

低镉高产春小麦品种筛选及富集转运特征分析

马凤仪, 马立超, 赵宝平, 王永宁, 鲁瑞英, 郭晓宇, 陈淼, 刘景辉

引用本文:

马凤仪, 马立超, 赵宝平, 王永宁, 鲁瑞英, 郭晓宇, 陈淼, 刘景辉. 低镉高产春小麦品种筛选及富集转运特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(5): 994–1003.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0980>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同类型水稻镉富集与转运能力的差异分析

蔡秋玲, 林大松, 王果, 王迪

农业环境科学学报. 2016, 35(6): 1028–1033 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.06.002>

不同燕麦品种籽粒镉富集特征及安全风险评估

马凤仪, 赵宝平, 张茹, 杨波, 王永宁, 郭晓宇, 陈淼, 刘景辉

农业环境科学学报. 2022, 41(11): 2458–2467 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0180>

不同玉米(Zeamays)品种对镉锌积累与转运的差异研究

杜彩艳, 张乃明, 雷宝坤, 胡万里, 付斌, 陈安强, 毛妍婷, 木霖, 王红华, 严婷婷, 段宗颜, 雷梅

农业环境科学学报. 2017, 36(1): 16–23 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0872>

不同小麦品种对大田中低量镉富集及转运研究

熊孜, 李菊梅, 赵会薇, 马义兵

农业环境科学学报. 2018, 37(1): 36–44 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0811>

长江中下游麦区不同小麦品种镉积累差异研究

易超, 史高玲, 陈恒强, 姚澄, 潘云俊, 石月红, 李标, 高岩

农业环境科学学报. 2022, 41(6): 1164–1174 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1373>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

马凤仪, 马立超, 赵宝平, 等. 低镉高产春小麦品种筛选及富集转运特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(5): 994–1003.

MA F Y, MA L C, ZHAO B P, et al. Screening Cd enrichment and transport characteristics of low-cadmium and high-yield spring wheat varieties[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(5): 994–1003.

低镉高产春小麦品种筛选及富集转运特征分析

马凤仪¹, 马立超¹, 赵宝平^{1*}, 王永宁², 鲁瑞英³, 郭晓宇², 陈森⁴, 刘景辉¹

(1. 内蒙古农业大学农学院, 呼和浩特 010019; 2. 内蒙古农牧业生态与资源保护中心, 呼和浩特 010000; 3. 巴彦淖尔市耕地质量监测保护中心, 巴彦淖尔 015000; 4. 乌拉特后旗农村牧区生态能源环保站, 巴彦淖尔 015000)

摘要: 筛选具有低Cd积累且高产特性的春小麦(*Triticum aestivum* L.)品种, 可使春小麦在轻度Cd污染农田得到安全生产利用。本研究以21个春小麦品种(编号X1~X21)为研究对象, 于2020年和2021年连续2年开展大田试验, 通过籽粒Cd含量和产量聚类分析, 筛选具有低Cd高产特性的春小麦品种, 并分析不同类型春小麦产量、Cd富集、转运系数差异。结果表明, X4、X6~X8、X10、X16~X21等11个品种具有低Cd高产特性, 且靶标危害系数均小于1, X14为Cd高积累且低产品种, 这两种类型分别占供试品种的52.38%和4.76%; 综合2年试验结果, 低产中Cd类型春小麦品种茎的富集系数较高产低Cd类型春小麦品种高0.4倍, 低产高Cd类型春小麦品种根、茎、叶、颖壳到籽粒的Cd转运系数较高产低Cd类型春小麦品种分别显著高2.5、2.2、1.8、2.2倍。研究表明, 丰强6号、丰强11号等11个高产低Cd春小麦品种可在Cd污染农田推广种植。

关键词: 春小麦; 镉(Cd); 低Cd高产; 富集系数; 转运系数

中图分类号: X53; X173; S512.12 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2023)05-0994-10 doi:10.11654/jaes.2022-0980

Screening Cd enrichment and transport characteristics of low-cadmium and high-yield spring wheat varieties

MA Fengyi¹, MA Lichao¹, ZHAO Baoping^{1*}, WANG Yongning², LU Ruiying³, GUO Xiaoyu², CHEN Miao⁴, LIU Jinghui¹

(1. College of Agriculture, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019; 2. Inner Mongolia Agriculture and Animal Husbandry Ecological and Resource Protection Center, Hohhot 010000; 3. Bayannur City Cultivated Land Quality Monitoring and Protection Center, Bayannur 015000; 4. Urad Rear Banner Eco-Energy and Environmental Protection Station in a rural pastoral area, Bayannur 015000)

Abstract: Screening of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties with low Cd accumulation and high yield characteristics can make spring wheat safe for production and utilization in mildly Cd contaminated farmlands. In this study, 21 spring wheat varieties (serial number X1–X21) were studied, and field experiments were carried out in 2020 and 2021. Spring wheat varieties with low Cd and high yield characteristics were screened through grain Cd content and yield clustering analysis, and the differences in yield, Cd bioaccumulation factor, and transport factor of the different varieties were analyzed. The results showed that 11 varieties, including X4, X6–X8, X10, X16–X21, had the characteristics of low Cd and high yield, and a target hazard factor of <1. X14 is a variety with high Cd accumulation and low yield, accounting for 52.38% and 4.76% of the tested varieties, respectively. Based on the results of the two-year experiment, the bioaccumulation factor of the stems of low-yielding and medium-Cd spring wheat varieties was 0.4 times higher, and the transport factor of roots, stems, leaves and husks of low-yielding and high-Cd spring wheat varieties were 2.5, 2.2, 1.8 times and 2.2 times higher than those

收稿日期: 2022-10-05 录用日期: 2023-01-02

作者简介: 马凤仪(1998—), 山东省邹平人, 硕士研究生, 从事土壤与产地环境污染管控与修复研究。E-mail: mfy130227@163.com

马立超与马凤仪同等贡献

*通信作者: 赵宝平 E-mail: zhaobaoping82@163.com

基金项目: 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系; 农业农村部耕地重金属污染防治联合攻关项目

Project supported: China Agriculture Research System of MOF and MARA; Joint Public Relations Project for the Prevention and Control of Heavy Metal Pollution in Cultivated Land by the Ministry of Agriculture and Rural Affairs

of high-yielding and low-Cd spring wheat varieties, respectively. In summary, 11 high-yield and low-Cd spring wheat varieties, such as Fengqiang No.6 and Fengqiang No.11, can be promoted and planted in Cd-polluted farmlands.

