

中文核公期刊/CSCD

请通过网上投稿系统投稿 网址:http://www.aes.org.cn

不同燕麦品种籽粒镉富集特征及安全风险评价

马凤仪,赵宝平,张茹,杨波,王永宁,郭晓宇,陈淼,刘景辉

引用本文:

马凤仪,赵宝平,张茹,杨波,王永宁,郭晓宇,陈淼,刘景辉.不同燕麦品种籽粒镉富集特征及安全风险评价[J].农业环境科 学学报,2022,41(11):2458-2467.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0180

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

不同玉米品种对土壤镉富集和转运的差异性

邓婷, 吴家龙, 卢维盛, 官以战, 李贵杰, 张秋华, 俞方玉, 曾祖蕾 农业环境科学学报. 2019, 38(6): 1265-1271 https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1291

镉在小麦各部位的富集和转运及籽粒镉含量的预测模型

刘克,和文祥,张红,曹莹菲,代允超,吕家珑 农业环境科学学报.2015,34(8):1441-1448 https://doi.org/10.11654/jaes.2015.08.002

镉砷复合污染条件下镉低吸收水稻品种对镉和砷的吸收和累积特征
单天宇, 刘秋辛, 阎秀兰, 邵金秋, 廖晓勇
农业环境科学学报. 2017, 36(10): 1938–1945 https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0462

双季稻区镉污染稻田水稻改制玉米轮作对镉吸收的影响

吴家梅,谢运河,田发祥,官迪,朱坚,陈锦,纪雄辉 农业环境科学学报.2019,38(3):502-509 https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0707



关注微信公众号,获得更多资讯信息

马凤仪,赵宝平,张茹,等.不同燕麦品种籽粒镉富集特征及安全风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(11): 2458-2467. MA F Y, ZHAO B P, ZHANG R, et al. Grain cadmium enrichment characteristics and safety risk assessment of different oat varieties[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(11): 2458-2467.



不同燕麦品种籽粒镉富集特征及安全风险评价

马凤仪1,赵宝平1*,张茹1,杨波3,王永宁2,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 010010;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,内蒙古 巴彦淖尔 015000;4.乌拉特后旗农村牧区生态能源环保站,内蒙古 巴彦淖尔 015500)

摘 要:为揭示影响燕麦籽粒镉(Cd)含量的关键因素,以18个燕麦品种为研究对象,分别于2020年和2021年开展连续2期大田 试验,研究燕麦不同器官间Cd富集转运对籽粒Cd含量的影响,并通过聚类分析、THQ值进行低Cd积累品种筛选和安全风险评 价;通过相关性分析和主成分分析评估影响籽粒Cd含量的关键器官和关键过程。结果表明:坝燕7号、201229-1-1、200919-7-1、 坝莜14号、坝燕6号、白燕9号等13个品种为籽粒Cd低积累型品种,坝燕4号、燕科2号、蒙燕2号、白燕17号为籽粒Cd高积累型 品种,分别占供试品种的72.22%和22.22%;燕麦籽粒Cd含量与茎中Cd富集系数及Cd从根到籽粒、茎到籽粒、叶到籽粒的转运系 数呈极显著正相关;在主成分分析中,茎中Cd的富集系数及Cd从根到籽粒、茎到籽粒、叶到籽粒的转运系数对区分高、低Cd积累 燕麦品种贡献较大。因此,茎是影响燕麦籽粒Cd含量差异的关键器官,Cd从根到籽粒、茎到籽粒、叶到籽粒的转运过程是造成燕 麦籽粒Cd含量差异的关键转运过程。

关键词:燕麦;镉;富集系数;转运系数;安全风险评价

中图分类号:X173;X820.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)11-2458-10 doi:10.11654/jaes.2022-0180

Grain cadmium enrichment characteristics and safety risk assessment of different oat varieties

MA Fengyi¹, ZHAO Baoping^{1*}, ZHANG Ru¹, YANG Bo³, WANG Yongning², GUO Xiaoyu², CHEN Miao⁴, LIU Jinghui¹

(1. College of Agriculture, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010010, China; 2. Inner Mongolia Agriculture and Animal Husbandry Ecological and Resource Protection Center, Hohhot 010000, China; 3. Bayannaoer City Cultivated Land Quality Monitoring and Protection Center, Bayannaoer 015000, China; 4. Urad Rear Banner Eco-Energy and Environmental Protection Station in a Rural Pastoral Area, Bayannaoer 015500, China)

Abstract: To reveal the key influencing factors affecting the Cd content of oat grains, 18 oat varieties were taken as research objects, and two consecutive field trials were carried out in 2020 and 2021 to study the effect of Cd enrichment and transport between different organs of oat on grain Cd content. Cluster analysis was applied to determine the *THQ* value to screen low Cd accumulation varieties, and a safety risk assessment was conducted through correlation analysis and principal components to analyze the key organs and key processes affecting grain Cd enrichment. The results showed that 13 cultivars, including Bayan No.7, 201229–1–1, 2009–7–1, Bayou No.14, Bayan No.6, and Baiyan No.9, had low–accumulation varieties of Cd in grains, and Bayan No.4, Yanke No.2, Mengyan No.2, and Baiyan No.17 had a high accumulation. The concentration factor and Cd transport coefficient from root to grain, stem to grain, and leaf to grain were significantly positively correlated, and the transport coefficient to the grain contributed significantly to the differentiation between high and low Cd accumulation oat cultivars. Therefore, the stem is the key organ that affects the difference in Cd content in oat grains, and the transport of Cd from root to grain, stem to grain, stem to grain, and leaf to grain is the key transport process that causes the difference in Cd content in oat grains. **Keywords**: oat; cadmium; enrichment coefficient; transport coefficient; safety risk assessment

