

甘薯对土壤中镉的吸收特征研究

靳艳玲¹, 丁凡², 方扬¹, 易卓林¹, 杜安平¹, 赵海^{1*}

(1. 中国科学院成都生物研究所, 成都 610041; 2. 绵阳市农业科学研究院, 绵阳 621023)

摘 要: **目的** 探究甘薯对土壤中镉的吸收特征。**方法** 在中度镉污染地块上以间作方式种植甘薯、花生、大豆, 检测叶、茎、皮/壳、肉/籽实等 4 个组织部位在生育期 90、120、150 d 的镉含量, 比较镉吸收差异。**结果** 3 种作物的镉吸收能力依次为花生 > 大豆 > 甘薯, 8 个品种甘薯的镉含量均未超过限量标准, 镉含量呈叶 > 茎 > 皮 > 肉的规律, 生育期 150 d 时地上部分茎叶的镉含量最高, 而地下部分薯块的镉含量最低。**结论** 与花生和大豆相比, 甘薯为低吸收镉作物, 在中度及以下镉污染区域种植的甘薯, 薯块食用安全风险低。**关键词:** 甘薯; 镉; 品种; 组织; 生育期

Cadmium uptake characteristic of sweetpotato from soil

JIN Yan-Ling¹, DING Fan², FANG Yang¹, YI Zhuo-Lin¹, DU An-Ping¹, ZHAO Hai^{1*}

(1. Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;
2. Mianyang Academy of Agricultural Sciences, Mianyang 621023, China)

ABSTRACT: Objective To explore the cadmium (Cd) uptake characteristic of sweetpotato from soil. **Methods** The Cd content in leaf, vine, peel/shell and flesh/seed of sweetpotato, peanut and soybean was detected at 90, 120, 150 d, then the cadmium absorption difference was compared. **Results** The Cd uptake capacity of the 3 crops was peanut>soybean>sweetpotato, and the Cd content of all 8 varieties of sweet potato did not exceed the limit standard. The Cd content was in the order of leaf>vine>peel>flesh. At the growth period 150 d, the Cd content in the aboveground part of sweetpotato was the highest, while that in the underground part of sweetpotato was the lowest. **Conclusion** Compared with peanut and soybean, sweetpotato is a low Cd uptake crop, and sweetpotato planted in moderate or low Cd polluted area has low quality risk. **KEY WORDS:** sweetpotato; cadmium; variety; tissue; growth period

1 引 言

近年来, 由于工农业生产活动, 我国土壤重金属污染问题凸显。2014 年环保部国土部发布《全国土壤污染状况调查公报》^[1], 调查结果显示, 我国耕地土壤环境质量较差, 土壤污染总的超标率为 16.1%, 其中首要污染物为镉

(cadmium, Cd), 其点位超标率为 7.0%, 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。

在非必需金属元素中, 镉在土壤中的迁移率和生物利用度均较高^[2], 是对植物和动物毒性最强的痕量重金属元素之一^[3], 被作物根系吸收后可以通过食物链进入人体。食用镉污染的植物, 并不一定会快速中毒或死亡, 而是通过累积

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-10-B22)、国家重点研发计划项目(2018YFF0213505)

Fund: Supported by the China Agriculture Research System (CARS-10-B22), and the National Key R&D Program of China(2018YFF0213505)

*通讯作者: 赵海, 研究员, 主要研究方向为甘薯质量安全与营养品质评价。E-mail: zhaohai@cib.ac.cn

*Corresponding author: ZHAO Hai, Professor, Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China. E-mail: zhaohai@cib.ac.cn

作用产生慢性中毒^[4], 镉在人体的半衰期长达 10~30 年^[5], 长期摄入可能造成肾、肺、肝、骨骼和生殖系统损伤, 引发肾功能不全、骨质疏松, 甚至癌症^[6,7]。

大部分植物对镉的吸收与土壤中镉浓度呈正相关^[8], 其中, 超富集植物表现出对镉吸收和富集的偏好性, 可以用于镉污染土壤的生物修复^[9,10]。而对于食用的植物, 其重金属吸收和富集量越低越好。不同植物对镉的吸收能力有较大差异, 武倩倩等^[11-13]比较了甘薯、水稻、玉米等粮食作物以及甘蓝、冬瓜、茄子、山药、木薯、马铃薯和南瓜等蔬菜对镉吸收的差异, 结果表明甘薯对镉的吸收较轻。相同植物的不同品种(基因型)的镉吸收和累积也存在差异^[14-16]。张超凡等^[17]比较了湖南镉污染稻田种植甘薯的镉积累, 结果表明品种间存在差异。