Keywords: spring wheat; cadmium(Cd); low Cd accumulation and high yield; bioaccumulation factor; transport factor

近年来,随着工农业的迅速发展,工业“三废”和农事操作不当导致农田重金属污染等环境问题凸显,粮食安全问题也受到广泛关注^[1-2]。重金属Cd在所有无机污染物中超标率最高^[3],农田Cd可以通过土壤转移积累到作物的可食部位,降低作物品质进而威胁人体健康^[4],减少作物可食部位Cd积累量、保证作物安全生产已成为环境科学领域关注的重点^[5]。目前,筛选重金属低积累品种是解决农作物中重金属超标的重要途径之一^[6]。

不同作物对重金属的吸收、累积存在种间和种内差异^[7]。诸多学者通过不同评价指标已对水稻^[8]、小麦^[9]、玉米^[10]等作物重金属低积累品种的吸收累积特征进行了大量研究,其中,小麦对Cd具有较强的富集能力^[11]。目前,有关冬小麦Cd低积累品种筛选的研究很多,明毅等^[12]通过大田试验和土培试验相结合的方式,从所选用的139份小麦材料中筛选籽粒Cd低积累且高产型品种,获取了4份具有稳定的籽粒Cd低积累且高产特性的小麦材料。

本试验广泛收集春小麦主产区主推的优质小麦品种,在内蒙古河套灌区Cd污染农田连续开展2 a大田试验,进行籽粒Cd低积累且高产春小麦品种筛选,并分析不同类型春小麦各器官Cd富集系数、Cd从各器官到籽粒的转运系数与产量的相关性差异,旨在为Cd污染农田的安全生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2020年和2021年在内蒙古河套灌区某地进行,地处温带,属高原大陆性气候,年平均气温14.3℃,试验地土壤为碱性棕钙土。供试区由于有色

金属矿山开采导致土壤重金属Cd超标,土壤Cd含量2020年为1.5 mg·kg⁻¹、2021年为1.2 mg·kg⁻¹,基本理化性质如表1所示。

1.2 供试材料与试验设计

供试春小麦品种21个:农麦2号、农麦4号、农麦5号由内蒙古自治区农牧业科学院提供;丰强6号、丰强9号、丰强10号、丰强11号、吉春12号由吉林省农业科学院提供;巴麦6号、巴麦12号、巴麦13号、巴麦15号、巴麦22号由巴彦淖尔市农业科学院提供;M7723、EM604、PJ627、H3015、宁2038、宁春4号、宁春50号、宁春57号由宁夏回族自治区农业科学院提供。试验品种编号详见表2。

试验采用随机区组设计,小区面积为3.6 m×6 m=21.6 m²,行距15 cm,播种密度4×10⁶株·hm⁻²(基本苗),重复3次;机器开沟,人工播种,2020年于3月19日播种,2021年于3月21日播种;种肥磷酸二铵(N 18%、P₂O₅ 46%) 25 kg·hm⁻²,复合肥(N 16%、P₂O₅ 16%、K₂O 16%) 15 kg·hm⁻²,拔节期追施尿素40 kg·hm⁻²,整个生育期灌水3次,其他种植管理方式按照当地常规习惯种植。

1.3 样品采集与处理

1.3.1 土壤样品采集与处理

于成熟期取土样,每品种小区按照5点取样,取耕层30 cm的根际土壤,剔除土壤中的非土壤成分,在室内自然风干后分别过2 mm和0.15 mm土筛后备用。

1.3.2 植物样品采集与处理

各小区春小麦收获时,按照3点取样,各采集20 cm整株春小麦,将其分为根(根系先后用自来水、去离子水洗涤)、茎秆、叶、颖壳和籽粒样品,分别混合后按照四分法留取样品,105℃杀青30 min,85℃烘至

表1 大田试验供试土壤理化性质

Table 1 The physical and chemical properties of the field experiment tested soil

年份 Year	全氮 Total nitrogen/%	全磷 Total phosphorus/%	全钾 Total potassium/ (g·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	有效磷 Available phosphorus/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Fast-acting potassium/ (mg·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkaline hydrolyzed nitrogen/(mg·kg ⁻¹)	pH值	阳离子交换量 Cation exchange capacity/ (cmol·kg ⁻¹)
2020	0.031	0.079	2.27	25.7	82	298	150	6.87	8.2
2021	0.145	0.095	9.85	26.2	34	301	132	7.82	19.7

表2 试验供试品种编号
Table 2 Tested variety number

编号 Serial number	品种 Variety	编号 Serial number	品种 Variety	编号 Serial number	品种 Variety
X1	农麦4号 Nongmai No.4	X8	丰强10号 Fengqiang No.10	X15	宁2038 Ning No.2038
X2	农麦2号 Nongmai No.2	X9	巴麦13号 Bamai No.13	X16	宁春57号 Ningchun No.57
X3	农麦5号 Nongmai No.5	X10	巴丰6号 Bafeng No.6	X17	EM604
X4	丰强6号 Fengqiang No.6	X11	巴麦15号 Bamai No.15	X18	PJ627
X5	丰强9号 Fengqiang No.9	X12	巴麦22号 Bamai No.22	X19	宁春50号 Ningchun No.50
X6	吉春12号 Jichun No.12	X13	巴麦12号 Bamai No.12	X20	H3015
X7	丰强11号 Fengqiang No.11	X14	M7723	X21	宁春4号 Ningchun No.4

恒量,用粉碎机磨碎后过0.15 mm筛待用。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 样品Cd含量测定

(1)使用微波消解-石墨炉原子吸收分光光度法测定土壤样品Cd含量^[13]。

称取0.20 g过100目筛的土壤样品,放入与微波消解仪配套的消解管中,采用三酸消解体系,依次放入4 mL HNO₃、2 mL HCl、2 mL HF,浸泡过夜,加盖密封后放入仪器中,每个样品5个平行,同时做空白实验。反应分为3个阶段,第1阶段:120 ℃,40 min;第2阶段:150 ℃,5 min;第3阶段:185 ℃,20 min。消解结束后冷却1 h,在通风橱中赶酸至近干,定容至50 mL,过滤。消解后样品Cd浓度用石墨炉原子吸收分光光度计测定。