收稿日期:2022-02-25 录用日期:2022-04-29

作者简介:马凤仪(1998一),女,山东邹平人,硕士研究生,从事土壤和产地环境污染管控与修复研究。E-mail:mfy130227@163.com

*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公关项目

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

2459

内蒙古西部有色金属、黑色金属等矿产丰富,在 其开采和冶炼过程中导致周边农田土壤镉(Cd)、铅 (Pb)等重金属污染物超标,严重影响了当地农产品 质量安全。燕麦(Avena sativa L.)是我国北方和西北 干旱冷凉等生态脆弱区的粮饲及优势特色作物^[1]。 内蒙古是我国燕麦主产区^[2],其燕麦种植面积占我国 燕麦种植面积的40%以上。因此,使当地受污染农 田土壤得到安全利用,是确保作物安全生产及生态农 业可持续发展的关键。

Cd可以通过食物链进入人体,而长期摄入过量 的Cd会对人体健康造成威胁^[3],因此使受污染农田作 物可食用部位的重金属含量达标是重中之重。前人 对小麦的研究表明,筛选低Cd积累品种是降低籽粒 Cd含量的有效方法,不同器官吸收转运Cd的生物学 机制对筛洗和应用低Cd积累小麦品种具有重要的指 导价值^[4],此外在水稻^[5]、玉米^[6]上也有相关的研究。 重金属从根部到地上部的转运能力是作物筛洗和改 告的重点^[7]。刘畅等^[8]的研究表明不同冬小麦品种 的颖壳、穗轴等器官是影响籽粒 Cd 积累差异的关 键器官:蔡秋玲等同的研究表明Cd从茎到叶的富集 转运是控制不同类型水稻籽粒Cd积累差异的关键 因素。不同作物间及同种作物不同品种类型间对 Cd的富集能力存在差异,目前,有关燕麦各器官吸 收转运 Cd 对籽粒 Cd 积累的影响及哪个器官或转运 过程在控制燕麦籽粒Cd含量的研究还鲜见报道。

针对影响不同品种燕麦籽粒Cd积累差异的问

题,本研究收集历年燕麦主产区主推种植的优质燕 麦品种,通过连续两年大田试验,分析不同品种燕麦 各器官Cd的富集系数、相邻器官间Cd的转运系数, 并通过相关性分析和主成分分析,揭示影响燕麦籽 粒Cd含量的关键器官和关键转运过程,并通过标靶 危害系数对不同品种燕麦进行安全风险评估,为燕 麦安全生产及内蒙古Cd污染农田的安全利用提供 理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

大田试验于2020年和2021年在内蒙古河套地区 某地进行,试验地年均降水量187.4 mm,年均温 14.3℃,试验区土壤为碱性棕钙土,该区由于有色金 属矿山开采导致土壤重金属Cd超标。供试区土壤理 化性质如表1所示。

1.2 供试材料与试验设计

供试燕麦品种共18种,其中坝燕7号、201229-1-1、坝莜3号、200919-7-1、品5、坝莜14号、坝燕4 号、坝燕6号由河北省张家口市农业科学院提供,燕 科2号、蒙燕1号、蒙燕2号、蒙燕3号由内蒙古自治区 农牧业科学院提供,白燕2号、白燕9号、白燕11号、 白燕15号、白燕17号、白燕20号由吉林省白城市农 业科学院提供,试验品种编号详见表2。

小区面积为21.6 m²(4 m×5.4 m),行距30 cm,26 行,随机播种,播种密度为4.5×10⁶ kg·hm⁻²的基本苗,

	Table 1 The physical and chemical properties of tested soil in the field experiment										
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 Available potassium/ (mg•kg ⁻¹)	碱解氮 Alkaline hydrolyzed nitrogen/ (mg·kg ⁻¹)	pH 值 pH value	阳离子交换量 Cation exchange capacity/ (cmol・kg ⁻¹)	土壤全Cd Soil total Cd/ (mg•kg ⁻¹)	
2020	0.029	0.084	2.10	20.7	53.0	228	192	7.35	7.9	0.82	
2021	0.135	0.098	9.03	22.5	65.0	264	174	7.61	17.5	1.51	

表1 大田试验供试土壤理化性质

表2 供试燕麦品种编号

Table 2 Serial number of tested oat varie	Table 2	Serial	number	of	tested	oat	variet
---	---------	--------	--------	----	--------	-----	--------

