

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 Zi, LI Ju-mei, ZHAO Hui-wei, et al. Accumulation and translocation of cadmium in different wheat cultivars in farmland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(1): 36-44.

不同小麦品种对大田中低量镉富集及转运研究

熊 孜¹, 李菊梅^{1*}, 赵会薇², 马义兵¹

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 国家土壤肥力与肥料效益监测站网, 北京 100081; 2. 国家半干旱农业工程技术研究中心, 石家庄 050051)

摘要:为解决 Cd 污染带来的粮食安全问题及为小麦品种推广应用提供品种特征数据资料, 采用田间调查的方法, 于黄淮海平原 9 个小麦种植区采集了 59 个小麦品种, 共计 91 组土壤-植物点对点样品, 基于小麦不同部位 Cd 含量、茎叶 Cd 转移系数(TF)及籽粒 Cd 富集系数(BCF)值等指标对不同小麦品种 Cd 富集能力进行比较研究; 采用聚类分析, 以不同基因型小麦的 BCF 为筛选条件, 对 59 个小麦品种进行了分类。结果表明:除济源外(2.292 mg·kg⁻¹), 研究区表层土壤 Cd 污染状况整体尚好(0.107~0.212 mg·kg⁻¹); 济源小麦品种籽粒 Cd 含量范围为 0.119~0.150 mg·kg⁻¹, 其他样点为 0.005~0.030 mg·kg⁻¹; TF 变化区间为 0.093~0.500, 最大与最小值间相差约 4.4 倍; BCF 变化区间为 0.047~0.165, 最大与最小值间相差约 2.5 倍。经聚类分析把不同品种小麦 Cd 的 BCF 值分为五类, 并筛选出冀麦 518、衡 0628、衡 09 观 29 三个低 Cd 富集小麦品种。通过 BCF 推算, 在保障籽粒 Cd 含量不超过食品安全限量标准的前提下, 59 个小麦品种基本上都可以在国家规定的二类 Cd 污染土壤上种植, 其中, 有 27 个小麦品种还可以在三级 Cd 污染土壤上种植。

关键词:大田; 小麦品种; Cd; 转运; 富集

中图分类号:S512.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2018)01-0036-09 **doi:**10.11654/jaes.2017-0811

Accumulation and translocation of cadmium in different wheat cultivars in farmland

XIONG Zi¹, LI Ju-mei^{1*}, ZHAO Hui-wei², MA Yi-bing¹

(1. Ministry of Agriculture Key Laboratory of Crop Nutrition and Fertilization, Agricultural Resources and Regional Planning Institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. The Semi-arid Agriculture Science and Technology Research Center of China, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: It is relatively easy for wheat to absorb cadmium(Cd) from the soil, resulting in high Cd levels in the seeds. Preferential selection of low Cd wheat varieties is important for the production of safe wheat production in Cd-contaminated areas. For the selection of low Cd wheat varieties, a study on Cd absorption, transport and enrichment ability by different wheat varieties was carried out. A total of 59 wheat varieties were collected in the field, and a total of 91 pairs of soils and grains, and stems and leaves, were collected from nine wheat planting areas of the Huanghuaihai Plain, and the Cd content in soil, wheat stems, leaves, and grain were analyzed, and the stem and leaf translocation factor(TF) and grain bioconcentration factor(BCF) were calculated. The results showed that the surface soil Cd content was low, with a range of 0.107~0.212 mg·kg⁻¹; Jiyuan's soil Cd content exceeded the standard, up to 2.292 mg·kg⁻¹. The grain Cd content in wheat varieties ranged from 0.005~0.030 mg·kg⁻¹(Jiyuan: 0.119~0.150 mg·kg⁻¹), with an average of 0.016 mg·kg⁻¹(except Jiyuan). The variation range of TF was 0.093~0.500, with a 4.4 folds difference between extremes. The range of BCF change was 0.047~0.165, with a 2.5 folds difference

收稿日期: 2017-06-07 录用日期: 2017-09-12

作者简介: 熊 孜(1991—), 女, 湖南湘潭人, 硕士, 从事农田重金属风险评估及修复研究。E-mail: sunflowerxiongzi@sina.com

* 通信作者: 李菊梅 E-mail: lijumei@caas.cn

基金项目: 河北省科技计划项目(15274008D); 公益性行业(环保)科研专项(201509032); 国家科技支撑项目(2015BAD05B01)

Project supported: The Science and Technology Support Program of Hebei, China(15274008D); Special Fund for(Environmental Protection) Scientific Research on Public Causes(201509032); The National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China(2015BAD05B01)

between extremes. Using a cluster analysis, the Cd BCF values of different wheat varieties were divided into five categories, and 29 wheat varieties with low Cd concentrations were identified, which were Ji Mai 518, Heng 0628, Heng 09 Guan 29. Based on the results of the BCF calculation, on the premise that the Cd content in grain should not exceed the standard of food safety limits, 59 wheat varieties could be planted in grade two Cd-contaminated soil prescribed by the state. Among them, 27 wheat varieties could also be planted in grade three Cd-contaminated soil.

