

# 镉胁迫对不同基因型小麦产量及构成因子的影响

杨玉敏<sup>1</sup>, 张庆玉<sup>1\*</sup>, 杨武云<sup>2</sup>, 田丽<sup>1</sup>, 雷建容<sup>1</sup>, 张冀<sup>1</sup>, 李俊<sup>2</sup>

(1 四川省农业科学院土壤肥料研究所, 四川成都 610066; 2 四川省农业科学院作物研究所, 四川成都 610066)

**摘要:** 盆栽试验以筛选出的 6 份子粒镉(Cd)高积累和 5 份子粒 Cd 低积累小麦为试材, 研究不同基因型小麦在 0.28 (对照 CK)、5、10 和 20 mg/kg 4 个 Cd 浓度胁迫下小麦子粒产量及其构成因子的变化。结果表明, 不同基因型小麦产量及其构成因子对土壤 Cd 浓度的变化响应差异很大。产量对 Cd 胁迫很敏感, 随着 Cd 浓度的提高极显著降低; 小穗数、穗粒数和千粒重随 Cd 浓度的增加逐渐降低, 响应显著的浓度分别为 5、5 和 10 mg/kg; 而有效分蘖随着 Cd 浓度的提高先在 5 mg/kg 显著增加, 然后极显著降低, 响应强烈的浓度为 10 mg/kg。相关性和通径分析表明, Cd 浓度与小麦产量及构成因子呈负相关, 影响程度为: 产量 > 千粒重 > 穗粒数 > 有效分蘖 > 小穗数。由此可知, 产量随着 Cd 浓度的提高极显著降低的直接原因是瘪粒和空粒的增加; 同时还看出, Cd 胁迫下子粒 Cd 高积累小麦的产量、小穗数和穗粒数显著低于 Cd 低积累品种, 千粒重两者相差不大, 有效分蘖是前者高于后者。

**关键词:** 小麦; 镉胁迫; 产量; 基因型差异

中图分类号: S512.1.01; Q945.78

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2011)03-0532-07

## Effect of cadmium stress on yield and yield components of different wheat genotypes

YANG Yu-min<sup>1</sup>, ZHANG Qing-yu<sup>1\*</sup>, YANG Wu-yun<sup>2</sup>, TIAN Li<sup>1</sup>, LEI Jian-rong<sup>1</sup>, ZHANG Ji<sup>1</sup>, LI Jun<sup>2</sup>

(1 Soil and Fertilizer Institute, Sichuan Academy of Agricultural Science, Chengdu, Sichuan 610066, China;

2 Crop Research Institute, Sichuan Academy of Agricultural Science, Chengdu, Sichuan 610066, China)

**Abstract:** To investigate the effect of the soil Cd concentration on yield and yield components of different wheat genotypes, a pot culture experiment was performed. Six high-Cd accumulating wheat (HCA) and five low-Cd accumulating wheat (LCA) were used under 0.28 (CK), 5, 10 and 20 mg/kg soil Cd concentrations. The wheat yield decreased gradually and significantly with increasing Cd concentration in the soil, and the 1000-grain weight (TGW), tiller number, spikelet number and kernel number per spike decreased gradually, while the effective tiller number increased significantly in the 5 mg/kg treatment, but was reduced significantly at higher soil Cd concentrations. The correlation and path analysis procedures were utilized to investigate the effect of Cd stress on yield and yield components of the different wheat genotypes. The results showed that Cd in the soil can easily lead to significantly reduced wheat yield, mainly because of shriveled grains and empty seeds, which suggested that Cd may affect fertilization or pollination, and growth of the embryo or endosperm. In addition, the yield, spikelet number per spike and kernel number per plant of HCA genotypes were significantly lower than those of LCA genotypes under the four different soil Cd concentrations, TGW was unchanged between HCA and LCA, while the effective tiller number of the former was higher than that of the latter.

**Key words:** wheat; cadmium stress; yield; genotypic difference

收稿日期: 2010-05-25 接受日期: 2011-01-31

**基金项目:** 国家自然科学基金(3047106, 30771338); 国家“973”项目(2006CB101700); 国家“863”计划(2006AA10ZIC6); 国家支撑计划项目(2006BAD13B02-03, 2006BAD01A02); 四川省育种攻关项目(2006YZGG-28); 四川省财政教育种青年基金项目(2010QNJJ-020); 国家小麦产业技术体系项目(nycytx-03)资助。