(2)使用微波消解-石墨炉原子吸收分光光度法测定植物样品的Cd含量^[14]。

称取0.500 0 g干燥样品,放入与微波消解仪配套的消解管中,依次放入7 mL HNO₃、2 mL H₂O₂,浸泡过夜,加盖密封后放入仪器中,每个样品3个平行,同时做空白实验。反应分为3个阶段,第1阶段:120 ℃,10 min;第2阶段:150 ℃,10 min;第3阶段:185 ℃,30 min。消解结束后冷却1 h,在通风橱中赶酸至近干,定容至25 mL,过滤。消解后样品Cd浓度用石墨炉原子吸收分光光度计测定。

1.4.2 不同品种春小麦产量的测定

成熟后在每一品种小区随机选1 m²收割穗头,脱粒晒干后测定质量,即1 m²产量。

1.5 数据处理

富集系数 BCF =各器官Cd含量/土壤Cd含量 (1)

转运系数 TF =籽粒Cd含量/各器官Cd含量 (2)

重金属膳食暴露量 $EDI=(C \cdot FIR \cdot EF \cdot ED)/(365Bw \cdot AT)$ (3)

标靶危害系数 $THQ=EDI/RfD$ (4)

式中: EDI 为重金属膳食暴露量; THQ 为标靶危害系数,可用于评估人体通过食物摄取重金属的风险,当 $THQ \leq 1.0$ 时,认为人体负荷的重金属对人体健康造成的影响不明显; C 为小麦籽粒中重金属含量, $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; FIR 为每人每日谷物摄入量, $\text{g} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; EF 为暴露频率,取 $365 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$; ED 为暴露年限,取70 a; Bw 为成人的平均体质量,取 $65 \text{ kg} \cdot \text{人}^{-1}$; AT 为生命期望值,取70 a; 365 为转化系数; RfD 为消化食物的比率, $\mu\text{g} \cdot \text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 。有研究^[12]指出,成年人平均每天的谷类食物食用量为 $261.1 \text{ g} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$;根据美国整合风险信息数据库,Cd的 RfD 为 $1.0 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

采用Excel 2019进行一般数据统计,采用SPSS 25.0统计软件进行单因素方差分析(ANOVA),采用最小显著差异法(LSD)进行不同处理均值的差异显著性比较,采用系统聚类法对不同品种进行聚类分析;采用Excel 2019软件进行图形处理。

2 结果分析

2.1 不同品种春小麦各器官Cd含量及籽粒Cd安全风险评价

2.1.1 各器官Cd含量及籽粒Cd含量聚类分析

不同品种春小麦根、茎、叶、颖壳和籽粒Cd含量如表3所示。2020、2021两年试验结果综合表明,不同品种春小麦各器官Cd含量总体趋势为根>叶>颖壳≈茎>籽粒;X10籽粒Cd含量在两年试验中均符合国家食品安全标准值 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (GB 2715—2016);籽粒Cd含量在2020年超标率为95.24%,2021年超标率为52.38%。

将2020年和2021年不同品种春小麦籽粒的Cd含量进行综合聚类分析,可分为3类,即高Cd积累型、中Cd积累型和低Cd积累型。如图1所示,具有籽

表3 不同品种春小麦各器官Cd含量(mg·kg⁻¹)Table 3 Cd content in each organ of spring wheat of different varieties(mg·kg⁻¹)

年份 Year	品种 Variety	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	颖壳 Glume	籽粒 Grain
2020	X1	0.870±0.149bcdefg	0.350±0.003c	0.777±0.019cde	0.329±0.029bcd	0.254±0.008bc
	X2	1.005±0.122b	0.469±0.08a	0.901±0.004abcd	0.348±0.012abc	0.265±0.007b
	X3	1.073±0.034ab	0.312±0.004cd	0.910±0.065ab	0.315±0.012cd	0.208±0.021cde
	X4	0.980±0.022bcde	0.295±0.021def	0.723±0.026e	0.320±0.012cd	0.175±0.018def
	X5	0.769±0.052cdefg	0.266±0.011efg	0.739±0.057e	0.355±0.017abc	0.166±0.046efg
	X6	0.975±0.191bcde	0.226±0.005ghi	0.792±0.056cde	0.328±0.006bcd	0.167±0.019ef
	X7	0.998±0.113bcd	0.254±0.002fgh	0.792±0.049cde	0.351±0.023abc	0.125±0.02jk
	X8	0.724±0.116fg	0.159±0.006jk	0.726±0.017e	0.343±0.026bcd	0.154±0.011fgh
	X9	0.748±0.095defg	0.243±0.01gh	0.822±0.025cd	0.337±0.02bcd	0.121±0.01ijk
	X10	0.681±0.029g	0.137±0.007k	0.786±0.012cde	0.391±0.047a	0.077±0.015k
	X11	0.901±0.049bcdefg	0.407±0.015b	0.934±0.062a	0.323±0.031cd	0.216±0.015cd
	X12	1.480±0.234a	0.476±0.024a	0.834±0.103abcd	0.374±0.016ab	0.321±0.019a
	X13	0.709±0.113fg	0.462±0.009a	0.897±0.046abcd	0.351±0.017abc	0.211±0.013cde
	X14	0.823±0.126cdefg	0.303±0.019de	0.773±0.028de	0.348±0.01abc	0.220±0.005bcd
	X15	0.739±0.028efg	0.193±0.01ij	0.761±0.051e	0.245±0.005e	0.108±0.024hijk
	X16	0.682±0.142g	0.262±0.004efg	0.902±0.024abc	0.314±0.007cd	0.113±0.031hijk
	X17	0.848±0.055bcdefg	0.237±0.007ghi	0.748±0.031e	0.331±0.009bcd	0.144±0.03fghij
	X18	0.660±0.063g	0.208±0.002hi	0.723±0.049e	0.255±0.054e	0.128±0.007fghij
	X19	0.683±0.022g	0.247±0.009gh	0.791±0.074cde	0.326±0.004bcd	0.131±0.01fghij
	X20	0.955±0.04bcdef	0.237±0.004ghi	0.767±0.017e	0.285±0.015de	0.118±0.011ghijk
	X21	0.914±0.047bcdefg	0.259±0.002efg	0.814±0.059cde	0.330±0.006bcd	0.146±0.012fghi
	均值 Mean	0.868	0.286	0.806	0.329	0.170
2021	X1	0.722±0.018abcdef	0.253±0.146a	0.469±0.02ab	0.237±0.025a	0.116±0.007b
	X2	0.638±0.065bcdef	0.217±0.151a	0.431±0.011ab	0.192±0.054a	0.091±0.019b
	X3	0.610±0.045bcdef	0.241±0.09a	0.38±0.009abc	0.182±0.045a	0.108±0.008b
	X4	0.831±0.097ab	0.234±0.109a	0.424±0.067ab	0.293±0.071a	0.091±0.026b
	X5	0.840±0.048ab	0.234±0.156a	0.433±0.015ab	0.199±0.051a	0.212±0.058b
	X6	0.531±0.06ef	0.263±0.149a	0.452±0.017ab	0.168±0.059a	0.108±0.022b
	X7	0.810±0.033abc	0.242±0.127a	0.417±0.005ab	0.236±0.073a	0.098±0.001b
	X8	0.660±0.142abcdef	0.225±0.144a	0.418±0.017ab	0.267±0.026a	0.115±0.006b
	X9	0.691±0.008abcdef	0.273±0.11a	0.372±0.041abc	0.308±0.024a	0.09±0.01b
	X10	0.770±0.011abcde	0.278±0.169a	0.449±0.046ab	0.247±0.083a	0.086±0.003b
	X11	0.761±0.066abcde	0.241±0.132a	0.441±0.015ab	0.201±0.023a	0.086±0.002b
	X12	0.890±0.1a	0.217±0.11a	0.406±0.047ab	0.34±0.037a	0.081±0.001b
	X13	0.751±0.087abcdef	0.271±0.148a	0.484±0.025a	0.205±0.02a	0.126±0.005b
	X14	0.630±0.085bcdef	0.269±0.152a	0.488±0.006a	0.226±0.048a	0.493±0.265a
	X15	0.511±0.039f	0.37±0.196a	0.333±0.074bc	0.16±0.014a	0.347±0.208ab
	X16	0.572±0.079cdef	0.25±0.121a	0.423±0.016ab	0.217±0.022a	0.093±0.003b
	X17	0.551±0.014ef	0.262±0.125a	0.475±0.048a	0.234±0.029a	0.112±0.006b
	X18	0.560±0.014def	0.195±0.109a	0.356±0.023abc	0.196±0.026a	0.098±0.031b
	X19	0.791±0.06abcd	0.284±0.109a	0.477±0.085a	0.219±0.023a	0.124±0.028b
	X20	0.720±0.025abcdef	0.274±0.137a	0.444±0.016ab	0.286±0.119a	0.107±0.027b
	X21	0.591±0.095bcdef	0.162±0.111a	0.265±0.066c	0.25±0.098a	0.083±0.022b
	均值 Mean	0.686	0.251	0.421	0.232	0.137

