

不同马铃薯品种对 Cd、Pb 吸收累积的差异

黄芳¹, 辜娇峰^{1,2}, 周航^{1,2}, 杨文俊¹, 袁腾跃¹, 张竞颐¹, 王诗龙¹, 廖柏寒^{1,2}

(1.中南林业科技大学环境科学与工程学院,长沙 410004;2.稻米品质安全控制湖南省工程实验室,长沙 410004)

摘要:采用田间试验法,以中南地区主要种植的 11 个马铃薯品种为研究对象,测定马铃薯植株各部位重金属 Cd、Pb 含量,探讨不同品种的马铃薯对 Cd、Pb 的吸收累积差异,为马铃薯的安全种植提供实践参考。结果表明: Cd—Pb 复合污染下,马铃薯块茎鲜重、茎叶鲜重以及根、茎叶、块茎中 Cd、Pb 含量在品种间均表现出显著差异。11 个马铃薯品种块茎 Cd 含量范围为 0.39~0.67 mg/kg,超标率 100%,块茎 Pb 含量为 0.16~0.43 mg/kg,超标率 81.8%。马铃薯各部位 Cd、Pb 含量均呈现根>茎叶>块茎的分布特点;马铃薯对 Cd 的富集系数为 2.35~5.56,对 Pb 富集系数为 0.11~0.22,马铃薯富集转运 Cd 的能力大于 Pb。尽管复合重金属靶标危险系数(TTHQ)法评价显示,金湘等 5 种马铃薯的 TTHQ 值<1,对人体健康风险较小,但结合块茎 Cd、Pb 含量,建议污染区种植的马铃薯作为工业原料使用更安全。

关键词: 马铃薯; 镉; 铅; 累积与转运; 品种; 健康风险评估

中图分类号: X53; S532 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2019)06-0370-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.06.052

Differences of Cadmium and Lead Absorption and Accumulation in Different Potato Varieties

HUANG Fang¹, GU Jiaofeng^{1,2}, ZHOU Hang^{1,2}, YANG Wenjun¹,

YUAN Tengyue¹, ZHANG Jingyi¹, WANG Shilong¹, LIAO Bohan^{1,2}

(1.College of Environment Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004; 2.Hunan Engineering Laboratory for Control of Rice Quality and Safety, Changsha 410004)

Abstract: Field experiments were conducted to study 11 common potato varieties in central south China. The contents of cadmium (Cd) and lead (Pb) in potato organs were determined to analyze the difference of Cd and Pb absorption and accumulation capacity in different varieties of potatoes. The achievement of this work could provide a practical reference for safe planting of potatoes in the areas soil polluted with heavy metals in central south China. The results showed that in the soil complexly polluted with Cd and Pb, the fresh weight of tuber, stem and leaf, and the contents of Cd and Pb in roots, stems and leaves, tubers of potato plants showed significant differences among 11 varieties. The contents of Cd in tuber ranged from 0.39 to 0.67 mg/kg, showing an exceeding the standard rate of 100%; the contents of Pb in tuber ranged from 0.16 to 0.43 mg/kg, exceeding the standard rate of 81.8%. The contents of Cd and Pb in different potato organs showed a distribution pattern as root>stem and leaf>tuber. The bioaccumulation factors of Cd and Pb in potato plants ranged from 2.35 to 5.56 and 0.11 to 0.22, respectively, indicating that bioaccumulation and translocation capacity of potato for Cd was greater than for Pb. Although the Total Target Hazard Quotient demonstrated that the TTHQ values of five kinds of potatoes such as Jinxiang were less than 1, the risk to human health was small, but combined with the Cd and Pb contents of tubers, it is recommended to be safer to use potatoes grown in contaminated areas as industrial raw materials.

Keywords: potato; cadmium; lead; accumulation and translocation; variety; health risk assessment

收稿日期: 2019-04-18
资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0801105); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y2018LM18)
第一作者: 黄芳(1994—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事土壤重金属污染与控制研究。E-mail: 2910425487@qq.com
通信作者: 辜娇峰(1979—), 女, 讲师, 博士, 主要从事土壤重金属污染与控制研究。E-mail: gujiaofeng@163.com
廖柏寒(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤重金属污染与控制研究。E-mail: liaobh1020@163.com

近年来,由于金属冶炼、污水灌溉、农药、化肥不合理利用及含有重金属的污泥农用等,使得我国农田土壤重金属污染日益加重^[1]。重金属进入土壤,不仅危害土壤生态环境,抑制作物的生长,导致农作物产量和质量下降,而且可通过食物链进入人体并富集,危及人类健康^[2]。每年粮食因重金属污染造成的直接经济损失超过 200 亿元^[3]。如何修复农田土壤重金属污染,保障作物的安全生产,是当前土壤和环境领域研究的重点和难点。

