

中图分类号: S532 文献标识码: A 文章编号: 1672-3635(2021)02-0156-08

DOI: 10.19918/j.cnki.1672-3635.2021.02.008

## 不同土壤类型马铃薯对镉的富集转运差异研究

张瑞瑞<sup>1</sup>, 刘鸿雁<sup>1,2\*</sup>, 刘 克<sup>1</sup>, 周显勇<sup>1</sup>, 王雪雯<sup>1</sup>, 罗 凯<sup>2</sup>

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

**摘 要:**喀斯特碳酸盐岩地区具有典型的重金属镉(Cadmium)地质高背景特征, 为探明区域地带性土壤黄壤和岩成土壤石灰性土上种植马铃薯对Cd胁迫的响应, 利用黄壤和石灰性土进行盆栽试验, 土壤Cd浓度梯度设置为0.3, 0.6, 1.2, 2.4和4.8 mg/kg, 研究Cd胁迫下马铃薯不同生长时期各部位Cd含量的变化, 采用富集和转运系数分析Cd在土壤-马铃薯系统中的迁移转化特性。结果表明, 随着土壤Cd浓度增加, 马铃薯植株各部位Cd含量上升, 表现为根 > 茎 > 叶 > 块茎; 随着马铃薯生长期加长, 植株对Cd的富集能力逐渐增强, 富集系数表现为成熟期 > 淀粉积累期 > 块茎膨大期 > 苗期 > 花期; 马铃薯植株Cd富集系数平均为6.90(黄壤)和3.66(石灰性土), 块茎Cd富集系数为0.95(黄壤)和0.36(石灰性土); 各生长期Cd转运系数表现出根-茎 > 根-叶 > 根-块茎, 在黄壤和石灰性土上植株转运系数均值为0.89和0.66, 块茎转运系数均值为0.11和0.17, 总体表现为黄壤上马铃薯的富集和转运系数大于石灰性土。在Cd胁迫下, 马铃薯植株比块茎(可食部分)有相对较强的富集和转运能力, 除黄壤马铃薯成熟期富集系数外, 两种土壤上块茎的富集系数和转运系数均小于1, 整体表现出高富集、低转运的特点。

**关键词:**黄壤; 石灰土; 马铃薯; 镉; 富集系数; 转运系数

## Difference of Cadmium Enrichment and Transportation of Potato in Different Types of Soils

ZHANG Rui<sup>1</sup>, LIU Hongyan<sup>1,2\*</sup>, LIU Ke<sup>1</sup>, ZHOU Xianyong<sup>1</sup>, WANG Xuewen<sup>1</sup>, LUO Kai<sup>2</sup>

(1. College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China;

2. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China )

**Abstract:** A karst carbonate rock-distributed region is characterized by high geological background of cadmium (Cd). Pot experiments were conducted to study the response of potato under Cd stress in yellow soil (zonal soil) and calcareous soil (lithogenic soil). Cd concentration of soils was set as 0.3, 0.6, 1.2, 2.4 and 4.8 mg/kg, and the change of Cd content in different potato plant parts and in different growth stages were determined. Enrichment and transportation coefficients were used to analyze the migration and transformation characteristics of Cd in soil-potato system. Cd content of potato plant increased with the rising of soil Cd concentration, and ranked as: roots > stems > leaves > tubers. Cd enrichment coefficient of potato was presented as: maturity > starch accumulation > tuber bulking > seedling > flowering, and Cd enrichment capacity increased as the growth of potato. The mean Cd enrichment coefficient of potato plant was 6.90 (yellow soil) and 3.66 (calcareous soil), and the mean Cd enrichment coefficient of

收稿日期: 2020-09-25

**基金项目:**贵州省科技计划项目(黔科合后补助[2020]3001); 国家重点研发计划项目(2018YFC1802602); 国家基金委-贵州省人民政府联合基金项目(U1616442); 贵州省生物学一流学科建设项目(GNYL[2017]009)。

**作者简介:**张瑞瑞(1996-), 女, 土家族, 硕士研究生, 研究方向为农业资源与环境(植物营养学)。

**\*通信作者(Corresponding author):**刘鸿雁, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤污染治理研究, E-mail: hylu@gzu.edu.cn。

potato tubers was 0.95 (yellow soil) and 0.36 (calcareous soil). Cd transportation coefficient was: root-stem > root-leaf > root-tuber. The mean Cd transportation coefficient of potato plant was 0.89 (yellow soil) and 0.66 (calcareous soil), and the mean transportation coefficient of tubers was 0.11 (yellow soil) and 0.17(calcareous soil). Overall, the enrichment and transportation capacities was stronger in yellow soil than that in calcareous soil. Under Cd stress, plant showed much higher Cd enrichment and transportation capacities than those of tubers (edible part). Cd enrichment and transportation coefficients of potato tubers were all less than 1, except for enrichment coefficient of maturity time in yellow soil, indicating higher enrichment and lower transportation characteristics.

