农业环境科学学报
JOURNAL OF AGRO-ENVIRONMENT SCIENCE
中文核心期刊/CSCD
请通过网上投稿系统投稿
网址：http://www.aes.org.cn

不同玉米品种苗期对镉及营养元素的吸收转运特性

樊玉, 庄重, 赵丽洁, 张晨, 王琪, 李花粉, 万亚男

引用本文:
樊玉, 庄重, 赵丽洁, 张晨, 王琪, 李花粉, 万亚男. 不同玉米品种苗期对镉及营养元素的吸收转运特性[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(4): 744–753.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2022–0868

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同玉米品种对镉的富集和转运特性
辛艳卫, 梁成华, 杜立宇, 吴岩, 张亚男, 胡悦
农业环境科学学报. 2017, 36(5): 839–846 https://doi.org/10.11654/jaes.2016–1668

不同小麦品种灌浆期生长和镉积累的差异研究
潘建清, 陆敏, 杨肖娥
农业环境科学学报. 2021, 40(4): 756–765 https://doi.org/10.11654/jaes.2020–0967

不同叶菜品种镉积累评价及降低镉积累的措施
陈志琴, 刘奇珍, 林强, 陆利民, 陆萍, 金海洋, 黄璐璐, 杨肖娥
农业环境科学学报. 2022, 41(8): 1671–1681 https://doi.org/10.11654/jaes.2021–1362

硅对镉胁迫条件下两个水稻品种镉亚细胞分布、非蛋白巯基物质含量的影响
李江遐, 张军, 马友华, 蔡慢弟, 高飞
农业环境科学学报. 2018, 37(6): 1066–1071 https://doi.org/10.11654/jaes.2017–0928

京津冀地区设施土壤中不同蔬菜对镉的累积特征
高鑫, 颜蒙蒙, 曾希柏, 白玲玉, 王亚男, 陈清, 赵会薇, 苏世鸣
农业环境科学学报. 2018, 37(11): 2541–2548 https://doi.org/10.11654/jaes.2018–0908

关注微信公众号，获得更多资讯信息

樊玉, 庄重, 赵丽洁, 等. 不同玉米品种苗期对镉及营养元素的吸收转运特性[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(4): 744-753.
FAN Y, ZHUANG Z, ZHAO L J, et al. Uptake and transport characteristics of cadmium and nutrients in different varieties of maize(*Zea mays*) at seedling stage[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(4): 744-753.

不同玉米品种苗期对镉及营养元素的吸收转运特性

樊玉, 庄重, 赵丽洁, 张晨, 王琪, 李花粉, 万亚男*

(中国农业大学资源与环境学院, 农田土壤污染防控与修复北京市重点实验室, 北京 100193)

摘　要:低累积品种筛选是降低作物镉含量,减少人体摄入镉的一种有效方法。本研究通过营养液培养试验,分析了24个玉米品种苗期吸收、转运、累积镉的特性及与其他营养元素之间的相关关系。结果表明:24个玉米品种对镉的吸收和转运存在显著性差异,地上部镉含量范围为40.8~83.8 μg·g^{-1}(以干质量计),根吸镉量为544~1 204 μg·g^{-1}(以干质量计),相差1倍以上;转运系数为0.060~0.297,不同品种相差4倍左右。地上部镉含量与每克根镉吸收量以及地上部镉含量与镉转运系数均存在显著正相关关系。24个玉米品种按地上部镉含量大小聚类划分低、中、高3个不同镉累积的类型。同时,玉米地上部镉含量与磷、锰、铁含量呈显著负相关关系。进一步对筛选出的镉低累积型玉米品种和3个钙易累积型、8个镁易累积型、1个锌易累积的玉米品种进行综合分析,发现伟科702和登海652是兼具低累积镉和易累积营养元素特性的优势玉米品种。

关键词:玉米品种;镉;吸收;转运;营养元素

中图分类号:X173　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1672-2043(2023)04-0744-10　　doi:10.11654/jaes.2022-0868

Uptake and transport characteristics of cadmium and nutrients in different varieties of maize(*Zea mays*) at seedling stage

FAN Yu, ZHUANG Zhong, ZHAO Lijie, ZHANG Chen, WANG Qi, LI Huafen, WAN Yanan*

(Beijing Key Laboratory of Farmland Soil Pollution Prevention and Remediation, College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: With the development of mining, metallurgy, industry, and agriculture, soil cadmium contamination has become increasingly serious. Screening of low accumulation varieties is an effective method to reduce cadmium in crops and its intake by humans. The uptake and transport characteristics of cadmium and its correlation with other nutrient elements in 24 maize varieties were studied through hydroponic experiments. The results showed significant differences in the uptake, transport, and accumulation of cadmium among different varieties of maize. The cadmium content in the shoot and root ranged from 40.8 μg·g^{-1} to 83.8 μg·g^{-1}(dry weight) and from 544 μg·g^{-1} to 1 204 μg·g^{-1}(dry weight), respectively, with one time difference. The transport factor ranged from 0.060 to 0.297, with a difference of approximately four times. There was a significant positive correlation between cadmium content in shoot and cadmium content in root, and also between cadmium content in shoot and transport factor. All varieties were clustered and divided into three different cadmium accumulation types, and 11 types of maize were selected as low cadmium accumulation types. In addition, the cadmium content in the shoot exhibited significant negative correlations with phosphorus, manganese, and iron. Among 11 maize varieties with low cadmium accumulation, three with calcium accumulation, eight with magnesium accumulation, and one with zinc accumulation, two maize varieties (Weike 702 and Denghai 652) with low accumulation of cadmium and easy accumulation of nutrients were selected.

Keywords: maize variety; cadmium; absorption; transport; nutrient element

收稿日期:2022-08-31　　**录用日期:**2022-11-23

作者简介:樊玉(1999—),女,河南商城人,硕士研究生,从事环境污染化学方面的研究。E-mail:S20213030309@cau.edu.cn
***通信作者:**万亚男　E-mail:wanyanan@cau.edu.cn

镉是生物毒性较强且分布较广的重金属元素之一，对人类健康具有较大威胁。伴随着采矿、冶金以及工农业的发展，使镉进入到农田生态系统中，导致镉污染日益严重。近年来，我国土壤，特别是耕地土壤，部分受到了镉污染[1-3]。镉进入人体后可对肾、肝、骨骼等多种器官、生殖系统及血液系统、神经系统产生伤害[4]，而人类摄入的大部分镉主要来自农作物。因此，减少人体对镉的摄入量需要减少农作物对镉的累积。目前主要通过以下途径实现农田镉的阻控：控制农业投入品中重金属的含量以减少投入；施加土壤钝化剂[5]以降低土壤中镉的有效性；种植镉超累积植物[6]等以减少土壤中的镉总量；通过筛选对镉耐性高、累积量低的优势农作物品种推广种植，以减少农作物对镉的吸收累积[7-9]。

