

中图分类号: S532 文献标识码: A 文章编号: 1672-3635(2016)05-0277-05

磷矿复垦地马铃薯镉和铅含量及分布规律

杨启中, 郭华春, 杜晓翠, 李俊*

(云南农业大学农学与生物技术学院, 云南 昆明 650201)

摘要: 利用火焰原子吸收法测定了种植于磷矿复垦地马铃薯植株不同器官中镉(Cd)、铅(Pb)重金属的含量。结果表明, 在磷矿复垦地土壤Cd、Pb含量高于土壤无机污染物的二级标准条件下, 马铃薯块茎中Cd、Pb含量都超过安全食用标准; 马铃薯植株中不同器官Cd、Pb的分布具有明显规律, 块茎、根、茎、叶的含量差异显著, 呈逐渐增加趋势, 叶片是积累2种重金属含量最多的器官, 块茎含量最低; 随生育期延长, 成熟期马铃薯根、茎、叶中的Cd含量较现蕾期略有增加。马铃薯各器官对2种重金属元素的富集系数不同, 对Cd的富集作用明显大于对Pb的富集作用, 因此即使在低Cd土壤中种植马铃薯也需要谨慎选择。

关键词: 磷矿复垦地; 马铃薯; Cd; Pb; 富集作用

Analysis on Cadmium and Lead in Whole Potato Plant from Phosphorite Reclaimed Land

YANG Qizhong, GUO Huachun, DU Xiaocui, LI Jun*

(College of Agronomy and Biotechnology, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650201, China)

Abstract: The content of cadmium and lead existing in potato plant in the phosphorite reclaimed land was determined by using flame atomic absorption spectrometry. The results showed that the total cadmium and lead content of soils exceeded the secondary standard of the environmental quality of soil inorganic pollutants, and both element contents in potato tuber exceeded the food safety standard; the distribution of cadmium and lead in various parts of the potato plant had obvious patterns, and the contents of both elements in various organs showed significant difference and increased gradually in the potato tuber, root, stem and leaf, with leaf containing the highest content of both elements and tuber the lowest; along with the advance of the growth, the content of cadmium in each organ of potato plant at maturity was a little bit higher than that at flower bud stage. The data also showed that the bioconcentration factor of cadmium was markedly higher than that of lead, suggesting that planting potato should be more cautious even in a low concentration of cadmium contaminated soils.

Key Words: phosphorite reclaimed land; potato; cadmium; lead; accumulation

中国马铃薯种植面积及产量均位居世界前列。马铃薯是云南省重要作物之一, 在全国马铃薯种植业中也占据重要的位置。在国家马铃薯主粮化战略中, 提出要提高马铃薯的单产, 播种面积从目前的

533万 hm^2 扩大至1 000万 hm^2 , 其中很大一部分涉及到南方闲置冬闲田的利用。2014年国家环境保护部和国土资源部公布的《全国土壤污染状况调查公报》数据显示: 中国南方土壤环境质量令人担

收稿日期: 2015-09-15

基金项目: 云南省教育厅科学研究基金项目(2014Y211); 云南省重大种业专项(2013ZA007)。

作者简介: 杨启中(1992-), 男, 本科, 从事马铃薯逆境生理研究。

*通信作者(Corresponding author): 李俊, 讲师, 博士, 主要从事马铃薯逆境生理生态研究, E-mail: nxy8mm@163.com。

