



农业资源与环境学报

CSCD 核心期刊
中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

不同玉米品种对镉积累和转运差异研究

张宁, 陶荣浩, 张慧敏, 周晓天, 高灿红, 胡兆云, 马友华

引用本文:

张宁, 陶荣浩, 张慧敏, 周晓天, 高灿红, 胡兆云, 马友华. 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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0600>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同基因型玉米品种对Pb的富集特征

秦榕璘, 李元, 祖艳群, 湛方栋, 陈建军

农业资源与环境学报. 2016, 33(3): 268–275 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0007>

基于多目标元素的重金属低累积水稻品种筛选及其吸收转运特征

冯爱煊, 贺红周, 李娜, 李伟, 魏世强, 蒋珍茂

农业资源与环境学报. 2020, 37(6): 988–1000 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0617>

7种紫花苜蓿对云南某铅锌矿区土壤镉铅的累积特征及品种差异

杨姝, 贾乐, 毕玉芬, 湛方栋, 陈建军, 李博, 祖艳群, 李元

农业资源与环境学报. 2018, 35(3): 222–228 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0334>

不同茶树品种吸收累积镉的差异研究

杨柳, 陈钰佩, 方丽, 石元值

农业资源与环境学报. 2021, 38(3): 401–410 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0336>

郴州尾矿区不同油菜品种对重金属吸收积累特性的比较

杨洋, 黎红亮, 陈志鹏, 廖柏寒, 曾清如

农业资源与环境学报. 2015(4): 370–376 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0210>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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.



开放科学 OSID

不同玉米品种对镉积累和转运差异研究

张宁¹, 陶荣浩¹, 张慧敏¹, 周晓天¹, 高灿红², 胡兆云³, 马友华^{1*}

(1. 农田生态保育与污染防治安徽省重点实验室, 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036; 2. 安徽农业大学农学院, 合肥 230036; 3. 铜陵市义安区农业技术推广中心, 安徽 铜陵 244100)

摘要:为探讨玉米对Cd积累和转运的种间差异,本研究以50个玉米品种为材料开展田间试验。通过聚类分析法筛选籽粒Cd高、中、低积累的品种,选择代表性品种分析植株各器官对Cd的富集和转运系数。结果表明:50个玉米品种籽粒Cd含量范围为0.09~0.85 mg·kg⁻¹,均符合国家饲料卫生标准,所有品种籽粒对Cd的富集系数均小于1。籽粒Cd高、中、低积累3类玉米品种分别占供试品种的8%(4个)、34%(17个)和58%(29个)。高、中、低积累代表品种根、茎叶、芯、籽粒对土壤中Cd的富集系数均小于1,高、中、低积累代表品种茎叶和籽粒对Cd的转运系数分别为1.17~1.31和0.60~0.76、0.90~0.96和0.26~0.27、0.84~0.87和0.08~0.10。高、中和低积累代表品种对土壤中Cd富集能力较强的部位分别为茎叶、根和根,且茎叶和籽粒对Cd转运能力依次降低。研究表明,50个玉米品种均可在严格管控类耕地种植生产饲料玉米,其中新单58、美加303等29个籽粒Cd低积累优势品种可在优先保护类和安全利用类耕地试种,生产安全可食用玉米。

关键词:玉米;镉;积累;转运;筛选

中图分类号:X173;S513

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2022)06-1208-09

doi: 10.13254/j.jare.2021.0600

Differences in cadmium accumulation and translocation in different varieties of *Zea mays*

ZHANG Ning¹, TAO Ronghao¹, ZHANG Huimin¹, ZHOU Xiaotian¹, GAO Canhong², HU Zhaoyun³, MA Youhua^{1*}

(1. Anhui Province Key Lab of Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention, College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2. College of Agronomy, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 3. Tongling Yi'an District Agricultural Technology Extension Center, Tongling 244100, China)

Abstract: To explore the differences in cadmium (Cd) bioaccumulation and translocation between maize varieties and to screen maize varieties with low seed Cd accumulation, a field experiment was carried out with 50 varieties of maize. Maize varieties with high, medium, and low accumulation of Cd in seeds were screened using cluster analysis. Representative varieties were selected to analyze the bioaccumulation and translocation factors of Cd in different plant organs. The results showed that the seed Cd content of the 50 maize varieties ranged from 0.09 to 0.85 mg·kg⁻¹, which meets the national feed hygiene standard. The bioaccumulation factor of Cd in the seeds of varieties was <1. According to cluster analysis, three types of maize with high, medium, and low accumulation were obtained, accounting for 8% (4), 34% (17), and 58% (29) of the tested varieties, respectively. The bioaccumulation factors of Cd in soil by roots, shoots, cobs, and seeds of high-, medium-, and low-accumulation representative varieties were <1, and the translocation factors of Cd in shoots and seeds were 1.17~1.31, 0.60~0.76; 0.90~0.96, 0.26~0.27; and 0.84~0.87, 0.08~0.10, respectively. The parts that exhibited a stronger Cd accumulation ability in the soil of representative high-, medium-, and low-accumulation maize varieties were shoots, roots, and roots, respectively, and the ability of shoots and seeds to transport Cd decreased sequentially. All 50 maize varieties were planted on strictly controlled cultivated land to produce maize feed. Among them, 29 dominant varieties with low accumulation of Cd in seeds, including Xindan 58 and Meijia 303, can be tested for priority protection and safe utilization of cultivated land to produce safe edible maize.

