

马铃薯及耕地土壤重金属含量的测定及健康风险评价

鲍玉花^{1,2}, 马秀花¹, 闫世芳^{1,2}, 肖明^{1,2*}, 崔明明²

(1. 青海大学农牧学院, 西宁 810016; 2. 青海省农林科学院农业农村部农产品质量安全风险评估实验室, 西宁 810016)

摘要: 目的 对青海大学农林科学院试验田马铃薯和其根系土壤中镉、铬、铜、铅、镍、锌的含量进行检测及评价, 并评价经马铃薯途径膳食途径摄入重金属的人体健康风险。**方法** 使用石墨消解仪对样品进行前处理, 使用电感耦合等离子体发射光谱仪测定马铃薯和土壤中的 Cd、Cr、Cu、Pb、Ni 和 Zn 6 种重金属含量; 采用单因子指数法和内梅罗综合指数法对重金属污染程度进行分析评价; 采用目标危险系数法(target hazard quotient/total target hazard quotient, THQ/TTHQ)对马铃薯进行单一及复合重金属摄入健康风险评价。**结果** 该研究区土壤中 6 种重金属单项污染指数均小于 1, 综合污染指数小于 0.7, 未对土壤造成污染, 马铃薯中除了 Cu 和 Zn 污染处于安全水平, Cr 和 Ni 污染达到轻污染水平, Cd 和 Pb 污染达到重污染水平。根据富集系数(bio-concentration factor, BCF)发现马铃薯对 Cd 和 Pb 有一定的富集能力; 成人和儿童因食用马铃薯而摄入重金属 Cd、Cr 和 Pb 的单一健康风险指数和复合健康风险指数均大于 1, 对儿童和成人存在健康风险。**结论** 该研究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, 本研究可为大田试验提供方法学基础。

关键词: 马铃薯; 土壤; 重金属; 污染评价

Detection and health risk assessment of heavy metal in potato and cultivated soil

BAO Yu-Hua^{1,2}, MA Xiu-Hua¹, YAN Shi-Fang^{1,2}, XIAO Ming^{1,2*}, CUI Ming-Ming²

(1. College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016, China; 2. Agricultural Product Quality and Safety Risk Assessment Laboratory of Rural Ministry of Agriculture and Forestry, Qinghai Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Xining 810016, China)

ABSTRACT: Objective To detect the content of Cd, Cr, Cu, Pb, Ni and Zn in potato and its root soil, and evaluate the human health risk of heavy metal in potato produced in the potato planting experimental field of the Qinghai University Academy of Agriculture and Forestry Sciences. **Methods** The samples were pretreated by graphite digester, the content of 6 kinds of heavy metals such as Cd, Cr, Cu, Pb, Ni and Zn in potato and soil were determined by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry, the pollution degree of heavy metals was analyzed and evaluated by single factor index method and Nemerо comprehensive index method, target hazard quotient/total target hazard quotient (THQ/TTHQ) was used to evaluate the health risks of single and compound heavy metals intake of potato. **Results** In the study area, the single pollution index of 6 kinds of heavy metals in the soil was less than 1, and

*通信作者: 肖明, 博士, 副研究员, 主要研究方向为农产品质量安全风险评估。E-mail: mhmdxiao@163.com

*Corresponding author: XIAO Ming, Ph.D, Associate Professor, Qinghai Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Ningda Road, Chengbei District, Xining 810016, China. E-mail: mhmdxiao@163.com

the comprehensive pollution index was less than 0.7, which did not pollute the soil. In addition to Cu and Zn pollution in potato, Cr and Ni pollution reached the light pollution level, Cd and Pb pollution reached the heavy pollution level. According to the bio-concentration factor, it was found that potato had a certain enrichment ability for Cd and Pb. The single health risk index and the compound health risk index of Cd, Cr and Pb ingested by adults and children due to potato consumption were both more than 1, which had health risks for children and adults. **Conclusion** The pollution degree of heavy metals in the soil of the study area is low, and the residue of heavy metals in potato has hidden dangers to human health, this study can provide a methodological basis for field experiments.

KEY WORDS: potato; soil; heavy metal; pollution assessment

0 引言

近年来,随着工农业的发展,环境问题越来越突出^[1]。其中土壤重金属污染具有强毒害性和难降解性等特点^[2],不仅会影响土壤肥力、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^[3]。马铃薯是我国重要的粮菜兼用和工业原料作物,其营养丰富全面,具有适应性强、分布广等特点。马铃薯块茎直接与土壤接触,随着土壤重金属污染程度的增大,马铃薯吸收和积累的重金属含量也在逐渐升高,当高于标准 GB 2762—2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》中规定的重金属限量要求时,即镉 0.05 mg/kg、铬 0.50 mg/kg、铜 10.00 mg/kg、铅 0.20 mg/kg、镍 0.30 mg/kg、锌 20.00 mg/kg,就会对人体健康产生威胁^[4-5]。

