

## 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

### 引用本文:

易超, 史高玲, 陈恒强, 姚澄, 潘云俊, 石月红, 李标, 高岩. 长江中下游麦区不同小麦品种镉积累差异研究[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(6): 1164-1174.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1373>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 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>

### 小麦株高和茎秆不同部位砷镉磷含量与籽粒砷镉磷含量的关系

史高玲, 马鸿翔, 娄来清, 蔡庆生

农业环境科学学报. 2017, 36(1): 8-15 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1044>

### 元江普通野生稻渗入系籽粒镉评价及与农艺性状的相关性分析

曾民, 曾黎琼, 王玲仙, 李娥贤, 钟巧芳, 赵白英, 郭蓉

农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1644-1649 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0196>

### 重金属Pb与抗生素对发光菌的联合毒性研究

李孟涵, 贺子琪, 苗家赫, 王风贺

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 1925-1936 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0103>

### 镉耐性固定细菌的筛选及其对不同品种小麦镉吸收的阻控效应

孙乐妮, 郭迎雪, 侯雪婷, 庄杰, 杨章泽, 陈兆进, 田伟

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 1878-1887 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0291>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

易超, 史高玲, 陈恒强, 等. 长江中下游麦区不同小麦品种镉积累差异研究[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(6): 1164–1174.

YI C, SHI G L, CHEN H Q, et al. Differences in cadmium accumulation among different wheat varieties in the middle and lower reaches of the Yangtze River, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(6): 1164–1174.



开放科学 OSID

# 长江中下游麦区不同小麦品种镉积累差异研究

易超<sup>1,2</sup>, 史高玲<sup>2\*</sup>, 陈恒强<sup>1,2</sup>, 姚澄<sup>1,2</sup>, 潘云俊<sup>3</sup>, 石月红<sup>3</sup>, 李标<sup>3</sup>, 高岩<sup>2\*</sup>

(1. 江苏大学环境与安全工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所/农业农村部长江下游平原农业环境重点实验室/国家农业环境六合一观测实验站, 南京 210014; 3. 常熟市耕地质量保护站, 江苏 常熟 215500)

**摘要:**为探究长江中下游麦区不同小麦品种对镉的积累差异,本研究于无污染农田中对长江中下游麦区107个小麦品种的镉积累能力进行了比较,并基于大田试验结果,从中选取了42个小麦品种,利用盆栽试验将其种植于轻度镉污染土壤中,进一步对小麦不同部位镉含量、农艺性状等指标进行了比较分析。结果表明:无污染条件下107个小麦品种籽粒镉含量分布在0.040~0.082 mg·kg<sup>-1</sup>范围内,均低于我国规定的限量值(0.1 mg·kg<sup>-1</sup>)。盆栽试验结果显示,42个小麦品种籽粒、秸秆镉含量范围分别为0.261~0.524 mg·kg<sup>-1</sup>和0.562~1.095 mg·kg<sup>-1</sup>,小麦籽粒镉含量与秸秆镉含量及秸秆向籽粒的镉转运系数呈显著正相关( $P<0.001$ )。小麦籽粒镉含量与小麦产量、株高、千粒质量等农艺性状无显著相关性,且聚类分析结果显示存在宁麦11这一低镉高产品种,表明通过常规育种方式筛选出低镉高产小麦品种是可行的。盆栽试验的42个小麦品种籽粒镉含量与大田试验中对应品种的籽粒镉含量呈显著正相关( $P<0.001$ ),表明在非污染和轻度镉污染条件下,小麦自身遗传特性是影响品种间镉积累差异的主要因素。因此,可在小麦品种审定过程中,测定参加生产试验的小麦籽粒镉含量,初步评估不同小麦对镉的积累能力。

**关键词:**小麦;镉;品种差异;农艺性状;低积累

中图分类号:S512.1;X173 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)06-1164-11 doi:10.11654/jaes.2021-1373

## Differences in cadmium accumulation among different wheat varieties in the middle and lower reaches of the Yangtze River, China

YI Chao<sup>1,2</sup>, SHI Gaoling<sup>2\*</sup>, CHEN Hengqiang<sup>1,2</sup>, YAO Cheng<sup>1,2</sup>, PAN Yunjun<sup>3</sup>, SHI Yuehong<sup>3</sup>, LI Biao<sup>3</sup>, GAO Yan<sup>2\*</sup>

(1. School of the Environment and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Agro-Environment in Downstream of Yangtze Plain, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Liuhe Observation and Experimental Station of National Agro-Environment, Nanjing 210014, China; 3. Changshu Cultivated Land Quality Protection Station, Changshu 215500, China)

**Abstract:** In order to explore the differences in Cd accumulation among different wheat varieties in the middle and lower reaches of the Yangtze River, a field experiment was conducted to compare the Cd accumulation capacity of 107 wheat varieties in a non-polluted farmland. Based on the field experiment results, 42 wheat varieties were selected and planted in pots with soil slightly contaminated with Cd. The differences in wheat agronomic traits and Cd accumulation and translocation among these cultivars were investigated in the pot experiment. Results of the field experiment showed that grain Cd concentrations of 107 wheat varieties ranged from 0.040 mg·kg<sup>-1</sup> to 0.082

收稿日期:2021-11-26 录用日期:2022-02-28

作者简介:易超(1997—),男,江西九江人,硕士研究生,主要从事农田土壤重金属污染修复研究。E-mail:yichao\_086@163.com

\*通信作者:史高玲 E-mail:shigaoling@jaas.ac.cn; 高岩 E-mail:ygao@jaas.ac.cn

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(20)1010);江苏省重点研发计划项目(BE2021717)

Project supported: Agricultural Independent Innovation Fund of Jiangsu Province(CX(20)1010); The Key Research and Development Program of Jiangsu Province(BE2021717)

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , which were all lower than the maximum permissible concentration in China ( $0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ). In the pot experiment, the Cd concentrations in grain and straw of 42 wheat varieties varied from  $0.261 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  to  $0.524 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  and  $0.562 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  to  $1.095 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , respectively. Grain Cd concentration was positively correlated ( $P < 0.001$ ) with straw Cd concentration and straw-to-grain Cd translocation, while no significant correlation was observed between grain Cd concentration and wheat agronomic traits such as wheat yield, plant height, and thousand kernel weight. Cluster analysis results demonstrated that Ningmai 11, a low Cd-accumulating and high-yielding variety, existed among the tested wheat varieties, indicating that it was feasible to screen wheat varieties with low Cd accumulation and high-yield by conventional breeding. Across all the 42 wheat varieties, correlation of grain Cd concentration between the pot experiment and field experiment was positive and highly significant ( $P < 0.001$ ). This result suggests that the genetic characteristics of wheat varieties are the main factors affecting the accumulation of Cd in wheat under non-polluted and slightly Cd polluted conditions. Therefore, it is possible to evaluate the Cd accumulation ability of different wheat cultivars by measuring grain Cd concentration at the stage of wheat production experiments, which are the final field experiments conducted before wheat cultivar approval and registration.

