

焦位雄, 杨虎德, 冯丹妮, 等. Cd Hg Pb 胁迫下不同作物可食部分重金属含量及累积特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9): 1726–1733.

JIAO Wei-xiong, YANG Hu-de, FENG Dan-ni, et al. Heavy metal content and accumulation characteristics in the edible parts of different crops under Cd, Hg, and Pb stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(9): 1726–1733.

Cd Hg Pb 胁迫下不同作物可食部分 重金属含量及累积特征研究

焦位雄¹, 杨虎德^{1,2*}, 冯丹妮², 林大松³, 李崇霄⁴

(1.甘肃农业大学资源与环境学院, 兰州 730070; 2.甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所, 兰州 730070; 3.农业部环境保护科研监测所, 天津 300191; 4.甘肃省农业生态环境保护管理站, 兰州 730000)

摘要:采用微区土培试验方法,研究了甘肃省3类10种主要栽培作物在Cd、Hg、Pb重度污染土壤上,作物可食部分对重金属的吸收富集能力,并根据食品安全国家标准(GB 2762—2012),采用单因子指数法对农产品质量安全进行评价。结果表明:不同类型作物对重金属的吸收与富集能力有显著性差异,对Cd富集能力表现为蔬菜类>油料作物>粮食作物,对Hg、Pb富集能力表现为蔬菜类>粮食作物>油料作物;同一作物(除玉米和大豆外)对不同重金属吸收能力表现为Cd>Pb>Hg。经综合评价,在对甘肃地区pH值大于8.0的重金属重度污染土壤进行种植业结构调整时,Cd污染耕地可优先选择种植玉米,Hg污染耕地可优先选择种植玉米和油菜,Pb污染耕地可优先选择种植玉米和大豆。

关键词:农田土壤;重金属含量;农产品;累积特征;安全性评价

中图分类号:X503.231 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2017)09-1726-08 doi:10.11654/jaes.2017-0225

Heavy metal content and accumulation characteristics in the edible parts of different crops under Cd, Hg, and Pb stress

JIAO Wei-xiong¹, YANG Hu-de^{1,2*}, FENG Dan-ni², LIN Da-song³, LI Chong-xiao⁴

(1.College of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2.Institute of Soil, Fertilizer and Water-saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China; 3.Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China; 4.Gansu Agricultural Ecological Environment Protection Management Station, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The test method of micro area soil cultivation was used in this research to investigate absorption and accumulation ability of heavy metals in the edible parts of 10 common types of cultivated crops, including three main crop classes, planted in soil heavily polluted by Cd, Hg, or Pb. Furthermore, the quality and safety of agricultural products were evaluated using a single factor index method, according to National food safety standard of China (GB 2762—2012). The results showed that there were significant differences in the absorption capacity of different types of heavy metals in different crops. The trend of accumulation ability of Cd showed as vegetables>oil crops>food crops; for Hg and Pb, it was vegetables>food crops>oil crops. The absorption ability of the same crop (except corn and soybean) for different heavy metals was in the order of Cd>Pb>Hg. This comprehensive evaluation suggested that corn was preferable for Cd-polluted farmland, corn and rapeseed for Hg-polluted farmland, and corn and soybeans for Pb-polluted farmland. This information is helpful for adjusting the crop planting structure in Gansu Province.

Keywords: farmland soil; heavy metal content; agricultural products; Accumulation characteristics; safety assessment

收稿日期:2017-02-26

作者简介:焦位雄(1986—),男,甘肃秦安人,硕士研究生,从事土地退化防治与土壤环境保护研究。E-mail:695663209@qq.com

*通信作者:杨虎德 E-mail:596259707@qq.com

基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFD0201207)

Project supported: The National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China(2016YFD0201207)

土壤是构成生态系统的基本环境要素,是人类赖以生存的物质基础,也是经济社会发展不可或缺的重要资源,更是绝大部分污染物的最终归宿和食品安全的第一道防线。土壤作为种养殖农产品的主要环境要素,其质量的高低直接决定了人们所获取农产品的数量与品质^[1]。随着我国经济社会的快速发展,特别是在近年来工业化、城市化、农业现代化的进程中,各种化学品、农药及化肥等的广泛使用,使土壤环境质量问题呈现多样化、复杂化,给我国经济社会发展带来了新的挑战。

环境保护部和国土资源部 2014 年发布的全国土壤污染状况调查公报显示^[2],全国土壤环境状况总体不容乐观,部分地区土壤污染较重,耕地土壤环境质量堪忧,工矿业废弃地土壤环境问题突出。全国土壤总的点位超标率为 16.1%,耕地土壤点位超标率为 19.4%,其中轻微、轻度、中度和重度污染点位比例分别为 13.7%、2.8%、1.8%和 1.1%,主要污染物为镉、镍、铜、砷、汞、铅、滴滴涕和多环芳烃,重金属已成为耕地土壤主要的污染物。重金属污染物进入土壤后不能被土壤微生物所分解,易于在土壤中积累,被作物吸收,影响农产品质量安全,对人体健康产生危害。因此,如何科学有效地控制和管理农产品产地土壤环境重金属污染问题,合理利用土地资源,提高农产品质量,保障农产品安全已成为现阶段土地可持续利用的主要任务。