忧, 南方土壤污染重于北方, 西南、中南地区土壤重金属超标范围较大; 镉(Cd)、铅(Pb)、汞(Hg)、砷(As)几种无机污染物含量分布呈现从西北到东南、从东北到西南方向逐渐升高的态势。因此, 这种土壤质量现状引发了人们对粮食安全话题的密切关注, 在这些增加的种植区域内生产出来的马铃薯是否安全, 有害重金属Cd、Pb在马铃薯植株的分布具有什么规律? 对这些问题的研究和阐明对主粮化战略推进和粮食安全是必要的。云南被称为“有色金属王国”, 矿产资源丰富。马铃薯种植主要分布于曲靖市、昭通市、昆明市等地, 这3个市马铃薯种植面积占全省总种植面积的71%^[1], 同时这3个区域也分布有丰富的铅锌矿、煤矿和磷矿等矿产资源。在矿区周围, 各种蔬菜和作物易受到扩散污染源的影响而导致有害重金属超标^[2-4]。昆明以滇池流域为中心的周围地区富含磷矿, 分布有安宁、西山、草铺等六大矿区共52处磷矿, 占到了全省磷矿资源的69%^[5]。生产磷肥的磷矿石成分比较复杂, 含有多种重金属组分, 其中以Cd含量尤为显著^[6]。所以, 尽管昆明市马铃薯集中分布于禄劝和寻甸2县的山区和半山区, 离滇池流域较远, 但是分析马铃薯在主要矿区周围是否积累对人体危害较大的重金属(Cd、Pb), 明确马铃薯植株对其的吸收和分布规律具有重要实践意义。本研究以昆明滇池流域主要磷矿复垦区上种植的马铃薯为研究对象, 重点分析复垦土壤上种植的马铃薯各器官Cd和Pb含量, 参照食品安全国家标准分析Cd和Pb的含量是否达到安全食用标准, 并得出马铃薯对Cd和Pb两种重金属元素的富集系数。最终, 为云南省矿区周围、复垦地作物选择和种植提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料采集和处理

土壤样品的采集: 参照龚世鹏^[7]的方法, 于5月中旬在昆明某磷矿复垦地上采用S形曲线法采集5份土样(每份500 g左右)。将采集的土样混合后用四分法缩分至约100 g, 缩分后的土样经风干后, 除去土样中石块和植物残体等异物, 用木棒碾压, 通过2 mm尼龙筛除去2 mm以上的砂砾, 混匀, 用研钵将土样研磨至全部通过40目尼龙筛,

混匀后备用。

马铃薯的根、茎、叶及块茎的采样: 试验用的马铃薯植株为昆明磷矿复垦地上种植的马铃薯, 品种为‘丽薯6号’。分别于2014年5月中旬采集了9株现蕾期马铃薯植株, 于8月下旬采集了12株收获期的马铃薯植株。将采集回来的每个马铃薯植株分为根、茎、叶和块茎4个部分, 分别测定鲜重。各部分清洗干净, 分别装入牛皮纸袋中并放入烘箱中105℃杀青0.5 h, 然后75℃烘干至恒重, 冷却后即刻测定干重, 将样品分别用小钢磨打成粉并放入密封袋中, 注明各个样品编号以备用。

1.2 分析方法

土壤及马铃薯植株样品均采用火焰原子吸收光谱法测定, 试验所用仪器为美国瓦里安原子吸收仪(AA240)。采用国家食品重金属测定标准分别测定马铃薯现蕾期(9株)、收获期(12株)的块茎、根、茎、叶各器官中Cd、Pb的含量^[8,9](由于现蕾期采到的样品不多, 仅测定了Cd, Pb未测), 国家土壤质量重金属测定标准测定土壤中Cd、Pb的含量^[10], 用手持pH计测量土壤pH值^[11]。各材料均称取3份1.00 g样品, 重复测定3次。

1.3 土壤Cd、Pb污染情况

土壤中总Cd、Pb的含量如表1所示。磷矿复垦土壤pH值在5.07~6.24, 属酸性土壤。与国家颁布的土壤环境质量标准进行对比^[12], 可知该取样地土壤中总Cd、Pb的含量都已经超过土壤无机污染物的环境质量二级标准(pH值在5.5~6.5, 菜地), 属于轻度污染水平, 具有潜在污染危害。

1.4 富集系数计算

参考曹莹等^[13]的方法评价马铃薯各器官对Cd、Pb的富集能力。富集系数 = 地上部植物中元素含

表1 土壤中总Cd、Pb的含量(mg/kg DW)

Table 1 Total content of cadmium and lead in soil

重金属 Heavy metal	平均值 Average	国家标准(二级) National standard (Secondary level)
Cd	0.528	< 0.30
Pb	65.92	< 50

量/土壤中元素含量; 转运系数 = 地上部植物中元素含量/地下部植物中元素含量, 地下部以根来计算, 不包括块茎。

1.5 数据分析

试验所有数据采用 Microsoft Office Excel 2007 进行计算, 采用 SPSS19.0(SPSS Inc., USA) 软件统计分析试验数据, 利用 Duncan's 多重比较法进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同时期马铃薯各器官 Cd、Pb 的含量