**Keywords:** wheat; cadmium; variety difference; agronomic trait; low accumulation

随着我国工业化和城市化进程的快速推进,土壤重金属污染问题也日益突出<sup>[1]</sup>。2014年环境保护部和国土资源部联合发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示:全国土壤点位总超标率为16.1%,耕地土壤点位超标率达19.4%,以中轻度污染为主;主要的污染类型为无机型污染,无机污染物的超标点位数占总超标点位的82.8%,其中重金属镉的点位超标率为7%<sup>[2]</sup>。镉(Cd)是一种人体非必需的有毒重金属,易通过食物链的传递作用在人体内累积,并持续威胁着人体健康<sup>[3]</sup>。长期摄入镉含量超标的食物会导致一系列人体器官的衰竭、癌变,著名的“痛痛病”便是长时间食用镉含量超标的大米引起的<sup>[4]</sup>。因此,镉也被世界卫生组织国际癌症研究机构(IARC)归为I类致癌物<sup>[5]</sup>。

小麦是我国第二大粮食作物,广泛种植于长江中下游平原、黄淮海平原、西南和西北等地区<sup>[6]</sup>。同时,小麦属于镉积累能力较强的作物之一,其对镉的积累能力甚至超过稻米<sup>[7-8]</sup>。近年来,小麦镉超标事件在我国被频繁报道,如河南新乡“镉麦”事件<sup>[9]</sup>。长江中下游麦区为我国小麦主要生产区之一,目前该区域的小麦籽粒镉超标率较高,达9.0%<sup>[10]</sup>。在江苏,一些镉污染区域小麦籽粒镉超标率通常为100%,部分样品籽粒镉含量甚至高达 $4.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[11-12]</sup>,对农业和食品安全构成了严重的威胁。然而在小麦籽粒镉超标形势严峻的当下,针对小麦镉污染治理方面的研究仍较为欠缺,如何控制与修复麦田镉污染、保障镉污染地区小麦的安全生产已成为当前亟待解决的问题。

在常用的土壤重金属污染修复技术中,物理化学修复的效果良好,但成本较高,在修复区域上也有一定的局限性<sup>[13-14]</sup>。植物修复近几年逐渐成为热门的

土壤修复技术,但却因其漫长的修复周期与作物耕种需求相冲突,而不适用于农田土壤重金属污染修复<sup>[9]</sup>。筛选重金属低积累作物品种,可在经济、高效地实现对土壤重金属阻控的同时,有效保障重金属污染地区农田的安全生产<sup>[13]</sup>。已有研究表明,小麦对重金属的吸收与累积存在显著的品种间差异<sup>[14]</sup>。基于此,国内外很多学者探究了不同小麦品种对镉的吸收、积累与转运差异,并开展了一系列低镉积累小麦品种的筛选工作。如LIU等<sup>[15]</sup>通过大田试验,分析了来自黄淮海麦区72个小麦品种对镉及微量营养元素的吸收差异,并从中筛选出了9个稳定的低镉积累小麦品种;LU等<sup>[16]</sup>比较了生长在轻度镉污染耕地上的30份小麦基因型对镉吸收、积累与分配的差异,认为考虑土壤条件、小麦基因型及其交互作用是筛选低镉积累小麦品种的重要条件;陈亚茹<sup>[17]</sup>以261份中国小麦微核心种质为研究材料,筛选出对重金属胁迫具有一定抗性且籽粒镉、铅低积累的小麦品种,并将其应用于后续的耐重金属胁迫小麦育种工作中。

现有的小麦品种间镉积累差异研究工作多涵盖数个麦区,所分析的小麦品种过于宽泛,针对性不足,适宜长江中下游种植的低镉积累小麦品种鲜有报道。此外,由于筛选低积累小麦品种所需的周期较长,很多低积累小麦品种被筛选出来后已不再是当地主推品种,如何保障筛选出的低积累小麦品种的时效性仍需进一步探索。本研究针对长江中下游麦区小麦镉污染超标率较高的现状,收集了107份适宜长江中下游麦区种植的小麦品种,首先于无污染农田中进行了初步的田间筛选试验。然后基于大田试验结果,按照随机均匀分布法,从中选取了42个低、中、高镉积累小麦品种,利用盆栽试验将其种植于轻度镉污染土壤

中,以研究不同小麦品种对镉积累、转运的差异,筛选出适宜长江中下游地区种植的低积累小麦品种,并对非污染条件和轻度镉污染条件下种植的小麦品种间镉积累差异的关系进行了分析,探究能否在小麦参与品种审定的同时,通过对小麦生产试验中各“准品种”小麦籽粒镉含量进行检测,初步判定各小麦品种对镉的积累能力,从而确保小麦品种筛选结果的时效性。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试小麦品种

大田试验所用107个供试小麦品种均属于长江中下游麦区种植品种,分别来自江苏、湖北、安徽等地区,对该麦区历年来的育种情况具有较强代表性<sup>[8]</sup>,品种信息详见表1。在大田试验的基础上,按照小麦籽粒镉浓度从高到低的顺序和随机均匀分布原则,从

107个小麦品种中选取了42个不同镉积累能力的小麦品种进行盆栽试验,具体品种信息详见表1(加粗品种)。

### 1.2 大田试验

大田试验于2016—2017年进行,试验地点位于江苏省农业科学院院内某试验田(32°01'54"N,118°52'23"E)。试验田表层(0~20 cm)土壤为黄棕壤,土壤镉含量为0.22 mg·kg<sup>-1</sup>,pH为6.56(土水比为1:2.5),有机质含量为23.11 g·kg<sup>-1</sup>,全氮含量为1.30 g·kg<sup>-1</sup>,有效磷含量为14.63 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾含量为110.09 mg·kg<sup>-1</sup>。试验按照完全随机区组设计,设置3组重复试验,试验小区行长1.6 m,行距30 cm,每个品种的每个重复种植3行。除所种植小麦品种不一致外,试验区域田间其他管理均保持一致,小麦田间管理参照当地管理模式。

表1 大田试验、盆栽试验供试小麦品种及其来源

Table 1 Wheat varieties tested in field experiment, pot experiment and their sources

编号 Number	品种 Variety	来源 Source									
1	宁麦3	江苏	28	<b>生选3号</b>	<b>江苏</b>	55	扬辐麦5号	江苏	82	鄂麦17	湖北
2	宁麦6	江苏	29	生选4号	江苏	56	镇麦5号	江苏	83	鄂麦18	湖北
3	宁麦7	江苏	30	生选5号	江苏	57	镇麦6号	江苏	84	鄂麦19	湖北
4	<b>宁麦8</b>	<b>江苏</b>	31	<b>生选6号</b>	<b>江苏</b>	58	镇麦8号	江苏	85	鄂麦21	湖北
5	<b>宁麦9</b>	<b>江苏</b>	32	扬麦5号	江苏	59	<b>镇麦9号</b>	<b>江苏</b>	86	鄂麦22	湖北
6	宁麦10	江苏	33	扬麦6号	江苏	60	<b>镇麦10号</b>	<b>江苏</b>	87	<b>鄂麦23</b>	<b>湖北</b>
7	<b>宁麦11</b>	<b>江苏</b>	34	扬麦9号	江苏	61	镇麦11	江苏	88	鄂麦24	湖北
8	宁麦12	江苏	35	扬麦10号	江苏	62	<b>镇麦12</b>	<b>江苏</b>	89	<b>鄂麦25</b>	<b>湖北</b>
9	<b>宁麦13</b>	<b>江苏</b>	36	<b>扬麦11</b>	<b>江苏</b>	63	镇麦168	江苏	90	<b>鄂麦26</b>	<b>湖北</b>
10	宁麦14	江苏	37	扬麦12	江苏	64	南农06Y86	江苏	91	<b>鄂麦27</b>	<b>湖北</b>
11	宁麦15	江苏	38	扬麦13	江苏	65	南农9918	江苏	92	鄂麦251	湖北
12	宁麦16	江苏	39	扬麦14	江苏	66	华麦5号	江苏	93	<b>鄂麦352</b>	<b>湖北</b>
13	<b>宁麦17</b>	<b>江苏</b>	40	<b>扬麦15</b>	<b>江苏</b>	67	华麦6号	江苏	94	<b>鄂麦580</b>	<b>湖北</b>
14	宁麦18	江苏	41	<b>扬麦16</b>	<b>江苏</b>	68	华麦8号	江苏	95	鄂麦596	湖北
15	宁麦19	江苏	42	<b>扬麦17</b>	<b>江苏</b>	69	<b>华麦12</b>	<b>湖北</b>	96	<b>襄麦25</b>	<b>湖北</b>
16	宁麦20	江苏	43	<b>扬麦18</b>	<b>江苏</b>	70	苏麦3号	江苏	97	<b>襄麦55</b>	<b>湖北</b>
17	<b>宁麦21</b>	<b>江苏</b>	44	扬麦19	江苏	71	苏麦5号	江苏	98	皖麦23	安徽
18	宁麦22	江苏	45	<b>扬麦20</b>	<b>江苏</b>	72	苏麦6号	江苏	99	<b>皖麦26</b>	<b>安徽</b>
19	宁麦23	江苏	46	<b>扬麦21</b>	<b>江苏</b>	73	苏麦8号	江苏	100	皖麦27	安徽
20	<b>宁麦24</b>	<b>江苏</b>	47	<b>扬麦22</b>	<b>江苏</b>	74	苏麦188	江苏	101	<b>皖麦32</b>	<b>安徽</b>
21	<b>宁麦26</b>	<b>江苏</b>	48	扬麦23	江苏	75	<b>苏科麦1号</b>	<b>江苏</b>	102	皖麦35	安徽
22	<b>宁麦27</b>	<b>江苏</b>	49	<b>扬麦27</b>	<b>江苏</b>	76	<b>申河麦1号</b>	<b>江苏</b>	103	皖麦42	安徽
23	宁糯麦1号	江苏	50	<b>扬麦158</b>	<b>江苏</b>	77	鄂麦11	湖北	104	<b>皖麦43</b>	<b>安徽</b>
24	宁盐1号	江苏	51	扬糯麦1号	江苏	78	鄂麦12	湖北	105	<b>皖麦54</b>	<b>安徽</b>
25	宁丰518	江苏	52	扬辐麦2号	江苏	79	鄂麦14	湖北	106	<b>轮选22</b>	<b>安徽</b>
26	生抗1号	江苏	53	扬辐麦3号	江苏	80	<b>鄂麦15</b>	<b>湖北</b>	107	安农92484	安徽
27	生抗2号	江苏	54	<b>扬辐麦4号</b>	<b>江苏</b>	81	鄂麦16	湖北			