四川是我国第一甘薯种植大省, 但在四川盆地开展甘薯重金属积累的研究报道尚少。关于甘薯对镉吸收特征方面的系统研究较少。因此本研究比较了间作甘薯、经济作物大豆、花生的镉吸收差异, 以及品种、组织部位、生育期对甘薯镉积累的影响, 以期筛选出具有低镉吸收能力的甘薯品种, 配合控制收获期、分部利用等措施, 有效地降低甘薯及其加工产品镉污染的质量安全风险。

2 材料与方法

2.1 试剂与仪器

2.1.1 试剂

硝酸(优级纯, 德国 Merck 公司); 高氯酸(优级纯, 成都市科龙化工试剂厂); 镉标准品(美国 Inorganic Ventures 公司)。

2.1.2 仪器

DHG-9076A 电热恒温鼓风干燥箱(上海精宏实验设备有限公司); ME204 电子分析天平(瑞士 Mettler Toled 公司); XJS54-24 智能消解仪(天津莱玻特瑞仪器设备有限公司); iCAP RQ 电感耦合等离子体质谱仪(美国 Thermo 公司)。

2.2 实验方法

2.2.1 实验设计

实验设在四川省什邡市某镇进行, 选择地势平坦的非甘薯连作地作为实验田块。土壤总镉含量为 1.35 mg/kg, 有效镉含量为 0.52 mg/kg。参照 GB 15618-2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》^[18], 属于中度污染。

用于研究的 8 个甘薯品种由国家甘薯产业技术体系育成, 于 2018 年 5 月 28 日栽插, 密度 27000 株/hm², 小区面积 40 m², 随机排列, 重复 3 次。取大豆和花生以同样种植密度与甘薯间作。作物生长所需水分以自然降水为主, 降水不足时采用无重金属污染源水源灌溉。

2.2.2 样品的采集

栽插后 90 d 起每隔 30 d 挖取各小区甘薯、花生和大豆 1

次, 每次 30 株。随机取薯块约 2.0 kg, 切分为皮、肉 2 部分; 取花生荚和大豆荚各 0.5 kg, 分为壳和籽实 2 部分; 取各作物地上部分约 2.0 kg, 切分为茎、叶 2 部分。75 °C 烘干至恒重后测取干率^[19], 样品再粉碎并过 100 目筛, 检测镉含量。

2.2.3 检测方法

参照 GB 5009.15-2014《食品安全国家标准 食品中镉的测定》^[20]湿法消解, 同时设置试剂空白对照, 采用电感耦合等离子体质谱(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)对消解液中镉的含量进行测定^[19]。

2.2.4 数据计算

文中镉含量为样品鲜基镉含量, 计算公式为: 鲜样镉含量(mg/kg)=干样实际检测镉含量(mg/kg)×样品干率(%)^[17,19]。

镉转运系数=地下部分镉含量(mg/kg)÷地上部分镉含量(mg/kg)^[21]。

2.3 统计学分析

用 SPSS19.0 软件进行描述性统计分析, 用 Duncan 检验差异分析, $P < 0.05$ 代表具有统计学意义。

3 结果与分析

3.1 甘薯、花生、大豆不同作物品种镉吸收差异

不同作物对镉吸收差异的测定结果见表 1。3 种作物的镉吸收能力依次为: 花生 > 大豆 > 甘薯, 花生和大豆的镉吸收能力极显著高于甘薯($P < 0.01$), 且花生的镉吸收能力也极显著高于大豆($P < 0.01$)。花生中镉的含量为 0.155~0.373 mg/kg, 大豆中镉的含量为 0.057~0.248 mg/kg, 而整个甘薯植株中镉的含量为 0~0.102 mg/kg。周虹等^[22]研究表明在中轻度镉污染地区种植甘薯, 整个甘薯植株中镉的含量为 0.004~0.091 mg/kg, 与本研究结果相近, 表明甘薯为低吸收镉作物。