			,		
编号 Serial number	品种 Variety	编号 Serial number	品种 Variety	编号Serial number	品种Variety
Y1	坝燕7号Bayan No. 7	Y7	坝燕6号Bayan No.6	Y13	白燕20号Baiyan No.20
Y2	201229-1-1	Y8	坝燕4号Bayan No.4	Y14	白燕2号Baiyan No.2
Y3	坝莜3号Bayou No.3	¥9	燕科2号Yanke No.2	Y15	白燕9号 Baiyan No.9
Y4	200919-7-1	Y10	蒙燕3号 Mengyan No.3	Y16	白燕15号Baiyan No.15
Y5	品 5 Product 5	Y11	蒙燕2号 Mengyan No.2	Y17	白燕17号Baiyan No.17
Y6	坝莜14号Bayou No.14	Y12	白燕11号Baiyan No.11	Y18	蒙燕1号 Mengyan No.1

www.aer.org.cn

13²⁴⁶⁰

重复3次:机器开沟,人工播种。种肥二铵450 kg· hm⁻²,复合肥 150 kg · hm⁻²,拔节期追肥尿素 600 kg · hm⁻², 整个生育期灌水3次, 其他种植管理方式按照当 地常规习惯进行。

1.3 样品采集、处理与指标测定

1.3.1样品采集与处理

于成熟期取土样,每品种小区按照3点取样,取 耕层20 cm的根际土壤,剔除非土壤成分,在室内自 然风干,混匀后用四分法取样品 200 g,分别过 2 mm 和0.15 mm 筛后备用。

各小区燕麦收获时,按照3点取样,分别采集作 物根(根系先后用自来水和去离子水洗涤)、萃秆、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 ℃烘至质量恒定, 经粉碎机磨 碎后过100目筛待用。

1.3.2 指标测定

土壤基本理化性质参照《土壤农化分析(第三 版)》中的方法测定¹⁹;采用微波消解-石墨炉原子吸 收分光光度法测定土壤^[10]和植株^[11]的Cd含量。

1.4 数据处理

各燕麦品种Cd富集系数(BCF)和转运系数(TF) 计算公式如下:

BCF=燕麦各器官Cd含量(mg·kg⁻¹)/土壤中Cd 含量(mg·kg⁻¹)

TF=器官1的Cd含量(mg·kg⁻¹)/器官2的Cd含量 $(mg \cdot kg^{-1})$

 $EDI=(C \times FIR \times EF \times ED)/(365 \times Bw \times AT)^{[12]}$

THQ=EDI/RfD

式中:BCF为富集系数,表示燕麦对Cd的摄取能力;TF 为转运系数,表征Cd在燕麦体内的转运过程[13];EDI为 重金属膳食暴露量;THO为标靶危害系数,是用于人体 通过食物摄取重金属风险的评估方法,当THQ<1.0时, 则认为人体负荷的重金属对人体健康造成的影响不明 显;C为燕麦籽粒中重金属含量,µg·kg⁻¹;FIR为每人每 日谷物摄入量,g·人⁻¹·d⁻¹;EF为暴露频率,取365 d·a⁻¹; ED为暴露年限,取70a;Bw为成人的平均体质量,取65 kg·人⁻¹;AT为生命期望值,取70a;365为转化系数;RfD 为消化食物的比率,µg·kg·d⁻¹。成年人平均每天的谷 类食物食用量为261.1g·人⁻¹·d⁻¹;根据美国整合风险信 息系统,Cd的RfD为1.0 µg·kg⁻¹·d^{-1[14]}。

使用Excel 2010对数据进行统计处理和绘图,采 用 SPSS 22.0 进行方差分析和聚类分析,采用 Origin 2021进行主成分分析图绘制。

2 结果与分析

2.1 不同品种燕麦各器官Cd含量

不同燕麦品种根、茎、叶、颖壳、籽粒Cd含量如表 3所示,18个燕麦品种各器官Cd含量均表现为根>叶> 颖壳>茎>籽粒。2020年所选品种籽粒Cd含量在 0.088~0.289 mg·kg⁻¹之间,其中Y4和Y15 籽粒Cd含 量符合国家食品安全标准值0.1 mg·kg⁻¹(GB 2715-2016), 超标率为88.89%; 2021年所洗品种籽粒 Cd含 量在0.199~0.542 mg·kg⁻¹之间,18个燕麦供试品种Cd 含量均超过国家食品安全限值,超标率为100%。

2.2 不同品种燕麦籽粒 Cd 含量聚类分析

将2020年和2021年不同品种燕麦籽粒的Cd含量 进行综合聚类分析,将其分为高Cd积累型、中Cd积累 型、低Cd积累型3类。如图1所示,具有籽粒Cd低积 累特性的品种有 Y1、Y2、Y3、Y4、Y6、Y7、Y10、Y12、 Y13、Y14、Y15、Y16、Y18,占供试品种的72.22%:具有 籽粒Cd中积累特性的品种为Y5,占供试品种的5.6%; 具有籽粒Cd高积累特性的品种有Y8、Y9、Y11、Y17, 占供试品种的22.22%。在重金属中轻度污染区域可 优先考虑种植具有低积累特性的品种。