### 1.3 盆栽试验

盆栽试验于2019—2020年进行,试验地点位于江苏省农业科学院院内试验基地(32°02′00″N, 118°52′25″E)。受试土壤采自江苏省农业科学院六合基地某块农田(32°29′07″N, 118°37′06″E)表层土壤,土壤镉含量背景值为0.19 mg·kg<sup>-1</sup>。土壤为黄棕壤,pH为6.65,有机质含量为14.24 g·kg<sup>-1</sup>,全氮含量为0.92 g·kg<sup>-1</sup>,有效磷含量为53.82 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾含量为141.57 mg·kg<sup>-1</sup>。土壤经风干、过10目筛后,以溶液的形式向土壤中加入CdCl<sub>2</sub>,使镉的最终添加量为0.60 mg·kg<sup>-1</sup>。添加过CdCl<sub>2</sub>的土壤经搅拌均匀后,加入一定量的水保持土壤在湿润状态下老化6个月,将老化后的土壤风干、敲碎、混匀过筛后进行盆栽试验。选用的盆钵材质为聚丙烯(PP),盆高、内径和外径分别为22、20.5 cm和24 cm,每盆装填5 kg受试土壤,基肥随土壤装盆时加入,每盆加入6 g氮磷钾复合肥(N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O比例为15:15:15),搅拌均匀,3 d后进行播种。选取饱满度相同、大小基本一致的小麦种子,用体积分数为10%的双氧水浸泡灭菌,10 min后用自来水和去离子水洗净,随后将种子置于润湿的培养皿中浸种1 d。将露白的种子转移至盆中,每盆均匀播种6粒,于同一天内完成。每个小麦品种设置3组重复试验,期间根据天气状况每盆等量浇水,约1个月后间苗,最终每盆留下大小和长势相同的3株小麦幼苗。所有盆钵随机放置,每隔两周重新更换各盆钵的摆放位置,小麦生长管理参照当地管理模式。

### 1.4 样品采集与处理

大田试验的小麦籽粒于小麦成熟期收获,采集每个重复处理中间一行的小麦,经人工分离出受试小麦的籽粒后,用自来水及去离子水洗净,在70℃的条件下烘干至恒质量,粉碎后过100目筛,留待消解、测定镉含量。

盆栽试验同样于小麦成熟期进行样品收获,收获时测量小麦株高。对每盆小麦进行分别采集,人工分离出籽粒、秸秆两部分后,用自来水及去离子水洗净,在70℃的条件下烘干至恒质量并称量,粉碎后过100目筛,留待消解、测定镉含量。

### 1.5 测试指标及方法

#### 1.5.1 土壤基本理化性质测定

土壤pH值用pH计(Mettler Toledo, FE-28, 德国)测定;全氮含量采用凯氏定氮法测定;有机质含量采用重铬酸钾-外加热法测定;速效磷含量采用碳酸氢钠提取,钼锑抗比色法测定;速效钾含量采用乙酸铵浸提法测定<sup>[19]</sup>。

#### 1.5.2 样品镉含量测定

小麦籽粒和秸秆样品的消解参考TAO等<sup>[20]</sup>的方法,采用HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>(V:V=1:1)进行电热消解,使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)(PerkinElmer, NexION-2000, 美国)测定样品中的镉含量。为确保样品检测的准确度,每批样品在消解过程中均带有试剂空白和植物标准物质样品(柑橘叶, GBW10020)。本实验过程中,标准物质镉的回收率范围为94%~105%。

#### 1.5.3 小麦镉转运系数

植物对重金属的转运系数(TF)是植物体内某部位的重金属含量与另一部位中同种重金属含量的比值,可用于表征某种元素在植物不同部位之间的转运能力<sup>[21]</sup>。公式如下:

$$TF_{\text{Straw-Grain}} = M_{\text{Grain}} / M_{\text{Straw}}$$

式中:TF<sub>Straw-Grain</sub>为小麦秸秆向籽粒转运镉的转运系数;M<sub>Grain</sub>、M<sub>Straw</sub>分别为小麦籽粒和秸秆中的镉含量,mg·kg<sup>-1</sup>。

### 1.6 数据处理

所有数据均使用SPSS 18.0和Excel 2016软件进行统计分析。采用单因素方差分析(ANOVA)及Duncan检验进行不同小麦品种中重金属镉含量的差异性分析;各指标间的相关性分析采用Pearson相关系数进行检验;小麦籽粒重金属镉含量及籽粒干质量通过离差平方和(Ward)聚类法进行聚类分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 大田试验小麦籽粒镉含量

大田试验中,于无污染土壤上生长的107个小麦品种籽粒镉含量如图1所示,不同小麦品种籽粒镉含量存在显著差异( $F=1.817, P<0.001$ )。籽粒镉含量最高的品种为扬麦21,镉含量为0.082 mg·kg<sup>-1</sup>,其次为镇麦10号和扬麦27;籽粒镉含量最低的品种为皖麦54,镉含量为0.040 mg·kg<sup>-1</sup>,其次为宁麦7和扬麦15。在大田试验107个供试品种中,小麦籽粒镉含量平均值为0.062 mg·kg<sup>-1</sup>,各品种间最大值为最小值的2.05倍,75%的小麦品种籽粒镉含量集中在0.050~0.070 mg·kg<sup>-1</sup>的范围内。

### 2.2 盆栽试验小麦籽粒和秸秆镉含量

如图2所示,盆栽试验中42个小麦品种的籽粒镉含量分布在0.261~0.524 mg·kg<sup>-1</sup>的范围内,各品种间最大值为最小值的2.00倍,平均值为0.384 mg·kg<sup>-1</sup>,不同品种间的籽粒镉含量存在显著差异( $F=3.013$ ,