由表 2 可以看出, 处于现蕾期的马铃薯植株

中, 根、茎、叶 Cd 的含量均呈明显增高趋势, 并且根中的平均含量最少, 茎中的含量比根中的增加 22.3%, 叶中 Cd 含量则又比茎中含量增加 38.4%。收获期马铃薯中根、茎、叶及块茎中的 Cd 含量差异较大, 呈现块茎、根、茎、叶 Cd 的含量逐渐增大规律, 增幅分别为 21.1%、22.2% 和 38.1%, 块茎与叶中 Cd 含量差值达到 2.04 倍。

另外, 马铃薯对 Pb 的积累规律与 Cd 是类似的, 收获期的马铃薯块茎、根、茎、叶中的含量也呈现逐渐增加趋势, 各器官中的 Pb 含量差异显著。块茎、根、茎、叶对 Pb 的积累增幅分别为 41.8%、22.5% 和 43.4%, 块茎和叶中的含量差值达 2.49 倍。

表 2 不同时期马铃薯块茎、根、茎、叶 Cd、Pb 的含量(mg/kg DW)
Table 2 Content of cadmium and lead in potato tuber, root, stem and leaf at different stages

马铃薯器官 Organ	现蕾期 Bud flower	收获期 Maturity	
	镉 Cd	镉 Cd	铅 Pb
块茎 Tuber	—	1.90 dD	13.91 dD
根 Root	2.11 cC	2.30 cC	19.72 cC
茎 Stem	2.58 bB	2.81 bB	24.16 bB
叶 Leaf	3.57 aA	3.88 aA	34.64 aA

注: 平均值数据后小写字母表示 0.05 显著水平, 大写字母表示 0.01 显著水平。
Note: Means followed by the different small and capital letters indicate significant difference at the levels of 0.05 and 0.01 probability, respectively.

随生育期的延长, 收获期马铃薯根、茎、叶中 Cd 含量较开花期的马铃薯根、茎、叶中的 Cd 含量有所增加, 但增加量并不明显(图 1)。表明马铃薯植株对 Cd 的吸收和积累事实上在现蕾期就达到较高水平, 在地下块茎膨大期间并没有再持续大量吸收和积累。

2.2 食用安全性

把马铃薯块茎中 Cd、Pb 含量换算为鲜重后, 含量分别为 0.40 和 2.89 mg/kg, 与国家规定的食品中污染物限量标准 Cd(0.1 mg/kg)、Pb(0.2 mg/kg) 进行比较, 块茎中 Cd、Pb 的含量均超过国家标准限量, 其中 Cd 超出 4 倍, 而 Pb 则超出 14.45 倍, 因此不适宜人体继续食用。

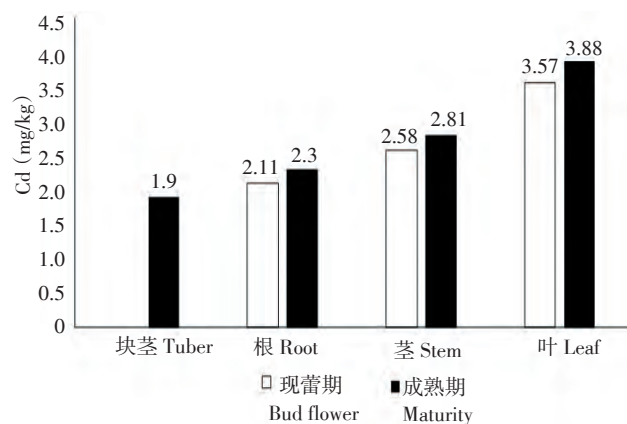


图 1 现蕾期和收获期马铃薯各个部位的 Cd 含量(mg/kg)
Figure 1 Cadmium content of each part of potato plant at bud flower and maturity stages

2.3 马铃薯对Cd、Pb的富集能力

马铃薯对Cd、Pb的富集能力见表3，可以看出马铃薯块茎、根、茎、叶对Cd、Pb的富集系数逐渐变大，块茎、叶对Cd、Pb的富集系数差值分

别为3.750和0.309，各器官对Cd的富集作用明显强于对Pb的富集作用。Cd、Pb的转运系数同样呈块茎、茎、叶逐渐增加规律，但2种重金属的转运系数则差别不大。

表3 收获期马铃薯各器官对Cd和Pb的富集系数和转运系数
Table 3 Bioconcentration and translocation factor of cadmium and lead in various organs at maturity

