

doi:10.3969/j.issn.2095-1035.2024.07.002

山西省马铃薯主产区土壤重金属含量 状况评价与膳食暴露评估

刘俐君 王国桢* 李丹 董琳 李敏
王萍 梁聪杰 何锦惠 马瑞莹 郭一

(山西省检验检测中心,太原 030025)

摘要 为探明山西马铃薯种植区域土壤重金属污染状况,并对马铃薯进行重金属摄入健康风险评价。选取山西省境内马铃薯优势产业基地县(区)作为调查研究对象,用电感耦合等离子体质谱仪测定马铃薯产地土壤及产品铅、镉、砷、铬、镍、铜、锌等七种重金属元素含量状况,并采用单因子指数法、内梅罗综合指数法和潜在生态危害指数法对土壤中重金属进行生态风险评价,采用目标危险系数法对马铃薯进行重金属摄入健康风险评价。结果表明,山西省马铃薯主产区土壤中 7 种重金属单项污染指数均小于 1,综合污染指数小于 0.5,潜在生态危害为轻微,土壤环境质量总体属于非污染水平,成人和儿童因食用马铃薯而摄入重金属的健康风险指数均小于 1。山西省马铃薯主产区土壤中重金属污染程度较低,而马铃薯中重金属的残留对人体健康存在隐患,建议制定预防性手段,加强对马铃薯及其他蔬菜等土壤中重金属的跟踪与监测,确保农产品产地环境质量,从而确保农产品质量安全。

关键词 马铃薯;重金属;膳食暴露;风险评估

中图分类号:O657.63 文献标志码:A 文章编号:2095-1035(2024)07-0866-09

Evaluation of Soil Heavy Metal Content and Dietary Exposure in the Main Potato Production Areas of Shanxi Province

LIU Lijun, WANG Guozhen*, LI Dan, DONG Lin, LI Min, WANG Ping,
LIANG Congjie, HE Jinhui, MA Ruiying, GUO Yi

(Inspection and Testing Center of Shanxi Province, Taiyuan, Shanxi 030025, China)

Abstract For exploring the heavy metal pollution in the soil of potato planting areas in Shanxi, and conducting a health risk assessment of heavy metal intake in potatoes. In this study, the advantageous potato industry base counties (districts) in Shanxi was selected as research objects and analyzed the contents of seven heavy metals by ICP-MS, including Pb, Cd, As, Cr, Ni, Cu and Zn, in the soil of potato production areas and potato products. The ecological risk assessment of heavy metals in soil was carried out by using single factor index method, Nemerow comprehensive index method and potential ecological harm

收稿日期:2023-10-11 修回日期:2024-02-07

基金项目:山西省重点研发计划项目(201903D221017);食品药品安全防控山西省重点实验室基金资助项目(202204010931006)

作者简介:刘俐君,女,高级农艺师,主要从事农产品及产地环境中重金属的检验检测与风险分析研究。E-mail:251012422@qq.com

* 通信作者:王国桢,女,正高级农艺师,主要从事农产品与环境质量安全研究。E-mail:12117917@qq.com

引用格式:刘俐君,王国桢,李丹,等. 山西省马铃薯主产区土壤重金属含量状况评价与膳食暴露评估[J]. 中国无机分析化学, 2024, 14(7):866-874.

LIU Lijun, WANG Guozhen, LI Dan, et al. Evaluation of Soil Heavy Metal Content and Dietary Exposure in the Main Potato Production Areas of Shanxi Province[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2024, 14(7):866-874.

index method. the health risk of heavy metal intake in potatoes was assessed using target hazard quotient. The results showed that the single pollution index of 7 heavy metals in soil of main potato producing areas in Shanxi province was less than 1, and the comprehensive pollution index was less than 0.5. The potential ecological harm was slight, soil environmental quality belonged to non-pollution level in general. The health risk index of heavy metals ingested by adults and children due to potato consumption was less than 1. The pollution level of heavy metals in the soil of the main potato producing areas in Shanxi province was relatively low, and the residue of heavy metals in potatoes posed a hidden danger to human health. It is recommended to develop preventive measures, strengthen the tracking and monitoring of heavy metals in soil such as potatoes and other vegetables to ensure the environmental quality of agricultural product production areas, and thus ensure the quality and safety of agricultural products.

Keywords potatoes; heavy metals; dietary exposure; risk evaluation

马铃薯是世界第四大重要的粮食作物。山西省是马铃薯传统种植区域,马铃薯品质在全国具有一定的特色和优势,被《中国马铃薯优势区域布局规划》(2008—2015年)^[1]列为全国马铃薯种薯、加工用薯和鲜食用薯生产的主产区和优势区。然而农田土壤作为根茎类作物——马铃薯生产的第一要素,其质量的好坏、优劣不仅关系到马铃薯的数量安全,而且影响到其质量安全,从而影响到人类的健康^[2-3]。目前,我国大部分地区的土壤重金属污染问题比较明显,已经慢慢成为了影响农产品产地环境质量的重要因素,进而影响了农产品质量问题^[4]。近些年曝出的“镉大米”事件、重金属污染蔬菜事件,引起社会各界对重金属的污染更广泛的关注^[5-7]。重金属污染物还具有隐蔽性、难降解、移动性差和易被富集等特点^[8],不仅会破坏土壤肥力、影响耕地质量,农作物对土壤重金属的吸收和富集还会导致作物产量减少、农产品品质下降^[9]。我省马铃薯生产区开展马铃薯种植多年,种植模式和种植品种的单一使得土壤中某些重金属元素在马铃薯中的积累富集,重金属污染的风险也相应增加,再加之山西省曾长期处于能源重化工基地的地位,土壤污染问题尤其是重金属类的污染不容忽视。

