

小麦苗期吸收和积累镉能力的品种间差异

刘艳阳, 黄萍霞, 马克强, 戴其根, 张洪程

(扬州大学农学院 江苏省作物遗传生理重点实验室, 江苏 扬州 225009)

摘要:采用水培方法,研究了 25 个小麦品种苗期对镉的吸收和积累的差异,以期筛选具有 Cd 低积累潜力的小麦品种。结果表明, Cd 对地上部干物重有显著抑制作用,对地下部干物重影响因品种而异,对春性品种有抑制作用,对半冬性小麦品种有促进作用。小麦对镉的吸收、积累、耐性指数以及镉运转效率有极显著的品种间差异。在 $1\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Cd 处理下,根系镉含量为 $33.1\sim139.7\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 积累量为 $2.12\sim9.78\ \mu\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$, 地上部镉含量为 $3.6\sim15.3\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 积累量为 $0.45\sim1.44\ \mu\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$, 表明小麦体内的 Cd 主要积累在地下部而非地上部。因此,以地上部 Cd 积累量为筛选指标,将 25 个小麦品种划分为 Cd 高积累型、Cd 中积累型、Cd 低积累型。

关键词:小麦;苗期;镉吸收;镉积累;品种间差异

中图分类号:X503.231 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)10-1939-07

Variations of Cd Absorption and Accumulation in Different Wheat Cultivars at Seedling Stage

LIU Yan-yang, HUANG Ping-xia, MA Ke-qiang, DAI Qi-gen, ZHANG Hong-cheng

(College of Agronomy/Key Laboratory of Crop Genetic and Physiology of Jiangsu Province, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: The differences of Cd absorption and accumulation in 25 wheat cultivars at seedling stage were studied under hydroponic condition in order to screen the low Cd accumulation type of wheat cultivars. The results showed that these wheat cultivars had significant difference in absorption, accumulation, tolerance index, and transport efficiency of Cd when plants grown in water contaminated with $1\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd. Cd had significant inhibitory effect on the shoot dry weight of wheat cultivars while the Cd effect on the root dry weight depended on the cultivars which decreasing the root dry weight in spring wheat cultivars but increasing the root dry weight in half-winter wheat cultivars. The Cd content in root varied from 33.1 to $139.7\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, the Cd accumulation in root varied from 2.12 to $9.78\ \mu\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$, the Cd content in shoot varied from 3.6 to $15.3\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, the Cd accumulation in shoot varied from 0.45 to $1.44\ \mu\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$, which showed that Cd was mainly accumulated in root not in shoot. Therefore, Cd accumulation in shoot could be adapted as screening indexes. And the 25 wheat cultivars were classified into three types: high Cd accumulation type, mean Cd accumulation type and low Cd accumulation type.

Keywords: wheat; seedling stage; Cd absorption; Cd accumulation; cultivar variation

镉是一种十分有害重金属,易被植物吸收、富集,通过食物链进入人体,威胁人体健康。近年来,随工农业的发展,农田和农作物受重金属污染越来越严重,江苏省部分粮食产品 Cd 含量的超标率达到 25%^[1],对粮食安全构成重大威胁。

镉对植物生长、发育、生理生化等的影响已有大

量报道^[2-5]。另有研究表明,农作物对重金属 Cd 的耐性存在种间差异和种内差异。杨居荣^[6]研究了 8 科 14 个作物对 Cd 的耐性,表明禾本科作物对 Cd 的耐性普遍高于蔬菜类。Athur^[7]研究表明十字花科属于 Cd 高积累型植物,禾本科属于 Cd 中积累型植物,豆科属于 Cd 低积累型植物。杨居荣^[8]研究了 28 个小麦和 14 个大豆品种对 Cd 耐性,发现作物对 Cd 的耐性具有明显的种内差异。另有研究表明,水稻^[9]、小麦^[3]、玉米^[10]、甘薯^[11]等作物对 Cd 的积累量也存在品种间的差异。

小麦是我国第二大粮食作物,是人类重要的食物

收稿日期:2010-09-30

基金项目:江苏省高校自然科学基金项目(06KJB210134)