**Key Words:** yellow soil; calcareous soil; potato; cadmium; enrichment coefficient; transportation coefficient

镉(Cadmium, Cd)是自然环境中普遍存在且毒性极强的重金属元素, 但几乎所有的土壤、地表水和植物体内均含有镉。摄入微量的镉不仅威胁生物个体的生理和健康, 而且还对生物种群数量和物种分布产生影响<sup>[1]</sup>。作物吸收Cd的能力除取决于作物本身, 还与土壤镉含量、土壤特性等外部环境有关。研究发现在相同镉浓度处理下红椿根部镉含量黄壤 > 酸性紫色土<sup>[2]</sup>, 巨菌草地上部与地下部植株随着Cd处理浓度的增加表现出黄壤 > 紫色土 > 冲积土趋势<sup>[3]</sup>, 可见土壤类型不同, 作物中Cd富集转运能力存在差异。

马铃薯是世界四大粮食作物之一, 2014年贵州省马铃薯种植面积达 $7.04 \times 10^5 \text{ hm}^2$ , 是种植面积最大的农作物<sup>[4]</sup>。中国耕地土壤镉背景值平均值为0.27 mg/kg, 西南喀斯特地区面积约 $1.50 \times 10^7 \text{ hm}^2$ , 土壤镉背景值远高于全国平均值, 是典型的镉地球化学异常区。贵州省土壤镉的背景值在0.015~2.977 mg/kg, 石灰性土背景值达1.115 mg/kg, 地质高背景与历史土法炼锌的污染叠加, 导致黔西北耕地土壤Pb, Zn, Cd等重金属污染严重。据统计, 该地区Cd超农用地土壤污染风险管制值(G5618-2018)的面积约 $6.70 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 在贵州种植马铃薯, 除块茎外, 根、茎、叶中Cd含量都较高, 存在一定的生态安全风险<sup>[5-8]</sup>。因此, 受污染

耕地的安全利用是值得深入研究的环境问题和农业生产问题。

发育于第四纪红色粘土上的地带性土壤—黄壤和发育于石灰岩的岩性土—石灰土在贵州喀斯特地区分布最为广泛。本研究通过黄壤和石灰土的盆栽试验, 参照农用地土壤污染风险管控标准(GB15618—2018)设置5个Cd浓度梯度, 探索马铃薯Cd的浓度分布, 以及富集系数和转运系数的变化, 为Cd污染土壤马铃薯安全生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试作物

选用贵州省常种植马铃薯品种(原种)‘会-2号’, 种薯由贵州省农业科学院马铃薯研究所提供。

1.1.2 供试土壤

分别采集样地0~20 cm耕层土壤, 剔除根系碎屑、石砾等杂物, 室内风干、磨细过2 mm尼龙筛, 供盆栽试验用, 土壤基本理化性质见表1。

1.2 试验方法

试验在贵州大学盆栽场进行, 参照农用地土壤污染风险管控标准(GB15618—2018)(表2), 分别于2种类型土壤上按土壤污染风险筛选值设置5个Cd

表1 供试土壤基本理化性质  
Table 1 Basic physical and chemical properties of tested soil

| 采样地<br>Sampling site                        | 土壤类型<br>Soil type | 酸碱度<br>pH | 有机质(g/kg)<br>Organic matter | 全镉(mg/kg)<br>Total cadmium | 有效镉(mg/kg)<br>Available cadmium |
|---------------------------------------------|-------------------|-----------|-----------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| 花溪区贵筑社区<br>Guizhu Community, Huaxi District | 石灰性土              | 7.95      | 46.58                       | 0.58                       | 0.12                            |
| 花溪区燕楼乡<br>Yanlou Township, Huaxi District   | 黄壤                | 5.26      | 33.08                       | 0.56                       | 0.09                            |

浓度添加处理(T1: 0.3 mg/kg, T2: 0.6 mg/kg, T3: 1.2 mg/kg, T4: 2.4 mg/kg, T5: 4.8 mg/kg), 5个取样时期(苗期, 花期, 块茎膨大期, 淀粉积累期, 成熟期), 每个取样时期3组重复试验。马铃薯播种时间为2018年3月7日, 块茎收获时间为8月23日, 每盆种1棵, 共进行150个试验盆栽。

将过筛的供试土壤装入花盆(直径35 cm, 高30 cm), 每盆装土4 kg(以烘干土计算), 种植前施用硫酸钾型三元复合肥(N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O = 15:15:15)作为基肥, 盆钵内底部放置滤水网防止浇水时土壤