2.3 不同品种燕麦Cd富集特征差异

2.3.1 不同品种燕麦各器官Cd富集特征

根据聚类分析将18个燕麦品种分为高、中、低3 个Cd积累类型,不同Cd积累型燕麦品种各器官富集 系数见图2。两年数据综合表明,根的富集系数最 大,其次为叶,此外颖壳的Cd富集系数明显高于茎和 籽粒。除高积累品种Y8、Y9、Y11外,其他燕麦品种 各器官Cd富集系数均呈现BCF_根>BCF_H>BCF_{题壳}>





Figure 1 Cluster analysis of Cd accumulationin grains of tested

oat varieties

2022年11月

表3 燕麦各器官Cd含量(mg·kg⁻¹)

Table 3 Cd content in every organ of $oat(mg \cdot kg^{-1})$

年份	品种编号	根	茎	叶	颖壳	籽粒
Year	Variety number	Root	Stem	Leaf	Glume	Seed
2020	Y1	$0.782{\pm}0.104{\rm bcd}$	$0.292{\pm}0.009{\rm bcde}$	$0.508{\pm}0.028{\rm b}$	$0.450{\pm}0.030{\rm ab}$	$0.133{\pm}0.005{\rm cdefg}$
	Y2	0.969±0.117ab	0.448±0.070a	$0.533 \pm 0.118 \mathrm{b}$	$0.377{\pm}0.020 \mathrm{bcde}$	$0.170{\pm}0.033{\rm bc}$
	Y3	1.165±0.178a	$0.239{\pm}0.008{\rm defg}$	$0.495{\pm}0.084\mathrm{b}$	$0.338{\pm}0.051{\rm def}$	$0.162{\pm}0.023{\rm bcd}$
	Y4	$0.665{\pm}0.069{\rm d}$	0.166 ± 0.023 g	$0.447{\pm}0.027\mathrm{b}$	0.271±0.052f	0.098 ± 0.006 gh
	Y5	$0.910{\pm}0.157{\rm abcd}$	$0.360{\pm}0.076{\rm abc}$	$0.467{\pm}0.047{\rm b}$	$0.424{\pm}0.008{\rm abc}$	0.289±0.018a
	Y6	$0.723 \pm 0.04 \text{bcd}$	$0.167 \pm 0.004 g$	$0.518{\pm}0.036\mathrm{b}$	$0.344 \pm 0.012 def$	$0.143{\pm}0.013{\rm cdef}$
	¥7	$0.677{\pm}0.056{\rm cd}$	$0.195{\pm}0.013\rm{defg}$	$0.440 \pm 0.066 b$	$0.401{\pm}0.003{\rm abcd}$	$0.168{\pm}0.029{\rm bc}$
	Y8	$0.937{\pm}0.076{\rm abcd}$	$0.271{\pm}0.021{\rm cdef}$	$0.375 \pm 0.103 \mathrm{b}$	$0.288 \pm 0.038 f$	$0.123{\pm}0.006{\rm defgh}$
	Y9	1.013±0.211ab	0.375±0.116ab	0.753±0.196a	$0.451\pm0.012ab$	0.268±0.031a
	Y10	$0.732{\pm}0.051\mathrm{bcd}$	$0.191{\pm}0.025{\rm efg}$	$0.447 \pm 0.135 b$	$0.441{\pm}0.078{\rm abc}$	$0.107{\pm}0.017{\rm fgh}$
	Y11	$0.840{\pm}0.029{\rm bcd}$	$0.228{\pm}0.025{\rm defg}$	$0.424 \pm 0.035 b$	$0.341 \pm 0.009 def$	$0.163{\pm}0.014{\rm bcd}$
	Y12	$0.751{\pm}0.036{\rm bcd}$	$0.185{\pm}0.017\mathrm{fg}$	$0.396 \pm 0.011 \mathrm{b}$	$0.379{\pm}0.025 \mathrm{bcde}$	$0.112{\pm}0.005{\rm efgh}$
	Y13	$0.875{\pm}0.076{\rm bcd}$	$0.212{\pm}0.013\rm{defg}$	$0.493 \pm 0.071 \mathrm{b}$	$0.465 \pm 0.042a$	$0.115{\pm}0.012{\rm efgh}$
	Y14	$0.885{\pm}0.159{\rm abcd}$	$0.181 \pm 0.046 \text{fg}$	$0.479{\pm}0.094\mathrm{b}$	$0.322 \pm 0.009 \text{ef}$	0.109 ± 0.018 fgh
	Y15	$0.829{\pm}0.085{\rm bcd}$	$0.183 \pm 0.013 \text{fg}$	$0.497{\pm}0.074\mathrm{b}$	$0.324 \pm 0.014 ef$	0.088±0.013h
	Y16	$0.959 \pm 0.148 \mathrm{abc}$	$0.248{\pm}0.01\rm{defg}$	$0.562 \pm 0.023 \mathrm{b}$	$0.421{\pm}0.015{\rm abc}$	$0.186 \pm 0.018 \mathrm{b}$
	Y17	0.886±0.227abcd	$0.229{\pm}0.053{\rm defg}$	$0.391 \pm 0.019 \mathrm{b}$	$0.434{\pm}0.008{\rm abc}$	$0.108{\pm}0.007 \mathrm{fgh}$
