邓　婷, 吴家龙, 卢维盛, 等. 不同玉米品种对土壤镉富集和转运的差异性[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(6): 1265-1271.
DENG Ting, WU Jia-long, LU Wei-sheng, et al. Differences in cadmium accumulation and translocation in different *Zea mays* cultivars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(6): 1265-1271.

不同玉米品种对土壤镉富集和转运的差异性

邓　婷[1,2], 吴家龙[1], 卢维盛[1*], 官以战[3], 李贵杰[1], 张秋华[1], 俞方玉[1], 曾祖蕾[1]

(1.华南农业大学资源环境学院, 广州 510642; 2.广东精地规划科技有限公司, 广州 510630; 3.韶关市曲江区农科所, 广东 韶关 512100)

摘　要: 为进一步验证前期筛选出的6个镉(Cadmium, Cd)高、低积累玉米品种对土壤Cd富集和转运的差异性,通过田间试验,研究了6个不同玉米(*Zea mays*)品种对重金属Cd富集系数(Bio-concentration coefficient, BCF)和转运系数(Transfer coefficient, TF)的差异。结果表明:6个玉米品种在抽丝期和成熟期的根部及地上部生物量、根部、茎叶及籽粒Cd含量、富集系数、积累量和总富集量均存在显著的种间差异(P<0.05)。华彩糯3号和广红糯8号的成熟期茎叶Cd含量分别为16.38 mg·kg^{-1}和13.64 mg·kg^{-1},茎叶Cd富集系数分别为7.45和6.20,Cd转运系数分别为1.88和3.02;籽粒Cd含量分别为0.65 mg·kg^{-1}和0.63 mg·kg^{-1},超过了食品安全国家标准(GB 2762—2017)和饲料卫生标准(GB 13078—2017)限值。粤彩糯2号、华玉8号和广紫糯6号茎叶富集系数分别为2.07、1.39和1.85,籽粒Cd含量分别为0.19、0.17 mg·kg^{-1}和0.15 mg·kg^{-1},高于GB 2762—2017但低于GB 13078—2017限值。仲糯1号茎叶和籽粒富集系数分别为1.85和0.032,玉米籽粒Cd含量为0.07 mg·kg^{-1},符合GB 2762—2017。华彩糯3号和广红糯8号可作为Cd高富集玉米品种,不可用作粮食或饲料;仲糯1号可作为Cd低累积玉米品种,可用作粮食或饲料。

关键词: 玉米品种;镉;累积
中图分类号: S513　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1672-2043(2019)06-1265-07　　doi:10.11654/jaes.2018-1291

Differences in cadmium accumulation and translocation in different *Zea mays* cultivars

DENG Ting[1,2], WU Jia-long[1], LU Wei-sheng[1*], GUAN Yi-zhan[3], LI Gui-jie[1], ZHANG Qiu-hua[1], YU Fang-yu[1], ZENG Zu-lei[1]

(1.College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2.Guangdong Jingdi Planning Technology Co., Ltd, Guangzhou 510630, China; 3.Qujiang District Agricultural Research Institute, Shaoguan 512100, China)

Abstract: The objectives of this study were to further test and verify the high and low Cd accumulation in maize cultivars screened in previous studies. A field experiment was conducted to discuss the differences in the characteristics of Cd accumulation and transport in six maize cultivars. The results showed that there were significant differences in root and shoot biomass, Cd content in roots, stems, and leaves, and in the Cd accumulation coefficients, accumulation, and total accumulation of the six maize cultivars during the silking and maturity stages(P<0.05). During maturity stages, the Cd contents in shoots of Huacainuo 3 and Guanghongnuo 8 were 16.38 mg·kg^{-1} and 13.64 mg·kg^{-1}, the accumulation coefficients were 7.45 and 6.20, the transfer coefficients were 1.88 and 3.02, respectively. The contents of Cd in grain in Huacainuo 3 and Guanghongnuo 8 were 0.65 mg·kg^{-1} and 0.63 mg·kg^{-1}, respectively, which were far exceeding national food hygiene standards(GB 2762—2017) and feed hygiene standards(GB 13078—2017). The Cd accumulation coefficients in shoots of Yuecainuo 2, Huayu 8 and Guangzinuo 6 were 2.07, 1.39 and 1.85, respectively. And their contents of Cd in grain were 0.19, 0.17 and 0.15, respectively, which were higher than the national food hygiene standards but lower than the national feed health standard. The accumulation coefficients of shoots and grain of Zhongnuo 1 were 1.85 and 0.032, respectively, and its Cd content in grain was 0.07 mg·kg^{-1}, which did not exceed the national food hygiene standard. Our results indicated that Huacainuo 3 and Guanghongnuo 8 could be used as high-accumulation maize cultivars but not for food or feed, while Zhongnuo 1 could be used as a high-accumulation maize cultivar for food or feed.

