

不同玉米品种镉积累及运移差异性研究

张彪¹,段恩忠²,师振亚¹,程海宽¹,周志云¹,周振¹,孙晓雪¹,苗丽娟³,杨素勤^{1*}

(1.河南农业大学资源与环境学院,河南郑州450002;2.驻马店市农村能源环境保护站,河南驻马店463000;

3.河南省农业科学院经济作物研究所,河南郑州450002)

摘要:为筛选出低积累镉(Cd)的玉米品种,选取25个玉米品种,在Cd污染耕地上进行田间试验,研究Cd在不同玉米品种植株内的积累、转运和富集差异性。结果表明,21个玉米品种籽粒Cd含量符合GB 2715—2005《粮食卫生标准》(≤ 0.1 mg/kg),但只有济单7号、农华101、郑单136、郑韩358、郑单958、鑫玉37、鑫玉13、先玉335八个品种符合NY 861—2004《粮食及制品中铅、铬、镉、汞、砷、铜、锌等8种元素限量》(≤ 0.05 mg/kg)。玉米不同器官Cd含量由高到低依次为根、茎叶、籽粒。玉米对重金属的运移及积累研究结果进一步证实,籽粒Cd积累的品种差异主要在于Cd从茎叶向籽粒中转移的能力。8个Cd低积累特性品种从根系向籽粒的Cd转运系数平均为0.0029,籽粒对土壤中Cd的富集系数平均为0.0071。其中,济单7号和农华101具有成为Cd低积累特性品种的潜力。

关键词:玉米;镉;低积累;吸收;转运

中图分类号: S513 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-3268(2017)09-0025-05

Study on the Differences in Cadmium Accumulation and Transport among Maize Cultivars

ZHANG Biao¹, DUAN Enzhong², SHI Zhenya¹, CHENG Haikuan¹, ZHOU Zhiyun¹,
ZHOU Zhen¹, SUN Xiaoxue¹, MIAO Lijuan³, YANG Suqin^{1*}

(1. College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;

2. Zhumadian Rural Energy Environmental Protection Station, Zhumadian 463000, China;

3. Industrial Crops Research Institute, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Field experiment in cadmium(Cd) polluted farmland was conducted to study differences in Cd transportation and accumulation among cultivars by using twenty-five maize cultivars. The results showed that twenty-one cultivars of grain Cd content could meet the hygienic standard for grains GB 2715—2005 (0.1 mg/kg or less), but only eight cultivars (Jidan 7 and Nonghua 101, Zhengdan 136, Zhenghan 358, Zhengdan 958, Liyu 37, Liyu 13, Xianyu 335) could reach the hygienic limit standard for grains NY 861—2004 (0.05 mg/kg or less). The contents of the Cd for different maize organs in descending order were the root, the stem leaf, and the grain. Further study on the transportation and accumulation of heavy metal confirmed that the differences among cultivars in grain Cd content mainly depended on the Cd transfer capacity from the stem leaf to the grain. These eight cultivars had an average transport coefficient from root to seed of 0.0029 and enrichment coefficient for seed of 0.0071. Among them, Jidan 7 and Nonghua 101 have low-accumulation characteristics.

Key words: maize; Cd; low accumulation; uptake; transport

收稿日期:2017-02-07

基金项目:河南省科技攻关计划项目(162102110127);国家自然科学基金项目(41571320);河南农业大学科技创新基金项目(KJCX2016A15)