甘肃省土壤类型众多,种植作物差异很大^[3],不同种类的作物对不同重金属元素的吸收富集能力不同^[4],不同种类作物对同一重金属元素吸收转化能力不同^[5-6],同一种类作物不同品种对重金属的吸收富集能力不同^[7-9]。土壤类型、土壤 pH 值、CEC、土壤有机质含量等众多因素均会影响作物对土壤中重金属的吸收^[10-11]。甘肃沿黄灌区重金属污染土壤主要分布在污水灌区,一般情况下,土壤 pH 值大于 8.0,有机质含量小于 15.0 g·kg⁻¹,CEC 小于 10.0 cmol·kg⁻¹,土壤质地为风积、淤积或洪冲积黄土母质,质地为粉砂质轻、中壤土。这种土壤的特性决定了土壤的缓冲能力低,环境容量小。

李裕等^[12]研究表明,甘肃沿黄灌区各种重金属在蔬菜中的含量呈现 Zn>Cu>Pb>Cd 的趋势,叶菜对重金属元素的吸收能力大于茎菜,某种特定金属元素在不同的蔬菜中累积不一致。南忠仁等^[13]对白银市土壤作物系统重金属污染调查分析发现,小麦等作物中重金属含量超标。为进一步研究甘肃省主要栽培作物可

食部分对重金属吸收和积累特征,本文采用微区土壤的试验方法,研究甘肃省 10 种主要栽培作物在 Cd、Hg、Pb 重度污染的土壤上,作物可食部分的吸收和累积特性,并对其进行安全评价,为甘肃省种植业结构调整,合理利用重金属污染土壤提供理论依据。对甘肃省产地土壤重金属污染防治及农产品安全生产具有现实意义。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所兰州试验地(东经 103°41'17",北纬 36°5'59",海拔高度 1510 m),属暖温带半干旱季风气候,年平均气温 9.1℃,年无霜期约 180 d,年平均降雨量 205~350 mm。试验土壤为灌淤土,质地中壤,pH 值 8.45,有机质 17.5 g·kg⁻¹,阳离子代换量 9.23 cmol·kg⁻¹,全氮 1.2 g·kg⁻¹,全磷 0.65 g·kg⁻¹,碱解氮 80 mg·kg⁻¹,速效磷 16 mg·kg⁻¹,速效钾 135 mg·kg⁻¹。供试土壤为 0~20 cm 表层土,全部过 2 cm 筛。试验地总面积 128 m²,微区面积 1.2 m²。

1.2 试验材料

供试重金属盐分别为 Cd(NO₃)₂·4H₂O(上海展云化工有限公司)、HgCl₂(泰兴市化学试剂厂)、Pb(NO₃)₂(天津凯信化工有限公司),均为分析纯。

试验主要农作物为小麦(*Triticum aestivum* L.)、玉米(*Zea mays* L.)、马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)、谷子(*Setaria italica*)、啤酒大麦(*Hordeum vulgare* L.)、油菜籽(*Brassica campestris* L.)、大豆[*Glycine max*(Linn.) Merr.]、胡麻(*Linum usitatissimum* L.)、娃娃菜[*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* Makino (var. *communis* Tsen et Lee)]、芹菜(*Apium graveolens* L.) 10 种作物(表 1)。

1.3 试验方法

试验研究涉及 3 类 10 种作物及 3 种重度重金属污染土壤两个因素,其中重金属处理分别为:(1)对照(CK),不添加重金属;(2)添加 Cd,土壤中施入 3.0 mg·kg⁻¹ 的 Cd(实际测定值 3.04 mg·kg⁻¹);(3)添加 Hg,土壤中施入 5.0 mg·kg⁻¹ 的 Hg(实际测定值 4.11 mg·kg⁻¹);(4)添加 Pb,土壤中施入 400.0 mg·kg⁻¹ 的 Pb(实际测定值 418.0 mg·kg⁻¹)。土壤中重金属添加量均按照《食用农产品产地环境质量评价标准》(HJ/T 332—2006)中土壤环境质量评价限值的 5 倍浓度值设定。试验设 4 个处理,每处理 4 次重复,共 16 个微区。重金属添加前,先将每个小区耕层 20 cm 的土壤

表 1 种植作物信息
Table 1 The information of crops

作物类别	作物名称	品种	种子来源
粮食作物	小麦	永良 4 号	甘肃省农业科学院种子市场购买
	玉米	先玉 335	甘肃省农业科学院种子市场购买
	马铃薯	陇薯 3 号	甘肃省农业科学院马铃薯研究所王一航(培育者)提供
	谷子	陇谷 13 号	甘肃省农业科学院作物研究所杨天育培育并提供
	啤酒大麦	甘啤 6 号	甘肃省农业科学院啤酒大麦研究所潘永东培育并提供
油料作物	油菜籽	陇油 10 号	甘肃省农业科学院作物研究所庞进平培育并提供
	大豆	陇引 1 号	甘肃省农业科学院旱地农业研究所张国宏培育并提供
	胡麻	陇亚 10 号	甘肃省农业科学院作物研究所张建平培育并提供
蔬菜类	娃娃菜	春玉黄	甘肃省介实公司推广种植及提供
	芹菜	美国西芹	甘肃省农业科学院种子市场购买

取出,过 2 cm 筛后混匀。按照设定的标准浓度称取相应质量的重金属化合物,加水稀释至一定量,将重金属溶液与土壤充分混合、拌匀,然后回填至已安装规格为 1.5 m×0.8 m×0.2 m 塑料筐的微区内,压实后老化 180 d,以保证重金属与土壤的充分融合。