郭卉^[6]研究发现,土壤重金属 Cd、Zn 污染会影响马铃薯的生长,进而导致马铃薯单产下降,随着 Zn 浓度的升高,马铃薯块茎中的淀粉含量和蛋白质含量都呈上升趋势,当 Cd 小于 5 mg/kg 时,马铃薯块茎中淀粉含量呈逐渐下降趋势,蛋白质含量呈上升趋势;当 Cd 大于 5 mg/kg 时,马铃薯块茎中淀粉含量呈逐渐上升趋势,蛋白质含量呈下降趋势。周爽^[7]通过研究 Cd 对马铃薯生长发育的影响,发现 Cd 在 10~20 mg/kg 时,可促进克新一号和费乌瑞它茎秆、枝叶生长,当 Cd 在 50~100 mg/kg 时,两品种马铃薯生长均受到抑制。莎娜等^[8]对内蒙古 327 份马铃薯样品中重金属进行了膳食暴露风险评估,膳食摄入评价表明,铜的每日允许摄入量(acceptable daily intake, ADI)为 3.69%,铅、铬和镉均低于 2%,慢性风险可接受,不同人群亚组急性膳食摄入风险顺序是幼儿>老年>成年>>儿童>青少年。综上所述,重金属在植物体内富集到一定的含量时,不仅会威胁人体健康,还会严重影响马铃薯的产量以及营养品质。随着生活水平的提高和安全意识的增强,人们对生产、食用安全营养蔬菜的需求愈加强烈,因此对马铃薯及耕地土壤中的重金属含量进行严格检测并进行膳食风险评估是很有必要的。目标危险系数(target hazard quotient/total target hazard quotient, THQ/TTHQ)是美国环保署于 2000 年建立的一种评价人群摄入某种食物健康风险的方法,该评价指标不仅能够评价单一重金属的健康风险,而且能够评价多种重金属复合暴露的健康风险^[9]。重金属污染既可能是单一因素作用的结果,也可

能是多因素共同作用的结果,故采用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法相结合进行评价^[10],能比较全面和准确地反映马铃薯和土壤中重金属的污染状况。

本研究通过对青海大学农林科学院马铃薯种植试验田马铃薯及其耕地土壤中镉、铬、铜、铅、镍和锌 6 种重金属的含量进行检测,分析马铃薯及其耕地土壤重金属污染状况,并采用目标危险系数法(THQ/TTHQ)评估摄入该试验田马铃薯的重金属健康风险,且考虑到马铃薯能够从土壤中吸收并且累积重金属,采用富集系数(bio-concentration factor, BCF)来评价马铃薯对土壤中 6 种重金属的富集能力^[4],为大田试验马铃薯质量监测提供方法学基础。

1 材料与方法

1.1 试剂与仪器

1.1.1 材料与试剂

镉、铬、铜、铅、镍、锌单元素标准溶液(1000 g/mL, 国家有色金属及电子材料分析测试中心);硝酸、氢氟酸、磷酸(优级纯,国药集团化学试剂有限公司);土壤成分分析标准物质 GBW07454 (GSS-25)(地球物理地球化学勘察研究所)。

1.1.2 仪器设备

Dena-Mini 全自动石墨消解及前处理系统(美国 Thomas Cain 公司); ICPE-9000 电感耦合等离子体发射光谱仪(日本岛津公司); H1850R 离心机(长沙高新技术产业开发区湘仪离心机仪器有限公司); pHs-3C 酸度计(上海仪电科学仪器股份有限公司); XS104 分析天平(瑞士梅特勒-托利多公司); Milli-Q Integral 水纯化系统(法国 Millipore SAS 公司); WDP-450 电热恒温培养箱(上海安亭科学仪器有限公司); 聚四氟乙烯消解管(深圳市白鳍豚生物科技有限公司)。

1.2 方法

1.2.1 样品的采集

以青海大学农林科学院马铃薯种植试验田为研究区,参照 NY/T 395—2012《农田土壤环境质量监测技术规范》和 NY/T 789—2004《农药残留分析样品的采样方法》,运用网格土壤取样方法,以等距离间隔采集马铃薯及其根区耕作层表层(0~20 cm)的土壤样品,样品数均为 50 个。每个

土样在 1.0 kg 左右, 记录装袋, 与此同时做好采样记录。

1.2.2 样品预处理

(1) 土壤样品预处理

参照 NY/T 395—2012 中样品制备方法, 将采集的所有土壤样品均自然风干, 剔除有机残渣、植物根系和可见侵入体, 按四分法将其充分混合后, 用木棍碾压研磨, 粗磨过 20 目尼龙筛, 再细磨过 100 目尼龙筛, 保存于自封袋中, 贴标待用^[11-12]。

(2) 马铃薯样品预处理

参照蔡娜^[13]的方法, 从采集的马铃薯样品中挑出发绿、腐烂的样品, 用超纯水充分洗净去皮、切块后于 70 °C 烘干、碾磨过筛后保存备用。

1.2.3 样品消解

(1) 土壤样品消解

准确称取 0.25 g (精确到 0.0001 g) 土壤样品于 50 mL 聚四氟乙烯管中, 加入 1 mL 超纯水使其浸润完全, 再加入 10 mL HNO₃、4 mL HF、1 mL HClO₄, 加盖后置于全自动石墨消解炉上进行消解(120 °C, 30 min; 后 170 °C, 180 min), 期间每隔 30 min 振荡 1 min, 待溶液变为淡黄色时取盖, 赶酸至剩一滴黄色胶状物时取出加入 1.5 mL HNO₃ 溶液(HNO₃:水=1:5, V:V), 并用超纯水定容至 25 mL, 振荡 1 min, 关机后余热加热 2~3 min, 取出备用, 同时做平行、空白试验^[14-16]。