Keywords: *Zea mays* cultivars; cadmium; accumulation

收稿日期: 2018-10-15　　**录用日期:** 2019-02-27
作者简介: 邓　婷(1990—),女,湖南岳阳人,硕士研究生,从事土壤重金属污染修复研究。E-mail:tingdeng0518@163.com
***通信作者:** 卢维盛　E-mail:lws2869@scau.edu.cn
基金项目: 国家自然科学基金项目(41271266)
Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41271266)

我国局部地区耕地土壤重金属污染严重[1]，其中Cd的污染比较常见。Cd具有较强的生物迁移性和毒性[2]，容易被作物吸收和累积，进而通过食物链危害人体健康[3]。玉米（*Zea mays*）是我国最重要的粮食作物之一，品种资源丰富，具有生物量大、生长周期短、易种植和易管理等优点[4-5]。研究表明不同玉米品种对Cd的吸收和富集能力具有显著的差异[6-8]，其中有些品种玉米对Cd的富集能力较强，在Cd污染土壤重金属修复上具有较大的潜力[3,9-10]。因此，一方面可以通过筛选Cd低积累品种，收获符合食品卫生标准的可食用部分，保证粮食安全[11]；另一方面，筛选出的Cd高积累品种玉米可以作为植物修复资源加以利用。邓婷[12]通过盆栽试验从11个玉米品种中分别筛选出了Cd高积累品种（华彩糯3号和广红糯8号）和低积累品种（粤彩糯2号、广紫糯6号和仲糯1号）；有报道[13]指出华玉8号也是玉米Cd低积累品种。本试验选取以上2个高积累品种和4个低积累品种，在Cd污染农田进行试验，通过研究不同玉米品种抽丝期和成熟期不同器官对Cd的累积和转运差异，进一步验证其对Cd高、低累积的潜力，为Cd污染耕地的安全利用和植物修复提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验位于广东省韶关市曲江区马坝镇。供试土壤为水稻土，其理化性质为：pH 5.36±0.08，有机质31.76±0.33 g·kg^{-1}，碱解氮94.5±1.10 mg·kg^{-1}，速效磷81.02±0.33 mg·kg^{-1}，速效钾187.7±0.80 mg·kg^{-1}，Cd全量2.2±0.06 mg·kg^{-1}。供试玉米为2个高积累品种（华彩糯3号和广红糯8号）和4个低积累品种（仲糯1号、粤彩糯2号、华玉8号和广紫糯6号）。其中，华彩糯3号和华玉8号由华南农业大学选育，粤彩糯2号由广东省农业科学院选育，广红糯8号和广紫糯6号由广州市农业科学研究院选育，仲糯1号由仲恺农业工程学院选育。

1.2 试验设计

试验共6个处理（6个玉米品种），每个处理设4次重复，共计24个小区，随机区组排列。试验小区规格为长24 m，宽0.5 m，面积12 m^2，每个小区种植两行玉米，行间距50 cm，株距30 cm。试验地四周设置保护行以消除边际效应。每穴播2粒玉米种子，使种子入土2~3 cm，保持播种深度一致；玉米长出3片叶时进行间苗，每穴留1株，每个小区20株；作物生长期间按大田常规操作进行灌溉和施肥，播种前施复合肥（15-15-15）做基肥（施用量600 kg·hm^{-2}），拔节期追施尿素（施用量300 kg·hm^{-2}）。2015年8月播种，分别于10月玉米抽丝期和11月玉米成熟期取样并收获。

1.3 样品采集与测定

抽丝期和成熟期时，分别在每个小区随机取5株玉米，分根、茎叶和籽粒（成熟期收获），依次用自来水、蒸馏水和高纯水清洗后，在105 ℃干燥箱杀青30 min，并在70 ℃烘干至恒质量后，测定干质量。玉米去包衣后脱粒。分别将根、茎叶和籽粒粉碎，过100目尼龙筛备用。土壤基本性质参照《土壤农化分析（第三版）》[14]中的方法测定。土壤全Cd采用HCl-HNO_3-HF-$HClO_4$消解，具体参照《土壤质量 铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法》（GB/T 17141—1997）。植株样品总Cd测定参照《食品安全国家标准 食品中镉的测定》（GB 5009.15—2014），采用HNO_3-$HClO_4$（4∶1）消化。土壤和植株待测液中的Cd均用原子吸收分光光度法（HITACHI-Z2300）测定。土壤、植物测定过程均采用国家标准参比物质（土壤：GBW07405；植物：GBW10015）进行质量控制，标准样品测定结果均在允许范围内。

1.4 Cd积累量、富集系数和转运系数

玉米各器官Cd积累量=各器官干物质量×各器官Cd含量

茎叶、根对Cd的富集系数=茎叶、根中Cd含量/土壤Cd含量[15]

籽粒对Cd的富集系数=籽粒中Cd含量/土壤Cd含量

茎叶对Cd的转运系数=茎叶中Cd含量/根系中Cd含量

籽粒对Cd的转运系数=籽粒中Cd含量/茎叶中Cd含量[8]

1.5 数据处理与分析

采用Excel 2003进行数据整理，图表中数据均为平均值±标准误（Mean±Standard error）。运用SPSS 23.0统计软件进行方差分析，并利用新复极差法（Duncan法）进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同玉米品种的生物量、Cd含量和Cd积累量

抽丝期和成熟期不同品种玉米各器官生物量、Cd含量等如表1所示。抽丝期茎叶干质量为26.29~51.95 g·株$^{-1}$，根部干质量为7.22~13.85 g·株$^{-1}$；华玉8