对于控制重金属向作物中转移,目前主要从 2 个方面着手^[4]:一方面是通过化学固定降低土壤中重金属活性,例如调控土壤 pH、施用土壤调理剂(如石灰石、沸石、磷酸盐类、生物炭等);另一方面从重金属污染土壤安全利用考虑,种植重金属抗性强、低累积型的作物品种。已有研究^[4]表明,植物对重金属的吸收和累积不仅存在显著的植物种间差异,同时存在种内差异,如水稻(*Oryza sativa* L.)、小麦(*Triticum aestivum* L.)、莴苣(*Lactuca sativa* L. var. *crispa*)、玉米(*Zea mays* L.)和向日葵(*Helianthus annuus* L.)等作物。马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)具有丰产性好、抗逆性强、适应性广、淀粉产量大等特点,是仅次于玉米、小麦和水稻的世界第四大粮食作物,还是生产生物乙醇的原材料^[5]。有研究^[6-7]发现,不同马铃薯品种对重金属的吸收累积存在显著差异,但以往有关马铃薯对重金属吸收累积的研究大多数是基于当地条件进行的,尤其我国西南广大区域。由于各地气候、土壤条件和马铃薯种植品种有所不同,其研究结果具有很强的地域性,且大多数研究以盆栽试验为主。湖南是有色金属之乡,土壤重金属污染严重,同时马铃薯在湖南种植面积越来越大。然而,目前有关湖南地区不同马铃薯品种对重金属的吸收累积的研究报道较少,为保障湖南地区,尤其是重金属污染农田地区马铃薯种植及利用的安全性,本试验选用市场上已审定推广的、中南地区常见的 11 个马铃薯品种,在湘东某污染农田进行大田试验,分析同等条件下不同马铃薯品种对重金属 Cd、Pb 吸收累积的差异性,研究马铃薯品种对重金属的吸收规律,为马铃薯在中南地区的安全种植提供实践参考,并为土壤重金属修复治理提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试马铃薯品种 11 个,分别为“丽薯 6 号”“合作 88 号”“宣薯 2 号”“黑美人”“希森 6 号”“青薯 168 号”“陇薯 10 号”“兴佳 2 号”“费乌瑞它”“金湘”和“紫

玉”,由丽江太安天红马铃薯专业合作社、永嘉马铃薯种业、希森马铃薯种业、甘肃省凯凯科技农业和湖南农业大学等单位或公司提供。

试验地点位于湘东某污染农田(28°29.232'N, 113°87.540'E),地处亚热带季风湿润气候区,四季分明,光照充足,雨量丰沛,气候温和,霜期较短,全年无霜期 260 d,年均降水量为 1 400~1 500 mm,年平均气温 16.8~17.5 ℃。试验区大田已划属重金属 Cd、Pb 污染常规耕作大田,土壤为红壤性水稻土,基本理化性质为:pH 5.04~5.36,有机质含量 32.1~36.9 g/kg,阳离子交换量 31.7~35.5 cmol/kg,碱解氮含量 195.9~220.7 mg/kg,有效磷 15.8~19.5 mg/kg,速效钾含量 153.2~158.6 mg/kg;土壤 Cd 和 Pb 的全量分别为 2.87~3.57,130.53~144.57 mg/kg。

1.2 试验设计与样品采集

单个马铃薯品种种植样方面积为 9 m²(3 m×3 m),株间距为(0.60 m×0.33 m),合计 45 株/样方,每个品种种植 3 个样方,共计 33 个样方,所有样方随机区组排列;同时,每个试验样方外设保护行 3 行,种植相应小区品种。2017 年 12 月 23 日马铃薯种植,2018 年 4 月 16 日成熟收获,种植期间的耕作管理方式与当地一致。马铃薯成熟时,在每个样方中随机采集 9 株完整的马铃薯植株,带回实验室,分根、茎叶、块茎 3 个部分,自来水和去离子水洗净后晾干,分别称取鲜重后,于烘箱 105 ℃杀青再 70 ℃下烘干至恒重,使用非金属器械粉碎,过 100 目尼龙筛,用塑料封口袋保存待测。同期采集马铃薯根际土壤,自然风干,去杂质,研钵磨碎,过 10,100 目尼龙筛,密封保存待测。

1.3 重金属富集与转运能力评价

采用生物富集系数(bioaccumulation factor, BAF,马铃薯根系中的重金属含量与土壤中重金属含量的比值)^[8]、转运系数(translocation factor, TF,马铃薯后一部位中重金属含量与前一部位中重金属含量的比值)^[8]研究马铃薯富集 Cd 和 Pb 的能力,及马铃薯各部位转运 Cd 和 Pb 的能力。

$$\text{BAF}=\frac{C_r}{C_s}$$
$$\text{TF}=\frac{C_{\text{later}}}{C_{\text{former}}}$$

式中: C_r 为根系中重金属 Cd 或 Pb 含量(mg/kg); C_s 为土壤中重金属 Cd 或 Pb 含量(mg/kg); C_{later} 为马铃薯后一部位(分别对应茎叶、块茎)重金属 Cd 或 Pb 的含量(mg/kg); C_{former} 为马铃薯前一部位(分别为根、茎叶)重金属 Cd 或 Pb 的含量(mg/kg)。