(2) 马铃薯样品消解

精确称取碾磨好的马铃薯样品 5 g (精确到 0.0001 g) 于 50 mL 聚四氟乙烯管中, 加入 10 mL HNO₃ 和 2 mL HClO₄, 放置于全自动石墨消解炉上加盖加热到 150 °C, 消解 30 min, 冒黄烟, 振荡 1 min; 再加热至 180 °C, 消解 90 min, 至黄烟变为暗黄色, 振荡 1 min; 180 °C 继续消解 80 min, 暗黄色烟变为黑色, 振荡 1 min; 至马铃薯样品溶液颜色变为白色或浅黄色时, 消解完成。待样品稍微冷却 4~5 min, 加 1.5 mL HNO₃ 溶液(HNO₃:水=1:5, V:V), 振荡 1 min, 超纯水定容至 25 mL, 静置备用, 同时做平行、空白试验^[17-19]。

1.2.4 重金属含量的测定

(1) 重金属标准系列溶液的配制

参照 GB 5009.268—2016 中标准溶液系列质量浓度, 配制混合标准溶液(铅、镉、铬、镍、锌、铜): 吸取质量浓度为 1000 μg/mL 的镉、铬、铜、铅、镍、锌单元素标准溶液, 用 1% HNO₃ 溶液逐次稀释为质量浓度为 0、0.001、0.002、0.005、0.010、0.025、0.050、0.075、0.100、0.200、0.400、0.600、0.800 和 1.000 mg/L 的标准系列。将标准系列工作溶液注入电感耦合等离子体发射光谱仪中, 测定待测元素分析谱线的强度信号响应值, 以待测元素的质量浓度为横坐标, 其分析谱线强度响应值为纵坐标, 绘制标准曲线。以土壤成分分析标准物质 GSS-25 为标准样品, 作为数据参考及仪器准确性的依据。

(2) 样品重金属含量的测定

将已消解好的土壤及马铃薯样品消解液在 ICP-9000

电感耦合等离子体发射光谱仪上进行铅、镉、铜、铬、镍、锌 6 种重金属元素的测定。根据标准曲线计算样品中各金属元素的含量。

1.3 重金属质量评价标准

土壤重金属质量评价以 GB 15618—2018 《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》为依据; 马铃薯重金属质量评价以 GB 2762—2017 为依据。

1.4 重金属质量评价方法

1.4.1 单因子污染指数法

通过单因子评价, 可以确定单一重金属对土壤的危害程度^[20]。单项污染指数按照公式(1)计算:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

式中: P_i 为土壤重金属 i 的单项污染指数; C_i 是土壤重金属 i 含量的实测值, mg/kg; S_i 是重金属 i 的土壤环境质量评价标准值(GB 15618—2018), mg/kg。

土壤中单项污染程度分级标准为: $P_i \leq 1.0$ 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。 P_i 数值越大, 说明受到的重金属污染越严重^[21]。

1.4.2 内梅罗综合指数法

内梅罗综合指数法是在单因子污染指数法的基础上, 通过单因子污染指数得出多种污染物综合污染指数, 从而对各污染物的污染程度进行综合评价^[22]。内梅罗综合指数法按照公式(2)计算:

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{P_{\text{mean}}^2 + P_{i_{\text{max}}}^2}{2}} \quad (2)$$

式中: $P_{\text{综}}$ 为土壤综合污染指数; P_{mean} 为土壤单因子污染指数平均值; $P_{i_{\text{max}}}$ 为土壤重金属单项污染指数最大值。

土壤综合污染程度根据指数大小不同, 分为 $P_{\text{综}} \leq 0.7$ 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。

1.4.3 超标率

超标率按照公式(3)计算:

$$C_i = \frac{n_i}{N_i} \times 100 \quad (3)$$

式中: C_i 为重金属 i 在土壤中的超标率, n_i 为重金属 i 超标样品数, N_i 为采集样品数。

1.4.4 富集系数

富集系数(BCF)能大致反映马铃薯对重金属元素的富集能力, BCF 越大, 表明马铃薯对该重金属的吸收能力越强, 抗土壤重金属污染的能力越弱^[23]。富集系数按照公式(4)计算:

$$BCF = \frac{C_{vi}}{C_i} \times 100 \quad (4)$$

式中: BCF 为马铃薯的富集系数; C_{vi} 为马铃薯中重金属 i 的实测值, mg/kg; C_i 为马铃薯对应根际土壤中重金属 i 的实测值, mg/kg。

1.5 马铃薯重金属健康风险评估方法

马铃薯重金属对暴露人群健康风险评估主要采用目标危险系数法(THQ/TTHQ)法进行。THQ 和 TTHQ 分别按照公式(5)和(6)计算:

$$THQ = \frac{E_F \times E_D \times F_{IR} \times C}{R_{FD} \times W_{AB} \times T_A} \times 10^{-3} \quad (5)$$

$$TTHQ = \sum THQ \quad (6)$$

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 年; 成人: 70 年); F_{IR} 为蔬菜摄入率, g/d, 儿童、成年人平均每天蔬菜摄入量分别为 231.5、301.4 g/d; C 为重金属含量, mg/kg; R_{FD} 为口服参考剂量, mg/(kg·d); Cd、Cr、Cu、Pb、Ni、Zn 参考剂量分别为 1×10^{-3} 、 3×10^{-3} 、 4×10^{-2} 、 4×10^{-3} 、 2×10^{-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/年 $\times E_D$ 。