试验于 2016 年 5 月 1 日播种,小麦、玉米、谷子、啤酒大麦、大豆、胡麻、油菜籽、娃娃菜、芹菜采用育苗移栽的方式,移栽前清洗掉根部的基质,并在移栽时根部蘸取生根粉溶液;马铃薯块茎蘸取生根粉溶液后采用穴播的方式播种。种植后,定期定量灌水、施肥,灌溉水源为自来水。试验期每月测定一次灌溉水中 Cd、Hg、Pb 含量,灌溉水质符合试验要求,其值分别小于 0.001、0.005、0.000 1 mg·L⁻¹。

1.4 样品处理与分析

种植前采集耕层(0~20 cm)土壤样品,风干后磨碎过 20、60、100 目筛备用。土壤 pH 值、有机质、CEC、N、P、K 均参照《土壤农业化学分析方法》^[14]进行测定。土壤中 Cd、Pb 全量分析采用 HNO₃-HF-HClO₄ 消解法(GB/T 17141—1997)^[15],ICP-MS(ZXS-31)测定;Hg 采用王水消解(GB/T 17136—1997)^[16],原子荧光仪(ZXS-02、30)测定。在测定过程中采用国家标准土壤样品(GSS-19)进行分析质量控制,数字修约遵从 GB 8170 规则。

作物成熟后,收获全部植株样品,用自来水冲洗去除植物表面的泥土,然后用蒸馏水多次冲洗,沥干水分。将植株分为根、茎叶和籽粒三部分,常温下风干,用 1%电子天平测定其生物量,并将可食部分磨碎,测定重金属含量。作物可食部分 Cd、Hg、Pb 含量分析采用硝酸-双氧水消解法(GB/T 5009—2010)^[17],测定方法同上。采用植物标准样品(GSB-2、3、4 国家标准参比物质)进行质控。

1.5 数据处理

农产品安全性评价采用单项污染指数法,单项污染指数表示某单项污染物对农产品污染影响的程度,该法只用 1 种重金属元素作为评价指标,可直接了解农作物中重金属含量与评价标准之间的关系^[18]。

农产品单项污染指数计算公式:

$$P_{i\text{安全}} = \frac{C_{i\text{农产品}}}{S_{i\text{农产品}}}$$

式中: $P_{i\text{安全}}$ 为农产品中重金属 i 的安全性评价指数; $C_{i\text{农产品}}$ 为农产品中重金属 i 的实测值,mg·kg⁻¹; $S_{i\text{农产品}}$ 为农产品中重金属 i 的卫生标准值,mg·kg⁻¹。

评价标准值按照食品安全国家标准《食品中污染物限量》(GB 2762—2012)执行^[19](表 2)。

$P_{i\text{安全}} \leq 1.0$ 农产品是安全的; $P_{i\text{安全}} > 1.0$ 农产品受到污染,超过农产品卫生标准值。

数据采用 Excel 软件进行常规分析,并用 Duncan 氏新复极差法进行差异显著性测验。用 SPSS 19.0 软件进行相关性分析。

重金属富集系数=植物某一部位重金属含量(mg·kg⁻¹)/土壤中重金属含量(mg·kg⁻¹)

2 结果与分析

2.1 不同作物可食部分重金属的含量

如图 1 所示,Cd 污染土壤上蔬菜类作物可食部分 Cd 含量普遍偏高,且极显著高于空白对照;其次是油料作物,其中胡麻籽粒中 Cd 含量极显著高于蔬菜类作物;粮食作物对 Cd 污染敏感性较低。同一类别不同作物对 Cd 吸收也存在差异,蔬菜类作物中芹菜对 Cd 的吸收量高于娃娃菜,但差异不显著。油料作物中胡麻籽粒 Cd 含量最高,且极显著高于所有供试作物,其次是大豆和油菜籽,但差异不显著。粮食类

表 2 食品中重金属限量标准值
Table 2 Limit the quantity of heavy metals in the food

污染物类型	食品类别(名称)	农作物名称	限量值/mg·kg ⁻¹
Cd	谷物、叶菜类蔬菜、豆类、芹菜	谷子、娃娃菜、芹菜、大豆、啤酒大麦	0.2
	小麦、玉米、块根和块茎蔬菜、油料	小麦、玉米、马铃薯、胡麻、油菜籽	0.1
Hg	谷物、小麦、玉米	小麦、玉米、马铃薯、胡麻、油菜籽、大豆、谷子、啤酒大麦	0.02
	蔬菜	娃娃菜、芹菜	0.01
Pb	叶菜类蔬菜	娃娃菜、芹菜	0.3
	谷物、小麦、玉米、豆类蔬菜、薯类、大豆	小麦、玉米、马铃薯、谷子、胡麻、油菜籽、啤酒大麦、大豆	0.2

作物马铃薯 Cd 含量最高,显著高于谷子、啤酒大麦和玉米;其次是小麦,显著高于啤酒大麦和玉米籽粒中 Cd 含量,与谷子差异不显著;谷子、啤酒大麦、玉米籽粒中 Cd 含量差异不显著,其中玉米籽粒 Cd 含量最低,较空白对照差异不显著。由此可见,蔬菜类作物对 Cd 吸收较大,胡麻 Cd 含量极显著高于其他油料作物,油菜籽、大豆与粮食作物相比差异不显著。