1.4 重金属人体健康风险评价

THQ(target hazard quotients)靶标危害系数法是

美国环保署(US EPA)提出的一种用于评估人体通过食物摄取重金属导致健康风险的方法^[9],最大的特点在于不仅可以评价单一重金属产生的健康风险,还能评价多种重金属复合暴露的健康风险。本试验中马铃薯受 Cd、Pb 复合污染,而重金属对人体健康的影响是多种元素共同作用的结果,因此采用复合重金属的总靶标危害系数(the total target hazard quotient, TTHQ)法来评价马铃薯块茎中 Cd、Pb 共同对人体产生的健康风险。复合重金属的总靶标危害系数等于各单一重金属的 THQ 之和,计算公式为:

$$TTHQ=\sum THQ_i$$
$$THQ_i=\frac{E_F\times E_D\times F_{IR}\times C}{rfD\times W_{AB}\times T_A}\times 10^{-3}$$

式中: E_F 为人群暴露频率(365 d/a); E_D 为平均寿命(76 a),相当于中国人口的平均寿命; F_{IR} 为消化食物的比率($g/(人\cdot d)$),根据《中国居民膳食指南(2016)》^[10]建议成人每天平均摄入薯类物质 50~100 g,本文取最高值 100 g 进行计算; C 为食物中重金属的含量水平(mg/kg); rfD 为参比剂量(mg/kg 每人),依据 USEPA 的标准^[9],Cd、Pb 的 rfD 分别为每人 0.001,0.004 mg/kg ; W_{AB} 为人体平均体重(61.7 kg); T_A 为平均接触时间($E_D\times 365$ d/a)。

当 $TTHQ\leq 1.0$,表明人体食用马铃薯无明显健康风险; $TTHQ>1.0$,表明人体食用马铃薯存在健康风险,数值越大健康风险越大。

1.5 样品分析测定

土壤的 pH、有机质含量、阳离子交换量、碱解氮、有效磷和速效钾根据文献[11]所述方法测定;土壤 Cd、Pb 总量测定采用王水—高氯酸电热板加热消解^[12],马铃薯各部位 Cd、Pb 总量测定采用干灰化法硝酸消解(GB/T 5009—2010)。采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP6300, Thermo)测定样品消解液中的 Cd、Pb 浓度。所有样品分析过程以国家标准物质土壤(GBW(E)—07009)和生物成分标准物质(GBW—10010)进行质量控制分析,同时全程做空白试验。重金属分析试验过程中 Cd、Pb 的回收率为 94.1%~105.9%,93.6%~106.4%。

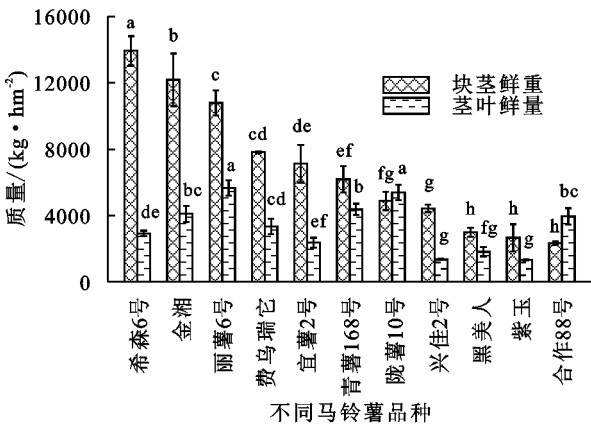
1.6 数据统计和分析

所有数据均采用 SPSS 22.0 软件进行统计分析,文中显示结果均为平均值±标准偏差($n=3$)。试验中马铃薯块茎鲜重根据 3 个平行样方 9 株样品的马铃薯平均值乘以种植密度计算,地上部茎叶鲜重同理计算。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和 Duncan 多重比较法($p<0.05$)进行差异性分析,图表中不同字母表示差异具有统计学意义。图形采用 OriginPro 9.0 软件进行绘制。

2 结果与分析

2.1 不同马铃薯品种块茎及茎叶鲜重差异

在重金属污染下,产量(鲜重或干重)可作为评价植物对重金属耐性的间接指标^[13]。从图 1 可以看出,11 个马铃薯品种块茎及茎叶鲜重变化幅度为 2 323.89~13 935.00,1 332.96~5 666.30 kg/hm^2 ,平均值分别为 6 849.14,3 327.84 kg/hm^2 。产量最高的是“希森 6 号”,最低的是“合作 88 号”,两者间相差 6.0 倍;而“丽薯 6 号”茎叶鲜重最大,“紫玉”最小,两者间相差 4.3 倍。



