

地质高背景区马铃薯安全生产的土壤镉风险阈值

王旭莲, 刘鸿雁, 周显勇, 罗凯, 于恩江, 冉晓追

引用本文:

王旭莲, 刘鸿雁, 周显勇, 等. 地质高背景区马铃薯安全生产的土壤镉风险阈值[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(2): 355–363.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0988>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

贵州省白菜种植土壤镉风险管控标准研究

许根焰, 宋静, 高慧, 张厦

农业环境科学学报. 2019, 38(7): 1490–1497 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1629>

改性玉米秸秆吸附磷的动力学和热力学特征研究

韩珏, 李佳欣, 崔红艳, 吕纬, 白淑琴

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 2008–2014 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0316>

设施农田土壤重金属污染评价及分区阈值研究

曹志强, 韦炳干, 虞江萍, 孟敏, 李海蓉, 杨林生, 尹舒慧, 李峰, 张国印, 陈清

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2227–2238 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0465>

三峡库区库尾典型农用地土壤重金属污染特征及潜在风险

王金霞, 罗乐, 陈玉成, 何清明, 詹玲玲

农业环境科学学报. 2018, 37(12): 2711–2717 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0844>

夜郎湖表层沉积物重金属分布特征及生态风险评估

徐梦, 刘鸿雁, 罗凯, 崔俊丽, 刘艳萍, 李家飞

农业环境科学学报. 2017, 36(6): 1202–1209 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1179>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王旭莲, 刘鸿雁, 周显勇, 等. 地质高背景区马铃薯安全生产的土壤镉风险阈值[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(2): 355–363.

WANG Xu-lian, LIU Hong-yan, ZHOU Xian-yong, et al. Risk threshold for soil cadmium, based on potato quality in a high geological background area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(2): 355–363.



开放科学 OSID

地质高背景区马铃薯安全生产的土壤镉风险阈值

王旭莲¹, 刘鸿雁^{1,2*}, 周显勇¹, 罗凯², 于恩江², 冉晓追¹

(1. 贵州大学农学院, 贵阳 550025; 2. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025)

摘要:为探讨我国西南喀斯特镉(Cd)地球化学高背景区马铃薯的安全生产,以贵州省5个县105对土壤样品及对应马铃薯样品为试验材料,以食品安全污染物限量为标准(GB 2762—2017, $Cd < 0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),利用回归模型推导基于马铃薯质量安全的土壤Cd风险阈值。结果表明:赫章县(HZ)和威宁县(WN)采样区土壤总Cd全部超过了土壤环境质量标准GB 15618—2018中农用地土壤污染风险筛选值,分别有92.3%和77.4%超过管制值,土壤处于中度到重度污染水平;长顺县(CS)和册亨县(CH)分别有80%和50%的土壤超过筛选值,但未超过管制值,土壤处于地质高背景的无污染水平。马铃薯Cd的点位超标率为17.1%,超标倍数仅为0.01~1.11倍,主要分布在WN;马铃薯Cd与土壤总Cd和有效态Cd的相关系数分别为0.587和0.755,均呈极显著正相关($P < 0.01$)。回归模型模拟基于马铃薯Cd限量标准($pH \leq 6.5$ 、 $6.5 < pH \leq 7.5$ 、 $pH > 7.5$)的土壤总Cd风险阈值分别为4.30、7.34、9.39 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤有效态Cd阈值分别为0.22、0.02、0.01 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;黔西北HZ和WN的污染土壤总Cd风险阈值分别为5.11、7.75、9.39 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。研究区土壤Cd超标严重,马铃薯超标率相对较低,超标倍数小,基于马铃薯质量安全的土壤Cd风险阈值是农用地土壤污染风险管制值的2倍以上;基于本研究,现行的农用地土壤Cd标准应用于喀斯特地区较为严格。

关键词:马铃薯;土壤;Cd;风险阈值;地球化学高背景

中图分类号:S532;X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)02-0355-09 doi:10.11654/jaes.2020-0988

Risk threshold for soil cadmium, based on potato quality in a high geological background area

WANG Xu-lian¹, LIU Hong-yan^{1,2*}, ZHOU Xian-yong¹, LUO Kai², YU En-jiang², RAN Xiao-zhui¹

(1. College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: To ensure the cleaner cultivation of potatoes in Karst region with a high geochemical background of cadmium (Cd) in southwest China, by using a total of 105 pairs of soil samples and corresponding potatoes were sourced from 5 counties of Guizhou Province as the test materials, taking the national food safety standards limits of pollutants for foods (GB 2762—2017, $Cd < 0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) as the measure, we used the statistical regression model to derive the soil threshold values of total and available cadmium based on potato safety production. The results showed that the total Cd content of soil in the Hezhang County (HZ) and Weining County (WN) sampling areas exceeded the Chinese environmental quality standard for soil (GB 15618—2018), 92.3% of soil samples exceeded the screening value of agricultural land, and 77.4% of soil samples exceeded the control value and the soil was at the level of moderate to severe pollution. 80% soils in Changshun County (CS) and 50% in Ceheng County (CH) exceeded the screened value but not the regulated value, and the soil was at the level of no pollution in a geological high background area. The point position superstandard rate of potato Cd was 17.1%, and the superstandard multiple varied between 0.01 and 1.11, mainly distributed in WN. The correlation coefficients between potato Cd and soil

收稿日期:2020-08-24 录用日期:2020-11-02

作者简介:王旭莲(1993—),女,贵州务川人,硕士研究生,主要从事农业资源与环境土壤学方向研究。E-mail:2478355046@qq.com

*通信作者:刘鸿雁 E-mail:hylu@gzu.edu.cn

基金项目:贵州省科技计划项目(黔科合后补助[2020]3001);国家自然科学基金项目(42067028)

Project supported: The Science and Technology Planning Project of Guizhou Province (Qiankehehoubuzhu[2020]3001); The National Natural Science Foundation of China(42067028)

Cd, as well as available Cd were 0.587 and 0.755, respectively, both showing strong positive correlation ($P < 0.01$). The regression model simulated the risk thresholds of soil Cd based on the potato Cd limit standard were 4.30, 7.34 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and 9.39 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ on soils with $\text{pH} \leq 6.5$, $6.5 < \text{pH} \leq 7.5$, and $\text{pH} > 7.5$, respectively; the corresponding thresholds of soil available Cd were 0.22, 0.02 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and 0.01 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. The total Cd risk thresholds of contaminated soils simulated by HZ and WN in northwest Guizhou Province were 5.11 ($\text{pH} \leq 6.5$), 7.75 ($6.5 < \text{pH} \leq 7.5$), and 9.39 ($\text{pH} > 7.5$) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. The risk threshold of soil Cd based on potato safety production is more than twice the risk control value of soil pollution in agricultural land, so the current soil Cd standard of agricultural land is applied strictly in the karst areas.