损失, 整个生育期内除草, 培养期间定时定量浇水。待马铃薯出苗产生匍匐茎开始取样, 共取5次样, 经完整生理周期后收获马铃薯。

### 1.3 样品测定与方法

#### 1.3.1 样品采集

马铃薯成熟后, 以盆为单位整株取出, 洗净块茎并称取鲜重。植株去除坏茎叶, 用自来水冲洗表面泥土, 去离子水将马铃薯植株反复冲洗3次; 根、茎、叶、块茎分别装入牛皮纸袋, 鲜样105~110℃杀青15 min, 再70~90℃烘干至恒重, 磨细备用。

表2 农田土壤污染风险管控标准(GB15618—2018)

Table 2 Farmland soil pollution risk management and control standards (GB15618—2018)

| 污染物项目<br>Pollutant project | 规定标准<br>Prescribed standards | pH≤5.5 | 5.5 < pH≤6.5 | 6.5 < pH≤7.5 | pH > 7.5 |
|----------------------------|------------------------------|--------|--------------|--------------|----------|
| 镉(mg/kg)                   | 筛选值                          | 0.3    | 0.3          | 0.3          | 0.6      |
| Cd                         | 管制值                          | 1.5    | 2.0          | 3.0          | 4.0      |

#### 1.3.2 测定方法

土壤pH值、有机质参照《土壤农业化学分析》<sup>[9]</sup>, 土样重金属Cd全量采用HNO<sub>3</sub>-HCl体系消煮, 植物样Cd全量采用HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>体系消煮, 待测液统一用ICP-MS(Thermo Fisher Scientific X2)测定, 所用试剂均为优级纯, 每批样品分析质量控制措施采取空白样、平行样和标准物质控制法, 标准样品测定结果在误差允许范围内。

#### 1.3.3 计算方法

Cd富集系数(BCF) = 植物某一部位Cd含量/土壤Cd含量

Cd转运系数(TF) = 植物地上部Cd浓度/植物根系Cd浓度

### 1.4 数据处理

所有数据通过Excel 2010统计, SPSS 26.0单因素方差分析进行差异性检验(One-way ANOVA), Origin 2018进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同生长时期马铃薯各部位Cd含量变化

#### 2.1.1 马铃薯根部Cd含量变化

马铃薯根部Cd含量有随Cd处理浓度增加而增

加的总趋势, 黄壤最高达到40.98 mg/kg, 石灰性土达18.52 mg/kg。根部Cd含量随着生长时期逐渐增大, 并在成熟期达到顶峰(图1)。外加镉处理提高了马铃薯植株对镉的吸收, 镉进入马铃薯根系后不断累积。

#### 2.1.2 马铃薯茎部Cd含量变化

两种土壤的T1、T2和T3处理下马铃薯茎Cd含量总体呈增加的趋势, 前两个取样时期马铃薯茎中Cd含量随Cd浓度梯度的升高而增加, 黄壤上平均达7.06 mg/kg, 石灰性土上达2.49 mg/kg。T5处理下淀粉积累期两种土壤种植的马铃薯茎中Cd与其他时期差异达显著水平( $P < 0.05$ ), 黄壤中为53.51 mg/kg, 石灰性土中为17.31 mg/kg(图2)。

#### 2.1.3 马铃薯叶部Cd含量变化

T1处理下两种土壤种植的马铃薯叶部Cd含量在整个生育期变化不大, 黄壤上变化为0.67~1.33 mg/kg, 石灰性土上为0.16~0.34 mg/kg; T4处理下马铃薯叶部Cd含量在花期到块茎膨大期阶段变化幅度较大, 黄壤上由5.19 mg/kg增加到10.93 mg/kg, 增幅达到110.60%; 石灰性土上由4.21 mg/kg降低到2.65 mg/kg, 降幅达到37.05%。T5处理下淀粉积累期时两种土壤种植的马铃薯叶片中Cd含量较高, 黄壤为25.58 mg/kg, 石灰性土为7.47 mg/kg(图3)。