Keywords: farmland; wheat varieties; cadmium; translocation; bio-concentration

小麦是我国主要粮食作物之一,品种丰富,集中分布于黄淮海平原的河北、河南、山东三省^[1],其质量安全在我国粮食生产中有重要意义。小麦属于耐Cd力较强^[2]、易积累Cd的作物之一,易从土壤中吸收积累Cd,造成小麦籽粒Cd累积。研究显示^[3-5],即使在未受人为污染的土壤上,小麦籽粒Cd含量也可能超标。杨玉敏等^[6]盆栽试验显示($N=102$),土壤Cd总量为 $0.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,不同小麦品种籽粒Cd含量区间为 $0.189\sim 0.557\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (GB 2715—2005, $0.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

近年来,污水灌溉^[7]、污泥农用、农药及化肥的不合理施用,使得小麦Cd污染风险问题逐渐成为社会关注的热点和政府农产品质量安全监管的重点^[8],因此,能否保证小麦在中低污染程度的土壤上安全生产,越来越受到人们关注。目前,解决粮食中Cd超标问题的途径主要有两种^[9]:一是从土壤角度出发,降低土壤中Cd的有效性;二是从农作物角度出发,优选和培育吸Cd量少或向籽粒转移系数低的优良抗逆小麦品种。在良种试验过程中,迫切需要筛选低Cd小麦品种,它有利于良种推广应用以及在Cd污染农田优选安全品种。目前,对低Cd土壤上,即小麦正常生长条件下小麦籽粒Cd吸收能力研究较少^[11-12],低Cd小麦品种筛选多基于添加高量外源Cd的盆栽试验,添加量较我国土壤Cd三级标准值要高出数倍到数十倍。在作物受害不能正常生长的土壤状态下进行品种筛选,有其不合理性。同时,由于外源添加Cd老化程度不同,和大田Cd有效性有很大差别,往往筛选的低Cd品种在无污染土壤上易超标^[6];此外,还存在推荐的某些低Cd小麦品种特性不稳定,换地方就超标的现象。

大量基于外源Cd添加土培、水培试验表明^[12-14],小麦对重金属元素的吸收、累积能力与其品种有关^[6,15-17]。本文基于良种试验中小麦品种间对Cd的吸收、转运以及籽粒富集差异,试图比较得出小麦低累积Cd品种,筛选出分别适宜于二级、三级Cd污染农田的小麦品种,为我国轻度Cd污染的二级、三级农田小麦安全生产提供依据,丰富优势小麦品种特征资

料,为优势小麦品种推广应用提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

2015年6月10—12日于河北、山东及河南3省9地采集59个小麦品种,共计91组土壤-植物点对点样品。土壤类型均为褐土,样点位置及品种详见表1。土样深度0~20 cm,经自然风干,剔除杂质后,研磨,分别过2、1、0.25 mm和0.149 mm尼龙筛,充分混匀,备用。植株样品(仅采集地上部分)经105℃杀青20 min,70℃烘干,分离为茎叶、籽粒两部分(舍去颖壳),并分别将其粉碎,过0.25 mm尼龙筛,测定Cd含量。样品基本理化性质详见表2。

1.2 测定项目与方法

土壤pH采用电位法(玻璃电极)测定(2.5:1, TP320, 北京时代新维测控设备有限公司),有机质(OM)采用外加热重铬酸钾法测定,阳离子交换量(CEC)采用非缓冲硫脲银法测定,土壤碱解氮采用扩散法测定,有效磷(Olsen-P)采用 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaHCO}_3$ 浸提-紫外分光光度法(UV-5100H, 上海元析仪器有限公司)测定;土壤有效钾采用 NH_4OAc 浸提-火焰光度法测定(HG-8, 北京检测仪器有限公司),参见《土壤农化分析》^[18]。土壤Cd总量测定参考EPA 3052方法,土样采用硝酸-氢氟酸(3:1, V:V)混合酸消解,溶液中Cd含量采用电感耦合等离子体质谱测定(7700X ICP-MS, 安捷伦科技有限公司)。植株中Cd含量测定方法参考GB/T 5009.15—2003,植物样采用硝酸-过氧化氢(2:1, V:V)混合酸消解,溶液中Cd含量测定方法同上。采用标准物质作为内标控制分析质量,土壤和植物标准样品分别选用GBW07427(GSS-13)和GBW10011(GSB-2),每10个样品添加一个标样,并保证回收率大于90%。

1.3 小麦Cd生物富集、转移系数

植物对重金属的生物富集系数(BCF)是指植物地上部某一重金属的含量与相应的土壤重金属含量的比值,可以表征小麦从土壤中吸收重金属的能力。

表 1 采样地点及小麦品种名称
Table 1 Sampling sites and varieties of wheat

采样地点	品种个数	品种名称					
赵种场	17	小偃 101	论选 103	衡 09 观 29	石麦 18	婴泊 700	藁优 5766
		邢麦 7 号	农大 399	石农 086	石麦 19	冀麦 518	科农 1006
		石麦 22	石新 633	衡 0628	河农 7069	邯 5093	
赵韩村	13	衡 4444	婴泊 700	农大 399	冀麦 518	石农 086	藁优 5766
		石麦 22	石新 633	冀麦 585	石新 828	良星 66	科农 1006
		济麦 22					
高邑	31	衡 4444	石麦 18	婴泊 700	农大 399	河农 6049	石农 086
		石麦 22	冀麦 585	石新 828	中麦 155	舜麦 1718	藁优 5766
		石麦 15	冀麦 518	邯麦 14	衡 4399	师栎 02-1	河农 58-3
		衡观 35	河农 827	石麦 21	科农 199	藁优 2018	邢麦 4 号
		京麦 8 号	沧麦 12	山农 22	石麦 20	邯麦 13	衡 6632
		邯 6172					
济源	3	周麦 16	矮坑 58	周麦 27			
山农	6	济麦 22	山农 22	泰农 18	良星 99	山农 20	山农 23
东平	1	汶农 8 号					
历城	13	良星 66	济麦 22	山农 22	泰农 18	良星 99	山农 15
		鲁原 502	潍麦 8	济南 17 号	山农 24	郟麦 98	石 4185
		良星 77					
王辛村	2	济麦 22	山农 15 ^a				
德州	1	济麦 22 ^b					