Keywords: potato; soil; cadmium; risk threshold; high geochemical background

马铃薯 (*Solanum tuberosum* L.) 是全球第四大粮食作物, 我国是世界上最大的马铃薯生产国, 随着农业产业结构调整, 马铃薯已逐渐成为我国部分地区的优势作物^[1]。在我国四大马铃薯主产区中, 以贵州省为中心的西南喀斯特高原山区马铃薯的生产综合优势最高^[2]。镉 (Cd) 通过损伤农作物叶绿素, 降低光合速率, 从而影响农作物产量和品质。Cd 可与农作物体内蛋白质、多肽、酶等大分子物质结合富集在可食部位 (如: 马铃薯块茎和胡萝卜块根), 并通过食物链进入人体, 危害人类身体健康^[3-4]。Cd 对马铃薯的生长发育呈现“低浓度促进, 高浓度抑制”的现象^[5-6], 在马铃薯各器官中呈现根 > 茎叶 > 块茎^[7] 或叶 > 茎 > 根 > 块茎^[8] 的分布特点, 块茎是富集 Cd 最少的器官; 成熟期马铃薯根、茎、叶中的 Cd 含量较现蕾期略微增加。

贵州省喀斯特地貌发育完全且分布集中, 碳酸盐岩裸露面积占全省面积的 61.9%; 岩溶发育强烈, 地层发育较为完备。碳酸盐岩分布区域内土壤 Cd 的背景值远高于全国平均值, 是典型的 Cd 地球化学异常区^[9]。Cd 是典型的亲铜 (硫) 性元素, 亲铜成矿元素以强聚集高地球化学背景占主导, 是贵州省农业土壤的主要污染元素^[10], 贵州省土壤中 Cd 背景值含量达 0.659 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[11]。根据全国土壤环境背景值调查^[12], 贵州省表层土壤 Cd 75% 统计值为 0.37 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 高出我国现行土壤 Cd 风险筛选值的 23.3%。土壤环境污染问题逐渐成为影响农产品质量和威胁人类健康的主要因素^[13]。孔祥宇等^[14]通过对贵州省 92 个稻田土壤中重金属 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Sb 和 Zn 进行研究, 发现重金属超标率达 89.1%。张建等^[15]研究发现六盘水马铃薯种植区表层土壤 (0~20 cm) 中 Cd 含量超过贵州省土壤元素背景值 177.54%, 超标倍数为 1.95。张家春等^[16]对贵州省草海湿地周边耕地土壤研究发现, 耕地表层土壤中 Cd 的平均含量是贵州省土壤元素背景值的 1.44 倍。

我国《土壤环境质量标准农用地土壤污染风险管

控标准 (试行)》(GB 15618—2018) 采用风险筛选值和风险管制值“双线管理”。很多学者对土壤中重金属限量值和农产品的安全生产进行了大量研究, 夏增禄^[17]对我国土壤中重金属元素 Cr、Pb、Cu、As 的临界含量进行研究; 郑向群等^[18]对 9 种常见叶菜类蔬菜土壤铬 (Ⅲ) 污染阈值进行研究, 发现潮土铬阈值预测区间为 104.387~300.741 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 红壤为 157.621~401.031 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 刘香香等^[19]通过原位土盆栽实验, 发现种植块根蔬菜胡萝卜的土壤总 Cd 和有效态 Cd 的阈值分别为 1.078 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 0.065 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 高于土壤限量标准值; 李富荣等^[20]对广东地区芸薹类叶菜可食部位 Cd 含量与土壤中总 Cd 和有效态 Cd 含量进行回归分析, 得出产地土壤总 Cd 和有效态 Cd 阈值分别为 1.22 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 0.43 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在我国西南喀斯特地球化学高背景区生产马铃薯是否安全, 基于马铃薯 Cd 限量标准的土壤总 Cd 和有效态 Cd 的风险阈值有多高, 现行的国家土壤环境质量标准在喀斯特地区的适用性怎样是本研究关注的焦点问题。

1 材料与方法

1.1 采样区分布及马铃薯品种

贵州省 Cd 地球化学分布图及采样区域示意图详见图 1。根据贵州省 Cd 地球化学背景图和马铃薯种植情况, 选取喀斯特 Cd 地球化学高背景区的黔西北赫章县 (HZ) 和威宁县 (WN)、黔南州长顺县 (CS)、黔西南州册亨县 (CH) 为研究区域, 以非喀斯特地区黔东南州雷山县 (LS) 作为对照, 采集耕作层 (0~20 cm) 土壤样品及对应马铃薯块茎样品共计 105 对, 其中 LS 2 对、HZ 13 对、WN 62 对、CS 20 对、CH 8 对。采集的马铃薯品种为贵州省主栽品种: 会-2 号、宣薯 2 号、青薯 9 号、威芋 5 号、黔芋 7 号、费乌瑞它等。