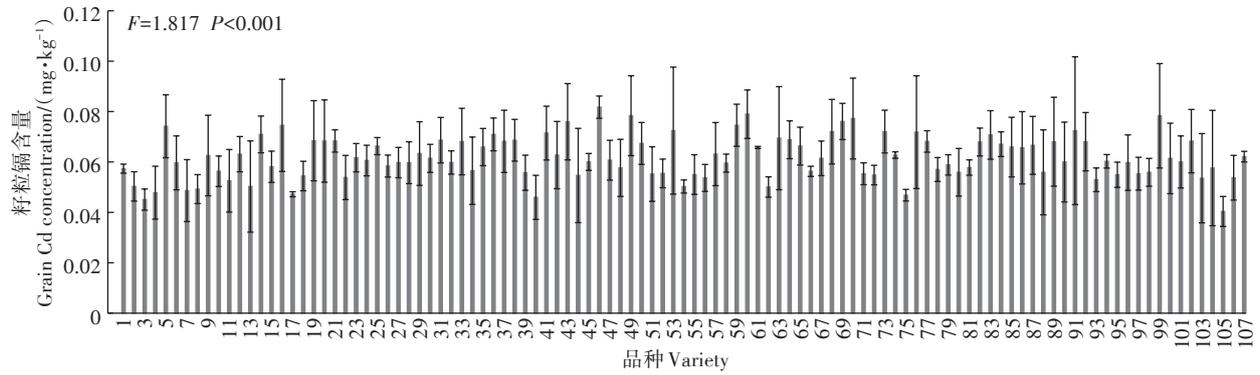


图1 大田试验107个小麦品种籽粒镉含量

Figure 1 Grain Cd concentration of 107 wheat varieties in field experiment

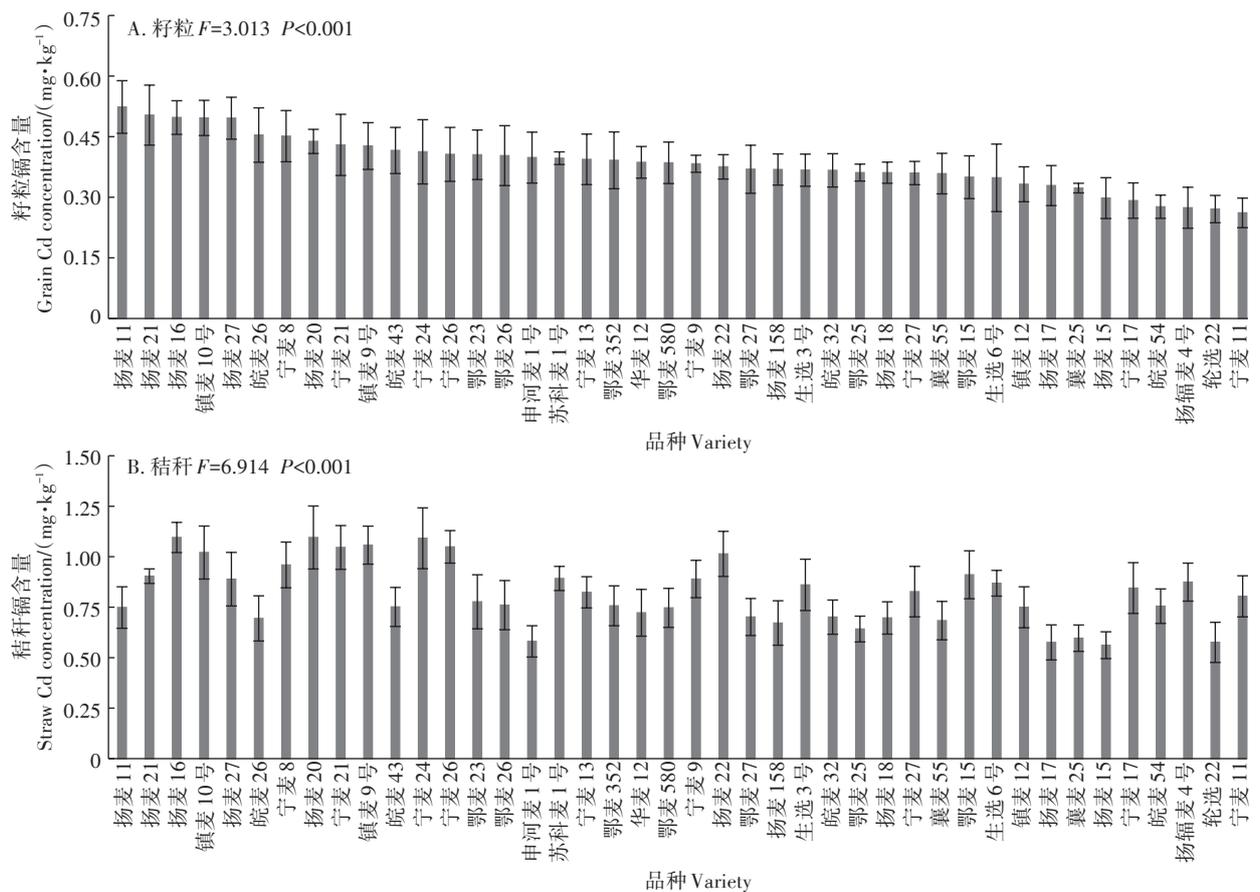


图2 盆栽试验42个小麦品种籽粒和秸秆镉含量

Figure 2 Cd concentration in grain and straw of 42 wheat varieties in pot experiment

$P<0.001$ )。其中,宁麦11、轮选22和扬辐麦4号3个品种籽粒镉积累量较低,分别为 $0.261$ 、 $0.270$   $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.274$   $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;而扬麦11、扬麦21和扬麦16的籽粒镉含量则高于其他小麦品种,分别达 $0.524$ 、 $0.503$   $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 及 $0.497$   $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。所有盆栽试验的受试小麦品种的秸秆镉含量均大于籽粒镉含量,且不同品种间的秸秆镉含量同样存在显著差异( $F=6.914$ , $P<0.001$ )。秸

秆镉含量分布范围介于 $0.562$   $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (扬麦15)和 $1.095$   $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (扬麦16)之间,其均值为 $0.816$   $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;各品种间秸秆镉含量的最大值为最小值的倍数(1.95倍)低于籽粒镉含量的相应倍数。

### 2.3 盆栽试验小麦镉转运系数

$TF$ 是评价不同小麦品系对镉积累差异的重要指标。对42个小麦品种的 $TF_{\text{Straw-Grain}}$ 进行分析(图3),

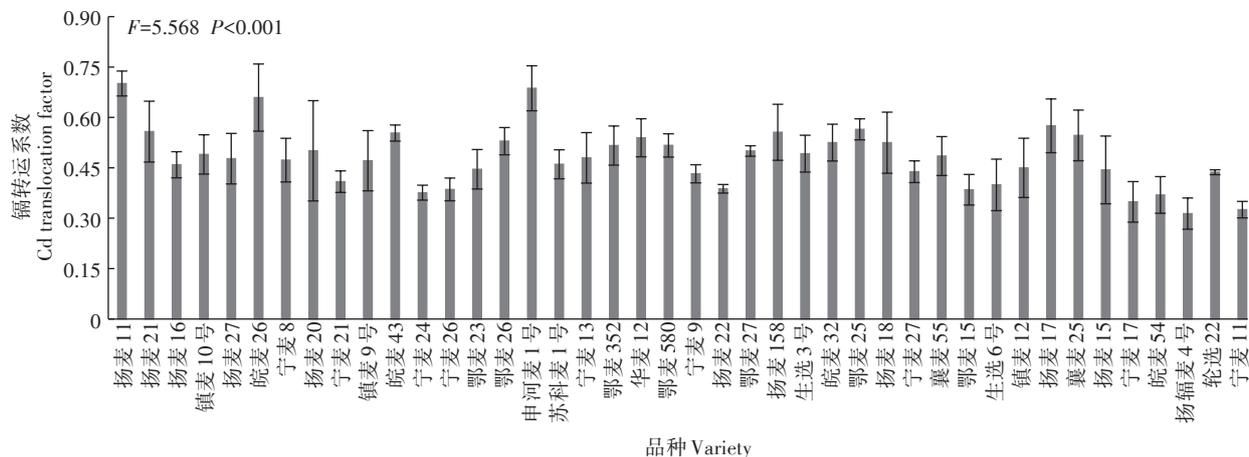


图3 盆栽试验42个小麦品种的镉转运系数( $TF_{Straw-Grain}$ )