注:同列数据后不同字母表示不同品种之间存在显著差异($P<0.05$);数据为平均值±标准误差。

Note: Different letters after the data in the same column indicate significant differences among different varieties($P<0.05$); data are mean±standard error.

粒Cd低积累特性的品种有X4、X7、X8、X9、X10、X16、X17、X18、X19、X20、X21, 占总品种数的52.38%; 具有籽粒Cd中积累特性的品种有X1、X2、X3、X5、X6、X11、X12、X13、X15, 占总品种数的42.86%; 具有籽粒Cd高积累特性的品种为X14, 占总品种数的4.76%。

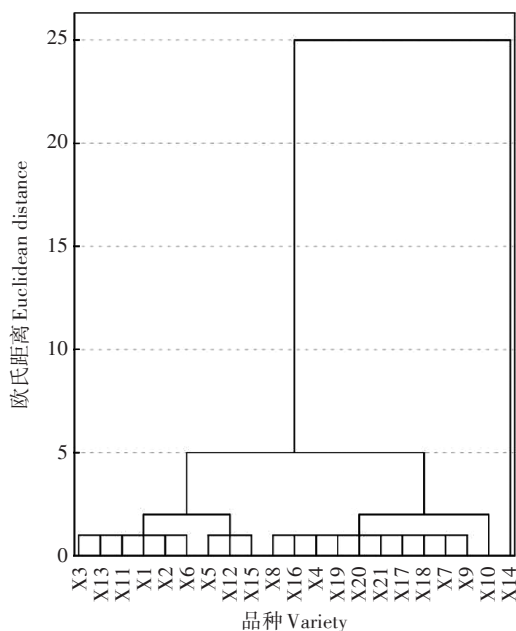


图1 不同春小麦品种籽粒Cd积累能力聚类分析

Figure 1 Cluster analysis of Cd accumulation ability in different spring wheat varieties

2.1.2 籽粒Cd安全风险评价

不同品种春小麦标靶危害系数如图2所示。2020年THQ值介于0.310~1.288之间, 2021年THQ值介于0.326~1.982之间。X3~X11、X13、X16~X21等16个春小麦品种在两年试验中THQ均小于1。

2.2 不同品种春小麦产量

2.2.1 产量聚类分析

在相同Cd污染环境下不同品种春小麦产量如图3所示, 不同品种春小麦产量存在显著差异。2020年X4产量最高, X14最低; X4较其他品种高7.89%~381.4%。2021年X7产量最高, X12最低; X7较其他品种高2.26%~332.31%。2020和2021两年数据综合表明, X12产量受Cd胁迫影响较大; X4和X7受Cd胁迫影响较小, 产量较高且稳定。

将2020年和2021年不同品种春小麦产量进行综合聚类分析(图4), 可分为2类, 即高产和低产。其中, 高产春小麦有X1~X8、X10、X13、X15~X21等17个品种, 占供试品种的80.95%; 低产春小麦有X9、X11、X12、X14等4个品种, 占供试品种的19.05%。