Keywords: *Zea mays*; cadmium; accumulation; translocation; screening

收稿日期: 2021-09-07 录用日期: 2021-12-22

作者简介: 张宁(1994—), 女, 安徽六安人, 硕士研究生, 从事土壤重金属治理修复研究。E-mail: e652579920@qq.com

*通信作者: 马友华 E-mail: yhma@ahau.edu.cn

基金项目: 安徽省自然科学基金项目(1908085MC69)

Project supported: Natural Science Foundation of Anhui Province, China(1908085MC69)

近年来,由于工矿企业的快速发展以及化肥农药的不合理施用,土壤污染愈发严重,尤其以重金属污染最为突出^[1-2]。相关研究表明重金属生物降解难度大,在土壤中不断积累并进一步富集在作物器官内,严重危害生态环境和人类身体健康^[3]。资料显示,我国每年因重金属污染导致的粮食损失超过1 000万t,经济损失总量达200亿元^[4],重金属防治已经刻不容缓。目前,控制重金属向食物链中转移主要有两种途径:一是通过化学方法钝化土壤中的重金属;二是筛选出对重金属有耐受性且积累量低的农作物品种^[5]。重金属低积累作物品种筛选研究具有操作简单、风险低、易推广等优点^[6],是当前受污染耕地安全利用的主要措施,品种选择上主要以水稻^[7]、小麦^[8]、玉米^[9]、白菜^[10]等为主。因此,通过探寻重金属在大宗粮食作物中富集的特征,筛选重金属低积累品种,对降低作物对重金属的吸收和积累,减少作物中重金属含量具有重要意义。

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,且籽粒对重金属的富集能力较低^[11]。因此,低积累玉米品种筛选工作对保障当前农产品安全和Cd污染农田修复具有重要意义。杨刚等^[12]分析了四川省主推的21个玉米品种对重金属Hg和As的积累特征,并分别筛选出Hg、As的低积累品种,为重金属污染土壤修复提供新思路。袁林等^[13]通过盆栽试验探讨了不同玉米品种对Cd的吸收累积差异,筛选出可用于重金属Cd污染土壤修复的玉米品种。陈建军等^[14]通过外源添加CdCl₂探索不同玉米品种对Cd积累和转运的种间差异,并筛选出适合云南Cd重度污染地区种植的3个品种。目前国内关于低积累玉米品种筛选的研究主要集中于四川、云南、广东等地,且局限于盆栽试验,而针对安徽省受污染耕地的重金属Cd低积累玉米品种筛选研究还未见报道。此外,已有研究中对玉米各器官重金属的积累研究主要集中于根、茎叶、籽粒,而玉米芯对重金属的富集及含量分布则鲜见报道。

本研究以安徽省农作物品种审定委员会审定或引种备案的适宜在安徽省合法种植的50个玉米品种为试验材料,通过在安徽省铜陵市义安区某严格管控类耕地进行大田试验,研究Cd胁迫对不同玉米品种生长的影响,以及玉米不同部位(根、茎叶、芯、籽粒)中Cd的分布和不同玉米品种对Cd积累及转运的种间差异,以期筛选出Cd低积累玉米品种,并探究Cd在玉米中的吸收转运及分布特征,为受污染耕地安全

利用及保障农产品质量安全提供有效参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验地点位于安徽省铜陵市义安区某严格管控类耕地,试验田周边存在大型铁硫矿。试验前土壤基本理化性质:pH 5.27,有机质34.22 g·kg⁻¹,全氮1.39 g·kg⁻¹,碱解氮58.01 mg·kg⁻¹,有效磷20.75 mg·kg⁻¹,速效钾87.5 mg·kg⁻¹,Cd 2.35 mg·kg⁻¹,根据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018),试验地Cd含量超出耕地土壤重金属污染风险管制值的1.57倍,土壤属于Cd重度污染。

1.2 供试材料及试验设计

供试玉米品种50个(表1),均为通过安徽省农作物品种审定委员会审定(引种)的品种,购自当地种子销售市场。

采用随机区组设计方法种植玉米,每个品种重复3次,共150个小区,行距65 cm,株距30 cm,小区面积7.2 m²(1.2 m×6 m),根据当地种植习惯采用双行种植,四周设保护行。播种前一周按照每亩(1亩=667 m²)50 kg播撒基肥氮磷钾三元复合肥(15:15:15),播前晒种,土壤含水量保持在最大田间持水量的60%~70%。2020年6月直接点播,正常田间水肥管理,并及时对田间进行排水和除虫等工作,9月成熟期采样

表1 供试玉米品种
Table 1 The varieties of *Zea mays*

编号 Number	品种 Variety	编号 Number	品种 Variety	编号 Number	品种 Variety
1	红大粒耕玉505	18	德单123	35	德单5号
2	秋乐618	19	MC121	36	嘉禧100
3	新单58	20	奥玉503	37	棒博士76
4	迪卡653	21	泛玉298	38	祺华703
5	京科968	22	农大372	39	明天695
6	NK718	23	金秋119	40	高玉2068
7	农单902	24	先达601	41	中科玉505
8	沃玉3号	25	巡天1102	42	邵单8号
9	强盛368	26	MC4520	43	武科2号
10	国禾918	27	京农科728	44	隆平206
11	美加303	28	禾茂808	45	鑫玉35
12	天泰316	29	金玉1233	46	鑫玉37
13	冀玉988	30	中单909	47	丰度191
14	郑单958	31	怀玉23	48	豫单9953
15	隆平218	32	联研35	49	皖玉708
16	京农科828	33	裕丰303	50	富诚796
17	苏玉29	34	德力666		

并收获,采集各试验小区不同玉米品种植株样及对应根际土样。

1.3 样品采集与分析

玉米成熟期取下果穗后晒干脱粒进行实际测产,并按梅花形取样法采集每个玉米品种5株,同时采集相对应的土壤样品(0~20 cm)组成混合土样。土壤样品自然风干后分别过10、60、100目筛备用,植株样品分为根、茎叶、芯、籽粒四部分,用自来水洗净后再用去离子水冲洗。根部使用10 mmol·L⁻¹的乙二胺四乙酸溶液清除Cd离子,再用去离子水清洗。在105℃烘箱中杀青30 min,70℃烘干至恒质量,测定干质量后粉碎,过100目筛备用。土壤和植株干样品经微波消解后,用原子吸收分光光度计测定Cd含量。