注:图中不同字母表示不同马铃薯品种间差异显著($p<0.05$)。下同。

图 1 不同马铃薯品种块茎及茎叶鲜重

2.2 不同马铃薯品种各部位 Cd、Pb 的含量

在 Cd、Pb 复合污染土壤中,11 个马铃薯品种各部位 Cd、Pb 含量差异显著($p<0.05$,图 2)。马铃薯各部位 Cd 含量的规律大致为根>茎叶>块茎,根 Cd 含量为 8.18~17.57 mg/kg ,均值为 11.81 mg/kg ,最高值和最低值相差 2.1 倍;茎叶 Cd 含量变化范围最大,为 4.55~16.58 mg/kg ,最高值和最低值相差 3.6 倍,均值为 10.24 mg/kg ;块茎 Cd 含量为 0.39~0.67 mg/kg ,均值为 0.55 mg/kg ,“黑美人”最高(0.67 mg/kg),其次为“兴佳 2 号”(0.66 mg/kg),“金湘”最低(0.39 mg/kg)。11 个马铃薯品种的可食部位,即块茎 Cd 含量均超过 GB 2762—2017 的标准^[14](≤ 0.1 mg/kg),超标率 100%。马铃薯各部位 Pb 含量的规律总体上为根>茎叶>块茎。不同马铃薯根中 Pb 含量变化幅度为 14.24~31.48 mg/kg ,均值为 22.45 mg/kg ;茎叶 Pb 含量为 2.41~4.48 mg/kg ,均值为 3.15 mg/kg ;块茎 Pb 含量为 0.16~0.43 mg/kg ,均值为 0.32 mg/kg ,其中“希森 6 号”和“费乌瑞它”Pb 含量显著低于其他马铃薯品种($p<0.05$),且低于 GB 2762—2017 标准要求^[14](≤ 0.2 mg/kg)。其他 9 个马铃薯品种块茎 Pb 含量超过 GB 2762—2017 标准要求,超标率 81.8%。对比 11 个马铃薯品种各部