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^[24-26]。

1.6 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2010 软件对原始数据进行统计

表 1 土壤重金属全量描述性统计结果
Table 1 Descriptive statistical results of heavy metals in soil

元素	样品数	含量范围/(mg/kg)	平均值/(mg/kg)	标准差/(mg/kg)	变异系数/%	土壤背景值/(mg/kg)	风险筛选值/(mg/kg)
Cd	50	0.01~0.48	0.08	0.07	0.87	0.38	0.60.00
Cr	50	50.90~70.50	63.17	3.55	0.06	44.37	250.00
Cu	50	23.10~29.50	25.75	1.41	0.05	18.20	100.00
Pb	50	16.35~20.80	18.47	1.03	0.06	63.96	170.00
Ni	50	23.50~29.85	26.66	1.42	0.05	7.98	190.00
Zn	50	63.05~142.65	74.55	13.89	0.19	58.03	300.00

由表 2 可知, 重金属 Cd 与 Cu 呈显著负相关($P < 0.05$), 与其他重金属均无相关性($P > 0.05$), 说明 Cd 的主要来源不同于其他重金属, Cd 平均含量与该研究区背景值相当, 说明受人类活动影响较小, 主要来源可能是土壤母质^[29-30]; 重金属之间存在极显著正相关性的有 Ni-Cr、Ni-Cu、Pb-Cr、Pb-Ni、Zn-Cr、Zn-Cu、Zn-Ni、Zn-Pb, 说明以上 5 种重金属的污染来源可能相同或有相似的迁移路径, 可能会产生复合污染^[31]。

2.3 土壤重金属污染评价结果

研究区土壤重金属污染评价结果如表 3 所示。

和分析, 采用 SPSS 21.0 软件进行显著性分析, 采用 origin 2018 软件进行图的绘制, 采用皮尔逊相关性分析法, 对马铃薯和土壤中重金属含量之间的相关性进行分析。试验结果取平行试验的平均值, 显著水平 $P < 0.05$ 表示差异性显著。

2 结果与分析

2.1 土壤重金属全量描述性统计

取研究区土壤样品 50 份, 土壤 pH 范围为 7.55~8.49, 平均值为 8.1, 因此以 GB 2762—2017 中 pH 大于 7.5 的农用地土壤污染风险筛选值为评价标准。土壤中的 Cd、Cr、Cu、Pb、Ni 和 Zn 含量的测定分析统计结果见表 1。

由表 1 可知, 供试土壤样品中重金属的平均含量顺序大小为: Zn>Cr>Ni>Cu>Pb>Cd。其中, Cd、Pb 平均含量均低于研究区土壤背景值, Cr、Cu、Ni 和 Zn 平均含量均高于土壤背景值, 分别是背景值的 1.42、1.41、3.34、1.28 倍, 但均未超过土壤风险筛选值。变异系数能反映人类活动与土壤中重金属污染关系, 变异系数越大说明人类活动的参与度越高^[27]。一般认为, 变异系数小于 0.1 为弱变异, 在 0.1~1 之间属于中等强度变异, 大于 1 为强变异^[28]。Cd 和 Zn 变异系数在 0.1~1 之间, 属于中等强度变异, 说明这两种重金属污染受人为干扰较为严重。

2.2 土壤重金属含量间相关性

研究区土壤重金属含量之间的相关性如表 2 所示。

表 2 土壤重金属含量之间的皮尔逊相关性
Table 2 Pearson correlation between soil heavy metal content

重金属元素	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Cd	1					
Cr	0.023	1				
Cu	-0.310*	0.145	1			
Ni	0.068	0.921**	0.365**	1		
Pb	0.233	0.776**	0.221	0.809**	1	
Zn	0.259	0.372**	0.655**	0.485**	0.450**	1

注: * $P < 0.05$, 相关性显著; ** $P < 0.01$, 相关性极显著, 下表 5 相同。

表 3 土壤重金属污染评价结果
Table 3 Evaluation results of soil heavy metal pollution

元素	单项污染指数	综合污染指数	土壤背景值/(mg/kg)	超标率I/%	风险筛选值/(mg/kg)	超标率II/%
Cd	0.13	0.32	0.38	2.00	0.60	0.00
Cr	0.25		44.37	100.00	250.00	0.00
Cu	0.26		18.20	100.00	100.00	0.00
Pb	0.11		63.96	0.00	170.00	0.00
Ni	0.14		7.98	100.00	190.00	0.00
Zn	0.25		58.03	100.00	300.00	0.00

注: I为土壤重金属含量相对于土壤背景值的超标率; II为土壤重金属含量相对于土壤风险筛选值的超标率。

由表 3 可知, Cd、Cr、Cu、Pb、Ni、Zn 的单项污染指数均小于 1, 综合污染指数为 0.32, 说明土壤重金属污染程度尚处于安全水平; 重金属 Cr、Cu、Ni 和 Zn 对于土壤背景值超标率均达到了 100%, 但均未超过农用地土壤污染风险筛选值, 该种植区附近没有工业存在, 推测可能来源于生活垃圾、废水废气, 以及化肥的不合理施用^[32]。因此, 应尽可能控制人类活动, 必要时利用超富集植物等生物修复法和遗传学方法对重金属污染农田进行修复, 确保作物的安全生产^[33]。