Figure 3 Cd translocation factor ( $TF_{Straw-Grain}$ ) of 42 wheat varieties in pot experiment

发现  $TF_{Straw-Grain}$  值均小于1,分布范围为0.314(扬辐麦4号)~0.701(扬麦11),平均值为0.481,最大值为最小值的2.23倍,不同品种间存在显著差异( $F=5.568, P<0.001$ )。

#### 2.4 盆栽试验小麦各项农艺性状与籽粒、秸秆镉含量的相关性分析

对42个小麦品种的农艺性状及其籽粒、秸秆镉含量和  $TF_{Straw-Grain}$  进行了相关性分析,结果如表2所示。相关性系数表明,小麦籽粒镉含量与小麦秸秆镉含量、 $TF_{Straw-Grain}$  呈极显著正相关( $P<0.001$ ),与包含籽粒干质量、株高等在内的农艺性状无显著相关性;小麦秸秆镉含量与  $TF_{Straw-Grain}$  呈极显著负相关( $P<0.001$ ),与株高呈显著负相关( $P<0.01$ ),与籽粒秸秆干质量比呈显著正相关( $P<0.01$ );而  $TF_{Straw-Grain}$  与籽粒秸秆干质量比呈极显著负相关( $P<0.001$ ),与株高呈显著正相关( $P<0.05$ )。

在小麦的各项农艺性状中,籽粒干质量与秸秆干质量、籽粒秸秆干质量比呈极显著正相关( $P<0.001$ ),与千粒质量呈显著负相关( $P<0.05$ );秸秆干质量与株高呈极显著正相关( $P<0.001$ ),与籽粒秸秆干质量比呈极显著负相关( $P<0.001$ );小麦株高与千粒质量呈显著正相关( $P<0.01$ ),与籽粒秸秆干质量比呈极显著负相关( $P<0.001$ )。

#### 2.5 盆栽试验小麦籽粒镉含量及籽粒干质量的聚类分析

基于盆栽试验中的小麦籽粒镉含量,采用聚类分析法(系统聚类-离差平方和(Ward)法-平方Euclidean距离)将42份小麦品种分为5个类群(图4A),即第I类群(籽粒镉低积累品种)、第II类群(籽粒镉较低

积累品种)、第III类群(籽粒镉中积累品种)、第IV类群(籽粒镉较高积累品种)和第V类群(籽粒镉高积累品种),从而更为直观地反映这些品种的镉积累能力差异。从I到V,各个类群分别占供试小麦总数的14.29%、33.34%、28.57%、11.90%和11.90%。其中,第I类由宁麦11、轮选22、皖麦54、扬辐麦4号、扬麦15及宁麦17共6个品种组成;第II类由襄麦25、扬麦17、镇麦12等14个品种组成;第III类为包含宁麦9、鄂麦580、华麦12在内的12个品种;第IV类包括皖麦26、宁麦8等5个品种;而第V类则由扬麦11、扬麦21、扬麦16、镇麦10号和扬麦27组成。第I类中6个品种的籽粒镉含量分布在0.261~0.298  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围内,平均值为0.279  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,是本次试验中优先考虑的低镉积累小麦品种;而第V类中5个品种的籽粒镉含量平均值达0.503  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,从食品安全的角度考虑,不推荐将这些品种种植于镉污染地区。

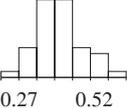
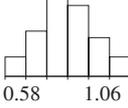
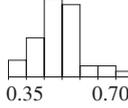
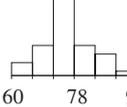
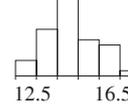
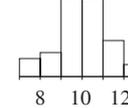
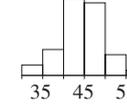
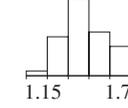
为明确不同小麦品种间产量差异,采用同种聚类分析法对42个小麦品种的籽粒干质量进行了分析(图4B)。结果表明,宁麦8、鄂麦26、宁麦11等8个品种组成的类群为籽粒干质量最高的类群,即高产类群,其平均籽粒干质量为16.08  $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$ ,最大值为16.65  $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$ (鄂麦26);而鄂麦352、襄麦55、皖麦26、扬麦22和生选3号这5个品种组成了低产类群,其平均籽粒干质量最低,为12.37  $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$ 。结合两次聚类分析结果,发现宁麦11为籽粒镉低积累品种类群与高产类群的交集,即为本次受试小麦中的低镉高产小麦品种。

#### 2.6 小麦品种间镉积累差异在非污染条件和污染条件下的相关性分析

为探究不同小麦品种在非污染和污染条件下对镉

表2 盆栽试验42个小麦品种籽粒镉含量、秸秆镉含量、镉转运系数及各项农艺性状之间的相关性系数

Table 2 Correlation coefficients of grain Cd concentration, straw Cd concentration, Cd translocation factor and wheat agronomic traits of 42 wheat varieties in pot experiment

指标 Index	籽粒镉含量 Grain Cd concentration	秸秆镉含量 Straw Cd concentration	镉转运系数 Cd translocation factor	株高 Plant height	籽粒干质量 Grain dry weight	秸秆干质量 Straw dry weight	千粒质量 Thousand kernel weight	籽粒干质量/ 秸秆干质量 Grain dry weight/ Straw dry weight
籽粒镉含量		0.480***	0.575***	-0.090	-0.096	-0.110	0.057	-0.045
秸秆镉含量			-0.358***	-0.303**	0.125	-0.131	-0.006	0.250**
镉转运系数				0.232*	-0.179	0.120	0.084	-0.332***
株高					-0.110	0.321***	0.301**	-0.438***
籽粒干质量						0.556***	-0.183*	0.358***
秸秆干质量							-0.088	-0.541***
千粒质量								-0.055
籽粒干质量/ 秸秆干质量								

注:数据后的\*表示相关性系数在0.05水平上显著;\*\*表示相关性系数在0.01水平上显著;\*\*\*表示相关性系数在0.001水平上显著。

Note: \* after the data indicates that the correlation coefficient is significant at the level of 0.05; \*\* indicates that the correlation coefficient is significant at the level of 0.01; \*\*\* indicates that the correlation coefficient is significant at the level of 0.001.