按照国标方法和《土壤农业化学分析方法》^[15]对土壤基本理化性质进行检测分析。土壤经去CO₂蒸馏水浸提(土水比为1:2.5)后用精密pH计(TART-ER2100)测定pH值。土壤全量Cd采用《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)中的方法测定,植株样品中总Cd测定参照《食品安全国家标准 食品中镉的测定》(GB 5009.15—2014),用德国耶拿Z700P原子吸收分光光度计石墨炉法测定。以国家标准参比物质土壤样品(GBW07461)和植物样品(GBW10012)进行质量控制,国家标准样品分析结果均在误差允许范围内。

1.4 统计分析

数据统计分析在SPSS和Excel软件中进行,处理间平均值的比较采用最小显著差数法(LSD),图表中的数据均采用平均值±标准差表示,差异显著水平为 $P<0.05$ 。采用Origin软件绘图。

茎叶、根富集系数=茎叶、根重金属含量/土壤相应重金属元素含量^[16]

(1)

籽粒富集系数=籽粒重金属含量/土壤相应重金属元素含量^[17]

(2)

芯富集系数=芯重金属含量/土壤相应重金属元素含量

(3)

籽粒转运系数=玉米籽粒重金属含量/茎叶重金属含量^[18]

(4)

茎叶转运系数=玉米茎叶重金属含量/根中重金属元素含量^[19]

(5)

2 结果与分析

2.1 不同玉米品种生物量及产量

不同玉米品种生物量及产量见表2。由表2可

知,不同玉米品种生物量及产量均存在显著差异。不同玉米品种根部生物量范围为1.99~23.79 g·株⁻¹(37号最低,48号最高),均值为5.82 g·株⁻¹;不同玉米品种茎叶生物量范围为26.47~70.12 g·株⁻¹(18号最低,50号最高),均值为54.47 g·株⁻¹;玉米芯生物量范围为6.41~28.80 g·株⁻¹(35号最低,30号最高),均值为18.66 g·株⁻¹。不同玉米品种产量范围为34.82~179.76 g·株⁻¹(35号最低,31号最高),均值为112.35 g·株⁻¹。

2.2 不同玉米品种籽粒、根际土壤Cd含量及聚类分析

2.2.1 不同玉米品种籽粒、根际土壤Cd含量差异分析

不同玉米品种籽粒、根际土壤Cd含量和籽粒富集系数见表3。由表3可知,不同玉米品种籽粒Cd含量存在显著差异。50个玉米品种籽粒Cd含量介于0.09~0.85 mg·kg⁻¹之间,均符合《饲料卫生标准》(GB 13078—2017)的要求(Cd≤1.0 mg·kg⁻¹),达标率为100%。除33号品种籽粒Cd含量未超过《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)规定的限值(Cd≤0.1 mg·kg⁻¹)外,其余均超标0.01~0.75 mg·kg⁻¹,超标率达到98%,这与试验区域土壤Cd含量高直接相关。

不同玉米品种根际土壤Cd含量范围为1.89~2.66 mg·kg⁻¹(18号最低,21号最高),均值为2.27 mg·kg⁻¹。不同玉米品种籽粒对土壤中Cd富集系数范围为0.040~0.386(33号最低,40号最高),均值为0.103。

2.2.2 不同玉米品种籽粒Cd含量聚类分析

50个供试玉米品种籽粒Cd含量均符合《饲料卫生标准》,为进一步筛选可在优先保护类耕地和安全利用类耕地试种且籽粒可安全食用的玉米品种,降低玉米籽粒Cd含量超标风险,对50个玉米品种进行聚类分析(图1),以期获得籽粒Cd低积累的玉米品种。由图1可知,50个玉米品种可分为高、中、低积累三类。其中高积累类型有8号、1号、10号、40号4个品种,玉米籽粒Cd含量介于0.47~0.85 mg·kg⁻¹之间,占供试品种的8%;中积累类型有2号、5号、50号等17个品种,玉米籽粒Cd含量介于0.22~0.32 mg·kg⁻¹之间,占供试品种的34%;低积累类型有33、25、49等29个品种,玉米籽粒Cd含量介于0.09~0.19 mg·kg⁻¹之间,占供试品种的58%,不同玉米品种籽粒Cd积累类型划分见表4。

2.3 不同玉米品种根、茎叶、芯Cd含量

为进一步探讨不同玉米品种对Cd的积累和转运特征,分别挑选籽粒Cd高、中、低积累代表玉米品种

表2 不同玉米品种生物量及产量(g·株⁻¹)
Table 2 Biomass and yield of different maize varieties(g·plant⁻¹)