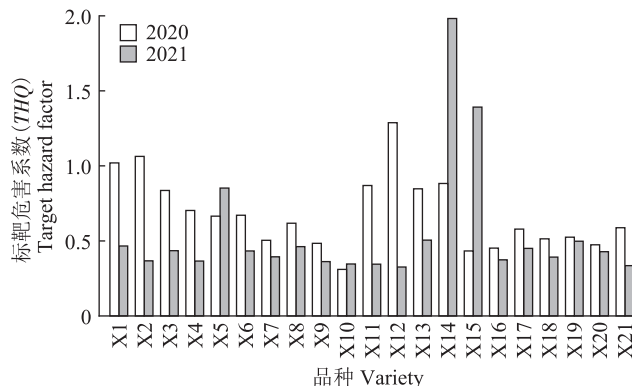


图2 不同品种春小麦标靶危害系数

Figure 2 Target hazard coefficients of different varieties of spring wheat

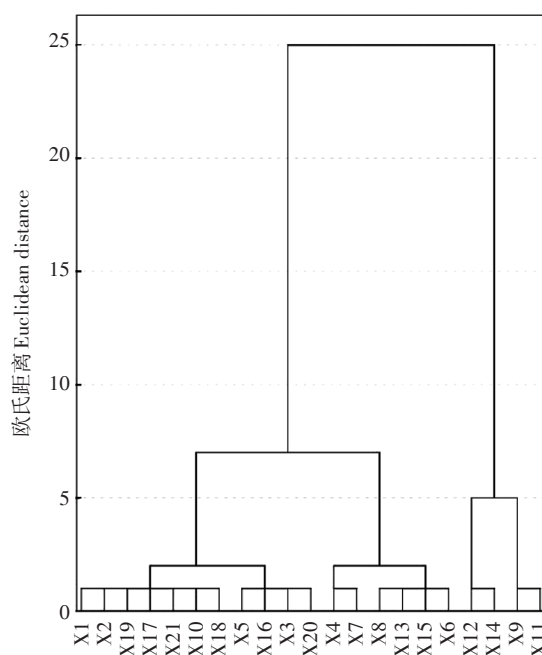


图4 不同品种春小麦产量聚类分析

Figure 4 Cluster analysis of spring wheat yield of different varieties

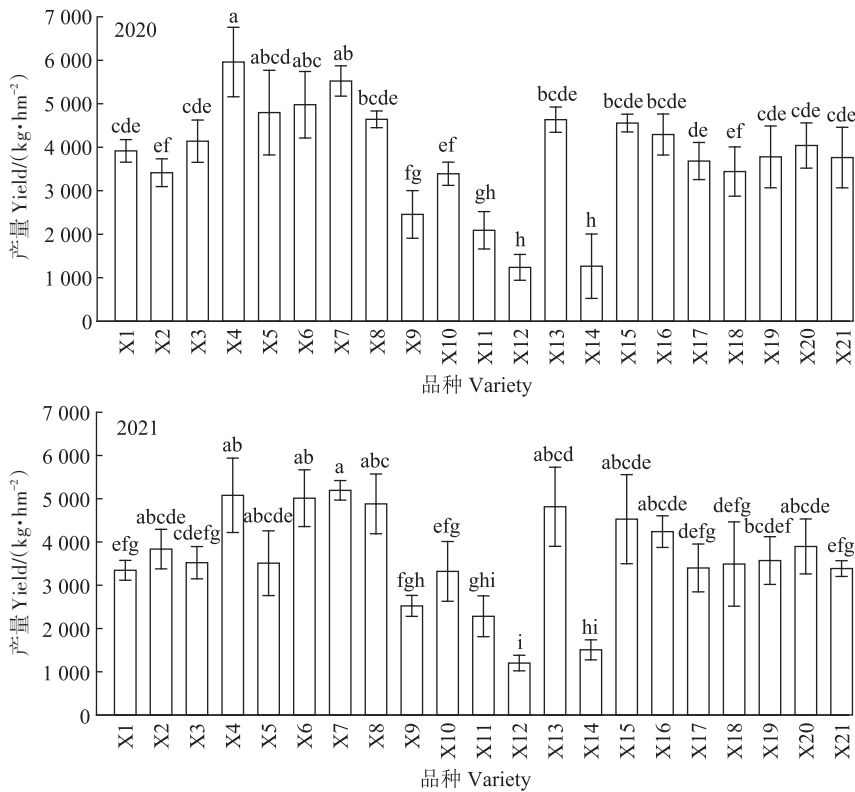
2.2.2 不同Cd积累能力春小麦品种产量分析

通过不同品种春小麦籽粒Cd含量和产量的聚类分析(图1、图4)可得到以下5个类型(表4): 高产低Cd品种X4、X6~X8、X10、X16~X21等11个, 占供试品种的52.38%; 高产中Cd品种X1~X3、X5、X13、X15等6个, 占供试品种的28.57%。低产低Cd品种X9, 占供试品种的4.76%; 低产中Cd品种X11、X12, 占供试品种的9.52%; 低产高Cd品种X14, 占供试品种的4.76%。

2.3 不同类型春小麦Cd富集特征差异

2.3.1 对Cd的富集特征

分组统计春小麦各器官的富集系数, 结果如图5



图中不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$),下同。
Different lowercase letters in the figure indicate significant differences among treatments ($P<0.05$), the same below.

图3 不同品种春小麦产量
Figure 3 Yield of different varieties of spring wheat

表4 不同类型春小麦品种分类
Table 4 Different types of spring wheat

类型Type	编号Serial number	品种数Number
低产低Cd春小麦 Low-yielding and low Cd spring wheat	LY-LC	1
低产中Cd春小麦 Low-yielding and medium Cd spring wheat	LY-MC	2
低产高Cd春小麦 Low-yielding and high Cd spring wheat	LY-HC	1
高产低Cd春小麦 High-yielding and low Cd spring wheat	HY-LC	11
高产中Cd春小麦 High-yielding and medium Cd spring wheat	HY-MC	6

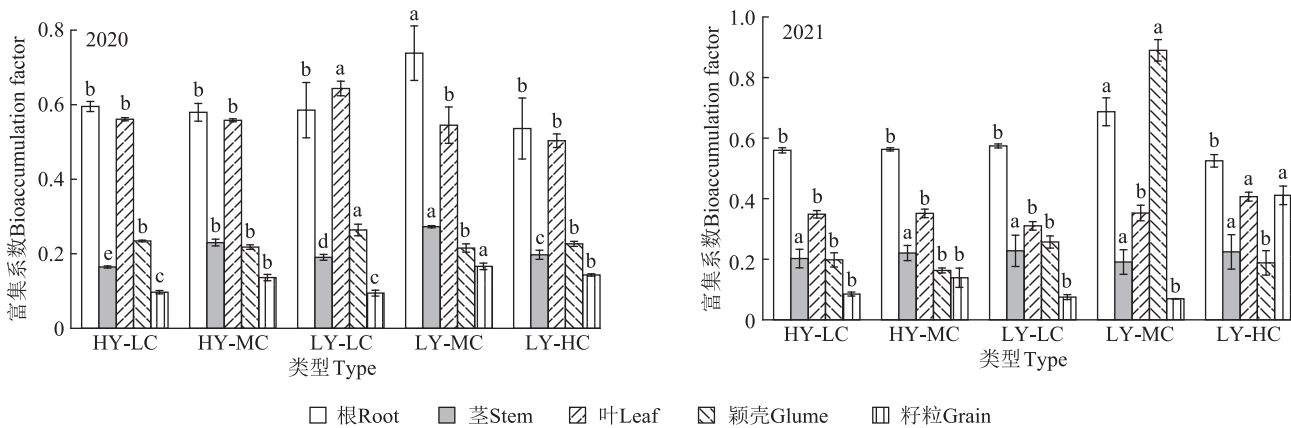


图5 不同类型春小麦品种各器官Cd富集系数
Figure 5 Cd bioaccumulation factor of various organs of different types of spring wheat