作者简介:刘艳阳(1979—),男,江苏丰县人,博士,讲师,研究方向为作物高产清洁栽培及作物逆境生理。

E-mail:Lyany2000@163.com

来源。生产低镉或无镉小麦对于人类健康至关重要。选育 Cd 低积累型品种是降低小麦 Cd 含量的一个有效措施。因此,本研究选用江苏省小麦大面积生产中常用、有代表性的小麦品种 25 个,研究其吸收和积累镉的特征,筛选 Cd 低积累、低吸收的品种,为小麦安全生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

选用江苏省大面积生产中常用、有代表性的小麦品种 25 个,其中:春性品种 15 个分别为扬麦 5 号、扬麦 6 号、扬麦 9 号、扬麦 10 号、扬麦 11 号、扬麦 12 号、扬麦 13 号、扬麦 158、扬麦 00118、扬辐麦 1 号、扬辐麦 2 号、宁麦 8 号、宁麦 9 号、苏麦 6 号、苏麦 98329;半冬性小麦品种 10 个分别为淮麦 18 号、淮麦 19 号、淮麦 20 号、淮麦 21 号、徐州 24 号、徐州 25 号、徐州 26 号、徐麦 27 号、徐麦 28 号、徐麦 974。

1.2 试验方法

本研究采用水培试验方法。水培试验是重金属胁迫研究中一种常用方法,小麦虽是典型的陆生作物,但国内外采用水培方法研究镉胁迫对小麦的影响已有大量报道^[2,12-14],同时水培方法具有取样方便、便于观察和测定小麦根部性状等优势,因此本研究采用水培方法。Cd 浓度处理为 0 和 1 μmol·L⁻¹ (GB 8978—1996 中规定废水排放 Cd 浓度上限为 0.1 mg·L⁻¹,但实际上 Cd 浓度可能会超标,故本研究设计 Cd 浓度高于 0.1 mg·L⁻¹,浓度为 1 μmol·L⁻¹ 相当于 0.112 4 mg·L⁻¹),在 Hongland 培养液(pH6.0)中加入 CdCl₂·2.5H₂O。采用沙床育苗,在 2 叶期将供试品种生长一

致的麦苗移栽至带孔塑料板上并用棉花固定,25 个供试品种移入 Cd 处理的水培池中用 Hongland 培养液培养。Hongland 培养液 7 d 更换 1 次。

1.3 测定项目

于 5 叶期测定各处理地上部和地下部干物重并测定其 Cd 含量。植株样品在 70 ℃烘至恒重后称干物重,磨碎过 100 目筛,用 HNO₃-HClO₄ 混合液(4:1)消化,用原子吸收光谱仪(SolarS4+Graphite Furnace System97, Thermo Elemental,美国)测定 Cd 含量。

参照 Metwally 等^[15]方法计算耐性指数,评价不同小麦品种的耐镉性强弱

$$\text{耐性指数}(\%) = \frac{\text{处理生物量} - \text{对照生物量}}{\text{对照生物量}} \times 100$$

$$\text{Cd 转运效率}(\%) = \frac{\text{地上部 Cd 净积累量}}{\text{地上部 Cd 净积累量} + \text{根部 Cd 净积累量}} \times 100$$

1.4 数据处理

利用唐启义的 DPS 数据处理系统统计分析数据,使用 Microsoft Excel 制表。

2 结果与分析

2.1 Cd 对不同小麦品种生物量的影响

由表 1 可知,无镉(对照)处理下,根系和地上部平均干物重分别为 61.08、144.04 mg·plant⁻¹,镉处理下,根系和地上部平均干物重分别为 61.36、115.40 mg·plant⁻¹。就根系干重来说,对照和镉处理间非常接近,且差异不显著,而地上部干重则表现为对照极显著大于镉处理,说明镉处理对地上部干重有显著的抑制作用。品种间差异的变异系数,因部位不同而有异,

表 1 不同小麦品种在 Cd 处理下生物量(mg·plant⁻¹)
Table 1 Biomass of different wheat cultivars under Cd stress(mg·plant⁻¹)

项目		地下部干重 Root dry weight		地上部干重 Shoot dry weight	
		对照 Control	镉处理 Cd treatment	对照 Control	镉处理 Cd treatment
全部品种 All cultivars	平均值 Mean	61.08ns	61.36	144.04**	115.40
	变异系数 CV%	29.44	27.16	18.51	22.47
春性品种 Spring type	平均值 Mean	60.33ns	56.57	135.47**	105.40
	变异系数 CV	25.62	25.63	15.95	16.85
半冬性品种 Half-winter type	平均值 Mean	62.20ns	68.55	156.90**	130.40
	变异系数 CV	35.51	25.70	18.71	22.82
春性品种和半冬性品种平均值统计结果 Examination of average comparison between spring wheat and half-winter wheat					
显著性 Significance		ns	*	**	**

注:对照与镉处理平均数比较 Comparison of averages between control and Cd-treatment; ns 无显著差异 No significant difference. *P<0.05, **P<0.01. 下同 The same below.