2.4 马铃薯重金属全量描述性统计

取研究区马铃薯样品 50 份, 样品中的重金属 Cd、Cr、Cu、Pb、Ni 和 Zn 含量的测定分析统计结果见表 4。

表 4 马铃薯重金属全量描述性统计结果
Table 4 Descriptive statistical results of the total heavy metal content of potatoes

元素	样品数	含量范围/(mg/kg)	平均值/(mg/kg)	标准差/(mg/kg)	变异系数/%	限量值/(mg/kg)
Cd	50	0.02~2.41	0.16	0.33	2.06	≤0.05
Cr	50	0.29~3.64	0.79	0.47	0.59	≤0.50
Cu	50	0.32~1.74	0.99	0.40	0.40	≤10.00
Pb	50	0.24~3.87	1.88	1.14	0.60	≤0.20
Ni	50	0.07~2.37	0.50	0.37	0.74	≤0.30
Zn	50	0.72~3.41	2.33	0.74	0.32	≤20.00

由表 4 可知, 供试马铃薯样品中重金属的平均含量顺序大小为: Zn>Pb>Cu>Cr>Ni>Cd。其中, 重金属 Cd、Cr、Pb 和 Ni 平均含量超过马铃薯块茎限量值, 超出倍数分别为 3.20、1.58、9.4 和 1.7 倍, 其余两种重金属 Cu 和 Zn 尚未超过马铃薯块茎限量值要求, 超标情况表现为 Pb 最为严重, Cd 次之。而通过对马铃薯耕作层土壤重金属污染情况分析发现, Pb 和 Cd 的含量均低于土壤背景值和筛选值, 均处于安全水平, 表明马铃薯对 Pb 和 Cd 有一定的富集吸收能力, 这与鄢铮等^[4]的研究结果一致

2.5 马铃薯重金属含量间相关性

研究区马铃薯重金属含量之间的相关性如表 5 所示。

表 5 马铃薯重金属含量之间的皮尔逊相关性
Table 5 Pearson correlation between heavy metal content of potatoes

重金属元素	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Cd	1					
Cr	0.898**	1				
Cu	0.942**	0.664**	1			
Ni	0.435**	0.942**	0.808**	1		
Pb	0.841**	0.949**	0.810**	0.965**	1	
Zn	0.869**	0.409**	0.588**	0.359*	0.457**	1

由表 5 可知, Ni 与 Zn 呈显著相关性($P<0.05$), 其余重金属之间存在极显著正相关性($P<0.01$), 表明马铃薯中重金属 Cd、Cr、Cu、Pb、Ni、Zn 具有较高的同源性, 除了来源于耕地土壤, 重金属在作物中的积累还会受到土壤理化性质的影响^[33]。后续可对土壤重金属含量和土壤理化性质与马铃薯重金属含量的相关性进行深入研究, 探明其污染源。

2.6 马铃薯重金属污染评价结果

研究区马铃薯重金属污染评价结果如表 6 所示。

表 6 马铃薯重金属污染评价结果
Table 6 Evaluation results of heavy metal contamination in potato

元素	单项污染指数	综合污染指数	限量值/(mg/kg)	超标率/%	富集系数/%
Cd	3.20	6.91	≤0.05	78.00	2.00
Cr	1.58		≤0.50	80.00	0.01
Cu	0.10		≤10.00	0.00	0.04
Pb	9.40		≤0.20	100.00	0.10
Ni	1.70		≤0.30	74.00	0.02
Zn	0.12		≤20.00	20.00	0.03

由表 6 可知, 根据单项污染程度分级标准, 研究区马铃薯中重金属 Cu 和 Zn 污染水平均低于 1, 污染等级为无污染; Cr 和 Ni 单项污染指数介于 1~2 之间, 为轻度污染水平; Cd 和 Pb 单项污染指数大于 3, 表现为重度污染。重金属综合污染指数为 6.91, 达到重度污染水平, 对人体健康存在安全隐患; 根据富集系数可得出, Cd 和 Pb 的富集系数远高于其他 4 种重金属, Cd 富集系数最高, Pb 富集系数次之, 说明相比于其他 4 种重金属, Cd 和 Pb 在马铃薯中具有较强的富集作用, 这与鄢铮等^[4]的研究结果一致。从整体来看, Cd 和 Pb 是该研究区马铃薯中污染较为严重的重金属, Pb 的超标率达到了 100%, 除了与土壤环境、种植制度密切相关外, 与该种植区施用肥料的种类及用量以及马铃薯品种也有关, 有研究发现, 使用废水灌溉或长期施用未腐熟的牛羊粪施肥等都会使马铃薯积累大量 Cd 和 Pb 等有毒元素^[8]。董颖苹等^[34]研究发现与不施肥处理相比, 施用商品羊粪有机肥和化学复合肥有利于减少 Cd 在块茎和茎叶中的富集, 但有助于增加 Pb 的富集率。本研究结果中 Pb 的超标率为 100%, 因此应筛选合适的化肥施用并控制用量, 或选择对重金属低积累型马铃薯品种种植, 以保证马铃薯的生产安全。

