

镉对小麦(*Triticum aestivum*)干物质积累、转移及籽粒产量的影响

朱志勇¹, 李友军¹, 郝玉芬², 蒋瑞婕¹, 刘晓红¹, 刘露露¹, 张晓雯¹

(1.河南科技大学农学院, 河南 洛阳 471003; 2.山西农业大学文理学院, 山西 太谷 030801)

摘要:采用大田试验以不同镉耐性的洛麦 23(镉耐性弱)和中育 10 号(镉耐性强)为试验材料,研究了镉(0、10、50、100 mg·kg⁻¹)对不同镉耐性小麦品种干物质积累、干物质转移、叶面积指数及产量的影响。结果表明,一定浓度范围的 Cd 胁迫可以增加小麦的叶面积指数,当超过这一浓度范围则呈现为抑制作用,这一临界值因小麦品种不同而异。结果同时表明,一定浓度范围的 Cd 处理对小麦各器官的干物质积累及同化物转移同样具有促进作用,这一临界值不仅因小麦品种不同而异,也因器官不同而异。镉胁迫导致小麦籽粒产量下降,3 个 Cd 处理下洛麦 23 籽粒产量较对照依次下降了 8.3%、34.3%、51.6%,中育 10 号产量下降程度较小,依次下降了 3.7%、9.5%、29.3%。整体而言,镉胁迫影响了小麦的正常生长发育,导致小麦减产。同时,这种影响也存在品种差异性,镉耐性较大的中育 10 号叶面积指数受抑制程度较小,干物质积累量较大,各器官同化物转移途径受 Cd 损伤较轻,最终在籽粒产量上表现优于镉耐性较弱的洛麦 23。

关键词:小麦;Cd;镉耐性;干物质积累;叶面积指数;产量

中图分类号:X503.231 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)02-0252-07

Effects of Cd on Accumulations and Translocation of Biomasses and Yield of Different Wheat (*Triticum aestivum*) Cultivars

ZHU Zhi-yong¹, LI You-jun¹, HAO Yu-fen², JIANG Rui-jie¹, LIU Xiao-hong¹, LIU Lu-lu¹, ZHANG Xiao-wen¹

(1. College of Agronomy, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China; 2. Arts and Sciences Academy, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

Abstract: The effects of Cd on dry matter accumulation and transportation, leaf area indexes(LAI) and yields of wheat were studied under field condition by using two wheat varieties differing in Cd-tolerance, Zhongyu 10 and Luomai 23. Cd was added into soil at four levels, i.e. 0 (CK), 10, 50 and 100 mg·kg⁻¹, respectively. The results showed that Cd stress increased wheat LAI under specific concentration, and then decreased wheat LAI exceeded the concentration, which was different for given wheat varieties. And Cd stress also had a same effect on dry matter accumulation and transportation of wheat, which critical Cd concentration was different for given wheat varieties and organ. Cd stress affected the wheat growth, development, and yield negatively. Compared with CK, the yield decreased 8.3%, 34.3%, and 51.6% for Luomai 23, 3.7%, 9.5%, and 29.3% for Zhongyu 10 under 10, 50, and 100 mg·kg⁻¹ Cd, respectively. Under Cd stress, the LAI, dry matter accumulation and transportation were higher of high Cd-tolerance wheat variety, Zhongyu 10, than low Cd-tolerance wheat variety, Luomai 23.

Keywords: wheat; Cd; Cd tolerance; biomass accumulation; Leaf area indexes; yield

Cd 是一类毒性高、生物迁移性强、土壤滞留时间长、不易被微生物分解、易被植物富集的重金属。Cd 是动、植物生长发育的非必需元素,镉污染对植物的

生长发育造成一系列的伤害,如抑制植物生长^[1-2]、阻碍养分吸收、降低植物光合速率和呼吸作用^[3-4]、使碳水化合物代谢失调^[5]及造成其他代谢紊乱,最终造成生长量和产量降低^[6-7]。

小麦是世界上最重要的粮食作物,有 1/3 以上人口以小麦为主要食粮。在中国,小麦的地位仅次于水稻。我国 Cd 污染的农田面积达 2.0×10⁵ hm²,每年生产含 Cd 量超标农产品 1.46×10⁹ kg^[8]。河南省属于黄

收稿日期:2011-07-05

基金项目:科技部《国家粮食丰产科技工程》项目支持(2004BA520A-06)