马铃薯各器官 Organs	镉 Cd		铅 Pb	
	富集系数	转运系数	富集系数	转运系数
	Bioconcentration factor	Translocation fator	Bioconcentration factor	Translocation fator
块茎 Tuber	3.598	0.826	0.211	0.705
根 Root	4.356	—	0.299	—
茎 Stem	5.322	1.222	0.367	1.225
叶 Leaf	7.348	1.687	0.520	1.757

3 讨 论

重金属由于对人体具有不可逆的伤害及富集效应，因此在食品安全问题上一直都是人们关注的核心话题。由于毒性较大和在土壤中存在的普遍性和长期性，Cd、Pb对人体构成的健康威胁最为明显^[14, 15]，在中国属于重点监测和控制排放的元素^[16-18]。当前，土地复垦和生态修复是全社会面临的重大课题，其涉及的农用耕地恢复和生态功能修复实践等等与农业生产密切相关。从本研究结果可以看出，在磷矿复垦地种植马铃薯，由于土壤Cd、Pb的含量超过环境质量二级标准致使块茎中的Cd、Pb含量超过食品限量标准^[19]，不适宜人体继续食用。云南作为马铃薯主产区同时也是矿产资源贮备丰富区，在开发利用各种矿产资源时应注重环境保护和绿色开采，加强对矿区周围农用耕地的保护，避免走先污染后治理的老路。而在农用耕地恢复过程中要强化对有害重金属的监管，例如镉，马铃薯块茎对其具有较强的富集作用，因此在选择种植区域时应避开矿区周围具有潜在镉污染源的土壤。

在高浓度Cd胁迫下(1, 5和25 mg/kg，土壤pH 8.2)，盆栽马铃薯植株中Cd含量从地下往地上器官逐渐增加^[20]，本研究样品采自磷矿复垦土壤(Cd浓度0.528 mg/kg，土壤pH 5.07~6.24)，即在酸性低Cd含量土壤上其对Cd的转运和分布规律仍

是一致的。叶片作为光合和蒸腾作用的主要器官，Cd随着木质部的蒸腾流向上运输并富集在叶片中，块茎中的Cd则以韧皮部的下行流输入，块茎及匍匐茎(根)自身只吸收土壤中较少的Cd，这在相关的盆栽试验中已经得到证实^[21, 22]。叶片中的Cd由于与光合产物及细胞壁组分形成稳定的络合物^[23]，影响了Cd向地下块茎的转移。加之马铃薯块茎的分化和膨大通常在植株现蕾后的花期，块茎在地下的时间只占整个生长期的一部分，因此尽管块茎生长于土壤中，其含有的Cd含量反而是最低的。马铃薯对Pb的吸收与积累规律研究较少，块茎中Pb的积累与土壤类型及品种具有密切关系^[24]，从Pb在马铃薯植株内含量来看，马铃薯各器官对Pb的转运系数和分布规律与Cd类似，因此其在体内的转运机制也应与Cd相似。但从富集系数分析则可知马铃薯对Cd、Pb的吸收机制不尽相同，马铃薯根系在磷矿复垦土壤中更易吸收Cd，这可能是因为土壤有机质、pH值导致Cd、Pb的可利用性不一样^[25]，或是不同金属元素间存在的相互作用引起^[26]，其原因有待进一步深入研究。

本文研究了磷矿复垦地种植马铃薯对Cd、Pb的吸收和积累规律，数据表明在此类土壤中马铃薯的块茎、根、茎、叶对这2种重金属元素的积累规律是一致的。虽然块茎的含量均为最低，但是仍超过食品安全下限标准，因此建议不宜在磷矿

复垦土地种植马铃薯。而在规划选择马铃薯种植区域时也要注意尽可能避开矿区, 避免块茎中有害重金属的超标, 保障食品安全和马铃薯产业健康有序地发展。

[参 考 文 献]

