

邓婷, 卢维盛, 吴家龙, 等. 不同玉米品种对土壤镉富集和转运的差异研究 [J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(4): 33-39.
DENG Ting, LU Weisheng, WU Jialong, et al. Differences of soil cadmium accumulation and translocation in different maize varieties[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(4): 33-39.

不同玉米品种对土壤镉富集和转运的差异研究

邓 婷^{1,2}, 卢维盛¹, 吴家龙¹, 赵 宇¹, 赵 杨¹, 姚元梦¹, 李贵杰¹

(1 华南农业大学 资源环境学院, 广东 广州 510642; 2 广东精地规划科技有限公司, 广东 广州 510630)

摘要:【目的】通过盆栽试验研究 11 个玉米 *Zea mays* 品种的 Cd 富集和转运能力, 并进行筛选, 旨在为探究和发掘 Cd 高累积玉米品种提供一定的理论参考。【方法】以 11 个玉米品种为研究对象, 在全 Cd 质量分数为 2.5 mg·kg⁻¹ 的土壤中培养 50 d, 测定玉米干质量、Cd 含量, 采用方差分析和主成分分析法研究不同品种玉米在 Cd 污染土壤中的干质量、Cd 富集和转运能力的差异。【结果】11 个品种玉米的根、茎叶的干质量、Cd 质量分数、富集系数和转运系数间均差异显著 ($P<0.05$)。华彩糯 3 号和广红糯 8 号玉米茎叶 Cd 质量分数分别为 26.66 和 20.25 mg·kg⁻¹、富集系数分别为 10.66 和 8.10、转运系数分别为 1.46 和 2.16, 均显著高于其他品种 ($P<0.05$); 主成分分析结果显示, 华彩糯 3 号和广红糯 8 号玉米对 Cd 的富集和转运能力强于其他品种 ($P<0.01$)。【结论】华彩糯 3 号和广红糯 8 号玉米对 Cd 的富集和转运能力较强, 属于 Cd 高累积玉米品种, 在 Cd 污染土壤修复中具有较大的应用潜力。

关键词: 玉米; 土壤; 镉富集; 转运; 品种筛选
中图分类号: S153.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2019)04-0033-07

Differences of soil cadmium accumulation and translocation in different maize varieties

DENG Ting^{1,2}, LU Weisheng¹, WU Jialong¹, ZHAO Yu¹, ZHAO Yang¹, YAO Yuanmeng¹, LI Guijie¹
(1 College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;
2 Guangdong Jingdi Planning Technology Co., Ltd., Guangzhou 510630, China)

Abstract: 【Objective】A pot experiment was conducted to study Cd accumulation and translocation capacities of 11 maize (*Zea Mays*) varieties and to screen these varieties, so as to provide a theoretical basis for discovering maize varieties with high Cd accumulation. 【Method】Eleven maize varieties were cultured in soil with 2.5 mg·kg⁻¹ Cd for 50 d. The dry biomass and Cd content were measured. We used variance analysis and principal component analysis to study the differences in dry biomass, Cd accumulation and translocation capacities of 11 maize varieties. 【Result】There were significant differences in the dry biomass of root and shoot, Cd content, Cd accumulation coefficient and translocation coefficient among 11 maize varieties ($P<0.05$). The Cd contents of Huacainuo 3 and Guanghongnuo 8 shoots were 26.66 and 20.25 mg·kg⁻¹ respectively, accumulation coefficients were 10.66 and 8.10 respectively, and translocation coefficients were 1.46 and 2.16 respectively, which were significantly higher than those of other varieties ($P<0.05$). Principal component analysis showed that the Cd accumulation and translocation capacities of Huacainuo 3 and Guanghongnuo 8 were stronger compared with other varieties ($P<0.01$). 【Conclusion】Huacainuo 3 and Guanghongnuo 8 have

relatively high capacity in Cd accumulation and translocation, and belong to the varieties with high Cd accumulation. They have great potential to remediate to Cd contaminated soil.

Key words: maize; soil; cadmium accumulation; translocation; variety screening

2014 年 4 月 17 日环境保护部联合国国土资源部公布的《全国土壤污染状况调查公报》指出,我国耕地土壤重金属点位超标率为 19.4%,其中, Cd 超标率为 7.0%^[1]。Cd 在土壤中的移动性强、毒性强,极易被植物吸收和积累^[2]。在土壤重金属污染修复中,传统的物理和化学修复方法存在成本高、易引起二次污染和破坏土壤结构等问题,因此植物修复技术因其成本低和修复具有彻底性等优点而备受关注^[3-5]。目前公认的 Cd 超富集植物有遏蓝菜 *Thlaspi caerulescens*^[6]、印度芥菜 *Brassica juncea*^[7]、东南景天 *Sedum alfredii*^[8]、宝山堇菜 *Viola baoshanensis*^[9]、龙葵 *Solanum nigrum*^[10] 等,但上述植物受生物量小或地域性强的限制,均难以推广应用^[3-5]。