位 Cd、Pb 含量,茎叶和块茎中 Cd 含量大于 Pb 含量,

而根系中 Cd 含量小于 Pb 含量。

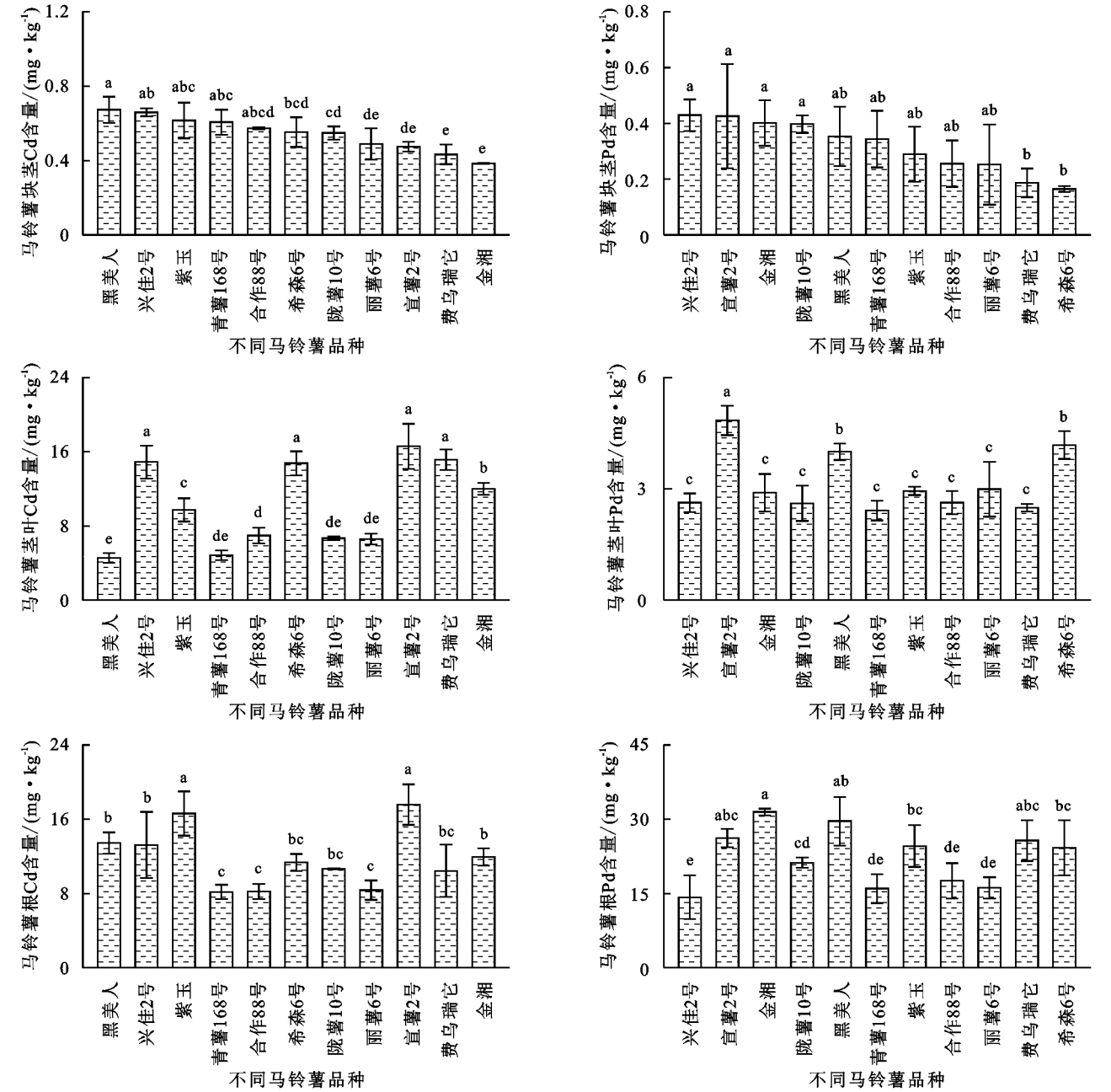


图 2 不同马铃薯品种各部位 Cd、Pb 含量

2.3 不同马铃薯品种 Cd、Pb 富集转运系数的差异

从表 1 可以看出,不同品种马铃薯根系对 Cd 的富集系数(BAF_{Cd})为 2.35~5.56,最高值和最低值相差 2.4 倍,其中对 Cd 富集能力较强的品种为“宣薯 2 号”“紫玉”“黑美人”和“兴佳 2 号”。所有马铃薯品种的根系 Cd 富集系数均大于 2,表明马铃薯对 Cd 有较强的富集能力。11 个马铃薯品种根系对 Pb 的富集系数(BAF_{Pb})为 0.11~0.22,品种金湘对 Pb 的富集能力最强。对比分析 11 个马铃薯根系对 Cd 和 Pb 的富集系数,BAF_{Cd}均明显大于 BAF_{Pb}。

马铃薯供食用块茎的主要成分淀粉合成于叶片,后经筛管运输到地下,不同品种马铃薯植株内 Cd、Pb 从根系到茎叶、茎叶到块茎的转运系数差异

较大(表 1)。11 个马铃薯 Cd 的根到茎叶的转运系数(TF_{根-茎叶})为 0.34~1.55,其中品种“费乌瑞它”“希森 6 号”“兴佳 2 号”和“金湘”的 TF_{根-茎叶} 较高,均大于 1,茎叶到块茎(TF_{茎叶-块茎})的转运系数分别为 0.03~0.15,均小于根到茎叶的转运系数。Pb 的根到茎叶(TF_{根-茎叶})、茎叶到块茎(TF_{茎叶-块茎})分别为 0.09~0.20,0.07~0.16,均小于 1。马铃薯各组织部位对这 2 种重金属元素的转运系数均为 TF_{根-茎叶} > TF_{茎叶-块茎}。对比 Cd、Pb 由根系向茎叶和茎叶向块茎转运系数的大小,Cd 由根系向茎叶的转运系数明显大于 Pb 由根系向茎叶的转运系数,但 Cd 由茎叶向块茎的转运系数小于 Pb。

表 1 不同马铃薯品种 Cd、Pb 的富集系数与转运系数

马铃薯品种	Cd			Pb		
	BAF—Cd	TF _{根—茎叶}	TF _{茎叶—块茎}	BAF—Pb	TF _{根—茎叶}	TF _{茎叶—块茎}
宣薯 2 号	5.56±0.25a	0.95±0.15bcd	0.03±0d	0.19±0.02ab	0.19±0.01ab	0.07±0ef
紫玉	5.22±1.52ab	0.59±0.06de	0.06±0bc	0.18±0.02abc	0.12±0.02cd	0.12±0.01bcd
黑美人	4.77±0.49abc	0.34±0.04e	0.15±0.03a	0.21±0.04a	0.14±0.02bcd	0.11±0.01cde
兴佳 2 号	4.26±1.41abcd	1.16±0.20bc	0.03±0d	0.11±0.04d	0.20±0.07a	0.16±0.02a
金湘	3.92±0.37bcde	1.01±0.06bc	0.03±0d	0.22±0.03a	0.09±0.02cd	0.12±0.01de
费乌瑞它	3.66±0.87cdef	1.55±0.53a	0.03±0d	0.19±0.03ab	0.10±0.02d	0.09±0.01de
希森 6 号	3.64±0.32cdef	1.31±0.19ab	0.04±0d	0.17±0.04abc	0.19±0.01ab	0.04±0f
陇薯 10 号	3.37±0.34cdef	0.63±0.02de	0.08±0.01b	0.15±0.02bcd	0.12±0.02cd	0.16±0.04ab
青薯 168 号	2.90±0.62def	0.60±0.12de	0.13±0.02a	0.12±0.03d	0.15±0.01abc	0.14±0.04abc
丽薯 6 号	2.54±0.18ef	0.80±0.16cd	0.07±0.01b	0.12±0.01d	0.18±0.02ab	0.10±0.02cde
合作 88 号	2.35±0.51f	0.85±0.02cd	0.08±0.01b	0.12±0.04cd	0.15±0.02abc	0.10±0.02de