号玉米茎叶干质量显著高于其他玉米品种($P<0.05$);仲糯1号、粤彩糯2号和华彩糯3号玉米茎叶干质量显著高于广紫糯6号和广红糯8号;华彩糯3号和华玉8号玉米根部干质量显著高于其他品种,分别为13.85 g·株$^{-1}$和13.05 g·株$^{-1}$,其他4个品种玉米根干质量均在8 g·株$^{-1}$左右。成熟期茎叶干质量为34.50~76.26 g·株$^{-1}$,根部干质量为4.79~11.85 g·株$^{-1}$,籽粒干质量为44.59~60.26 g·株$^{-1}$;粤彩糯2号、华彩糯3号、华玉8号玉米茎叶干质量显著高于仲糯1号、广紫糯6号、广红糯8号;华玉8号玉米根部的干质量显著高于其他品种;仲糯1号玉米的籽粒干质量显著高于华彩糯3号和广红糯8号,华彩糯3号玉米籽粒干质量最低。

抽丝期不同品种玉米茎叶Cd含量为2.63~13.12 mg·kg^{-1},根部Cd含量为5.96~12.03 mg·kg^{-1};华彩糯3号和广红糯8号玉米茎叶Cd含量显著高于其他品种,分别达13.12 mg·kg^{-1}和12.10 mg·kg^{-1};仲糯1号、粤彩糯2号、华玉8号、广紫糯6号玉米茎叶Cd含量差异不显著;华玉8号和仲糯1号玉米根Cd含量最大,显著高于广紫糯6号和广红糯8号,仲糯1号、粤彩糯2号、华彩糯3号、华玉8号玉米的根Cd含量之间无显著差异;可以看出,广红糯8号玉米茎叶Cd含量高,根含量低,相反,华玉8号和仲糯1号茎叶Cd含量低,而根含量高。成熟期茎叶Cd含量为3.07~16.38 mg·kg^{-1},根部Cd含量为4.71~12.33 mg·kg^{-1},籽粒Cd含量为0.07~0.65 mg·kg^{-1};成熟期华彩糯3号和广红糯8号玉米各器官Cd含量大小为茎叶>根>籽粒,而仲糯1号、粤彩糯2号、广紫糯6号、华玉8号则为根>茎叶>籽粒;华彩糯3号和广红糯8号玉米茎叶Cd含量分别为16.38 mg·kg^{-1}和13.64 mg·kg^{-1},显著高于其他4个品种,其中华玉8号玉米茎叶Cd含量最小;华玉8号玉米的根部Cd含量(12.33 mg·kg^{-1})显著高于其他5个品种;仲糯1号、粤彩糯2号和华彩糯3号之间无显著差异,广红糯8号玉米根部Cd含量最低;华彩糯3号和广红糯8号玉米的籽粒Cd含量最高,分别为0.65 mg·kg^{-1}和0.63 mg·kg^{-1},显著高于其他4个品种;仲糯1号、粤彩糯2号、华玉8号和广紫糯6号玉米籽粒Cd含量均在0.2 mg·kg^{-1}以下,仲糯1号玉米籽粒Cd含量最低,仅0.07 mg·kg^{-1}。

抽丝期不同品种玉米茎叶和根部Cd积累量分别为0.087~0.598 mg·株$^{-1}$和0.046~0.159 mg·株$^{-1}$;华彩糯3号和广红糯8号玉米茎叶Cd积累量显著高于其他品种,且华彩糯3号显著高于广红糯8号;华玉8号玉米根部Cd积累量最大,显著高于仲糯1号、粤彩糯2号、广紫糯6号、广红糯8号,其次是华彩糯3号,显著高于粤彩糯2号、广紫糯6号、广红糯8号玉米;华彩糯3号和广红糯8号品种玉米茎叶Cd积累量分别比其根部高342.62%和659.06%,说明这两个品种玉米在抽丝期吸收的Cd主要积累在茎叶,而仲糯1号、粤彩糯2号、华玉8号和广紫糯6号玉米茎叶和根部Cd积累量差异不明显。成熟期茎叶、根部和籽粒Cd积累量分别为0.142~1.103、0.022~0.143 mg·株$^{-1}$和

表1 抽丝期和成熟期不同品种玉米的干质量、Cd含量和积累量

Table 1 The dry weight, Cd concentration and accumulation of *Zey mays* cultivars in silking and maturity stage