本文选取了山西省境内大同市、朔州市、忻州市、吕梁市、太原市等五个地级市的阳高县、天镇县、右玉县、平鲁区、静乐县、神池县、宁武县、岢岚县、定襄县、岚县、方山县、临县、娄烦县等13个马铃薯优势产业基地县(区)作为调查研究对象,采集土壤样品及马铃薯样品262个,采用电感耦合等离子体质谱仪测定马铃薯产地土壤及产品中的铅、镉、砷、铬、镍、铜、锌等七种重金属元素,并采用单因子指数法、内梅罗综合指数法和潜在生态危害指数法对土壤中重金属进行生态风险评价及污染源分析,采用目标

危险系数法对马铃薯进行重金属摄入健康风险评估。

1 材料与方法

1.1 试剂与仪器

硝酸(优级纯,德国Merk公司),氢氟酸(优级纯,北京化工厂),高氯酸(优级纯,北京化工厂),铅、镉、砷、铬、镍、铜、锌元素标准溶液(高纯试剂,国家有色金属及电子材料分析测试中心)。

iCAPQ电感耦合等离子体质谱仪(美国赛默飞公司)、GZX-9240MBE电热鼓风干燥箱(上海博迅公司)、PT60电热石墨消解仪(普立泰科公司)、MS-104S电子分析天平(METTLER TOLEDO)。

1.2 样品的采集与制备

选择山西省境内大同市、朔州市、忻州市、吕梁市、太原市等五个地级市的阳高县、天镇县、右玉县、平鲁区、静乐县、神池县、宁武县、岢岚县、定襄县、岚县、房山县、临县、娄烦县等13个马铃薯优势产业基地县(区)的马铃薯主产区作为调查研究对象。

在马铃薯即将进入成熟采收期之前,分组前往选定的马铃薯主产区现场采集土壤及马铃薯样品。在马铃薯的生长地块上,按照随机多点混合的原则进行采集,采集地表0~20 cm的土壤样品,每个样品均由邻近相同类型的10个点的土壤样品均匀混合而成,用四分法缩分至1 kg,编好样品编号带回实验室。将带回的土壤样品置于风干架上自然风干,除去土样中的石子和动植物残体等异物,再用四分法缩分至约100 g,用木棒碾压,通过2 mm尼龙筛(待测pH值),混匀,再将土样研磨至全部通过100目(孔径0.149 mm)尼龙筛(待测重金属元素),混匀后存放于阴凉干燥处备用。

同时将现场采集到的马铃薯鲜样装入干净的聚

乙烯塑料袋中编号、封口,并尽快运送回实验室。带回的马铃薯样品先用自来水洗去样品表面附着的泥土和污物等杂质,再用三级水冲洗样品表面3次,用干净的纱布吸干样品表面残余水分后,用刀切碎并四分缩分至100 g左右后再进行匀浆处理,最后将均匀的浆状鲜样装入干净的聚乙烯塑料样品杯中冷冻待测。

1.3 样品的消解

土壤样品的前处理采用电热石墨消解的方法^[10-11]。准确称取0.2~0.3 g(精确至0.000 1 g)土壤样品于50 mL聚四氟乙烯消解管中,用少许水润湿后加入5 mL硝酸、3 mL氢氟酸、1 mL高氯酸加盖静置过夜。次日将聚四氟乙烯消解管放入电热石墨消解仪中,130 ℃加热2 h,再升温至150 ℃加热2 h,开盖飞硅1 h后继续升温至180 ℃赶酸,待蒸发至内容物呈黄豆粒大小黏稠状时,取下稍冷却,少量多次冲洗消解管盖和内壁,将溶液转移至50 mL比色管中,冷却后定容摇匀,再分取0.50 mL定容至10 mL比色管中,摇匀待测。

马铃薯样品的前处理采用高压消解法。准确称取1~2 g(精确至0.000 1 g)马铃薯样品,于50 mL聚四氟乙烯高压消解内罐中,加入5 mL硝酸,加盖静置过夜。次日旋上不锈钢外套,置于电热鼓风干燥箱中,于160 ℃加热消解4 h,冷却后取出聚四氟乙烯内罐,用少量一级水冲洗消解罐盖,并于150 ℃电热板上赶酸至黄豆粒大小。取下冷却后转移定容至50 mL比色管中,摇匀待测。

1.4 重金属含量的测定

1.4.1 标准曲线的配制

分别移取国家标准储备液Pb(1 000 mg/L)、Cd(1 000 mg/L)、As(1 000 mg/L)、Cr(1 000 mg/L)、Ni(1 000 mg/L)各1.00 mL,Cu(1 000 mg/L)、Zn(1 000 mg/L)各2.00 mL于100 mL容量瓶中,用HNO₃溶液(2%)定容,此混合标准溶液的浓度分