玉米作为我国最重要的粮食作物之一被广泛种植,品种资源丰富,具有生物量大、生长周期短、易种植、易管理等优点^[11]。玉米对 Cd 有一定的富集能力,在重金属 Cd 污染土壤修复上具有很大的潜力^[12],因此, Cd 高累积玉米品种可作为植物修复资源加以利用^[13]。已有研究结果表明,不同玉米品种对 Cd 的吸收和富集能力具有显著的差异^[12, 14],因此很有必要根据玉米对 Cd 的吸收能力筛选出高积累品种。关于华南地区不同玉米品种对 Cd 的吸收和富集能力差异的报道较少。本研究以华南地区广泛种植的 11 个玉米品种为试验材料,通过盆栽试验分析和比较 11 个玉米品种的 Cd 富集和转运能力,筛选出高积累品种,旨在为华南地区土壤 Cd 污染的植物(玉米)修复技术研究提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

2015 年 3 月供试土壤取自广东省韶关市马坝镇(113°35'13"E, 24°38'33"N)Cd 污染水稻土耕作层(0~20 cm),土壤经风干、磨碎、过 5 mm 孔径筛,充分混匀后每盆装土 4 kg(圆柱形盆钵的上部和底部直径及高分别为:22、15 和 19 cm,底部有孔,盆钵下方垫有底盘),用于盆栽试验。土壤 pH 5.44,土壤有机质、碱解 N、速效 P、速效 K 和全量 Cd 质量分数分别为 31.41、95.60、80.69、186.9 和 2.50 mg·kg⁻¹。

供试的 11 个玉米品种均由华南农业大学农学院提供,包括:华彩糯 3 号、桂单 0810、金圣玉 1 号、佳美 1 号、广彩甜糯 7 号、仲糯 1 号、粤彩糯 2 号、广红糯 8 号、广紫糯 6 号、广白糯 5 号和广甜 10 号。

1.2 试验方法

盆栽试验在华南农业大学日光温室内进行。以 11 个玉米品种为试验材料,每个品种设置 3 个重复,随机区组排列。移栽前 1 周每盆施用尿素 1.3 g、磷酸二氢钾 0.6 g 和氯化钾 0.8 g,并和土壤充分混匀,每盆加入等量去离子水,平衡 1 周。2015 年 4 月 10 日将玉米种子催芽后播种,使种子入土 2~3 cm,保持深浅一致,每盆种 2 粒。在玉米整个生长期间浇灌去离子水,使土壤含水量保持在田间持水量的 60%~70%,为防止污染物淋溶物渗漏损失,在盆下放置塑料托盘,并将渗漏液倒回盆中。2015 年 5 月 30 日收获,采集玉米植株。

1.3 样品采集与指标测定

收获时,从茎基部截取茎叶,称其鲜质量,然后小心取出根系,用自来水洗净根系泥土,吸干根上多余水分后称质量。最后将茎叶和根分别依次用自来水、蒸馏水、高纯水洗净,室内自然晾干,置于烘箱中 105 °C 杀青 30 min, 75 °C 烘干至恒质量,称质量后用植物粉碎机磨碎,过 0.25 mm 尼龙筛备用。

土壤样品测定:土壤 pH 用无 CO₂ 蒸馏水按土水质量比 1.0:2.5 测定;土壤有机质用外加热重铬酸钾容量法测定;土壤碱解 N 采用碱解扩散法测定;土壤速效 P 采用 0.5 mol·L⁻¹ 的 NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法测定;土壤速效钾用 NH₄OAc 浸提-火焰光度法测定;土壤全量 Cd 的测定采用 HCl-HNO₃-HF-HClO₄ 消解-原子吸收分光光度法(HITACHI-Z2300)测定^[15]。土壤 Cd 测定过程采用国家标准参比物质(GBW07405)进行质量控制,标准样品测定结果均在允许范围内。

植株样品的总 Cd 测定:参考 GB/T5009.15—2003^[16],采用 HNO₃-HClO₄(体积比 4:1)消化。操作步骤:称取磨碎的样品约 2.00 g 至 150 mL 三角瓶中,分别加入浓 HNO₃ 30 mL,浓 HCl 和浓 HClO₄ 各 5 mL,在三角瓶口盖上弯颈小漏斗,于 100 °C 砂浴小心加热至植物样品完全分解,提高温度至 200 °C,