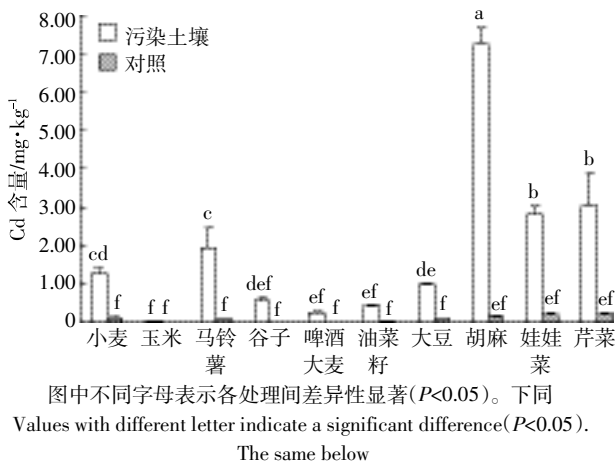
如图 2 所示,Hg 污染土壤上蔬菜类作物可食部分 Hg 含量较高,极显著高于其他类别作物和空白对照;其次是粮食作物,油料作物对 Hg 污染敏感性最低,但二者差异不显著。同一类别不同作物对 Hg 吸收也存在一定差异,蔬菜类作物中娃娃菜对 Hg 的吸收量高于芹菜,但差异不显著。油料作物中胡麻籽粒 Hg 含量最高,且极显著高于油菜籽,与大豆差异不显著;大豆高于油菜籽,但差异不显著。粮食类作物中马铃薯 Hg 含量最高,极显著高于玉米,与其他粮食作物差异不显著;啤酒大麦、谷子和小麦差异不显著;玉米籽粒 Hg 含量最低,较空白对照差异不显著。由此可见,蔬菜类作物对 Hg 吸收较强,油料作物中胡麻对 Hg 的吸收较强,粮食作物中马铃薯对 Hg 的吸收较

强。在 Hg 污染土壤上 10 种作物可食部分 Hg 含量均高于空白对照,其中娃娃菜、芹菜、胡麻和马铃薯均达到极显著水平,其他作物差异不显著;粮食作物中玉米 Hg 含量最低,油料作物中油菜籽 Hg 含量最低。

如图 3 所示,Pb 污染土壤上蔬菜类作物可食部分 Pb 含量较高,极显著高于其他类别作物和空白对照;其次是粮食作物和油料作物,但粮食作物和油料作物差异不显著。同一类别不同作物对 Pb 吸收也存在一定差异,蔬菜类作物中娃娃菜对 Hg 的吸收量极显著高于芹菜。油料作物中胡麻籽粒 Hg 含量最高,其次为油菜籽和大豆,但三者差异不显著。粮食类作物中谷子 Pb 含量最高,其次是马铃薯、啤酒大麦、小麦和玉米,但 5 种作物差异均不显著。与空白对照比较,娃娃菜和芹菜在 Pb 胁迫下,可食部分 Pb 含量极显著高于空白对照,其他作物与空白对照比较,差异不显著。由此可见,蔬菜对 Pb 的吸收能力较强,油料作物中胡麻对 Pb 的吸收能力较强,粮食作物中谷子和马铃薯对 Pb 的吸收能力较强。在所有供试作物中,玉米和大豆对 Pb 的吸收能力较弱。

2.2 不同作物可食部分对重金属的富集性

供试的 3 类 10 种作物中,同一作物可食部分 Cd 的富集系数最高,明显高于 Hg 和 Pb(表 3)。按作物



图中不同字母表示各处理间差异性显著($P<0.05$)。下同
Values with different letter indicate a significant difference($P<0.05$). The same below

图 1 10 种农产品中 Cd 含量
Figure 1 Concentrations of Cd in ten different plants of agriculture products

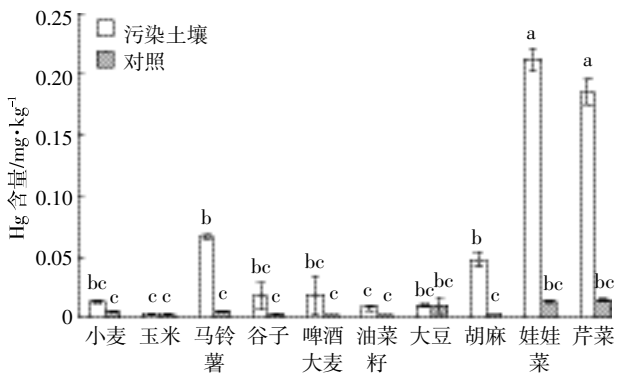


图 2 10 种农产品中 Hg 含量
Figure 2 Concentrations of Hg in ten different plants of agriculture products