注:平均值±标准偏差($n=3$);同列不同字母表示各品种之间差异显著($P<0.05$)。

2.4 马铃薯块茎中重金属人体健康风险评价

利用复合重金属的总靶标危害系数法对马铃薯块茎中重金属进行健康风险评价,结果表明食用不同品种马铃薯的健康风险有较明显差异(图 3)。

11 个马铃薯品种的 Cd、Pb 总靶标危险系数(TTHQ)为 0.78~1.24,其中“兴佳 2 号”“黑美人”“青薯 168 号”“紫玉”“陇薯 10 号”和“合作 88 号”的 TTHQ 均大于 1,说明如若长期食用重金属污染土壤种植的这 6 个品种的马铃薯对人体存在健康风险;“希森 6 号”“宣薯 2 号”“丽薯 6 号”“金湘”和“费乌瑞它”的 TTHQ 均小于 1,说明对人体食用这 5 个品种的马铃薯无明显的健康风险,但是“希森 6 号”和“宣薯 2 号”的 TTHQ 已接近风险值 1,亦应引起足够重视。

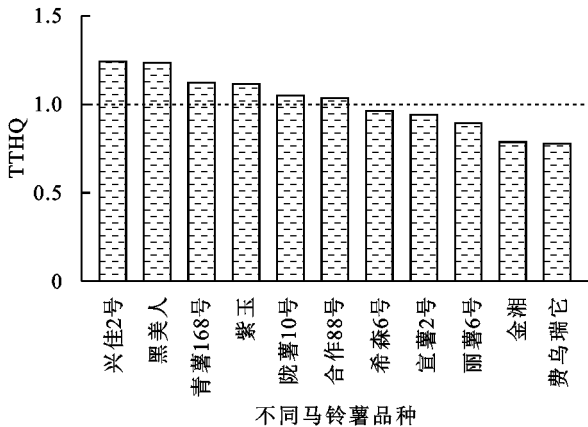


图 3 不同马铃薯品种块茎的总靶标危害系数

3 讨论

3.1 马铃薯品种间对 Cd、Pb 的耐受差异显著

本试验中,供试的 33 个样方土壤 pH 为 5.04~5.36,Cd 总量为 2.87~3.57 mg/kg,Pb 总量为 130.53~144.57 mg/kg,土壤 Cd 已经超出《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)^[15]风

险管控值($\text{pH}\leq 5.5,\text{Cd}<1.5\text{ mg/kg}$)的 1.9~2.4 倍。马铃薯在 Cd、Pb 污染土壤中生长,Cd、Pb 被吸收和转运到马铃薯体内后,破坏了马铃薯的抗氧化酶系统和光合作用,使得丙二醛(MDA)含量升高,叶绿素含量降低,对其正常生理代谢、养分吸收及转运造成了一定影响^[16],最后从生长状况、产量变化等表现出来^[17]。本试验中,马铃薯茎叶和块茎鲜重在不同品种间差异显著($P<0.05$),说明不同马铃薯品种对 Cd、Pb 的耐受不同。除“希森 6 号”“金湘”和“丽薯 6 号”外,其他 8 个马铃薯品种的块茎鲜重均低于我国马铃薯一般块茎重量 10 000~15 000 kg/hm²,主要原因是土壤中 Cd 和 Pb 的重度污染。

3.2 不同马铃薯品种 Cd、Pb 含量的差异

本试验表明,不同马铃薯品种对 Cd、Pb 的吸收累积存在差异,马铃薯块茎 Cd 含量范围为 0.39~0.67 mg/kg,均值为 0.55 mg/kg,超标率 100%;块茎 Pb 含量为 0.16~0.43 mg/kg,均值为 0.32 mg/kg,超标率 81.8%。同一品种各部位 Cd、Pb 含量同样差异显著($p<0.05$),马铃薯根部的 Cd、Pb 含量均最高,且呈现根>茎叶>块茎的分布特点(图 2)。不同马铃薯品种块茎累积 Cd、Pb 的差异主要是基因型差异。基因型的差异主要来自 2 个方面^[7]:一是根系的吸收效率不同造成不同基因型间块茎累积差异;二是在 Cd、Pb 污染土壤中,马铃薯生理、生化及分子方面都会产生一系列的适应机制来减少 Cd、Pb 的转运和由其带来的伤害,如根系分泌金属硫蛋白、植物络合素等与重金属离子结合,使之不能与相应载体配对,减少根系重金属吸收量,由于各品种基因组背景不同,不同马铃薯品种抑制重金属转运能力也存在差异。马铃薯不同部位累积 Cd、Pb 的差异,则源于植物器官间对重金属分配的差异^[18]。另外,种植环境因素不同也会带来较大差异,且可能远远大于基因型效应,如重金属污染程度、土壤条件、马铃薯种植条件和耕作管理