注:表中上标 a、b 分别代表该小麦品种有 2 个和 4 个种植重复。采样地点具体位置分别为:河北省石家庄市赵县原种场(赵种场)、赵县韩村小麦品种试验地(赵韩村)、高邑县原种场(高邑),河南省济源实验站(济源),山东农业大学农场(山农),山东省泰安市东平县彭集镇后周村(东平)、济南市历城区唐王镇颜家村小麦品种展示园(历城)、王辛村(王辛村)和中国农业科学院德州试验站(德州)。

表 2 供试土壤的基本理化性质
Table 2 The properties of the soils collected from different site

采样地点	pH/H ₂ O	有机质/g·kg ⁻¹	CEC/cm ² ·kg ⁻¹	碱解氮/mg·kg ⁻¹	有效磷/mg·kg ⁻¹	有效钾/mg·kg ⁻¹	全 Cd/mg·kg ⁻¹
赵种场	8.56	13.6	16.7	68.8	40.7	187	0.107
赵韩村	8.59	19.3	16.6	101	28.3	101	0.155
高邑	8.49	22.6	19.4	116	25.2	99.2	0.182
济源	8.13	18.2	15.6	119	88.8	128	2.292
山农	8.32	23.1	16.2	93	33.8	111	0.156
东平	7.71	27.9	7.10	149	37.4	229	0.108
历城	8.31	19.0	15.4	101	26.1	120	0.146
王辛村	7.98	21.5	15.3	111	67.7	174	0.173
德州	8.31	22.7	6.14	127	105	192	0.212

植物对重金属的转移系数(TF)是指植物某一部位重金属的含量与植物另外相应部位重金属含量的比值,可以表征小麦自身转移重金属的能力。

小麦籽粒 Cd 生物富集系数:BCF= $\frac{C_{\text{grain}}}{C_{\text{soil}}}$

小麦 Cd 生物转移系数:TF= $\frac{C_{\text{grain}}}{C_{\text{stem}}}$

式中: C_{grain} 、 C_{stem} 和 C_{soil} 分别表示籽粒、茎叶和土壤 Cd 全量,mg·kg⁻¹。

1.4 数据处理与分析

所有试验数据均采用 Microsoft Excel 2010、Origin 8.5 和 SAS 9.0 软件进行处理与分析。

2 结果与分析

2.1 不同小麦品种茎叶、籽粒 Cd 含量比较

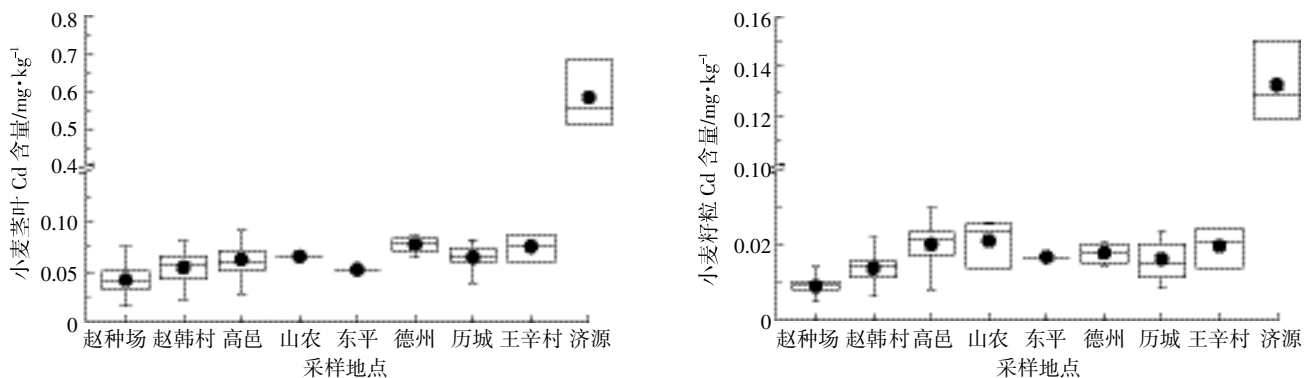
在调查的 9 个小麦种植区域中有 8 个小麦种植区耕层土壤 Cd 含量低于国家土壤环境质量标准

规定的限制标准 ($0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 范围为 $0.107 \sim 0.212 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均为 $0.155 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤 Cd 含量整体变化不大, 并且接近国家土壤环境质量标准规定的自然背景值 ($0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); 只有济源采样点土壤 Cd 含量超过《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995) 限制的三级 Cd 污染限量 ($\leq 1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 为 $2.292 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 2)。未超标采样点不同小麦品种的籽粒 Cd 含量范围为 $0.005 \sim 0.030 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均为 $0.016 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 最大值是最小值的 5.89 倍, 茎叶 Cd 含量范围为 $0.016 \sim 0.092 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均为 $0.058 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中小麦籽粒 Cd 含量远低于食品卫生标准; 济源 Cd 超标地茎叶 Cd 含量范围为 $0.513 \sim 0.681 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均为 $0.583 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 籽粒 Cd 含量范围为 $0.119 \sim 0.150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均为 $0.132 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 高于我国《粮食卫生标准》(GB 2715—2005, 小麦籽粒 Cd 含量 $\leq 0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。同一地块土壤 Cd 含量相同, 部分品种间籽粒 Cd 含量差