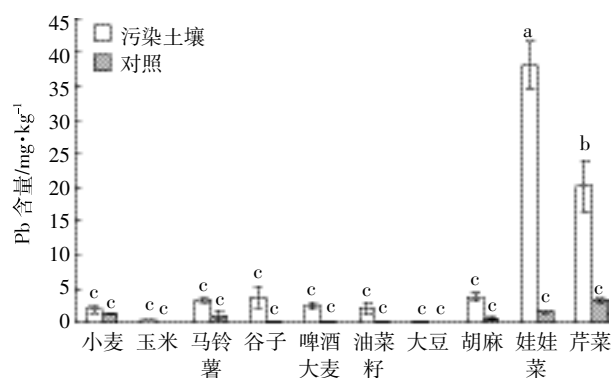


图3 10种农产品中Pb含量

Figure 3 Concentrations of Pb in ten different plants of agriculture products

表3 农产品中重金属富集系数

Table 3 Bioconcentration coefficient of heavy metals in ten different crops

作物类型	作物名称	Cd 富集系数	Hg 富集系数	Pb 富集系数
粮食作物	小麦	0.41±0.05	0.003±0.000 2	0.004±0.001
	玉米	0.02±0.01	0.001±0.000 1	0.001±0.000 1
	马铃薯	0.64±0.18	0.016±0.006 2	0.008±0.001
	谷子	0.18±0.03	0.004±0.002 7	0.009±0.004
	啤酒大麦	0.08±0.01	0.005±0.003 8	0.006±0.001
油料作物	油菜籽	0.13±0.01	0.002±0.000 4	0.005±0.002
	大豆	0.31±0.01	0.002±0.000 3	0.001±0.000 1
	胡麻	2.39±0.14	0.003±0.000 1	0.009±0.006
蔬菜类	娃娃菜	0.94±0.06	0.052±0.022 9	0.091±0.032
	芹菜	1.00±0.29	0.045±0.017 2	0.048±0.009

类型分析,Cd 污染土壤上,蔬菜类作物对Cd的富集系数最大,油料作物次之,粮食作物最小;Hg和Pb污染土壤上,蔬菜类作物的富集系数最大,粮食作物次之,油料作物最小。按作物品种分析,Cd污染土壤上,胡麻籽粒Cd的富集系数最高,为2.39,玉米籽粒Cd的富集系数最低,为0.02;Hg和Pb污染土壤上,娃娃菜Hg和Pb的富集系数最高,分别为0.052和0.091,玉米籽粒Hg和Pb的富集系数最低,均为0.001。由此可见,Cd、Hg、Pb污染土壤上,娃娃菜、芹菜和胡麻对重金属的富集能力较高,玉米和啤酒大麦的富集能力较低。

2.3 农产品质量安全评价

根据食品安全国家标准《食品中污染物限量》(GB 2762—2012)中限量值,采用单因子指数法对农产品质量安全进行评价,结果如表4所示。

在Cd重度污染土壤上,10种作物可食部分 P_{Cd}

表4 农产品质量安全单因子评价指数

Table 4 Single factor evaluation index for quality and safety of agricultural products

作物类型	作物名称	P_{Cd} 安全	P_{Hg} 安全	P_{Pb} 安全
粮食作物	小麦	12.5±1.39	0.60±0.05	8.91±2.24
	玉米	0.47±0.07	0.15±0.02	0.92±0.09
	马铃薯	19.3±5.42	3.24±1.26	16.0±2.13
	谷子	2.76±0.47	0.89±0.54	18.3±8.41
	啤酒大麦	1.25±0.16	0.92±0.79	11.9±2.63
油料作物	油菜籽	3.96±0.37	0.41±0.08	10.1±4.31
	大豆	4.78±0.19	0.44±0.06	0.74±0.05
	胡麻	72.5±4.36	0.56±0.01	18.8±13.5
蔬菜类	娃娃菜	14.2±0.86	21.2±9.43	127.0±45.3
	芹菜	15.1±4.41	18.5±7.07	67.1±13.2

在0.47~72.5之间。从作物类型上来看,蔬菜类作物污染指数最大,油料作物次之,粮食作物最小。按作物分析,除玉米籽粒Cd污染指数小于1,未受到污染外,其他农产品Cd污染指数均大于1,出现不同程度的污染。胡麻籽粒污染指数最高,为72.5,污染程度最为严重,显著高于其他农产品;其次为马铃薯、芹菜、娃娃菜和小麦,污染指数均大于10。油菜籽、啤酒大麦、大豆和谷子Cd污染指数较低,但仍超过农产品卫生标准值,农产品中Cd含量超标。

在Hg重度污染土壤上, P_{Hg} 值在0.15~21.2之间。从作物类型分析,蔬菜作物全部超过食品质量标准限量值,在三类作物中超标最严重;粮食作物中只有马铃薯块茎中Hg含量超标,油料作物中均未出现Hg含量超标现象。从作物品种分析,娃娃菜、芹菜和马铃薯Hg污染指数分别为21.2、18.5和3.24,农产品受到Hg污染;其他农产品质量安全指数均小于1,农产品是安全的,玉米污染指数最小。

在Pb重度污染土壤上, P_{Pb} 值在0.74~127.0之间。从作物类型分析,蔬菜作物全部超过食品质量标准限量值,在三类作物中超标最严重;按作物品种分析,大豆和玉米Pb污染指数小于1,Pb含量未超标,农产品是安全的;其他作物Pb污染指数均大于1,出现不同程度的污染,其中娃娃菜Pb污染指数最高,为127.0,污染程度最为严重,显著高于其他农产品;其次为芹菜,污染指数为67.1;胡麻、谷子、马铃薯、啤酒大麦、油菜籽、小麦污染指数相对较低,但仍超过农产品卫生标准值,农产品中Pb含量超标。