所示。在两年试验中,土壤Cd进入不同类型春小麦品种植株后主要集中在根部,低产中Cd春小麦根中Cd含量综合表现为最高;2020年高产低Cd春小麦品种茎中Cd含量较高产中Cd、低产低Cd、低产中Cd、低产高Cd类型品种分别显著低35.30%、11.77%、58.82%、17.65%。除低产低Cd和低产高Cd两个类型的春小麦外,其他类型春小麦在两年中的Cd富集系数均呈现为根>叶>颖壳~茎>籽粒的规律,且各器官的富集系数均小于1。

2.3.2 籽粒Cd富集系数与其他器官Cd富集系数的相关性

将春小麦籽粒Cd富集系数与其他器官的Cd富集系数进行相关性分析,结果如表5所示。两年数据共同表现为茎的Cd富集系数与籽粒Cd的富集系数呈显著正相关关系。

2.4 不同类型春小麦Cd转运特征差异

2.4.1 对Cd的转运特征

分组统计春小麦各器官间Cd转运系数,结果如图6所示。综合两年试验结果表明,不同类型春小麦根到茎和根到籽粒的Cd转运系数均小于1;Cd从茎到叶的转运系数均值最大,2020年和2021年分别为

表5 春小麦籽粒Cd富集系数与各器官Cd富集系数的相关性
Table 5 Correlation between Cd bioaccumulation factor of spring wheat grains and Cd bioaccumulation factor of various organs

年份 Year	$BCF_{\text{根}}$ BCF_{Root}	$BCF_{\text{茎}}$ BCF_{Stem}	$BCF_{\text{叶}}$ BCF_{Leaf}	$BCF_{\text{颖壳}}$ BCF_{Glume}
2020	0.405**	0.816**	0.006	0.057
2021	-0.223	0.473*	0.120	-0.153

注:*表示0.05水平上的显著相关性,**表示0.01水平上的极显著相关性。下同。

Note: * indicates the significant correlation at the 0.05 level, ** indicates the significant correlation at the 0.01 level. The same below.

2.83和2.15。

低产高Cd类型春小麦品种Cd从根、茎、叶、颖壳到籽粒的Cd转运系数均显著高于高产低Cd类型春小麦品种($P<0.05$),2020年分别显著高58.82%、21.67%、61.1%、68.97%;2021年分别显著高431.25%、414.03%、300%、356.52%。

2.4.2 籽粒Cd富集系数与其他器官Cd转运系数的相关性

将春小麦籽粒Cd富集系数与其他器官的Cd转运系数进行相关性分析,结果如表6所示。两年数据共同表现为Cd从根、茎、叶、颖壳到籽粒的Cd转运系

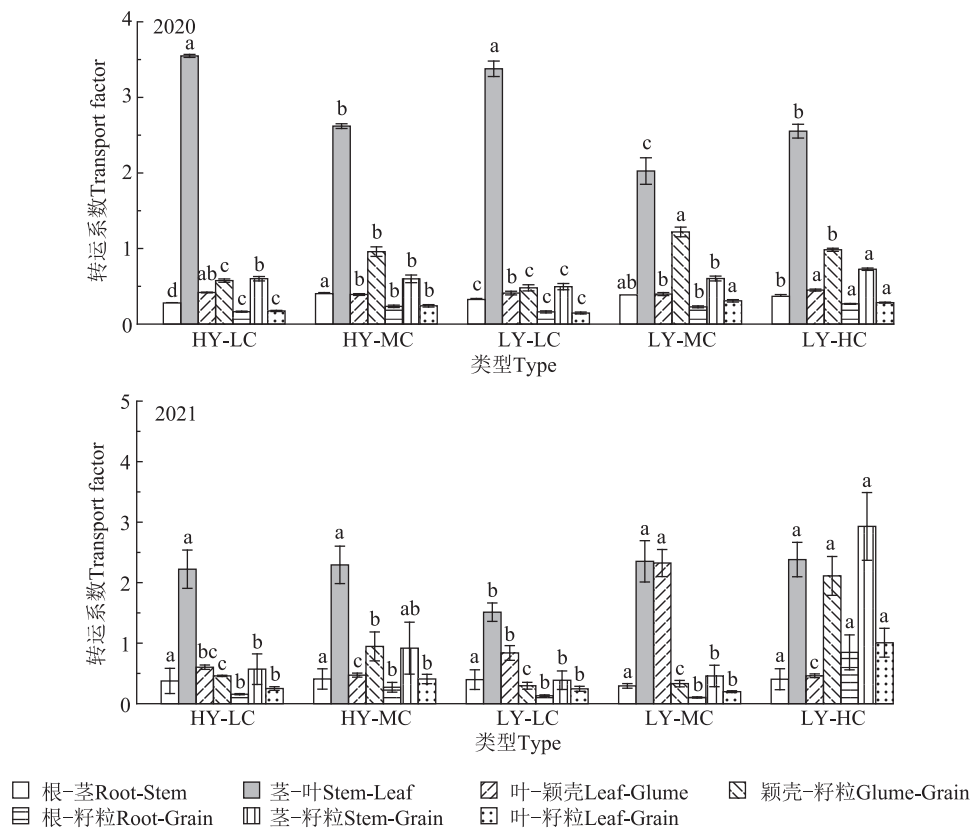


图6 不同类型春小麦品种各器官间Cd转运系数

Figure 6 Cd transport factor among organs of different types of spring wheat

表6 春小麦籽粒Cd富集系数与各器官Cd转运系数的相关性

Table 6 Correlation between Cd bioaccumulation factor of wheat grains and Cd transport factor of various organs