时期 Stages	品种 Cultivars	干质量 Dry weight/g·株$^{-1}$			Cd含量 Contents of Cd/mg·kg^{-1}			Cd积累量 Accumulation of Cd/mg·株$^{-1}$		
		茎叶 Shoot	根 Root	籽粒 Seed	茎叶 Shoot	根 Root	籽粒 Seed	茎叶 Shoot	根 Root	籽粒 Seed
抽丝期 Silking stage	华彩糯3号	45.32±1.60b	13.85±0.29a	—	13.12±1.02a	9.77±1.11abc	—	0.598±0.065a	0.135±0.015ab	—
	广红糯8号	30.01±2.40c	7.42±0.79b	—	12.10±2.30a	5.96±1.53c	—	0.347±0.038b	0.046±0.013c	—
	粤彩糯2号	45.29±1.47b	7.22±0.91b	—	3.45±0.08b	9.30±1.27abc	—	0.156±0.006c	0.070±0.018c	—
	华玉8号	51.95±2.99a	13.05±0.52a	—	2.63±0.39b	12.03±1.56a	—	0.135±0.018c	0.159±0.025a	—
	广紫糯6号	26.29±0.52c	8.10±0.61b	—	3.29±0.30b	7.96±0.63bc	—	0.087±0.009c	0.065±0.009c	—
	仲糯1号	43.42±0.90b	8.27±0.75b	—	3.76±0.21b	11.38±0.63ab	—	0.163±0.010c	0.094±0.011bc	—
成熟期 Maturity stage	华彩糯3号	67.03±5.36a	10.03±0.82ab	44.59±5.81b	16.38±0.88a	8.81±0.48b	0.65±0.09a	1.103±0.121a	0.088±0.006b	0.028±0.004a
	广红糯8号	38.27±4.69b	4.79±0.26d	45.00±2.09b	13.64±1.95a	4.71±0.71c	0.63±0.10a	0.520±0.088b	0.022±0.002d	0.028±0.004a
	粤彩糯2号	71.27±0.81a	7.53±0.68c	53.46±2.75ab	4.56±0.53b	6.55±0.11bc	0.19±0.03b	0.324±0.034bc	0.049±0.004cd	0.010±0.002b
	华玉8号	76.26±5.38a	11.85±0.61a	47.03±5.61ab	3.07±0.20b	12.33±2.16a	0.17±0.02b	0.232±0.014c	0.143±0.021a	0.008±0.001b
	广紫糯6号	34.50±3.07b	7.51±0.95c	52.02±5.19ab	4.07±0.50b	4.89±0.08c	0.15±0.05b	0.142±0.022c	0.037±0.005cd	0.007±0.002b
	仲糯1号	46.70±3.07b	9.47±0.61bc	60.26±2.62a	4.06±1.23b	6.44±0.16bc	0.07±0.01b	0.257±0.079c	0.061±0.003bc	0.004±0.004b

注:不同小写字母表示不同品种玉米间差异显著($n=4$, $P<0.05$)。

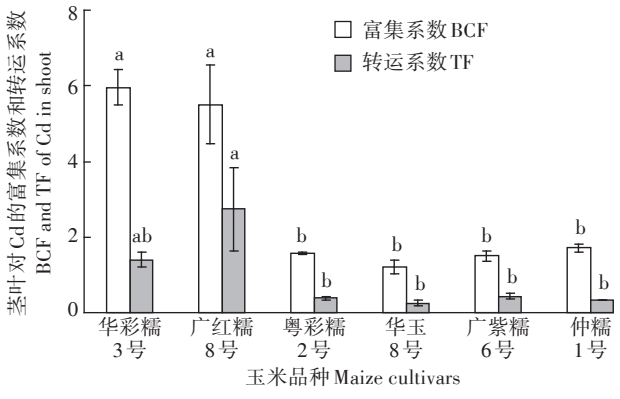
Note: Different lowercase letters indicate the significant differences between different treatments ($n=4$, $P<0.05$).

0.004~0.028 mg·株$^{-1}$；华彩糯3号玉米茎叶Cd积累量显著高于其他5个品种，广紫糯6号玉米茎叶Cd积累量最低；华玉8号玉米根部Cd积累量最高，显著高于其他品种，广红糯8号玉米的根部Cd积累量最低；华彩糯3号和广红糯8号玉米籽粒Cd积累量显著高于其他4个品种玉米，仲糯1号、粤彩糯2号、华玉8号、广紫糯6号玉米籽粒的Cd积累量均在0.01 mg·株$^{-1}$以下，其中最低的是仲糯1号玉米；相比于根部和籽粒，几乎所有品种玉米在茎叶的Cd积累量均为最高。

2.2 不同品种玉米对Cd的富集系数和转运系数

抽丝期不同品种玉米茎叶对Cd的富集系数和转运系数如图1所示。不同品种玉米茎叶的富集系数为1.20~5.96，其中，华彩糯3号和广红糯8号玉米植株对Cd的富集系数分别为5.96和5.50，显著高于其他4个品种（P<0.05）；仲糯1号、粤彩糯2号、华玉8号、广紫糯6号玉米茎叶对Cd的富集系数在1~2之间。不同玉米品种对Cd的转运系数为0.25~2.74，其中，广红糯8号玉米茎叶对Cd的转运系数最大，显著高于仲糯1号、粤彩糯2号、华玉8号、广紫糯6号，华彩糯3号其次，为1.40。抽丝期不同品种玉米根对Cd的富集系数在2.70~5.47之间（图2），其中华玉8号显著高于广红糯8号。

成熟期不同品种玉米茎叶对Cd的富集系数为1.39~7.45（图3）。华彩糯3号和广红糯8号玉米茎叶的富集系数显著高于其他4个品种（P<0.05），均达到6以上；仲糯1号、粤彩糯2号、华玉8号、广紫糯6号玉米茎叶对Cd的富集系数在2左右。不同品种玉米茎叶对Cd的转移系数范围为0.27~3.02，华彩糯3号和广红糯8号玉米茎叶的转移系数显著高于其他4个品种（P<0.05，图3），且广红糯8号显著高于华彩糯3号。成熟期不同品种玉米根对Cd的富集系数为2.14~5.60（图4），华玉8号最高且显著高于其他5个品种（P<0.05），广红糯8号和广紫糯6号最低。