异较显著, 相同地块不同品种间差异可达 1.26~3.75 倍(图 1)。

2.2 不同小麦品种 Cd 富集系数的差异

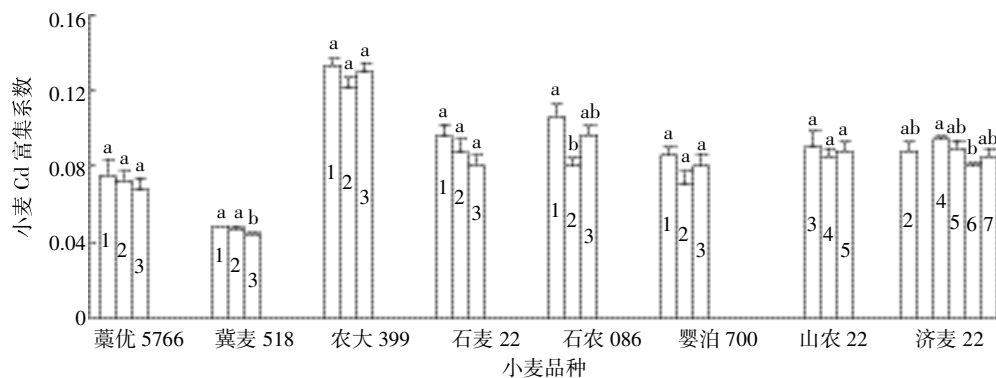
小麦籽粒对土壤 Cd 的富集系数(BCF)是评价小麦品种低 Cd 品质的重要参数。将不同土壤上种植的不同小麦品种(同一小麦品种数大于 3)的 BCF 值进行比较(图 2), 结果显示, 相同小麦品种种植于不同低 Cd 含量土壤地块, 籽粒 Cd 含量一般随土壤 Cd 含量增高而增高, BCF 随土壤 Cd 含量增高而减小。因为土壤 Cd 含量差异较小, 故同一小麦品种间大多差异不显著, 但也出现个别差异显著的小麦品种, 分别为冀麦 518、石农 086 和济麦 22。将不同地点相同品种小麦的 BCF 取均值, 将所有小麦品种的 BCF 按大小顺序进行排列并进行显著性差异分析(图 3)。发现不同小麦品种间籽粒 Cd 富集系数存在差异, 其中部分小麦品种间 BCF 差异显著, 部分 BCF 差异不显著,



图中箱图的上下横线分别表示最大值(Max)和最小值(Min), 方框表示 50% 变异区间, 方框中横线和实心圆点分别表示对应指标的中值(Mid)和平均值(Mean)

图 1 不同地点小麦茎叶及籽粒 Cd 含量

Figure 1 Concentrations of Cd in stems and leaves and grains in wheat



图中数字表示不同样点位置, 1~7 分别表示赵种场、赵韩村、高邑、历城、山农、王辛村和德州, 下同

图 2 同一品种小麦在不同土壤上 Cd 富集系数

Figure 2 Compare Cd bioconcentration factor with same wheat variety in different soils

供试小麦品种籽粒对土壤 Cd 的 BCF 范围为 0.047~0.165, 平均为 0.107, 品种间最大差异达 3.55 倍。

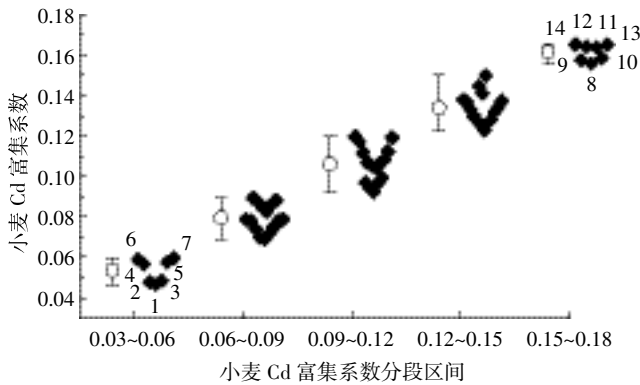
2.3 不同小麦品种转运系数的差异

小麦 Cd 从茎叶向籽粒转运的多少关系到籽粒 Cd 的含量, 其转运系数(TF)也是评价小麦品种的重要指标之一。59 个小麦品种中, 济源 Cd 超标土壤 3 个小麦品种 TF 值平均为 0.231, 其他不超标土壤小麦品种 TF 范围为 0.093~0.500, 平均为 0.291。相同小麦品种在 Cd 含量不同土壤上的 TF 值除衡 4444 和冀麦 585 外其他都表现为差异不显著(图 4, 同一小麦品种数 ≥ 3 的地点), 因此可以将不同地块相同小麦品种的 TF 值进行平均, 以便比较品种间 TF 值的差异。小麦品种间 Cd 从茎叶向籽粒的转运系数如图 5 所示, 有的品种间差异极显著, 有的品种间差异不

显著, TF 值最大品种是衡 6632(0.500), 最小品种是衡 0628(0.093), 二者相差约 4.4 倍。TF 值较低的衡 0628、衡 09 观 29 小麦品种的 BCF 值也较低, TF 值较高的石麦 15、衡 6632 等小麦品种其 BCF 值也较高。

2.4 不同小麦品种富集系数的聚类分析

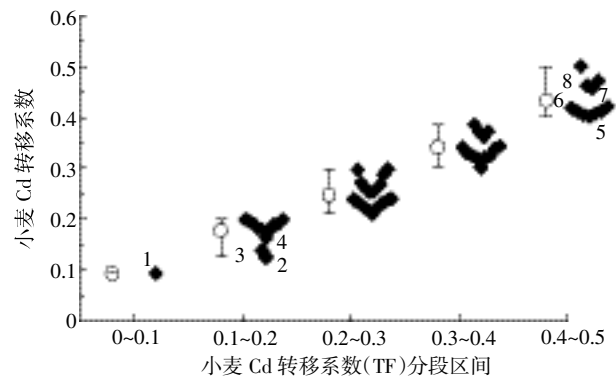
对所有品种小麦籽粒的 Cd 富集系数进行聚类分析(图 6), 结果可大致分成 5 类: 籽粒低富集型 (BCF<0.050), 小麦品种为冀麦 518、衡 0628、衡 09 观 29; 籽粒较低富集型 (BCF $\in$ 0.050~0.060), 小麦品种为周麦 27、周麦 16、矮抗 58、山农 24; 籽粒中富集型 (BCF $\in$ 0.060~0.150), 小麦品种为河农 58-3、郑麦 98、藁优 5766、邢麦 7 号、论选 103、济南 17 号、石麦 18、潍麦 8、婴泊 700、科农 1006、河农 7069、济麦 22、山农 22、石麦 22、衡 4444、石麦 19、石农 086、石麦



