高岭	7.41	7.28	4.32	10.3	9.02	7.20	0.545	0.460
澄江	3.27	3.50	0.670	16.2	3.42	9.23	0.246	0.365
安阳	7.54	2.31	0.324	10.4	3.39	8.32	0.370	0.326
拉仁	5.40	1.06	0.960	11.3	0.810	9.06	0.371	0.290
九渡	18.3	0.906	1.08	9.29	3.14	7.10	0.357	0.402
都安县	6.64	2.26	1.13	11.1	3.10	8.32	0.309	0.329
Rf/D $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$	0.3	3.5	1	300	3	40	20	

注: Rf/D 值为参考文献[15-17]中重金属的限量值。

Note: Rf/D refers to the limits of heavy metals in reference[15-17].

会造成影响。

3 讨论

3.1 都安县玉米重金属污染防控

土壤重金属污染是导致我国粮食安全问题的主要原因之一^[18]。玉米作为我国主要粮食作物之一,其质量安全问题人们尤为关注。经过调查发现,广西都

安瑶族自治县玉米籽粒中重金属含量存在超标情况,玉米籽粒 Pb 超标率为 7.81%,Zn 超标率为 4.69%,存在一定的农产品安全问题,但对人体健康并不构成威胁。原国家卫生部已将 Cu、Zn 限量标准废除,且欧盟、日本、国际食品添加剂与污染物法典委员会等也未将 Cu、Zn 纳入食品限量标准,本文所套用的 Zn 限量标准为已经停止使用的《食品中锌限量卫生标准》(GB 13106—1991),虽然能在客观上反应玉米中 Zn 的超标状况,但是因为我国居民膳食中锌的摄入不足,Zn 的轻微超标不会对人体健康造成威胁。因此,都安县玉米质量安全隐患主要是 Pb 超标。这与唐保晖等^[19]的研究结果相同,河池市市场上玉米面粉重金属 Pb 超标严重,抽检超标率为 100%。本文中玉米籽粒 Pb 含量超标出现在高岭、地苏和东庙三个乡镇(图 2),虽然这些超标样点土壤中 Pb 含量相对较低,为 21.3~86.4 mg·kg⁻¹(表 4),但是玉米对 Pb 的富集系数为 0.008~0.052,可能是这些乡镇的玉米品种对 Pb 的累积能力较高,导致这三个乡镇玉米籽粒 Pb 超标。因此,在都安县高岭、地苏和东庙三个乡镇推行玉米种植时,应优先选用对重金属低累积的玉米品种。

3.2 玉米重金属累积效应

农产品对重金属的积累与土壤重金属含量有一定的关系^[20]。如表 4 所示,都安县玉米地土壤重金属污染严重,所有重金属均存在超标情况。Cd 污染最为严重,超标率为 90.6%,达到重度污染水平;同时,As 和 Ni 达到了轻度污染水平。

都安县玉米籽粒中 As、Pb、Cd 分布存在一定的差异性,可能与土壤重金属含量差异大有关。土壤中

表4 都安县玉米地土壤重金属污染评价

Table 4 Assessment of heavy metal pollution in soils planted with corn in Du'an County

元素	统计结果/mg·kg ⁻¹						污染评价	
	最小值	最大值	平均值	标准差	超标率/%	平均超标倍数*	单因子指数	综合污染指数
As	1.13	700	39.8	87.8	37.5	1.33	轻度	重度
Pb	7.58	456	54.2	59.3	1.56	0.18	清洁	(3.21)
Cd	0.11	11.9	2.48	2.28	90.6	8.27	重度	
Zn	20.8	972	189	148	31.3	0.75	清洁	
Cr	37.0	769	170	118	32.8	0.85	清洁	
Cu	4.68	313	39.0	38.6	1.56	0.39	清洁	
Ni	2.49	111	50.4	30.7	46.9	1.01	轻度	

注:评价参考《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)中二级标准($6.5 \leq \text{pH} \leq 7.5$)。

Note: Pollution criteria refer to Grade II of GB 15618—1995 Chinese Environmental Quality Standard for Soils.

As、Pb、Cd 含量的变异系数分别为 225%、109%、92%,且相关性分析表明,土壤 As 含量和玉米籽粒 As 含量呈显著正相关($P<0.05$)。虽然都安县玉米地土壤重金属污染严重,但是玉米籽粒中重金属超标率较低,可能与玉米籽粒对重金属的累积能力较低有关。都安县玉米籽粒中 As、Pb、Cd、Cr、Ni、Cu 和 Zn 的平均富集系数分别为 0.001、0.003、0.012、0.001、0.002、0.128 和 0.332。除 Zn 外,其他重金属的富集系数均较低,与 Corguinha 等^[21]和李静等^[22]的研究结果类似。近年来,许多学者针对玉米籽粒累积重金属的特征进行了大量研究^[23-25],证实玉米属于低累积作物,对重金属累积作用不显著。因此,玉米对重金属的低累积能力是都安县玉米籽粒超标率较低的主要原因。同时,当地玉米基本靠雨水浇灌^[26],不受污水灌溉的影响,也是玉米籽粒超标状况较轻的重要原因。另外,玉米为旱地作物,当地玉米地土壤 pH 偏碱性(7.45),导致重金属有效性受到抑制,可能也是都安县玉米重金属超标较轻的一个原因。总体而言,在都安县大规模种植玉米是可行的,但需要在高岭、地苏和东庙三个乡镇关注 Pb 污染风险。