加热至近干, 然后用 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 HCl 溶液 5 mL 溶解, 定容到 20 mL 容量瓶中, 得待测液, 同时做空白试验。待测液中的 Cd 用原子吸收分光光度法 (HITACHI-Z2300) 测定。植物测定过程采用国家标准参比物质 (GBW10015) 进行质量控制, 标准样品测定结果均在允许范围内。

1.4 富集量、转运系数和富集系数

各指标计算如下:
玉米各器官每盆 Cd 富集量=各器官每盆干质量×各器官 Cd 含量;
玉米对 Cd 的转运系数 (TF)=茎叶 Cd 含量/根 Cd 含量;
玉米对 Cd 的富集系数 (BCF)=玉米茎叶 Cd 含量/土壤中 Cd 含量^[14];

1.5 数据处理与分析

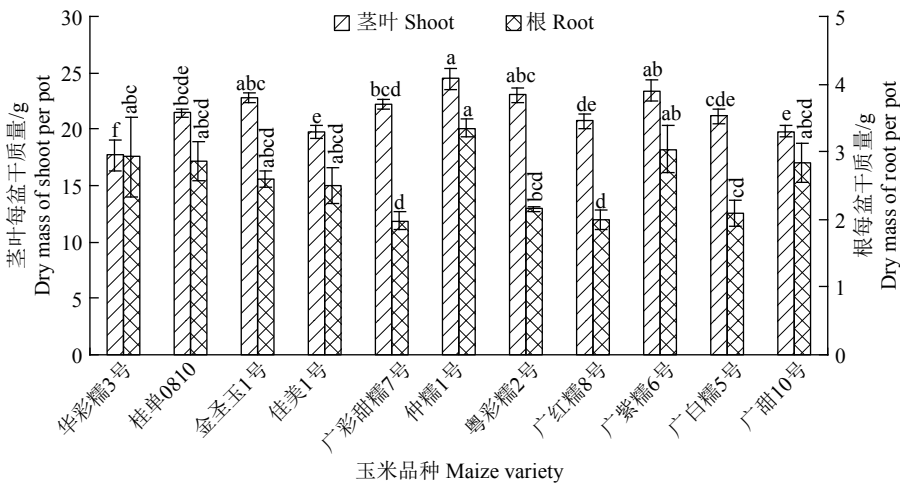
用 Excel 2003 进行数据整理, 运用 SPSS 23.0

统计软件进行方差分析, 采用 Duncan's 新复极差法进行差异显著性检验 ($P<0.05$)。通过在 R 中导入 ADE-4 软件包^[17] 对不同玉米品种的 Cd 富集和转运特征进行主成分分析 (Principal component analysis, PCA)。

2 结果与分析

2.1 不同品种玉米茎叶和根的干质量

从图 1 可知, 不同品种玉米茎叶的每盆干质量范围为 $17.73\sim24.48\text{ g}$ 。仲糯 1 号玉米茎叶的每盆干质量最大 (24.48 g), 其次是广紫糯 6 号玉米, 华彩糯 3 号玉米茎叶的每盆干质量最小。玉米根的每盆干质量范围为 $1.97\sim3.35\text{ g}$, 根的每盆干质量较大的是仲糯 1 号和广紫糯 6 号玉米, 分别为 3.35 和 3.03 g , 根的每盆干质量最小的是广彩甜糯 7 号和广红糯 8 号玉米, 分别为 1.97 和 1.99 g 。



相同柱子上方的不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 法)
Different lowercase letters on bars of the same color indicate significant difference ($P<0.05$, Duncan's test)

图 1 不同品种玉米茎叶和根的每盆干质量

Fig. 1 Dry mass of shoot and root per pot of different maize varieties

2.2 不同品种玉米茎叶和根的 Cd 含量

由图 2 可知, 华彩糯 3 号和广红糯 8 号玉米茎叶 Cd 含量大于根, 而其他玉米茎叶 Cd 含量均小于根。各品种玉米茎叶的 Cd 质量分数范围为 $1.91\sim26.66\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。华彩糯 3 号和广红糯 8 号玉米茎叶的 Cd 质量分数较大, 分别达 26.66 和 $20.25\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其次是广白糯 5 号, 其茎叶 Cd 质量分数为 $12.79\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 也显著地高于其他品种玉米, 最低的为广紫糯 6 号, 最高与最低 Cd 含量相差近 14 倍。玉米根的 Cd 质量分数范围为 $10.66\sim23.63\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 根 Cd 含量最高的为佳美 1 号和华彩糯 3 号玉米, 质量分数分别达 23.63 和 $20.11\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 且佳美 1 号玉米