作者简介:张彪(1984-),男,河南焦作人,讲师,博士,主要从事土壤污染修复研究。E-mail:zhangbiao6136@163.com

* 通讯作者:杨素勤(1962-),女,河南郑州人,教授,本科,主要从事农田重金属污染防控与修复研究。

E-mail:yang_suqin@126.com

根据《全国土壤污染状况调查公报》^[1], 全国土壤污染超标率达 16.1%, 耕地点位超标率达 19.4%。其中, 镉(Cd)元素的点位超标率达 7.0%, 在所有污染物中比例最高。Cd 容易进入食物链, 在人体内蓄积对健康产生严重威胁^[2]。土壤 Cd 污染已成为人类生存环境与健康的主要威胁之一。因此, 针对耕地 Cd 污染条件下农产品安全进行研究具有重要的理论意义和实践价值。目前, 筛选对重金属低积累的作物品种, 使可食用部位重金属含量达到安全食用标准, 降低重金属向食物链转移, 是一个行之有效的方法。该方法既可以充分利用耕地, 又可以保证粮食安全^[3], 同时也能为联合其他技术修复土壤提供种质资源。

目前, 作物对重金属吸收的种内差异研究主要集中于玉米^[4-5]、水稻^[6-8]、小麦^[9]、白菜^[10]等。玉米具有种植面积广、生长周期短、生物量大等特点, 且其籽粒对重金属的累积能力较低, 筛选出适宜的具有重金属低积累特性的玉米品种, 将成为土壤修复的重要手段。重金属从土壤进入玉米籽粒经历了土壤—根系—根系—茎—茎—叶—籽粒等过程, 若要进一步确定重金属的关键运输环节则需通过测算转运系数、富集系数^[4-5], 然而, 目前, 针对河南地区广泛种植的玉米品种的 Cd 转运和富集差异性研究较为缺乏。此外, 不同积累特性的玉米品种籽粒 Cd 含量尤其是在豫北石灰性污染土壤条件下的 Cd 积累水平研究也较少。鉴于此, 选用河南省种植的 25 个玉米品种, 以籽粒 Cd 积累水平为切入点, 研究 Cd 在玉米体内的积累、转运和富集差异性, 力图筛选出具有 Cd 低积累特性的玉米品种, 为安全利用重金属污染耕地提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 试验地概况与供试材料

试验地选择豫西某冶炼企业西 1.5 km 的耕地, 该地土壤理化性质: pH 值 7.8, 有机质含量 19.99 g/kg, 速效磷含量 22.95 mg/kg, 速效钾含量 177.4 mg/kg, 碱解氮含量 177.64 mg/kg, 全镉含量 4.9 mg/kg, DTPA 提取态 Cd 含量 1.73 mg/kg。河南省“七五”期间调查该地区土壤 Cd 背景值为 0.074 mg/kg^[11]。

供试玉米品种: 济单 7 号、农华 101、郑单 136、

郑韩 358、郑单 958、蠡玉 37、蠡玉 13、先玉 335、罔玉 118、漯玉 336、中科 11、豫禾 858、京科 220、漯单 9 号、浚单 20、郑韩 9 号、金骆驼 335、德利农 988、新单 33、豫单 811、张玉 9 号、登海 605、金丹 3 号、淦玉 178 和阳光 98, 共计 25 个。

1.2 试验设计

采用完全随机区组设计, 试验共分 3 个区组, 每个区组均分为 25 个小区, 每个区组内随机种植 25 个品种。每个小区种 4 行, 行距 50 cm, 株距 35 cm, 按当地传统模式进行田间管理。

1.3 测定项目及方法

植株 Cd 含量: 随机选取 5 株成熟玉米植株, 分根、茎叶、籽粒三部分。105 ℃杀青后, 85 ℃烘至恒质量, 粉碎, 充分混匀。用混合酸($V_{\text{HNO}_3} : V_{\text{HClO}_4} = 4:1$)进行消煮, 采用原子吸收分光光度法(ZEEnit 700)测定。