**作者简介:** 杨玉敏(1981—), 女, 湖北荆门人, 硕士研究生, 主要从事植物营养与分子生物学研究。E-mail: yangym12@163.com

\* 通讯作者 Tel: 028-84504297, E-mail: zhangqingyu202@sina.com

随着“三废”的大量排出,农药、化肥的大量使用以及城市垃圾的不断增多导致土壤中镉(Cd)污染越来越严重。据不完全统计,世界平均每年有 $2.2 \times 10^4$  t Cd 进入土壤<sup>[1]</sup>。中国土壤 Cd 背景平均值(0.097 mg/kg)和最大值(13.4 mg/kg)都远远高于世界平均值(0.06 mg/kg)和最大值(0.7 mg/kg)<sup>[2-3]</sup>。Cd 污染范围广、难迁移、难降解、易积累、不可逆、毒性大、易侵入,被认为是最具危害性的重金属之一<sup>[4-5]</sup>。Cd 污染严重影响土壤生态环境和功能的稳定性,阻碍植物生长发育,促进植物早衰,引起代谢紊乱,抑制养分吸收,降低产量等等,通过食物链进一步危害人类和动物健康<sup>[6-8]</sup>。

小麦是我国最重要粮食作物之一。国内外学者对 Cd 污染主要关注的是 Cd 对小麦品质和各生理指标的影响。在土壤中 Cd 胁迫对小麦产量的影响方面,主要对小麦生长和结实情况进行了研究<sup>[9-14]</sup>。但由于试验方法、施 Cd 方式以及试验材料等方面的不同,结果不尽一致。张国平等<sup>[10]</sup>研究了 2 份小麦在 0、0.03、0.1、0.3 和 1.0 mg/kg Cd 浓度下的生长情况,发现在 0.03 mg/kg 浓度下明显促进小麦生长和干物质积累,浓度高于 0.3 mg/kg 会抑制生长;纪淑娟等<sup>[9]</sup>研究了不同 Cd 浓度胁迫下小麦生长和结实情况结果表明, Cd 浓度为 0.1 ~ 0.3 mg/kg 时,株高、穗长、单盆产量和百粒重较对照高; Cd 浓度为 5.0 mg/kg 时,小麦的生长和结实开始下降,当浓度达到 50.0 mg/kg 时,生长和结实严重受到抑制。他们都认为不同 Cd 浓度间的影响差异显著,但 Jalil 等<sup>[13]</sup>则得出各浓度间差异不显著的结论。

不同基因型小麦对 Cd 胁迫的响应差异很大,但关于此类研究报道较少。本课题组于 2007 年采用盆栽试验对 102 份不同基因型的小麦在土壤 Cd 浓度为 0.4、5 和 20 mg/kg 的胁迫下子粒 Cd 积累含量进行了分析,筛选出 6 份子粒 Cd 高积累(简称高积累)和 5 份子粒 Cd 低积累(简称低积累)的小麦品种<sup>[15]</sup>。为更好地研究和利用筛选出的 11 份材料,本试验结合土壤 Cd 污染情况,探讨了不同 Cd 浓度胁迫下不同基因型小麦子粒产量及其构成因子的变化,以期筛选出 Cd 胁迫下小麦子粒低 Cd 积累、产量较高的材料,探讨土壤 Cd 胁迫对小麦生产影响的规律,为 Cd 污染预测、评价和污染区域规划提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

盆栽试验所用土壤采于四川省绵竹市孝德镇桂

兰村 5 组的大田耕作层(0—15 cm),其 pH 为 4.85,全氮 1.9 g/kg、有机质 31.3 g/kg、碱解氮 262.10 mg/kg、速效磷 15.24 mg/kg、速效钾 145.27 mg/kg、Cd 浓度为 0.28 mg/kg。试验材料为 6 份高积累小麦和 5 份低积累小麦<sup>[15]</sup>,编号分别为 H<sub>1</sub> ~ H<sub>6</sub> 和 L<sub>1</sub> ~ L<sub>5</sub>。所有材料均由四川省农业科学院作物研究所提供。

每份试材设 4 个 Cd 浓度胁迫,即:0.28(未施外源 Cd,作对照 CK)、5、10 和 20 mg/kg。以 CdCl<sub>2</sub> · 2.5H<sub>2</sub>O 为外源 Cd,以溶液形式于播种前施入,使 Cd 浓度达到目标浓度,3 次重复。试验用盆钵高 30 cm,直径 25 cm,每盆装去杂、风干、粉碎后土壤 7.5 kg。小麦播种前基施尿素、磷酸一铵和氯化钾(分析纯),按照 N 0.20 g/kg、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.15 g/kg 和 K<sub>2</sub>O 0.15 g/kg 的标准施用。苗期每盆定苗 5 株。整个生育期以自来水浇灌,其他管理同常规大田生产。

### 1.2 调查分析项目与方法

小麦成熟期单盆收获,对各盆分别考种,检测小麦的单盆产量、有效分蘖数、小穗数、穗粒数和千粒重。

土壤基础性状采用常规分析法<sup>[16]</sup>;土壤 Cd 采用原子吸收分光光度计法测定<sup>[17]</sup>。

试验数据用 Excel 2003 和 DPS 7.05 进行统计、显著性分析、回归分析和通径分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同基因型小麦子粒 Cd 积累