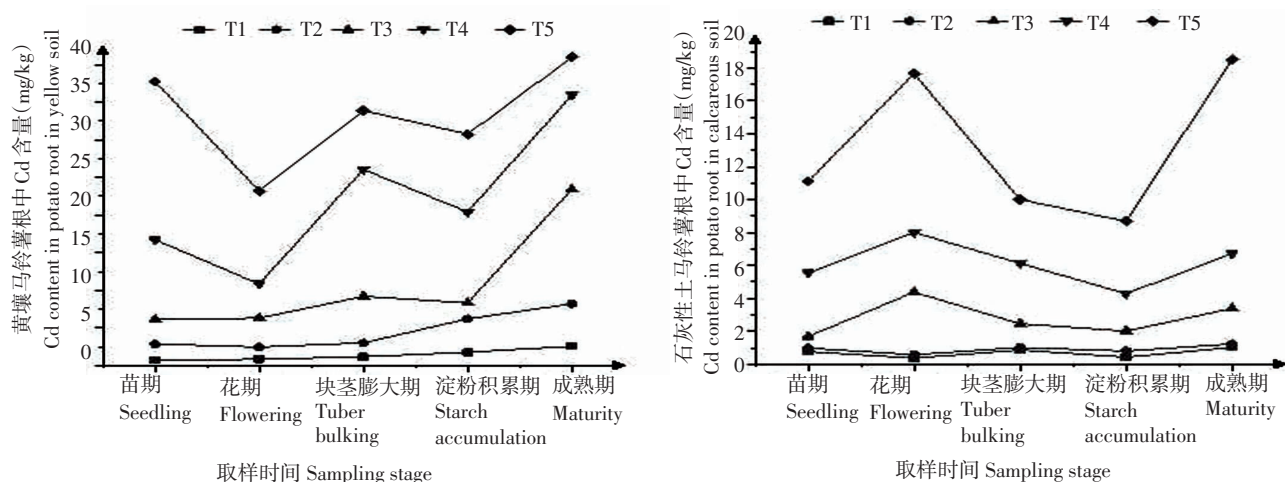


图1 黄壤和石灰性土马铃薯不同生长时期根Cd含量变化

Figure 1 Changes in root Cd content of potato in yellow soil and calcareous soil at different growth stages

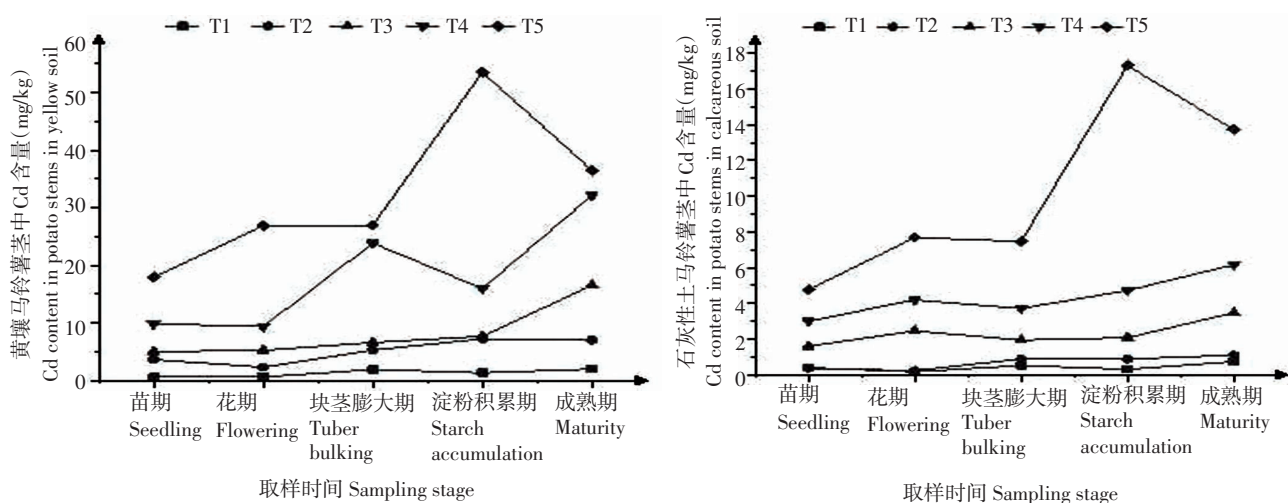


图2 黄壤和石灰性土马铃薯不同生长时期茎Cd含量变化

Figure 2 Changes in stem Cd content of potato in yellow soil and calcareous soil at different growth stages

#### 2.1.4 马铃薯块茎Cd含量变化

随Cd浓度增加, 马铃薯块茎Cd也有增加趋势。黄壤种植的马铃薯块茎Cd含量平均为0.29 mg/kg, 石灰性土壤块茎Cd含量平均为0.13 mg/kg。在块茎形成的整个生育时期, T1和T2处理条件下, 黄壤上马铃薯块茎Cd含量分别为0.05和0.08 mg/kg, 石灰性土上马铃薯块茎Cd含量分别为0.03和0.05 mg/kg;

而在T3、T4和T5处理下, 黄壤上马铃薯块茎Cd含量分别为0.22, 0.47和0.61 mg/kg, 石灰性土上马铃薯块茎Cd含量分别为0.10, 0.33和0.41 mg/kg。黄壤种植的马铃薯块茎Cd含量总体高于石灰性土壤(图4)。