3.2 不同品种甘薯的镉吸收差异

8 个品种甘薯的不同组织部位在不同生育期镉含量的平均值见图 1。由图 1 可以看出, 8 个品种甘薯中, 叶菜型甘薯(福薯 18 和台农 71)的镉含量为 0~0.057 mg/kg, 平均值为 0.024 mg/kg; 紫薯(绵 12-22-3 和绵 12-18-1)的镉含量为 0.002~0.064 mg/kg, 平均值为 0.033 mg/kg; 鲜食型甘薯(广薯 87 和徐渝 34)的镉含量为 0.001~0.102 mg/kg, 平均值为 0.044 mg/kg; 淀粉型甘薯(商薯 19 和徐薯 22)的镉含量为 0.002~0.081 mg/kg, 平均值为 0.032 mg/kg。表明鲜食型甘薯广薯 87 和徐渝 34 的镉吸收能力最强, 而叶菜型甘薯福薯 18 和台农 71 的镉吸收能力最弱, 淀粉型甘薯商薯 19 和徐薯 22 以及紫薯绵 12-22-3 和绵 12-18-1 的镉吸收能力相近。但仅广薯 87 的镉吸收能力显著高于福薯 18($P < 0.05$), 其他品种甘薯的镉吸收能力差异不显著。

表 1 甘薯、花生、大豆的镉吸收差异(mg/kg)
Table 1 Difference of Cd uptake in sweetpotato, peanut and soybean (mg/kg)

	花生	大豆	福薯 18	台农 71	绵 13-22-3	绵 12-18-1	商薯 19	徐薯 22	广薯 87	徐渝 34
叶	90 d	0.277±0.010	0.164±0.005	0.035±0.004	0.04±0	0.064±0.004	0.049±0.001	0.057±0.001	0.056±0.002	0.084±0.001
	120 d	0.285±0.004	0.248±0.023	0.033±0.002	0.037±0.005	0.043±0.003	0.051±0.012	0.05±0.001	0.053±0.001	0.076±0.015
	150 d	NA	0.185±0.021	0.057±0.005	0.052±0.006	0.061±0.004	0.057±0.001	0.081±0.01	0.078±0.004	0.075±0.001
茎	90 d	0.296±0.019	0.118±0.002	0.021±0.001	0.036±0.001	0.033±0	0.038±0.005	0.04±0	0.033±0.001	0.071±0.004
	120 d	0.307±0.006	0.129±0.003	0.021±0.002	0.033±0.004	0.038±0.002	0.052±0.013	0.039±0.002	0.035±0	0.078±0.002
	150 d	NA	0.158±0.003	0.025±0.002	0.047±0.003	0.051±0	0.047±0.001	0.058±0.002	0.051±0.002	0.102±0.001
皮/壳	90 d	0.155±0.002	NA	NA	NA	0.063±0.036	0.029±0.003	0.022±0.004	0.031±0.002	0.03±0.005
	120 d	0.203±0.036	0.062±0.001	0.009±0.001	0.008±0	0.016±0.001	0.014±0.002	0.011±0.001	0.013±0.002	0.017±0.005
	150 d	NA	0.094±0.012	0.003±0.001	0.005±0.001	0.009±0.002	0.007±0.001	0.002±0.001	0.009±0.004	0.016±0.007
肉/籽实	90 d	0.335±0.007	NA	NA	NA	0.013±0.001	0.019±0.008	0.013±0.006	0.01±0.227	0.014±0.003
	120 d	0.373±0.001	0.057±0.002	0.003±0.001	0.007±0.005	0.018±0.007	0.011±0.146	0.006±0.005	0.013±0.004	0.007±0.002
	150 d	NA	0.067±0.009	-	0.002±0	0.002±0	0.004±0	0.006±0.003	0.006±0.001	0.001±0.004
平均值		0.279 ^{aA}	0.128 ^{BB}	0.021 ^{cC}	0.027 ^{cC}	0.034 ^{cC}	0.031 ^{cC}	0.032 ^{cC}	0.032 ^{cC}	0.048 ^{cC}

注: NA 代表生育期较短时未结薯/结莢或生育期过长时叶片脱落、已落果; -代表低于检测限; Duncan 多重比较的差异分析结果以字母区分, 不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$), 不同大写字母表示差异极显著($P < 0.01$), 下同。