Cd 富集系数(BCF)及转运系数(TF)^[12]计算:

$$\text{BCF}_{\text{茎叶}} = \text{茎叶 Cd 含量} / \text{土壤中 Cd 含量};$$

$$\text{BCF}_{\text{籽粒}} = \text{籽粒 Cd 含量} / \text{土壤中 Cd 含量};$$

$$\text{TF}_{(\text{籽粒/根})} = \text{籽粒 Cd 含量} / \text{根 Cd 含量};$$

$$\text{TF}_{(\text{茎叶/根})} = \text{茎叶 Cd 含量} / \text{根 Cd 含量};$$

$$\text{TF}_{(\text{籽粒/茎叶})} = \text{籽粒 Cd 含量} / \text{茎叶 Cd 含量}。$$

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2010 和 DPS 软件进行数据处理与分析。

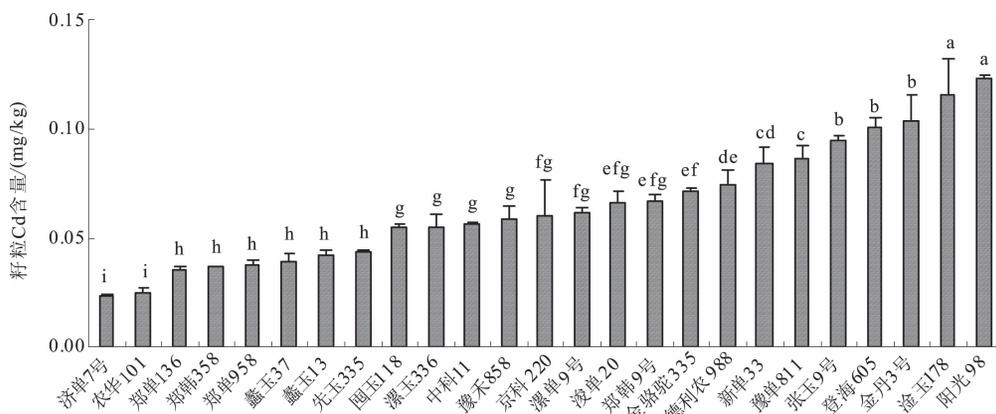
2 结果与分析

2.1 不同玉米品种籽粒的 Cd 含量分析

由表 1 可见, 25 个玉米品种籽粒的 Cd 含量为 0.023 ~ 0.123 mg/kg, 平均含量为 0.065 mg/kg, 其中, 济单 7 号籽粒 Cd 含量最低, 阳光 98 籽粒 Cd 含量最高。整体上, 玉米品种间籽粒 Cd 含量存在较大差异(图 1)。GB 2715—2005《粮食卫生标准》规定, 玉米籽粒 Cd 限量为 0.1 mg/kg; NY 861—2004《粮食及制品中铅、铬、镉、汞、硒、砷、铜、锌等 8 种元素限量》(以下简称《粮食限量标准》)规定, 玉米籽粒限量为 0.05 mg/kg。参照此标准发现, 有 21 个玉米品种的籽粒 Cd 含量符合 GB 2715—2005《粮食卫生标准》, 但仅有 8 个品种符合 NY 861—2004《粮食限量标准》。

表 1 玉米籽粒 Cd 含量分析

品种/个	最小值/(mg/kg)	最大值/(mg/kg)	平均值/(mg/kg)	变异系数/%	符合粮食卫生标准/个	符合粮食限量标准/个
25	0.023	0.123	0.065	43	21	8



不同小写字母表示品种间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

图 1 不同玉米品种籽粒的 Cd 含量

为便于数据比较,将 25 个玉米品种籽粒 Cd 含量分成 3 类,第 1 类为 Cd 积累相对较弱品种 ($\leq 0.05 \text{ mg/kg}$),这类籽粒 Cd 含量符合《粮食限量标准》;第 2 类为 Cd 积累一般品种 ($> 0.05 \text{ mg/kg}$ 但 $\leq 0.1 \text{ mg/kg}$),品种籽粒 Cd 含量符合《粮食卫生标准》但不符合《粮食限量标准》;第 3 类为 Cd 积累较强品种 ($> 0.1 \text{ mg/kg}$),品种籽粒 Cd 含量不符合《粮食卫生标准》。本研究重点分析第 1 类玉米和第 3 类玉米对 Cd 的吸收富集差异。