别为Pb(10 mg/L)、Cd(10 mg/L)、As(10 mg/L)、Cr(10 mg/L)、Ni(10 mg/L)、Cu(20 mg/L)、Zn(20 mg/L)。

取一级储备液5.00 mL于100 mL容量瓶中,用HNO₃溶液(2%)定容,此混合标准溶液的浓度分别为Pb(0.5 mg/L)、Cd(0.5 mg/L)、As(0.5 mg/L)、Cr(0.5 mg/L)、Ni(0.5 mg/L)、Cu(1.0 mg/L)、Zn(1.0 mg/L),此混合标准溶液可作为二级储备液。

分别移取二级储备溶液0.10、0.50、1.00、1.50、5.00 mL于50 mL容量瓶中,用HNO₃溶液(2%)定容,此混合标准系列用于ICP-MS检测。

1.4.2 电感耦合等离子体质谱仪工作参数

电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)最佳仪器条件为:射频功率1 500 W、冷却气流量15 L/min、雾化器流量0.80 L/min、氦气流量4.8 mL/min、雾化室温度4 ℃、蠕动泵转速40 r/min、样品提取时间40 s、停留时间20 s、测量模式为碰撞池模式,测量方式为跳峰,重复次数为3次。

2 结果与分析

2.1 马铃薯产地土壤样品pH值的测定结果

由于不同酸碱度(pH值)条件的土壤重金属限量值不同,因此在测定土壤重金属含量前首先测定并统计土壤样品pH值。

测定结果发现,山西的土壤碱性比较大,除四个样品外,绝大多数土壤pH值都大于7.5。

2.2 马铃薯产地土壤样品中重金属元素含量

采用电热石墨消解-ICP-MS上机测定,对山西省境内大同市、朔州市、忻州市、吕梁市和太原市五个地市的马铃薯主产区农田土壤进行重金属元素含量的分析,每个样品做2组平行测试,每批样品同时检测一个国家标准物质土壤样品作质控样,检测结果见表1,重金属含量分布曲线见图1。

表 1 土壤样品测试结果
Table 1 The testing results of soil samples

Source of sample	Items	Elements/(mg · kg ⁻¹)						
		Pb	Cd	As	Cr	Ni	Cu	Zn
Datong city (n=24)	Content range	10.8—63.5	0.066—0.240	8.43—14.4	60.9—152	16.4—48.2	11.9—47.2	41.3—81.2
	Average value	22.7	0.113	11.3	87.4	28.1	21.1	55.6
	Standard deviation	14.0	0.033 2	1.50	25.9	10.2	10.6	12.1
Shuozhou city (n=21)	Content range	15.0—320	0.076—0.597	7.78—11.1	50.5—81.2	15.2—26.9	12.3—22.5	41.1—66.1
	Average value	41.4	0.136	9.41	63.7	19.5	16.1	51.2
	Standard deviation	65.9	0.109	0.916	6.90	2.67	2.58	7.15
Xinzhou city (n=30)	Content range	17.3—97.7	0.108—0.212	6.13—15.8	48.0—86.5	15.8—25.8	13.5—22.5	42.4—72.4
	Average value	30.3	0.144	11.4	65.8	20.5	17.2	54.2
	Standard deviation	18.5	0.027 8	1.90	7.85	2.38	2.51	7.08
Lüliang city (n=36)	Content range	11.6—22.3	0.090—0.243	6.49—12.8	42.1—63.2	19.5—29.0	13.1—22.5	40.3—90.1
	Average value	14.1	0.127	10.3	52.7	23.4	16.0	55.1
	Standard deviation	2.38	0.027 2	1.23	5.93	2.16	2.29	8.54
Taiyuan city(n=20)	Content range	12.2—64.5	0.087—0.226	10.8—16.4	54.8—79.8	18.7—25.2	14.5—179	47.7—182
	Average value	21.7	0.126	13.3	66.7	21.5	24.8	61.8
	Standard deviation	13.1	0.032 7	1.56	6.58	1.85	36.4	29.0

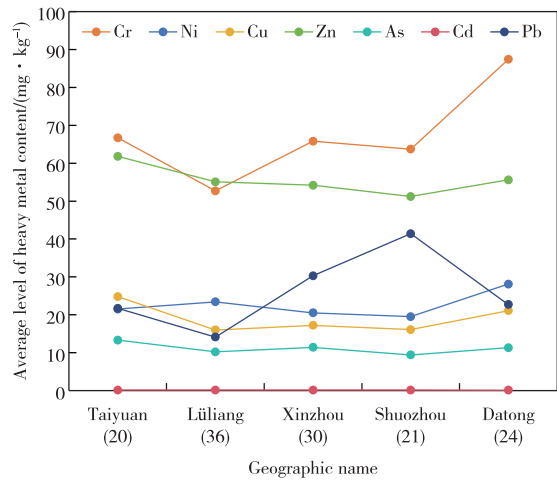


图 1 土壤重金属含量分布曲线
Figure 1 The distribution curves of heavy metal contents in soil.