方式等。林燕^[19]的研究表明,在轻度 Cd 污染区,“费乌瑞它”和“黑美人”块茎的 Cd 含量均低于食品安全国家标准食品中污染物限量标准,而在本试验中两者块茎 Cd 含量超标,即是环境因素引起的,本试验区农田土壤 Cd 含量相对较高。

3.3 马铃薯对 Cd、Pb 的富集与转运

11 个品种马铃薯的 Cd 富集系数均大于 2,Pb 的富集系数均小于 0.3,表明马铃薯根系富集 Cd 的能力远大于 Pb。对不同马铃薯品种各部位中 Cd、Pb 的转运能力分析表明,Cd 的转运系数 $TF_{根-茎叶}$ 高于 $TF_{茎叶-块茎}$ (表 1),这说明马铃薯根系具有较强的将 Cd 转运到茎叶中的能力,而马铃薯茎叶仅能将很少一部分 Cd 转运到块茎中。Pb 的转运系数 $TF_{根-茎叶}$ 、 $TF_{茎叶-块茎}$ 分别为 0.09~0.20,0.07~0.16,均较小,说明马铃薯根系和茎叶对 Pb 的转运能力均较弱。表 2 显示马铃薯各部位 Cd/Pb 值呈现茎叶>块茎>根的规律,其中茎叶为 1.14~6.09,块茎为 0.96~3.37,根为 0.38~0.93;茎叶中 Cd/Pb 值最大,说明马铃薯茎

叶对 Cd 的累积能力大于 Pb,而根系 Cd/Pb 值最小,根系对 Pb 的“截留”能力大于 Cd。有研究^[20]表明,根系吸收的 Cd 先通过根与叶相连的木质部运输到地上茎叶部分,然后再通过叶与块茎相连的韧皮部从茎叶转运至块茎。马铃薯韧皮部筛管中存在高亲和力的疏基,使得 Cd 在韧皮部组织中具有较强的移动性,能够将叶中的 Cd 迅速转运至块茎中^[21],但同时 Cd 会通过叶中的高分子量络合剂附着在叶上并沉积在茎的细胞壁结合位点^[22]。因此,尽管 Cd 在韧皮部具有一定的流动性,但是在韧皮部中被转移的 Cd 总量会受到茎叶对 Cd 的固定的限制。这样就使从根转运的 Cd 大部分集中在茎叶,而茎叶只能将少量的 Cd 转运到块茎。相比于 Cd,Pb 本身的生物活性低,同时植物根中的 Pb 绝大部分结合于细胞壁或储存于液泡,导致组织中的 Pb 主要以活性低的醋酸和盐酸提取态存在,移动性很差,而且 Pb 在根、茎叶中以相似的形态转移和累积^[23]。

表 2 不同马铃薯品种各部位 Cd 和 Pb 含量的比值

马铃薯 各部位	兴佳 2 号	紫玉	宣薯 2 号	丽薯 6 号	青薯 168 号	陇薯 10 号	希森 6 号	合作 88 号	黑美人	费乌 瑞它	金湘
根	0.93	0.68	0.67	0.52	0.51	0.50	0.47	0.47	0.45	0.41	0.38
茎叶	5.67	3.30	3.42	2.20	2.00	2.55	3.53	2.65	1.14	6.09	4.15
块茎	1.53	2.13	1.11	1.94	1.94	1.38	3.37	2.25	1.91	2.32	0.96

3.4 马铃薯的健康风险评价

TTHQ 评价结果显示,不同马铃薯品种经块茎摄入重金属对人体造成的健康风险有着明显的差异(图 4)。供试的 6 个马铃薯品种 TTHQ 均大于 1,长期食用可能会对人体造成重金属危害。“希森 6 号”“宣薯 2 号”“丽薯 6 号”“金湘”和“费乌瑞它”5 个品种的 TTHQ 均小于 1;尽管这 5 个品种的马铃薯块茎 Cd 含量均超出 GB 2762—2017 标准要求,但当地人群食用无明显健康风险。这与暴露人群对马铃薯的摄入量有关^[24],我国居民以大米为主食,对马铃薯的摄入量远低于大米。鉴于 11 个马铃薯品种块茎 Cd、Pb 含量均超标(“希森 6 号”“费乌瑞它”块茎 Pb 含量除外),Cd、Pb 的过量累积均能引起人体诸多器官的病变,甚至诱发癌症^[25]。因此,在试验地区种植的马铃薯不建议直接食用,而是用于生产生物乙醇,以降低其风险。

4 结论

(1)马铃薯块茎和茎叶鲜重以及根、块茎、茎叶中 Cd、Pb 含量在品种间均表现出显著差异,马铃薯各部位 Cd、Pb 含量均呈现根>茎叶>块茎的分布特点。11 个马铃薯品种块茎中 Cd、Pb 含量范围分别为 0.39~0.67,0.16~0.43 mg/kg,超标率分别达到 100%,81.8%。