#### 2.2 马铃薯对镉的富集转运特征

##### 2.2.1 马铃薯不同生长时期Cd富集系数变化

两土壤马铃薯植株富集系数表现出: 成熟期 >

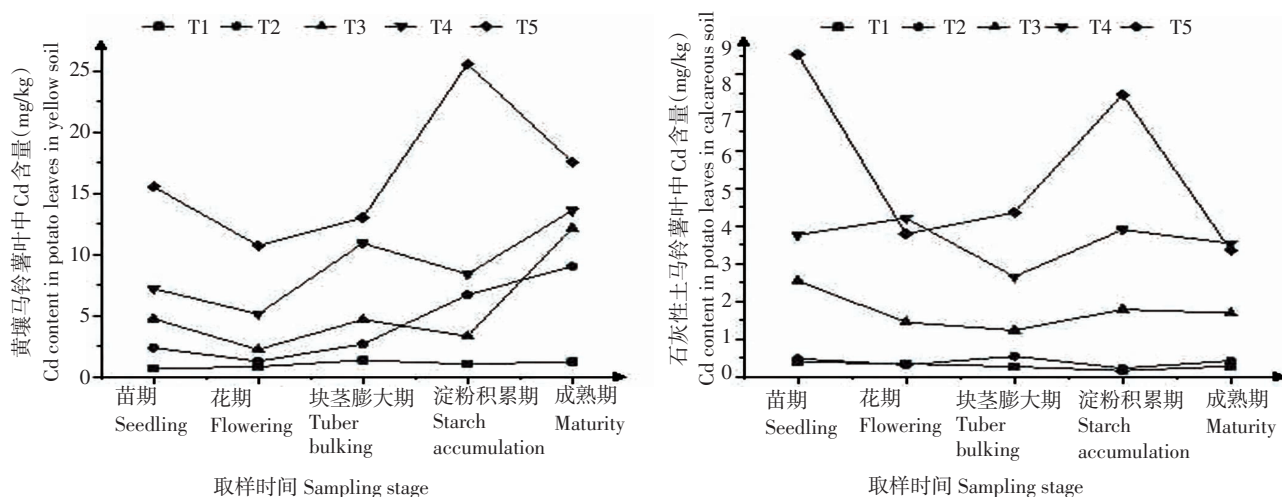


图3 黄壤和石灰性土马铃薯不同生长时期叶Cd含量变化

Figure 3 Changes in leaf Cd content of potato in yellow soil and calcareous soil at different growth stages

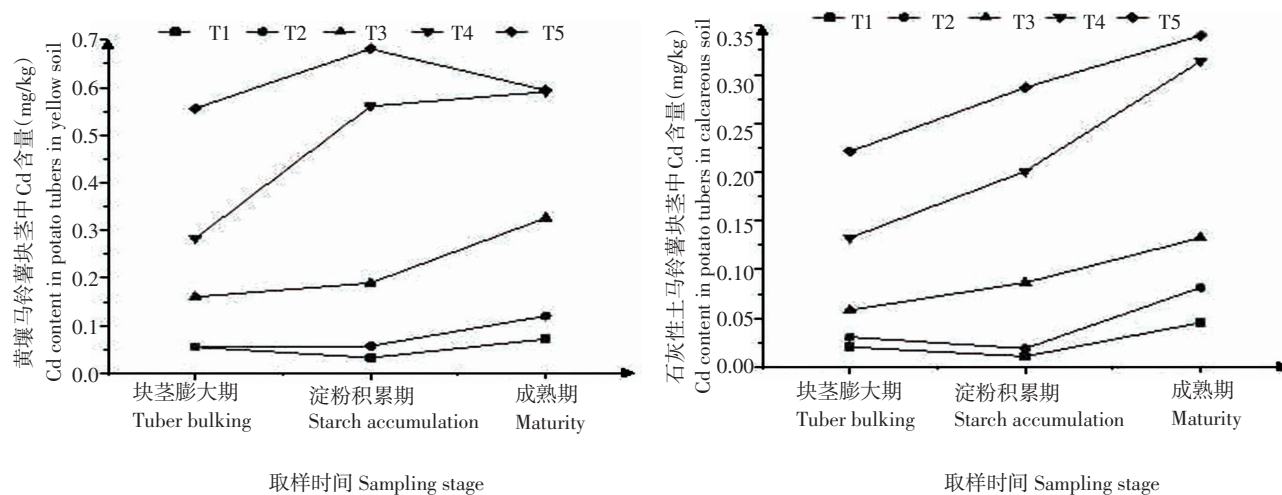


图4 黄壤和石灰性土马铃薯不同生长时期块茎Cd含量变化

Figure 4 Changes in tuber Cd content of potato in yellow soil and calcareous soil at different growth stages

淀粉积累期 > 块茎膨大期 > 苗期 > 花期的总体趋势。黄壤上Cd富集系数较石灰性土平均高出89.69%;黄壤上成熟期Cd富集系数分别高淀粉积累期46.74%,块茎膨大期97.09%,花期208.16%,苗期157.48%;石灰性土上成熟期Cd富集系数分别高淀粉积累期28.62%,块茎膨大期44.64%,花期74.36%,苗期49.36%;黄壤上马铃薯植株Cd富集系数平均为6.90,石灰性土平均为3.66;Cd进入马铃薯植株后开始逐渐累积,黄壤上根部富集系数平