从山西省境内五个地市马铃薯主产区土壤中重金属的检测结果来看,pH>7.5 的土壤中 Cr、As、Ni、Zn 的含量均小于风险筛选值,其中有一个土壤

样品 Cu 含量为 179 mg/kg 超过了 100 mg/kg 的风险筛选值,其中有一个土壤样品 Pb 含量为 320 mg/kg 超过了 170 mg/kg 的风险筛选值,小于 1 000 mg/kg 风险管制值;有一个土壤样本中 Cd 含量 0.597 mg/kg,接近风险筛选值,值得注意;pH≤7.5 的土壤中重金属的含量均小于风险筛选值。

2.3 土壤中重金属元素的污染评价

目前国内外常用于土壤中重金属评价的方法有指数法、模型指数法、基于人体健康风险评价和基于 GIS 和地统计学的评价等^[12-14],本研究主要采用指数法的单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法和潜在生态危害指数法对马铃薯主产区的土壤中重金属的污染情况进行评价。

2.3.1 单因子污染指数法

依据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》GB 15618—2018 中农用地土壤污染风险筛选值及管制值的规定,限量值见表 2。

表 2 土壤污染风险筛选值及管制值
Table 2 The risk screening values and intervention values of soil contamination

Elements	6.5< pH≤ 7.5		pH>7.5	
	Risk screening values	Risk intervention values	Risk screening values	Risk intervention values
Pb	120	700	170	1 000
Cd	0.3	3.0	0.6	4.0
As	30	120	25	100
Cr	200	1 000	250	1 300
Ni	100		190	
Cu	100		100	
Zn	250		300	

通过单因子评价,可以确定单一重金属对土壤的危害程度。单项污染指数 P_i 为土壤重金属元素 i 含量的实测值 C_i 与土壤环境质量评价标准值 S_i 的比值;其对土壤中单项污染程度的分级标准为: $P_i \leq 1.0$ 为非污染水平, $1.0 < P_i \leq 2.0$ 为轻污染水平, $2.0 < P_i \leq 3.0$ 为中污染水平, $P_i > 3.0$ 为重污染水平。实验表明: P_{Pb} 是 $0.06 \sim 1.88$, 一个样品为轻污染水平,其余所有点位均为非污染水平; P_{As} 是 $0.25 \sim 0.66$,所有点位均为非污染水平; P_{Cr} 是 $0.15 \sim 0.61$,所有点位均为非污染水平; P_{Ni} 是 $0.08 \sim 0.25$,所有点位均为非污染水平; P_{Cu} 是 $0.12 \sim 1.79$,一个样品为轻污染水平,其余所有点位均为非污染水平; P_{Zn} 为 $0.13 \sim 0.61$,所有点位均为非污染水平。综上,所调查的五个地市马铃薯主产区 131 个土壤样品中七种重金属元素含量,有两个土壤样品中铅元素和铜元素超过了土壤污染风险筛选值,为轻污染水平,其余点位的土壤均为非污染水平。

2.3.2 内梅罗综合污染指数法

内梅罗指数 $P_{\text{综}}$ 是一种兼顾极值或称突出最大值的计权型多因子环境质量指数。因其特别考虑了污染最严重的因子,并在加权过程中避免了计权系数中主观因素的影响,是应用较多的一种环境质量

指数。通过计算五个地市马铃薯主产区土壤样品的内梅罗指数 $P_{\text{综}}$ 可以判断马铃薯产地环境质量与评价标准之间的关系;一般说来, $P_{\text{综}} \leq 0.7$ 为安全, $0.7 < P_{\text{综}} \leq 1.0$ 为警戒线, $1.0 < P_{\text{综}} \leq 2.0$ 为轻度污染, $2.0 < P_{\text{综}} \leq 3.0$ 为中度污染, $P_{\text{综}} > 3.0$ 为重度污染。五地市马铃薯产地的内梅罗指数 $P_{\text{综}}$ 由大到小排列分别为太原市(0.414) > 吕梁市(0.379) > 大同市(0.361) > 忻州市(0.361) > 朔州市(0.308)。结果表明,五个地市的马铃薯主产区农田土壤未受到重金属污染,属于清洁水平,适宜发展马铃薯生产。

2.3.3 潜在生态危害指数法

潜在生态危害指数法(又称“Hakanson 法”)是由瑞典科学家 Hakanson 于 1980 年提出建立的,是一种根据重金属性质与环境行为特点,从沉积学角度对土壤或沉积物中土壤重金属污染进行评价的方法^[14]。该法不仅考虑土壤重金属含量,而且综合考虑了多元素协同作用、毒性水平、污染浓度以及环境对重金属污染敏感性等因素,是在国际上应用广泛、影响较大的评价方法之一。其中的潜在生态危害系数 E_r^i 描述某一污染物(元素)的污染程度,从低到高分 5 个等级;而综合潜在生态危害指数 RI 描述某一点多个污染物潜在生态危害系数的综合值,此值分为 4 个等级,详见表 3。