根系干重间的变异系数对照大于镉处理,地上部干重间的变异系数相反。

进一步分析春性品种和半冬性品种的生物量,无论对照还是镉处理,半冬性小麦品种的根系干重和地上部干物重均高于春性小麦品种。除对照处理的根系干重外,半冬性小麦品种生物量均显著或极显著高于春性小麦品种。春性小麦品种和半冬性小麦品种的根系对镉处理的反应不一,镉对春性小麦品种的根干重起抑制作用,对半冬性小麦品种的根干重起促进作用,但镉处理与对照间差异均不显著。镉处理对春性小麦品种和半冬性小麦品种地上部干重均有显著抑制作用。春性小麦品种地上部干重的下降幅度大于半冬性小麦品种,说明镉处理对春性小麦品种的地上部生长的抑制作用大于对半冬性小麦品种。无论对照还是镉处理,春性小麦品种根干重和地上部干重的变异系数均小于半冬性小麦品种,说明春性小麦品种根系和地上部生物量的品种间差异小。

2.2 不同小麦品种镉含量比较

因对照处理检测出镉含量极低,故忽略不计。镉处理下,供试小麦品种根系和地上部镉含量见表 2。镉处理,供试小麦品种根和地上部镉含量的最大值和最小值之间相差 4.2 倍和 4.3 倍,其变异系数分别为 31.2%和 35.1%。方差分析表明,根和地上部镉含量在品种间差异均达到极显著水平。就 Cd 含量平均值而言,根系镉含量是地上部镉含量的 8.9 倍。

进一步分析春性和半冬性小麦品种平均镉含量,春性品种根系和地上部平均镉含量均大于半冬性品种,且差异达到极显著水平。春性小麦品种根系镉含量的变异系数为 21.3%,半冬性小麦品种根系镉含量的变异系数为 44.5%,是春性小麦品种根系镉含量变异系数的 2 倍;春性小麦品种地上部镉含量变异系数

为 33.7%,半冬性小麦品种地上部镉含量变异系数为 28.9%,说明春性小麦品种和半冬性小麦品种镉含量在品种间差异因部位不同而不同,这可能与镉运转效率高低有关。

2.3 不同小麦品种镉积累量比较

由表 3 可知,镉处理下,供试小麦品种根系和地上部镉积累量的最大值和最小值之间相差 4.6 倍和 3.2 倍,其变异系数分别为 38.5%和 31.7%。供试品种根系和地上部镉积累量在品种间差异均达到极显著水平。就积累量平均值而言,根系镉积累量是地上部镉积累量的 4.9 倍,根系镉积累量占植株镉积累量的 82.9%,说明小麦吸收的镉绝大部分保存在根部,地上部积累量很少。

春性小麦品种根系平均镉积累量小于半冬性小麦品种,且差异不显著;春性小麦品种地上部平均镉积累量显著大于半冬性品种。春性小麦品种根系和地上部镉积累量的变异系数均小于半冬性小麦品种,说明春性小麦品种镉积累量在品种间差异小。

2.4 耐性指数

耐性指数反映不同小麦品种对 Cd 的耐性,耐性指数越大,说明该小麦品种对 Cd 的耐性越强,若耐性指数为负值,说明该供试品种对 Cd 反映比较敏感。由表 4 可看出,供试小麦品种耐性指数从负到正都有,说明选用小麦品种既有对 Cd 反映敏感的,也有对 Cd 有不同耐性的。方差分析表明,根系和地上部的耐性指数在品种间均存在极显著差异。就耐性指数平均值而言,根系对 Cd 具有一定耐性,地上部对 Cd 反映敏感。春性小麦品种根系对 Cd 耐性指数小于半冬性小麦品种,春性小麦品种地上部对 Cd 敏感性大于半冬性小麦品种。

将地上部耐性指数(x)与地上部干重(y_1)、地上部

表 2 不同小麦品种镉含量品种间差异
Table 2 Variations of Cd concentrations of different wheat cultivars under Cd stress