1.2 测定方法与评价标准

1.2.1 样品采集、处理和指标测定

采集的试验样品带回实验室进行处理。土壤样

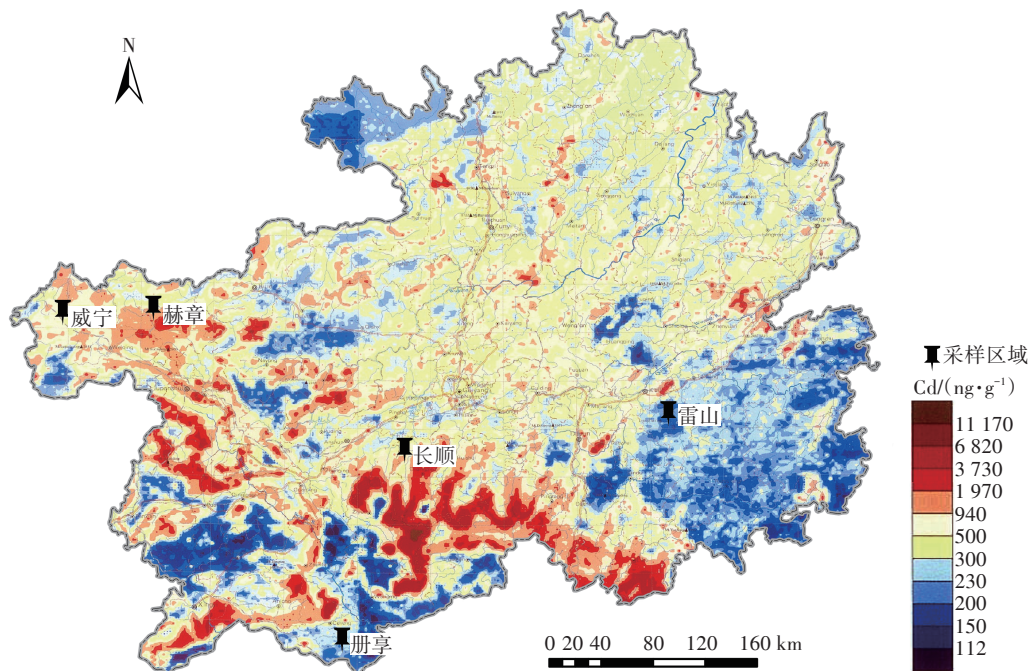


图1 贵州省Cd地球化学分布图及采样区域示意图

Figure 1 Schematic diagram of cadmium geochemical distribution and sampling areas in Guizhou Province

品置于室内通风干燥处,待自然风干后用木制锤敲碎,过2、0.25 mm和0.15 mm尼龙筛,供土壤理化性质及重金属含量的测定;马铃薯样品用纯净水清洗干净,用牛皮纸包裹后置于105℃电热烘箱中杀青15 min,再于75℃彻底烘干至恒质量,将样品粉碎研磨后保存供马铃薯Cd含量的测定。

土壤总Cd含量的测定:用电子天平准确称取0.1 g(精确至0.000 1 g)过0.15 mm筛的土壤样品,用3 mL HNO₃和3 mL HF对样品进行10 h的预处理,加入2 mL HClO₄消解12 h,电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Thermo Fisher X series II)测定Cd含量。土壤有效态Cd含量的测定:用电子天平准确称取2.00 g过0.25 mm筛的土壤样品,用20 mL 0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂浸提,ICP-MS测定土壤有效态Cd含量。马铃薯Cd含量的测定:用电子天平准确称取0.3 g(精确至0.000 1 g)马铃薯样品,采用6 mL HNO₃对样品进行预处理,加入2 mL H₂O₂消解8 h,ICP-MS测定马铃薯Cd含量。分析过程采用国家土壤成分分析标准物质GBW07405(GSS-5)和生物成分标准物质GBW10010(GSB-1)及空白处理和空白处理进行质量控制。土壤pH值采用蒸馏水浸提(土水比为1:2.5)电位法测定。土壤有机质含量采用0.800 0 mol·L⁻¹ K₂Cr₂O₇和5 mL浓H₂SO₄处理,0.2 mol·L⁻¹ FeSO₄溶液滴定测定。

1.2.2 土壤环境质量分类及土壤Cd污染评价

利用《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)^[21]对土壤进行质量类别划分。

对土壤Cd污染进行评价,需考虑人为污染因素、环境地球化学背景值、自然成岩作用可能会引起背景值的变动等方面的影响^[22-23]。地累积指数法(Index of Geo-accumulation, I_{geo}),又称Muller指数^[24],考虑了成岩作用对土壤背景值所带来的影响,通常用于定量评价水环境沉积物和土壤中重金属的污染程度及其分级情况^[25-26]。贵州省作为典型的Cd地球化学背景异常区,Cd地球化学背景值高,可通过地累积指数法对研究区土壤中重金属Cd进行污染评价。其表达式如下:

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{1.5B_n}$$

式中: I_{geo} 为地累积指数; C_n 为土壤中Cd的含量; B_n 为贵州省Cd地球化学背景值;1.5为修正系数。 I_{geo} 与污染水平之间的对应关系如下:无污染($I_{geo} \leq 0$),无污染至中度污染($0 < I_{geo} \leq 1$),中度污染($1 < I_{geo} \leq 2$),中度至重度污染($2 < I_{geo} \leq 3$),重度污染($3 < I_{geo} \leq 4$),重度至严重污染($4 < I_{geo} \leq 5$),严重污染($I_{geo} > 5$)。

1.2.3 马铃薯生态风险评价

根据《食品安全国家标准 食品中污染物限量》

(GB 2762—2017)^[27]中块根和块茎类蔬菜的限量要求($\leq 0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)对马铃薯Cd进行生态风险评价。

1.2.4 土壤Cd风险阈值推导方法

确定土壤重金属污染阈值的依据,一是通过蔬菜作物减产10%为临界标准,二是根据我国颁布的《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017),反推出土壤中重金属的限量值^[18,28]。农用地土壤重金属安全阈值确定的方法主要有点模型、概率分布模型、经验模型^[29],经验模型以生态环境效应法为代表,能定量反映阈值结果且考虑到土壤理化性质之间的差异。因此,本研究根据蔬菜可食部位国家卫生质量标准并结合经验模型,依据土壤-马铃薯之间迁移转化规律,建立土壤中Cd含量(y)与马铃薯Cd含量(x)之间的线性、多项式、对数、乘幂、指数5类回归模型^[30],通过比较各方程的决定系数(R^2)以及相关显著性检验结果(P 值),选用拟合程度最高(最大 R^2 值和最小 P 值)的回归方程作为拟合公式。将《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)中块茎类蔬菜的限量值($0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)代入相应回归方程,反演 $\text{pH} \leq 6.5$ 、 $6.5 < \text{pH} \leq 7.5$ 、 $\text{pH} > 7.5$ 的马铃薯生产土壤总Cd和有效态Cd的风险阈值。