3.3 不同甘薯组织的镉吸收差异

图 2 为不同品种甘薯的 4 个组织部位在不同生育期的镉含量平均值, 由图 2 可以看出, 除广薯 87 和徐渝 34 外, 其余甘薯品种 4 个组织部位的镉含量依次为: 叶 > 茎 > 皮 > 肉。地上部分(叶、茎)的镉含量显著高于地下部分(皮、肉)($P < 0.01$), 而叶与茎的镉含量差异不显著, 皮与肉的镉含量差异也不显著。叶中镉含量最高的是鲜食型品种广薯 87 和徐渝 34, 分别为 0.078 mg/kg 和 0.068 mg/kg; 镉含量最低的为叶菜型甘薯福薯 18 和台农 71, 分别为 0.042 mg/kg 和 0.043 mg/kg。茎中镉含量最高的是鲜食型品种广薯 87 和徐渝 34, 分别为 0.084 mg/kg 和 0.066 mg/kg;

镉含量最低的为叶菜型甘薯福薯 18 和台农 71, 分别为 0.022 mg/kg 和 0.039 mg/kg。薯皮中镉含量最高的是紫薯绵 13-22-3 和鲜食型品种广薯 87, 分别为 0.029 mg/kg 和 0.021 mg/kg; 镉含量最低的为叶菜型甘薯福薯 18 和台农 71, 分别为 0.006 mg/kg 和 0.007 mg/kg。薯肉中镉含量最高的是紫薯绵 13-22-3 和绵 12-18-1, 分别为 0.016 mg/kg 和 0.015 mg/kg; 镉含量最低的为叶菜型甘薯福薯 18 和台农 71, 分别为 0.001 mg/kg 和 0.004 mg/kg。根据 GB 2762-2017 《食品安全国家标准 食品中污染物限量》^[23], 叶菜蔬菜的镉限量标准为 0.2 mg/kg, 块根类蔬菜的镉限量标准为 0.1 mg/kg。因此, 甘薯各组织部位的镉含量均未超标。

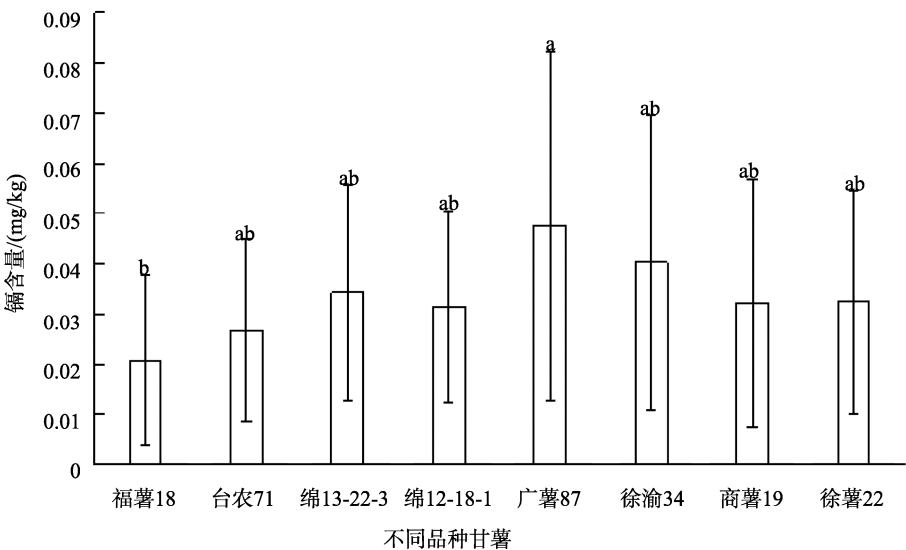


图 1 不同品种甘薯的镉吸收差异(n=12)
Fig.1 Difference of Cd uptake in different sweetpotato varieties (n=12)