玉米作为我国广泛种植的农作物之一，具有生物量大、生长周期短等特点[10]。有研究表明不同玉米品种对镉的吸收和富集能力存在差异性[11-12]。杜彩艳等[13]分析了20种玉米在镉污染条件下的生物量、产量以及玉米根、茎、叶和籽粒中镉含量发现，不同品种间均表现出显著差异。因此可以通过筛选镉低累积品种，用于污染土地推广种植，达到安全生产的目的。

微量元素摄入不足已成为影响人体健康的普遍性问题。据调查显示，目前世界约有60%的人缺铁，30%的人缺锌，还有钙、镁和铜等元素的摄入不足在发展中国家也比较普遍[14]。人体主要通过食物摄入来补充所必需的营养元素，饮食的单一化导致营养元素的缺乏，尤其是以玉米、小麦等谷物作物为主食的发展中国家[15]。国际玉米小麦改良中心（CIMMYT）通过分析矿物质元素含量高的作物材料，筛选富含微量营养元素的玉米品种进行推广[16]。因此，提高玉米籽粒锌、铁等营养元素的含量，促进人体对营养元素的吸收具有重要意义。目前关于玉米的品种筛选已有一定的研究基础，但是更多地侧重于筛选产量高、养分利用效率高、抗逆性强以及重金属累积量低的品种，但在污染条件下不同品种玉米矿质元素的含量差异以及镉与其他矿物质营养元素互作的研究少有报道。本研究选取24个玉米品种，通过水培试验探究不同品种玉米对镉吸收、转运的差异，以及镉与其他元素的互作影响，根据地上部镉含量以及营养元素含量筛选出镉低累积以及营养元素高累积的优势玉米品种，以期为玉米优质、高效生产提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试玉米品种

本研究从我国玉米主产区的主要推广品种中选取了24个玉米品种作为研究对象（表1）。这24种玉米为普通品种，属于粮食型玉米，主要用作饲料储备。

表1 供试玉米品种

Table 1 Tested varieties of maize

编号 Number	品种 Variety	适种区域 Suitable planting region
1	伟科702	河南、河北、江苏、安徽等
2	北农青贮368	北京
3	良玉99	天津、吉林
4	中科11	河北
5	登海618	河北、河南、江苏、安徽等
6	良玉918	北京、天津、河北、吉林等
7	远科105	吉林
8	京农科728	北京、天津、黄淮海
9	京农科828	北京
10	登海652	山东
11	农华101	北京、天津、河北、山西等
12	东单6531	四川、湖南、湖北、云南等
13	京科968	吉林、辽宁、河北、北京等
14	金海5	东北、西北、南方均可
15	郑单958	河北、山东、河南、安徽等
16	宇玉30	北京、天津、河北、河南等
17	迪犬517	北京、天津、黄淮海
18	中单909	河南、河北、山东、陕西等
19	隆平206	河南、河北、山东、安徽等
20	绥玉23	黑龙江省第二、三积温带
21	登海518	河南、河北、山东、安徽等
22	先锋047	山东
23	登海605	河南、河北、山东、安徽等
24	金庆202	吉林

1.2 试验设计

水培试验在中国农业大学温室中进行。每个品种玉米各挑选14粒种子在10%双氧水（H_2O_2，*m/m*）中表面灭菌10 min，漂洗，用蒸馏水浸泡过夜，然后在20 ℃的黑夜潮湿条件下萌发24 h。挑选发芽一致的种子用滤纸卷起，在塑料小盆中用蒸馏水培养6 d。培养长至两叶一心后，挑选长势一致的幼苗移栽至水培箱中，采用含镉的营养液（表2）一起培养。营养液组分：$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ 2 000 μmol·L^{-1}，KH_2PO_4 250 μmol·L^{-1}，K_2SO_4 750 μmol·L^{-1}，$MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 650 μmol·L^{-1}，KCl 100 μmol·L^{-1}，H_3BO_3 1 μmol·L^{-1}，Mn-

$SO_4 \cdot H_2O$ 1 μmol·L^{-1}，$CuSO_4 \cdot 5H_2O$ 0.1 μmol·L^{-1}，$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 1 μmol·L^{-1}，$(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$ 0.005 μmol·L^{-1}，Fe(Ⅱ)-EDTA 100 μmol·L^{-1}。设置的镉处理以$Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$的形式添加在营养液中，浓度为10 μmol·L^{-1}。用0.1 mol·L的KOH或HCl调节营养液pH为6.0。每个品种5个重复。每7 d更换一次营养液，供气泵保证培养液正常供氧。培养19 d后收获。

收获的玉米幼苗根系浸至200 mL pH为5.5的洗脱液（1 mmol·L^{-1} $CaSO_4$，2 mmol·L^{-1} MES）中，洗脱吸附在根表的镉。用滤纸吸干表面水分，分离地上部和根部，在60 ℃的烘箱中烘干。将烘干后的玉米粉碎、消解，用电感耦合等离子体发射光谱仪（ICP-OES，PerkinElmer Avio 200）测定消解液中镉、磷、钙、镁、铜、锌、铁、锰的含量。以国家标准参比物质植物样品（GBW10049 大葱）进行质量控制，国标样品分析结果均在允许误差范围内（回收率在80%~115%之间）。

1.3 数据处理

使用Excel 2003、SPSS 26.0、R 4.1.3进行数据处理和分析，SigmaPlot 12.5制图。采用单因素方差分析（ANOVA）和Duncan多重比较检验（$P<0.05$）进行统计学处理。变量间的关系通过Pearson相关分析确定。采用欧氏距离和离差平方和法进行聚类分析。

每克根镉吸收量（μg·g^{-1}）=[地上部镉含量（μg·g^{-1}）×地上部干物质量（g）+根系镉含量（μg·g^{-1}）×根系干物质量（g）]/根系干物质量（g）

转运系数=地上部镉含量（μg·g^{-1}）/根系镉含量（μg·g^{-1}）[17]。

2 结果与分析

2.1 不同玉米品种的生物量

在10 μmol·L^{-1}的镉处理水平下，不同品种玉米的生物量具有显著性差异（表2）。玉米地上部干质量变化范围从3号（良玉99）0.357 g·株$^{-1}$到18号（中单909）0.767 g·株$^{-1}$，平均值为0.590 g·株$^{-1}$。根系干质量变化范围从3号（良玉99）0.073 g·株$^{-1}$到21号（登海518）0.147 g·株$^{-1}$，平均值为0.112 g·株$^{-1}$。不同玉米品种间生物量的差异可能是由于不同品种生长特性的差异造成的。