1.3 数据处理与分析

本研究选用 Arcgis 10.1 绘制采样区域示意图, Excel 2010 整理数据与制表。利用 SPSS 22.0 进行相关性分析及 Origin 9.2 进行回归分析,采用 LSD 法进行多重比较分析。

2 结果与讨论

2.1 不同研究区土壤基本理化性质

研究区土壤基本理化性质见表1。HZ和WN的土壤总Cd与LS、CS和CH存在显著差异,有效态Cd含量以HZ和WN较高,LS、CS和CH较低。不同研究区土壤总Cd含量大小为 $\text{HZ}(8.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}) > \text{WN}(6.98$

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}) > \text{CS}(0.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}) > \text{CH}(0.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}) > \text{LS}(0.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1})$; HZ和WN的土壤总Cd含量平均值远超农田土壤环境质量标准($0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); LS、CS和CH土壤总Cd含量平均值均超过我国自然土壤Cd含量。土壤有效态Cd含量平均值 $\text{HZ}(0.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}) > \text{WN}(0.09 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}) > \text{CS}(0.04 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}) > \text{CH}(0.03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1})$ 。不同研究区土壤pH平均值介于5.14~7.35之间;有机质平均值介于30.34~44.86 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间。

2.2 不同研究区土壤Cd浓度及污染评价

通过现行土壤环境质量标准(GB 15618—2018)对研究区土壤进行质量类别划分(表2)。HZ和WN土壤总Cd均超过农用地土壤污染筛选值,土壤可能存在健康风险;超过管制值的比例分别为92.3%和77.4%,土壤存在健康风险,需要采取风险管控或修复措施。CS和CH土壤超过筛选值的比例分别达80.0%和50.0%,土壤可能存在健康风险;LS、CS和CH的土壤均未超过土壤污染管制值。贵州省喀斯特地质高背景区92.2%的土壤总Cd超过农用地土壤污染风险筛选值,58.3%超过土壤污染风险管制值,超过管制值的土壤全部分布在黔西北的HZ和WN。

通过地累积指数法,采用贵州省Cd土壤背景值作为自然土壤背景值对不同研究区土壤中Cd污染程度进行评价(表3)。不同研究区Cd的平均 I_{geo} 值大小顺序为 $\text{HZ}(2.71) > \text{WN}(2.36) > \text{CS}(-1.18) > \text{CH}(-2.03) > \text{LS}(-2.21)$ 。地累积指数法表明, HZ和WN土壤受Cd污染较为严重,达到中度-重度污染水平。贵州是典型喀斯特地区,喀斯特地区特别是以碳酸盐系石灰岩发育的土壤Cd的背景值高于其他成土母质发育的土壤^[31],对区内农产品的质量安全存在一定风险。喀斯特地区农田土壤表层Cd的随机分布与农业生产中农用化学品如化肥、农药、生长调节剂的施用关系更大^[9],在矿业开采区、土法炼锌区和养殖废水灌溉区^[32]的土壤表层Cd具有明显的表层富集现象。

表1 研究区土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil

研究区 Areas	总Cd Total Cd/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有效态Cd Available Cd/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	土壤pH Soil pH	有机质 Organic matter/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	样品数 Samples
LS	0.24±0.11b	0.04±0.04a	5.69±1.17b	41.70±21.46a	2
HZ	8.42±5.31a	0.10±0.20a	7.16±1.04a	44.86±18.26a	13
WN	6.98±5.62a	0.09±0.15a	7.35±0.97a	44.06±15.87a	62
CS	0.52±0.28b	0.04±0.03a	5.56±0.66b	43.18±12.98a	20
CH	0.27±0.12b	0.03±0.02a	5.14±0.55b	30.34±6.03a	8

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$). The same below.

表2 研究区土壤环境质量类别划分

Table 2 Classification of soil environmental quality in the study area

研究区 Areas	样品数 Samples	优先保护类(小于筛选值) Priority protection class (Less than filter value)		安全利用类(筛选值~管制值) Security utilization class (Filter value~Control value)		严格管控类(大于管制值) Strictly controlled class (Greater than control value)	
		样品数 Samples	比率 Ratios/%	样品数 Samples	比率 Ratios/%	样品数 Samples	比率 Ratios/%
LS	2	2	100	—	—	—	—
HZ	13	—	—	1	7.7	12	92.3
WN	62	—	—	14	22.6	48	77.4
CS	20	4	20	16	80.0	—	—
CH	8	4	50	4	50.0	—	—

注:“—”表示样品数和所占比率为0。

Note: “—” means the number and proportion is 0.

表3 不同研究区土壤Cd地累积指数及其分级

Table 3 Soil Cd accumulation index and its classification in different areas

研究区 Areas	I_{geo} 最小值 Minimum	I_{geo} 最大值 Maximum	I_{geo} 平均值 Mean	分级 Classes	污染程度 Pollution levels
LS	-2.64	-1.77	-2.21	0	无污染
HZ	0.24	4.27	2.71	2~3	中度~重度污染
WN	-0.73	5.25	2.36	2~3	中度~重度污染
CS	-2.75	-0.06	-1.18	0	无污染
CH	-2.71	-1.14	-2.03	0	无污染

2.3 不同研究区马铃薯Cd累积特性及影响因素

研究区105个马铃薯样品中有18个样品Cd超标,分别为HZ 1个、WN 16个、CS 1个,点位超标率为17.1%(图2);超标倍数仅为0.01~1.11倍,均值为0.30倍。HZ、WN和CS的马铃薯均存在Cd超标现象,LS和CH的马铃薯未超标。对比表3和图2可知,用地累积指数法评价CS土壤Cd污染程度处于无污染,而种植的马铃薯存在超标现象。CS存在超过农用地土壤污染筛选值的点位,其土壤可能存在健康风险;CS土壤pH介于4.5~6.8之间,均值为5.56,土壤中Cd的生物有效性相较HZ和WN高。研究表明,马铃薯块茎中Cd含量主要受体内运输和分配Cd生理过程的影响^[33],这可能引起土壤超标而马铃薯未超标。