图中空心圆表示平均数, 上下横线表示最大值和最小值, 实心菱形表示不同小麦品种, 数字 1~14 分别表示冀麦 518、衡 0628、衡 09 观 29、周麦 27、周麦 16、矮抗 58、山农 24、汶农 8 号、泰农 18、石麦 15、良星 77、良星 99、衡 6632 和山农 23

图 3 不同品种 Cd 富集系数差异比较

Figure 3 Compare Cd bioconcentration with different wheat varieties



图中空心圆表示平均数, 上下横线表示最大值和最小值, 实心菱形表示不同品种, 数字 1~8 分别表示衡 0628、衡 09 观 29、邯 5093、济南 17 号、石麦 20、农大 399、科农 199 和衡 6632

图 5 不同品种小麦 Cd 转移系数差异比较

Figure 5 Compare Cd translocation factor with different wheat varieties

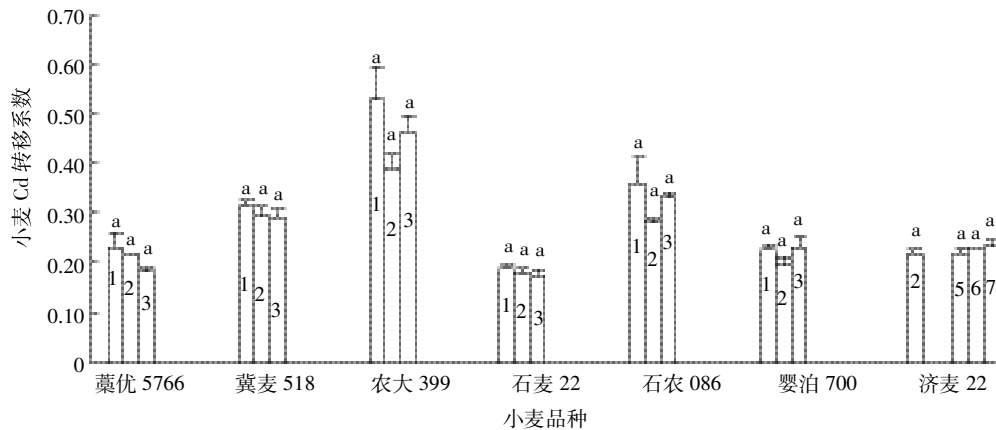


图 4 同一品种小麦在不同土壤上 Cd 转运系数

Figure 4 Compare Cd translocation factor with same wheat variety of in different soils