	Y18	$0.956{\pm}0.047{\rm abc}$	$0.295{\pm}0.028{\rm bcd}$	$0.545 \pm 0.069 \mathrm{b}$	$0.373{\pm}0.021{\rm cde}$	$0.150{\pm}0.001{\rm bcde}$
2021	Y1	1.217 ± 0.155 bcd	$0.270{\pm}0.012{\rm cd}$	$0.469{\pm}0.083{\rm d}$	$0.355 \pm 0.011 \text{ef}$	$0.235 \pm 0.012c$
	Y2	$1.033 \pm 0.069 \text{bcd}$	$0.258{\pm}0.029{\rm cd}$	$0.550{\pm}0.066{\rm cd}$	0.309±0.05f	0.233±0.044c
	Y3	$1.257 \pm 0.082 \text{bcd}$	$0.360{\pm}0.052{\rm bed}$	$0.672{\pm}0.098{\rm bcd}$	$0.502{\pm}0.069{\rm cdef}$	$0.255 \pm 0.039c$
	Y4	$0.976{\pm}0.018{\rm cd}$	0.422±0.118abc	1.032±0.265a	$0.714{\pm}0.039{\rm abc}$	$0.234 \pm 0.007 c$
	Y5	$0.915{\pm}0.191\mathrm{d}$	$0.304{\pm}0.054{\rm bcd}$	$0.546{\pm}0.051{\rm cd}$	$0.364 \pm 0.028 \text{ef}$	$0.225 \pm 0.032c$
	Y6	1.350±0.271abc	0.348 ± 0.013 bed	$0.672{\pm}0.029{\rm bcd}$	$0.344 \pm 0.043 ef$	$0.214 \pm 0.056c$
	Y7	$1.123 \pm 0.046 \text{bcd}$	$0.262{\pm}0.089{\rm cd}$	$0.644{\pm}0.179{\rm bcd}$	$0.351 \pm 0.127 ef$	$0.220\pm0.069c$
	Y8	$1.307{\pm}0.068{\rm abc}$	0.387 ± 0.125 bed	1.003±0.261a	$0.821{\pm}0.057{\rm ab}$	0.542±0.072a
	Y9	$1.056{\pm}0.077{\rm bcd}$	$0.395{\pm}0.008{\rm bcd}$	$0.671{\pm}0.032{\rm bcd}$	$0.507{\pm}0.014{\rm cdef}$	$0.456 \pm 0.004 ab$
	Y10	1.343 ± 0.233 abc	$0.295{\pm}0.059{\rm bcd}$	$0.665{\pm}0.055{\rm bcd}$	$0.392{\pm}0.052{\rm def}$	$0.255{\pm}0.045{\rm c}$
	Y11	1.620±0.355a	0.562±0.099a	$0.677{\pm}0.207{\rm ab}$	0.889±0.072a	0.510±0.034a
	Y12	1.493±0.193ab	$0.377{\pm}0.095{\rm bcd}$	0.701 ± 0.111 bcd	$0.617{\pm}0.137{\rm cde}$	$0.308 \pm 0.071 c$
	Y13	$0.996{\pm}0.064{\rm bcd}$	$0.297{\pm}0.047{\rm bcd}$	$0.594{\pm}0.078{\rm bcd}$	$0.370 \pm 0.062 \mathrm{ef}$	$0.262 \pm 0.006c$
	Y14	$1.180{\pm}0.065{\rm bcd}$	$0.375{\pm}0.034{\rm bcd}$	$0.791{\pm}0.238{\rm abc}$	$0.520{\pm}0.029{\rm cdef}$	$0.273 \pm 0.039 c$
	Y15	$0.996{\pm}0.069{\rm bcd}$	$0.232{\pm}0.018\mathrm{d}$	0.6±0.043bcd	$0.277 \pm 0.055 f$	$0.199 \pm 0.029 c$
	Y16	$0.981{\pm}0.148{\rm bcd}$	$0.295 \pm 0.102 \text{bcd}$	$0.609{\pm}0.126{\rm bcd}$	$0.401{\pm}0.076\mathrm{def}$	$0.269{\pm}0.030{\rm c}$
	Y17	1.317±0.136abc	0.447±0.101ab	0.901±0.113ab	$0.628{\pm}0.073{\rm bcd}$	$0.436 \pm 0.067 \mathrm{ab}$
	Y18	$1.065{\pm}0.067{\rm bcd}$	$0.364{\pm}0.040{\rm bcd}$	$0.600{\pm}0.056{\rm bcd}$	$0.506{\pm}0.094{\rm cdef}$	$0.315 \pm 0.026 \mathrm{bc}$

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。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different treatments (P<0.05); data are presented as means± standard error. The same below.