2.2 不同 Cd 积累强度玉米品种籽粒、茎叶、根的 Cd 含量

由表 2 可知,玉米品种不同部位 Cd 含量表现为根 $>$ 茎叶 $>$ 籽粒。由此分析,根是玉米吸收和储存重金属的主要器官,对 Cd 向地上部运输起到限制作用。

Cd 积累作用相对较弱的 8 个玉米品种中,籽粒 Cd 含量平均为 0.035 mg/kg ,其中,济单 7 号、农华 101 的籽粒 Cd 含量显著低于其他 6 个品种,但这 6 个品种间的籽粒 Cd 含量差异不显著。Cd 积累作用相对较强的 4 个品种中,籽粒 Cd 含量平均为 0.111 mg/kg ,为《粮食卫生标准》规定玉米籽粒 Cd 限量的 1.11 倍。其中,阳光 98、淦玉 178 的籽粒 Cd 含量显著高于金丹 3 号和登海 605。Cd 积累相对较强的玉米品种平均籽粒 Cd 含量是 Cd 积累相对较弱品种的 3.17 倍。

Cd 积累作用相对较弱的 8 个玉米品种茎叶 Cd 含量平均为 6.534 mg/kg ,Cd 积累作用相对较强的 4 个品种茎叶 Cd 含量平均为 6.120 mg/kg ,Cd 积累相对较弱品种平均茎叶 Cd 含量略高于 Cd 积累相对较强的品种。Cd 积累作用相对较弱的 8 个品种根 Cd 含量平均为 12.156 mg/kg ,Cd 积累作用相对较强的 4 个品种根 Cd 含量平均为 12.232 mg/kg 。

表 2 不同 Cd 积累强度玉米品种籽粒、茎叶、根的 Cd 含量 mg/kg

Cd 积累强度	品种	部位		
		籽粒	茎叶	根
较弱	济单 7 号	0.023e	7.488b	11.996bcd
	农华 101	0.024e	6.384c	10.195de
	郑单 136	0.035cd	7.149b	13.421abc
	郑单 358	0.036c	7.301b	11.792bcd
	郑单 958	0.037c	7.326b	10.259de
	鑫玉 37	0.039c	6.269c	13.322abc
	鑫玉 13	0.042c	5.456de	10.816de
	先玉 335	0.043c	4.897g	15.445a
	平均	0.035	6.534	12.156
较强	登海 605	0.101b	5.175de	9.586f
	金丹 3 号	0.104b	5.798cd	11.110cd
	淦玉 178	0.116a	5.056f	13.559ab
	阳光 98	0.123a	8.451a	14.674a
	平均	0.111	6.120	12.232