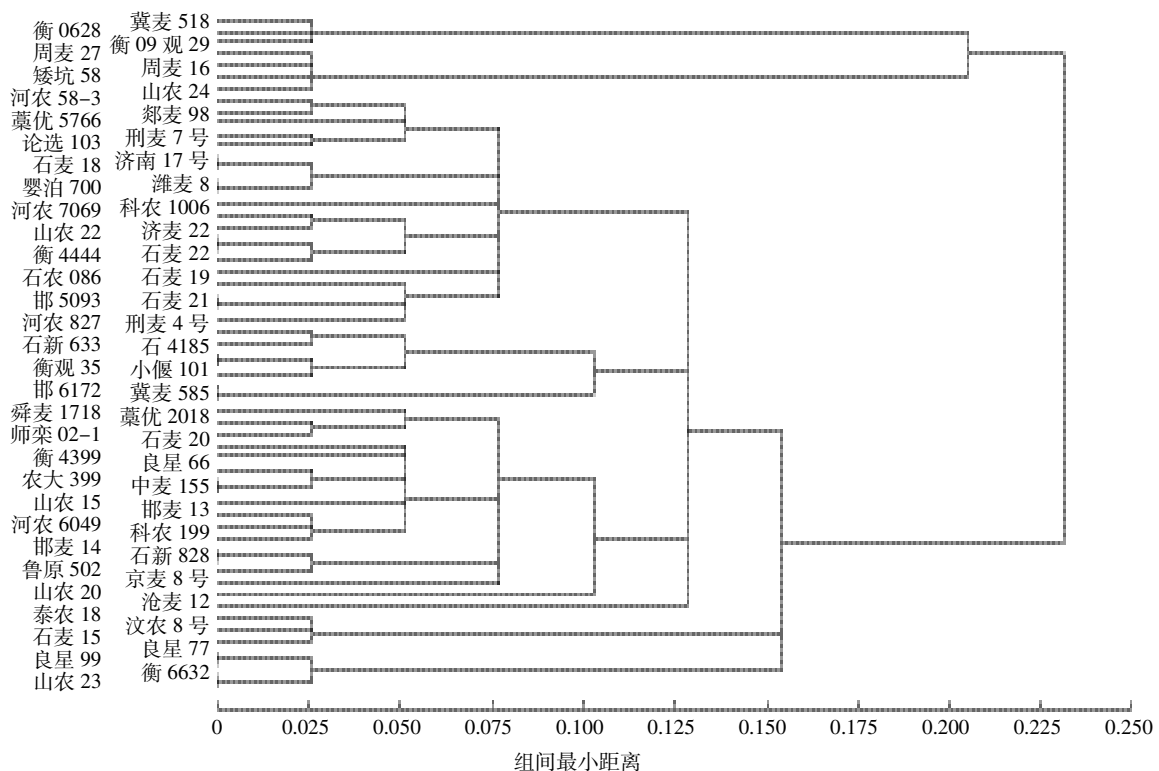


图 6 不同品种小麦富集系数聚类分析

Figure 6 Cluster analysis of BCF with different wheat varieties

21、邯 5093、刑麦 4 号、河农 827、石 4185、石新 633、小偃 101、衡观 35、冀麦 585、邯 6172、藁优 2018、舜麦 1718、石麦 20、师栾 02-1、良星 66、衡 4399、中麦 155、农大 399、邯麦 13、山农 15、科农 199、河农 6049、石新 828、京麦 8 号、邯麦 14、鲁原 502、沧麦 12、山农 20;籽粒较高富集型($BCF \in 0.150 \sim 0.160$),小麦品种为汶农 8 号、泰农 18、石麦 15;籽粒高富集型($BCF > 0.160$),小麦品种为良星 77、良星 99、衡 6632、山农 23。

2.5 Cd 污染土壤上基于 BCF 的小麦品种筛选

在土壤类型、耕作措施相同的条件下,不同小麦品种积累 Cd 含量差异的原因应主要是品种基因的差别,若不考虑 pH 和有机质等其他条件的差异,可以由 BCF 值推算二级 Cd 污染和三级 Cd 污染条件下籽粒 Cd 含量,为选择安全适宜的小麦品种提供依据。根据 BCF 计算公式可知,小麦籽粒 Cd 含量 = $BCF \times \text{土壤 Cd 含量}$,参照我国粮食卫生标准(GB 2715—2005)中小麦籽粒 Cd 含量限量值($\leq 0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)与我国土壤环境质量标准(GB 15618—1995)中二级($\leq 0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{pH} > 7.5$)及三级污染土壤 Cd 限量值($\leq 1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{pH} > 6.5$),对本研究 59 个小麦品

种进行推算,得出:当土壤 Cd 含量 $\leq 0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (即土壤达到二级污染临界水平时), $BCF \leq 0.167$,59 个小麦籽粒 Cd 含量全部未超过限量标准(GB 15618—1995),都可以种植;当土壤 Cd 含量 $\leq 1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (即土壤达到三级污染临界水平时),有 50%的小麦品种籽粒 Cd 含量超标。从另一方面考虑,籽粒超标临界水平为 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,在 Cd 二级污染土壤上适宜种植的小麦籽粒的 BCF 应 ≤ 0.167 ,在三级 Cd 污染土壤上适宜种植的小麦籽粒的 BCF 应该 ≤ 0.100 。

3 讨论

本研究 9 个调查土壤中,除济源外土壤 Cd 含量均远低于污染土壤的限制标准($0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。小麦茎叶和籽粒 Cd 含量较低,且品种间有显著差异。小麦吸收的 Cd 随土壤 Cd 含量提高而增高,且茎叶 Cd 含量 $>$ 籽粒 Cd 含量,与其他学者研究一致^[6,19-20]。本研究 56 个小麦品种(济源 3 个品种除外)籽粒 Cd 含量范围为 $0.005 \sim 0.030 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均为 $0.0160 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,该数值范围与季书勤等^[21]、刘克等^[22]测定结果相近。

小麦对 Cd 富集与转运的品种间差异被许多研究证实。Cd 进入植物体机理研究^[23-24]显示,小麦对 Cd

的吸收和转运受基因影响^[25-26],但具体何种基因还有待深入研究,同时小麦对Cd的吸收、转运还受多种环境因素影响^[22,27-29]。小麦低Cd吸收品种筛选的评价指标基本相同,包括:籽粒Cd含量、转运系数和富集系数,且多对不同试验条件下各评估指标进行简单排序或者初步聚类^[2,10-15,19-20,29-32]以确定品种优势。

我国土壤Cd环境质量三级标准($\leq 1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)是为了保障农林业生产和植物正常生长的土壤临界值。许多试验结果显示,影响小麦生长的土壤Cd含量阈值为 $3 \sim 5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[33],在土壤Cd含量 $< 20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 条件下,小麦籽粒Cd浓度与土壤Cd含量基本呈线性关系^[34-35]。据此可推测,三级Cd污染土壤上小麦生长过程不受毒性抑制,小麦籽粒Cd富集效应随土壤Cd含量线性相关^[6,34],且BCF值通常随着土壤Cd含量增加而减小^[6],这与本文研究结果一致。由此可见,对同一品种来说,由高BCF推算出的小麦籽粒Cd含量会高于在污染土壤上小麦籽粒Cd的实测含量,用低Cd土壤上小麦籽粒的BCF筛选低Cd小麦品种更具有科学性。

杨玉敏从102份小麦品种中筛选出了9份低Cd富集小麦品种^[6],之后分别对筛选出的低富集Cd小麦品种在Cd含量为 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 及 $0.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤上进行验证^[33],但所有小麦籽粒含量都超过食品安全标准($\leq 0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。以杨玉敏在高Cd含量土壤上得出的小麦BCF值推算小麦籽粒超标情况,结果仅部分超标,但实际结果却均超过标准。因此,通过对以上低Cd土壤和高Cd污染土壤上小麦籽粒Cd含量的比较可知,两者根本的区别是在低Cd土壤上,小麦可以正常生长、吸收、转运和富集土壤Cd,而在高Cd污染土壤上,小麦正常生长受到不同程度影响,对Cd的吸收、转运及富集也受到影响,前者对Cd的低富集具有确定性,而后者主要是在耐性支配下小麦籽粒对土壤Cd的富集。在低Cd土壤筛选低Cd小麦品种的缺点就是可能会把一些吸收Cd含量较低的小麦品种淘汰,而在高Cd污染土壤上筛选低Cd小麦品种的缺点就是可能会把吸收Cd含量较高的品种选上。