BCF_茎>BCF_{将粒},且不同Cd积累型燕麦品种各器官富 集系数均小于1。

2.3.2 燕麦籽粒 Cd富集系数与其他器官 Cd富集系数的相关性

将燕麦籽粒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4所示。2020年和 2021年的结果表明,茎的Cd富集系数与籽粒Cd的富 集系数呈极显著正相关关系。

从燕麦各器官Cd富集系数的主成分分析载荷图 (图3)可以看出,两年试验共同表现为第一主成分中

2461

载荷较高的是BCF_{科粒}和BCF_茎,且BCF_茎和BCF_{科粒}距 离较近,表明茎的Cd富集系数对籽粒Cd的富集有正 效应,与其他器官相比茎的Cd含量对籽粒Cd含量影 响较大;BCF_根和BCF_{科粒}距离较远,表明根的Cd富集 系数对籽粒Cd含量的积累影响较小。综上所述,茎可 能是造成燕麦籽粒Cd含量差异的关键器官。

2.4 不同品种燕麦Cd转运特征差异

2.4.1 不同品种燕麦各器官间Cd转运特征

不同燕麦品种Cd从根到地上部各器官的转运系 数如图4所示。2020年和2021年的结果表明,除高

表4 燕麦籽粒Cd富集系数与各器官Cd富集系数的相关性

Table 4 Correlation between Cd enrichment coefficient of oat

grain and	Cd	enrich	iment	coefficient	of	each	organ	

年份Year	$BCF_{\mathbb{R}}$	$BCF_{\underline{x}}$	BCF Bit	$BCF_{intermediate}$
2020	0.178	0.613**	0.339	0.180
2021	0.512*	0.741**	0.497*	0.712*
I. →			L. →	

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

农业环境科学学报 第41卷第11期

积累品种Y8、Y9、Y17外,其他品种根到地上各器官 间的Cd转运系数中,Cd从根到叶的转运系数最高, Cd从根到籽粒的转运系数最低;而高Cd积累品种 Y8、Y9、Y17在2021年试验中则表现为根到茎的Cd 转运系数最低。地上部各器官间转运系数中,高积累 品种Cd从茎到籽粒、叶到颖壳、叶到籽粒、颖壳到籽 粒的转运系数较低积累品种高(图5)。

2.4.2 燕麦籽粒 Cd 富集系数与各器官间 Cd 转运的相关性

不同品种燕麦籽粒 Cd 富集系数与器官间 Cd 转运 系数的相关性分析如表5所示。两年数据共同表现为 Cd 从根到籽粒、叶到籽粒的转运系数与籽粒 Cd 含量 呈极显著正相关,茎到籽粒的 Cd 转运系数与籽粒 Cd 含量呈显著或极显著正相关关系;而 Cd 从茎到叶的转 运系数与籽粒 Cd 富集系数呈不显著负相关关系。

从燕麦各器官Cd转运系数和籽粒富集系数的主成分分析载荷图(图6)可以看出,两年试验共同表现为,TF_{将粒/根}、TF_{将粒/是}和BCF_{将粒}距离较近,表明根到籽粒、叶到籽粒、颖壳到籽粒的转运过程对籽粒Cd含量



Figure 2 The enrichment coefficients of Cd in various organs of different varieties of oats



图 3 富集系数的主成分分析载荷系数

Figure 3 Principal component analysis load factor plot for enrichment coefficients





Figure 4 Cd transport coefficients from roots to aboveground organs in different oat varieties

表5 籽粒Cd富集系数与各器官间Cd转运系数的相关性

Table 5 Correlation between grain Cd enrichment coefficient and Cd transport coefficient among organs

年份Year	$TF_{\frac{3}{2}/\mathbb{R}}$	$TF_{ m tr/R}$	$TF_{ m infty,R}$	TF _{料粒/根}	$TF_{ m tr/2}$	$TF_{$ $ m interms m, scheme m, sch$	$TF_{\ H^{rac{1}{2}}}$	TF _{颖壳/叶}	TF _{将粒/叶}	TF _{将粒/颖壳}
2020	0.606**	0.153	-0.021	0.907**	-0.438	-0.514*	0.521*	-0.134	0.851**	0.910**
2021	0.403	0.083	0.596**	0.867**	-0.278	0.630**	0.747**	0.691**	0.795**	0.229



Figure 5 Cd transport coefficients of aboveground organs of different oat varieties





的影响最大;TF_{叶莲}、TF_{颖壳}和BCF_{科粒}距离较远,表明 茎到叶、茎到颖壳的转运过程对籽粒Cd含量的积累 作用较小。综上所述,Cd从根到籽粒、茎到籽粒、叶 到籽粒的转运过程可能是造成燕麦籽粒Cd含量差异 的关键过程。

2.5 不同品种燕麦籽粒安全风险评价

不同品种燕麦标靶危害系数见图 7。2020年 THQ 值介于 0.352~1.160 之间,其中 THQ 最大值为 Y6、最小值为 Y16;2021年 THQ 值介于 0.800~2.179之 间,其中 THQ 最大值为 Y8、最小值为 Y15。结合籽粒