注:同列不同小写字母表示品种间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

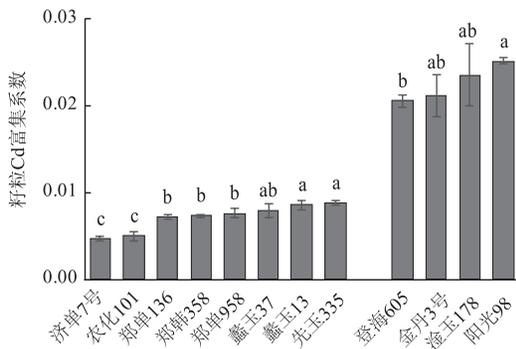
2.3 不同 Cd 积累强度玉米品种的 Cd 转运系数及富集系数

$TF_{\text{籽粒/根}}$ 表示重金属从根部向籽粒中的转运程度, $TF_{\text{茎叶/根}}$ 是重金属从根部向茎叶中的转运程度,二者比例越小,表明重金属从根部向籽粒和茎叶中转运越困难; $TF_{\text{籽粒/茎叶}}$ 表示重金属从茎叶向籽粒中转运的能力,比值越大,表明重金属越容易从茎叶中向籽粒中转运。由表 3 可知,2 类玉米品种不同部位转运系数表现为 $TF_{\text{茎叶/根}} > TF_{\text{籽粒/茎叶}} > TF_{\text{籽粒/根}}$ 。Cd 积累作用相对较强的玉米品种 $TF_{\text{籽粒/根}}$ 和 $TF_{\text{籽粒/茎叶}}$ 均高于 Cd 积累作用相对较弱的品种,Cd 积累作用相对较强的品种其平均 $TF_{\text{籽粒/根}}$ 为 0.009 2,是 Cd 积累作用相对较弱品种 (0.002 9) 的 3.17 倍;Cd 积累作用相对较强的玉米品种其平均 $TF_{\text{籽粒/茎叶}}$ 为 0.020 1,是 Cd 积累作用相对较弱品种 (0.005 6) 的 3.59 倍。Cd 积累作用相对较强的玉米品种 $TF_{\text{茎叶/根}}$

表 3 玉米不同部位 Cd 转运系数

Cd 积累强度	品种	TF _{籽粒/根}	TF _{籽粒/茎叶}	TF _{茎叶/根}
较弱	济单 7 号	0.001 9d	0.003 0f	0.624 2b
	农华 101	0.002 4cd	0.003 8e	0.627 1b
	郑单 136	0.002 6cd	0.004 9d	0.532 9bc
	郑韩 358	0.003 1bc	0.004 9d	0.620 5b
	郑单 958	0.003 8ab	0.005 2d	0.735 0a
	蠡玉 37	0.002 9e	0.006 2c	0.470 7c
	蠡玉 13	0.003 9a	0.007 7b	0.504 5c
	先玉 335	0.002 8c	0.008 8a	0.317 3d
	平均	0.002 9	0.005 6	0.554 0
	较强	登海 605	0.010 5a	0.019 6b
金丹 3 号		0.009 4a	0.017 9bc	0.524 8a
淦玉 178		0.008 5a	0.028 4a	0.299 1b
阳光 98		0.008 4a	0.014 6c	0.581 4a
平均		0.009 2	0.020 1	0.486 2

为 0.486 2, 仅为 Cd 积累作用相对较弱品种(0.554 0) 的 0.877。据此分析, 相比于 Cd 从根部向茎叶的转移能力 (TF_{茎叶/根}), Cd 从茎叶向籽粒转移的能力



(TF_{籽粒/茎叶}) 较弱。此外, Cd 从根系进入籽粒的过程中, Cd 积累作用相对较弱和较强的品种主要区别在于 Cd 从茎叶向籽粒中转移的能力 (TF_{籽粒/茎叶})。

BCF_{籽粒} 表示籽粒对 Cd 的富集能力, BCF_{茎叶} 则代表茎叶对 Cd 的富集能力。由图 2 可知, 2 类玉米品种不同部位的富集系数均表现为 BCF_{茎叶} > BCF_{籽粒}。Cd 积累作用相对较弱的玉米品种平均 BCF_{籽粒} 为 0.007 1, 其中, 济单 7 号和农华 101 的最低, 分别为 0.004 6 和 0.005 0; Cd 积累作用相对较强的玉米品种平均 BCF_{籽粒} 为 0.022 6, 是 Cd 积累作用相对较弱品种的 3.18 倍, Cd 积累作用相对较强的玉米品种, 其籽粒更易富集 Cd。Cd 积累作用相对较强的玉米品种平均 BCF_{茎叶} 为 1.198, 是 Cd 积累作用相对较弱品种(1.333) 的 0.90 倍。可见, 玉米对 Cd 富集能力的差异在于籽粒对 Cd 富集能力的强弱程度。