因此,相同土壤大田试验、土培或者水培条件下筛选小麦低Cd吸收品种比较容易,但不同土壤条件下,有些小麦品种出现显著差异,易受环境影响,本研究结果可为在低Cd土壤上进一步优选低Cd吸收品种提供资料,也为良种场品种推广应用提供科学依据。总之,小麦对Cd吸收受许多环境因素影响,本研

究涉及土壤Cd含量低且范围窄,大多数相同小麦品种在不同地点土壤上的转运系数和富集系数差异不显著,可能与土壤之间Cd含量差异较小有关系,以上品种低Cd特性还需要进一步验证。

4 结论

(1)在低Cd($0.107 \sim 0.212 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)大田条件下,小麦茎叶、籽粒Cd含量显示出品种间的差异。小麦富集系数的聚类分析表明,冀麦518、衡0628、衡09观29为低Cd富集小麦品种。

(2)以BCF推算,在保障籽粒Cd含量不超过标准的前提下,59个小麦品种基本上都可以在二类Cd污染土壤上种植,有27个小麦品种可以在三级Cd污染土壤上种植。

(3)在土壤Cd含量较低条件下筛选出的低Cd富集小麦品种比在高Cd条件下筛选出的保障性更高。在Cd二级污染土壤上适宜种植的小麦籽粒的富集系数应 ≤ 0.167 ,在三级Cd污染土壤上适宜种植的小麦籽粒的富集系数应 ≤ 0.100 。

参考文献:

- [1] 吕晓欢,冯晶,蔺瑞明,等. 2009—2010年河南、河北、山东三省小麦区试品种(系)的亲缘系数分析[J]. 麦类作物学报, 2013, 33(3): 455-460.
LÜ Xiao-huan, FENG Jing, LIN Rui-ming, et al. Analysis on coefficient of parentage of wheat varieties in the regional trials of Henan, Hebei and Shandong in 2009—2010[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2013, 33(3): 455-460.
- [2] 李惠英,田魁祥,赵欣胜. 不同小麦品系耐镉能力对比研究[J]. 农业系统科学与综合研究, 2001, 17(4): 279-282.
LI Hui-ying, TIAN Kui-xiang, ZHAO Xin-sheng. The comparison of tolerant abilities to cadmium among 18 winter wheat varieties in North China[J]. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2001, 17(4): 279-282.
- [3] Andersson A, Pettersson O. Cadmium in Swedish winter wheat[J]. *Swedish Journal of Agricultural Research*, 1981, 11(2): 49-55.
- [4] Galal G H. Dietary intake, levels in food and estimated intake of cadmium, lead and mercury[J]. *Food Additives and Contaminants*, 1993, 10(1): 115-128.
- [5] Wolnik K A, Fricke F L, Capar S G, et al. Elements in major raw agricultural crops in the United States. Cadmium and lead in lettuce, peanuts, potatoes, soybeans, sweet corn, and wheat[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1983, 31(6): 1240-1244.
- [6] 杨玉敏,张庆玉,张冀,等. 小麦基因型间籽粒镉积累及低积累资源筛选[J]. 中国农学通报, 2010, 26(17): 342-346.
YANG Yu-min, ZHANG Qing-yu, ZHANG Ji, et al. Genotypic differences of cadmium accumulation in *Triticum aestivum* and screening of