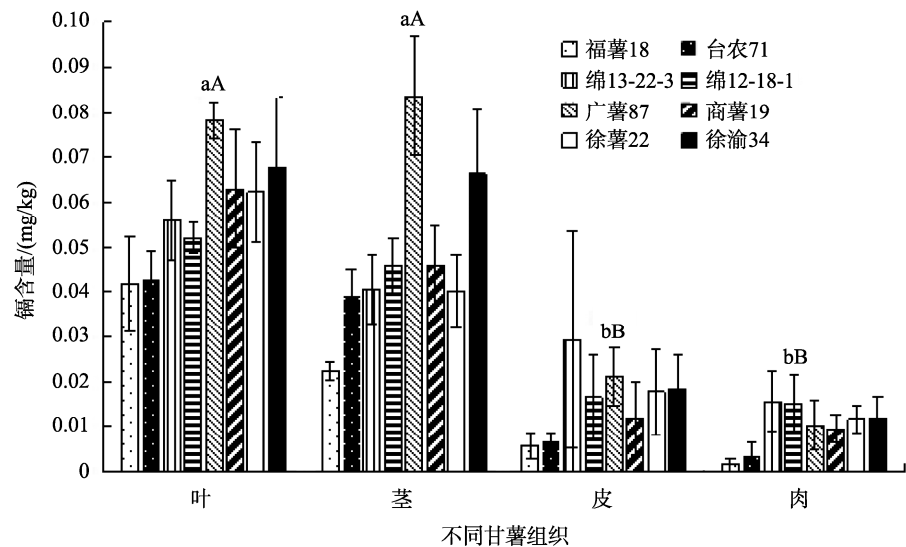


图 2 不同甘薯组织部位的镉吸收差异(n=3)
Fig.2 Difference of Cd uptake in different sweetpotato tissues (n=3)

3.4 不同生育期甘薯的镉吸收差异

甘薯不同组织部位在 3 个生育期的各品种镉含量平均值见图 3, 由图 3 可以看出, 地上部分(叶、茎)的镉含量随着生育期的延长呈先略减少后增加的趋势, 在生育期 120 d 时最低, 在生育期 150 d 时最高。从 8 个品种甘薯镉含量的平均值可以看出叶在 90 d 时镉含量为 0.057 mg/kg, 120 d 时降至 0.049 mg/kg, 150 d 时增加至 0.068 mg/kg; 茎在 90 d 时镉含量为 0.045 mg/kg, 120 d 时降至 0.043 mg/kg, 150 d 时增加至 0.056 mg/kg。地下部分(皮、肉)的镉含量随着生育期的延长持续降低, 在生育期 90 d 时最高, 而生育期 150 d 时最低。薯皮的镉含量在 90、120、150 d 依次为

0.034、0.013、0.008 mg/kg; 薯肉的镉含量在 90、120、150 d 依次为 0.014、0.009、0.003 mg/kg。不同品种中(表 1), 在 3 个生育期内变化幅度最大的为徐渝 34 的叶, 90、120、150 d 的镉含量依次为 0.075、0.046、0.082 mg/kg; 变化幅度最小的为福薯 18 的茎, 90、120、150 d 的镉含量依次为 0.021、0.021、0.025 mg/kg。

转运系数表示镉由地下部分转运到地上部分的能力。转运系数越高, 表示镉从薯块转运到茎叶的能力越强^[24]。由图 4 可知, 不同品种甘薯在不同生育期的转运系数呈 90 d < 120 d < 150 d 的趋势。150 d 的镉转运系数极显著高于 90 d 和 120 d ($P < 0.01$), 而 90 d 和 120 d 的镉转运系数差异不显著。