2007 年对遗传差异较大的 102 份小麦在 3 个 Cd 胁迫浓度(0.4、5 和 20 mg/kg)下小麦子粒 Cd 积累进行了初步筛选;2008 年对所选出的 11 份材料子粒 Cd 积累和产量变化情况进行试验。2 年结果(表 1)看出,11 份材料子粒 Cd 积累相对稳定,差异不明显。H<sub>1</sub> ~ H<sub>6</sub> 在不同浓度 Cd 胁迫下始终高积累,L<sub>1</sub> ~ L<sub>5</sub> 则始终低积累。说明小麦子粒 Cd 积累的多少受基因控制,且遗传相对稳定。

### 2.2 Cd 胁迫对不同基因型小麦产量的影响

随着 Cd 浓度的提高,小麦子粒的产量显著降低。表 2 看出,Cd 浓度从 0.28 mg/kg 增加至 20 mg/kg,11 份材料的单盆产量平均值从 11.83 g 降至 6.01 g。Cd 浓度为 5、10 和 20 mg/kg 时分别比对照(Cd 0.28 mg/kg)减产 12.60%、38.46% 和 49.20%。说明土壤 Cd 浓度达到 10 mg/kg 时,已严重影响小麦产量。

表 1 不同基因型小麦子粒在不同浓度镉胁迫下子粒镉积累的差异 (mg/kg)

Table 1 Grain Cd concentrations of different wheat genotypes under different soil Cd concentrations

材料编号 No. of material	镉浓度 Cd concentration (mg/kg)						
	CK		5		10	20	
	2007yr	2008yr	2007yr	2008yr	2008yr	2007yr	2008yr
H <sub>1</sub>	0.4763	0.4938	4.0625	5.3251	5.8681	10.725	9.7175
H <sub>2</sub>	0.5571	0.4776	4.3365	5.8012	6.4883	7.9391	9.3418
H <sub>3</sub>	0.4482	0.3624	4.1333	4.9411	5.8557	7.338	10.2020
H <sub>4</sub>	0.4782	0.5510	6.0799	6.8946	8.6842	10.7538	10.9339
H <sub>5</sub>	0.4300	0.3873	3.8357	3.8209	4.1790	8.5604	8.4428
H <sub>6</sub>	0.4723	0.3011	6.1070	4.6853	5.3526	10.3206	9.5920
L <sub>1</sub>	0.1894	0.1524	1.5561	0.9195	2.0384	3.9979	3.3939
L <sub>2</sub>	0.2329	0.1667	2.3671	1.4783	2.2701	3.9308	4.1729
L <sub>3</sub>	0.2983	0.0988	1.9248	1.7677	2.5255	2.4205	2.6815
L <sub>4</sub>	0.2610	0.2645	1.833	1.5180	1.9145	3.3435	3.6558
L <sub>5</sub>	0.2691	0.2293	2.4706	1.2849	1.7877	3.3358	2.2447

注 (Note): CK 的 Cd 浓度在 2007 年为 0.4 mg/kg, 2008 年为 0.28 mg/kg. Soil Cd concentrations of CK were 0.4 mg/kg in 2007, and 0.28 mg/kg in 2008.

表 2 不同浓度镉胁迫下 11 份小麦材料的产量 (g/pot)

Table 2 The yield of eleven different genotype wheat under different soil Cd concentration

材料编号 No. of material	镉浓度 Cd concentration (mg/kg)				平均值 Mean
	0.28 (CK)	5	10	20	
H <sub>1</sub>	13.59 aA	9.95 bB	9.29 bB	10.42 bB	11.59
H <sub>2</sub>	3.54 abAB	6.04 aA	1.75 bB	2.10 bB	3.37
H <sub>3</sub>	14.79 aA	12.41 abAB	10.77 bB	10.11 bB	12.11
H <sub>4</sub>	3.59 aA	2.83 aA	1.80 aA	2.14 aA	2.75
H <sub>5</sub>	8.57 bB	14.14 aA	7.97 bB	7.59 bB	10.24
H <sub>6</sub>	5.59 abAB	7.68 aA	3.34 bcBC	2.11 cC	4.97
L <sub>1</sub>	25.54 aA	15.36 bB	12.99 bB	8.28 cC	15.61
L <sub>2</sub>	14.38 aA	10.21 bB	9.26 bB	7.88 bB	10.56
L <sub>3</sub>	8.04 aA	5.83 bAB	4.96 bcAB	2.78 cB	5.80
L <sub>4</sub>	14.09 aA	8.26 bB	5.84 cBC	4.74 cC	8.70
L <sub>5</sub>	22.72 aA	21.39 aA	14.50 bB	7.49 cC	17.59
平均值 Mean	11.83 aA	10.34 bB	7.28 cC	6.01 dD	9.39
变异系数 CV (%)	52.89 aA	27.28 bB	18.84 cC	11.26 dD	23.35
减产比例 Reduction (%)		12.60 cC	38.46 bB	49.20 aA	

注 (Note): 同行数值后不同大、小写字母分别表示同一材料在不同浓度下差异极显著 ( $P < 0.01$ ) 和显著 ( $P < 0.05$ ) Values followed by different capital or small letters in a row mean significant difference at 0.01 and 0.05 levels among different Cd concentrations, respectively.