表 3 潜在生态危害评级

Table 3 The potential ecological hazard ratings

E_r^i	Pollution level	RI	Pollution level
$E_r^i < 40$	Slight ecological hazard	$RI < 150$	Slight ecological hazard
$40 \leq E_r^i < 80$	Medium ecological hazard	$150 \leq RI < 300$	Medium ecological hazard
$80 \leq E_r^i < 160$	Strong ecological hazard	$300 \leq RI < 600$	Strong ecological hazard
$160 \leq E_r^i < 320$	Very strong ecological hazard	$RI \geq 600$	Very strong ecological hazard
$E_r^i \geq 320$	Super strong ecological hazard		

通过对每一个采样点位的 E_r^i 、 RI 的计算,本研究发现不论是单独哪种重金属元素的 E_r^i 或是以 Pb、Cd、As、Cr、Ni、Cu、Zn 七种元素为主要重金属污染物的 RI 判定,五地市马铃薯主产区的农田土壤都属于轻微生态危害程度。每个地市的潜在生态危害系数 E_r^i 按元素排列分别为大同市、吕梁市: $\text{Cd} > \text{As} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{Pb} > \text{Zn}$;朔州市、忻州市: $\text{Cd} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{Zn}$;太原市: $\text{Cd} > \text{As} > \text{Cu} >$

$\text{Pb} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{Zn}$ 。而 RI 排序为:太原 > 忻州 > 朔州 > 大同 > 吕梁。

2.4 马铃薯样品中重金属元素的含量

根据已建立的 ICP-MS 样品分析方法,对山西省境内大同市、朔州市、忻州市、吕梁市和太原市五个地市采集到的马铃薯样品进行重金属元素含量的分析,每个样品做 2 组平行测试,每批样品同时检测一个国家标准物质生物样品质控样,检测结果见表 4。

表 4 马铃薯样品测试结果
Table 4 The testing results of potato samples

Source of sample	Items	Elements/(mg · kg ⁻¹)						
		Pb	Cd	As	Cr	Ni	Cu	Zn
Datong city	Content range	0.003 9—	0.000 8—	0.001 6—	0.010 1—	0.023 9—	1.15—	2.12—
		0.015 0	0.011 9	0.005 3	0.051 8	0.092 3	2.04	4.52
	Average value	0.007 7	0.003 9	0.003 2	0.021 4	0.044 1	1.58	3.01
Shuozhou city	Content range	0.004 9—	0.001 4—	0.001 4—	0.012 0—	0.007 8—	0.51—	0.97—
		0.139	0.014 7	0.006 9	0.071 2	0.275	3.70	5.45
	Average value	0.017 0	0.003 8	0.003 8	0.023 9	0.070 3	1.34	2.57
Xinzhou city	Content range	0.004 4—	0.001 1—	0.001 7—	0.008 7—	0.007 9—	0.36—	1.49—
		0.129	0.007 4	0.011	0.662	0.138	3.26	4.63
	Average value	0.017 7	0.003 4	0.004 7	0.046 3	0.038 4	1.53	2.86
Lüliang city	Content range	0.004 7—	0.001 5—	0.001 7—	0.014 4—	0.016 6—	0.79—	1.32—
		0.061 2	0.008 2	0.004 4	0.029 9	0.051 8	1.75	4.78
	Average value	0.011 2	0.005 8	0.003 4	0.024 0	0.031 2	1.41	2.71
Taiyuan city	Content range	0.004 3—	0.000 9—	0.001 7—	0.016 2—	0.032 4—	1.12—	1.47—
		0.019 0	0.004 8	0.006 9	0.058 5	0.121	2.22	4.18
	Average value	0.010 7	0.002 2	0.003 8	0.032 4	0.063 4	1.59	2.74

从山西省境内五个地市马铃薯主产区产品中重金属的检测结果来看,马铃薯中 Pb 的含量为 0.003 9~0.139 mg/kg,其中忻州市与朔州市马铃薯中铅含量的平均值相对较高,其余三个地市马铃薯中铅含量相对较低;马铃薯主产区产品中 Cd 的含量为 0.000 8~0.014 7 mg/kg,其中吕梁市马铃薯中镉含量相对较高,其他三个地市马铃薯中镉含量相差不大,太原市马铃薯中镉含量最低;马铃薯产品中 As 的含量为 0.001 4~0.011 mg/kg,其中忻州市马铃薯中砷含量相对高,其他四个地市马铃薯中砷含量相差不大,相对较低;马铃薯产品中 Cr 的含量为 0.008 7~0.662 mg/kg,其中忻州市马铃薯中铬含量相对较高,其他四个地市马铃薯中铬含量相差不大,平均含量均较低;马铃薯产品中 Ni 的含量为 0.007 8~0.275 mg/kg,其中朔州市和太原市马铃薯中的镍含量相对较高,其余三个地市马铃薯中含量均较低;马铃薯产品中 Cu 的含量为 0.36~3.70 mg/kg,其中太原市和大同市马铃薯中铜含量相对较高,其次为忻州市,吕梁市和朔州市马铃薯中铜含量较低;马铃薯产品中 Zn 的含量为 0.97~5.45 mg/kg,其中大同市马铃薯中的锌含量相对较高,接下来依次为忻州市、太原市、吕梁市、朔州市。

2.5 农产品中重金属元素的污染评价

GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》中仅规定了蔬菜中铅、镉、砷、铬的限量指标,限量值见表 5。