均达8.22,石灰性土平均达3.54;茎段分别为7.50和3.80;叶片分别为4.97和3.65;块茎富集较少,分别为0.95和0.36;石灰性土上马铃薯块茎富集系数低于黄壤且均小于1(表3)。

#### 2.2.2 马铃薯不同生长时期Cd转运系数变化

各生长时期转运系数表现出:根-茎段 > 根-叶片 > 根-块茎的总体趋势。黄壤上植株转运系数均值为0.89,块茎均值为0.11;石灰性土上植株转运系数均值为0.66,块茎均值为0.17;黄壤上马铃薯

表3 马铃薯不同生长时期镉富集系数  
Table 3 Cadmium enrichment coefficient at different growth stages of potato

| 土壤类型<br>Soil type       | 植株部位<br>Plant part | 苗期<br>Seedling | 花期<br>Flowering | 块茎膨大期<br>Tuber bulking | 淀粉积累期<br>Starch accumulation | 成熟期<br>Maturity |
|-------------------------|--------------------|----------------|-----------------|------------------------|------------------------------|-----------------|
| 黄壤<br>Yellow soil       | 根部                 | 6.20 ± 2.84 d  | 4.84 ± 1.33 e   | 6.69 ± 2.10 c          | 8.72 ± 3.09 b                | 14.67 ± 4.49 a  |
|                         | 茎段                 | 4.53 ± 1.26 d  | 4.54 ± 1.79 d   | 7.12 ± 1.66 c          | 9.28 ± 4.29 b                | 12.03 ± 3.42 a  |
|                         | 叶片                 | 3.50 ± 0.78 d  | 2.51 ± 0.44 e   | 3.97 ± 0.70 c          | 6.15 ± 1.48 b                | 8.71 ± 0.36 a   |
|                         | 块茎                 | —              | —               | 0.81 ± 0.36 b          | 0.82 ± 0.30 b                | 1.23 ± 0.33 a   |
| 石灰性土<br>Calcareous soil | 根部                 | 3.79 ± 0.37 b  | 2.46 ± 1.46 d   | 2.95 ± 0.35 c          | 3.54 ± 0.32 b                | 4.97 ± 0.73 a   |
|                         | 茎段                 | 2.97 ± 0.26 c  | 3.22 ± 0.79 c   | 3.40 ± 0.18 c          | 3.89 ± 0.89 b                | 5.52 ± 0.49 a   |
|                         | 叶片                 | 3.35 ± 0.52 b  | 2.98 ± 0.48 b   | 3.86 ± 0.19 a          | 4.05 ± 0.57 a                | 4.02 ± 0.32 a   |
|                         | 块茎                 | —              | —               | 0.23 ± 0.02 b          | 0.26 ± 0.11 b                | 0.59 ± 0.15 a   |

注：所列结果为平均值 ± 标准差。表中不同小写字母表示同一部位不同生长时期之间差异达0.05显著水平( $P < 0.05$ )，LSD测验。下同。

Note: Results listed are mean ± standard deviation. Different lowercase letters in table indicate a significant difference between different growth stages in the same part ( $P < 0.05$ ) using LSD method. The same below.

表4 马铃薯不同生长时期镉转运系数  
Table 4 Transfer coefficient of cadmium in potato at different growth stages

| 土壤类型<br>Soil type       | 植株部位<br>Plant part | 苗期<br>Seedling | 花期<br>Flowering | 块茎膨大期<br>Tuber bulking | 淀粉积累期<br>Starch accumulation | 成熟期<br>Maturity |
|-------------------------|--------------------|----------------|-----------------|------------------------|------------------------------|-----------------|
| 黄壤<br>Yellow soil       | 根-茎段               | 0.91 ± 0.08 c  | 0.82 ± 0.4 c    | 1.07 ± 0.34 b          | 1.58 ± 0.04 a                | 0.83 ± 0.07 c   |
|                         | 根-叶片               | 0.69 ± 0.03 b  | 0.56 ± 0.11 b   | 0.94 ± 0.09 a          | 0.96 ± 0.25 a                | 0.58 ± 0.12 b   |
|                         | 根-块茎               | —              | —               | 0.09 ± 0.08 a          | 0.10 ± 0.03 a                | 0.14 ± 0.02 a   |
| 石灰性土<br>Calcareous soil | 根-茎段               | 0.57 ± 0.13 c  | 0.48 ± 0.06 c   | 0.73 ± 0.11 b          | 1.19 ± 0.47 a                | 0.86 ± 0.12 b   |
|                         | 根-叶片               | 0.79 ± 0.04 a  | 0.51 ± 0.17 b   | 0.44 ± 0.08 b          | 0.66 ± 0.05 a                | 0.37 ± 0.14 b   |
|                         | 根-块茎               | —              | —               | 0.12 ± 0.02 a          | 0.17 ± 0.05 a                | 0.21 ± 0.08 a   |