年份 Year	$TF_{\text{根-茎}}$ $TF_{\text{Root-Stem}}$	$TF_{\text{茎-叶}}$ $TF_{\text{Stem-Leaf}}$	$TF_{\text{叶-颖壳}}$ $TF_{\text{Leaf-Glume}}$	$TF_{\text{颖壳-籽粒}}$ $TF_{\text{Glume-Seed}}$	$TF_{\text{根-籽粒}}$ $TF_{\text{Root-Seed}}$	$TF_{\text{茎-籽粒}}$ $TF_{\text{Stem-Seed}}$	$TF_{\text{叶-籽粒}}$ $TF_{\text{Leaf-Seed}}$
2020	0.809*	-0.957**	-0.018	0.992**	0.845**	0.579*	0.980**
2021	-0.221	0.399	-0.348	0.893**	0.998**	0.972**	0.998**

数与籽粒Cd的富集系数呈显著正相关关系。

3 讨论

筛选和培育具有低Cd积累特性的作物品种是使Cd污染土壤得到持续安全生产且经济、有效的途径之一^[16]。低Cd积累作物的评价基本采用籽粒Cd含量、转移系数或富集系数等材料进行初步聚类分析以确定材料的类型,选择作物可食部位吸收Cd含量或关键指标进行评价,可较好地体现出相同作物不同品种间对Cd的吸收差异^[17]。本研究所选的21个春小麦品种籽粒Cd的富集系数在2期大田试验中均小于1,说明供试品种对Cd均具较高的耐受性。李乐乐等^[18]根据国家标准(GB 2715—2016)以及聚类分析、标靶危害系数、富集系数和转运系数筛选出了16个可在中轻度Cd污染农田推广种植的小麦品种。本研究对21个春小麦品种进行低Cd积累品种筛选的基础上结合产量,筛选出了11个可在Cd污染农田进行推广种植的具有低Cd高产特性的春小麦品种。明毅等^[12]通过籽粒Cd含量和产量进行综合聚类分析,获得了同时具有低Cd且高产特性的小麦品种。本研究在2期大田试验中,通过结合籽粒Cd含量、籽粒产量和标靶危害系数筛选出了11个低Cd高产的春小麦品种,丰强10号(X8)、EM604(X17)、宁春50号(X19)、H3015(X20)虽籽粒Cd含量超过了国家食品安全标准值,但这4个品种标靶危害系数值均小于1,人体摄入后对人体健康不会造成明显影响。因此,从经济收益和粮食安全角度,可考虑将筛选出的Cd低积累且高产的春小麦品种在轻度Cd污染农田进行推广种植,使受污染农田得到安全利用的同时增加收益。

土壤中的Cd离子通过质外体或共质体途径进入植物根系,根系是Cd进入植物体内的首要门户,是Cd的主要积累器官。籽粒中Cd含量取决于地上部各器官Cd的吸收、运输^[19],同种作物不同类型间Cd吸收转运存在差异^[20-22]。本研究发现,不同类型春小麦品种各器官中根部的Cd富集系数最大、籽粒Cd富集系数最小,这表明大量的Cd都被根固定吸收,这与刘畅等^[22]和辛艳卫等^[20]、邓婷等^[23]在高、低Cd积累冬

小麦和玉米品种各器官Cd含量差异研究结果一致。在不同类型春小麦品种籽粒Cd富集系数与其他器官Cd富集系数的相关性分析中,茎的Cd富集系数与籽粒Cd富集系数呈显著的正相关关系,这与胡莹等^[24]研究结果一致。对各类型春小麦根的Cd富集系数进行对比发现,在2020年试验中低产中Cd和低产高Cd类型的春小麦茎的Cd富集系数与高产低Cd类型间春小麦茎的Cd富集系数呈显著差异,蔡秋玲等^[8]研究结果中,低产高Cd春小麦和低产低Cd春小麦的Cd富集系数之间有显著差异,且该研究发现不同产量和富集能力的水稻类型的差异主要在于茎和叶的富集与转移。本研究两年试验结果表明,低产中Cd类型的春小麦品种和高产低Cd类型春小麦茎部Cd富集系数存在差异。

Cd转运系数是评价Cd在植物体内的分配情况及植物对Cd转运能力的重要指标^[25]。地上部的转运主要经历的过程包括Cd离子进入木质部、木质部的转运及韧皮部的输送。前人研究表明,籽粒中Cd含量的差异取决于根和茎叶中Cd从穗轴向颖壳和籽粒的转运与再分配^[19],茎是地上部Cd转运的主要通道^[26]。本研究结果表明,在2期大田试验中,各器官到籽粒的Cd转运系数中,Cd由茎和颖壳向籽粒的转移能力均较根和叶向籽粒的转运能力强,其中,低产高Cd春小麦品种Cd从茎到籽粒的转运系数显著高于其他类型品种;各器官Cd转运系数中Cd由茎到叶的转运系数最大,其中,高产低Cd类型春小麦品种Cd由茎到叶的转运系数较其他类型高0.45~1.52倍,这与蔡秋玲等^[8]的研究结果一致,与其研究结果不同的是,本研究结果中Cd从叶到颖壳和叶到籽粒的转运系数较其他类型春小麦品种小。综上结果分析表明,高产低Cd类型的春小麦品种大量的Cd被截留在叶中。在相关性分析中,Cd从各器官到籽粒的Cd转运系数均与籽粒Cd的富集系数呈正相关关系,在2021年低产高Cd类型各器官到籽粒的Cd转运系数较其他类型品种高,而2期试验结果表现并不稳定。

从本研究结果可见,高产低Cd和低产高Cd两个类型的春小麦品种的差异在于Cd在茎中的富集和

Cd由根、茎、叶、颖壳到籽粒的转运,由此在生产过程中采取有效阻控措施控制根对Cd的吸收及向地上各器官的转运均可能降低籽粒中Cd含量。

4 结论

(1)不同类型春小麦品种各器官Cd含量及Cd富集系数总体表现为根>叶>颖壳~茎>籽粒的规律,且各器官的富集系数均小于1;高产低Cd类型春小麦品种和低产高Cd类型春小麦品种的主要差异在于Cd在茎的富集和Cd从根、茎、叶、颖壳到籽粒的转运。

(2)X4、X6~X8、X10、X16~X21等11个品种标靶危害系数均小于1,且同时具有低Cd高产特性,可优先考虑在Cd污染农田进行推广种植。

参考文献:

- [1] 曾希柏, 徐建明, 黄巧云, 等. 中国农田重金属问题的若干思考[J]. 土壤学报, 2013, 50(1): 186-194. ZENG X B, XU J M, HUANG Q Y, et al. Reflections on heavy metals in farmland in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(1): 186-194.
- [2] 程旺大, 张国平. 晚粳稻籽粒中As、Cd、Cr、Ni、Pb等重金属含量的基因型与环境效应及其稳定性[J]. 作物学报, 2006, 32(4): 573-579. CHENG W D, ZHANG G P. Genotypic and environmental effects and stability of heavy metal content such as As, Cd, Cr, Ni and Pb in late japonica rice grain[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(4): 573-579.
- [3] 环境保护部和国土资源部发布全国土壤污染状况调查公报[J]. 资源与人居环境, 2014(4): 26-27. The Ministry of Environmental Protection and the Ministry of Land and Resources issued a communique on the investigation of soil pollution status in China[J]. *Resources and Human Settlement Environment*, 2014(4): 26-27.
- [4] 何俊瑜, 王阳阳, 任艳芳, 等. 镉胁迫对不同水稻品种幼苗根系形态和生理特性的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(5): 1863-1868. HE J Y, WANG Y Y, REN Y F, et al. Effects of cadmium stress on root morphology and physiological characteristics of seedlings of different rice varieties[J]. *Journal of Ecological Environment*, 2009, 18(5): 1863-1868.
- [5] LIU W T, LIANG L C, ZHANG X, ZHOU Q X. Cultivar variations in cadmium and lead accumulation and distribution among 30 wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars[J]. *Environmental Science Pollution Research International*, 2015, 22(11): 8432-8441.
- [6] ZHAO F J, MA Y, ZHU Y G, et al. Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies[J]. *Environmental Science and Technology*, 2015, 49(2): 750-759.
- [7] 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. LIU W T, ZHOU Q X, SUN Y B, et al. Cultivar differences between lead accumulation and transport in Chinese cabbage[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(1): 63-67.
- [8] 蔡秋玲, 林大松, 王果, 等. 不同类型水稻镉富集与转运能力的差异分析[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(6): 1028-1033. CAI Q L, LIN D S, WANG G, et al. Differences in cadmium accumulation and transfer capacity among different types of rice cultivars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(6): 1028-1033.
- [9] 艾金华, 廖晓勇, 王凌青, 等. 镉胁迫下小麦镉低累积品种筛选[J]. 南昌大学学报(理科版), 2019, 43(2): 175-181. AI J W, LIAO X Y, WANG L Q, et al. Screening of low cadmium accumulation cultivars in wheat under cadmium stress[J]. *Journal of Nanchang University (Natural Science)*, 2019, 43(2): 175-181.
- [10] 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. Enrichment and transshipment capacity of heavy metal lead and cadmium by different maize cultivars[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, 30(6): 774-779.
- [11] YOUSAF B, LIU G J, WANG R W, et al. Bioavailability evaluation, uptake of heavy metals and potential health risks via dietary exposure in urban-industrial areas[J]. *Environmental Science & Pollution Research International*, 2016, 23(22): 1-11.
- [12] 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. Differential evaluation of cadmium accumulation in wheat grain[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(22): 4219-4229.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 495. BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. *Beijing: China Agricultural Press*, 2000: 495.
- [14] 喻华, 冯文强, 秦鱼生, 等. 石墨炉原子吸收法测定植株镉消除背景值的改进方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(9): 2577-2580. YU H, FENG W Q, QIN Y S, et al. Improved method for determination of plant cadmium elimination background value by graphite furnace atomic absorption spectrometry[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(9): 2577-2580.
- [15] 程加迁, 王俊平. 蔬菜水果重金属膳食暴露评估中风险权重的确定方法[J]. 食品科学, 2018, 39(1): 47-52. CHENG J Q, WANG J P. Determination of risk weights in dietary exposure assessment of heavy metals in vegetables and fruits[J]. *Food Science*, 2018, 39(1): 47-52.
- [16] 张路, 张锡洲, 李廷轩, 等. 水稻镉安全亲本材料对镉的吸收分配特性[J]. 中国农业科学, 2015, 48(1): 174-184. ZHANG L, ZHANG X C, LI T X, et al. Absorption and distribution characteristics of cadmium by safe parent materials of cadmium in rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(1): 174-184.
- [17] 熊孜, 李菊梅, 赵会薇, 等. 不同小麦品种对大田中低量镉富集及转运研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(1): 36-44. XIONG Z, LI J M, ZHAO H W, et al. Study on the enrichment and transport of low and medium cadmium in different wheat varieties in the field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(1): 36-44.
- [18] 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 wheat varieties with low cadmium accumulation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(8): 53-58, 72.

- [19] SHI G L, LI D J, WANG Y F, et al. Accumulation and distribution of arsenic and cadmium in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) at different developmental stages[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 667:532–539.
- [20] 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 Y W, LIANG C H, DU L Y, et al. Accumulation and transport characteristics of cadmium in different maize varieties[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(5):839–846.
- [21] 杨素勤, 程海宽, 张彪, 等. 不同品种小麦 Pb 积累差异性研究[J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30(5):646–651. YANG S Q, CHENG H K, ZHANG B, et al. Study on Pb accumulation differences of different varieties of wheat[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, 30(5):646–651.
- [22] 刘畅, 徐应明, 黄青青, 等. 不同冬小麦品种镉富集转运及离子组特征差异[J]. 环境科学, 2022, 43(3):1596–1605. LIU C, XU Y M, HUANG Q Q, et al. Differences in cadmium accumulation, transport and ionome characteristics in different winter wheat varieties[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(3):1596–1605.
- [23] 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 T, LU W S, WU J L, et al. Differences in soil cadmium accumulation and transport among different maize varieties[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2019, 40(4):33–39.
- [24] 胡莹, 黄益宗, 段桂兰, 等. 镉对不同生态型水稻的毒性及其在水稻体内迁移转运[J]. 生态毒理学报, 2012, 7(6):664–670. HU Y, HUANG Y S, DUAN G L, et al. Toxicity of cadmium to different ecological types of rice and its transport in rice[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2012, 7(6):664–670.
- [25] 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]. 地球与环境学报, 2022, 50(1):103–109. MAO X, FU T L, HE T B, et al. Screening and enrichment and transport characteristics of low cadmium accumulation cultivars of buckwheat[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2022, 50(1):103–109.
- [26] ZHANG L G, ZHANG C, DU B Y, et al. Effects of node restriction on cadmium accumulation in eight Chinese wheat (*Triticum turgidum*) cultivars[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 725:138358.