比较各浓度下所有材料的变异系数可发现,随着浓度的提高,材料间单盆产量变化幅度降低。以 Cd 胁迫浓度为自变量,小麦产量为因变量的相关分析表明,其相关系数  $r = -0.4973$ ; 通径分析结果表明,Cd 浓度对小麦产量的决定系数为 0.2043。可见,一般情况下,Cd 浓度与小麦产量呈负相关,相关性不高。

试验还看出,11 份材料间平均产量变化范围为 17.59 ~ 2.75 g/pot,产量最高的是材料 L<sub>5</sub>,其次为 L<sub>1</sub>,这 2 份材料在 4 个浓度下平均产量均显著高于其它材料(表 2); 其子粒低 Cd 积累、产量较高,是高产优质材料,可作为进一步育种的基础材料。

基因型和 Cd 浓度的相互作用对小麦产量影响也很大。表 2 可看出,同一基因型小麦在不同浓度 Cd 胁迫下单盆产量变化趋势不完全一致。供试的 11 份材料主要表现出 3 种趋势:单盆产量受 Cd 浓度影响不显著,如 H<sub>4</sub>,占总材料的 9.09%; 随着 Cd 浓度的增加产量逐渐降低,共 7 份,占总材料的 63.64%; H<sub>2</sub>、H<sub>5</sub>和 H<sub>6</sub> 在低 Cd 浓度(5 mg/kg)胁迫时,产量增加明显,Cd 浓度超过 5 mg/kg 时,产量显

著降低,占 27.27%。

### 2.3 Cd 胁迫对不同基因型小麦有效分蘖数和小穗数的影响

由表 3 可知,土壤 Cd 浓度为 5 mg/kg 时单盆有效分蘖 16.7 个,比对照有效分蘖 16.0 个显著增加; 土壤 Cd 浓度增加至 10 mg/kg 时,11 份材料有效分蘖平均值极显著下降( $P < 0.01$ ),Cd 浓度 10 与 20 mg/kg 间有效分蘖差异不显著。说明随着土壤 Cd 浓度的提高,单盆有效分蘖先显著增加后显著减少。小麦有效分蘖与 Cd 浓度的相关系数  $r = -0.2662$ ; 通径分析,Cd 浓度对小麦有效分蘖数的决定系数为 0.0586。

11 份小麦材料在 Cd 胁迫下单盆有效分蘖平均值变化较大,变化范围 23.2 ~ 11.4 个,最多的是材料 H<sub>2</sub>,最少的是 L<sub>3</sub>; 低积累材料中 L<sub>2</sub> 和 L<sub>5</sub> 的有效分蘖较多。有效分蘖对 Cd 浓度的响应可分为:随着 Cd 浓度的变化有效分蘖无明显变化的有 H<sub>1</sub>、H<sub>3</sub>、H<sub>4</sub>、L<sub>1</sub> 和 L<sub>4</sub> 5 份; 随着 Cd 浓度的增加有效分蘖明显减少的有 L<sub>2</sub>、L<sub>3</sub> 和 L<sub>5</sub>; 随着 Cd 浓度的增加有效分蘖先明显增加后明显减少的有 H<sub>2</sub>、H<sub>5</sub> 和 H<sub>6</sub>。

表 3 不同基因型小麦在不同镉浓度胁迫下有效分蘖和单穗小穗数

Table 3 Effects of cadmium on effective tillers and spikelets of different wheat genotypes