编号 Number	生物量 Biomass			产量 Yield
	根 Root	茎叶 Shoot	芯 Corn cob	
1	4.48±0.95b	48.10±1.45mnopq	14.87±1.36uvw	86.30±5.98opq
2	3.04±0.62b	65.58±4.65ab	25.45±1.28bcde	128.70±8.26defg
3	6.22±0.19b	45.50±4.13opqr	18.48±2.31nopqr	122.41±7.07efghij
4	6.73±0.39b	61.46±1.94bcdefg	12.22±2.12xy	88.89±5.75opq
5	5.60±0.76b	66.44±2.58ab	11.11±1.23y	58.52±2.51s
6	5.64±0.39b	51.64±3.39jklmno	14.99±1.42uvw	87.96±4.26opq
7	8.50±0.53b	54.31±1.72hijklm	20.50±0.92jklmno	101.85±8.04lmno
8	3.48±0.62b	49.78±2.86jklmnop	15.52±0.80tuv	91.67±5.89nopq
9	2.30±0.29b	41.32±2.97rs	11.60±1.31xy	78.33±8.95qr
10	5.80±0.45b	57.46±1.86defghi	14.74±1.02uvw	87.78±4.39opq
11	8.90±0.98b	49.99±1.84jklmnop	10.47±0.86y	64.63±4.49rs
12	10.28±1.47b	63.84±2.37bcd	23.60±1.67efgh	154.63±1.61b
13	11.14±0.94b	63.52±2.73bcde	20.57±2.11jklmno	117.41±10.14efghijkl
14	7.79±0.71b	58.24±2.06cdefgh	7.52±1.21z	38.33±1.29t
15	2.67±0.70b	55.82±2.38fghij	18.15±1.86opqrs	104.81±9.53jklmno
16	6.84±1.97b	49.22±1.29klmnop	27.09±1.75abc	147.22±7.37bc
17	4.66±0.78b	63.21±2.11bcde	16.03±1.47stuv	81.48±5.14pqr
18	2.25±0.36b	26.47±0.96t	21.17±1.07ijklm	127.78±11.11defgh
19	5.69±0.50b	45.69±6.37opqr	19.39±1.65lmnopq	117.59±9.06efghijkl
20	5.43±1.09b	47.92±2.07nopq	21.35±0.97hijkl	125.92±11.81efghi
21	6.86±0.28b	54.46±4.40hijkl	20.68±1.81jklmn	108.34±7.67ijklmn
22	4.06±0.17b	62.60±3.61bcde	18.98±1.46lmnopq	115.19±8.26ghijklm
23	2.57±0.26b	55.23±2.44ghijk	19.56±0.79klmnopq	109.26±10.07hijklmn
24	3.85±0.40b	46.87±5.36opqr	11.41±1.19xy	75.00±7.35qrs
25	5.70±0.57b	57.63±6.11defghi	22.02±0.24hijk	115.74±6.32ghijklm
26	4.39±0.32b	64.23±2.89abc	16.17±0.94rstu	104.07±6.12jklmno
27	7.79±1.40b	58.46±6.21cdefgh	17.14±1.63qrstu	109.44±8.05hijklmn
28	6.37±0.97b	63.10±2.15bcde	18.16±1.38opqrs	121.30±6.57efghijk
29	4.76±0.22b	44.89±1.20pqr	25.38±1.22bcde	154.63±5.78b
30	5.58±0.44b	47.99±2.46mnopq	28.80±1.19a	150.92±9.30bc
31	6.95±1.22b	46.90±2.78opqr	26.33±0.63bcd	179.76±6.41a
32	2.87±0.78b	64.25±2.42abc	18.68±1.00mnopq	97.22±4.82mnop
33	5.75±0.92b	54.06±2.70hijklmn	11.88±1.14xy	133.07±5.53cdefg
34	6.21±0.41b	48.79±2.77lmnop	13.71±1.19vwx	87.59±4.87opq
35	4.39±0.42b	54.23±1.62hijklm	6.41±1.23z	34.82±1.63t
36	3.27±0.64b	46.83±3.17opqr	19.92±1.55klmnop	116.67±7.73fghijkl
37	1.99±0.38b	62.33±1.86bcde	23.45±1.34efghi	144.45±3.53bcd
38	5.75±0.45b	48.92±3.49lmnop	18.73±0.96mnopq	133.33±4.13cdefg
39	4.27±0.46b	65.23±1.53ab	24.48±1.37defg	136.11±3.84cde
40	4.12±0.95b	63.49±2.60bcde	25.49±0.69bcde	135.18±4.62cdef
41	4.99±0.25b	45.18±1.84pqr	25.68±0.89bcde	158.33±5.80b
42	3.06±0.49b	37.87±1.26s	22.77±1.10fghij	156.11±6.01b
43	2.95±0.30b	42.13±3.06qrs	24.94±0.72cdef	116.48±5.01fghijkl
44	8.57±0.71b	62.05±2.90bcdef	12.78±0.93wxy	107.41±3.60ijklmn
45	8.90±1.32b	61.23±4.10bcdefg	11.35±0.76xy	76.11±4.49qr
46	9.88±1.08b	58.32±6.58cdefgh	20.35±1.89jklmno	119.45±4.89efghijkl
47	6.97±0.32b	57.90±0.54cdefghi	22.46±1.13ghij	145.93±6.35bcd
48	23.79±31.21a	55.45±3.86ghijk	27.61±0.82ab	159.81±3.93b
49	3.49±0.53b	57.36±5.19efghi	17.58±0.99pqrst	102.78±6.66klmno
50	3.27±0.38b	70.12±3.25a	15.20±0.76uv	100.92±5.28lmno
平均值	5.82	54.47	18.66	112.35

注:同列不同小写字母表示不同品种间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in a column indicate significant differences among maize varieties ($P<0.05$). The same below.

表3 不同玉米品种籽粒、根际土壤Cd含量和籽粒富集系数

Table 3 Cd content in seeds and rhizosphere soil and seed bioaccumulation factor of different maize varieties