不同小写字母表示不同品种玉米间差异显著（n=4，P<0.05）。下同 Different lowercase letters used to show the significant differences between different treatments（n=4，P<0.05）. The same below

图1 抽丝期不同品种玉米茎叶对Cd的富集系数和转运系数

Figure 1 Stem and leaf BCF and TF of *Zea mays* cultivars in silking stage

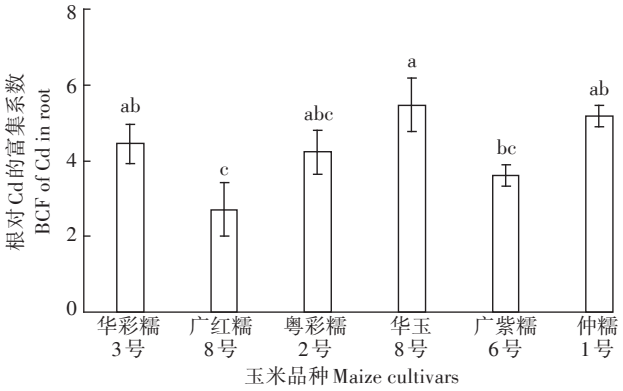


图2 抽丝期不同品种玉米根对Cd的富集系数

Figure 2 Root BCF of *Zea mays* cultivars in silking stage

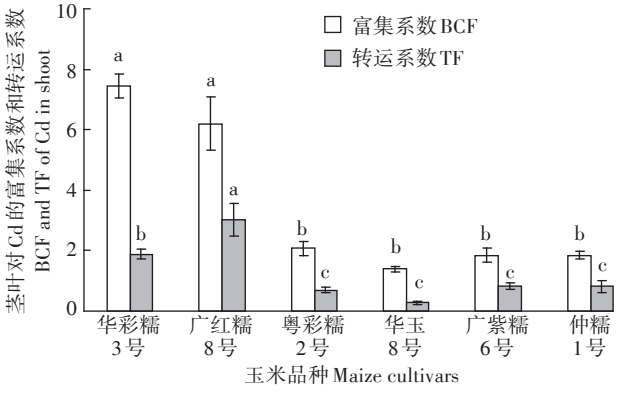


图3 成熟期不同品种玉米茎叶对Cd的富集系数和转运系数

Figure 3 Stem and leaf BCF and TF of *Zea mays* cultivars in maturity stage

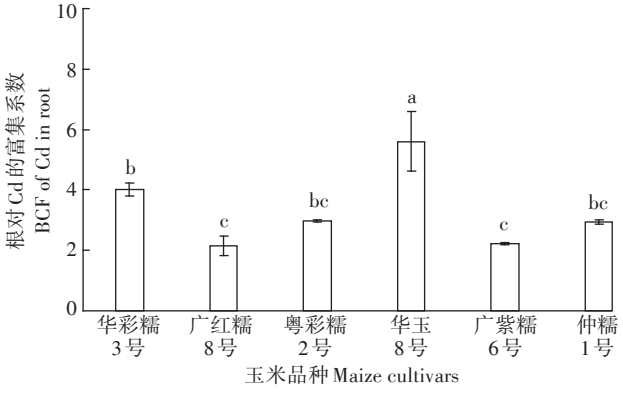


图4 成熟期不同品种玉米根对Cd的富集系数

Figure 4 Root BCF of *Zea mays* cultivars in maturity stage

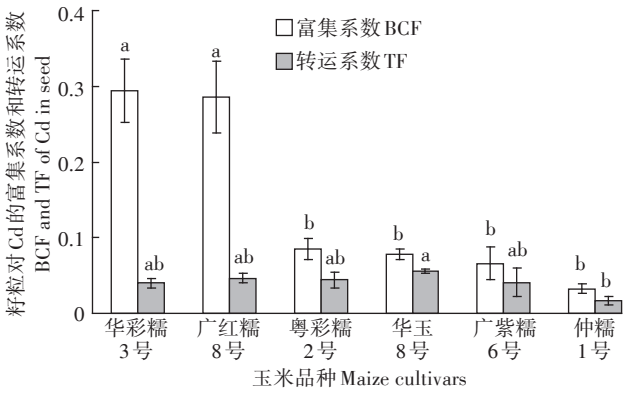


图5 成熟期不同品种玉米籽粒对Cd的富集系数和转运系数

Figure 5 Seeds BCF and TF of *Zea mays* cultivars in maturity stage

如图5所示,华彩糯3号和广红糯8号玉米籽粒的富集系数分别为0.296和0.286,显著高于其他4个品种($P<0.05$)。仲糯1号、粤彩糯2号、华玉8号、广紫糯6号玉米籽粒对Cd的富集系数均在0.1以下。不同品种玉米籽粒对Cd的转移系数范围为0.016~0.056。华玉8号玉米籽粒对Cd的转移系数最高,显著高于仲糯1号($P<0.05$)。