项目		Cd 含量范围(平均值)Range(average) of Cd in the tissues/mg·kg ⁻¹	Cd 含量方差分析 F value of ANOVA for Cd	Cd 含量变异系数 Coefficient of variation(CV) for Cd/%
全部品种 All cultivars	根 Root	33.1~139.7(76.2)	546.49**	31.15
	地上部 Shoot	3.6~15.3(8.6)	97.64**	35.13
春性品种 Spring type	根 Root	57.5~114.8(80.8)	327.47**	21.34
	地上部 Shoot	3.6~15.3(9.7)	76.46**	33.71
半冬性品种 Half-winter type	根 Root	33.1~139.7(69.4)	783.79**	44.51
	地上部 Shoot	3.7~9.0(6.9)	108.64**	28.97
春性品种和半冬性品种平均值统计结果 Examination of average comparison between spring wheat and half-winter wheat				
根 Root			**	
地上部 Shoot			**	

表 3 不同小麦品种镉积累量品种间差异
Table 3 Variations of Cd accumulation of different wheat cultivars under Cd stress

项目		Cd 积累量范围 Range(average) of Cd accumulation/ $\mu\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$	Cd 积累量方差分析 <i>F</i> value of ANOVA for Cd accumulation	Cd 积累量变异系数 Coefficient of variation(CV) for Cd/%
全部品种 All cultivars	根 Root	2.12~9.78(4.61)	18.26**	38.51
	地上部 Shoot	0.45~1.44(0.95)	16.75**	31.68
春性品种 Spring type	根 Root	3.05~7.76(4.51)	7.91**	29.43
	地上部 Shoot	0.45~1.44(0.98)	13.90**	29.89
半冬性品种 Half-winter type	根 Root	2.12~9.78(4.76)	57.75**	49.80
	地上部 Shoot	0.48~1.43(0.89)	24.41**	35.45
春性品种和半冬性品种平均值统计结果 Examination of average comparison between spring wheat and half-winter wheat				
根 Root			ns	
地上部 Shoot			*	

表 4 不同小麦品种耐性指数
Table 4 Variations of Cd tolerance index of different wheat cultivars

项目		耐性指数范围(平均)Range(average) of Cd tolerance index/%	耐性指数方差分析 <i>F</i> value of ANOVA for Cd tolerance index
全部品种 All cultivars	根 Root	-35.63~115.79(9.09)	12.99**
	地上部 Shoot	-48.29~25.35(-18.63)	5.50**
春性品种 Spring type	根 Root	-35.36~78.57(0.08)	7.86**
	地上部 Shoot	-40.67~7.61(-21.03)	3.81**
半冬性品种 Half-winter type	根 Root	-35.63~115.79(22.61)	24.62**
	地上部 Shoot	-48.29~25.35(-15.02)	8.41**
春性品种和半冬性品种平均值统计结果 Examination of average comparison between spring wheat and half-winter wheat			
根 Root			*
地上部 Shoot			ns

镉含量(y_2)、地上部镉积累量(y_3)分别进行相关分析可知:地上部耐性指数与地上部干重呈极显著正相关,

$$y_1=0.933\ 5x+132.57(r=0.668\ 1^{**})$$

与地上部镉含量呈显著负相关,

$$y_2=-0.058\ 5x+7.474\ 2(r=-0.397\ 3^{*})$$

而与地上部镉积累量间无显著相关性。这说明选择地上部耐性指数大、镉低积累小麦品种是有可能的。

2.5 运转效率

由表 5 可知,供试小麦品种运转效率最大值和最小值分别为 25.1%和 8.9%,两者之间相差 2.8 倍,经方差分析,运转效率在品种间存在极显著差异,其变异系数为 24.1%。春性小麦品种的运转效率在品种间差异达极显著水平,半冬性小麦品种的运转效率在品种间差异不显著。就运转效率的平均值而言,春性小麦品种的运转效率高于半冬性小麦品种运转效率,差异不显著。春性小麦品种的运转效率的变异系数为 27.96%,半冬性小麦品种的运转效率的变异系数为 13.83%,说明春性小麦品种的 Cd 运转效率在品种间