编号 Number	籽粒Cd含量 Cd content in seeds/(mg·kg ⁻¹)	根际土壤Cd含量 Cd content in rhizosphere soil/(mg·kg ⁻¹)	籽粒富集系数 Bioaccumulation factor in seeds
1	0.71±0.06b	2.26±0.02klmnopqr	0.315±0.024b
2	0.22±0.01lmno	2.13±0.03uv	0.103±0.008jklmn
3	0.13±0.01stuvwxy	1.89±0.08y	0.070±0.008qrstuv
4	0.29±0.01efgh	2.03±0.02wx	0.145±0.006ef
5	0.29±0.02efghi	2.30±0.06hijklmno	0.125±0.012fghij
6	0.26±0.03ghijk	2.42±0.03cdef	0.109±0.011hijklm
7	0.27±0.02ghij	2.33±0.02ghijklmn	0.115±0.007ghijkl
8	0.47±0.02d	2.41±0.03efg	0.195±0.006d
9	0.31±0.02efg	2.55±0.06b	0.120±0.006ghijk
10	0.62±0.02c	2.29±0.03ijklmnop	0.272±0.008c
11	0.16±0.03pqrstu	2.18±0.01pqrstuv	0.073±0.013pqrstu
12	0.30±0.02efgh	2.21±0.03mnopqrstu	0.136±0.012efg
13	0.27±0.02fghi	2.15±0.01rstuv	0.128±0.011efghi
14	0.28±0.02fghi	2.22±0.02mnopqrst	0.124±0.010fghij
15	0.31±0.03efg	2.29±0.02ijklmnop	0.135±0.011efg
16	0.18±0.01mnopqrs	2.36±0.02fghijk	0.074±0.004pqrstu
17	0.18±0.03mnopqr	2.39±0.02fghi	0.077±0.011opqrstu
18	0.17±0.02nopqrst	1.89±0.03y	0.091±0.008lmnopq
19	0.12±0.03uvwxy	1.95±0.03xy	0.061±0.014tuvwxy
20	0.14±0.02rstuvw	2.20±0.01nopqrstu	0.063±0.008rstuvwxy
21	0.16±0.03pqrstu	2.66±0.06a	0.062±0.012stuvwxy
22	0.11±0.02wxy	2.51±0.04bc	0.042±0.010xy
23	0.14±0.03rstuvw	2.36±0.02fghij	0.059±0.010uvwxy
24	0.17±0.04opqrst	2.27±0.02jklmnopq	0.074±0.014pqrstu
25	0.15±0.02pqrstuvw	2.38±0.02fghij	0.062±0.008stuvwxy
26	0.33±0.03e	2.48±0.03bcde	0.131±0.010efgh
27	0.11±0.03vwxy	2.41±0.20defg	0.046±0.014vwxy
28	0.18±0.02mnopqr	2.20±0.05opqrstu	0.084±0.011nopqrst
29	0.13±0.02tuvwxy	2.33±0.08ghijklmn	0.055±0.006uvwxy
30	0.22±0.03jklm	2.22±0.06mnopqrstu	0.102±0.012jklmn
31	0.10±0.01xy	2.39±0.01efgh	0.043±0.005xy
32	0.22±0.02klmn	2.24±0.05lmnopqrs	0.099±0.011klmno
33	0.09±0.01y	2.15±0.02rstuv	0.040±0.004y
34	0.15±0.02pqrstuvw	2.25±0.02klmnopqr	0.067±0.010rstuvw
35	0.19±0.02mnopq	2.17±0.02qrstuv	0.086±0.008mnopqr
36	0.11±0.02vwxy	2.38±0.02fghij	0.046±0.009wxy
37	0.15±0.02pqrstuvw	2.35±0.05fghijkl	0.063±0.006rstuvwxy
38	0.24±0.03ijkl	2.50±0.03bcd	0.096±0.014lmnop
39	0.24±0.02ijkl	2.40±0.03efg	0.102±0.011jklmn
40	0.85±0.06a	2.19±0.01pqrstu	0.386±0.033a
41	0.18±0.03mnopqr	2.13±0.03tuv	0.085±0.016nopqrs
42	0.15±0.00pqrstuvw	2.02±0.04wx	0.072±0.002pqrstu
43	0.25±0.02hijkl	2.38±0.04fghij	0.106±0.007ijklmn
44	0.17±0.02pqrstu	2.33±0.05fghijklm	0.072±0.007pqrstu
45	0.14±0.02qrstuvw	2.22±0.04mnopqrst	0.065±0.009rstuvw
46	0.18±0.02mnopqrs	2.29±0.03ijklmnop	0.077±0.010opqrstu
47	0.19±0.02mnopq	2.09±0.02vw	0.091±0.010mnopq
48	0.16±0.03pqrstuv	2.24±0.06klmnopqrs	0.069±0.012qrstuv
49	0.19±0.02mnop	2.27±0.03jklmnopq	0.086±0.009mnopqr
50	0.32±0.03ef	2.13±0.04tuv	0.149±0.013e
平均值	0.23	2.27	0.103

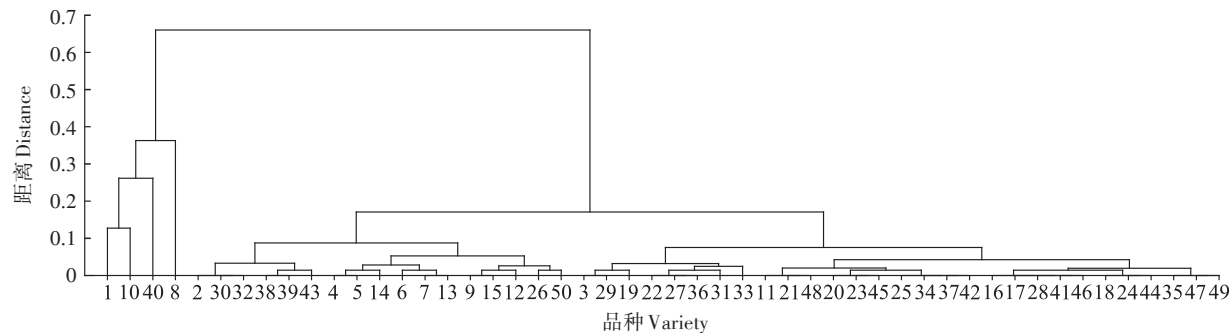


图1 不同玉米品种籽粒Cd含量聚类分析
Figure 1 Cluster analysis of Cd content in seeds of different maize varieties

表4 不同玉米品种(编号)籽粒Cd积累类型划分
Table 4 Classification of seeds Cd accumulation types of different maize varieties(number)

高积累型 High accumulation	中积累型 Medium accumulation			低积累型 Low accumulation				
1	2	12	32	3	20	27	35	45
8	4	13	38	11	21	28	36	46
10	5	14	39	16	22	29	37	47
40	6	15	43	17	23	31	41	48
	7	26	50	18	24	33	42	49
	9	30		19	25	34	44	

各两个(每种类型各选一个高产类型和低产类型),检测植株根、茎叶、芯的Cd含量。不同玉米品种根、茎叶、芯Cd含量见表5。由表5可知,玉米代表品种不同部位Cd含量差异显著,其中根部Cd含量介于0.91~1.28 mg·kg⁻¹之间,平均值为1.12 mg·kg⁻¹;茎叶Cd含量范围为1.07~1.19 mg·kg⁻¹,平均值为1.10 mg·kg⁻¹;芯Cd含量范围为0.51~0.94 mg·kg⁻¹,平均值为0.74 mg·kg⁻¹。总体来看,高积累代表品种Cd含量表现为茎叶>根>芯,中积累代表品种表现为根>茎叶>芯,低积累代表品种表现为根>茎叶>芯。