3 讨论

植物提取是目前研究最多、最具前景的重金属污染土壤的修复途径,筛选超富集植物是修复重金属污染土壤的关键[16]。目前被证实的超富集植物因其生物量小、生长慢、根系浅、环境适应性差等问题,导致在实际应用中存在一定的局限性[17-18]。玉米是我国重要的农作物,具有分布广、品种资源丰富、生长快、生物量大的特点。本研究的供试玉米品种均是广东省选育的本地品种,具有良好的区域适应性。

与常规Cd修复植物不同,玉米不仅具有吸收和积累重金属的能力而适于作为生物修复资源加以发掘和利用,同时玉米还是重要的粮食作物,需注意防范食品安全的风险。当玉米籽粒Cd含量超过国家饲料卫生标准(GB 13078—2017,≤0.5 mg·kg^{-1})时,建议将其作为修复植物在抽丝期收获植株并加以回收集中处理,同时可有效缩短种植周期,增加种植次数以加快土壤修复的进度;当玉米籽粒符合国家饲料卫生标准(GB 13078—2017)时,可以考虑在成熟期收获玉米籽粒和植株,玉米籽粒可作饲料,其他部位可作为修复部分并加以回收集中处理,达到"边生产,边修复"的效果[19]。

目前,尚无明确的标准来对Cd高、低富集玉米品种进行区分和界定,尤其是Cd低富集品种。作物对重金属的吸收能力大小主要由作物本身的遗传因素和外界的环境条件决定[20-21]。本研究供试玉米的环境条件一致,因此,玉米对Cd的吸收能力大小由其本身遗传特征决定。通常认为低积累植物对重金属的排斥机制包括两个方面,一是减少根部对重金属的吸收,二是重金属在根部通过区室化保存,限制向地上部转移[22]。Cd低富集玉米品种能降低结合于细胞壁或者液泡的Cd活性,使其移动性变差,上一器官对Cd的这种钝化或者"拦截"能力限制了Cd向下一器官的转移和积累;相比Cd低富集玉米品种,Cd高富集玉米品种这种钝化和拦截的能力较弱。此外,目前玉米品种的选育多是以玉米的产量、品质以及抗性等为指标,建议今后玉米品种选育可增加考虑重金属低积累品种的选育,同时也注意发掘可用于Cd污染修复的玉米品种,对于玉米的安全生产和重金属污染土壤的修复将具有重要的现实意义。

利用不同品种对Cd吸收积累的差异性筛选出符合食品卫生标准的低积累玉米品种,对保证粮食安全至关重要。郭晓芳等[6]通过田间试验,根据玉米籽粒生物量、籽粒重金属含量以及重金属转运系数进行综合评价,发现灵丹20和正丹958可作为广东地区冬季种植的重金属低积累品种。吴传星[11]通过田间试验发现川单428是Cd低累积品种。辛艳卫等[8]通过田间试验筛选出的玉米籽粒Cd低积累品种,其籽粒的Cd平均含量为0.069 mg·kg^{-1}。本研究供试的6个玉米品种中,仲糯1号玉米籽粒Cd含量为0.07 mg·kg^{-1}符合食品安全国家标准(GB 2762—2017,≤0.1 mg·kg^{-1}),是Cd低积累玉米,可在镉污染土壤进行安全生产;粤彩糯2号、华玉8号和广紫糯6号玉米籽粒符合国家饲料卫生标准(GB 13078—2017,≤0.5 mg·kg^{-1}),可以用作饲料;华彩糯3号和广红糯8号玉米籽粒Cd含量超出了国家饲料卫生标准限值(GB 13078—2017),不能用作饲料,要注意其食品安全的风险。此外,本研究玉米籽粒Cd的转运系数远低于杜彩艳等[23]、郭晓芳等[6]和辛艳卫等[8]的研究报道,可能与土壤和玉米茎叶中Cd含量较高有关。

对于植物修复来说,富集系数要比单纯植物地上部重金属含量更为重要[24]。本研究表明,在成熟期,华彩糯3号和广红糯8号玉米茎叶Cd的富集系数(分别为7.45和6.20)和转运系数(分别为1.88和3.02)远高于目前文献的报道:辛艳卫等[8]研究了18个玉米品种在土壤外加全Cd含量为5.0 mg·kg^{-1}条件下对Cd