3 讨论

对重金属污染土壤的治理方法包括物理措施、化

学方法及生物技术等,但这些方法在有效性、持久性及经济性方面难以达到预期效果^[20]。通过评价比较不同农作物吸收、积累重金属的能力,调节农作物种植结构,可以有效地防止重金属对农产品的污染,降低农产品中重金属污染风险。作物吸收重金属主要取决于作物本身的遗传因素和外界的环境条件^[21-22]。作物对重金属的吸收能力通过富集系数(Bioconcentration Coefficient, BCF)量化表现,反映植物对重金属富集程度的高低或富集能力的强弱^[23-25]。

研究发现,3类10种作物可食部分对Cd富集能力表现为蔬菜>油料作物>粮食作物,对Hg、Pb富集能力表现为蔬菜>粮食作物>油料作物,同一类型作物(除玉米和大豆外)对不同重金属吸收能力表现为Cd>Pb>Hg。杨晖等^[26]研究发现,茎叶类蔬菜重金属富集能力高于禾谷类,同时供试的7种作物对土壤中Cd的吸收能力明显大于Pb;蔬菜对不同重金属富集的规律是Cd>Zn、Cu>Pb、Hg、As、Cr^[27];小麦籽粒对土壤重金属富集能力的大小顺序均为Cu>Cd>Zn>Pb>Cr^[28];胡麻对重金属Cd的吸收明显高于Pb^[29]。这与本研究结果相同,说明土壤中的Cd更易被作物吸收和转运,容易在可食部分中累积。

由于不同作物重金属富集基因型不同,其Cd、Hg、Pb的吸收富集能力也存在较大差异。蔬菜作物中,芹菜对Cd的敏感性显著高于娃娃菜,与顾燕青等^[30]研究结果相同,而在Hg、Pb污染土壤上,娃娃菜的重金属富集能力高于芹菜。粮食作物对Cd的吸收能力为马铃薯>小麦>谷子>啤酒大麦>玉米,对Hg的吸收表现为马铃薯>啤酒大麦>谷子>小麦>玉米,对Pb的吸收表现为谷子>马铃薯>啤酒大麦>小麦>玉米。马铃薯对重金属的吸收显著强于其他粮食作物,主要是因为马铃薯可食部位为块茎,其他粮食作物可食部位为籽粒,植物茎部较籽粒更易富集重金属;玉米籽粒对重金属的富集能力最低,与Florijn等^[31]的结论一致,玉米生物量大是典型的重金属富集作物^[32],但重金属主要富集在玉米秸秆中。油料作物对Cd的吸收表现为胡麻>大豆>油菜籽,对Hg和Pb的吸收表现为胡麻>油菜籽、大豆。研究发现胡麻是重金属富集作物^[33],其在重金属污染土壤上耐性和富集性高,与本研究结论一致。油菜籽的重金属富集能力也较强^[34],但主要富集部位为叶片。本试验在Cd、Hg、Pb胁迫条件下,不同类别作物可食部分对重金属的吸收表现出明显的差异,同一种类别作物,其基因型的差异也较大,同时也因农艺措施及环境条件的变化表现出不同

的特性,吸收重金属的能力也不同。如何保证筛选出的某类农作物对特定重金属的遗传功能稳定发挥,往往受诸多因素影响,因而尚有很多工作要做。

农产品产地土壤环境重金属污染问题的出现,极有可能导致农产品质量安全问题的发生,并通过食物链最终在人体内蓄积而危害人类生命与健康。农产品质量安全风险评估是农产品质量安全监管工作推进到一定程度的客观需要和必然选择^[35]。本试验中3类10种作物可食部分对Cd、Hg、Pb等重金属的累积情况及农产品质量安全的评价研究表明:娃娃菜、芹菜、胡麻对重金属的敏感性最强,具有较强的吸收和富集能力,也是重金属最容易超标的食用性农产品。玉米对重金属的敏感性最弱,吸收和富集能力较小,是10种作物中超标率最低的农作物。因此,为保证农产品质量安全,必须对娃娃菜、芹菜、胡麻产地土壤及农产品进行定期安全检测,对农作物产地重金属含量背景值较高或已存在重金属污染的低风险区进行种植业结构调整,将胡麻、娃娃菜、芹菜、马铃薯等对Cd、Hg、Pb富集能力较强的作物调整为玉米等重金属富集能力较低的作物,以降低农产品中重金属含量且不影响农产品的生产,但在实际生产应用中,仍然需要通过大田试验验证。

4 结论

(1)蔬菜对重金属的敏感性最高,在Cd、Pb、Hg污染土壤上应尽量避免种植蔬菜作物,尤其是根茎叶类蔬菜;油料作物Cd的富集能力较强,粮食作物对Pb、Hg的富集能力较强,针对不同土壤污染物状况,适当调整油料作物和粮食作物的种植。

(2)同一作物可食部分对Cd的富集能力显著高于Hg、Pb,Cd污染土壤对农产品质量安全具有更大的潜在威胁。

(3)在供试的10种作物农产品中,Cd胁迫下有9种作物超标,Pb胁迫下有8种作物超标,Hg胁迫下有3种作物超标。Cd和Pb比Hg更容易造成农产品中重金属超标。

(4)在土壤Cd、Hg、Pb重度污染区域进行农作物种植结构调整时,综合评价:在Cd污染区可优先选择种植玉米做验证;在Hg污染区可优先选择种植玉米和油菜籽做验证;在Pb污染区可优先选择种植玉米和大豆做验证。因此,玉米可作为甘肃省农产品产地土壤重金属污染防治中低风险区域种植业结构调整的首选作物。