Cd 含量显著高于华彩糯 3 号以外的其他品种玉米 ($P<0.05$), 其他品种之间没有显著性差异。

2.3 不同品种玉米的 Cd 富集量

从图 3 可以看出, 不同品种玉米茎叶的 Cd 每盆富集量范围为 $0.045\sim0.467\text{ mg}$, 最高与最低相差 10 倍以上, 其中华彩糯 3 号和广红糯 8 号玉米茎叶 Cd 每盆富集量最大, 分别达 0.467 和 0.420 mg , 显著大于其余品种 ($P<0.05$)。其次是广白糯 5 号玉米, 茎叶 Cd 每盆富集量为 0.270 mg , 广紫糯 6 号玉米茎叶 Cd 每盆富集量最小, 为 0.045 mg 。不同品种玉米根的 Cd 每盆富集量范围为 $0.023\sim0.061\text{ mg}$ 。佳美 1 号和华彩糯 3 号玉米根 Cd 每盆富集量最大,

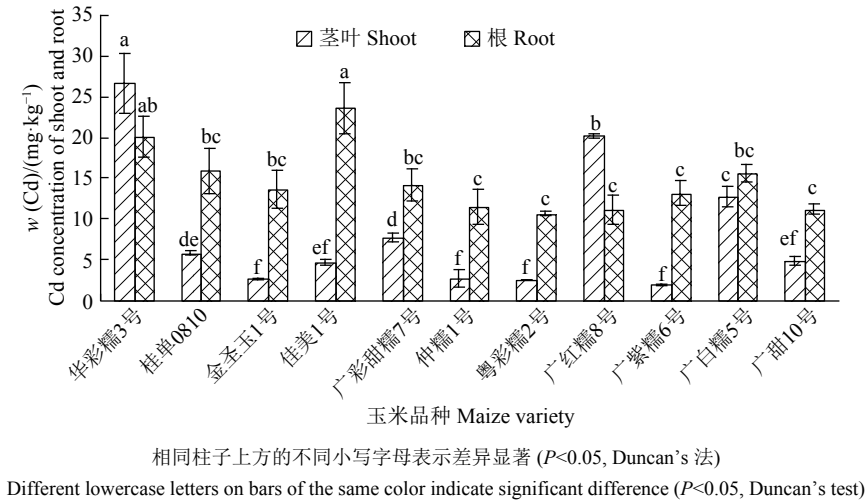


图 2 不同品种玉米茎叶和根的 Cd 含量
Fig. 2 Cd contents in shoot and root of different maize varieties

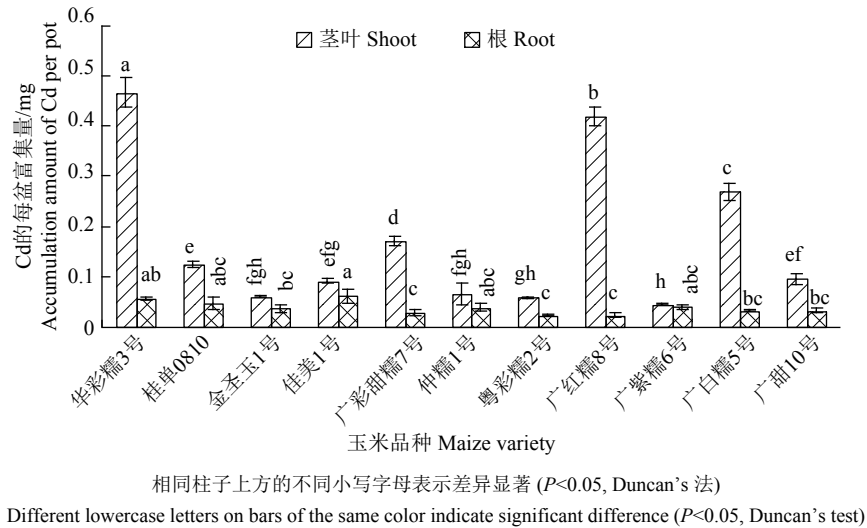


图 3 不同品种玉米茎叶和根的 Cd 富集量
Fig. 3 Cd accumulations in shoot and root of different maize varieties

分别为 0.061 和 0.056 mg, 其他品种玉米均在 0.04 mg 以下, 相互间差异不显著。所有品种玉米均是茎叶 Cd 富集量大于根富集量, 说明玉米吸收土壤中 Cd 主要积累在茎叶中。

不同品种玉米 Cd 的每盆总富集量范围为 0.081~0.523 mg(图 4)。华彩糯 3 号和广红糯 8 号玉米 Cd 每盆总富集量较大, 分别达 0.523 和 0.442 mg, 显著高于其他玉米品种 ($P<0.05$), 广白糯 5 号 Cd 每盆总富集量也较大, 为 0.302 mg, 也显著高于其余玉米品种 ($P<0.05$), 而金圣玉 1 号、粤彩糯 2 号和广紫糯 6 号玉米 Cd 每盆总富集量均小于 0.1 mg。