马铃薯Cd含量与土壤基本理化性质的相关性分析结果表明(表4),马铃薯Cd与土壤总Cd呈极显著正相关($R=0.587, P<0.01$),与有效态Cd呈极显著正相关($R=0.755, P<0.01$)。马铃薯主要吸收有效态Cd,在酸性条件下土壤中的Cd快速解吸,有效态含量增加,马铃薯对Cd的吸收也增加。在Cd的赋存形态中,碳酸盐结合态、交换态Cd迁移性强,随着土壤pH和有机质的改变,赋存状态会相互转化。土壤pH与有效态Cd呈极显著负相关($R=-0.633, P<0.01$)。pH因影响Cd的赋存形态,从而影响Cd的生物有效性;

随着pH的升高,土壤中逐渐生成Cd的硫化物、氢氧化物、碳酸盐和磷酸盐的沉淀,Cd的生物有效性降低^[34]。

土壤pH与土壤总Cd呈极显著正相关($R=0.647, P<0.01$);有机质与土壤总Cd呈极显著正相关($R=0.683, P<0.01$),而与有效态Cd无显著相关性。部分原因可能是与马铃薯栽培管理过程中为提升土壤肥力、提高马铃薯产量而施入大量的有机肥和化肥有关。有机肥中含有的大量Cd会引起土壤总Cd含量增加,有机质可直接与Cd发生吸附、离子交换等作用形成有机结合态Cd而影响Cd的有效性;大量施用化肥造成土壤酸化,而化肥中大量阴阳离子可与土壤中Cd发生沉淀反应、离子交换作用、拮抗交互作用等影响土壤中Cd的行为。土壤的淋溶作用、土壤动物(如蚯蚓)的运动,也会对土壤中Cd进行重新分配。

2.4 基于马铃薯质量安全的土壤Cd风险阈值推导

2.4.1 贵州喀斯特地区土壤总Cd和有效态Cd的风险阈值

利用贵州省4个县区103对马铃薯块茎和土壤Cd进行Cd风险阈值推导,风险阈值没有考虑品种之间的差异。研究表明,宣薯2号、费乌瑞它、威芋7号、威芋5号块茎中Cd的富集系数分别为0.031、0.034、0.043、0.017^[35];周显勇^[36]在黄壤和石灰(岩)土种植

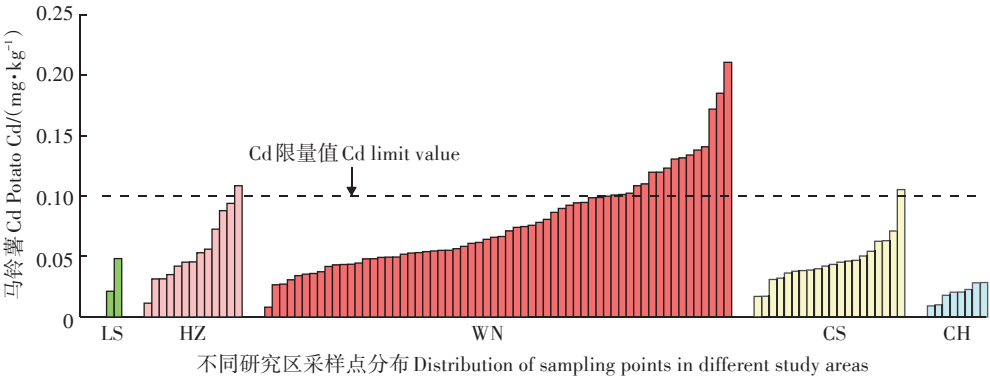


图 2 不同研究区马铃薯 Cd 含量分布及超标情况

Figure 2 Cd content distribution of potato in different research areas and its exceeding standard

表 4 马铃薯 Cd 含量与土壤基本理化性质的相关性

Table 4 Correlation between Cd content of potato tuber and soil basic physical and chemical properties

相关系数 Correlation coefficient	马铃薯 Cd Potato Cd	总 Cd Total Cd	有效态 Cd Available Cd	土壤 pH Soil pH	有机质 Organic matter
马铃薯 Cd	1				
总 Cd	0.345**	1			
有效态 Cd	0.570**	0.015	1		
土壤 pH	-0.031	0.419**	-0.401**	1	
有机质	0.031	0.467**	-0.187	0.242*	1

注：“*”表示在 5% 水平上相关性显著，“**”表示在 1% 水平上相关性极显著。
Note: "*" indicates that the correlation is significant at the 5% level, "**" indicates that the correlation is extremely significant at the 1% level.

会-2 号、宣薯 2 号、青薯 9 号等马铃薯品种,结果显示不同马铃薯品种块茎中 Cd 的富集系数均小于 1;有学者对 20 种马铃薯品种的研究表明,块茎 Cd 的转运系数均小于 1,品种间没有显著差异^[37]。因此,不同马铃薯品种的富集转运系数均小于 1,品种间差异不显著,属于低富集农作物。

GB 15618—2018 中, $\text{pH} \leq 5.5$ 、 $5.5 < \text{pH} \leq 6.5$ 、 $6.5 < \text{pH} \leq 7.5$ 、 $\text{pH} > 7.5$ 的土壤污染风险管制值分别为 1.5、2.0、3.0、4.0 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。通过拟合得到贵州喀斯特地区马铃薯生产土壤总 Cd 的风险阈值分别为 4.30 ($\text{pH} \leq 6.5$)、7.34 ($6.5 < \text{pH} \leq 7.5$)、9.39 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($\text{pH} > 7.5$) (表 5),土壤有效态 Cd 的风险阈值分别为 0.22 ($\text{pH} \leq 6.5$)、0.02 ($6.5 < \text{pH} \leq 7.5$)、0.01 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($\text{pH} > 7.5$) (表 6)。拟合出的土壤总 Cd 阈值远高于现行土壤环境质量评价二级标准,分别高出农用地土壤污染风险管制值 1.15、1.45、1.35 倍。刘香香等^[19]通过对广东省块根和块茎类蔬菜胡萝卜进行原位土盆栽实验,得出土壤总 Cd、有效态 Cd 阈值分别为 1.08、0.07 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,与本研究阈值存在差异;刘克^[38]对江西红壤和陕西塿土小麦安全种植的土壤 Cd 安全阈值进行研究, pH 为 5.5、