表2 不同玉米品种不同部位干质量

Table 2 Dry biomass of different parts of different maize varieties

单位：g·plant^{-1}

编号 Number	品种 Variety	地上部 Aboveground	根系 Root
1	伟科702	0.408±0.071cd	0.080±0.018abc
2	北农青贮368	0.612±0.157abcd	0.141±0.032ab
3	良玉99	0.357±0.107d	0.073±0.020bc
4	中科11	0.564±0.099abcd	0.102±0.017abc
5	登海618	0.652±0.123abcd	0.146±0.023a
6	良玉918	0.722±0.121abc	0.129±0.033abc
7	远科105	0.423±0.119bcd	0.087±0.024abc
8	京农科728	0.713±0.161abc	0.128±0.032abc
9	京科828	0.412±0.063cd	0.078±0.013bc
10	登海652	0.390±0.106cd	0.086±0.027abc
11	农华101	0.676±0.176abcd	0.115±0.027abc
12	东单6531	0.450±0.012abcd	0.084±0.014abc
13	京科968	0.614±0.125abcd	0.120±0.033abc
14	金海5	0.474±0.067abcd	0.086±0.010abc
15	郑单958	0.674±0.172abcd	0.118±0.042ab
16	宇玉30	0.565±0.124abcd	0.114±0.027abc
17	迪犬517	0.626±0.130abcd	0.130±0.022abc
18	中单909	0.767±0.166a	0.138±0.036abc
19	隆平206	0.646±0.097abcd	0.112±0.018abc
20	绥玉23	0.373±0.152d	0.072±0.019c
21	登海518	0.724±0.162abc	0.147±0.023a
22	先锋047	0.761±0.076ab	0.141±0.016ab
23	登海605	0.721±0.075abc	0.132±0.019abc
24	金庆202	0.695±0.238abcd	0.141±0.043ab

注：表中数据为平均值±标准差（n=5），同列不同小写字母表示不同品种间差异显著（$P<0.05$）。

Note: The data in the table are means±SD（n=5）. Different lowercases in a column indicate significant differences among varieties（$P<0.05$）.

2.2 不同玉米品种对镉的吸收和转运

24个玉米品种地上部镉含量（以干质量计）和根系对镉的吸收量（以干质量计）如图1所示。不同品种玉米地上部镉含量差异显著。镉含量变化范围从1号（伟科702）40.8 μg·g^{-1}到24号（金庆202）83.8 μg·g^{-1}，最高品种的地上部镉含量是最低品种的2.05倍，平均值为62.6 μg·g^{-1}（图1a）。

玉米地上部对镉的累积主要是由根系吸收镉能力和镉转运能力决定的。玉米根系镉吸收能力可以用每克根镉吸收量体现。试验结果表明，24个品种玉米每克根镉吸收量也具有显著性差异，且品种间的含量高低与地上部呈现出不一致的顺序（图1b）。最低的品种为10号（登海652）544 μg·g^{-1}，最高的品种为15号（郑单958）1 204 μg·g^{-1}，最高品种的根系镉吸收量是最低品种的2.21倍，根系吸收量平均值为876 μg·g^{-1}。

转运系数是地上部镉含量与根系镉含量的比值，可用来评价植物将镉从根系向地上部的运输能力。不同品种玉米的转运系数存在显著性差异（图1c）。

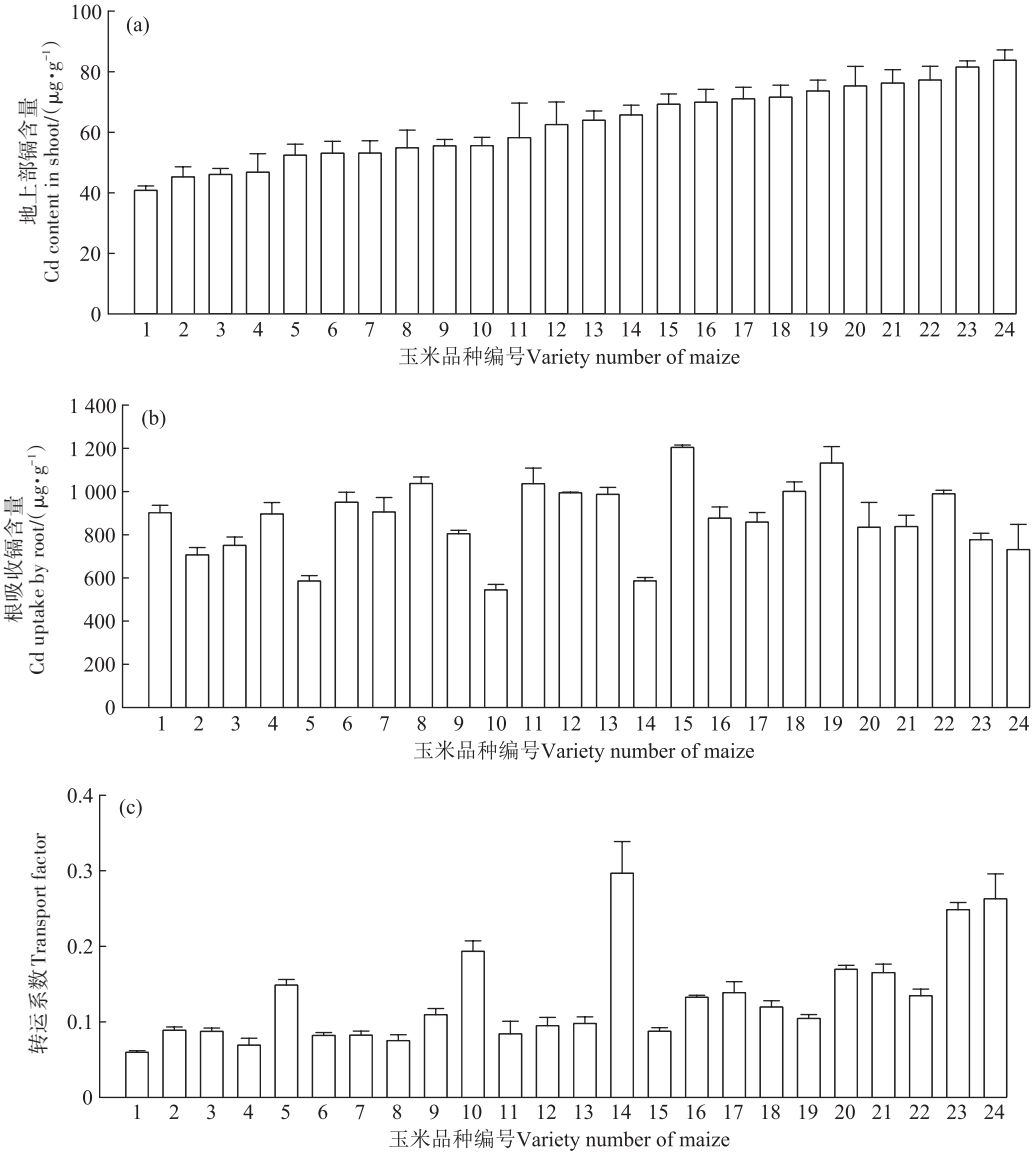


图1 不同品种玉米地上部镉含量(a)、每克根镉吸收量(b)和转运系数(c)