积累差异的关系,对盆栽试验中42个小麦品种的籽粒镉含量及对应品种的大田试验籽粒镉含量进行相关性分析(图5)。结果表明,盆栽试验与大田试验中的小麦籽粒镉含量呈极显著正相关( $r=0.612, P<0.001$ ),说明非污染条件下不同小麦品种对镉的积累差异在一定程度上能够反映其在污染条件下对镉的积累差异,例如镉积累能力较弱的宁麦11,无论是在非污染条件还是在轻度镉污染条件下均能保持较低的籽粒镉含量。故可通过各小麦品系在非污染条件下的镉积累差异来初步推测其镉积累能力。

### 3 讨论

作为自然界中毒性最强的重金属之一,镉即使是在极低的含量下也能通过食物链的传递对动植物健康构成严重威胁<sup>[22]</sup>。小麦是人类重要的粮食来源,且与其他谷物相比,小麦籽粒对镉的积累能力更强<sup>[18, 23]</sup>。因此,小麦籽粒中积累的镉是人体镉暴露的主要来源之一。目前,国内外许多学者的研究均表明,不同小麦品种的籽粒对重金属镉的积累能力存在着显著差异<sup>[14-16, 24]</sup>。孙洪欣等<sup>[24]</sup>在轻度镉污染条件下比较了北

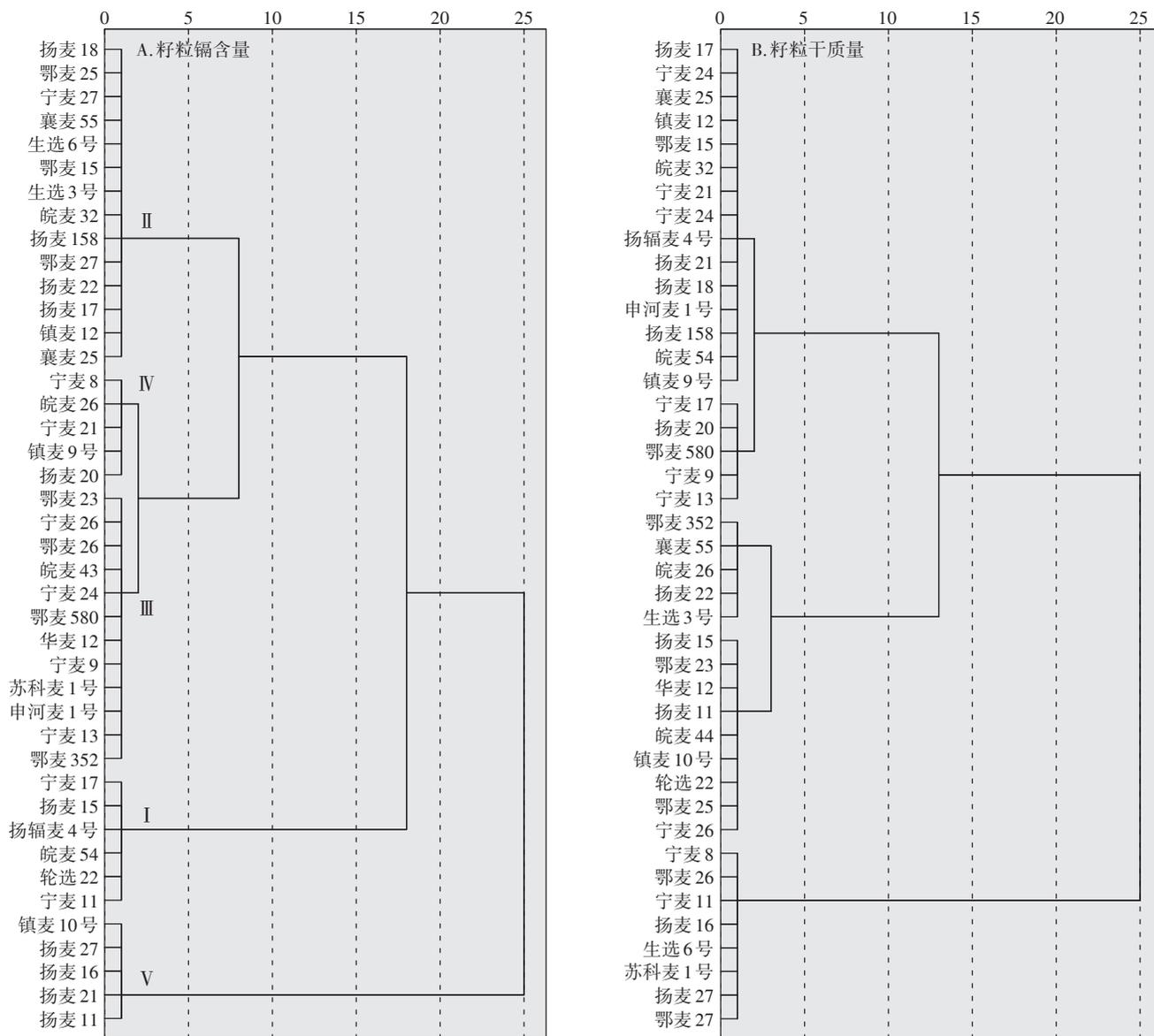


图4 盆栽试验42个小麦品种籽粒镉含量及籽粒干质量的聚类分析

Figure 4 Cluster analysis of grain Cd concentration and grain dry weight of 42 wheat varieties in pot experiment

方10个小麦品种对镉的积累差异,发现受试的10个小麦品种间镉积累量最大值为最小值的1.94倍。LIU等<sup>[15]</sup>通过多点试验,比较了黄淮海麦区72个小麦品种对镉的积累差异,发现受试的72个小麦品种对镉积累量的最大值为最小值的2~3倍。本研究同样发现,无论是在无污染还是在镉轻度污染条件下,不同小麦品种籽粒对镉的积累均出现了显著的品种间差异( $P<0.001$ ),不同小麦品种在无污染大田试验和轻度镉污染盆栽试验条件下的最大值为最小值的2.05倍和2.00倍(图1和图2)。进一步分析发现,小麦籽粒镉含量与秸秆镉含量、镉从秸秆向籽粒的转运能力均呈显著正相关(表2),表明小麦品种间籽粒镉含量差异与镉从根系向地上部转运的总量以及镉从

秸秆向籽粒的转运能力均相关。同时,较强的转运能力也是高镉积累小麦品种扬麦11籽粒镉积累量高的主要原因,盆栽试验42个小麦品种中,扬麦11的 $TF_{\text{Straw-Grain}}$ 最高,达0.701(图3)。因此,解析不同小麦品种对镉转运差异的生理与分子机制有助于阐明高镉积累小麦品种的镉积累机制。有研究表明,农作物的生育期是影响作物可食部位镉积累的因素之一。如DUAN等<sup>[25]</sup>对水稻的研究结果表明,水稻籽粒镉含量与水稻抽穗日期呈显著正相关,抽穗期越早的水稻品种籽粒镉含量越低。而本研究中的42个小麦品种同属长江中下游麦区,生育期较为接近,在种植时间一致的情况下,品种间抽穗期、成熟期相差不超过5 d,对小麦镉积累的影响微乎其微。因此,生育期差异

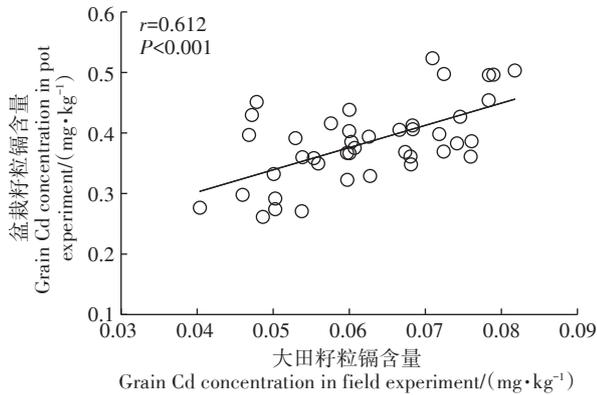


图5 非污染(大田)和轻度污染(盆栽)条件下小麦籽粒镉含量相关性分析

Figure 5 Correlation analysis of Cd concentration in wheat grain under non-polluted(field) and slightly polluted(pot) conditions