4 结论

(1)广西都安瑶族自治县玉米籽粒重金属 As、Pb、Cd、Zn、Cr、Cu 和 Ni 含量均值分别为 0.019、0.076、0.011、32.1、0.090、3.21、0.060 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Pb 和 Zn 的超标率分别为 7.81%和 4.69%。

(2)玉米籽粒中 Pb 超标点出现在高岭镇、地苏乡和东庙乡,Zn 超标点出现在保安乡和澄江乡。

(3)都安县土壤重金属达到重度污染水平,但是玉米籽粒对重金属的累积不明显;都安县能大面积种植当地玉米品种,但在高岭、地苏和东庙三个乡镇需关注玉米 Pb 污染风险。

(4)玉米籽粒重金属的高危商和高危指数均小于 1,食用当地玉米不会对人体健康造成影响。

参考文献:

- [1] Teng Y G, Wu J, Lu S J, et al. Soil and soil environmental quality monitoring in China: A review[J]. *Environment International*, 2014, 69 (8): 177-199.
- [2] Ali H, Khan E, Sajad M A. Phytoremediation of heavy metals: Concepts and applications[J]. *Chemosphere*, 2013, 91(7): 869-881.
- [3] 时成俏, 黄安霞, 王兵伟, 等. 广西鲜食玉米产业发展现状及对策[J]. 广西农业科学, 2010, 41(9): 1011-1013.
- SHI Cheng-qiao, HUANG An-xia, WANG Bing-wei, et al. Status of freshly consumable corn industrialization and countermeasures for its development in Guangxi[J]. *Guangxi Agricultural Sciences*, 2010, 41 (9): 1011-1013.
- [4] 孔祥林, 闫飞燕. 广西玉米生产现状及发展思考[J]. 中国种业, 2008(1): 12-14.
- KONG Xiang-lin, YAN Fei-yan. Current situation and development of maize production in Guangxi[J]. *China Seed Industry*, 2008(1): 12-14.
- [5] 宋书巧, 吴浩东, 蓝唯源. 刁江沿岸土壤重金属污染状况及土地的合理利用模式[J]. 环境与健康杂志, 2008, 25(4): 317-319.
- SONG Shu-qiao, WU Hao-dong, LAN Wei-yuan. The status of heavy metals pollution in soil along Diaojiang River sides[J]. *Journal of Environment and Health*, 2008, 25(4): 317-319.
- [6] 宋书巧, 梁利芳, 周永章, 等. 广西刁江沿岸农田受矿山重金属污染现状与治理对策[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(2): 152-155.
- SONG Shu-qiao, LIANG Li-fang, ZHOU Yong-zhang, et al. The situation and remedial measures of the cropland polluted by heavy metals from mining along the Diaojiang River[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2003, 22(2): 152-155.
- [7] 王林, 徐应明, 梁学峰, 等. 广西刁江流域 Cd 和 Pb 复合污染稻田土壤的钝化修复[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(5): 563-568.
- WANG Lin, XU Ying-ming, LIANG Xue-feng, et al. Remediation of contaminated paddy soil by immobilization of pollutants in the Diaojiang catchment, Guangxi Province[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2012, 28(5): 563-568.
- [8] 凌乃规, 何金富, 黄碧燕, 等. 刁江流域土壤铅对水稻和小白菜的污染影响研究[J]. 广西农业科学, 2008, 39(4): 507-510.
- LING Nai-gui, HE Jin-fu, HUANG Bi-yan, et al. Impacts of Pb pollution in soils on rice and cabbage in Diaojiang basin[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2008, 39(4): 507-510.
- [9] 翟丽梅. 矿业活动密集区农田土壤重金属的污染特征: 以广西西江流域为重点[D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2007: 89-98.
- ZHAI Li-mei. Heavy metals contamination of agricultural soils in the intensively mining area of Guangxi Xijiang River valley[D]. Beijing: Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, 2007: 89-98.
- [10] 胡宝清, 严志强, 廖赤眉, 等. 喀斯特石漠化与地质生态环境背景的空间相关性分析: 以广西都安瑶族自治县为例[J]. 热带地理, 2004, 24(3): 226-230.
- HU Bao-qing, YAN Zhi-qiang, LIAO Chi-mei, et al. An analysis on the spatial relationship between karst rocky desertification and geological eco-environment backgrounds: A case study of Du'an County[J]. *Tropical Geography*, 2004, 24(3): 226-230.
- [11] 上官贞军, 胡宝清, 严志强, 等. 广西都安县可持续发展能力评价与生态经济发展[J]. 热带地理, 2005, 25(2): 156-160.
- SHANGGUAN Zhen-jun, HU Bao-qing, YAN Zhi-qiang, et al. Evaluation of sustainable development and ecologic-economic development for Du'an County of Guangxi[J]. *Tropical Geography*, 2005, 25(2): 156-160.
- [12] 严桂青, 黄毅, 韦贵方, 等. 都安县春玉米不同品种小区对比试验研究[J]. 农业科技通讯, 2013(12): 60-62.