Figure 1 Cd content in shoot(a), Cd uptake by root(b) and transport factor(c) of different maize varieties

变化范围从1号(伟科702)0.060到14号(金海5)0.297，平均值为0.130。除了5号(登海618)、10号(登海652)、14号(金海5)这些转运系数比较高的品种，其他品种的转运系数排序规律与地上部镉含量的排序规律相似，地上部含量高的品种转运系数也高。

分析24个品种的玉米幼苗地上部镉含量和根系镉吸收量以及镉转运系数的相关性(图2)，结果表明地上部镉含量与根镉吸收量存在显著正相关关系(r=0.305，P<0.01)与镉转运系数存在显著正相关关系(r=0.530，P<0.01)。这说明在玉米苗期阶段，玉米根系对镉的吸收以及玉米对镉从根向地上部的转运共同影响地上部镉含量。

2.3 优势玉米品种筛选

为明确不同玉米品种镉累积的差异，采用聚类分析的方法，通过计算欧式距离和离差平方和法对24个玉米品种的地上部镉进行定量化归类，确定不同镉累积类型的玉米品种(图3)。当聚类距离处于10~15时，可将24个品种分为3类：第一类为镉低累积类型，包含11个品种，占所有品种数的46%。低累积类型地上部镉含量范围为40.8~58.2 μg·g^{-1}，具体的品种镉含量由低到高排序为伟科702<北农青贮368<良玉99<中科11<登海618<良玉918<远科105<京农科728<京科828<登海652<农华101。第二类为镉中累积类

型，包含11个品种，占所有品种数的46%。中累积类型地上部镉含量范围为62.5~77.2 μg·g^{-1}。11个品种地上部镉含量由低到高排序为东单6531<京科968<金海5<郑单958<宇玉30<迪犬517<中单909<隆平206<绥玉23<登海518<先锋047。第三类为镉高累积类型，只有2个品种：登海605（81.5 μg·g^{-1}）和金庆202（83.8 μg·g^{-1}），占总品种数的2%。低、中、高累积类型之间玉米地上部镉含量存在显著性差异。高累积品种玉米地上部的镉含量是伟科702（低累积类型）的1.6~2.0倍。

为探究玉米地上部对镉的累积与其他营养元素之间的关系，对24种玉米地上部镉、磷、钙、镁、铜、锌、锰、铁含量进行相关性分析（表3），结果表明，地上部镉与磷（r=−0.225，P<0.05）、锰（r=−0.386，P<0.01）、铁（r=−0.233，P<0.05）具有显著负相关关系，表明地上部镉含量累积较少的品种对磷、锰、铁的累积较多。因此上述筛选的镉低累积类型的品种中，可能存在磷、锰、铁累积量高的品种。而地上部镉与钙、镁、铜、锌之间相关性不显著，则有可能筛选出兼具地上部镉含量低和钙、镁、铜、锌含量高的品种。因此，地上部镉与营养元素的相关性结果，为筛选地上部镉含量低，磷、钙、镁、铜、锌、锰、铁营养元素含量高的玉米品种提供了参考。

对24种玉米地上部钙、镁、铜、锌含量进行聚类分析，获得钙、镁、铜、锌易累积类型玉米（图4）。根据聚类结果显示，易累积钙类型有3种（图4a）：金庆202、登海518、登海652。易累积镁类型有8种（图4b）：伟科702、绥玉23、登海518、隆平206、京科968、良玉99、金庆202、登海652。易累积铜类型只有7种（图4c）：绥玉23、金海5、良玉918、金庆202、中单909、登海605、伟科702。易累积锌类型只有1种（图4d）：京科968。

对筛选出的11种镉低累积玉米和3种钙较易累积、8种镁易累积、7种铜易累积、1种锌易累积的玉米

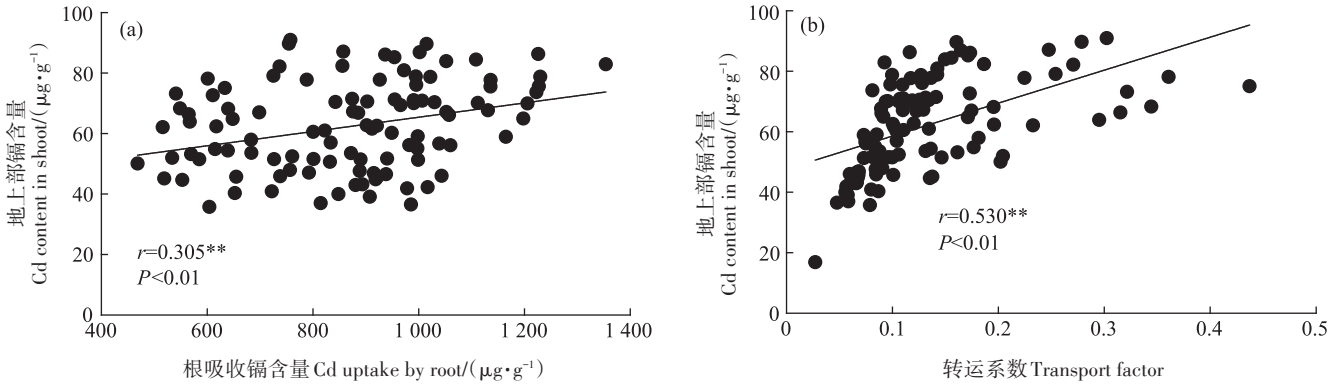


图2 玉米地上部镉含量与每克根吸收量（a）和转运系数（b）的相关性（n=107）

Figure 2 Correlation between Cd content in shoot and Cd content absorbed per gram (a) and transport factor (b) in maize (n=107)

表3 不同品种玉米地上部镉、磷、钙、镁、铜、锌、锰、铁含量相关性系数（r）

Table 3 Correlation of Cd, P, Ca, Mg, Cu, Zn, Mn and Fe contents in shoot of different maize varieties (r)

	Cd	P	Ca	Mg	Cu	Zn	Mn	Fe
Cd	1.00							
P	−0.225*	1.00						
Ca	0.026	−0.094	1.00					
Mg	0.164	0.248*	0.520**	1.00				
Cu	0.106	−0.147	0.502**	0.241*	1.00			
Zn	0.178	0.429**	0.102	0.357**	0.235*	1.00		
Mn	−0.386**	0.315**	0.435**	0.293**	−0.018	0.112	1.00	
Fe	−0.233*	−0.009	0.076	0.041	0.262**	−0.027	0.226*	1.00

注：*表示P<0.05，**表示P<0.01，采用双尾检验对相关性的显著性进行验。

Note: * represents significant correlation at P<0.05. **represents significant correlation at P<0.01 and the tank bottom corrosion, and testing the correlation by two-tailed test.