2.7 马铃薯重金属健康风险评价

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 值, 结果见表 7。

表 7 马铃薯中重金属的目标危险系数
Table 7 Target hazard quotients of heavy metal in potato

元素	重金属含量 C (mg/kg)	成年人 THQ 值	儿童 THQ 值
Cd	0.16	1.01	1.10
Cr	0.79	1.33	1.84
Cu	0.99	0.16	0.22
Pb	1.88	2.49	3.26
Ni	0.50	0.16	0.21
Zn	2.33	0.06	0.10
TTHQ		6.73	5.21

由表 7 可知, 该研究区马铃薯中重金属 Cu、Ni 和 Zn 对儿童和成人 THQ 值均小于 1, 表明该研究区马铃薯中以上 3 种单一重金属不会对人体健康产生威胁, 而重金属 Cd、Cr 和 Pb 对儿童和成年人的 THQ 值均大于 1, 说明 Cd、Cr 和 Pb 对儿童和成年人均存在一定的健康风险, 这与刘家琴等^[35]的研究结果一致。重金属对儿童与成年人的 TTHQ 值分别为 6.73、5.21, 均大于 1, 说明该研究区马铃薯中不同重金属之间产生的复合污染水平较高, 对这两类

人群均存在明显的复合健康风险, 若长期食用该马铃薯会对人体造成慢性毒性效应。

3 结论与讨论

本研究结果表明, 马铃薯种植试验田土壤中重金属 Cd 和 Pb 平均含量未超过土壤背景值, Cr、Cu、Ni 和 Zn 平均含量均超过土壤背景值, 但未超过 GB 15618—2018 中规定的土壤风险筛选值。从单因子污染指数和内梅罗综合污染指数分析, 6 种重金属污染水平属安全范围。该试验田马铃薯中 Cu 和 Zn 未超过马铃薯块茎限量值要求, Cd、Cr、Pb 和 Ni 平均含量超过马铃薯块茎限量值, 且马铃薯中 Cd、Cr、Pb 的 THQ 和 TTHQ 均大于 1, 对人体存在明显的健康风险。根据富集系数分析, 发现马铃薯对 Cd 具有较强的富集作用, 其次是 Pb。

值得注意的是, 虽然 Cd 和 Pb 在土壤中含量均低于土壤背景值和筛选值, 处于安全水平, 但两者在马铃薯中平均含量均超过马铃薯块茎限量值, 表明马铃薯对土壤中 Cd 和 Pb 这两种重金属有较强的吸收能力, 武倩倩^[36]也研究发现, 随着土壤 Cd 和 Pb 含量的增加, 马铃薯各组织对 Cd 和 Pb 吸收量也不断增加。因此, 推测该试验田土壤重金属污染有可能会对马铃薯根、块茎产品、马铃薯皮、叶中的含量高于国家标准限制范围, 后续试验应对该试验田马铃薯不同器官的重金属污染情况进行监测, 降低马铃薯的食用安全风险。作物积累的重金属可通过食物链进入人体而给人类健康带来潜在危害, 如 Cd 污染可造成贫血、高血压、骨痛病等疾病^[10]。因此, 基于本研究得到的结果, 马铃薯对重金属 Cd 和 Pb 的吸收、迁移和积累过程中的生理、分子机制也是需要深入研究的方向, 基于马铃薯的品种、种植区环境条件、吸收机制和积累特征来选择降低马铃薯重金属污染的方法, 从各个层面探索合理的安全生产措施, 确保马铃薯的安全生产。

参考文献

- 贾相岳. 土壤中重金属 Cd 含量与叶类蔬菜中 Cd 含量的相关性[J]. 山西农业科学, 2016, 44(5): 625-628.
JIA XY. Study on correlation of the cadmium content between soil and leafy vegetables [J]. J Shanxi Agric Sci, 2016, 44(5): 625-628.
- WU Z, CHEN Y, HAN Y, *et al.* Identifying the influencing factors controlling the spatial variation of heavy metals in suburbans oil using spatial regression models [J]. Sci Total Environ, 2020, 717: 137212.
- 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 JH, FU Y. Study on physiological toxicity of heavy metal ions to rape seedlings [J]. J Zhoukou Norm Univ, 2020, 37(2): 92-95.
- 鄢铮, 彭琼. 马铃薯对土壤中 4 种重金属富集能力的差异[J]. 中国农学通报, 2020, 36(2): 10-17.
YAN Z, PENG Q. Absorptive capacity of potato varieties to four heavy metals in soil [J]. China Agric Sci Bull, 2020, 36(2): 10-17.