植株转运系数大于石灰性土。马铃薯根-茎段在淀粉积累期转运系数与其他时期差异显著( $P < 0.05$ )，黄壤上分别是苗期的1.74倍，花期1.93倍，块茎膨大期1.48倍，成熟期1.90倍；石灰性土上分别是苗期的2.09倍，花期2.48倍，块茎膨大期1.63倍，成熟期1.38倍。两种土壤条件下马铃薯根-茎段在淀粉积累期转运系数均大于1，块茎Cd的转运系数均小于1(表4)。

### 3 讨 论

土壤重金属的迁移性受土壤pH值和有机质的影响较大<sup>[10]</sup>，土壤pH值与马铃薯根、茎中Cd含量呈

负相关，这是由于酸性条件下重金属具有较高的活性和生物有效性，pH值较小的土壤中胶体、粘土矿物颗粒吸附的Cd与H<sup>+</sup>交换量将会增加，导致土壤有效态Cd<sup>2+</sup>的浓度增加，从而促进重金属向植物体内的迁移<sup>[11,12]</sup>。本研究中马铃薯各器官Cd含量均随胁迫增大而升高(图1、图2)，相同Cd胁迫条件下，马铃薯根茎叶Cd含量表现出黄壤 > 石灰性土；pH值较高的石灰性土种植的马铃薯Cd含量更低，是由于碳酸盐有效降低了土壤中的交换态Cd，从而降低植株对Cd的吸收。因此在Cd污染土壤上可适当增加土壤pH值，降低土壤中Cd向植物迁移的能力和农作物中的Cd含量，保障当地农作物食品安全<sup>[13]</sup>。石

灰性土中Ca、Mg离子对Cd吸收也存在一定的拮抗能力, Ca、Mg离子的存在也抑制了马铃薯对Cd的吸收<sup>[14]</sup>。影响重金属生物有效性有很多原因, 土壤有机质含量也是重要因素之一<sup>[15,16]</sup>。有机质可通过氨基、羧基和羟基与Cd螯合配位结合, 从而降低Cd生物有效性<sup>[17-19]</sup>。本研究中石灰性土有机质含量更高, 碳酸盐类也有效的降低了土壤中Cd向植株的迁移。

Cd在土壤-作物系统中的迁移与分配是多重因素共同决定的, 转运系数是指植物地上部中的金属含量与地下部中金属含量的比值, 反映重金属从根系分配到其他器官的能力和效率, 富集系数可反映植物对重金属富集程度的高低或富集能力的强弱<sup>[20-23]</sup>。茎叶中Cd的累积主要来源于根系对土壤中Cd的吸收迁移<sup>[14,15,24]</sup>, 此外根部木质部汁液中以自由离子存在的Cd, 在根压作用与蒸腾作用共同条件下也会向地上部进行运输; 地上部分的Cd在实现了木质部到韧皮部的转运以后, 也会随着植物生长发育在茎叶等器官之间通过韧皮部进行再分配<sup>[25]</sup>。通过比较马铃薯不同部位的转运系数可知, 两种土壤上马铃薯根-茎段转运系数较大; 这是由于作物根细胞壁通过选择性吸收, 吸附和固定土壤中的Cd, 大部分Cd被截留在细胞壁中; 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。蒸腾作用对叶片中重金属的吸收也起重要作用, Cd在植物体内长距离运输的速率约为0.35~0.60 m/h, 蒸腾越强, 向茎叶中的运输也就越快越多<sup>[12,24-27]</sup>; 马铃薯根-块茎转运系数较小, 一方面是由于Cd与根系分泌物有机酸等通过竞争性结合后滞留在根表面, 通过主动运输转移至其他器官的Cd<sup>2+</sup>量减少; 另一方面马铃薯根系向地上部分输送营养时, 各个器官都会对Cd<sup>2+</sup>产生截留作用, 大部分Cd<sup>2+</sup>被截留在根、茎、叶中, 只有少量的Cd<sup>2+</sup>转运到块茎<sup>[15,28-30]</sup>。

综上所述, 随着Cd胁迫的增强, 黄壤和石灰性土上种植的马铃薯植株和块茎Cd含量都增加。黄壤上马铃薯植株Cd的富集系数较高, 均值可达6.90, 石灰性土的富集系数均值可达3.66; 马铃薯可食部分块茎Cd的富集系数相对较小, 黄壤上最大值为1.23, 石灰性土上均小于1。两种土壤上马铃薯可食部分块茎的转运系数在0.09~0.21, T1和T2处理马

铃薯块茎Cd小于食品安全国家标准(GB2762—2017)<sup>[31]</sup>0.1 mg/kg的限值; 在Cd胁迫条件下, 黄壤和石灰性土上种植马铃薯均表现为高富集、低转运的特点。