从山西省境内马铃薯主产区五个地市农产品中重金属的检测结果来看,马铃薯农产品中除有一个

样品的铬含量为 0.662 mg/kg 超过 0.5 mg/kg 的蔬菜限量值外,其余样品的铅、镉、砷、铬均小于限量值;其他几种元素镍、铜、锌目前没有蔬菜中判定的依据,但是从浓度含量水平来看,风险相对较低。

表 5 蔬菜中污染物限量
Table 5 The limit of pollutants in vegetables

Species	/(mg · kg ⁻¹)			
	Pb	Cd	As	Cr
Vegetables	0.2	0.1	0.5	0.5

马铃薯重金属对暴露人群健康风险评价主要采用目标危险系数法($THQ/TTHQ$)进行。

$$THQ=\frac{E_F \times E_D \times F_{IR} \times C}{R_{fd} \times W_{AB} \times T_A} \times 10^{-3}$$

$$TTHQ=\sum THQ$$

式中: E_F 为人体暴露频率,365 d/a; E_D 为人体暴露时间,a(儿童:6 a;成人:70 a); F_{IR} 为食品摄入率,g/d,参照《中国居民膳食指南 2022》中膳食结构人均薯类日摄入量 50~100 g; C 为重金属含量,mg/kg; R_{fd} 为口服参考剂量,mg/(kg · d),Pb、Cd、As、Cr、Ni、Cu、Zn 参考剂量分别为 4×10^{-3} 、 1×10^{-3} 、 5×10^{-4} 、 3×10^{-3} 、 2×10^{-2} 、 4×10^{-2} 、0.3 mg/(kg · d); W_{AB} 为平均体重,kg,儿童、成年人平均体重分别为 32.7、55.9 kg; T_A 为非致癌性平均暴露时间,365 d/a × E_D 。

单一重金属风险 $THQ < 1$,说明健康风险小; $THQ > 1$,表明对人体可能存在健康风险。复合暴露健康风险 $TTHQ \leq 1$ 时,说明重金属对人体没有显著健康风险; $TTHQ > 1$ 时,产生健康风险可能性较大; $TTHQ > 10$ 时,说明重金属对人体存在慢性

毒性作用^[15-17]。计算儿童和成人通过食用该研究区马铃薯摄入的重金属含量均值 *THQ* 和 *TTHQ*, 结果见表 6。由表 6 可知,五个地市马铃薯中重金属 *Pb*、*Cd*、*As*、*Cr*、*Ni*、*Cu* 和 *Zn* 对儿童和成年人的 *THQ* 值及 *TTHQ* 值均小于 1,表明马铃薯中以上七种重金属元素不会对人体健康产生威胁。

表 6 马铃薯中重金属的目标危险系数
Table 6 The target hazard quotient of heavy metals in potatoes

Elements	Content average values of heavy metals/(mg · kg ⁻¹)	THQ values of adults	THQ values of children
Pb	0.012 9	0.005 8	0.009 8
Cd	0.003 8	0.006 8	0.011 7
As	0.003 8	0.013 5	0.023 1
Cr	0.029 6	0.017 7	0.030 2
Ni	0.049 5	0.004 4	0.007 6
Cu	1.49	0.066 6	0.113 9
Zn	2.78	0.016 6	0.028 3
TTHQ		0.131 4	0.224 6

2.6 马铃薯对土壤中重金属的富集能力
将农产品含有的重金属含量与相应的土壤重金属含量之比定义为富集系数,富集系数 $BCF = \text{作物内重金属含量} / \text{土壤重金属含量} \times 100\%$,富集系数可以表征农产品从土壤中吸收重金属的能力^[18-19]。本研究分析的五个地市中马铃薯对土壤重金属的富集系数见表 7。

表 7 马铃薯的富集系数
Table 7 The enrichment coefficient of potatoes /%

Source of sample	Pb	Cd	As	Cr	Ni	Cu	Zn
Datong city	0.042 1	3.72	0.027 4	0.026 0	0.170	8.54	5.58
Shuozhou city	0.048 0	3.24	0.040 0	0.038 2	0.367	8.53	5.10
Xinzhou city	0.061 0	2.45	0.042 4	0.063 4	0.187	9.00	5.28
Lüliang city	0.107 8	4.62	0.032 8	0.045 5	0.133	8.81	4.92
Taiyuan city	0.062 9	1.80	0.029 0	0.048 5	0.294	9.25	4.76

由表 7 中数据可以看出,马铃薯对土壤中不同重金属元素的富集系数各不相同,富集系数越大,富集能力越强,其富集能力从大到小依次为 $Cu > Zn > Cd > Ni > Pb > Cr > As$,马铃薯对不同元素间富集系数呈数量级差异,高富集元素为 *Cu*、*Zn*,富集系数分别为 8.53%~9.25%、4.76%~5.58%,其次为 *Cd*,富集系数为 1.80%~3.72%,再次为 *Ni*,富集系数为 0.170%~0.367%,低富集元素为 *Pb*、*Cr*、*As*,富集系数分别为 0.0421%~0.0629%、0.0260%~0.0634%、0.0274%~0.0424%。