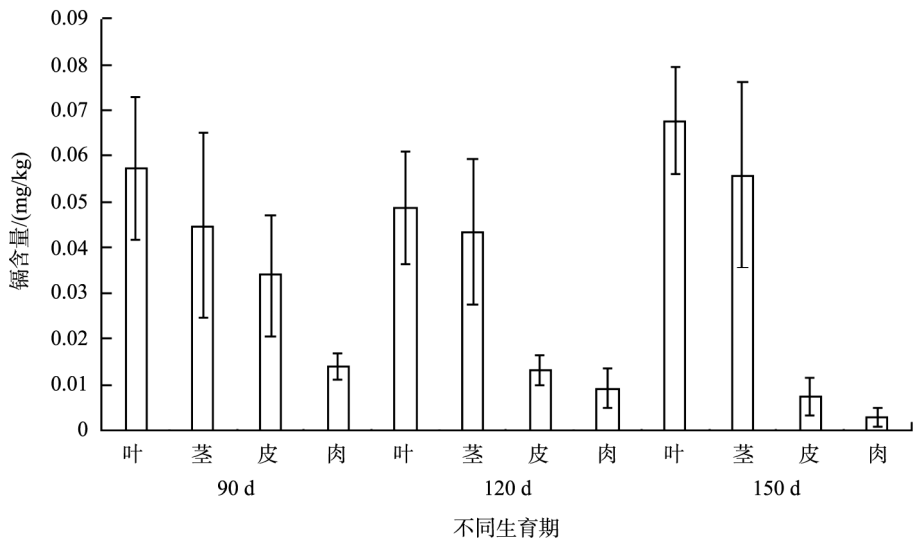
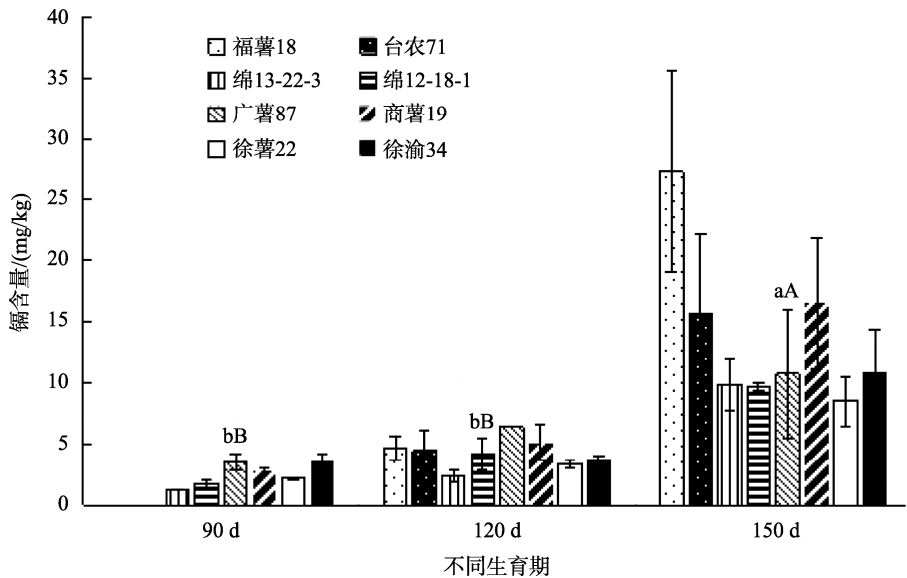


图 3 不同生育期甘薯的镉吸收差异(n=8)
Fig.3 Difference of Cd uptake in sweetpotato at different growth stage (n=8)



注: *因为福薯 18 和台农 71 在生育期 90 d 时未结薯, 所以无转运系数数据。
图 4 不同品种甘薯在不同生育期的镉转运系数
Fig.4 Cd transport factors of different sweetpotato varieties at different growth stages

4 结论与讨论

本研究比较了间作甘薯、经济作物花生、大豆不同组织部位在不同生育期的重金属镉含量的差异,发现与花生和大豆相比,甘薯为低吸收镉的作物,8个品种甘薯的镉含量均未超过限量标准,表明在中度及以下镉污染田块种植的甘薯食用安全风险低,与前期研究结果具有一致性^[19,22]。目前关于甘薯镉吸收、转运、积累机制的相关研究仍较少,对水稻、玉米等的研究表明^[25,26],根中镉通过木质部运输到地上部分的能力对于镉的吸收、运输与积累具有重要作用,而镉运输能力的差异与多个基因相关^[27]。

不同品种甘薯的镉吸收存在差异,总体呈鲜食型甘薯>紫薯>淀粉型甘薯>叶菜型甘薯的规律,而张超凡等^[17]的研究认为不同类型甘薯的镉吸收能力为紫薯>鲜食型甘薯>淀粉型甘薯,与本研究结果相比,淀粉型甘薯的镉吸收能力较低,而对于紫薯和鲜食型甘薯镉吸收能力的比较结果与本研究不同,可能与本研究所用甘薯品种不同有关。

甘薯地上部分的镉含量极显著高于地下部分,且均未超过限量标准。不同部位镉含量呈叶>茎>皮>肉的趋势,而刘兰英等^[28]利用重度镉污染(5、10 mg/kg)土壤开展的盆栽研究发现甘薯不同部位镉含量高低顺序为茎>皮>叶>肉,造成这种差异的原因可能与镉浓度及甘薯品种不同有关。

地下部分的镉含量随着生育期的延长持续降低,而地上部分的镉含量随着生育期的延长呈先略减少后增加的趋势,表明地下部分将吸收的镉持续向地上部分转运,而造成地上部位镉的积累。转运系数的变化也支持这一结论,生育期150 d的镉转运系数极显著高于生育期90、120 d,可能与生育期后期地下部分向地上部分转运能力较强有关。