2.4 不同玉米品种对Cd积累和转运差异分析

2.4.1 不同玉米品种对Cd积累差异分析

作物对重金属的积累能力可用富集系数表示,不同玉米品种对土壤中Cd的富集系数如图2所示。其中高积累代表品种(1号、40号)根、茎叶、芯、籽粒的Cd富集系数分别为0.40~0.44、0.51~0.53、0.34~0.40、0.32~0.39,中积累代表品种(5号、12号)根、茎叶、芯、籽粒的Cd富集系数分别为0.52、0.47~0.49、0.22~0.23、0.12~0.14,低积累代表品种(31号、33号)根、茎叶、芯、籽粒的Cd富集系数分别为0.52~0.60、0.45~0.50、0.35~0.44、0.04。不同玉米品种各器官对Cd的积累能力有较大差异,但富集系数均小于1,说明各

表5 不同玉米品种根、茎叶、芯Cd含量
Table 5 Cd content in roots,shoots and corncobs of different maize varieties

类型 Type	编号 Number	Cd含量Cd content/(mg·kg ⁻¹)		
		根Root	茎叶Shoot	芯Corncob
高积累型	1	0.91±0.04d	1.19±0.03a	0.77±0.01c
	40	0.96±0.02d	1.12±0.06b	0.87±0.01b
中积累型	5	1.19±0.04bc	1.07±0.02b	0.51±0.05d
	12	1.14±0.04c	1.09±0.02b	0.51±0.05d
低积累型	31	1.24±0.03ab	1.07±0.01b	0.83±0.04b
	33	1.28±0.06a	1.07±0.01b	0.94±0.01a
平均值		1.12	1.10	0.74

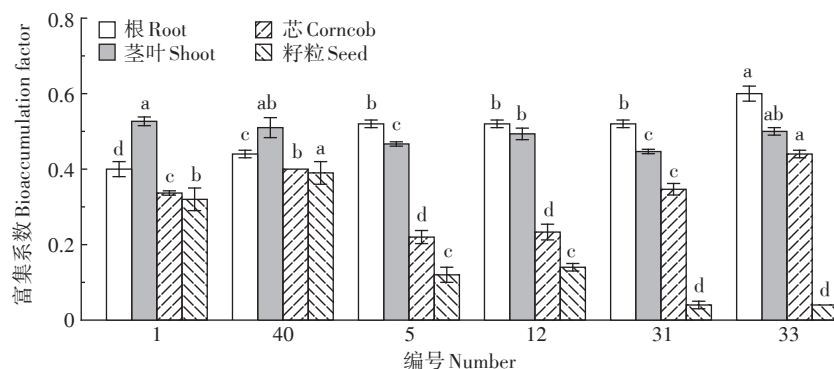
品种对Cd的吸收能力均较弱。其中高积累代表品种Cd富集系数表现为茎叶>根>芯>籽粒,中积累代表品种Cd富集系数表现为根>茎叶>芯>籽粒,低积累代表品种Cd富集系数表现为根>茎叶>芯>籽粒。

2.4.2 不同玉米品种对Cd转运差异分析

不同玉米品种对Cd的转运系数见图3。高积累代表品种(1号、40号)茎叶、籽粒对Cd的转运系数分别为1.17~1.31、0.60~0.76,中积累代表品种(5号、12号)茎叶、籽粒对Cd的转运系数分别为0.90~0.96、0.26~0.27,低积累代表品种(31号、33号)茎叶、籽粒对Cd的转运系数分别为0.84~0.87、0.08~0.10,具有明显的差异性。高积累代表品种茎叶对Cd的转运系数大于1,而中积累代表品种和低积累代表品种的茎叶转运系数均小于1,总体呈现出高积累型>中积累型>低积累型的趋势。不同玉米品种籽粒转运系数均小于1,整体表现为高积累型>中积累型>低积累型的趋势。

3 讨论

作物对重金属的吸收由外界环境和自身的遗传因素共同决定^[20]。段桂兰等^[21]的研究表明稻米中As的积累受到环境、遗传及环境与遗传交互作用的显著



不同小写字母表示同一器官不同品种间差异显著 ($P < 0.05$)。下同

Different lowercase letters on the same part of the plant indicate significant differences among different maize varieties ($P < 0.05$). The same below

图2 不同玉米品种对Cd的富集系数

Figure 2 Bioaccumulation factor of Cd in different maize varieties

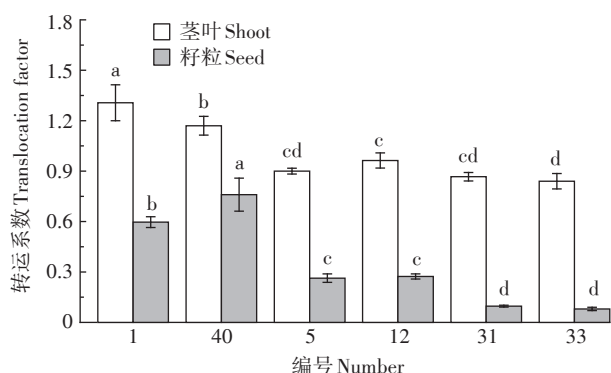


图3 不同玉米品种对Cd的转运系数

Figure 3 Translocation factor of Cd in different maize varieties

影响。本研究中外界环境条件一致,所以各玉米品种对Cd的吸收主要由自身的遗传因素决定。依据我国《土壤污染防治行动计划》,严格管控类耕地禁止种植可食用农产品,如种植需进行安全性评估。本研究中50个玉米品种籽粒中的Cd含量有较大差异,由于试验地Cd污染较为严重(>1.5 倍三级标准限值),绝大部分品种籽粒中的Cd含量高于《食品安全国家标准食品中污染物限量》中Cd的限值 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,但所有品种的籽粒Cd含量均未超过《饲料卫生标准》(GB 13078—2017)中Cd的限值 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,因此籽粒在成熟期收获时可作为动物饲料,其他部位作为修复部分回收处理,达到边生产、边修复的目的。所有玉米品种籽粒对土壤中Cd的富集系数均小于1,说明供试玉米品种对Cd均具有较好的耐受性。李乐乐等^[22]根据聚类分析等结果,筛选出16个小麦品种可优先用于中轻度污染耕地的推广种植。杜彩艳等^[23]通过对不同玉米品种籽粒重金属含量进行聚类分析,筛选出云瑞88等4个品种作为籽粒As、Pb、Cd低积累玉米品种。易春丽等^[24]通过聚类分析将不同水稻品种进行