7.0、7.5 小麦安全种植的土壤 Cd 安全阈值分别为 0.34、0.54、0.64 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,结果低于本研究的阈值;这可能是区域环境因子、不同农作物的富集能力等差异导致。喀斯特地区超过 50% 的 Cd 以碳酸盐形式存在,这使喀斯特地区土壤总 Cd 含量偏高,土壤有效态 Cd 含量低,该地区对种植马铃薯的土壤 Cd 阈值有更高要求。用现行土壤环境质量标准评价喀斯特地区土壤过于严格,适用性较差。

2.4.2 黔西北土壤总 Cd 和有效态 Cd 的风险阈值

从土壤总 Cd 的分布可知,黔西北 HZ 和 WN 土壤 Cd 含量高,具有地质高背景与污染叠加的分布特征,黔西北受到地球化学高背景和土法炼锌^[39]、矿山开采等人为活动的双重影响,与省内其他地区差异明显。通过拟合得到黔西北土壤 Cd 的风险阈值,土壤 $\text{pH} \leq 6.5$ 、 $6.5 < \text{pH} \leq 7.5$ 、 $\text{pH} > 7.5$ 时,土壤总 Cd 的风险阈值分别为 5.11、7.75、9.39 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 7),土壤有效态 Cd 的风险阈值分别为 0.29、0.02、0.01 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 8)。拟合出的土壤总 Cd 阈值远高于现行土壤环境质量标准,分别高出农用地土壤污染风险管制值 1.56、1.58、1.35 倍。当 $6.5 < \text{pH} \leq 7.5$ 时,比喀斯特地区总 Cd 阈值高

表5 贵州喀斯特地区马铃薯安全生产土壤总Cd阈值

Table 5 Total Cd threshold of potato safety production soil in karst area of Guizhou Province

pH	回归方程 Regression equations	P值	阈值 Thresholds/(mg·kg ⁻¹)
pH≤6.5(n=48)	$y = -1.363\ 9 + 70.596\ 8x - 139.914\ 4x^2$ ($R^2=0.633\ 8$)	$1.529\ 8 \times 10^{-10}$	4.30
6.5<pH≤7.5(n=34)	$y = 6.226\ 7 + 0.000\ 3e^{82.229\ 6x}$ ($R^2=0.410\ 2$)	3.61×10^{-8}	7.34
pH>7.5(n=21)	$y = 0.129\ 1 + 3.847\ 9e^{8.781\ 7x}$ ($R^2=0.082\ 4$)	0.001 2	9.39

表6 贵州喀斯特地区马铃薯安全生产土壤有效态Cd阈值

Table 6 Effective Cd threshold of potato safety production soil in karst area of Guizhou Province

pH	回归方程 Regression equations	P值	阈值 Thresholds/(mg·kg ⁻¹)
pH≤6.5(n=48)	$y = -0.062\ 2 + 3.316\ 5x - 4.514\ 2x^2$ ($R^2=0.454\ 7$)	1.19×10^{-6}	0.22
6.5<pH≤7.5(n=34)	$y = 0.022\ 3 - 1.788\ 7e^{-652.663\ 3x}$ ($R^2=0.002\ 6$)	0.012 4	0.02
pH>7.5(n=21)	$y = 0.011\ 6 - 0.012\ 4e^{-30.391\ 1x}$ ($R^2=0.055\ 8$)	0.006 9	0.01

表7 地质高背景与重金属污染叠加区马铃薯生产土壤总Cd阈值

Table 7 Total Cd threshold of potato producing soil in the superposed area of high geological background and heavy metal pollution

pH	回归方程 Regression equations	P值	阈值 Thresholds/(mg·kg ⁻¹)
pH≤6.5(n=21)	$y = 1\ 683.823\ 5 - 1\ 680.320\ 9e^{-0.009\ 6x}$ ($R^2=0.123\ 4$)	1.43×10^{-8}	5.11
6.5<pH≤7.5(n=33)	$y = 6.445\ 3 + 0.000\ 4e^{80.897\ 9x}$ ($R^2=0.414\ 5$)	7.71×10^{-8}	7.75
pH>7.5(n=21)	$y = 0.129\ 1 + 3.847\ 9e^{8.781\ 7x}$ ($R^2=0.082\ 4$)	0.001 2	9.39

表8 地质高背景与重金属污染叠加区马铃薯生产土壤有效态Cd阈值

Table 8 Effective Cd threshold of potato production in the superposed area of high geological background and heavy metal pollution

pH	回归方程 Regression equations	P值	阈值 Thresholds/(mg·kg ⁻¹)
pH≤6.5(n=21)	$y = 0.370\ 5 - 1.524\ 4 \times (3 \times 10^{-13})^x$ ($R^2=0.204\ 2$)	0.001 1	0.29
6.5<pH≤7.5(n=33)	$y = 0.022\ 9 - 1.897\ 8e^{-651.988\ 1x}$ ($R^2=0.003\ 0$)	0.012 4	0.02
pH>7.5(n=21)	$y = 0.011\ 6 - 0.012\ 4e^{-30.391\ 1x}$ ($R^2=0.055\ 8$)	0.006 9	0.01

5.59%。受地质背景和人为活动的影响,黔西北马铃薯Cd的超标风险相对较高。

3 结论

(1)贵州省喀斯特地质高背景区土壤总Cd含量普遍较高,92.2%超过农用地土壤污染风险筛选值,58.3%超过土壤污染风险管制值,超过管制值的土壤全部分布在黔西北的赫章县和威宁县,土壤处于中度-重度污染水平。

(2)受土壤总Cd和有效态Cd的影响,马铃薯Cd点位超标率为17.1%,均为轻度超标,主要分布在威宁县,在喀斯特污染土壤上种植马铃薯存在一定的Cd质量安全风险。

(3)基于马铃薯质量安全的喀斯特地质高背景区土壤总Cd风险阈值分别为4.30(pH≤6.5)、7.34(6.5<pH≤7.5)、9.39 mg·kg⁻¹(pH>7.5),是农用地土壤环境