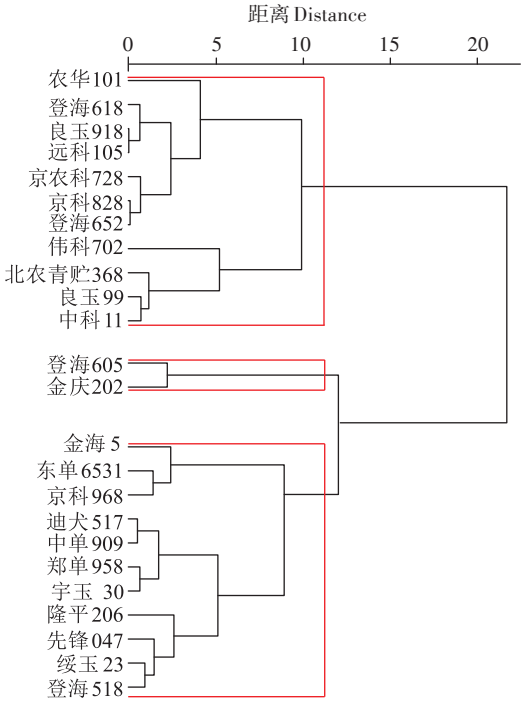


图3 不同品种玉米地上部镉含量聚类分析

Figure 3 Cluster of Cd content in shoot of different maize varieties

品种进行分析，筛选出了2个品种的玉米：伟科702和登海652，属于24个品种中的优势玉米品种（图5）。伟科702是兼具镉低累积和镁、铜易累积特性的玉米品种。登海652是同时具有镉低累积和钙、镁易累积特性的玉米品种。在地上部镉与不同营养元素的相关性分析结果表明，地上部镉与磷、锰、铁具有显著负相关关系。伟科702和登海652在24个品种中属于镉低累积类型品种，其磷、铁、锰含量可能较高。因此对伟科702和登海652地上部磷、锰、铁含量进行聚类分析，结果表明伟科702属于磷、锰、铁易累积类型，登海652属于磷、锰易累积类型。因此伟科702是兼具镉低累积和磷、镁、铜、锰、铁易累积特性的玉米品种，登海652是同时具有镉低累积和磷、钙、镁、锰易累积特性的玉米品种。

3 讨论

玉米对元素的吸收和转运是由生长的环境条件和本身的遗传特性共同决定的。不同品种的玉米有着不同的遗传特性[17-21]。本研究结果显示，不同玉米品种对镉的吸收、转运和积累具有明显的差异性，这主要是由于品种间的基因型差异造成的[12-13,21-22]。邓伟等[23]研究了4个品种水稻在苗期对镉吸收的差异发现，镉胁迫72 h之后4个品种根和地上部镉累积量不同，差异显著。张宁等[24]以50个玉米品种开展田间试验，结果表明各玉米品种对镉的吸收主要由本身的遗传因素决定。邓婷等[11]对筛选出的6个镉高、低积累玉米品种的镉富集和转运的差异性进行田间试验验证，结果表明6个玉米品种在抽丝期和成熟期的根系、地上部生物量以及根、茎、籽粒中镉含量均存在显著的品种间差异。

玉米在不同生育期累积镉的能力不同，在苗期吸收到的镉会通过后面的生长发育向各器官分配，最终运送到籽粒中。杨惟薇等[25]研究了全生育期的玉米镉富集规律，结果表明：不同品种玉米根、茎和叶中镉含量在不同生育期表现一致的变化趋势，为苗期>拔节期>灌浆期>成熟期，且苗期累积镉含量高的玉米成熟期籽粒镉含量也相对较高。本试验研究的是玉米幼苗对镉胁迫反应的品种间差异，这可以对成熟期玉米生长的镉胁迫反应起到一定的预示作用。很多研究的结果表明，作物在苗期对镉的吸收特征可以反映成熟期的结果。余飞宇[26]的研究显示，苗期水稻镉积累量与成熟期地上部镉含量呈显著的正相关关系，可见镉胁迫下水稻在苗期的镉吸收特性可以在一定程度上反映出水稻品种全生育期水稻的累积特性。王效瑾[27]研究不同的小麦品种对镉吸收和转运之间的差异，发现苗期小麦地上部镉累积量高的品种，在成熟期地上部含量也高。Shi等[28]选择12个小麦品种进行水培实验，发现镉、砷在苗期小麦根中的相关性与盆栽试验中培养至成熟期小麦的结果一致。因此，苗期的结果可以为低累积品种的筛选提供参考。尽管由于环境条件的复杂影响和遗传特性在不同生育阶段的表现不同，苗期的结果还不能完全准确地预测成熟期的结果，但可以在苗期通过简单指标的测定进行间接的简化选择，为成熟期预测提供参考，可以提高品种筛选的效率。

本研究结果显示，地上部镉含量与根镉吸收量存在显著正相关关系（r=0.305，P<0.01），与镉转运系数存在显著正相关关系（r=0.530，P<0.01）。这说明在玉米苗期阶段，玉米根系对镉的吸收能力以及玉米对镉从根向地上部的转运能力共同影响地上部镉含量（图3）。玉米对镉的吸收和转运分为以下步骤：经根系吸附过程[29]、质外体途径[30]和共质体途径[31]的短距离运输过程以及木质部和韧皮部装载的长距离运输过程[32]，最终输送到地上部的各个组织器官中。环境中的Cd^{2+}被玉米根系吸收主要通过以下3种方式：①细胞呼吸产生的CO_2和H_2O在根表形成H_2CO_3，Cd^{2+}与