2.4 不同品种玉米茎叶的 Cd 富集系数和转运系数

由图 5 可知, 不同品种玉米茎叶的 Cd 富集系数为 0.763~10.663, 其中华彩糯 3 号和广红糯 8 号

富集系数较大, 分别为 10.663 和 8.101, 说明这 2 个品种玉米对土壤中 Cd 有很强的富集能力; 其次是广白糯 5 号, 富集系数达到 5 以上, 对土壤中 Cd 也有较强的吸收能力。广紫糯 6 号的富集系数最小, 为 0.763, 说明它对土壤中 Cd 的吸收能力较弱, 其余品种玉米富集系数在 1 左右, 对土壤中 Cd 的吸收能力也相对较弱。

从图 5 还可以看出, 不同品种玉米茎叶的 Cd 转运系数为 0.205~2.164, 其中广红糯 8 号和华彩糯 3 号玉米植株对 Cd 的转运系数较大, 分别为 2.164 和 1.458, 显著高于其他玉米品种 ($P<0.05$), 说明这 2 个品种玉米对 Cd 的转运能力较强; 其他品种玉米的转运系数在 1 以下, 对 Cd 的转运能力相对较弱。

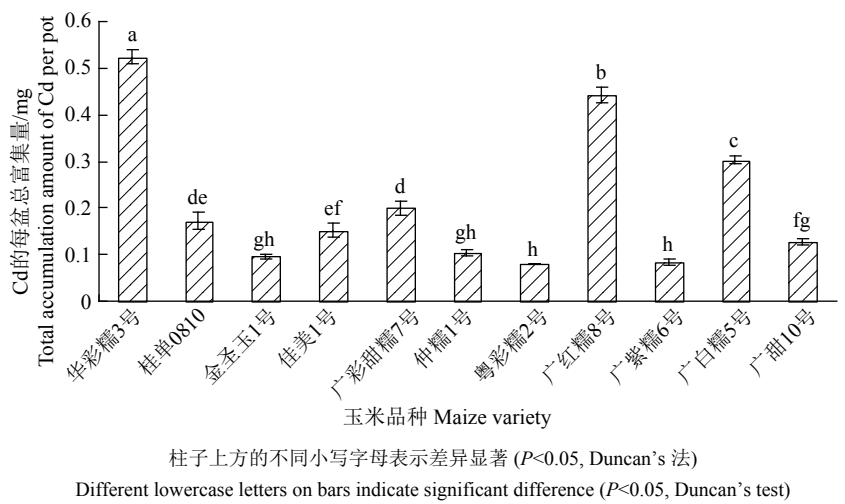


图 4 不同品种玉米的 Cd 总富集量

Fig. 4 Total Cd accumulations of different maize varieties

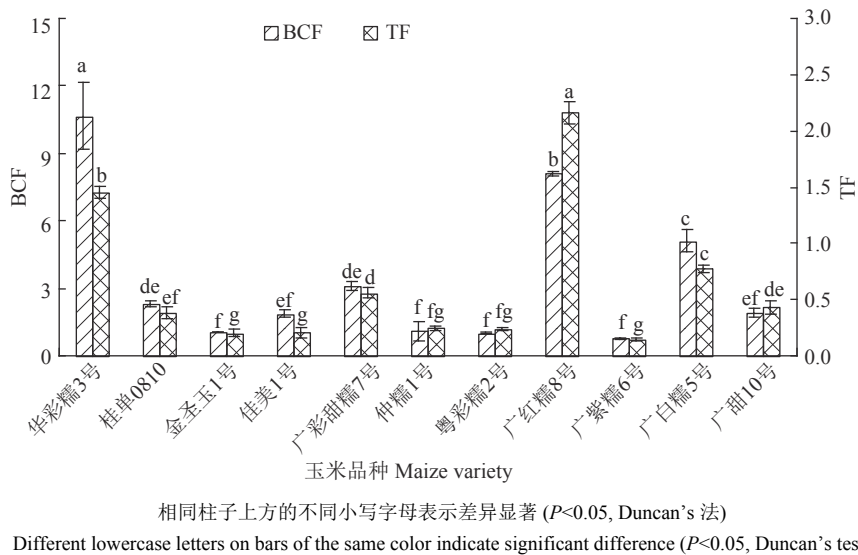


图 5 不同品种玉米 Cd 富集系数 (BCF) 和转运系数 (TF)