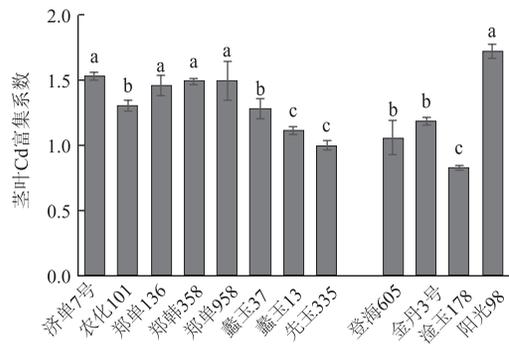


图 2 不同玉米品种籽粒与茎叶的 Cd 富集系数

3 结论与讨论

本研究供试 25 个玉米品种中, 21 个品种的籽粒 Cd 含量符合 GB 2715—2005《粮食卫生标准》(≤ 0.1 mg/kg), 但其中只有 8 个品种符合 NY 861—2004《粮食限量标准》(≤ 0.05 mg/kg), 分别是济单 7 号、农华 101、郑单 136、郑韩 358、郑单 958、蠡玉 37、蠡玉 13、先玉 335。这些品种由根系向籽粒的 Cd 转运系数平均为 0.002 9, 籽粒 Cd 富集系数平均为 0.007 1, 远小于 1。

重金属在植物体内富集经过 3 个过程: (1) 重金属从土壤进入植物根部; (2) 借助木质部从根部到茎部, 即本研究中 TF_(茎叶/根); (3) 从茎到籽粒^[13], 即本研究中 TF_(籽粒/茎叶)。笔者发现, 污染耕地中 Cd 积累作用相对较弱与相对较强的玉米品种对 Cd 的吸收差异主要在于后面 2 个过程。Florijn 等^[14] 研究证明, Cd 在植物体内主要以自由离子形式在木质部流液中运输。另外, 重金属向地上部运输还受蒸

腾作用的影响, 研究认为, 蒸腾作用越强, 重金属向茎叶中运输的越多^[15]。不同基因型玉米的凯氏带结构及木质部、韧皮部内部化合物种类和含量不同, 造成蒸腾作用存在差异, 这些差异导致不同玉米品种对重金属的吸收存在显著差异, 为筛选重金属低积累玉米品种提供了理论基础。

受重金属胁迫时, 作物的耐性必然受体内重金属不同化学形态含量及体内重金属亚细胞分布的影响。研究发现, 玉米 Cd 积累的品种差异可能与其体内 Cd 的化学形态、亚细胞形态分布差异有关^[16]。高积累 Cd 水稻品种体内的可溶性 Cd 含量显著高于低 Cd 品种, 乙醇提取态和去离子水提取态 Cd 含量所占比例同样高于低 Cd 水稻品种^[17]。受 Cd 胁迫时, Cd 敏感型大麦中的 Cd 主要分布在叶绿体等细胞器中, 其含量明显高于耐 Cd 型大麦品种, 且体内的活性态 Cd 含量同样高于耐 Cd 型品种^[18]。因此, 今后可进一步研究不同 Cd 吸收类型玉米品种体内 Cd 化学形态及亚细胞分布的差异, 为 Cd 低积

累品种的筛选提供进一步的理论基础。

关于低积累、低吸收重金属的农作物品种筛选,国内外已经做了较为广泛的研究^[19],但低积累品种没有详细的统一标准,任何标准其最重要的特征均是植物可食部位的重金属含量符合安全标准。刘维涛等^[20]对低积累重金属的植物概括得比较全面,认为理想的低积累重金属的植物应同时具备4个特征:(1)植物地上部和根部重金属积累很低或可食部位低于有关标准;(2)植物尤其是可食部位对重金属的富集系数 <1 ;(3)重金属由根系向茎叶的转运系数 <1 ;(4)在较高的重金属污染下能够正常生长且生物量无明显下降。这一观点,从作物品种对重金属的吸收累积能力、可食部位重金属积累以及作物产量多个方面进行划分,比较全面详细,但在实际工作中,所需测定数据量大、耗费时间长。且通过本研究发现,所选25个玉米品种的籽粒Cd富集系数和Cd从根系向茎叶的转移系数均小于1,因此关于对重金属转运系数、富集系数小于1的划分标准较为宽松。笔者认为,具有重金属低积累特性的玉米品种应具备可食部位重金属含量低于有关标准,产量没有明显减少,转运系数、富集系数还应通过大量的试验数据进行研究确定。