- [5] 黄凤玲, 张琳, 李先德, 等. 中国马铃薯产业发展现状及对策[J]. 农业展望, 2017, 13(1): 25–31.
HUANG FL, ZHANG L, LI XD, *et al.* Development situation and countermeasures of China's potato industry [J]. *Agric Outlook*, 2017, 13(1): 25–31.
- [6] 郭卉. 重金属 Cd、Zn 对马铃薯生长及品质的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2008.
GUO H. Effects of heavy metal pollution of Cd and Zn in soil growth and quality of potato [D]. Changsha: Hunan Agric Univ, 2008.
- [7] 周爽. 重金属 Cd 及施肥对马铃薯生长发育的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012.
ZHOU S. The effects of cadmium and fertilization on the growth and development of potato [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agric Univ, 2012.
- [8] 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 N, LIU GH, ZHANG FJ, *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics of heavy metals in Inner Mongolia and its dietary exposure assessment [J]. *Qual Saf Agric Prod*, 2021, (1): 42–50.
- [9] 郑娜, 王起超, 郑冬梅. 基于 THQ 的锌冶炼厂周围人群食用蔬菜的健康风险分析[J]. 环境科学学报, 2007, (4): 672–678.
ZHENG N, WANG QC, ZHENG DM. Health risk assessment of heavy metals to residents by consuming vegetable irrigated around zinc smelting plant based THQ [J]. *Acta Sci Circumstantiae*, 2007, (4): 672–678.
- [10] 黄绍文, 金继运, 和爱玲, 等. 农田不同利用方式下土壤重金属区域分异与评价[J]. 农业环境科学学报, 2007, (S2): 540–548.
SHAO SW, JIN JY, HE AIL, *et al.* Regional differentiation and status of heavy metals in rural soils under different patterns of land use [J]. *J Environ Sci*, 2007, (S2): 540–548.
- [11] 赵杰, 罗志军, 赵越, 等. 环鄱阳湖区农田土壤重金属空间分布及污染评价[J]. 环境科学学报, 2018, 38(6): 2475–2485.
ZHAO J, LUO ZJ, ZHAO Y, *et al.* Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in farmland soil in Poyang lake area [J]. *J Environ Sci*, 2018, 38(6): 2475–2485.
- [12] 方慧, 颜秋晓, 柳小兰, 等. 油菜全生长期中土壤理化性质的变化及重金属污染评价[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(23): 344–348.
FANG H, YAN QX, LIU XL, *et al.* Changes of soil physical and chemical properties and evaluation of heavy metal pollution during whole growing period of rape [J]. *Jiangsu Agric Sci*, 2018, 46(23): 344–348.
- [13] 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]. 贵州: 贵州大学, 2019.
CAI N. Classification of Cd pollution degree in soil for safety of potato esplanting [D]. Guizhou: Guizhou University, 2019.
- [14] 黄盛楠. 全自动石墨消解-原子吸收法测定土壤中重金属的方法研究[J]. 绿色科技, 2018, (12): 97–100.
HUANG SN. Determination of heavy metals in soil by automatic graphite digestion atomic absorption spectrometry [J]. *Green Sci Technol*, 2018, (12): 97–100.
- [15] 李承. 全自动石墨消解-ICP-MS 法测定土壤中的重金属含量[J]. 广东化工, 2016, 43(21): 162–163.
LI C. Determination of six kinds of heavy metal in soil by automatic graphite digestion-ICP-MS [J]. *Guangdong Chem Ind*, 2016, 43(21): 162–163.
- [16] 赵睿, 杨梦婷. 全自动石墨消解仪 ICP-MS 测定土壤中的 5 种金属元素[J]. 低碳世界, 2018, (8): 10–11.
ZHAO R, YANG MT. Determination of five metal elements in soil by automatic graphite digester ICP-MS [J]. *Low Carbon World*, 2018, (8): 10–11.
- [17] 王宁芳. 火焰原子吸收法测定马铃薯中的微量元素[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(34): 46–47.
WANG NF. Determination of trace elements in potato by flame atomic absorption spectrometry [J]. *Anhui Agric Sci*, 2016, 44(34): 46–47.
- [18] 王晓, 邵丽, 滕振勇, 等. 石墨炉原子吸收法测定马铃薯中的铅和镉[J]. 食品研究与开发, 2013, (23): 104–106.
WANG X, SHAO L, TENG ZY, *et al.* Determination of trace elements (lead and cadmium) in potato by graphite furnace atomic absorption spectrometry [J]. *Food Res Dev*, 2013, (23): 104–106.
- [19] 向文军, 陈安银. 石墨炉原子吸收光谱法测定马铃薯中铬含量[J]. 应用化工, 2014, 43(11): 2115–2117.
XIANG WJ, CHEN ANY. Determination of chromium content in potato by graphite furnace atomic absorption spectrometry [J]. *Appl Chem Ind*, 2014, 43(11): 2115–2117.
- [20] 苏春田, 唐健生, 潘晓东, 等. 不同地质条件下土壤重金属质量评价比较[J]. 中国环境监测, 2012, 28(4): 28–31.
SU CT, TANG JS, PAN XD, *et al.* Evaluation comparison of heavy metals quality in soil in different geological conditions [J]. *China Environ Monit*, 2012, 28(4): 28–31.
- [21] 穆莉, 王跃华, 徐亚平, 等. 湖南省某县稻田土壤重金属污染特征及来源解析[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(3): 573–582.
MU L, WANG YH, XU YP, *et al.* Pollution characteristics and sources of heavy metals in paddy soils in a county of Hunan province, China [J]. *J Agric Environ Sci*, 2019, 38(3): 573–582.
- [22] 李伟, 布多, 孙晶, 等. 拉萨巴嘎雪湿地土壤重金属分布及生态风险评估[J]. 环境化学, 2021, 40(1): 195–203.
LI W, BU D, SUN J, *et al.* Distribution and ecological risk assessment of heavy metal element in the surface sediments of Bagaxue wetland in Lasa [J]. *Environ Chem*, 2021, 40(1): 195–203.
- [23] 罗伟, 赖星, 伍钧, 等. 施用沼液对土壤-马铃薯重金属污染状况研究[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(10): 160–168.
LUO W, LAI X, WU J, *et al.* Study on heavy metal pollution of soil-potato by biogas slurry application [J]. *Environ Sci Technol*, 2019, 42(10): 160–168.
- [24] 鲁潇, 于坤, 孙庆业, 等. 铜陵矿区周边莲藕重金属元素含量及健康风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(9): 2049–2056.
LU X, YU K, SUN QY, *et al.* Heavy metal content and health risk assessment of lotus roots around Tongling mining area, China [J]. *J Agric Environ Sci*, 2019, 38(9): 2049–2056.
- [25] 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估[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(7): 2671–2678.
OUYANG JR, SHAO ZM, QI MY, *et al.* Investigation and health risk assessment of heavy metals in edible fish in Chancheng district, Foshan city [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(7): 2671–2678.
- [26] 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 RR, GU MH, DONG WJ, *et al.* Metallic element analysis and dietary risk assessment of Meizhou golden pomelo [J]. *J Food Saf Qual*, 2021,