并非导致本研究中不同小麦品种对镉积累出现差异的原因。

针对小麦、水稻等主要粮食作物的重金属镉超标问题,目前已开展了多项研究<sup>[26-27]</sup>。我国《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)规定,谷物及其制品中镉的限定阈值为 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,一旦超过该值就会威胁谷物质量安全。本研究在无污染土壤条件下进行的大田试验结果显示,107种小麦的籽粒镉含量分布在 $0.040 \sim 0.082 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围内,均低于标准所规定的限定阈值,即在无污染土壤中,受试的长江中下游麦区小麦品种均可安全生产。然而本研究的盆栽试验结果表明,在轻度镉污染条件下,42个小麦品种的籽粒镉含量均超过国家规定阈值,部分品种籽粒镉含量可达 $0.524 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (扬麦11),这与熊孜等<sup>[28]</sup>和邢维芹等<sup>[29]</sup>的研究结果一致。而在江苏,工业发展带来的耕地镉污染问题已严重威胁到小麦的安全生产,其中以苏南地区和徐州等工业发达地区的小麦镉超标现象最为常见<sup>[30]</sup>,一些镉污染区域小麦籽粒镉超标率通常为100%,部分小麦籽粒镉含量甚至高达 $4.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[11-12]</sup>。因此,前人及本研究的结果均表明小麦籽粒对镉的积累能力较强,小麦高富集镉的机制应当得到更多的关注与研究。

产量是小麦选育过程中最重要的指标之一<sup>[31]</sup>,然而小麦籽粒镉含量与小麦产量的关系尚不明确。是否能选育出低镉高产小麦品种,在保证食品安全不受重金属镉威胁的同时尽可能实现稳产高产,已成为目前低镉小麦育种工作中的关键问题。本研究结果显示,小麦籽粒镉含量与小麦籽粒干质量无显著相关性(表2),表明选育同时具备低镉积累和高产特性的小

麦品种是可行的。对小麦籽粒镉含量和籽粒干质量分别进行聚类分析,发现品种宁麦11同时具备高产与低籽粒镉含量两个特征(图4),这进一步印证了筛选低镉高产小麦品种的可行性。前人的研究也筛选出了一些低镉且相对高产的小麦品种,如陈亮妹等<sup>[32]</sup>在镉重度污染农田及非污染农田间进行了12个小麦品种的筛选试验,最终确定扬麦20和宁麦8为籽粒镉积累量较低、产量较高的小麦品种;孙洪欣等<sup>[24]</sup>基于北方冬麦区的10个小麦品种在污灌区的产量、籽粒重金属含量和转运系数等指标,筛选出适宜在黄淮海麦区北部种植的兼具高产和低镉积累能力的小麦品种济麦22。此外,在筛选低镉积累小麦品种时,除了保证其可食部位镉含量相比于其他品种处于尽可能低的水平外,还应将较低的镉转运水平纳入参考范围内,即最终筛选出的小麦品种应兼顾低籽粒镉含量和低镉转运系数这两点<sup>[33-34]</sup>。本研究中的扬辐麦4号、宁麦11、宁麦17和皖麦54这4个品种的镉转运系数均处于较低水平(图3),平均值为0.339,且在非污染的大田试验中同样呈现出较低的籽粒镉含量(图1),符合低镉积累小麦品种的筛选标准。因此,根据以上结果可将宁麦11、扬辐麦4号、皖麦54和宁麦17认定为本次受试小麦中的低镉积累品种,其中的宁麦11作为低镉高产品种,适用于长江中下游麦区的推广种植。

关于低积累小麦品种的筛选,前人已开展过大量的研究,但这些研究筛选出的小麦品种常面临着即将退出或已退出市场的问题,多数低积累品种难以得到大面积推广应用<sup>[35-37]</sup>。重金属低积累品种筛选是一项工作量大、周期长的工程,而小麦又具有较长的生育期,从而导致低积累小麦品种的筛选结果难以跟上小麦主推品种的更新速度。对此,目前亟待开发一种能够在小麦进入市场前即可初步判定小麦镉积累能力的方法,为后期稳定低积累小麦品种的筛选提供候选名单,在缩小筛选范围的同时缩短筛选周期,从而保障低积累小麦品种筛选结果的时效性。本研究结果显示,42个小麦品种在非污染大田试验和轻度镉污染盆栽试验中的籽粒镉含量呈显著正相关(图5),说明小麦品种间镉积累差异在无污染和轻度镉污染条件下具有一致性,类似的结果也出现在LIU等<sup>[15]</sup>和LU等<sup>[16]</sup>的研究中。这些研究表明,小麦自身遗传特性是影响其镉积累的主要因素之一,这与DUAN等<sup>[25]</sup>在水稻中的研究结果一致,其通过对多点大田试验结果进行分析,发现水稻基因型、环境以及基因型与环境互作对稻米镉积累的贡献分别为48%、16%和

26%。因此,对生长于无污染条件下不同小麦对镉的积累差异进行比较,也可在一定程度上评估其在轻度镉污染条件下对镉的积累水平。而小麦在品种审定完成前需要投入大面积的生产试验,在此期间可检测这些小麦“准品种”的籽粒镉含量,在小麦材料尚处于品种审定阶段时就对其镉积累能力进行初步评价,从而为低镉积累小麦筛选提供第一手数据。这将显著缩短低镉积累小麦品种的筛选周期,在保证筛选结果时效性的同时,也为低镉积累小麦品种的最终鉴定提供重要的参考依据。

#### 4 结论

(1)无论是在非污染还是在轻度镉污染条件下,小麦籽粒镉含量均存在显著的品种间差异,且品种间镉积累差异在两种条件下较为一致。因此,通过对同时期投入生产试验的小麦“准品种”籽粒镉含量进行检测,可初步评判各小麦品系对镉的积累能力,确保低镉积累小麦品种筛选结果的时效性。

(2)小麦籽粒镉含量与秸秆镉含量、镉从秸秆向籽粒的转运系数均呈极显著正相关,表明小麦籽粒对镉积累的品种间差异同时取决于小麦根系转运到地上部镉的总量和镉从秸秆向籽粒的转运能力。

(3)小麦籽粒镉含量和产量间无显著相关性,通过常规育种方式选育出低镉高产小麦品种具有可行性。本研究的受试品种中,宁麦11为低镉高产小麦品种,推荐用于长江中下游麦区推广种植。