分类。明毅等^[25]结合小麦籽粒Cd含量和籽粒产量进行聚类分析,获得籽粒Cd含量低且产量较高的优势小麦品种。本研究根据聚类分析结果将50个玉米品种划分为籽粒Cd高、中、低积累三种类型,分别为红大粒耕玉505、沃玉3号等4个高积累品种,秋乐618、迪卡653等17个中积累品种,以及新单58、美加303等29个低积累品种,各占供试玉米品种的8%、34%和58%,其中低积累类型可作为优势品种在优先保护类耕地和安全利用类耕地试种,以进一步筛选安全可食用玉米品种,降低玉米籽粒Cd超标风险。

玉米品种根、茎叶、芯、籽粒中的Cd含量分配规律也具有较大差异,其中高积累代表品种1号、40号表现为茎叶>根>芯>籽粒,中积累代表品种5号、12号表现为根>茎叶>芯>籽粒,低积累代表品种31号、33号表现为根>茎叶>芯>籽粒。陈建军等^[14]研究发现,玉米植株中的Cd含量分配表现为根>茎叶>籽粒,与本研究中的中积累和低积累代表品种一致。但也有茎叶>根>籽粒的研究结果^[5,26],与本研究中高积累代表品种一致,可能与品种差异和种植土壤的不同有关^[5]。不同玉米品种均表现为籽粒中的Cd含量最低,芯次之,而根和茎叶中的Cd含量较高,其中高积累代表品种1号、40号茎叶中的Cd含量明显高于植株其他部位,表明Cd主要分布于其茎叶中,而中、低积累代表品种植株中的Cd主要分布于根部,但与茎叶中的Cd含量差异不大。

不同玉米品种对Cd的积累和转运具有明显的差异性。辛艳卫等^[27]研究发现,不同玉米品种根、茎、叶、籽粒积累和转运Cd的能力存在显著差异。杨惟薇等^[28]的研究表明,不同玉米品种籽粒对土壤中Cd的富集能力同样具有差异性。本研究中,不同玉米品

种植株各器官对Cd的富集系数呈现出一定的规律性和差异性,高积累玉米代表品种Cd富集系数表现为茎叶>根>芯>籽粒,中、低积累玉米代表品种表现为根>茎叶>芯>籽粒,表明高积累代表品种茎叶的富集能力优于植株其他部位,而中、低积累代表品种根的富集能力较强,其次是茎叶,但三个品种均表现出从地下部向地上部(芯和籽粒)转移过程中Cd富集系数逐级递减的规律。转运系数是评价重金属在植物体内分配情况以及植物对重金属转运能力的重要依据^[29]。各玉米品种茎叶对Cd的转运系数也存在差异,表现为高积累代表品种>中积累代表品种>低积累代表品种,说明低积累代表品种将Cd从根部向地上部转移的能力较弱。研究表明,低积累作物的根部在减少对重金属吸收^[30]的同时,还会通过区室化保存抑制重金属由根部向地上部转移^[31]。本研究中各品种籽粒对Cd的转运系数均小于1。籽粒转运系数总体表现为高积累代表品种>中积累代表品种>低积累代表品种,说明低积累代表品种将Cd从茎叶转移到籽粒的能力比其他两组品种弱。这一方面可能是由于低积累代表品种植株中的Cd主要积累在根部,另一方面可能是因为Cd在低积累代表品种地上部各器官之间转移时,主要富集在茎叶和玉米芯中。后者可以从不同玉米品种各器官间的Cd含量差异和富集系数看出,即低积累代表品种玉米芯对Cd的富集系数明显高于中积累代表品种,且接近高积累代表品种。研究表明,Cd低积累玉米品种植株中与液泡或细胞壁结合的Cd活性较低,移动性较弱,上一器官能够拦截Cd向下一器官的转运和积累,而高积累玉米品种这种拦截能力相对较低^[17],这解释了不同积累类型玉米品种芯和籽粒中Cd含量的差异,但本研究中茎叶对Cd的拦截作用并不明显,今后还需进一步验证。

4 结论

(1)农田Cd重度污染条件下不同玉米品种的生物量和产量表现出明显的品种间差异。

(2)50个玉米品种籽粒中Cd含量差异显著,均符合国家饲料卫生标准,新单58、美加303、京农科828、苏玉29、德单123、MC121、奥玉503、泛玉298、农大372、金秋119、先达601、巡天1102、京农科728、禾茂808、金玉1233、怀玉23、裕丰303、德力666、德单5号、嘉禧100、棒博士76、中科玉505、邵单8号、隆平206、鑫玉35、鑫玉37、丰度191、豫单9953和皖玉708共29个品种为籽粒Cd低积累的优势品种。

(3)不同玉米品种器官间Cd的分布具有显著差异,高、中、低积累玉米代表品种依次表现为茎叶>根>芯>籽粒,根>茎叶>芯>籽粒,根>茎叶>芯>籽粒。

(4)高积累玉米代表品种茎叶对土壤中Cd的富集能力较强,而中、低积累玉米代表品种根对土壤中Cd的富集能力较强。

(5)高、中、低积累玉米代表品种茎叶和籽粒对Cd转运能力依次降低,且籽粒对Cd的转运能力均较弱。

参考文献:

- [1] HU Y A, CHENG H F, TAO S. The challenges and solutions for cadmium-contaminated rice in China: A critical review[J]. *Environment International*, 2016(92/93):515-532.
- [2] 冯爱煊, 贺红周, 李娜, 等. 基于多目标元素的重金属低累积水稻品种筛选及其吸收转运特征[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(6): 988-1000. FENG A X, HE H Z, LI N, et al. Screening of rice varieties with low accumulation of heavy metals based on multiple target elements and their absorption and transport characteristics in rice plants [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(6): 988-1000.
- [3] REYNDERS H, BERVOETS L, GELDERS M, et al. Accumulation and effects of metals in caged carp and resident roach along a metal pollution gradient[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 391(1): 82-95.
- [4] 薛涛, 廖晓勇, 王凌青, 等. 镉污染农田不同水稻品种镉积累差异研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(8):1818-1826. XUE T, LIAO X Y, WANG L Q, et al. Cadmium accumulation in different rice cultivars from cadmium-polluted paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(8):1818-1826.
- [5] 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.
- [6] 陈亮妹, 李江遐, 胡兆云, 等. 重金属低积累作物在农田修复中的研究与应用[J]. 作物杂志, 2018(1):16-24. CHEN L M, LI J X, HU Z Y, et al. Review on application of low accumulation crops on remediation of farmland contaminated by heavy metals[J]. *Crops*, 2018(1):16-24.
- [7] 陈彩艳, 唐文帮. 筛选和培育镉低积累水稻品种的进展和问题探讨[J]. 农业现代化研究, 2018, 39(6):1044-1051. CHEN C Y, TANG W B. A perspective on the selection and breeding of low-Cd rice[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2018, 39(6):1044-1051.
- [8] 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.

- [9] 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.
- [10] 杜俊杰, 李娜, 吴永宁, 等. 蔬菜对重金属的积累差异及低积累蔬菜的研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(6): 1193-1201. DU J J, LI N, WU Y N, et al. Variation in accumulation of heavy metals in vegetables and low accumulation vegetable varieties: A review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(6): 1193-1201.
- [11] 党志, 张慧, 易筱筠, 等. 污染农田土壤植物修复——边生产边修复的理念与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2021: 21-23. DANG Z, ZHANG H, YI X Y, et al. Phytoremediation of contaminated farmland soil: Concept and practice of remediation while production[M]. Beijing: Science Press, 2021: 21-23.
- [12] 杨刚, 吴传星, 李艳, 等. 不同品种玉米Hg、As积累特性及籽粒低积累品种筛选[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(6): 228-232. YANG G, WU C X, LI Y, et al. Accumulation characteristics of Hg and As in different maize varieties and screening their cultivars via low-grain accumulation[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2014, 14(6): 228-232.
- [13] 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 L, LIU Y, LAN Y S, 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.
- [14] 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 J J, YU W, ZU Y Q, et al. Variety difference of Cd accumulation and translocation in *Zea Mays*[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(10): 1671-1676.
- [15] 鲍士旦. 土壤农业化学分析方法[M]. 三版. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000. BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd Edition. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [16] 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 Q X, SONG Y F. Principles and methods of contaminated soil remediation[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [17] 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.
- [18] 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 X F, WEI Z B, QIU J R, 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.
- [19] FAYIGA A O, MA L Q, CAO X D, et al. Effects of heavy metals on growth and arsenic accumulation in the arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L.[J]. *Environmental Pollution*, 2004, 132(2): 289-296.
- [20] NORTON G J, DUAN G L, DASGUPTA T, et al. Environmental and genetic control of arsenic accumulation and speciation in rice grain: Comparing a range of common cultivars grown in contaminated sites across Bangladesh, China, and India[J]. *Environmental Science & 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 G L, ZHANG H M, LIU Y X, 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] 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.
- [23] 杜彩艳, 张乃明, 雷宝坤, 等. 砷、铅、镉低积累玉米品种筛选研究[J]. 西南农业学报, 2017, 30(1): 5-10. DU C Y, ZHANG N M, LEI B K, et al. Selection of varieties of *Zea mays* with low accumulation of heavy metals of arsenic, lead and cadmium[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2017, 30(1): 5-10.
- [24] 易春丽, 刘汇川, 李海英, 等. 镉低积累水稻品种筛选[J]. 湖南农业科学, 2020(6): 1-4. YI C L, LIU H C, LI H Y, et al. Screening of rice varieties with low cadmium and arsenic accumulation[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2020(6): 1-4.
- [25] 明毅, 张锡洲, 余海英. 小麦籽粒镉积累差异评价[J]. 中国农业科学, 2018, 51(22): 4219-4229. MING Y, ZHANG X Z, YU H Y. The evaluation of Cd accumulation in grains of different wheat materials[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(22): 4219-4229.
- [26] 吴传星. 不同玉米品种对重金属吸收累积特性研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2010. WU C X. Study on characteristics of heavy metals absorption and accumulation in the different maize varieties [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2010.
- [27] 辛艳卫, 梁成华, 杜立字, 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 Y W, LIANG C H, DU L Y, et al. Accumulation and translocation of cadmium in different maize cultivars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(5): 839-846.
- [28] 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.
- [29] 毛旭, 付天岭, 何腾兵, 等. 苦荞低镉积累品种筛选及富集转运特征分析[J]. 地球与环境, 2022, 50(1): 103-109. MAO X, FU T L, HE T B, et al. Screening of low cadmium accumulation cultivars of tartary buckwheat and analysis of the characteristics of bioconcentration and transportation[J]. *Earth and Environment*, 2022, 50(1): 103-109.
- [30] 刘源, 崔二苹, 李中阳, 等. 再生水和养殖废水灌溉下土壤-植物系统养分和重金属迁移特征[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(2): 45-51. LIU Y, CUI E P, LI Z Y, et al. Differences of nutrient and heavy metals migration in soil-plant system irrigated by reclaimed water and livestock wastewater[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(2): 45-51.
- [31] BAKER A J M. Accumulators and excluders—strategies in the response of plants to heavy metals[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1981, 3(1/2/3/4): 643-654.