- low-accumulation material[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(17):342-346.
- [7] Wong S C, Li X D, Zhang G, et al. Heavy metals in agricultural soils of the Pearl River Delta, South China[J]. *Environmental Pollution*, 2002, 119(1):33-44.
- [8] 刘潇威,陈 春,宇 妍,等.农产品重金属风险评估体系的研究进展[J].北京工商大学学报:自然科学版,2012,30(5):19-22.
LIU Xiao-wei, CHEN Chun, YU Yan, et al. Research progress of risk assessment of heavy metals in agricultural products quality and safety[J]. *Journal of Beijing Technology and Business University: Natural Science Edition*, 2012, 30(5):19-22.
- [9] Zhao F J, Ma Y B, Zhu Y G, et al. Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies[J]. *Environmental Science and Technology*, 2015, 49(2):750-759.
- [10] 张丙春,王 磊,孟立红,等.镉胁迫下春小麦中镉的分布、富集及转移规律[J].生态学杂志,2010,29(12):2521-2524.
ZHANG Bing-chun, WANG Lei, MENG Li-hong, et al. Distribution, enrichment, and transfer of cadmium in spring wheat under cadmium stress[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(12):2521-2524.
- [11] 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 Mei-bin, CHEN Zhi-jun, LI Wei-xi, 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.
- [12] 朱志勇,郝玉芬,吴金芝,等.镉胁迫对不同小麦品种幼苗生长以及 Cd^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Mn^{2+} 吸收和累积的影响[J].水土保持,2011,25(2):209-213.
ZHU Zhi-yong, HAO Yu-fen, WU Jin-zhi, et al. Effects of Cd^{2+} stress on the seedling growth, Cd^{2+} , Zn^{2+} and Mn^{2+} uptake of different wheat cultivars[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(2):209-213.
- [13] 蔡保松,张国平.大、小麦对镉的吸收、运输及在籽粒中的积累[J].麦类作物学报,2002,22(3):82-86.
CAI Bao-song, ZHANG Guo-ping. Cadmium absorption and mobilization in barley and wheat plants and its accumulation in grains[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2002, 22(3):82-86.
- [14] 刘艳阳,黄萍霞,马克强,等.小麦苗期吸收和积累镉能力的品种间差异[J].农业环境科学学报,2011,30(10):1939-1945.
LIU Yan-yang, HUANG Ping-xia, MA Ke-qiang, et al. Variations of Cd absorption and accumulation in different wheat cultivars at seedling stage[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(10):1939-1945.
- [15] 杨居荣,贺建群,黄 翌,等.农作物 Cd 耐性的种内和种间差异 II. 种内差[J].应用生态学报,1995(增刊1):132-136.
YANG Ju-rong, HE Jian-qun, HUANG Yi, et al. Inter- and intraspecific differences of crops in cadmium tolerance II. Intraspecific difference[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1995, (Suppl 1):132-136.
- [16] Zhang G. Genotypic differences in effects of cadmium on growth and nutrient compositions in wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2008, 23(9):1337-1350.
- [17] Zhang G, Fukami M, Sekimoto H. Influence of cadmium on mineral concentrations and yield components in wheat genotypes differing in Cd tolerance at seedling stage[J]. *Field Crops Research*, 2002, 77(2):93-98.
- [18] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,1999.
BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1999.
- [19] 邵 云,姜丽娜,李向力,等.五种重金属在小麦植株不同器官中的分布特征[J].生态环境,2005,14(2):204-207.
SHAO Yun, JIANG Li-na, LI Xiang-li, et al. Distribution of five heavy metals in different organs of wheat[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(2):204-207.
- [20] 张国平,深见元弘,关本根.不同镉水平下小麦对镉及矿质养分吸收和积累的品种间差异[J].应用生态学报,2002,13(4):454-458.
ZHANG Guo-ping, SHEN JIAN Yuan-hong, GUAN Ben-gen. Difference between two wheat cultivars in Cd and mineral nutrient uptake under different Cd level[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(4):454-458.
- [21] 季书勤,郭 瑞,王汉芳,等.河南省主要小麦品种重金属污染评价及镉吸收规律研究[J].麦类作物学报,2006,26(6):154-157.
JI Shu-qin, GUO Rui, WANG Han-fang, et al. Estimate of pollution by heavy metals on wheat in Henan and the rule of cadmium absorption in wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2006, 26(6):154-157.
- [22] 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 Ke, HE Wen-xiang, ZHANG Hong, et al. Cadmium accumulation and translocation in wheat and grain Cd prediction[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(8):1441-1448.
- [23] Haghiri F. Cadmium uptake by plants[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1973, 2(1):177-183.
- [24] Mustafa G, Sing B, Kookana R S. Cadmium absorption and desorption behaviour on goethite at low equilibrium concentrations: Effect of pH and index cation[J]. *Chemosphere*, 2004, 57(10):1325-1333.
- [25] Hura C, Munteanu N, Stoleru V. Heavy metals levels in soil and vegetables in different growing systems[C]. Proceedings of the 16th International Conference on Heavy Metals in the Environment, 2013, 1(1):77-87.
- [26] 黄其颖.不同基因型小麦对土壤镉污染的反应及竹炭对小麦镉积累的影响[D].浙江:浙江农林大学,2015.
HUANG Qi-ying. Responses of different genotypes of wheat to soil cadmium pollution and effect of bamboo charcoal on cadmium accumulation in wheat[D]. Zhejiang: Zhejiang Agricultural & Forestry University, 2015.
- [27] 汤丽玲.作物吸收 Cd 的影响因素分析及籽实 Cd 含量的预测[J].农业环境科学学报,2007,26(2):699-703.
TANG Li-ling. Effects of soil proper on crop Cd uptake and prediction of Cd concentration in grains[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2):699-703.
- [28] Li F, Okazaki M, Zhou Q. Evaluation of Cd uptake by plants estimated

- from total soil Cd, pH, and organic matter[J]. *Bull Environment Contamination Toxicology*, 2003, 71(4):714-721.
- [29] Salah S A, Barrington S F. Effect of soil fertility and transpiration rate on young wheat plant (*Triticum aestivum*) Cd/Zn uptake and yield[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 82(1/2):177-192.
- [30] 贾 夏, 周春娟, 董岁明. 镉胁迫对小麦的影响及小麦对镉毒害响应的研究进展[J]. 麦类作物学报, 2011, 31(4):786-792.
JIA Xia, ZHOU Chun-juan, DONG Sui-ming. Progress of research on the effects of Cd²⁺ stress on wheat and the response of wheat to Cd²⁺[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2011, 31(4):786-792.
- [31] 朱宇恩, 赵 烨, 李 强, 等. 北京市郊污灌区镉、铜在小麦中的富集特征[J]. 安全与环境学报, 2011, 11(2):15-20.
ZHU Yu-en, ZHAO Ye, LI Qiang, et al. Translocation and enrichment characteristics of cadmium and copper in *Triticum aestivum* in sewage-irrigated suburb area of Beijing[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2011, 11(2):15-20.
- [32] Wang Z W, Nan Z R, Wang S L, et al. Accumulation and distribution of cadmium and lead in wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in contaminated soils from the oasis, north-west China[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2011, 91(2):377-384.
- [33] 杨玉敏, 张庆玉, 杨武云, 等. 镉胁迫对不同基因型小麦产量及构成因子的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3):532-538.
YANG Yu-min, ZHANG Qing-yu, YANG Wu-yun, et al. Effect of cadmium stress on yield and yield components of different wheat genotypes[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(3):532-538.
- [34] 纪淑娟, 王俊伟, 黄莉萍, 等. 重金属镉胁迫对小麦生长的影响及小麦镉污染预测的研究[J]. 粮食加工, 2008, 33(1):51-53.
JI Shu-juan, WANG Jun-wei, HUANG Li-ping, et al. Study on influence of cadmium on growth of *Triticum aestivum* and forecast of contamination to wheat[J]. *Grain Processing*, 2008, 33(1):51-53.
- [35] Hart J J, Norvell W A, Welch R M, et al. Characterization of zinc uptake, binding, and translocation in intact seedlings of bread and durum wheat cultivars[J]. *Plant Physiology*, 1998, 118(1):219-226.