差异大,半冬性小麦品种的 Cd 运转效率在品种间差异小。

2.6 不同小麦品种地上部镉积累量的聚类分析

为明确不同小麦品种地上部对 Cd 积累能力的差异,以供试品种地上部 Cd 积累量为基础,采用欧氏距离和离差平方和法对 25 个小麦品种进行聚类分析(图 1)。聚类结果表明,25 个小麦品种被划分为 3 类,镉高积累型、镉中积累型和镉低积累型(表 6)。

镉高积累型品种有扬麦 5 号、徐州 26 号等 10 个品种,占供试品种的 40%,其中春性品种有 7 个,占供试春性品种的 46.7%;半冬性品种有 3 个,占供试半冬性品种的 30%。地上部平均镉积累量为 $1.24\ \mu\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$,变化范围为 $1.09\sim1.44\ \mu\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$,镉运转效率为 12.73%~25.07%。

镉中积累型品种有扬麦 9 号、淮麦 21 号等 7 个品种,占供试品种的 28%,其中春性品种有 4 个,占供试春性品种的 26.7%;半冬性品种有 3 个,占供试半冬性品种的 30%。地上部平均镉积累量为 $0.94\ \mu\text{g}\cdot$

表 5 不同小麦品种 Cd 运转效率
Table 5 Variations of Cd transport efficiency of different wheat cultivars

项目	运转效率范围(平均)Range(average) of Cd transport efficiency/%	运转效率方差分析 F value of ANOVA for Cd transport efficiency	运转效率变异系数 Coefficient of variation(CV) for Cd(%)
全部品种 All cultivars	8.87~25.07(17.09)	7.08**	24.12
春性品种 Spring type	8.87~25.07(18.30)	10.90**	27.96
半冬性品种 Half-winter type	12.73~21.30(16.53)	2.15ns	13.83
春性品种和半冬性品种平均值统计结果 Examination of average comparison between spring wheat and half-winter wheat			
显著性 Significance	ns		

表 6 各供试小麦品种对 Cd 响应类型的划分
Table 6 Different types of response of different Cd accumulation

项目	Cd 高积累型 High Cd accumulation type	Cd 中积累型 Mean Cd accumulation type	Cd 低积累型 Low Cd accumulation type
春性品种 Spring type	扬麦 5 号、扬麦 12 号、扬辐麦 2 号、宁麦 9 号、扬麦 10 号、宁麦 8 号、扬麦 00118	扬麦 9 号、扬麦 13 号、扬麦 11 号、扬麦 6 号	苏麦 98329、扬辐麦 1 号、苏麦 6 号、扬麦 158
半冬性品种 Half-winter type	徐州 26 号、淮麦 19 号、淮麦 20 号	淮麦 21 号、徐州 25 号、徐麦 27 号	淮麦 18、徐麦 28 号、徐麦 974、徐州 24 号

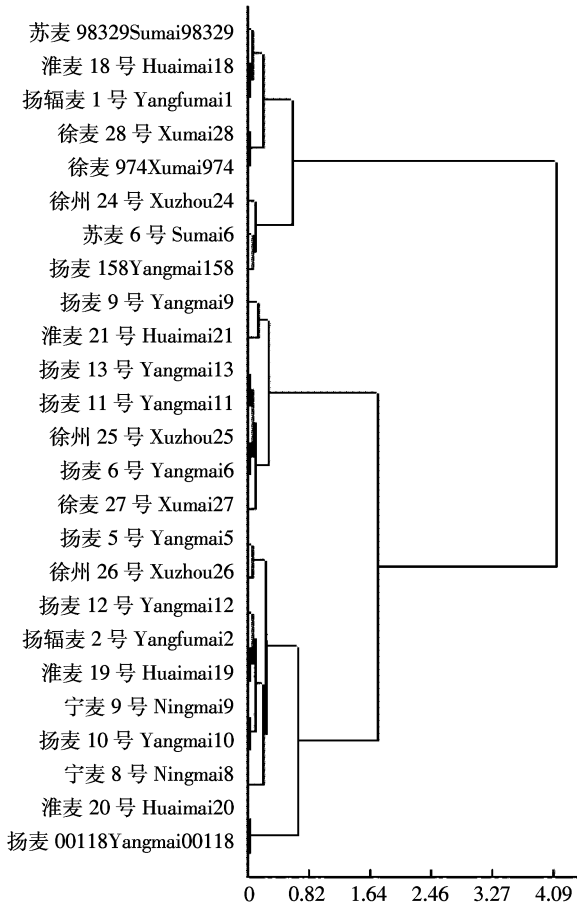


图 1 不同小麦品种地上部 Cd 积累量聚类分析图
Figure 1 Dendrogram using different wheat in
Cd accumulation of shoots