Fig. 5 Accumulation coefficients (BCF) and translocation coefficients (TF) of different maize varieties

2.5 不同品种玉米干质量和 Cd 富集特征的主成分分析

不同品种玉米干质量和 Cd 富集特征的主成分分析结果如图 6A 所示,第 1 主成分 (PC1) 累计方差贡献率为 70.48%,第 2 主成分 (PC2) 累计方差贡献率为 14.15%,第 1、2 主成分累计方差贡献率达到 84.63%,可以反映不同品种玉米生长和 Cd 富集特性的大部分信息,受第 1、2 主成分的综合影响,不同处理样点空间分布差异极显著 ($P<0.01$, 图 6B)。PC1 和 PC2 的空间载荷图表明:PC1 主要与茎叶每盆干质量、茎叶 Cd 富集量、根 Cd 富集量、茎叶 Cd 含量、Cd 总富集量、BCF 和 TF 密切相关 (图 5A),受 PC1 参数的影响,华彩糯 3 号、广红糯 8 号和广白糯 5 号的处理样点和其他处理样点的空间分布

差异极显著 ($P<0.01$),华彩糯 3 号、广红糯 8 号和广白糯 5 号的处理样点显著向茎叶 Cd 富集量、根 Cd 富集量、茎叶 Cd 含量、Cd 总富集量、BCF 和 TF 升高的方向偏移,而桂单 0801、金圣玉 1 号、佳美 1 号、广彩甜糯 7 号、仲糯 1 号、粤彩糯 2 号、广紫糯 6 号、广甜 10 号的处理样点则显著偏向茎叶干质量增加的方向 (图 6B)。这表明与桂单 0801、金圣玉 1 号、佳美 1 号、广彩甜糯 7 号、仲糯 1 号、粤彩糯 2 号、广紫糯 6 号、广甜 10 号玉米相比,华彩糯 3 号、广红糯 8 号和广白糯 5 号玉米具有更高的 Cd 富集和转运能力。PC2 主要与根干质量密切相关 (图 6A),受 PC2 参数的影响,华彩糯 3 号、桂单 0801、仲糯 1 号和广紫糯 6 号处理样点显著向更高的根干质量的方向偏移 (图 6B)。