质量标准(GB 15618—2018)管制值的2倍以上;基于本研究,现行的农用地土壤Cd标准应用于喀斯特地区较为严格。

参考文献:

- [1] 李继平,李敏权,惠娜娜,等. 马铃薯连作田土壤中主要病原真菌的种群动态变化规律[J]. 草业学报, 2013, 22(4): 147-152. LI Ji-ping, LI Min-quan, HUI Na-na, et al. Population dynamics of main fungal pathogens in soil of continuously cropped potato[J]. *Acta Prata-culturae Sinica*, 2013, 22(4): 147-152.
- [2] 杨雅伦,郭燕枝,孙君茂. 我国马铃薯产业发展现状及未来展望[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(1): 29-36. YANG Ya-lun, GUO Yan-zhi, SUN Jun-mao. Present status and future prospect for potato industry in China[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2017, 19(1): 29-36.
- [3] Wang G, Su M Y, Chen Y H, et al. Transfer characteristics of cadmium and lead from soil to the edible parts of six vegetable species in south-eastern China[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 144(1): 127-135.

- [4] Clemens S, Aarts M G M, Thomine S, et al. Plant science: The key to preventing slow cadmium poisoning[J]. *Trends in Plant Science*, 2013, 18(2):92-99.
- [5] 白瑞琴, 孟海波, 周爽. 重金属Cd对两个马铃薯品种生长发育的影响[J]. 华北农学报, 2012, 27(1): 168-172. BAI Rui-qin, MENG Hai-bo, ZHOU Shuang. Effects of cadmium on growth and development of two potato varieties[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2012, 27(1):168-172.
- [6] 王沛裴, 郑顺林, 何彩莲, 等. 液体有机肥对铅、镉污染下马铃薯重金属吸收及干物质积累的研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(3): 425-431. WANG Pei-pei, ZHENG Shun-lin, HE Cai-lian, et al. Effects of liquid organic fertilizer on absorption of lead and cadmium and dry matter accumulation indifferent organs of potato[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(3):425-431.
- [7] 黄芳, 辜娇峰, 周航, 等. 不同马铃薯品种对Cd、Pb吸收累积的差异[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 370-376. HUANG Fang, GU Jiao-feng, ZHOU Hang, et al. Differences of cadmium and lead absorption and accumulation in different potato varieties[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(6):370-376.
- [8] 杨启中, 郭华春, 杜晓翠, 等. 磷矿复垦地马铃薯镉和铅含量及分布规律[J]. 中国马铃薯, 2016, 30(5): 277-281. YANG Qi-zhong, GUO Hua-chun, DU Xiao-cui, et al. Analysis on cadmium and lead in whole potato plant from phosphorite reclaimed land[J]. *Chinese Potato Journal*, 2016, 30(5):277-281.
- [9] 刘鸿雁, 涂宇, 顾小凤, 等. 地球化学高背景农田土壤重金属镉的累积效应及环境影响[J]. 山地农业生物学报, 2018, 37(5): 1-5. LIU Hong-yan, TU Yu, GU Xiao-feng, et al. Accumulative effect and environmental impact of cadmium in farmland soil with high background of geochemistry[J]. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 2018, 37(5):1-5.
- [10] 费志军, 何锦林. 贵州喀斯特农业土壤中镉的吸附解吸特性分析[J]. 贵州农业科学, 2018, 46(12): 68-73. FEI Zhi-jun, HE Jin-lin. Adsorption and desorption characteristics of cadmium in agricultural soils in Guizhou karst area[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2018, 46(12):68-73.
- [11] 赵志鹏. 重金属镉的土壤空间分布机制及迁移转化过程研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2015: 1-10. ZHAO Zhi-peng. Cadmium distribution and transformation in soil profile and the effect factor[D]. Guiyang: Guizhou University, 2015: 1-10.
- [12] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 331-332. China National Environment Monitoring Centre. Background values of soil elements in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990:331-332.
- [13] Mohmand J, Eqani S A M A S, Fasola M, et al. Human exposure to toxic metals via contaminated dust: Bio-accumulation trends and their potential risk estimation[J]. *Chemosphere*, 2015, 132(8): 142-151.
- [14] 孔祥宇, 黄国培, 程天金, 等. 贵州省稻田土壤重金属分布特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2018, 37(6): 1084-1091. KONG Xiang-yu, HUANG Guo-pe, CHENG Tian-jin, et al. Distribution characteristics of heavy metals in paddy soils of Guizhou[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2018, 37(6):1084-1091.
- [15] 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 Jian, LANG Xian-dong, CHEN Rong. Content status and assessment of heavy metals in soils from potato growing areas in Liuzhi, Panxian and Shuicheng counties, Guizhou Province[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2015, 42(17):6-11.
- [16] 张家春, 林绍霞, 张清海, 等. 贵州草海湿地周边耕地土壤与农作物重金属污染特征[J]. 水土保持研究, 2014, 21(3): 273-278. ZHANG Jia-chun, LIN Shao-xia, ZHANG Qing-hai, et al. Characteristics of heavy metal pollution in crops and soil around Caohai wetland in Guizhou Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(3):273-278.
- [17] 夏增禄. 中国土壤环境容量[M]. 北京: 地震出版社, 1992: 1-2. XIA Zeng-lu. Soil environmental capacity in China[M]. Beijing: Seismological Press, 1992: 1-2.
- [18] 郑向群, 郑顺安, 李晓辰. 叶菜类蔬菜土壤铬(Ⅲ)污染阈值研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(12): 3039-3044. ZHENG Xiang-qun, ZHENG Shun-an, LI Xiao-chen. Pollution threshold value of soil chromium(Ⅲ) for leafy vegetables[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(12):3039-3044.
- [19] 刘香香, 文典, 王其枫, 等. 广东省不同种类蔬菜与土壤Cd污染相关性阈值研究[J]. 中国农学通报, 2011, 28(10): 109-115. LIU Xiang-xiang, WEN Dian, WANG Qi-feng, et al. Study on the relationship between soil Cd pollution and Cd contents in different kinds of vegetables and pollution threshold of soil in Guangdong Province[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 28(10):109-115.
- [20] 李富荣, 文典, 王富华, 等. 广东地区芸薹类叶菜-土壤Cd污染相关性分析及土壤Cd限量值研究[J]. 生态环境学报, 2016, 25(4): 705-710. LI Fu-rong, WEN Dian, WANG Fu-hua, et al. Correlation analysis of Cd pollution between soil and Brassica leaf vegetables and the soil Cd safety threshold in Guangdong region[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(4):705-710.
- [21] 中华人民共和国生态环境部. 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行): GB 15618—2018[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2018. Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Soil environmental quality risk control standard for soil contamination of agricultural land: GB 15618—2018[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2018.
- [22] 马宏宏, 余涛, 杨忠芳, 等. 典型区土壤重金属空间插值方法与污染评价[J]. 环境科学, 2018, 39(10): 4684-4693. MA Hong-hong, YU Tao, YANG Zhong-fang, et al. Spatial interpolation methods and pollution assessment of heavy metals of soil in typical areas[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(10):4684-4693.
- [23] 郭笑笑, 刘丛强, 朱兆洲, 等. 土壤重金属污染评价方法[J]. 生态学报, 2011, 30(5): 889-896. GUO Xiao-xiao, LIU Cong-qiang, ZHU Zhao-zhou, et al. Evaluation methods for soil heavy metals contamination: A review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(5): 889-896.
- [24] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *GeoJournal*, 1969, 2(3): 108-118.