的富集和转运差异，玉米茎叶的Cd富集系数和转移系数分别为0.068~0.902和0.19~0.83；陈建军等[9]通过田间实验，研究了25个玉米品种在土壤外加全Cd含量为50 mg·kg^{-1}条件下对Cd积累和转运的差异，发现玉米茎叶的Cd富集系数和转移系数分别为0.063~0.899和0.038~0.554；徐稳定[19]研究发现超甜38玉米的Cd富集系数和转移系数分别为3.84~4.98和0.12~0.16；袁林等[25]研究发现供试的9种玉米的Cd富集系数和转移系数分别为1.16~1.76和0.268~0.902；Yang等[26]发现不同品种玉米地上部Cd富集和转运系数的范围分别为0.12~1.04和0.04~0.45；Retamal-Salgado等[27]调查发现智利不同品种玉米的Cd富集系数和转运系数分别为0.20~1.20和0.57~11.82。综上，本研究中的华彩糯3号和广红糯8号具有较高的Cd富集和转运能力。除此之外，筛选用于土壤重金属修复的植物，单株生物量是应重点考虑的内容之一[28]。本研究中的华彩糯3号成熟期玉米茎叶干质量为67.03 g·株$^{-1}$，其玉米茎叶Cd的单株积累量为1.103 mg，按玉米种植密度60 000 株·hm^{-2}计算，一季可以去除约66 g·hm^{-2}的Cd，一年可以种植2~3季，一共可以去除Cd约132~198 g·hm^{-2}。龙新宪等[29]研究发现当土壤Cd含量为400 mg·kg^{-1}时，矿山生态型东南景天对Cd的富集量为1.74 g·株$^{-1}$，但当土壤Cd含量为12.5 mg·kg^{-1}时，富集量仅为0.32 mg·株$^{-1}$；李凝玉等[30]发现当土壤Cd含量为16 mg·kg^{-1}时，籽粒苋的Cd含量在100 mg·kg^{-1}以上，但其生物量仅为0.40~0.50 g·株$^{-1}$，因此，Cd富集量为0.04~0.050 mg·株$^{-1}$，均低于华彩糯3号和广红糯8号。相比之下，华彩糯3号和广红糯8号玉米具有一定的Cd污染土壤修复潜力。

4 结论

华彩糯3号和广红糯8号可作为Cd高积累玉米品种，但其籽粒Cd含量超出国家食品卫生标准和饲料卫生标准，不可用作粮食或饲料。仲糯1号可作为Cd低积累玉米品种，可用作粮食或饲料。

参考文献：

[1] 宋 伟, 陈百明, 刘 琳. 中国耕地土壤重金属污染概况[J]. 水土保持研究, 2013, 20(2): 293-298.
SONG Wei, CHEN Bai-ming, LIU Lin. Soil heavy metal pollution of cultivated land in China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(2): 293-298.

[2] Waalkes M P. Cadmium carcinogenesis in review[J]. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 2000, 79(1/2/3/4): 241-244.

[3] Wang M, Zou J, Duan X, et al. Cadmium accumulation and its effects on metal uptake in maize (*Zea mays* L.)[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(1): 82-88.

[4] Keller C, Hammer D, Kayser A, et al. Root development and heavy metal phytoextraction efficiency: Comparison of different plant species in the field[J]. *Plant and Soil*, 2003, 249: 67-81.

[5] Fässler E, Robinson B H, Gupta S K, et al. Uptake and allocation of plant nutrients and Cd in maize, sunflower and tobacco growing on contaminated soil and the effect of soil conditioners under field conditions [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2010, 87(3): 339-352.

[6] 郭晓芳, 卫泽斌, 丘锦荣, 等. 玉米对重金属累积与转运的品种间差异[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(4): 367-371.
GUO Xiao-fang, WEI Ze-bin, QIU Jin-rong, et al. Differences between corn cultivars in accumulation and translocation of heavy metals [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(4): 367-371.

[7] 伍 钧, 吴传星, 孟晓霞, 等. 重金属低积累玉米品种的稳定性和环境适应性分析[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11): 2160-2167.
WU Jun, WU Chuan-xing, MENG Xiao-xia, et al. The analysis of stability and adaptability on low accumulation of heavy metals in various cultivars of *Zea Mays*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11): 2160-2167.

[8] 辛艳卫, 梁成华, 杜立宇, 等. 不同玉米品种对镉的富集和转运特性[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(5): 839-846.
XIN Yan-wei, LIANG Cheng-hua, DU Li-yu, et al. Accumulation and translocation of cadmium in different maize cultivars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(5): 839-846.

[9] 陈建军, 于 蔚, 祖艳群, 等. 玉米(*Zea mays*)对镉积累与转运的品种差异研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(10): 1671-1676.
CHEN Jian-jun, YU Wei, ZU Yan-qun, et al. Variety difference of Cd accumulation and translocation in *Zea Mays*[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(10): 1671-1676.

[10] 李 静, 依艳丽, 李亮亮, 等. 几种重金属(Cd、Pb、Cu、Zn)在玉米植株不同器官中的分布特征[J]. 中国农学通报, 2006, 22(4): 244-247.
LI Jing, YI Yan-li, LI Liang-liang, et al. Distribution of heavy metal (Cd, Pb, Cu, Zn) in different organs of maize[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(4): 244-247.

[11] 吴传星. 不同玉米品种对重金属吸收累积特性研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2010.
WU Chuan-xing. Study on characteristics of heavy metal absorption and accumulation in the different maize varieties[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2010.

[12] 邓 婷. 镉污染土壤修复玉米品种筛选及强化修复技术研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
DENG Ting. Selection of maize varieties for phytoremediation of cadmium contaminated soil and its enhanced technology[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016.

[13] 赵 宇. 不同品种玉米对土壤镉吸收和累积的研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2015.
ZHAO Yu. Study on characteristics of cadmium absorption and accumulation in the different maize varieties[D]. Guangzhou: South China

Agricultural University, 2015.