材料编号 No. of material	镉浓度 Cd concentration (mg/kg)								平均值 Mean	
	0.28 (CK)		5		10		20		分蘖数 Tillers (No./pot)	小穗数 Spikelets (No./spike)
	分蘖数 Tillers (No./pot)	小穗数 Spikelets (No./spike)	分蘖数 Tillers (No./pot)	小穗数 Spikelets (No./spike)	分蘖数 Tillers (No./pot)	小穗数 Spikelets (No./spike)	分蘖数 Tillers (No./pot)	小穗数 Spikelets (No./spike)		
H <sub>1</sub>	10.1 aA	16.1 abA	11.4 aA	17.7 aA	10.8 aA	15.4 abA	13.4 aA	13.7 bA	12.2	16.7
H <sub>2</sub>	20.6 bA	5.8 abA	25.9 aA	8.4 aA	23.5 abA	4.7 abA	23.3 abA	3.3 bA	23.2	5.5
H <sub>3</sub>	19.8 aA	17.6 aA	17.2 aA	14.7 aA	16.1 aA	14.7 aA	15.1 aA	13.3 aA	17.3	15.2
H <sub>4</sub>	14.5 aA	12.8 aA	13.1 aA	11.7 aA	13.8 aA	12.1 aA	13.7 aA	9.1 aA	14.8	12.2
H <sub>5</sub>	9.7 bA	18.1 aA	13.5 abA	16.6 abA	10.1 abA	14.4 abA	13.4 aA	14.2 bA	12.4	16.9
H <sub>6</sub>	15.5 bBC	19.6 aA	26.1 aA	17.2 aA	16.1 bB	16.5 aA	10.4 cC	16.1 aA	18.2	18.4
L <sub>1</sub>	17.4 aA	16.3 aA	18.4 aA	15.7 aA	18.2 aA	13.7 aA	17.5 aA	13.1 aA	17.8	14.6
L <sub>2</sub>	22.4 aA	16.8 aA	18.6 abA	16.9 aA	19.8 abA	15.8 aA	18.7 bA	16.1 aA	20.2	16.7
L <sub>3</sub>	12.1 aA	21.1 aA	11.7 abA	19.3 aA	10.7 abA	18.1 aA	8.3 bA	18.3 aA	11.4	20.6
L <sub>4</sub>	17.7 aA	17.7 aA	16.1 aA	12.1 bA	15.3 aA	12.8 bA	13.8 aA	12.8 bA	16.6	14.8
L <sub>5</sub>	19.8 aA	23.2 aA	20.3 aA	23.1 aA	16.5 aAB	21.2 aA	12.7 bB	21.3 aA	18.4	23.6
平均 Mean	16.0 bAB	16.3 aA	16.7 aA	15.2 bB	14.8 bcB	14.3 bB	14.5 cB	14.3 bB	16.6	15.9

注 (Note): 同行数值后不同大、小写字母分别表示同一材料的相同参数在不同浓度下差异极显著 ( $P < 0.01$ ) 和显著 ( $P < 0.05$ ) Values followed by different capital or small letters in a row mean significant difference at 0.01 and 0.05 levels among different Cd concentrations, respectively.

表3还看出,随着土壤中Cd浓度的提高,小穗数逐渐减少。Cd浓度为5 mg/kg时降幅很大,与对照相比降低极显著。Cd浓度从5 mg/kg增加至10和20 mg/kg,小穗数逐渐减少,但变化不显著。相关分析表明,小麦小穗数与Cd浓度的相关系数 $r = -0.2638$ ; 通径分析,Cd浓度对小麦小穗数的决定系数为0.0575。

基因型极显著地影响小麦小穗数。4个浓度Cd胁迫下,小麦小穗数平均值变化范围为23.6~5.5个,低积累材料中L<sub>3</sub>和L<sub>5</sub>小麦小穗数较多。根据11份小麦材料对不同Cd浓度的响应可看出,绝大多数材料小穗数对Cd浓度的变化不敏感,其占63.64%;随着Cd浓度增加,小穗数显著减少或呈先显著增加后显著减少的各占18.18%。

#### 2.4 Cd胁迫对不同基因型小麦穗粒数和千粒重的影响

小麦穗粒数对Cd浓度反应敏感。随着土壤中Cd浓度的提高,小麦穗粒数逐渐减少,Cd浓度为5 mg/kg时穗粒数降幅显著。在Cd浓度低于10 mg/kg时随着浓度的提高小麦的穗粒数减少,空粒现象严重;在Cd浓度超过10 mg/kg后对穗粒数影

响不明显(表4)。相关分析表明,小麦穗粒数与Cd浓度呈负相关, $r = -0.3302$ ; 通径分析结果,Cd浓度对穗粒数的决定系数为0.0901。

基因型对小麦穗粒数的影响也极显著,11份小麦材料穗粒数在4个浓度下平均变化范围为30.4~7.9粒,最多的是子粒低Cd积累材料L<sub>1</sub>和L<sub>5</sub>,最少的是H<sub>2</sub>;材料L<sub>1</sub>和L<sub>5</sub>子粒低Cd积累、穗粒数较多,可作为农艺性状较优的材料加以利用。

同一基因型小麦在不同浓度Cd胁迫下穗粒数变化差异很大。Cd浓度对穗粒数影响不明显的有H<sub>2</sub>、H<sub>3</sub>、H<sub>4</sub>、H<sub>6</sub>、L<sub>2</sub>和L<sub>3</sub>,占54.55%;随着Cd浓度的提高穗粒数明显减少的有H<sub>1</sub>、H<sub>5</sub>、L<sub>1</sub>、L<sub>4</sub>和L<sub>5</sub>,占45.45%。

表4还看出,不同Cd浓度下小麦千粒重差异显著。Cd浓度为10 mg/kg,是小麦千粒重显著变化的临界值。土壤Cd浓度小于5 mg/kg时,千粒重变化不显著;Cd浓度增加至10 mg/kg时,千粒重变化极显著;Cd浓度继续提高至20 mg/kg,千粒重变化不显著。相关分析表明,小麦千粒重与Cd浓度的相关系数 $r = -0.4011$ ; 通径分析,Cd浓度对千粒重的决定系数为0.1329。