3 讨论

本次采集的马铃薯主要分布在高寒地区和吕梁山地区,主要包括了大同、朔州、忻州、吕梁、太原等地,播种面积达到全省种植面积的 80% 以上,这一区域海拔在 1 200 m 以上,无霜期短,昼夜温差较大,降雨量少,且集中在 7—8 月份,土壤多为栗钙土和灰褐土。山西省 13 个马铃薯优势产业基地县(区)的 131 个马铃薯产地土壤样品中铅、镉、砷、铬、镍、铜、锌等七种重金属元素的检测结果表明,有两

个样品分别是铜和铅元素超出风险筛选值,与 2010 年的山西省表层土壤中各元素背景值^[20] 相比较得出:铜、锌和镉元素与背景值相近,铬、砷元素含量略高于背景值,铅元素是背景值的 1.58 倍,累积较为明显。本文既充分利用了监测数据,也较全面地考虑了重金属累积对生态环境各方面的不良影响,能更好地为山西地区农田土壤的安全利用提供指导。对于不同的评价方法均可得出山西省马铃薯主产区农田土壤未受到重金属污染,但在不同评价方法中,不同地区的不同指数排序略有不同。内梅罗指数 $P_{综}$ 由大到小排列分别为太原市(0.414)>吕梁市(0.379)>大同市(0.361)>忻州市(0.361)>朔州市(0.308)。而综合潜在生态危害指数 *RI* 由大到小依次为:太原、忻州、朔州、大同、吕梁。
山西省 131 个马铃薯产品中铅、镉、砷、铬、镍、铜、锌等七种重金属元素的检测结果表明,仅有一个样品中铬含量超过 0.5 mg/kg 的蔬菜限量值,其余三个元素铅、镉、砷均未有超标样品,而另三种元素镍、铜、锌我国标准未规定限量值。与内蒙古地区马铃薯产品几种重金属元素相比较^[21],山西省除铜元

素是其近两倍以外,其余铅、镉、铬、砷、镍等元素均略低。国际上对铜的膳食参考摄入量已经制定了量值^[22],有关农产品中铜元素最高限量标准的制定应引起相关监管部门的关注。本文借鉴美国环保署(EUSEPA)提出的人体暴露健康风险评价模型,针对我国人群体质对其部分参数进行修正后应用,选取现有的适合我国人群的暴露参数进行健康风险评估,评估人体每日马铃薯摄入的重金属所带来的健康风险。结果表明:五个地市马铃薯中重金属 Pb、Cd、As、Cr、Ni、Cu 和 Zn 对儿童和成年人的 THQ 值及 TTHQ 值均小于 1,表明马铃薯中以上七种重金属元素不会对人体健康产生威胁,但对儿童的风险均高于成年人,成年人和儿童的 TTHQ 值分别为 0.131 4 和 0.224 6。

4 结论

山西省马铃薯种植区土壤重金属的分布存在不均一性,初步判断土壤中重金属来源于成土母质和农业活动影响,马铃薯种植区周边工矿企业在开采及洗选煤炭等地质资源的过程中转移的重金属可能会导致周边农用土壤中重金属含量增加,另外覆盖地膜普遍使用(农用塑料薄膜生产中使用的热稳定剂含有铅),以及含重金属元素的磷肥、复合肥的使用都会造成土壤重金属污染。而马铃薯通过根茎的吸收会产生富集,再通过食物链影响到人类的健康,因此马铃薯中重金属的残留对人体健康存在隐患,建议制定预防性手段,加强对马铃薯及其他蔬菜等土壤中重金属的跟踪与监测,确保农产品产地环境质量,从而确保农产品质量安全。

参考文献

- [1] 中国马铃薯优势区域布局规划(2008—2015 年)[J]. 农业工程技术(农产品加工业),2009(11):4-7.
Layout plan for dominant regions of potatoes in China (2008—2015)[J]. Agriculture Engineering Technology (Agricultural Product Processing Industry), 2009 (11): 4-7.
- [2] 庄国泰. 我国土壤污染现状与防治策略[J]. 中国科学院院刊,2015,30(4):477-483.
ZHUANG Guotai. Current situation and prevention and control strategies of soil pollution in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences,2015,30(4): 477-483.
- [3] 宋伟,陈百明,刘琳. 中国耕地土壤重金属污染概况[J]. 水土保持研究,2013,20(2):293-298.
SONG Wei, CHEN Baiming, LIU Lin. Soil heavy metal pollution of cultivated land in China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(2): 293-298.
- [4] 曾希柏,徐建明,黄巧云,等. 中国农田重金属问题的若干思考[J]. 土壤学报,2013,50(1):186-194.
ZENG Xibai, XU Jianming, HUANG Qiaoyun, et al. Some deliberation on the issues of heavy metals in farmlands of China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(1): 186-194.
- [5] 蔡娜. 基于马铃薯质量安全的产地土壤重金属 Cd 污染程度分级[D]. 贵阳:贵州大学,2019.
CAI Na. Classification of Cd pollution degree in soil for safety of potatoes planting[D]. Guiyang: Guizhou University, 2019.
- [6] LIU X J, TIAN G J, JIANG D, et al. Cadmium (Cd) distribution and contamination in Chinese paddy soils on national scale[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23: 17941-17952.
- [7] HU Y A, CHENG H F, TAO S. The challenges and solutions for cadmium-contaminated rice in China: a critical review[J]. Environment International, 2016, 92-93: 515-532.
- [8] 唐发静,祖艳群. 土壤重金属空间变异的研究方法[J]. 云南农业大学学报,2008,23(4):558-561.
TANG Fajing, ZU Yanqun. Research methods of spatial variability of heavy metals in soil[J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2008, 23(4): 558-561.
- [9] 赵锦慧,扶元. 重金属离子对油菜幼苗生理毒害的研究[J]. 周口师范学院学报,2020,37(2):92-95.
ZHAO Jinhui, FU Yuan. Study on the physiological toxicity of heavy metal ions to rapeseed seedlings[J]. Journal of Zhoukou Normal University, 2020, 37(2): 92-95.
- [10] 江祺,彭锦芬,罗杏良,等. 微敞开体系石墨消解-电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法测定土壤中 16 种稀土元素[J]. 中国无机分析化学,2023,13(12):1420-1428.
JIANG Qi, PENG Jinfen, LUO Xingliang, et al. Determination of 16 rare earth elements in soil by ICP-MS with micro-open graphite digestion [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2023, 13(12): 1420-1428.
- [11] 钟雪雯,杨曦,刘方,等. 石墨消解-原子荧光光谱法测定土壤中的总硒[J]. 中国无机分析化学,2021,11(3): 42-46.
ZHONG Xuwen, YANG Xi, LIU Fang, et al. Determination the total selenium in soil by graphite digestion-atomic fluorescence spectrometry[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2021,