plant⁻¹,变化范围为 0.81~1.02 μg·plant⁻¹,镉运转效率为 12.36%~22.18%。

镉低积累型品种有苏麦 98329、淮麦 18 等 8 个品种,占供试品种的 32%,其中春性品种有 4 个,占供试春性品种的 26.7%;半冬性品种有 4 个,占供试半冬性品种的 40%。地上部平均镉积累量为 0.58 μg·plant⁻¹,变化范围为 0.45~0.75 μg·plant⁻¹,镉运转效率为 8.87%~21.30%。

不同小麦品种地上部镉积累量取决于两个方面,一是地上部干重,二是地上部镉含量。虽然镉处理导致春性小麦品种地上部干重的下降幅度大于半冬性小麦品种,但春性小麦品种平均地上部干重小于半冬性小麦品种(表 1)。春性小麦品种平均地上部镉含量极显著大于半冬性小麦品种(表 2)。就不同小麦品种平均地上部镉积累量而言,春性小麦品种显著大于半冬性小麦品种,且春性小麦品种地上部镉积累量的变异系数小于半冬性小麦品种(表 3)。因此,从半冬性小麦品种中筛选出镉低积累品种的概率较大。从聚类分析结果中也可以看出,春性小麦品种的 26.7%为低积累型品种,半冬性小麦品种的 40%为低积累型品种。

3 讨论

张国平等^[2]研究表明甘谷 534 的耐 Cd 毒害能力要强于鄂 81513,地上部较地下部敏感。蔡保松等^[16]研究表明镉对小麦地上部和地下部的抑制能力不同,对根长的抑制作用大于茎高。王丽香等^[17]研究表明 Cd 对燕麦地上部和地下部的抑制能力不同,对茎高的抑制作用大于根长,对地上部干重的抑制作用大于地下

部。研究表明,Cd处理下供试品种的地上部生物量极显著下降,而地下部生物量无明显差异,说明地上部对Cd胁迫的反应较地下部敏感,这与张国平、王丽香等研究结果一致。

春性小麦品种和半冬性小麦品种根系干重对Cd处理的反应不同,Cd处理下春性小麦品种根系干重减少,半冬性小麦品种根系干重增加,但与对照均无显著差异。邬飞波^[18]研究表明,0.01 mmol·L⁻¹的Cd处理对水稻的根系干重也略有促进作用。本研究中镉胁迫对半冬性小麦品种根系干重有促进作用,可能是Cd处理浓度没有达到对半冬性小麦品种根系损伤的程度。

吴启堂等^[19]认为在1 mg·kg⁻¹土壤污染时水稻不同品种对Cd吸收积累具有明显差异,李正文等^[20]认为不同水稻品种对同一土壤中Cd的吸收及其在籽粒中的积累存在显著性差异。研究表明,25个小麦品种对Cd的吸收和积累存在显著的品种间差异,这为筛选出Cd低积累型小麦品种提供了可能。供试品种吸收的Cd主要积累在根部,地上部Cd积累量较低,供试品种根系平均Cd含量是地上部平均Cd含量的8.9倍,根系镉积累量是地上部镉积累量4.9倍,根系Cd积累量占植株积累量的82.9%。

本研究还发现,25个供试小麦品种的Cd运转效率存在极显著差异,其中春性小麦品种Cd运转效率高半冬性小麦品种,春性小麦品种间Cd运转效率差异显著,半冬性小麦品种间Cd运转效率差异不显著。

筛选低镉积累型小麦品种关键在于植株地上部镉积累量低。植物对重金属离子的抗性机制包括排斥和积累^[21]。在排斥机制中,植物具有限制根系吸收和从根系向地上部运输或主动向细胞外运输有毒离子的能力。积累机制是植物把有毒离子分布在特定的器官、组织或细胞器中,形成难溶性化合物或合成特定的有机化合物^[22]。

不同小麦品种地上部镉积累量与镉运转效率有一定的相关性,但并不完全一致。如低积累型品种徐麦974,其运转效率21.3%,高积累型品种淮麦20,其运转效率为12.7%。这可能与小麦根系吸收和保持镉特性有关。相关研究表明^[16],小麦对镉吸收和分配是由根部特征决定的。小麦镉积累量低或镉运转效率低能够将其固定在根部的品种是人们所希望的小麦品种。