- [25] 马宏宏, 彭敏, 刘飞, 等. 广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征[J]. 环境科学, 2020, 41(1): 449-459. MA Hong-hong, PENG Min, LIU Fei, et al. Bioavailability, translocation, and accumulation characteristic of heavy metals in a soil-crop system from a typical carbonate rock area in Guangxi, China[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(1): 449-459.
- [26] Raimundo J B, Bueno P C, Rubi J A M, et al. Peto-geochemical baseline content levels and soil quality reference values of trace elements in soils from the Mediterranean (Castilla La Mancha, Spain)[J]. *Central European Journal of Geosciences*, 2010, 2(4): 441-454.
- [27] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中污染物限量: GB 2762—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. National Health and Family Planning Commission of PRC, State Administration for Market Regulation. National food safety standard contaminant limit in food: GB 2762—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [28] Moreno J L, Bastida F, Ros M, et al. Soil organic carbon buffers heavy metal contamination on semiarid soils: Effects of different metal threshold levels on soil microbial activity[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2009, 45(3): 220-228.
- [29] 窦韦强, 安毅, 秦莉, 等. 农用地土壤重金属生态安全阈值确定方法的研究进展[J]. 生态毒理学报, 2019, 14(4): 54-64. DOU Wei-qiang, AN Yi, QIN Li, et al. Research progress in determination methods of ecological safety thresholds for heavy metals in agricultural land[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2019, 14(4): 54-64.
- [30] 赵勇, 李红娟, 魏婷婷, 等. 土壤、蔬菜的铅污染相关性分析及土壤铅污染阈限值研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(4): 843-847. ZHAO Yong, LI Hong-juan, WEI Ting-ting, et al. Relationship between soil Pb pollution and Pb contents in vegetables and pollution threshold of soil Pb[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(4): 843-847.
- [31] 何腾兵, 董玲玲, 李广枝, 等. 喀斯特山区不同母质(岩)发育的土壤主要重金属含量差异性研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(1): 188-193. HE Teng-bing, DONG Ling-ling, LI Guang-zhi, et al. Differences of heavy metal contents in soils derived from different parent materials/rocks in karst mountain area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(1): 188-193.
- [32] 刘艳萍, 刘鸿雁, 吴龙华, 等. 贵阳市某蔬菜地养殖废水污灌土壤重金属、抗生素复合污染研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(3): 1074-1082. LIU Yan-ping, LIU Hong-yan, WU Long-hua, et al. Co-contamination of heavy metals and antibiotics in soils under husbandry wastewater irrigation in Guiyang City[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(3): 1074-1082.
- [33] 彭益书. 黔西北土法炼锌区炉渣、土壤与植物系统中重金属分布及迁移研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2018: 79-87. PENG Yi-shu. Distribution and migration of heavy metals among system of the slag, soil and plant in the indigenous zinc smelting area of northwestern Guizhou Province, China[D]. Guiyang: Guizhou University, 2018: 79-87.
- [34] Altin O, Ozbelge O H, Dogu T. Effect of pH, flow rate and concentration on the sorption of Pb and Cd on montmorillonite: I Experimental[J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2007, 74(12): 1131-1138.
- [35] 符东顺. 镉胁迫下马铃薯相关表达基因的转录组测序与候选基因挖掘[D]. 贵阳: 贵州大学, 2019: 19-28. FU Dong-shun. Transcriptome sequencing and candidate gene mining of potato related gene expression under cadmium stress[D]. Guiyang: Guizhou University, 2019: 19-28.
- [36] 周显勇. 马铃薯主栽品种吸Cd特性及安全生产阈值探究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2019: 10-33. ZHOU Xian-yong. Study on Cd absorption characteristics and safety production threshold of main potato varieties[D]. Guiyang: Guizhou University, 2019: 10-33.
- [37] 宋洁, 郭华春. 低Pb、Cd积累马铃薯品种筛选及其余矿质营养元素的相关性研究[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(2): 621-627. SONG Jie, GUO Hua-chun. Selection of low Pb and Cd accumulation potato cultivars and analysis of correlation among Pb, Cd and mineral elements[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2019, 19(2): 621-627.
- [38] 刘克. 我国主要小麦产地土壤镉和铅的安全阈值研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016: 87-90. LIU Ke. Soil threshold of cadmium and lead in major Chinese wheat producing areas[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016: 87-90.
- [39] 敖子强, 林文杰, 严重玲, 等. 土法炼锌区土壤重金属形态及其转化[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2): 564-569. AO Zi-qiang, LIN Wen-jie, YAN Chong-ling, et al. Speciation and transformation of heavy metals in the indigenous zinc smelting area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2): 564-569.