- [1] 桑月秋, 杨琼芬, 刘彦和, 等. 云南省马铃薯种植区域分布和周年生产 [J]. 西南农业学报, 2014, 27(3): 1003–1008.
- [2] Stefanowicz A M, Woch M W, Kapusta P. Inconspicuous waste heaps left by historical Zn–Pb mining are hot spots of soil contamination [J]. Geoderma, 2014, 235: 1–8.
- [3] Wen H, Zhang Y, Cloquet C, *et al.* Tracing sources of pollution in soils from the Jinding Pb–Zn mining district in China using cadmium and lead isotopes [J]. Applied Geochemistry, 2015, 52: 147–154.
- [4] 叶银龙, 袁庆虹, 张迪, 等. 兰坪铅锌矿区农作物重金属污染调查研究 [J]. 国外医学: 医学地理分册, 2012, 33(4): 246–248.
- [5] 薛步高. 昆明滇池周围磷矿资源现状及开发前景 [J]. 化工矿产地质, 2008, 30(3): 149–154.
- [6] 曹志洪. 施肥与土壤健康质量—论施肥对环境的影响(3) [J]. 土壤, 2003, 35(6): 450–455.
- [7] 龚世鹏. 马铃薯产地重金属含量检测及污染评价 [J]. 农业环境与发展, 2009(4): 89–91.
- [8] 国家卫生部. GB 5009.12–2010 食品国家安全标准—食品中铅的测定 [S]. 北京: 中华人民共和国国家标准, 2010.
- [9] 国家卫生部. GB/T 5009.15–2003 食品中镉的测定 [S]. 北京: 中华人民共和国国家标准, 2003.
- [10] 国家环保局. GB/T 17141–1997 土壤质量—镉、铅的测定 [S]. 北京: 中华人民共和国国家标准, 1997.
- [11] 国家农业部. NY/T 1377–2007 土壤pH的测定 [S]. 北京: 中华人民共和国农业行业标准, 2007.
- [12] 国家环保局. GB 15618–2008. 土壤环境质量标准(修订) [S]. 北京: 中华人民共和国国家标准, 2008.
- [13] 曹莹, 刘洋, 王国骄, 等. 铅–镉复合胁迫下玉米品种间积累铅、Cd的差异 [J]. 玉米科学, 2009, 17(1): 80–85.
- [14] Järup L. Hazards of heavy metal contamination [J]. British Medical Bulletin, 2003, 68(1): 167–182.
- [15] Peralta–Videa J R, Lopez M L, Narayan M, *et al.* The biochemistry of environmental heavy metal uptake by plants: implications for the food chain [J]. The International Journal of Biochemistry and Cell Biology, 2009, 41(8): 1665–1677.
- [16] He B, Yun Z J, Shi J B, *et al.* Research progress of heavy metal pollution in China: Sources, analytical methods, status, and toxicity [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(2): 134–140.
- [17] Li Z, Ma Z, van der Kuijp T J, *et al.* A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment [J]. Science of the Total Environment, 2014, 468: 843–853.
- [18] Chen H, Teng Y, Lu S, *et al.* Contamination features and health risk of soil heavy metals in China [J]. Science of the Total Environment, 2015, 512: 143–153.
- [19] 国家卫生部. GB 2762–2012 食品安全国家标准—食品中污染物限量 [S]. 北京: 中华人民共和国国家标准, 2012.
- [20] Chen Z, Zhao Y, Gu L, *et al.* Accumulation and localization of cadmium in potato (*Solanum tuberosum*) under different soil Cd levels [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2014, 92(6): 745–751.
- [21] Dunbar K R, McLaughlin M J, Reid R J. The uptake and partitioning of cadmium in two cultivars of potato (*Solanum tuberosum* L.) [J]. Journal of Experimental Botany, 2003, 54: 349–354.
- [22] Reid R J, Dunbar K R, McLaughlin M J. Cadmium loading into potato tubers: the roles of the periderm, xylem and phloem [J]. Plant Cell Environ, 2003, 26: 201–206.
- [23] Fu X, Dou C, Chen Y, *et al.* Subcellular distribution and chemical forms of cadmium in *Phytolacca americana* L [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 186(1): 103–107.
- [24] Ding C, Zhang T, Wang X, *et al.* Effects of soil type and genotype on lead concentration in rootstalk vegetables and the selection of cultivars for food safety [J]. Journal of Environmental Management, 2013, 122: 8–14.
- [25] Jönsson E H L, Asp H. Effects of pH and nitrogen on cadmium uptake in potato [J]. Biologia Plantarum, 2013, 57(4): 788–792.
- [26] Nazar R, Iqbal N, Masood A, *et al.* Cadmium toxicity in plants and role of mineral nutrients in its alleviation [J]. American Journal of Plant Sciences, 2012, 3: 1476–1489.