表4 不同基因型小麦在不同浓度镉胁迫下的穗粒数和千粒重

Table 4 Effects of cadmium on kernels per spike and 1000-grain weight (TGW) under different wheat genotypes

材料编号 No. of material	镉浓度 Cd concentration (mg/kg)								平均值 Mean	
	0.28 (CK)		5		10		20		穗粒数 Kernels (No./spike)	千粒重 TGW (g)
	穗粒数 Kernels (No./spike)	千粒重 TGW (g)	穗粒数 Kernels (No./spike)	千粒重 TGW (g)	穗粒数 Kernels (No./spike)	千粒重 TGW (g)	穗粒数 Kernels (No./spike)	千粒重 TGW (g)		
H <sub>1</sub>	34.7 aA	24.59 aA	24.2 bA	24.25 aA	24.0 bA	23.06 aA	26.0 bA	21.91 aA	29.0	24.94
H <sub>2</sub>	9.7 aA	20.79 aA	12.1 aA	22.98 aA	4.3 aA	20.48 aA	5.5 aA	19.53 aA	7.9	20.87
H <sub>3</sub>	30.8 aA	29.35 aA	28.1 aA	31.16 aA	25.9 aA	28.52 aA	28.4 aA	26.15 aA	28.7	29.22
H <sub>4</sub>	9.3 aA	27.66 aA	10.6 aA	21.94 bAB	9.1 aA	21.68 bA	7.1 aA	15.34 cB	9.6	23.14
H <sub>5</sub>	25.5 abA	37.49 bB	25.7 aA	42.59 aA	22.7 abA	35.39 bB	16.7 bA	35.46 bB	24.0	40.30
H <sub>6</sub>	12.3 aA	31.86 aA	9.7 aA	30.89 aA	7.7 aA	27.32 abAB	8.8 aA	23.83 bB	10.2	30.26
L <sub>1</sub>	47.4 aA	36.52 aA	30.2 bB	32.42 abA	27.2 bBC	31.35 bA	17.2 cC	32.86 abA	30.4	33.18
L <sub>2</sub>	15.8 aA	44.93 aA	15.4 aA	39.47 bAB	13.7 aA	41.39 bAB	14.3 aA	35.67 cB	15.0	40.76
L <sub>3</sub>	20.2 aA	33.29 aA	15.8 aA	32.67 aA	15.8 aA	30.59 aA	16.6 aA	21.67 bB	18.3	31.68
L <sub>4</sub>	22.1 aA	38.92 aA	17.1 abA	30.37 bB	14.2 abA	28.33 bB	12.1 bA	29.75 bB	17.4	33.94
L <sub>5</sub>	31.5 aA	36.96 aA	30.4 abA	36.87 aAB	29.3 abA	30.60 bBC	22.1 bA	28.39 bC	30.4	35.31
平均 Mean	23.1 aA	31.24 aA	19.9 bB	31.07 aA	17.4 bcBC	27.49 bB	16.1 cC	26.99 bB	20.1	31.23

注(Note): 同行数值后不同大、小写字母分别表示同一材料的相同参数在不同浓度下差异极显著( $P < 0.01$ )和显著( $P < 0.05$ ) Values followed by different capital or small letters in a row mean significant difference at 0.01 and 0.05 levels among different Cd concentrations, respectively.

11 份小麦材料中千粒重最大的是低 Cd 积累材料 L<sub>2</sub>,最小的是 H<sub>2</sub>;另外,子粒低 Cd 积累材料中 L<sub>1</sub>、L<sub>4</sub> 和 L<sub>5</sub> 的千粒重也较大;整体上看,低积累材料千粒重高于高积累材料。由此推测,选出子粒低 Cd 积累、高千粒重的小麦材料是可行的。

同一基因型小麦在不同浓度 Cd 胁迫下千粒重反应各不相同。11 份材料中随着 Cd 浓度的增加千粒重下降的有 H<sub>4</sub>、H<sub>6</sub>、L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>、L<sub>3</sub>、L<sub>4</sub> 和 L<sub>5</sub>; Cd 浓度对小麦千粒重影响不明显的有 H<sub>1</sub>、H<sub>2</sub> 和 H<sub>3</sub> 3 份; Cd 浓度为 5 mg/kg 时千粒重先明显增加然后明显下降的仅有 H<sub>5</sub>。可见,大多数小麦的千粒重是随着土壤 Cd 浓度的增加而减少,即随着土壤中 Cd 浓度的提高小麦的瘪粒越来越严重。