参考文献:

- [1] 梁尧, 李刚, 仇建飞, 等. 土壤重金属污染对农产品质量安全的影响及其防治措施[J]. 农产品质量与安全, 2013, 21(3): 9-14.
LIANG Yao, LI Gang, QIU Jian-fei, et al. Effect of soil heavy metal pollution on quality and safety of agricultural Products and its prevention and control measures[J]. *Quality and Safety of Agro-Products*, 2013, 21(3): 9-14.
- [2] 环境保护部和国土资源部发布全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. 北京: 环境保护部, 2014.[2014-04-17]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm.
Ministry of Environmental Protection and the Ministry of Land and Resources issued a national survey of soil pollution bulletin[EB/OL]. Beijing: Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, 2014.[2014-04-17]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm.
- [3] 刘凤枝, 师荣光, 徐亚平, 等. 耕地土壤重金属污染评价技术研究: 以土壤中铅和镉污染为例[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(2): 422-426.
LIU Feng-zhi, SHI Rong-guang, XU Ya-ping, et al. The study of assessment technology for farmland soil heavy metal pollutions[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(2): 422-426.
- [4] 方风满, 汪琳琳, 谢宏芳, 等. 芜湖市三山区蔬菜中重金属富集特征及健康风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(8): 1471-1476.
FANG Feng-man, WANG Lin-lin, XIE Hong-fang, et al. Enrichment characteristic and health risk assessment of heavy metals in vegetables in Sanshan District, Wuhu City, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(8): 1471-1476.
- [5] Su Y H, Mc Grath S, Zhao F J. Rice is more efficient in arsenite uptake and translocation than wheat and barley[J]. *Bio Metals*, 2010, 328(1): 27-34.
- [6] 赵勇, 李红娟, 孙治强. 土壤-蔬菜 Cd 污染相关性分析与土壤污染阈限值研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 149-153.
ZHAO Yong, LI Hong-juan, SUN Zhi-qiang. Correlation analysis of Cd pollution in vegetables and soils and the soil pollution threshold[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(7): 149-153.
- [7] Ro Mkens P F A M, Guo H Y, Chu C L, et al. Prediction of cadmium uptake by brown rice and derivation of soil-plant transfer models to improve soil protection guidelines[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157(8/9): 2435-2444.
- [8] Norton G J, Islam M R, Duan G L, et al. Arsenic shoot-grain relationships in field grown rice cultivars[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(4): 1471-1477.
- [9] 李正文, 张艳玲, 潘根兴, 等. 不同水稻品种籽粒 Cd、Cu 和 Se 的含量差异及其人类膳食摄取风险[J]. 环境科学, 2003, 25(3): 112-115.
LI Zheng-wen, ZHANG Yan-ling, PAN Gen-xing, et al. Grain content of Cd, Cu and Se by 57 rice cultivars and the risk significance for human dietary uptake[J]. *Environmental Science*, 2003, 25(3): 112-115.
- [10] Chuan M C, Shu G Y, Liu J C. Solubility of heavy metals in a contaminated soil: Effects of redox potential and pH[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1996, 90(3/4): 543-556.
- [11] Miao S Y, Delaune R D, Jugsujinda A. Influence of sediment redox conditions on release/solubility of metals and nutrients in a Louisiana Mississippi River deltaic plain freshwater lake[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 371(1/2/3): 334-343.
- [12] 李裕, 王刚, 王绍明, 等. 甘肃中部旱农耕作区生产绿色食品可行性分析[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(2): 164-168.
LI Yu, WANG Gang, WANG Shao-ming, et al. Feasibility to develop and produce green foods in the dryland farming regions of central Gansu[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(2): 164-168.
- [13] 南忠仁, 李吉均, 张建明, 等. 白银市区土壤作物系统重金属污染分析与防治对策研究[J]. 环境污染与防治, 2002, 24(3): 170-173.
NAN Zhong-ren, LI Ji-jun, ZHANG Jian-ming, et al. Research on the soil-crop system pollution of trace metals and its control strategies in the suburb of Baiyin City[J]. *Environment Pollution & Control*, 2002, 24(3): 170-173.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 309-311.
LU Ru-kun. Analytical method of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 309-311.
- [15] 国家环境保护总局. GB/T 17141—1997 土壤质量 铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
State Environmental Protection administration. GB/T 17141—1997 Soil quality determination of lead, cadmium: Graphite furnace atomic absorption spectrometry[S]. Beijing: China Standards Press, 1997.
- [16] 国家环境保护总局. GB/T 17136—1997 土壤质量 总汞的测定 冷原子吸收分光光度法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
State Environmental Protection administration. GB/T 17136—1997 Soil quality determination of total mercury: Cold atomic absorption spectrometry[S]. Beijing: China Standards Press, 1997.
- [17] 中华人民共和国卫生部. GB/T 5009—2010 食品安全国家标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
Ministry of Health of the PRC. GB/T 5009—2010 National food safety standard[S]. Beijing: China Standards Press, 2010.
- [18] 中华人民共和国农业部. NY/T 395—2012 农田土壤环境质量管理技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
Ministry of Agriculture of the PRC. NY/T 395—2012 Technical rules for monitoring of environmental quality of farmland soil[S]. Beijing: China Standards Press, 2012.
- [19] 中华人民共和国卫生部. GB 2762—2012 食品中污染物限量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
Ministry of Health of the PRC. GB 2762—2012 Maximum levels of contaminants in foods[S]. Beijing: China Standards Press, 2012.
- [20] Wang K R. Tolerance of cultivated plants to cadmium and their utilization in polluted farmland soils[J]. *Acta Biotechnology*, 2002, 22(1/2): 189-198.
- [21] 杜彩艳, 张乃明, 雷宝坤, 等. 不同玉米(*Zea mays*)品种对镉锌积累与转运的差异研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(1): 16-23.
DU Cai-yan, ZHANG Nai-ming, LEI Bao-kun, et al. Differences of cadmium and zinc accumulation and translocation in different varieties of *Zea mays*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(1): 16-23.