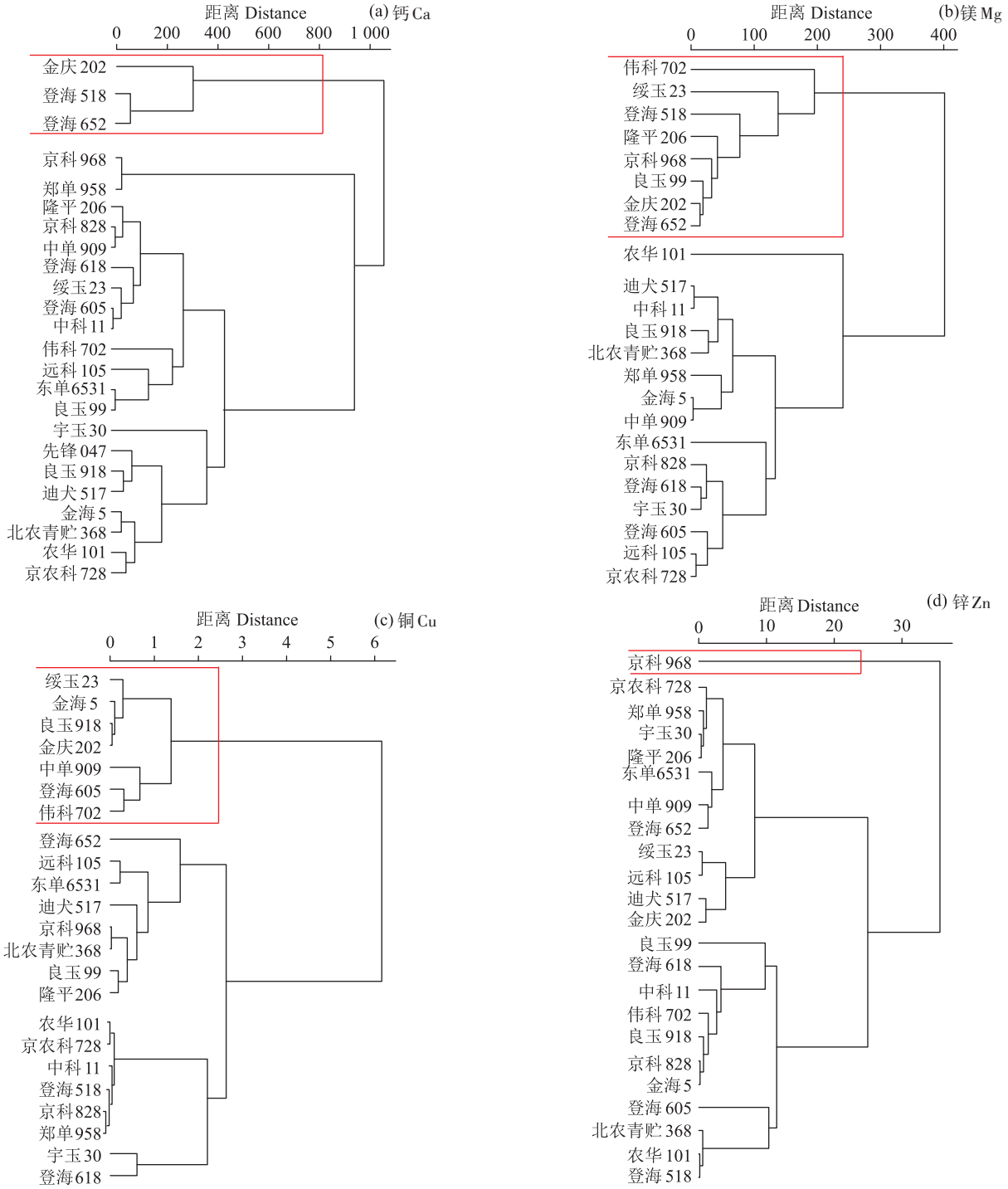
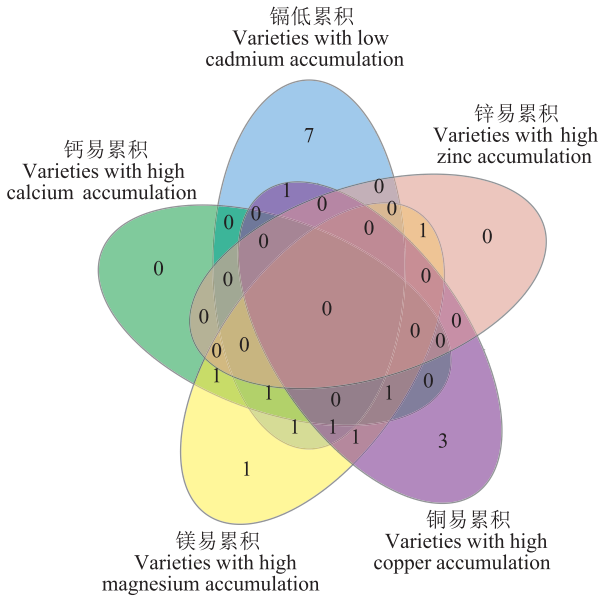


图4 不同品种玉米地上部钙(a)、镁(b)、铜(c)、锌(d)含量聚类分析

Figure 4 Cluster of Ca(a), Mg(b), Cu(c) and Zn(d) contents in shoot of different maize varieties

H_2CO_3解离形成的H^+产生交换吸附，以质外体途径进入表皮细胞[33]；②Cd^{2+}利用Fe^{2+}、Zn^{2+}和Ca^{2+}的离子通道进入根表细胞[34]；③玉米根系的分泌物与Cd^{2+}螯合通过YSL蛋白进入根表细胞[35]。经过根表细胞吸收的镉在玉米体内的运移受到转运蛋白的影响。同一个转运蛋白可能运输多种金属元素，一种金属离子的吸收可能受多个转运蛋白的调控，而且金属元素之间存在互作效应以维持植物体内金属离子平衡[36-37]。镉作为植物的非必需元素，至今未在玉米中发现镉的专属运输蛋白[38-40]，玉米转运Cd^{2+}需要借助Ca^{2+}、Mg^{2+}、Mn^{2+}、Zn^{2+}等二价阳离子的运输蛋白[41-43]。例如ZIP[44]和HMA[45-46]都是二价金属转运蛋白，除了可以运输



四个椭圆代表具有四种特性的玉米品种。不同区域的数字代表筛选出的玉米品种数

Four ellipses represent maize varieties with four characteristics. Numbers in different regions represent the number of corn varieties screened

图5 优势玉米品种筛选

Figure 5 Dominant varieties of 24 maize varieties

Zn^{2+}、Cu^{2+}、Mn^{2+}、Fe^{2+}，还可运输 Cd^{2+}[47]。

本研究依据玉米的地上部镉含量将所有的试验品种分为高、中、低累积3种类型，分别占供试玉米品种的46%、46%和2%。已有研究将作物中重金属含量的聚类分析结果作为筛选重金属低累积作物的参考。本研究筛选出的京农科728属于镉低累积类型，与张宁等[24]籽粒镉低累积的玉米品种结果一致。在进行地上部镉与其他元素含量的相关性分析的基础上，筛选出具有镉低累积、矿物质营养元素易累积特性的玉米品种：伟科702和登海652。这与Shi等[28]的研究方法相似。Shi等[28]的试验结果表明12种小麦籽粒砷、镉不具有相关性，因此可以筛选小麦籽粒砷、镉累积量较少的品种。然而，本研究筛选出的两种玉米品种适种区域主要为华东和华北的玉米种植产区，由于玉米在不同土壤环境条件下的生长情况不同，以及不同的土壤条件下玉米种子对镉积累量的变化很敏感[48]，因此低累积量品种需要在更多的田间试验中进一步验证。