## [参 考 文 献]

- [1] Larison J R, Likens G E, Fitzpatrick J W, *et al.* Cadmium toxicity among wildlife in the Colorado Rocky Mountains [J]. *Nature*, 2000, 406: 181-183.
- [2] 王岑涅, 刘柿良, 李勋, 等. 3种土壤类型下镉胁迫对红椿生物量分配及其镉富集特性的影响 [J]. *生态环境学报*, 2017, 26(9): 1591-1598.
- [3] 王丽萍, 张健, 胡红玲, 等. 3种土壤下巨菌草对镉胁迫的生理响应 [J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(12): 2252-2260.
- [4] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴2015 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
- [5] 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.
- [6] 余志, 陈凤, 张军方, 等. 锌冶炼区菜地土壤和蔬菜重金属污染状况及风险评价 [J]. *中国环境科学*, 2019, 39(5): 2086-2094.
- [7] 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): 1-6.
- [8] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. GB15618—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.
- [9] 鲍士旦. 土壤农业化学分析 [M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 263-274.
- [10] 付海波, 曾艳, 陈敬安, 等. 铅锌矿冶炼区农田土壤和马铃薯中Cd含量及其化学形态分布 [J]. *河南农业科学*, 2014, 43(9): 66-71.
- [11] 吴勇, 蒋万, 宋勇. 土壤镉污染对薯类作物影响的研究进展 [J]. *中国园艺文摘*, 2016, 32(10): 1-6, 32.
- [12] Shimpei U, Shinsuke M, Masato K, *et al.* Root-to-shoot Cd translocation via the xylem is the major process determining shoot and grain cadmium accumulation in rice [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2009, 60(9): 2677-2688.
- [13] Jamile F G, Fabiane G A, Joseila M, *et al.* Cadmium and mineral nutrient accumulation in potato plantlets grown under cadmium stress in two different experimental culture conditions [J]. *Plant*

- Physiology and Biochemistry, 2009, 47(9): 814–821.
- [14] 高中超, 王秋菊, 张劲松, 等. 深耕修复除草剂污染土壤提高马铃薯的产量 [J]. 中国马铃薯, 2017, 31(1): 11–17.
- [15] 刘昭兵, 纪雄辉, 官迪, 等. 湖南两种母质发育土壤的稻米镉积累差异 [J]. 土壤通报, 2018, 49(1): 191–196.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Nzediegwu C, Prasher S, Elsayed E, *et al.* Effect of biochar on heavy metal accumulation in potatoes from waste water irrigation [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 232: 153–164.
- [19] Mohsen J, Meyari A. Accumulation of heavy metals in potatoes grown on calcareous soils of the Hamedan, Western Iran [J]. Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 2016, 25(4): 365–377.
- [20] 谢永贤. 不同培肥措施对土壤养分及马铃薯产量的影响 [J]. 中国马铃薯, 2017, 31(1): 25–29.
- [21] 焦位雄, 杨虎德, 冯丹妮, 等. Cd Hg Pb胁迫下不同作物可食部分重金属含量及累积特征研究 [J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9): 1726–1733.
- [22] 景丽洁, 王敏. 不同类型土壤对重金属的吸附特性 [J]. 生态环境, 2008(1): 245–248.
- [23] 刘利, 郝小花, 田连福, 等. 植物吸收、转运和积累镉的机理研究进展 [J]. 生命科学研究, 2015, 19(2): 176–184.
- [24] 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.
- [25] 罗宇. 马铃薯品种镉积累比较及降镉栽培措施研究 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2017.
- [26] 董见南, 李雪茹, 陈国峰, 等. 调环酸钙在马铃薯及植株中的残留和消解分析 [J]. 中国马铃薯, 2019, 33(6): 352–358.
- [27] Xu D, Chen Z, Sun 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(1): 147–153.
- [28] 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.
- [29] 李瑜, 张百忍, 刘运华, 等. 马铃薯对硒的吸收及生物富集规律 [J]. 中国马铃薯, 2013, 27(6): 358–361.
- [30] 周积兵, 郑天翔, 陆海宁, 等. 整薯与切块播种对河西走廊加工型马铃薯品种生长及品质和产量的影响 [J]. 中国马铃薯, 2019, 33(2): 84–88.
- [31] 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. GB2762—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.

## 书

## 讯

现有《中国马铃薯》杂志2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019和2020年精装合订本, 中国马铃薯大会论文集2011年《马铃薯产业与科技扶贫》, 2012年《马铃薯产业与水资源高效利用》, 2013年《马铃薯产业与农村区域发展》, 2014年《马铃薯产业与小康社会建设》, 2015年《马铃薯产业与现代可持续农业》, 2016年《马铃薯产业与中国式主食》, 2017年《马铃薯产业与精准扶贫》, 2018年《马铃薯产业与脱贫攻坚》, 2019年《马铃薯产业与健康消费》和2020年《马铃薯产业与美丽乡村》, 每本定价100元。有需要的读者, 可与《中国马铃薯》编辑部联系。

联系电话: 0451-55190003