- 12(12): 4742–4749.
- [27] 陈碧珊, 苏文华, 罗松英, 等. 雷州半岛红树林土壤重金属空间分布特征及来源分析[J]. 海洋环境科学, 2018, 37(6): 922–928.
CHEN BS, SU WH, LUO SY, *et al.* Distribution characteristics and source analysis of heavy metals in soils from mangrove forest in Leizhou Peninsula [J]. *Mar Environ Sci*, 2018, 37(6): 922–928.
- [28] 钟晓兰, 周生路, 李江涛, 等. 长江三角洲地区土壤重金属污染的空间变异特征——以江苏省太仓市为例[J]. 土壤学报, 2007, (1): 33–40.
ZHONG XL, ZHOU SL, LI JT, *et al.* Spatial variability of soil heavy metal contamination in the Yangtze river delta—A case study of Taicang city in Jiangsu province [J]. *Acta Pedol Sin*, 2007, (1): 33–40.
- [29] 张建, 郎咸东, 陈蓉. 贵州六盘水马铃薯种植区土壤重金属含量状况及评价[J]. 广东农业科学, 2015, 42(17): 6–11.
ZHANG J, LANG XD, CHEN R. Content status and assessment of heavy metal in soil from potato growing area of Liuzhi, Panxian and Shuicheng counties, Guizhou province [J]. *Guangdong Agric Sci*, 2015, 42(17): 6–11.
- [30] 柴磊, 王新, 马良, 等. 基于 PMF 模型的兰州耕地土壤重金属来源解析[J]. 中国环境科学, 2020, 40(9): 3919–3929.
CHAI L, WANG X, MA L, *et al.* Source analysis of heavy metals in cultivated soil in Lanzhou based on PMF models [J]. *China Environ Sci*, 2020, 40(9): 3919–3929.
- [31] 陈斌, 祝怡斌, 翟文龙. 某退役稀土回收厂表层土壤重金属污染及其对人体健康风险评价[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021, (10): 133–138.
CHEN B, ZHU YB, ZHAI WL. Assessment of heavy metal and human health risk in surface soils in a decommissioned rare earth recycling plant [J]. *Nonferrous Met (Extr Met)*, 2021, (10): 133–138.
- [32] 臧泉, 陈鲁, 杨玉义, 等. 城市化对湖泊表层沉积物重金属污染的影响: 高原湖泊和城市湖泊重金属生态风险比较[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(10): 43–50.
ZANG Q, CHEN L, YANG YY, *et al.* Effects of urbanization on the pollution and ecological risk of heavy metals in surface sediments from lake: Comparison of Plateau lakes and urban lakes [J]. *Environ Sci Technol*, 2020, 43(10): 43–50.
- [33] 王成尘, 田稳, 向萍, 等. 土壤-水稻/小麦系统重金属吸收机制与安全生产调控[J/OL]. 中国环境科学: 1-19. [2021-10-15]. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20210929.003>
WANG CC, TIAN W, XIANG P, *et al.* Mechanism of heavy metal uptake and transport in soil-rice/wheat system and regulation measures for safe production [J/OL]. *China Environ Sci*: 1-19. [2021-10-15]. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20210929.003>
- [34] 董颖苹, 曹绍书, 粟彩芸, 等. 贵州喀斯特区域马铃薯种薯生产重金属安全性初探[J]. 种子, 2021, 40(8): 122–126.
DONG YP, CAO SS, SU CY, *et al.* Preliminary study on heavy metal safety of potato production in Karst area [J]. *Seed*, 2021, 40(8): 122–126.
- [35] 刘家琴, 刘恒豪, 郑钰钊, 等. 彭州市某蔬菜基地蔬菜中重金属含量特征及健康风险评价[J]. 周口师范学院学报, 2016, 33(2): 94–98.
LIU JQ, LIU HH, ZHENG YC, *et al.* Health risks assessment and characteristics of heavy metals concentrations of vegetables in vegetable base of Pengzhou [J]. *J Zhoukou Norm Univ*, 2016, 33(2): 94–98.
- [36] 武倩倩. 块根、块茎类植物修复土壤铅、镉污染的试验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
WU QQ. The phytoremediation experimental study of root tuber plants and tuber plants for pb and Cd contaminated soil [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.

(责任编辑: 郑丽 张晓寒)

作者简介



鲍玉花, 硕士研究生, 主要研究方向为食品加工与安全。

E-mail: 2370368401@qq.com



肖明, 博士, 副研究员, 主要研究方向为农产品质量安全风险评估。

E-mail: mhmdxiao@163.com