4 结论

（1）24个玉米品种苗期对镉的吸收转运能力存在显著性差异。其中登海652对镉的吸收量最低，而从根向地上部的转运能力以及地上部镉含量最低的品种均为伟科702。不同品种镉转运系数的排序规律与地上部镉含量的排序规律基本相似。

（2）通过对玉米苗期镉及其他营养元素的吸收累积分析，得到了11个镉低累积型、3个钙易累积型、8个镁易累积型、1个锌易累积型的玉米品种。综合分析后选择伟科702和登海652作为兼具低累积镉和易累积营养元素特性的优势玉米品种。

参考文献：

[1] SHAO D, ZHAN Y, ZHOU W, et al. Current status and temporal trend of heavy metals in farmland soil of the Yangtze River Delta region: field survey and meta-analysis[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 219: 329-336.

[2] 于元赫, 吕建树, 王亚梦. 黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布[J]. 环境科学, 2018, 39(6): 2865-2874. YU Y H, LÜ J S, WANG Y M. Source identification and spatial distribution of heavy metals in soils in typical areas around the Lower Yellow River[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(6): 2865-2874.

[3] HUANG Y, WANG L, WANG W, et al. Current status of agricultural soil pollution by heavy metals in China: A meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 3034-3042.

[4] 黄芸, 袁洪, 黄志军, 等. 环境重金属暴露对人群健康危害研究进展[J]. 中国公共卫生, 2016, 32(8): 1113-1116. HUANG Y, YUAN H, HUANG Z J, et al. Progress in research on environmental exposure and health hazards of heavy metals in China[J]. *Chinese Journal of Public Health*, 2016, 32(8): 1113-1116.

[5] 殷飞, 王海娟, 李燕燕, 等. 不同钝化剂对重金属复合污染土壤的修复效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(3): 438-448. YIN F, WANG H J, LI Y Y, et al. Remediation of multiple heavy metal polluted soil using different immobilizing agents[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(3): 438-448.

[6] 杨勇, 江荣风, 李花粉, 等. 土壤容重改变对锌/镉超累积植物遏兰菜根系特征及吸镉的影响[J]. 环境科学, 2010, 31(12): 3043-3049. YANG Y, JIANG R F, LI H F, et al. Effect of the soil bulk density on the root morphology and cadmium uptake by *Thlaspi caerulescens* grown on Cd-contaminated soil[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(12): 3043-3049.

[7] 徐燕玲, 陈能场, 徐胜光, 等. 低镉累积水稻品种的筛选方法研究——品种与类型[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(7): 1346-1352. XU Y L, CHEN N C, XU S G, et al. Breeding rice cultivars with low accumulation of cadmium: cultivars versus types[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(7): 1346-1352.

[8] 邢维芹, 张红毅, SCHECKEL K G, 等. 铅冶炼污染区小麦籽粒镉含量及低积累品种筛选[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(10): 2039-2040. XING W Q, ZHANG H Y, SCHECKEL K G, et al. Grain Cd concentrations of 100 wheat (*Triticum aestivum* Linn) varieties and strains grown on lead-smelting contaminated soils and screening for low Cd varieties[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34

(10):2039-2040.

[9] 陈亚茹, 张巧凤, 付必胜, 等. 中国小麦微核心种质籽粒铅、镉、锌积累差异性分析及低积累品种筛选[J]. 南京农业大学学报, 2017, 40(3):393-399. CHEN Y R, ZHANG Q F, FU B S, et al. Differences of lead, cadmium and zinc accumulation among Chinese wheat mini-core collections germplasms and screening for low Pb, Cd and Zn accumulative cultivars in grains[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2017, 40(3):393-399.

[10] 李乐乐, 刘源, 李宝贵, 等. 镉低积累小麦品种的筛选研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(8):53-58, 72. LI L L, LIU Y, LI B G, et al. Screening of low-accumulation wheat varieties with cadmium[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(8):53-58, 72.

[11] 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 T, WU J L, LU W S, et al. Differences in cadmium accumulation and translocation in different *Zea mays* cultivars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(6):1265-1271.

[12] 杜彩艳, 余小芬, 杜建磊, 等. 不同玉米品种对Cd、Pb、As积累与转运的差异研究[J]. 生态环境学报, 2019, 28(9):1867-1875. DU C Y, YU X F, DU J L, et al. Variety difference of Cd, Pb and As accumulation and translocation in different varieties of *Zea mays*[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(9):1867-1875.

[13] 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 C Y, ZHANG N M, LEI B K, 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.

[14] WHITE P J, BROADLY M R. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets: iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine[J]. *The New Phytologist*, 2009, 182(1):49-84.

[15] CALDELAS C, WEISS D J. Zinc homeostasis and isotopic fractionation in plants: a review[J]. *Plant and Soil*, 2017, 411(1/2):17-46.

[16] YE B, SINGH R P, YUAN C, et al. Three co-located resistance genes confer resistance to leaf rust and stripe rust in wheat variety Borlaug 100[J]. *The Crop Journal*, 2022, 10(2):490-497.

[17] 周启星. 污染土壤修复原理与方法[M]. 北京:科学出版社, 2004:134-144. ZHOU Q X. Remediation of contaminated soils: principles and methods[M]. Beijing: Science Press, 2004:134-144.

[18] LIU Z H, LI W H, QI H Y, et al. Arsenic accumulation and distribution in the tissues of inbred lines in maize(*Zea mays* L.)[J]. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 2012, 59(8):1705-1711.

[19] JAVED M T, AKRAM M S, TANWIR K, et al. Cadmium spiked soil modulates root organic acids exudation and ionic contents of two differentially Cd tolerant maize(*Zea mays* L.) cultivars[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 141:216-225.

[20] 辛艳卫. 不同玉米品种对镉的吸收和转运差异性研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2017:55. XIN Y W. Uptake and translocation of cadmium in different maize cultivars[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017:55.

[21] 孙姣辉. 不同玉米品种对镉的吸收积累差异研究[D]. 长沙:湖南农业大学, 2017:36. SUN J H. Uptake and accumulation of cadmium in different maize varieties[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2017:36.