## 2.5 子粒 Cd 高、低积累与产量及构成因子的关系

为进一步研究子粒 Cd 高、低积累与产量之间的关系,将子粒 Cd 高积累材料(H<sub>1</sub> ~ H<sub>6</sub>)和子粒 Cd 低积累材料(L<sub>1</sub> ~ L<sub>5</sub>)产量指标进一步分类,结果(图 1)表明,高积累材料的平均产量、平均小穗数和穗粒数显著低于低积累材料,千粒重差异不显著,而有效分蘖高积累材料稍微偏高。说明一般情况下,高积累材料在前期生长较旺盛,有效分蘖数较高,而旺盛的生长会吸收大量的营养成分,在吸收必需营养成分的同时也会吸收有害元素,如 Cd。有害元素超过作物的忍受限度后会严重影响作物的生长、养分吸收和代谢等,进而影响生殖生长,导致小穗数和穗粒数下降。

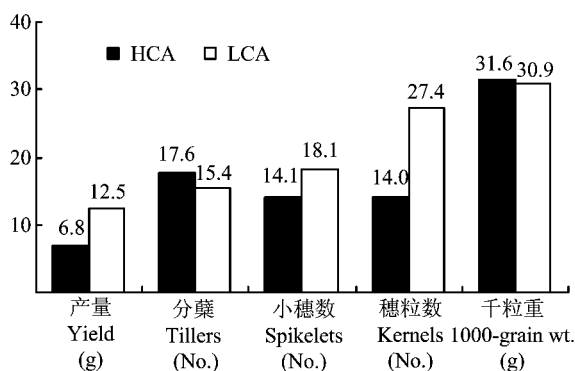


图 1 不同镉积累类型小麦产量指标比较

Fig. 1 Comparison of yield indices between low-Cd and high-Cd accumulating wheat

[注(Notes): HCA—高镉积累 High-Cd accumulating;  
LCA—低镉积累 Low-Cd accumulating]

## 3 讨论

试验表明,随着 Cd 浓度的增加小麦产量降低;

小穗数、穗粒数和千粒重也都随 Cd 浓度的提高逐渐降低。与对照相比,在 Cd 浓度为 5 mg/kg 时小麦小穗数和穗粒数显著降低; Cd 浓度为 10 mg/kg 时,千粒重显著降低,但超过敏感浓度后变化不明显。有效分蘖在 Cd 浓度为 5 mg/kg 时显著增加,而后随着浓度的提高,极显著减少,显著降低的浓度也为 10 mg/kg。纪淑娟等<sup>[9]</sup>和张国平等<sup>[10]</sup>研究认为不同 Cd 浓度对小麦生长影响的差异显著;而 Jalil 等<sup>[13]</sup>则认为 Cd 浓度的影响差异不显著,本试验这两种情况都出现,不同结果可能与试验材料的选择不同有关。由此看出,土壤中 Cd 浓度超过 10 mg/kg 时,绝大部分小麦品种的生长已经严重受到影响,产量及其构成因子都极显著降低。因此,对于污染严重的土壤(土壤 Cd 浓度超过 10 mg/kg),应推广低 Cd 积累小麦品种,或者改种其他收获部位低积累作物或做其他规划。

本试验看出,导致产量降低的直接原因是随着 Cd 浓度的增加小麦的瘪粒和空粒现象加重。推测 Cd 会影响小麦的受精过程,导致性器官发育不全,形成空粒;同时也可能是其影响性器官发育不协调,导致授粉不能顺利完成而形成空粒。Cd 也可能影响小麦穗部营养的供应,导致子房或胚乳营养不良而中途停止发育,造成瘪粒。作物 Cd 的积累和转运过程是通过皮层组织进入根部,再通过一质外体或共质体到达木质部<sup>[18-19]</sup>。Cd 与酶活性中心或蛋白质中巯基结合,取代金属硫蛋白中的必需元素,导致必需元素缺乏,干扰正常代谢<sup>[20]</sup>; Cd 破坏水分平衡,降低光合速率等<sup>[21]</sup>。正常的细胞代谢、养分的充足供应、光合作用的顺利进行等对作物的产量影响都很大。本试验中高积累材料前期生长旺盛,环境中大量的 Cd 与酶活性中心或蛋白质中巯基结合,取代金属硫蛋白中的必需元素,导致有益元素缺乏,影响后期的生殖生长,导致小穗少、穗粒少、产量低。

利用小麦基因型间的差异筛选出子粒低 Cd 积累、产量较高和农艺性状较好的材料作为进一步育种资源,或者直接在污染严重的地区推广,既经济又有效。本试验中 L<sub>1</sub> 和 L<sub>5</sub> 试材在 Cd 胁迫下产量较高、小穗数、穗粒数和千粒重都较好,可作为选育高产、子粒低 Cd 积累的种质资源。

## 参考文献:

- [1] 周泽义. 中国蔬菜重金属污染及控制[J]. 资源生态环境网络研究动态, 1999, 10(3): 21-27.