#### 参考文献:

- [1] 杨启良,武振中,陈金陵,等.植物修复重金属污染土壤的研究现状及其水肥调控技术展望[J].生态环境学报,2015,24(6):1075-1084. YANG Q L, WU Z Z, CHEN J L, et al. Research status of phytoremediation of heavy metals contaminated soil and prospects of water and fertilizer regulating technology[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(6):1075-1084.
- [2] 环境保护部,国土资源部.全国土壤污染状况调查公报[R].北京:环境保护部,国土资源部,2014. Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources. Bulletin of the national survey of soil pollution[R]. Beijing: Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources, 2014.
- [3] ZHAI L M, LIAO X Y, CHEN T B, et al. Regional assessment of cadmium pollution in agricultural lands and the potential health risk related to intensive mining activities: A case study in Chenzhou City, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20(6):696-703.
- [4] 史高玲,马鸿翔,娄来清,等.小麦株高和茎秆不同部位砷磷含量与籽粒砷磷含量的关系[J].农业环境科学学报,2017,36(1):8-15. SHI G L, MA H X, LOU L Q, et al. Relationship between arsenic, cadmium, and phosphorous concentrations in different parts of wheat straw, wheat plant height and grain arsenic, cadmium, and phosphorous concentrations[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(1):8-15.
- [5] SHASID H, ALI M K, ZED R. Zinc-biofortified wheat accumulates more cadmium in grains than standard wheat when grown on cadmium-contaminated soil regardless of soil and foliar zinc application[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 654:402-408.
- [6] 赵一静,王晓利,侯西勇,等.2003—2019年山东省冬小麦关键物候期时空特征[J].生态学报,2021,41(19):7785-7795. ZHAO Y J, WANG X L, HOU X Y, et al. Spatio-temporal characteristics of key phenology of winter wheat in Shandong Province from 2003 to 2019[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(19):7785-7795.
- [7] 夏亦涛.小麦镉高低积累品种筛选及其镉吸收转运的差异机制[D].武汉:华中农业大学,2018:11-13. XIA Y T. Screening of high and low cadmium accumulation *Triticum aestivum* varieties and research on the difference and mechanism of cadmium absorption and transport[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018:11-13.
- [8] YANG J L, CANG L, WANG X, et al. Field survey study on the difference in Cd accumulation capacity of rice and wheat in rice-wheat rotation area[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(4):2082-2092.
- [9] LI X F. Technical solutions for the safe utilization of heavy metal-contaminated farmland in China: A critical review[J]. *Land Degradation & Development*, 2019, 30:1773-1784.
- [10] 陆美斌,陈志军,李为喜,等.中国两大优势产区小麦重金属镉含量调查与膳食暴露评估[J].中国农业科学,2015,48(19):3866-3876. LU M B, CHEN Z J, LI W X, et al. Survey and dietary exposure assessment of cadmium in wheat from two main wheat-producing regions in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(19):3866-3876.
- [11] 曹丹,白耀博,李文红.不同施肥处理对土壤质量及小麦吸收镉的影响[J].现代农业科技,2020(9):1-2. CAO D, BAI Y B, LI W H. Effects of different fertilization treatments on soil quality and cadmium uptake by wheat[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2020(9):1-2.
- [12] 史高玲,周东美,余向阳,等.水稻和小麦累积镉和砷的机制与阻控对策[J].江苏农业学报,2021,37(5):1333-1343. SHI G L, ZHOU D M, YU X Y, et al. Mechanisms of cadmium and arsenic accumulation in rice and wheat and related mitigation strategies[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 37(5):1333-1343.
- [13] 潘建清,陆敏,杨肖娥.不同小麦品种灌浆期生长和镉积累的差异研究[J].农业环境科学学报,2021,40(4):756-765. PAN J Q, LU M, YANG X E. Variations in growth and cadmium accumulation among 30 wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars during the grain filling stage[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(4):756-765.
- [14] LIU W T, LIANG L C, ZHANG X, et al. Cultivar variations in cadmium and lead accumulation and distribution among 30 wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2015, 22(11):8432-8441.
- [15] LIU N, HUANG X M, SUN L M, et al. Screening stably low cadmium and moderately high micronutrients wheat cultivars under three different agricultural environments of China[J]. *Chemosphere*, 2020, 241:125065.

- [16] LU M, CAO X R, PAN J Q, et al. Identification of wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes for food safety on two different cadmium contaminated soils[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(8):7943-7956.
- [17] 陈亚茹. 中国小麦微核心种质重金属低积累品种筛选及低积累等位变异发掘[D]. 南京:南京农业大学, 2017:23-40. CHEN Y R. Screening and identification of Chinese wheat mini-core collections germplasms for low heavy metal accumulation in grain and exploring low accumulation alleles[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017:23-40.
- [18] 王化敦, 高春蕾, 张鹏, 等. 长江中下游麦区小麦品种籽粒硬度及  *puroindoline*  基因等位变异的分子检测[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(4):438-444. WANG H D, GAO C L, ZHANG P, et al. Allelic variation of  *puroindoline*  alleles in bread wheats from lower-middle reaches of the Yangtze River[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017, 37(4):438-444.
- [19] 樊广萍, 姚澄, 周东美, 等. 不同增强试剂对二维电场下伴矿景天修复镉污染土壤的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(12):2669-2680. FAN G P, YAO C, ZHOU D M, et al. Effects of different enhancing agents on the remediation of cadmium contaminated soil by  *Sedum plumbizincicola*  under a two-dimensional electric field [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(12):2669-2680.
- [20] TAO Y, ZHANG S, JIAN W, et al. Effects of oxalate and phosphate on the release of arsenic from contaminated soils and arsenic accumulation in wheat[J]. *Chemosphere*, 2006, 65(8):1281-1287.
- [21] 刘克, 和文祥, 张红, 等. 镉在小麦各部位的富集和转运及籽粒镉含量的预测模型[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(8):1441-1448. LIU K, HE W X, ZHANG H, et al. Cadmium accumulation and translocation in wheat and grain Cd prediction[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(8):1441-1448.
- [22] ABIN S, MAJETI N V P. Cadmium minimization in rice. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2014, 34(1):155-173.
- [23] MUHAMMAD R, SHAFIAT A, TAHIR A, et al. Cadmium minimization in wheat: A critical review[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, 130:43-53.
- [24] 孙洪欣, 薛培英, 赵全利, 等. 镉、铅积累与转运在冬小麦品种间的差异[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(8):1161-1167. SUN H X, XUE P Y, ZHAO Q L, et al. Differences of cadmium and lead accumulation and transportation among winter wheat varieties[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35(8):1161-1167.
- [25] DUAN G L, SHAO G S, TANG Z, et al. Genotypic and environmental variations in grain cadmium and arsenic concentrations among a panel of high yielding rice cultivars[J]. *Rice*, 2017, 10(1):1-13.
- [26] CHEN H P, ZHANG W W, YANG X P, et al. Effective methods to reduce cadmium accumulation in rice grain[J]. *Chemosphere*, 2018, 207:699-707.
- [27] 徐建明, 孟俊, 刘杏梅, 等. 我国农田土壤重金属污染防治与粮食安全保障[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2):153-159. XU J M, MENG J, LIU X M, et al. Control of heavy metal pollution in farmland of China in terms of food security[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2):153-159.
- [28] 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. Accumulation and translocation of cadmium in different wheat cultivars in farmland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(1):36-44.
- [29] 邢维芹, 张红毅, KIRK G S, 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, KIRK G S, 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.
- [30] 陈定玉, 祁超, 郭炳跃, 等. 江苏中部农业园小麦和土壤镉元素含量关系研究[J]. 环境监测与预警, 2021, 13(5):109-115. CHEN D Y, QI C, GUO B Y, et al. Study on the relationship between the content of cadmium in wheat and soil in an agricultural park in central Jiangsu[J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2021, 13(5):109-115.
- [31] 何中虎, 夏先春, 陈新民, 等. 中国小麦育种进展与展望[J]. 作物学报, 2011, 37(2):202-215. HE Z H, XIA X C, CHEN X M, et al. Progress of wheat breeding in China and the future perspective[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(2):202-215.
- [32] 陈亮妹, 于倩倩, 胡兆云, 等. 小麦品种与生物有机肥联合修复农田镉污染研究[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(12):1627-1633. CHEN L M, YU Q Q, HU Z Y, et al. Study on wheat varieties and bio-organic fertilizer in remediation of cadmium polluted farmland[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017, 37(12):1627-1633.
- [33] 肖亚涛. 冬小麦籽粒镉低积累品种的生产特性及其低积累机制研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2016:15-23. XIAO Y T. Production characteristics and mechanism of low accumulation in winter wheat with low cadmium accumulation in grain[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016:15-23.
- [34] 冯爱焯, 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.
- [35] ARDUINI I, MASONI A, MARIOTTI M, et al. Cadmium uptake and translocation in durum wheat varieties differing in grain-Cd accumulation[J]. *Plant, Soil and Environment*, 2014, 64:43-49.
- [36] 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.
- [37] 徐颖菲. 基于品种筛选与原位钝化的镉轻度污染农田安全利用技术研究[D]. 杭州:浙江大学, 2020:29-35. XU Y F. Safe utilization of slightly cadmium-polluted farmland based on cultivar screening and  *in-situ*  immobilization[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020:29-35.

(责任编辑:宋潇)