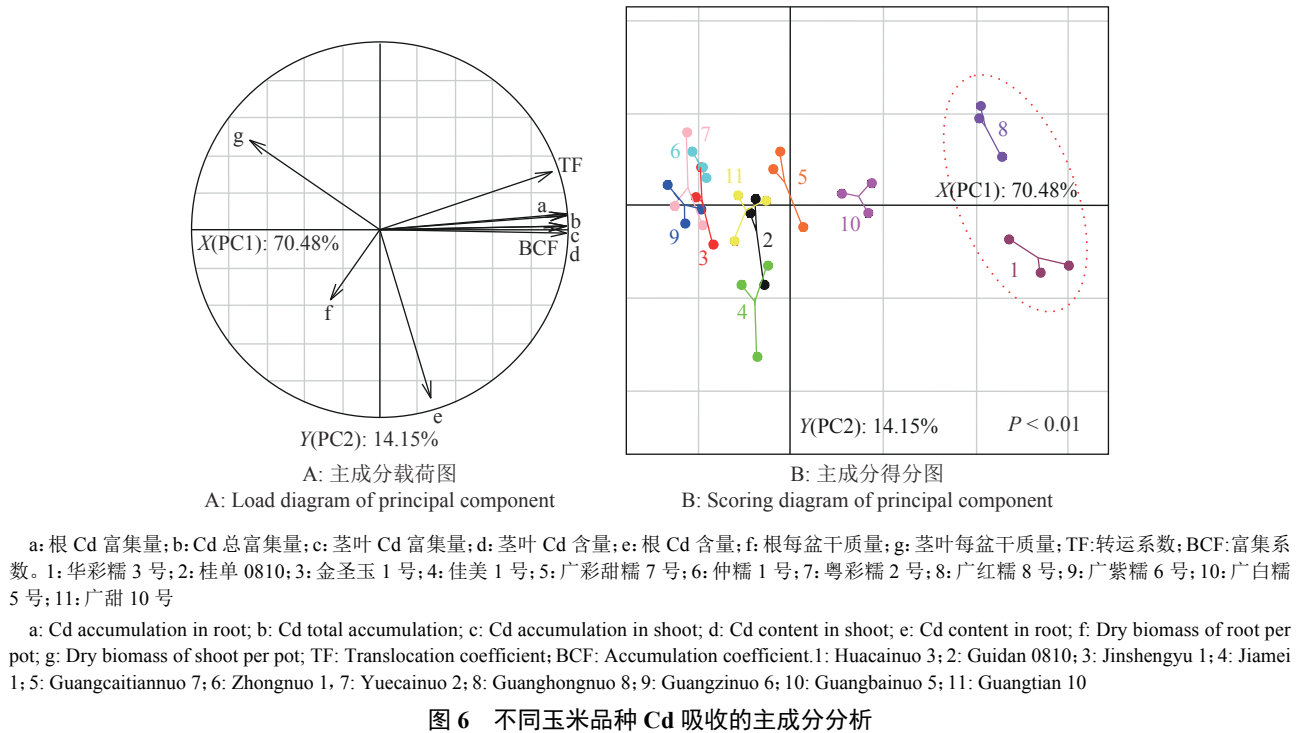


图 6 不同玉米品种 Cd 吸收的主成分分析

Fig. 6 Principal component analysis of Cd absorption of different maize varieties

3 讨论与结论

目前,国内外学者研究发现了一些重金属超积累植物^[6-10, 18],但大部分超积累植物由于自身的特点,生长缓慢、生物量较小、适应环境能力差等,再加上具有一定的地域分布特性,应用在污染农田土壤修复方面具有一定的局限性^[3-5]。玉米是须根系植物,根系发达,而且生长周期短、生物量大、易栽培管理^[11, 19],因此高、低 Cd 累积玉米品种的筛选受到了广泛的关注,其中 Cd 低累积品种可作为保障粮食安全的玉米品种进行推广种植,而 Cd 高积累的玉米品种可作为植物修复资源加以利用,为土壤 Cd 污染的修复提供技术支撑。

有研究发现,植物吸收和累积重金属不仅存在种间差异还存在种内差异^[20],不同玉米品种对 Cd 的吸收和富集能力也具有显著差异^[12, 14, 21]。本研究的 11 个供试玉米品种的 Cd 富集系数范围为 0.763~10.663,且不同品种玉米茎叶和根的 Cd 积累存在显著差异,这可能与这 11 个玉米品种的遗传背景差异较大、基因型不同有关。

有研究发现, Cd 在玉米植株中的分布规律大都为根的 Cd 含量大于茎叶^[22],本研究中,华彩糯 3 号和广红糯 8 号玉米茎叶 Cd 含量大于根,而其他玉米茎叶 Cd 含量均小于根,而文秋红等^[23]也发现 6 个玉米自交系的茎叶 Cd 含量大于根。这一现象的原因可能是 Cd 高累积玉米从根部向茎叶运输

Cd 的能力较强,最终导致玉米茎叶 Cd 含量大于根,相关机理有待进一步探究。

陈建军等^[12]通过 25 个玉米品种在土壤外加全 Cd 含量为 50 mg·kg⁻¹ 条件下盆栽试验,结果发现玉米茎叶 Cd 的富集系数为 0.063~0.899,转运系数为 0.038~0.554。辛艳卫等^[14]通过盆栽试验研究发现,18 个玉米品种在土壤外加全 Cd 质量分数为 5.0 mg·kg⁻¹ 条件下,茎叶 Cd 的富集系数为 0.093~0.902,转运系数为 0.19~0.83。文秋红等^[23]研究表明,在土壤 Cd 质量分数为 5.986 mg·kg⁻¹ 时,玉米地上部 Cd 质量分数最高为 21.716 mg·kg⁻¹,最大富集系数为 3.63,最大转运系数为 3.609。徐稳定^[24]研究发现,土壤 Cd 质量分数为 1~5 mg·kg⁻¹ 时,盆栽 30 d 的超甜 38 玉米茎叶镉富集系数最高为 8.1,但转运系数小于 1。Máthé-Gáspár 等^[25]发现玉米对 Cd 的转运系数为 3.33。本试验结果表明,华彩糯 3 号和广红糯 8 号玉米茎叶 Cd 质量分数分别为 26.66 和 20.25 mg·kg⁻¹,根 Cd 质量分数分别为 20.11 和 11.14 mg·kg⁻¹,富集系数为 10.663 和 8.101,远远高于文献^[12, 14, 21, 24]的研究结果。此外,本研究中的华彩糯 3 号和广红糯 8 号玉米的单株 Cd 总富集量分别为 0.26 和 0.22 mg,这与袁林等^[26]报道的正红 6 号 (0.26 mg)、雅玉 12 号和川单 13 号 (0.21 mg) 单株 Cd 总富集量相当,但袁林等^[26]的供试土壤的全 Cd 质量分数为 10.47 mg·kg⁻¹,这远高于本研究的供试土壤 (2.50 mg·kg⁻¹),这也证实了华彩糯 3 号和广红糯 8 号玉米具有较