[14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 三版. 北京:中国农业出版社, 2000:495.
BAO Shi-dan. Soil agriculture chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing:China Agriculture Press, 2000:495.

[15] 周启星, 宋玉芳. 污染土壤修复原理与方法[M]. 北京:科学出版社, 2004.
ZHOU Qi-xing, SONG Yu-fang. The principle and method of remediation of contaminated soil[M]. Beijing:China Agriculture Press, 2004.

[16] 仲 灿, 葛晓敏, 倪 云, 等. 植物对土壤Cd、Pb污染的修复与抗性机理研究进展[J]. 世界林业研究, 2017, 30(1):37-43.
ZHONG Can, GE Xiao-min, NI Yun, et al. Research progress of phytoremediation technology and resistance mechanism of plant in soil polluted by Cd or Pb[J]. *World Forestry Research*, 2017, 30(1):37-43.

[17] Laureysens I, Blust R, Temmerman L D, et al. Clonal variation in heavy metal accumulation and biomass production in a poplar coppice culture: Ⅰ. seasonal variation in leaf, wood and bark concentrations [J]. *Environmental Pollution*, 2004, 131(3):485-494.

[18] 韦朝阳, 陈同斌. 重金属污染植物修复技术的研究与应用现状[J]. 地球科学进展, 2002, 17(6):833-839.
WEI Chao-yang, CHEN Tong-bin. An preview on the status of research and application of heavy metal phytoremediation[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2002, 17(6):833-839.

[19] 徐稳定. 超甜38玉米对镉的耐受机理及强化富集研究[D]. 广州:华南理工大学, 2014.
XU Wen-ding. The mechanism of Cd tolerance and the enhancement of Cd phytoremediation in maize (*Zea mays* L.) CT 38[D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2014.

[20] Gareth J H, Guilan D, Tapash D, et al. Environmental and genetic control of common cultivars grown in contaminated sites across Bangladesh, China and India[J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, 43(21):8381-8386.

[21] 段桂兰, 张红梅, 刘云霞, 等. 水稻基因类型与生长环境对精米中砷积累的影响[J]. 生态毒理学报, 2013, 8(2):156-162.
DUAN Gui-lan, ZHANG Hong-mei, LIU Yun-xia, et al. Impact of rice genotype and growing environment on arsenic accumulation in rice polished grains[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2013, 8(2):156-162.

[22] Baker A J M. Accumulators and excluders-strategies in the response of plants to heavy metals[J]. *Journal of Plant Nutrient*, 1981, 3(4):643-654.

[23] 杜彩艳, 张乃明, 雷宝坤, 等. 不同玉米(*Zea mays*)品种对镉锌积累与转运的差异研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(1):16-23.
DU Cai-yan, ZHANG Nai-ming, LEI Bao-kun, et al. Differences of cadmium and zinc accumulation and translocation in different varieties of *Zea mays*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(1):16-23.

[24] Zhao F J, Lombi E, McGrath S P. Assessing the potential for zinc and cadmium phytoremediation with the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*[J]. *Plant and Soil*, 2003, 249(1):37-43.

[25] 袁 林, 刘 颖, 兰玉书, 等. 不同玉米品种对镉吸收累积特性研究[J]. 四川农业大学学报, 2018, 36(1):22-27.
YUAN Lin, LIU Ying, LAN Yu-shu, et al. Variations of cadmium absorption and accumulation among corn cultivars of metal pollution in soil from lead-zinc mining area[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2018, 36(1):22-27.

[26] Yang Y M, Nan Z R, Zhao Z J. Bioaccumulation and translocation of cadmium in wheat (*Triticum aestivum* L.) and maize (*Zea mays* L.) from the polluted oasis soil of northwestern China[J]. *Chemical Speciation & Bioavailability*, 2014, 26(1):43-51.

[27] Retamal-Salgado J, Hirzel J, Walter I, et al. Bioabsorption and bioaccumulation of cadmium in the straw and grain of maize (*Zea mays* L.) in growing soils contaminated with cadmium in different environment [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, 14(11):1399.

[28] 王民炎, 王爱云, 贺喜全, 等. 玉米品种Cd富集差异研究[J]. 科学通报, 2016, 5(4):248-254.
WANG Min-yan, WANG Ai-yun, HE Xi-quan, et al. Differences of Cd accumulation in maize hybrids[J]. *Soil and Corps*, 2016, 5(4):248-254.

[29] 龙新宪, 王艳红, 刘洪彦. 不同生态型东南景天对土壤中Cd的生长反应及吸收积累的差异性[J]. 植物生态学报, 2008, 32(1):168-175.
LONG Xin-xian, WANG Yan-hong, LIU Hong-yan. Growth response and uptake differences between two ecotypes of *Sedum alfredii* to soil Cd[J]. *Soil and Corps*, 2008, 32(1):168-175.

[30] 李凝玉, 卢焕萍, 李志安, 等. 籽粒苋对土壤中镉的耐性和积累特征[J]. 应用与环境生物学报, 2010, 16(1):28-32.
LI Ning-yu, LU Huan-ping, LI Zhi-an, et al. Tolerance and accumulation of cadmium in soil by *Amaranthus hypochondriacus* L.[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2010, 16(1):28-32.