中文核心期刊





Figure 7 Cadmium bioconcentration factor of different oat varieties

Cd含量聚类分析及两年*THQ*值,在Cd污染地区可优 先推广种植Y1、Y2、Y4、Y6、Y7、Y15。

3 讨论

土壤中的Cd²⁺通过质外体或共质体途径进入根 系.之后逐渐向地上部运输. 籽粒中Cd含量与地上部 各器官对Cd的吸收和转运有关。本研究发现,燕麦 不同器官中根部的Cd富集系数最大,多数燕麦品种 各器官间的 Cd 转运系数中根到叶的转运系数最大、 根到籽粒的转运系数最小,表明燕麦吸收的Cd大部 分被截留在叶片中。辛艳卫等[15]、刘畅等[8]和张大众 等116在玉米和小麦上的研究表明,高、低Cd不同积累 型品种间作物根部的Cd富集系数最大,这与本研究 结果一致;而Cd在不同器官间的转运系数中,刘畅 等18的研究表明根到第5节间的值最小,反映了吸收 的Cd大部分被固定在根部。在本研究中,各器官Cd 富集系数中,根的Cd富集系数在高、低积累品种间的 差异较明显,但在两年试验中其与籽粒Cd富集系数 的相关性并不稳定,只在2021年有显著相关性;主成 分分析对区分高、低积累品种也没有发挥重要作用。 根到茎的Cd转运系数差异较明显,但在两年试验中 高、低积累品种间表现不稳定,与籽粒的Cd富集系数 无显著相关性;根到籽粒的Cd转运系数与其他器官 间转运系数相比差异较小,但相关性分析表明其与籽 粒Cd含量有极显著的相关性,在主成分分析中对区 分高、低Cd积累品种有一定贡献。在本研究中,根部 的吸收及根到叶的转运过程并不是影响燕麦籽粒 Cd 积累差异的关键因素,而根到籽粒的转运过程是影响 燕麦籽粒Cd积累差异的关键因素之一。蔡秋玲等¹⁵¹、 ZHANG 等^[17]和邓婷等^[6]通过田间试验分别对水稻、小 麦和玉米的研究表明高积累品种根部Cd含量较低积 累品种显著高;SHI等^[18]研究认为根部向地上部的转运过程是影响小麦 Cd积累的关键因素,这与本研究结果一致;蔡秋玲等^[5]对不同类型水稻的研究则表明影响高、低 Cd积累型水稻籽粒 Cd含量差异的关键因素是 Cd从茎到叶的富集转运。

有研究表明, 茎是地上部 Cd 转运的主要通道[17]. 不同品种籽粒中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和再分配^{118]}。在本研 究中,高积累品种茎和颖壳的Cd富集系数较低积累 品种高,低积累品种茎到叶的Cd转运系数较高积累 品种高,而茎到籽粒、叶到籽粒的Cd转运系数低于高 积累品种,表明低积累品种茎中的Cd在向上运输过 程中较多的被固定在茎和叶中,从而减少了向籽粒中 的运输。鄢小龙等^[19]的研究表明低积累植物将Cd积 累在根部,主要通过茎、叶部阻拦从而降低籽粒Cd含 量,这与本研究结果相似。在相关性分析中,茎到叶 的Cd转运系数与籽粒Cd富集系数呈不显著负相关, 且在主成分分析中对籽粒贡献较小;而茎到籽粒、叶 到籽粒的Cd转运系数与籽粒Cd含量呈显著正相关 关系,且在主成分分析中对区分高、低积累品种有一 定作用。而ZHANG等^[17]在研究高Cd积累小麦不同 节点时发现茎向上转运Cd的能力明显强于低积累品 种,这导致高、低积累小麦地上部Cd富集存在差异。 本研究与其研究结果不同,一方面可能与作物和种植 环境的差异有关,另一方面上述试验研究计算转运系 数是不同节点Cd含量的比值。综上所述,Cd从根、 茎、叶到籽粒的转运过程及茎中Cd的含量在决定燕 麦籽粒Cd积累差异中发挥了重要作用,同时这也为 喷施叶面调理剂,阻控茎叶中Cd向籽粒转运提供了 重要依据。

对于生长在受Cd污染土壤中的燕麦,可利用

THQ值进行评估,THQ值作为一种用于人体通过食物 摄取重金属风险的评估方法而被广泛应用^[20]。李乐 乐等^[21]对47份冬小麦进行低Cd积累品种筛选,所选 材料THQ值均小于1。张婍等^[22]以扬麦13号为材料 进行盆栽试验发现,籽粒中Cd的THQ值也随外源Cd 浓度的增加而增大,且儿童的THQ值大于成人。本 研究中18个燕麦品种在2020年除Y6外,其他品种 THQ值均小于1,2021年除Y1、Y2、Y4、Y6、Y7、Y15 外,其他品种THQ值均大于1。在两年试验中,13个 低积累品种THQ值均小于1的品种占比仅为46.2%。 因此,从粮食安全角度出发,符合标准的燕麦品种还 需进一步的长期验证,以满足安全生产和污染农田利 用的需要。

4 结论

(1)不同Cd积累型燕麦品种各器官Cd含量及Cd 富集系数总体表现为根>叶>颖壳>茎>籽粒的规律。

(2)相关性分析和主成分分析表明,茎是影响燕 麦籽粒 Cd 含量差异的关键器官,Cd 从根到籽粒、茎 到籽粒、叶到籽粒的转运过程是造成燕麦籽粒 Cd 含 量差异的关键转运过程。