- 16-23.
- [22] Gareth J H, Guilan D, Tapash D, et al. Environmental and genetic control of common cultivars grown in contaminated sites across Bangladesh, China and India[J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, 43(21):8381-8386.
- [23] Zu Y Q, Li Y, Christian S, et al. Accumulation of Pb, Cd, Cu and Zn in plants and hyperaccumulator choice in lanping lead-zinc mine area[J]. *China Environ Int*, 2004, 30(4):567-576.
- [24] Salt E D, Blaylock M, Kumar N P B A, et al. Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants[J]. *Nature Biotechnology*, 1995, 13(5):468-474.
- [25] 李玉双, 孙丽娜, 孙铁珩, 等. 超富集植物叶用红苋菜 (*Beta vulgaris* var. *cicla* L.) 及其对 Cd 的富集特征[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4):1386-1389.
- LI Yu-shuang, SUN Li-na, SUN Tie-heng, et al. Cadmium hyperaccumulator *Beta vulgaris* var. *cicla* L. and its accumulating characteristics[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4):1386-1389.
- [26] 杨 晖, 梁巧玲, 赵 鹏, 等. 7 种蔬菜型作物重金属积累效应及间作鸡眼草对其重金属吸收的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6):209-214.
- YANG Hui, LIANG Qiao-ling, ZHAO Li, et al. The cumulative effect on heavy metal of seven kinds of vegetable crops and effects on heavy metal absorption of intercropping *kummerowia striata*[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2012, 26(6):209-214.
- [27] 汪雅谷, 章国强. 蔬菜区土壤镉污染及蔬菜种类选择[J]. 农业环境保护, 1995, 14(4):7-10.
- WANG Ya-gu, ZHANG Guo-qiang. Cd pollution in vegetable soil and vegetable species selection[J]. *Agro-Environmental Protection*, 1995, 14(4):7-10.
- [28] 李 剑, 马建华, 宋 博. 郑汴路路旁土壤-小麦系统重金属积累及其健康风险评价[J]. 植物生态学报, 2009, 33(3):624-628.
- LI Jian, MA Jian-hua, SONG Bo. Heavy metal accumulation and health risk assessment in the roadside soil-wheat system along Zhengzhou-kaifeng highway, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(3):624-628.
- [29] 李 勃, 李国梁, 曾正中, 等. 污泥改性黄土对胡麻生长及 Cd、Ni、Pb 的吸收实验[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(9):65-70.
- LI Bo, LI Guo-liang, ZENG Zheng-zhong, et al. Effects of loess modified by sludge on flax growth and accumulation of Cd, Ni and Pb: A pot experiment[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 39(9):65-70.
- [30] 顾燕青, 顾优丽, 白 倩, 等. 杭州市菜地蔬菜对土壤重金属的富集特性研究[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(4):401-410.
- GU Yan-qing, GU You-li, BAI Qian, et al. Heavy metals accumulation characteristics of vegetables in Hangzhou City, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, 32(4):401-410.
- [31] Florijn P J, van Beusichem M L. Uptake and distribution of cadmium in maize inbred lines[J]. *Plant and Soil*, 1993, 150(1):25-32.
- [32] 周振民, 朱彦云. 土壤重金属污染大生物量植物修复技术研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(6):26-29.
- ZHOU Zhen-min, ZHU Yan-yun. Research progress of phytoremediation technology of large biomass plant[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2009, 28(6):26-29.
- [33] 王玉富, 郭 媛, 汤清明, 等. 亚麻修复重金属污染土壤的研究与应用[J]. 作物研究, 2015, 29(4):443-448.
- WANG Yu-fu, GUO Yuan, TANG Qing-ming, et al. Study progress in flax remediation of soil contaminated by heavy metals and its application prospect[J]. *Crop Research*, 2015, 29(4):443-448.
- [34] 彭歆琼. 芝麻与蓖麻对土壤重金属的吸收积累特性、修复潜力及提油后粕饼的脱毒研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2015.
- PENG Xin-qiong. Accumulation and remediation potential of heavy metals by cole, sesame and castor and their detoxification of heavy metal from oil meals[D]. Changsha: Hunan Agriculture University, 2015.
- [35] 金发忠. 我国农产品质量安全风险评估的体系构建及运行管理[J]. 农产品质量与安全, 2014(3):3-11.
- JIN Fa-zhong. Building and operation management of agro-product quality and safety risk assessment system in China[J]. *Quality and Safety of Agro-Products*, 2014(3):3-11.