(2)不同马铃薯品种对 Cd、Pb 的富集转运存在明显差异,11 个马铃薯品种对 Cd 的富集系数为 2.35~5.56,对 Pb 富集系数为 0.11~0.22,马铃薯富集转运 Cd 的能力大于 Pb。

(3)复合重金属靶标危险系数法(TTHQ)评价显示,虽然“希森 6 号”“宣薯 2 号”“丽薯 6 号”“金湘”和“费乌瑞它”5 个马铃薯品种块茎部位 Cd、Pb 含量超出《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762—2017)的要求,但对人体健康风险较小。

参考文献:

[1] 张桃林,王兴祥.推进土壤污染防控与修复 厚植农业高质量发展根基[J].土壤学报,2019,56(2):251-258.

[2] Roy M, Mcdonald L M. Metal uptake in plants and health risk assessments in metal-contaminated smelter soils[J].Land Degradation and Development, 2015, 26(8):785-792.

[3] 李文略,金关荣,骆霞虹,等.不同红麻品种的土壤重金属污染修复潜力对比研究[J].农业环境科学学报,2018, 37(10):2150-2158.

[4] Zhao F J, Ma Y, Zhu Y G, et al. Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies[J].Environmental Science and Technology, 2015, 49(2):750-759.

- [5] 李文华,吕典秋,闵凡祥.中国、荷兰和比利时马铃薯生产概况对比分析[J].中国马铃薯,2018,32(1):54-60.
- [6] Peng Y S, Yang R D, Jin T, et al. Risk assessment for potentially toxic metals (loid) in potatoes in the indigenous zinc smelting area of northwestern Guizhou Province, China[J]. Food and Chemical Toxicology, 2018, 120:328-339.
- [7] 王翠.马铃薯对镉、铅胁迫响应与富集的基因型差异[D].四川雅安:四川农业大学,2010.
- [8] Liu J G, Ma X M, Wang M X. Genotypic differences among rice cultivars in lead accumulation and translocation and the relation with grain Pb levels[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2013, 90:35-40.
- [9] Liu X M, Song Q J, Tang Y, et al. Human health risk assessment of heavy metals in soil-vegetable system: A multi-medium analysis[J]. The Science of the Total Environment, 2013, 463/464:530-540.
- [10] 杜松明,马冠生.《中国学龄儿童膳食指南(2016)》及解读[J].营养学报,2017,39(1):1-4.
- [11] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- [12] Bunluesin S, Pokethitiyook P, Lanza G R. Influences of cadmium and zinc interaction and humic acid on metal accumulation in ceratophyllum demersum [J]. Water Air and Soil Pollution, 2007, 180(1/4):225-235.
- [13] Zhang X F, Zhang X H, Gao B, et al. Effect of cadmium on growth, photosynthesis, mineral nutrition and metal accumulation of an energy crop, king grass (*Pennisetum americanum* × *P. purpureum*) [J]. Biomass and Bioenergy, 2014, 67:179-187.
- [14] 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.GB 2762—2017 食品安全国家标准食品中污染物限量[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [15] 生态环境部,国家市场监督管理总局.GB 15618—2018 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].北京:中国标准出版社,2018.
- [16] Chen Z F, Zhao Y, Gu L, et al. Accumulation and localization of cadmium in Potato (*Solanum tuberosum* L.) under different soil Cd levels[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2014, 92(6):745-751.
- [17] Jia W T, Lv S, Feng J J, et al. Morphophysiological characteristic analysis demonstrated the potential of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) in the phytoremediation of cadmium-contaminated soils[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(18):18823-18831.
- [18] Mengist M F, Milbourne D, Griffin D, et al. Cadmium uptake and partitioning in potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars with different tuber-Cd concentration[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24:27384-27391.
- [19] 林燕.不同马铃薯品种对镉的富集特性研究[J].福建农业科技,2017(6):8-10.
- [20] 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 and Environment, 2010, 26(2):201-206.
- [21] Xu D Y, Chen Z F, Su K, et al. Effect of cadmium on the physiological parameters and the subcellular cadmium localization in the potato (*Solanum tuberosum* L.) [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2013, 97(11):147-153.
- [22] Gallego S M, Pena L B, Barcia R A, et al. Unravelling cadmium toxicity and tolerance in plants: Insight into regulatory mechanisms[J]. Environmental and Experimental Botany, 2012, 83:33-46.
- [23] 段德超,于明革,施积炎.植物对铅的吸收、转运、累积和解毒机制研究进展[J].应用生态学报,2014,25(1):287-296.
- [24] Meharg A A, Norton G, Deacon C, et al. Variation in rice cadmium related to human exposure[J]. Environmental Science and Technology, 2013, 47(11):5613-5618.
- [25] Hu B F, Wang J Y, Jin B, et al. Assessment of the potential health risks of heavy metals in soils in a coastal industrial region of the Yangtze River Delta[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(24):19816-19826.