我国是世界第一大甘薯生产国,近年来鲜食和加工用甘薯在我国甘薯总体消费中所占的比重越来越高。在我国土壤镉污染严峻的形势下,本研究探讨了甘薯对土壤镉的吸收特征,发现中度镉污染土壤种植的甘薯中镉含量未超过限量标准,为中度及以下镉污染地区甘薯的食用安全风险评估提供参考。比较了不同品种、不同组织部位及不同生育期甘薯的镉吸收差异,认为配合生育期控制(120 d内收获)可以降低甘薯的镉吸收,通过分部位利用(薯块去皮食用)可以进一步减少镉污染地区鲜食及加工用甘薯的质量安全风险。

参考文献

- [1] 环境保护部 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. http://www.gov.cn/foot/2014-04/17/content_2661768.htm. 2014.
- Ministry of Environment of People's Republic of China, Ministry of Land

- and Resources of the People's Republic of China. The bulletin of national soil pollution survey [EB/OL]. http://www.gov.cn/foot/2014-04/17/content_2661768.htm. 2014.
- [2] Ahmad E, Zaidi A, Khan MS, *et al.* Toxicity of heavy metals to Legumes and bioremediation [M]. New York: Springer-Verlag Wien, 2012.
- [3] 孙丽娟, 秦秦, 宋科, 等. 镉污染农田土壤修复技术及安全利用方法研究进展[J]. 生态环境学报, 2018, 27(7): 1377-1386.
- Sun LJ, Qin Q, Song K, *et al.* The remediation and safety utilization techniques for Cd contaminated farmland soil: a review [J]. Ecol Environ Sci, 2018, 27(7): 1377-1386.
- [4] 崔玉静. 镉对人类健康的危害及其影响因素的研究进展[J]. 卫生研究, 2006, 35(5): 656-659.
- Cui YJ. Adverse health effects of cadmium and related factors [J]. J Hyg Res, 2006, 35(5): 656-659.
- [5] 芮海云, 沈振国, 张芬琴. 土壤镉污染对箭筈豌豆生长、镉积累和营养物质吸收的影响[J]. 作物杂志, 2017, (6): 104-108.
- Rui HY, Shen ZG, Zhang FQ. Effects of soil cadmium contamination on growth, cadmium accumulation and nutrient uptake of *Vicia Sativa* L. [J]. Crops, 2017, (6): 104-108.
- [6] Alfvén T, Elinder C, Carlsson M, *et al.* Low-level cadmium and osteoporosis [J]. J Bone Miner Res, 2000, 15(8): 1579-1586.
- [7] Nordberg G. Cadmium and human health: A perspective based on recent studies in China [J]. Trace Elem Exp Med, 2003, 16(4): 307-319.
- [8] Wiczeorek J, Baran A, Urbanski K, *et al.* Assessment of the pollution and ecological risk of lead and cadmium in soils [J]. Environ Geochem Health, 2018, 40(6): 2325-2342.
- [9] McGrath SP, Lombi E, Zhao FJ. What's new about cadmium hyperaccumulation? [J]. New Phytol, 2001, 149(1): 2-3.
- [10] 方金芝. 淮南矿区植物修复潜力研究及农作物重金属评价[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2011.
- Fang JZ. The potential of phytoremediation in Huainan mine and evaluation of heavy metal contamination in crops [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2011.
- [11] 赖佳, 李浩, 何斌, 等. 不同大春作物种类对重金属吸收差异性的研究[J]. 四川农业科技, 2016, 11: 43-46.
- Lai J, Li H, He B, *et al.* Study on the difference of heavy metal uptake of different spring crops [J]. Sichuan Agric Sci Technol, 2016, 11: 43-46.
- [12] Wright V, Jones S, Omoruyi FO. Effect of bauxite mineralized soil on residual metal levels in some post harvest food crops in Jamaica [J]. Bull Environ Contam Toxicol, 2012, 89: 824-830.
- [13] 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, Cd contaminated soil [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [14] Huang B, Xin JL, Dai HW, *et al.* Identification of low-Cd cultivars of sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) after growing on Cd-contaminated soil: Uptake and partitioning to the edible roots [J]. Environ Sci Poll Res, 2015, 22: 11813-11821.
- [15] Wright V, Jones S, Omoruyi FO. Effect of Bauxite mineralized soil on residual metal levels in some post harvest food crops in Jamaica [J]. Bull Environ Contam Toxicol, 2012, 89: 824-830.
- [16] 王艳芳, 悦飞雪, 李冬, 等. 镉胁迫对不同基因型玉米生长和镉吸收分