强的Cd富集能力。广红糯8号和华彩糯3号玉米Cd的转运系数分别为2.164和1.458,低于文献[21,25],但高于文献[12,14,20]的报道。目前Cd的富集系数大于8,同时转运系数大于1的玉米品种鲜见报道。综上所述,华彩糯3号和广红糯8号是Cd高累积玉米品种。

通过11个玉米品种在土壤pH 5.44,Cd质量分数为2.5 mg·kg⁻¹的盆栽试验得出以下主要结论:华彩糯3号和广红糯8号玉米对Cd的富集和转运能力较强,属于Cd高累积玉米品种,在Cd污染土壤修复中具有较大的应用潜力,值得进一步深入研究其富集Cd的机理。

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].(2014-04-17)[2018-08-10]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm.

[2] WANG M, ZOU J, DUAN X, et al. Cadmium accumulation and its effects on metal uptake in maize (*Zea mays* L.)[J]. *Bioresour Technol*, 2007, 98(1): 82-88.

[3] 邢艳帅,乔冬梅,朱桂芬,等.土壤重金属污染植物修复技术研究进展[J].*中国农学通报*, 2014, 30(17): 208-214.

[4] 刘小梅,吴启堂,李秉滔.超富集植物治理重金属污染土壤研究进展[J].*农业环境科学学报*, 2003, 22(5): 636-640.

[5] 屈冉,孟伟,李俊生,等.土壤重金属污染的植物修复[J].*生态学杂志*, 2008, 27(4): 626-631.

[6] EUSACHERS H J P, HAMERS T. Intergrates soil and sediment research: A basis for proper protection[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993:673-676.

[7] KUMAR N P B A, DUSHENKOV V, MOTTO H, et al. Phytoextraction: The use of plants to remove heavy metals from soils[J]. *Environ Sci Technol*, 1995, 29(5): 1232-1238.

[8] YANG X E, LONG X X, YE H B, et al. Cadmium tolerance and hyper-accumulation in a new Zn-hyperaccumulating plant species (*Sedum alfredii* Hance)[J]. *Plant Soil*, 2004, 259(1/2): 181-189.

[9] 刘威,束文圣,蓝崇钰.宝山堇菜(*Viola baoshanensis*)一种新的镉超富集植物[J].*科学通报*, 2003, 48(19): 2046-2049.

[10] 魏树和,周启星,王新,等.一种新发现的镉超积累植物龙葵(*Solanum nigrum* L.)[J].*科学通报*, 2004, 49(23): 2568-2573.

[11] 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]. *Nutr Cycl Agroecosys*, 2010, 87(3): 339-352.

[12] 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.

[13] 祁剑英,杜天庆,郝建平,等.能源作物甜高粱和玉米对土壤重金属的富集比较[J].*玉米科学*, 2017, 25(6): 73-78.

[14] 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.

[15] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社, 2000: 495.

[16] 中华人民共和国卫生部.食品中镉的测定:GB/T 5009.15—2003[S].北京:中国标准出版社, 2003: 112-117.

[17] THIOULOUSE J, CHESSEL D, DOLÉDEC S, et al. ADE-4: A multivariate analysis and graphical display software[J]. *Stat Comput*, 1997, 7(1): 75-83.

[18] LIU D H, JIAN W H, LIU C J, et al. Uptake and accumulation of lead by roots, hypocotyls and shoots of Indian mustard [*Brassica juncea* (L.)][J]. *Bioresour Technol*, 2000, 71(3): 273-277.

[19] 孙洪欣,赵全利,薛培英,等.不同夏玉米品种对镉、铅积累与转运的差异性田间研究[J].*生态环境学报*, 2015, 24(12): 2068-2074.

[20] GRANT C A, CLARKE J M, DUGUID S, et al. Selection and breeding of plant cultivars to minimize cadmium accumulation[J]. *Sci Total Environ*, 2008, 390: 301-310.

[21] 刘维涛,周启星.重金属污染预防品种的筛选与培育[J].*生态环境学报*, 2010, 19(6): 1452-1458.

[22] 孙姣辉,陈婷婷,邱博,等.几种重金属(Cd、Cr、As)在玉米植株中的分布研究[J].*作物研究*, 2016, 30(4): 402-405.

[23] 文秋红,于丽华.玉米自交系富集镉能力和最佳收获时期[J].*生态学报*, 2006, 26(12): 4066-4070.

[24] 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.

[25] MÂTHÉ-GÅSPÅR G, ANTON A. Phytoremediation study: Factors influencing heavy metal uptake of plants[J]. *Acta Biol Szegediensis*, 2005, 49(1/2): 69-70.

[26] 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.

【责任编辑 李晓卉】