- 11(3):42-46.
- [12] 范拴喜,甘卓亭,李美娟,等. 土壤重金属污染评价方法进展[J]. 中国农学通报,2010,26(17):310-315.
FAN Shuanxi, GAN Zhuoting, LI Meijuan, et al. Progress of assessment methods of heavy metal pollution in soil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(17):310-315.
- [13] 孙瑞玲,阮心玲,魏杰,等. 冶炼厂烟囱降尘农田土壤重金属含量及潜在生态风险评价[J]. 中国无机分析化学,2023,13(12):1304-1310.
SUN Ruiling, RUAN Xinling, WEI Jie, et al. Heavy metal content and potential ecological risk assessment of farmland soil with chimney dust from smelter[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2023,13(12):1304-1310.
- [14] 王玉军,吴同亮,周东美,等. 农田土壤重金属污染评价研究进展[J]. 农业环境科学学报,2017,36(12):2365-2378.
WANG Yujun, WU Tongliang, ZHOU Dongmei, et al. Advances in soil heavy metal pollution evaluation based on bibliometrics analysis[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017,36(12):2365-2378.
- [15] 张济龙,马飞攀,张卫威,等. 成都平原典型地区水果-土壤重金属污染特征研究[J]. 中国无机分析化学,2023,13(12):1318-1327.
ZHANG Jilong, MA Feipan, ZHANG Weiwei, et al. Characterization of heavy metal pollution in fruit and soils in typical areas of Chengdu plain[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2023,13(12):1318-1327.
- [16] 欧阳静茹,邵昭明,戚慕怡,等. 佛山市禅城区食用鱼中重金属含量现状调查与健康风险评价[J]. 食品安全质量检测学报,2021,12(7):2671-2678.
OUYANG Jingru, SHAO Zhaoming, QI Muyi, et al. Investigation and health risk assessment of heavy metals in edible fish in Chancheng district, Foshan city[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021,12(7):2671-2678.
- [17] 聂荣荣,古勉辉,董文静,等. 梅州金柚中金属元素分析及膳食风险评估[J]. 食品安全质量检测学报,2021,12(12):4742-4749.
NIE Rongrong, GU Mianhui, DONG Wenjing, et al. Metallic element analysis and dietary risk assessment of Meizhou golden pomelo[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021,12(12):4742-4749.
- [18] 赵亚玲. 土壤蔬菜中铅镉污染评价与富集特征研究[J]. 蔬菜,2018(12):60-64.
ZHAO Yaling. Evaluation and enrichment of lead and cadmium pollution in soil vegetables[J]. Vegetables, 2018(12):60-64.
- [19] 李嘉蕊. 基于土壤-作物-人体系统的耕地重金属污染评价和健康风险评估[D]. 杭州:浙江大学,2019.
LI Jiarui. Heavy metal pollution assessment and health risk assessment of cultivated land based on soil-crop-human system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [20] 滕葳,柳琪,李倩,等. 重金属污染对农产品的危害与风险评估[M]. 北京:化学工业出版社,2010.
TENG Wei, LIU Qi, LI Qian, et al. Harm and risk assessment of heavy metal pollution on agricultural products[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.
- [21] 莎娜,刘广华,张福金,等. 内蒙古马铃薯重金属时空分布特征及其膳食暴露评估[J]. 农产品质量与安全,2021(1):42-50.
SHA Na, LIU Guanghua, ZHANG Fujin, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of potato heavy metals in Inner Mongolia and its dietary exposure assessment[J]. Quality and Safety of Agro-Products, 2021(1):42-50.
- [22] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Submission and evaluation of pesticide residues data for estimation of maximum residue levels in food and feed (FAO Plant Production and Protection Paper 197)[R]. 2nd ed. Rome:FAO, 2009.