本研究中春性小麦品种和半冬性小麦品种在吸收和积累Cd能力上有一定的差异,至于这种差异是

品种决定还是感温感光特性不同所引起的有待于进一步研究。

张国平^[2]、邬飞波^[23]、王丽香^[17]等研究麦类作物对镉的响应,对样品的考察时期均在5叶期左右,本研究分析小麦5叶期对镉的吸收、积累和转运。对于麦类作物来说,其重点应是籽粒中含镉量。Stolt等^[24]研究表明小麦苗期地上部高累积镉的小麦品种,其小麦籽粒镉含量也较高。因此,利用5叶期的结果筛选籽粒镉低积累型小麦品种是可靠的。

4 结论

25个小麦品种苗期在1 μmol·L⁻¹ Cd处理下抑制地上部干物重生长,对根系干物重影响因品种类型而异,对春性小麦品种根系干重有抑制作用,对半冬性小麦品种根系干重有促进作用。

25个小麦品种苗期在1 μmol·L⁻¹ Cd处理下对Cd的运转效率范围为8.87%~25.07%,平均为17.09%,表明根系能从水培液中吸收一定数量的Cd,但运转到地上部Cd量较少,大部分Cd积累在根部。

25个小麦品种苗期在1 μmol·L⁻¹ Cd处理下地上部和根系Cd含量差异均达极显著水平,地上部和根系Cd积累量差异也达极显著。根据地上部Cd积累量进行聚类分析显示,25个小麦品种分为3类,苏麦98329、扬辐麦1号、苏麦6号、扬麦158、淮麦18、徐麦28号、徐麦974、徐州24号为Cd低积累型,其地上部平均Cd积累量为0.58 μg·plant⁻¹,变化范围为0.45~0.75 μg·plant⁻¹。

参考文献:

- [1] 赵其国,周炳中,杨浩.江苏省环境质量与农业安全问题研究[J]. 土壤,2002(1):1-8.
ZHAO Qi-guo, ZHOU Bing-zhong, YANG Hao. Research on environmental quality and agricultural safety of Jiangsu Province[J]. *Soil*, 2002(1):1-8.
- [2] 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, Montohiro Fukami, Histoshi Sekimoto. Difference between two wheat cultivars in Cd and mineral nutrient uptake under different Cd levels[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(4): 454-458.
- [3] 张义贤,张丽萍. Cd²⁺ Pb²⁺ Hg²⁺ Ni²⁺胁迫对大麦抗氧化酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报. 2005, 24(2):217-221.
ZHANG Yi-xian, ZHANG Li-ping. Effects of antioxidant enzymes activities in *hordeum vulgare* seedling under Cd²⁺, Pb²⁺, Hg²⁺, Ni²⁺ stresses [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(2):217-221.
- [4] 慈敦伟,姜东,戴廷波,等. 镉毒害对小麦幼苗光合及叶绿素荧光