(3)筛选籽粒低Cd积累型燕麦品种,对受污染燕 麦产区土壤的安全利用具有重要意义,综合籽粒Cd 聚类分析、标靶危害系数、富集系数以及转运系数结 果,可考虑将低积累品种(坝燕7号、201229-1-1、 200919-7-1、坝莜14号、坝燕6号、白燕9号)优先用 于Cd污染农田的推广种植。

参考文献:

- [1] 赵宝平, 刘景辉, 任长忠. 燕麦产量形成生理机制研究进展[J]. 作物 杂志, 2021(3):1-7. ZHAO B P, LIU J H, REN C Z. Research progress of physiological mechanism of yield formation in oats[J]. *Crops*, 2021(3):1-7.
- [2] 薄晓智, 石晓宇, 赵炯超, 等. 基于 MaxEnt 模型的中国裸燕麦种植 气候适宜性评价[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(9):1-10. BO X Z, SHI X Y, ZHAO J C, et al. Climatic suitability of naked oat (Avena Nuda L.) planting in China based on MaxEnt model[J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(9):1-10.
- [3] 欧阳燕莎, 刘爱玉, 李瑞莲. 镉对作物的影响及作物对镉毒害响应 研究进展[J]. 作物研究, 2016, 30(1):105-110. OUYANG Y S, LIU A Y, LI R L. Research progress on effects of cadmium on crops and the response of crops to cadmium[J]. *Crop Research*, 2016, 30(1):105-110.
- [4] 肖亚涛.冬小麦苗期对镉胁迫的响应及阻控机制研究[D].北京:中 国农业科学院, 2019. XIAO Y T. The response and control mechanism of cadmium stress during seedlings stage of winter wheat[D]. Bei-

农业环境科学学报 第41卷第11期

jing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.

- [5] 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.
- [6] 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, LUWS, WUJL, 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.
- [7] 李小方.重金属污染农田安全利用:目标、可选技术与可推广技术 [J].中国生态农业学报(中英文),2020,28(6):860-866. LIXF. Safe utilization of heavy metal-contaminated farmland:Goals, technical options, and extendable technology[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(6):860-866.
- [8] 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. Variations in cadmium accumulation and transport and ionomic traits among different winter wheat varieties[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(3):1596-1605.
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 三版. 北京:中国农业出版社, 2000:
 495. BAO S D. Soil agriculture chemistry analysis[M]. 3rd Edition.
 Beijing: China Agriculture Press, 2000:495.
- [10] 朱颜苹, 段桂玲, 亓学红. 原子吸收分光光度法测定土壤中的重金属[J]. 绿色科技, 2012(7):175-176. ZHU Y P, DUAN G L, QI X H. Determination of heavy metals in soil by atomic absorption spectro-photometry[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2012(7): 175-176.
- [11] 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. Methodology improvement in background elimination in plant Cd measurement by graphiteb furnace atom absorption[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(9): 2577-2580.
- [12] 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. A method to determine risk weight in dietary exposure assessment to heavy metals in vegetables and fruits[J]. *Food Science*, 2018, 39 (1):47-52.
- [13] 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. Differences in Pb accumulation between wheat varieties[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2014, 30(5):646-651.
- [14] LI H, LUO N, LI Y W, et al. Cadmium in rice: Transport mechanisms, influencing factors, and minimizing measures[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 224:622–630.
- [15] 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, LI-ANG C H, DU L Y, et al. Accumulation and translocation of cadmium

2467

in different maize cultivars[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(5):839-846.

- [16] 张大众,杨海川,菅明阳,等.Cd胁迫下小麦的形态生理响应及Cd 积累分布特征[J].农业环境科学学报,2019,38(9):2031-2040. ZHANG D Z, YANG H C, JIAN M Y, et al. Physiological response and Cd accumulation and distribution characteristics of wheat under Cd stress[J]. Journal of Agro - Environment Science, 2019, 38 (9): 2031-2040.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 鄢小龙,马宏朕,李元,等.铅锌矿区周边农田Cd、Pb低累积玉米 品种筛选[J]. 云南农业大学学报(自然科学),2019,34(6):1076-

1083. YAN X L, MA H Z, LI Y, et al. Screening zea mays cultivars based upon accumulation of Cd and Pb in the farmland around the lead – zinc mine area[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University* (*Natural Science*), 2019, 34(6):1076–1083.

- [20] HANG X S, WANG H Y, ZHOU J M, et al. Risk assessment of potentially toxic element pollution in soils and rice (*Oryza sativa* L) in a typical area of the Yangtze River Delta[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157:2542-2549.
- [21] 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.
- [22] 张婍, 李仁英, 徐向华, 等. 土壤镉污染对小麦生长及镉吸收的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(4):522-527. ZHANG Q, LI R Y, XU X H, et al. Effects of cadmium pollution in soil on growth and cadmium uptake of wheat[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2019, 36(4):522-527.