[22] 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. SUN H X, ZHAO Q L, XUE P Y, et al. Variety difference of cadmium and lead accumulation and translocation in summer maize[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(12):2068-2074.

[23] 邓伟, 张玉烛, 敖和军, 等. 不同镉积累型水稻品种苗期镉积累及转运变化特征[J]. 中国稻米, 2018, 24(4):86-90. DENG W, ZHANG Y Z, AO H J, et al. Cadmium accumulation and transfer capacity among different types of rice cultivars at seedling stage[J]. *China Rice*, 2018, 24(4):86-90.

[24] 张宁, 陶荣浩, 张慧敏, 等, 不同玉米品种对镉积累和转运差异研究[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(6):1208-1216. ZHANG N, TAO R H, ZHANG H M, et al. Differences in cadmium accumulation and translocation in different varieties of *Zea mays*[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(6):1208-1216.

[25] 杨惟薇, 刘敏, 曹美珠, 等. 不同玉米品种对重金属铅镉的富集和转运能力[J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30(6):774-779. YANG W W, LIU M, CAO M Z, et al. Accumulation and transfer of lead(Pb) and cadmium(Cd) on different species of maize[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, 30(6):774-779.

[26] 余飞宇. 水稻幼苗对镉胁迫的反应及其与全生育期镉积累特性的关系[D]. 扬州:扬州大学, 2008:47-49. YU F Y. Responses of rice seedling to Cd stress and the relation with Cd accumulation in whole growth period under Cd stress[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2008:47-49.

[27] 王效瑾. 小麦镉吸收和转运的品种间差异研究[D]. 郑州:河南农业大学, 2020:79. WANG X J. Study on the differences varieties of wheat cadmium uptake and translocation[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2020:79.

[28] SHI G L, ZHU S, BAI S N, et al. The transportation and accumulation of arsenic, cadmium, and phosphorus in 12 wheat cultivars and their relationships with each other[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 299:94-102.

[29] JARVIS S C, JONES L H P, HOPPER M J.Cadmium uptake from solution by plants and its transport from roots to shoots[J]. *Plant and Soil*, 1976, 44:179-191.

[30] SEREGIN I V, KOZHEVNIKOVA A D. Roles of root and shoot tissues in transport and accumulation of cadmium, lead, nickel, and strontium[J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2008, 55(1):1-22.

[31] CLEMENS S. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants[J]. *Biochimie*, 2006, 88(11):1707-1719.

[32] CONN S, GILLIHAM M. Comparative physiology of elemental distributions in plants[J]. *Annals of Botany*, 2010, 105(7):1081-1102.

[33] YILMAZ D. Effects of salinity on growth and nickel accumulation capacity of Lemna gibba(*Lemnaceae*)[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 147(1/2):74-77.

[34] 王晓娟, 王文斌, 杨龙, 等. 重金属镉(Cd)在植物体内的转运途径

及其调控机制[J]. 生态学报, 2015, 35(23)：7921-7929. WANG X J, WANG W B, YANG L, et al. Transport pathways of cadmium (Cd) and its regulatory mechanisms in plant[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(23)：7921-7929.

[35] CURIE C, CASSIN G, COUCH D, et al. Metal movement within the plant: contribution of nicotianamine and yellow stripe 1-like transporters[J]. *Annals of Botany*, 2009, 103(1)：1-11.

[36] 曹玉巧, 聂庆凯, 高云, 等. 植物中镉及其螯合物相关转运蛋白研究进展[J]. 作物杂志, 2018(3)：15-24. CAO Y Q, NIE Q K, GAO Y, et al. The studies on cadmium and its chelate related transporters in plants[J]. *Crops*, 2018(3)：15-24.

[37] HE J, LI H, LUO J, et al. A transcriptomic network underlies microstructural and physiological responses to cadmium in *Populus×canescens*[J]. *Plant Physiology*, 2013, 162(1)：424-439.

[38] 曹继容, 钟广炎, 王其兵. 植物离子组学及其研究方法与应用进展[J]. 植物学报, 2014, 49(4)：504-513. CAO J R, ZHONG G Y, WANG Q B. Progress in methodology and application of plant lonomics[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2014, 49(4)：504-513.

[39] 沙之敏, 赵峥, 卢琳芳, 等. 植物离子组学研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(5)：1370-1377. SHA Z M, ZHAO Z, LU L F, et al. Research progress on ionomics of plants[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(5)：1370-1377.

[40] 刘仲齐, 张长波. 重金属调控非选择性阳离子通道生理功能的研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(1)：1-5. LIU Z Q, ZHANG C B. Advance in regulation of heavy metals on nonselective cation channels: a review[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(1)：1-5.

[41] 徐莜, 杨益新, 李文华, 等. 锰离子浓度及其转运通道对水稻幼苗镉吸收转运特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(8)：1429-1435. XU Y, YANG Y X, LI W H, et al. Effects of manganese concentrations and transporters on uptake and translocation of cadmium in rice seedlings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(8)：1429-1435.

[42] 徐莜. 锰离子对水稻镉吸收转运特性的影响[D]. 北京：中国农业科学院, 2017：51. XU Y. Effects of manganese ions on cadmium a bsorption and translocation in rice[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017：51.

[43] 马晓晓. 锌/镉超积累植物东南景天(*Sedum alfredii* Hance)两个锌转运蛋白基因的功能研究[D]. 杭州：浙江大学, 2015：44-51. MA X X. Functional analysis of two zinc transporters from the Zn/Cd hyperaccumulator *Sedum afredii* Hance[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015：44-51.

[44] CHEN W R, FENG Y, CHAO Y E. Genomic analysis and expression pattern of $OsZIP_1$, $OsZIP_3$, and $OsZIP_4$ in two rice (*Oryza sativa* L.) genotypes with different zinc efficiency[J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2008, 55(3)：400-409.

[45] MIGEON A, BLAUDEZ D, WILKINS O, et al. Genome-wide analysis of plant metal transporters, with an emphasis on poplar[J]. *Cellular & Molecular Life Sciences Cmls*, 2010, 67(22)：3763-3784.

[46] ZENG L, ZHU T, GAO Y, et al. Effects of Ca addition on the uptake, translocation, and distribution of Cd in *Arabidopsis thaliana*[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 139：228-237.

[47] CAO Y, ZHAO X, LIU Y, et al. Genome-wide identification of $ZmHMA_4$ and association of natural variation in $ZmHMA_2$ and $ZmHMA_3$ with leaf cadmium accumulation in maize[J]. *PeerJ*, 2019, 7：e7877.

[48] XU M Q, YANG L Y, CHEN Y L, et al. Selection of rice and maize varieties with low cadmium accumulation and derivation of soil environmental thresholds in karst[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 247：114244.

（责任编辑：叶飞）