- 特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2005, 25(5):88-91.
- CI Dun-wei, JIANG Dong, DAI Ting-bo, et al. Effect of Cd toxicity on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of wheat seedling[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2005, 25(5):88-91.
- [5] 张 微, 吕金印, 柳 玲. 不同基因型番茄幼苗对镉胁迫的生理响应及镉吸收差异[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(6):1065-1071.
- ZHANG Wei, LV Jin-yin, LIU Ling. Different of cadmium absorption and physiological responses of different varieties of tomatoes to cadmium stress [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29 (6):1065-1071.
- [6] 杨居荣, 贺建群, 黄 翌, 等. 农作物 Cd 耐性的种内和种间差异 I: 种间差[J]. 应用生态学报, 1994, 5(2):192-196.
- YANG Ju-rong, HE Jian-qun, HUANG Yi, et al. Inter-and intraspecific differences of crops in cadmium tolerance I :Interspecific difference[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1994, 5(2):192-196.
- [7] Arthu E, Crews H, Morgan C. Optimizing plant genetic strategies for minimizing environmental contamination in food chain[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2000, 2(1):1-21.
- [8] 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, 6(增刊):132-136.
- YANG Ju-rong, HE Jian-qun, HUANG Yi, et al. Inter-and intraspecific differences of crops in cadmium tolerance II :Interspecific difference[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1995, 6(Suppl):132-136.
- [9] 赵步洪, 张洪熙, 奚岭林, 等. 杂交水稻不同器官镉浓度与累积量[J]. 中国水稻科学, 2006, 20(3):306-312.
- ZHAO Bu-hong, ZHANG Hong-xi, XI Ling-lin, et al. Concentrations and accumulation of cadmium in different organs of hybrid rice[J]. *Chinese J Rice Sci*, 2006, 20(3):306-312.
- [10] Florijn P J, van Beusichem M L. Uptake and distribution of cadmium in maize inbred lines[J]. *Plant and Soil*, 1993, 150 :25-32.
- [11] 刘昭兵, 纪雄辉, 田发祥, 等. 不同基因型甘薯吸收积累 Cd 的特征差异性研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(9):1653-1658.
- LIU Zhao-bing, JI Xiong-hui, TIAN Fa-xiang, et al. Absorption and accumulation of Cd in different sweet potato genotypes[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(9):1653-1658.
- [12] 王丽燕, 郑世英. 镉、铅及其复合污染对小麦种子萌发的影响[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(1):146-148.
- WANG Li-yan, ZHENG Shi-ying. Effect of cadmium, lead and their combined pollution on seed germination of wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2009, 29(1):146-148.
- [13] 王 云, 张海军, 唐为忠, 等. 硫对镉胁迫下小麦幼苗生长和一些生理特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3):1029-1032.
- WANG Yun, ZHANG Hai-jun, TANG Wei-zhong, et al. Effect of sulfur on plant growth and some physiological characteristics of wheat seedlings under cadmium stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(3):1029-1032.
- [14] Jalil A, Selles F, Clarke J M. Effect of cadmium on growth and uptake of cadmium and other elements by durum-wheat[J]. *Plant Nutr*, 1994, 17:1839-1858.
- [15] Metwally A, Safronova V I, Belimov A A, et al. Genotypic variation of the response to cadmium toxicity in *Pisum sativum* L.[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 56:167-178.
- [16] 蔡保松, 曹林奎. 镉对小麦生长发育的影响及其基因型间差异[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2003, 31(1):62-66.
- CAI Bao-song, CAO Lin-kui. Effect of cadmium on growth and the tolerance among wheat genotype[J]. *Journal of Northwest Sci-Tech Univ. of Agri and For(Nat Sci Ed)*, 2003, 31(1):62-66.
- [17] 王丽香, 范仲学, 张 欣, 等. 不同品种燕麦对镉胁迫响应的差异性研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(1):14-20.
- WANG Li-xiang, FAN Zhong-xue, ZHANG Xin, et al. Responses oat cultivars to cadmium stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(1):14-20.
- [18] WU Fei-bo, DONG Jing, JIA Guo-xia, et al. Genotypic difference in the responses of seedling growth and Cd toxicity in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2006, 5(1):68-76.
- [19] 吴启堂, 陈 卢, 王广寿. 水稻不同品种对 Cd 吸收累积的差异和机理研究[J]. 生态学报, 1999, 19(1):104-107.
- WU Qi-tang, CHEN Lu, WANG Guang-shou. Difference on Cd uptake and accumulation among rice cultivars and its mechanism [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(1):104-107.
- [20] 李正文, 张艳玲, 潘根兴, 等. 不同水稻品种籽粒 Cd、Cu 和 Se 的含量差异及其人类膳食摄入风险[J]. 环境科学, 2003, 24(3):112-115.
- LI Zheng-wen, ZHANG Yan-ling, PAN Gen-xing, et al. Grain contents of Cd, Cu and Se by 57 rice cultivars and the risk significance for human dietary uptake[J]. *Environmental Science*, 2003, 24(3):112-115.
- [21] Baker A T M. Metal tolerance[J]. *Neco phytol*, 1987, 106(suppl):93-111.
- [22] Hall J L. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53:1-11.
- [23] 邬飞波, 张国平. 不同镉水平下大麦幼苗生长和镉及养分吸收的品种间差异[J]. 应用生态学报, 2002, 13(12):1595-1599.
- WU Fei-bo, ZHANG Guo-ping. Differences between barely cultivars in seedling growth and in uptake of cadmium and nutrients under various Cd levels[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(12):1595-1599.
- [24] Stolt P, Asp H, Hultin S. Genetic variation in wheat cadmium accumulation on soils with different cadmium concentrations[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2006, 192:201-208.