- Zhou Z Y. Control of heavy metal pollution in vegetables [J]. *Devel. Res. Netw. Nat. Resource. Environ. Ecol.*, 1999, 10 (3): 21–27.
- [2] 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉, 郑春江. 中国土壤环境背景值研究 [J]. *环境科学*, 1991, 12(4): 12–19.
- Wei F S, Chen J S, Wu Y Y, Zheng C J. Study on the background contents on elements of soils in China [J]. *Environ. Sci.*, 1991, 12(4): 12–19.
- [3] 许嘉林, 杨居荣. 陆地生态系统中的重金属 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995. 24–36.
- Xu Z L, Yang J R. Heavy metal in terrestrial ecosystems [M]. Beijing: China Environment Science Press, 1995. 24–36.
- [4] 郭笃发. 环境中铅和镉的来源及其对人和动物的危害 [J]. *环境科学进展*, 1994, 2(3): 71–76.
- Guo D F. Environmental sources of Pb and Cd and their toxicity to man and animals [J]. *J. Environ. Eng.*, 1994, 2(3): 71–76.
- [5] Costa G, Morel J L. Efficiency of  $H^+$ -atpase activity on cadmium uptake by four cultivars of lettuce [J]. *J. Plant Nutr.*, 1994, 17 (4): 627–637.
- [6] Gussarsson M. Cadmium-induced alternations in nutrient composition and growth of *Betula pendula* seedlings; The significance of fine roots as a primary target for cadmium toxicity [J]. *J. Plant Nutr.*, 1994, 17: 2151–2163.
- [7] Pettersson O. Differences in cadmium uptake between plant species and cultivars [J]. *Swedish J. Agric. Res.*, 1997, 7: 21–24.
- [8] Mensah E, Allen H E, Shoji R *et al.* Cadmium (Cd) and lead (Pb) concentrations effects on yields of some vegetables due to uptake from irrigation water in Ghana [J]. *Int. J. Agric. Res.*, 2008, 3(4): 243–251.
- [9] 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, 3(1): 51–53.
- Ji S J, Wang J W, Huang L P *et al.* Study on influence of cadmium on growth of *Triticum Aestivum* and forecast of contamination to wheat [J]. *Grain Proc.*, 2008, 33(1): 51–53.
- [10] 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 G P, Motohiro F, Hitoshi S. Difference between two wheat cultivars in Cd and mineral nutrient uptake under different Cd levels [J]. *J. Appl. Ecol.*, 2002, 13(4): 454–458.
- [11] 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*, 2003, 30(1): 62–66.
- Cai B S, Cao L K. Effect of cadmium on growth and the tolerance among wheat genotype [J]. *J. Northwest Sci-Tech Univ. Agric. For. (Nat. Sci. Ed.)* 2003, 30(1): 62–66.
- [12] Zhang G P, Fukami M, Sekimoto H. Genotypic difference in effects of cadmium on growth and nutrient compositions in wheat [J]. *J Plant Nutr.*, 2000, 23(9): 1337–1350.
- [13] Jalil A, Selles F, Clarke J M. Effect of cadmium on growth and the uptake of cadmium and other elements by durum wheat [J]. *J. Plant Nutr.*, 1994, 17: 1839–1858.
- [14] Athar R, Ahmad M. Heavy metal toxicity: Effect on plant growth and metal uptake by wheat, and on free living azotobacter [J]. *Water, Air Soil Poll.*, 2002, 138(7): 165–180.
- [15] 杨玉敏, 张庆玉, 张冀, 等. 小麦基因型间子粒镉积累及低积累资源筛选 [J]. *中国农学通报*, 2010, 26(15): 1–8.
- Yang Y M, Zhang Q Y, Zhang J *et al.* Genotypic differences of cadmium accumulation in *Triticum aestivum* and screening of low-accumulation material [J]. *Chin. Agric. Sci. Bull.*, 2010, 26 (15): 1–8.
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- Lu R S. Soil analysis way in agricultural chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Sciencetech Press, 2000.
- [17] 中国环境检测总站. 土壤元素的近代分析方法 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992. 82–84.
- China NEMC. Modern analysis of soil elements [M]. Beijing: China Environment Science Press, 1992. 82–84.
- [18] 荆红梅, 郑海雷, 赵中秋, 张春光. 植物对镉胁迫响应的研究进展 [J]. *生态学报*, 2001, 21(12): 2125–2130.
- Jin H M, Zhang H L, Zhao Z Q, Zhang C G. Progresses of plants response to cadmium [J]. *Acta Ecol. Sin.*, 2001, 21 (12): 2125–2130.
- [19] Sait D E, Prince R C, Pickering I J, Raskin I. Mechanisms of cadmium mobility and accumulation in Indian mustard [J]. *Plant Physiol.*, 1995, 109: 1427–1433.
- [20] Assche F, Clijster H. Effects of metal on enzyme activity in plants [J]. *Plant Cell Environ.*, 1990, 13: 195–206.
- [21] Siedleka A, Baszynsky T. Inhibition of electron flow around photosystem I in chloroplasts of cadmium-treated maize plants in due to cadmium-induced iron deficiency [J]. *Physiol. Plant*, 1993, 87: 199–202.