- YAN Gui-qing, HUANG Yi, WEI Gui-fang, et al. Experimental study on comparison of different varieties of Du'an County village of spring maize[J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2013 (12):60-62.
- [13] Song B, Lei M, Chen T B, et al. Assessing the health risk of heavy metals in vegetables to the general population in Beijing, China[J]. *Journal of Environmental Sciences-China*, 2009, 21(12):1702-1709.
- [14] 傅逸根, 胡欣, 俞苏霞. 食品中镍限量卫生标准的研究[J]. 浙江省医学科学院学报, 1999, 37:9-11.
- FU Yi-gen, HU Xin, YU Su-xia. Study on the health standard for nickel in food limited[J]. *Journal of Zhejiang Academy of Medical Sciences*, 1999, 37:9-11.
- [15] 吴迪, 杨秀珍, 李存雄, 等. 贵州典型铅锌矿区水稻土壤和水稻中重金属含量及健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(10):1992-1998.
- WU Di, YANG Xiu-zhen, LI Cun-xiong, et al. Concentrations and health risk assessments of heavy metals in soil and rice in zinc-lead mining area in Guizhou Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(10):1992-1998.
- [16] 杨刚, 沈飞, 钟贵江, 等. 西南山地铅锌矿区耕地土壤和谷类产品重金属含量及健康风险评价[J]. 环境科学学报, 2011, 31(9):2014-2021.
- YANG Gang, SHEN Fei, ZHONG Gui-jiang, et al. Concentration and health risk of heavy metals in crops and soils in a zinc-lead mining area in southwest mountainous regions[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(9):2014-2021.
- [17] 雷鸣, 曾敏, 王利红, 等. 湖南市场和污染区稻米中 As、Pb、Cd 污染及其健康风险评价[J]. 环境科学学报, 2010, 30(11):2314-2320.
- LEI Ming, ZENG Min, WANG Li-hong, et al. Arsenic, lead, and cadmium pollution in rice from Hunan markets and contaminated areas and their health risk assessment[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(11):2314-2320.
- [18] Zhao F J, Ma Y B, Zhu Y B, et al. Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies[J]. *Environmental Science and Technology*, 2015, 49(2):750-759.
- [19] 唐保晖, 黄丽华, 邓雄鹰. 2009—2010 年河池市食品中重金属污染监测及分析[J]. 医学动物防治, 2011, 27(9):841-842.
- TANG Bao-hui, HUANG Li-hua, DENG Xiong-ying. Monitoring and analysis of heavy metal pollution in food in Hechi city during 2009—2010[J]. *Journal of Medical Pest Control*, 2011, 27(9):841-842.
- [20] Wang L Z, Guo Z H, Xiao X Y, et al. Heavy metal pollution of soils and vegetables in the midstream and downstream of the Xiangjiang River, Hunan Province[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2008, 18(3):353-362.
- [21] Corguinha A P B, Souza G A D, Goncalves V C, et al. Assessing arsenic, cadmium, and lead contents in major crops in Brazil for food safety purposes[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2015, 37:143-150.
- [22] 李静, 依艳丽, 李亮亮, 等. 几种重金属(Cd、Pb、Cu、Zn)在玉米植株不同器官中的分布特征[J]. 中国农学通报, 2006, 22(4):244-247.
- LI Jing, YI Yan-li, LI Liang-liang, et al. Distribution of heavy metal (Cd, Pb, Cu, Zn) in different organs of maize[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(4):244-247.
- [23] Chao C C, Wang Y P. Effects of heavy-metals on the infection of vesicular-arbuscular mycorrhizae and the growth of maize[J]. *Journal of the Agricultural Association of China*, 1990, (152):34-45.
- [24] 陈建军, 于蔚, 祖艳群, 等. 玉米(*Zea mays*)对镉积累与转运的品种差异研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(10):1671-1676.
- CHEN Jian-jun, YU Wei, ZU Yan-qun, et al. Variety difference of Cd accumulation and translocation in *Zea mays*[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(10):1671-1676.
- [25] 杨刚, 吴传星, 李艳, 等. 不同品种玉米 Hg、As 积累特性及籽粒低积累品种筛选[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(6):228-232.
- YANG Gang, WU Chuan-xing, LI Yan, et al. Accumulation characteristics of Hg and As in different maize varieties and screening their cultivars via low-grain accumulation[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2014, 14(6):228-232.
- [26] 唐艾金, 黄泽栋, 唐运作, 等. 都安县秋玉米不同栽培模式小区对比试验研究[J]. 农业科技通讯, 2014(10):102-105.
- TANG Ai-jin, HUANG Ze-dong, TANG Yun-zuo, et al. Comparative study on different cultivation patterns of Du'an County district autumn maize[J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2014(10):102-105.