总体而言,本研究中参试玉米品种不同器官Cd含量由高到低依次均为根、茎叶、籽粒,籽粒Cd富集系数均小于1,不同玉米品种对Cd的吸收差异较大。Cd积累作用较强和较弱的2类品种主要区别在于Cd从茎叶向籽粒中转移的能力,本研究中济单7号和农华101具有成为Cd低积累特性品种的潜力。

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)[2017-01-02]. http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/qt/t20140417_270670.htm.
- [2] 崔岩山,陈晓晨. 土壤中镉的生物可给性及其对人体的健康风险评估[J]. 环境科学,2010,31(2):403-408.
- [3] Yan Y F, Choi D H, Kim D S, *et al.* Genotypic variation of cadmium accumulation and distribution in rice[J]. Journal of Crop Science and Biotechnology, 2010, 13(2):69-73.
- [4] 李月芳,刘领,陈欣,等. 模拟铅胁迫下玉米不同基因型生长与铅积累及各器官间分配规律[J]. 农业环境科学学报,2010,29(12):2260-2267.
- [5] 郭晓方,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.
- [6] Arao T, Ae N. Genotypic variations in cadmium levels of rice grain[J]. Soil Science and Plant Nutrition,2003,49(4):473-479.
- [7] Liu J G, Qian M, Cai G L, *et al.* Uptake and translocation of Cd in different rice cultivars and the relation with Cd accumulation in rice grain[J]. Journal of Hazardous Materials,2007,143(2):443-447.
- [8] Zeng F R, Mao Y, Cheng W D, *et al.* Genotypic and environmental variation in chromium, cadmium and lead concentrations in rice [J]. Environmental Pollution, 2008, 153:309-314.
- [9] 高巍,耿月华,赵鹏,等. 不同小麦品种对重金属镉吸收及转运的差异研究[J]. 天津农业科学,2014,20(10):55-59.
- [10] Liu W T, Zhou Q X, Sun Y E, *et al.* Identification of chinese cabbage genotypes with low cadmium accumulation for food safety [J]. Environmental Pollution, 2009, 157(6):1961-1967.
- [11] 中国环境保护总局,中国环境监测总站. 土壤污染与人体健康[M]. 北京:中国环境科学出版社,1990:366.
- [12] 聂发辉. 关于超富集植物的新理解[J]. 生态环境,2005,14(1):136-138.
- [13] Clemens S, Palmgren M G, Kramer U. A long way ahead: Understanding and engineering plant metal accumulation [J]. Trends in Plant Science,2002,7:309-315.
- [14] Florijn P J, Nelemans J A, Van Beusichem M L. The influence of the form of nitrogen nutrition on uptake and distribution of cadmium in lettuce varieties [J]. Journal of Plant Nutrition,1992,15(11):2405-2416.
- [15] 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,2008,16(5):1317-1321.
- [16] Vatehova Z, Malovikova A, Kollarova K, *et al.* Impact of cadmium stress on two maize hybrids[J]. Plant Physiology and Biochemistry,2016,108(11):90-98.
- [17] 于辉,杨中艺,杨知建,等. 不同类型镉积累水稻细胞镉化学形态及亚细胞和分子分布[J]. 应用生态学报,2008,19(10):2221-2226.
- [18] Wu F B, Dong J, Qian Q Q, *et al.* Subcellular distribution and chemical form of Cd and Cd-Zn interaction in different barley genotypes [J]. Chemosphere,2005,60(10):1437-1446.
- [19] Murakami M, Ae N, Ishikawa S. Phytoextraction of cadmium by rice (*Oryza sativa* L.), soybean (*Glycine max* (L.) Merr.), and maize (*Zea mays* L.) [J]. Environmental Pollution,2007,145(1):96-103.
- [20] 刘维涛,周启星,孙约兵,等. 大白菜对铅积累与转运的品种差异研究[J]. 中国环境科学,2009,29(1):63-67.