- 配的影响[J]. 核农学报, 2019, 33(7): 1440–1447.
- Wang YF, Yue FX, Li D, *et al.* Effects of cadmium dress on plant growth, cadmium uptake and distribution of different genotypes of maize [J]. J Nucl Agric Sci, 2019, 33(7): 1440–1447.
- [17] 张超凡, 张道微, 周虹, 等. 镉污染稻田甘薯品种镉积累差异分析[J]. 湖南农业科学, 2018, 1: 48–50.
- Zhang CF, Zhang DW, Zhou H, *et al.* Difference analysis of cadmium accumulation of sweet potato varieties in Cd-contaminated rice field [J]. Hunan Agric Sci, 2018, 1: 48–50.
- [18] GB 15618–2018 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准[S].
- GB 15618–2018 Soil environmental quality-Risk control standard for soil contamination of agricultural land [S].
- [19] Fan Y, Li H, Xue ZJ, *et al.* Accumulation characteristics and potential risk of heavy metals in soil-vegetable system under greenhouse cultivation condition in northern China [J]. Ecol Eng, 2017, 102: 367–373.
- [20] GB 5009.15–2014 食品安全国家标准 食品中镉的测定[S].
- GB 5009.15–2014 National food safety standard–Determination of cadmium in food [S].
- [21] 张丽, 彭重华, 王莹雪, 等. 14 种植物对土壤重金属的分布、富集及转运特性[J]. 草业科学, 2014, 5: 833–838.
- Zhang L, Peng CH, Wang YX, *et al.* Heavy metal distribution, bioaccumulation and translocation characteristics of fourteen plants [J]. Pratac Sci, 2014, 5: 833–838.
- [22] 周虹, 张超凡, 张亚, 等. 不同甘薯品种中镉的积累与转运特性研究[J]. 中国农学通报, 2019, 35(3): 12–19.
- Zhou H, Zhang CF, Zhang Y, *et al.* Cadmium accumulation and translocation in sweet potato cultivars [J]. Chin Agric Sci Bull, 2019, 35(3): 12–19.
- [23] GB 2762–2017 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S].
- GB 2762–2017 National food safety standard–Maximum levels of contaminants in foods [S].
- [24] 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 J, Guo HC. Selection of low Pb and Cd accumulation potato cultivars and analysis of correlation among Pb, Cd and mineral elements [J]. J Saf Environ, 2019, 19(2): 621–627.
- [25] 张玉秀, 于飞, 张媛雅, 等. 植物对重金属镉的吸收转运和累积机制[J]. 中国生态农业学报, 2008, 5: 1317–1321.
- Zhang YX, Yu F, Zhang YY, *et al.* Uptake, translocation and accumulation of cadmium in plant [J]. Chin Eco-Agric, 2008, 5: 1317–1321.
- [26] 沈天尔, 施洁, 胡盈盈, 等. 玉米对镉的转运、积累机制及其生理响应[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(9): 139–146.
- Shen TE, Shi J, Hu YY, *et al.* Mechanism of cadmium transport and accumulation in maize and its physiological response against Cd toxicity [J]. Chin Cere Oil Assoc, 2019, 34(9): 139–146.
- [27] 王凯, 徐世龙, 杨远柱. 水稻镉吸收与转运机理研究进展[J]. 作物研究, 2014, 28(8): 926–930.
- Wang K, Xu SL, Yang YZ. Research progress on cadmium uptake and transport mechanism in rice [J]. Crop Res, 2014, 28(8): 926–930.
- [28] 刘兰英, 吕新, 陈丽华, 等. 土壤镉胁迫对甘薯品质和镉、锌吸收的影响[J]. 福建农业学报, 2019, 34(3): 344–351.
- Liu LY, Lv X, Chen LH, *et al.* Cd and Zn uptakes and quality of sweet potatoes under Cd stress [J]. Fujian Agric Sci, 2019, 34(3): 344–351.

(责任编辑: 王 欣)

作者简介



靳艳玲, 副研究员, 主要研究方向为甘薯质量安全与营养品质评价。
E-mail: jinyling@cib.ac.cn



赵 海, 研究员, 主要研究方向为甘薯质量安全与营养品质评价。
E-mail: zhaohai@cib.ac.cn