作者简介:朱志勇(1983—),男,福建泉州人,硕士,主要从事小麦栽培生理研究。E-mail:lanzhu3@yahoo.com.cn

* 通讯作者:李友军 E-mail:kdlyj@sina.com

淮冬小麦区,全区小麦面积及总产量分别占全国麦田面积和总产量的45%及48%左右,约为全区粮食作物种植面积44%,是中国小麦主要产区。

目前,虽然有了Cd对小麦苗期生长、生理生化、Cd吸收特性的研究,但是关于灌浆期间Cd对小麦花后干物质积累、干物质转移、产量影响及籽粒产量与小麦镉耐性关系的研究罕见报道。本试验试图通过探讨灌浆期间镉胁迫对不同镉耐性小麦品种干物质积累、干物质转移、叶面积指数、籽粒产量及产量性状的影响,为小麦安全、优质、高效生产提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试作物为小麦(*Triticum aestivum*),品种为苗期镉耐性强的中育10号,苗期镉耐性差的洛麦23。

1.2 试验设置

试验于2009年10月21日在河南科技大学开元校区试验田进行,随机区组排列,小区为3 m×3 m,重复3次,基本苗 2.4×10^6 stem·hm⁻²。氮肥240 kg·hm⁻²,50%作底肥,50%在拔节期随水追入,P₂O₅ 138 kg·hm⁻²、K₂O 165 kg·hm⁻²,作底肥一次性施入。Cd处理设置对照、低Cd、中Cd、高Cd 4个水平,处理浓度分别为0、10、50、100 mg·kg⁻¹,试剂为分析纯CdCl₂·2.5H₂O,施于地表,翻土,使CdCl₂·2.5H₂O均匀分布于0~40 cm的耕作层之中。取试验田0~40 cm的土层测定土壤理化性质,土壤Cd本底值为0.18 mg·kg⁻¹,碱解氮含量68.3 mg·kg⁻¹,速效磷9.02 mg·kg⁻¹,速效钾230 mg·kg⁻¹,有机质2.13%,阳离子交换量19.9 mol·kg⁻¹,pH为7.13。

1.3 测定方法

1.3.1 开花期和成熟期生物量测定

开花期和成熟期选取具有代表性的植株10株,3个重复。去除根部,分为茎鞘、叶片和穗部3部分,105℃杀青,75℃烘干,称重。

1.3.2 籽粒粒重与灌浆速率测定

开花期选同一日开花的单茎进行标记,每隔5 d取样1次,3次重复,每重复取10穗,剥取籽粒,105℃杀青,75℃烘干至恒重,称重并计算单个籽粒重与籽粒灌浆速率。

1.3.3 土壤理化性质的测定

土壤的碱解氮含量采用碱解扩散法测定;速效磷含量采用0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃法测定;速效钾含量采用1 mol·L⁻¹ NH₄OAc浸提-火焰光度法测定;有机质含量采用重铬酸钾容量法-外加热法;阳离子交换量

采用1 mol·L⁻¹ 乙酸铵交换法测定,pH采用电位法测定;土壤中Cd含量采用王水-高氯酸消煮-原子吸收光谱法测定^[9]。

1.4 统计分析

干物质转移量=开花期器官干重-成熟期器官干重

干物质转移率=(开花期器官干重-成熟期器官干重)×100/开花期器官干重

对籽粒贡献率=(叶片干物质转运量+茎鞘干物质转运量+穗轴+颖壳转运量)/籽粒干重

器官干物质分配比=器官干重×100/地上部所有器官总干重

灌浆速率=(n+5 d后千粒重-n d千粒重)/5

数据统计分析采用DPS7.05和Excel软件。

2 结果与分析

2.1 镉对不同品种小麦干物质积累的影响

由表1可知,随着土壤Cd浓度升高,开花期和成熟期各器官干物质积累量变化趋势因品种、器官和Cd浓度而异。

开花期,洛麦23叶片干重在低、中、高Cd处理下较对照分别下降了5.3%、23.2%、38.8%;低镉处理下,其茎鞘和穗干重较各自对照增加了6.6%和11.7%,中、高Cd处理下则分别较各自对照下降了16.9%、28.1%和6.5%、22.4%。中育10号叶片干重随着Cd浓度升高较对照依次下降了0.1%、12.6%、15.4%;低Cd处理下,其茎鞘干重较对照增加了1.5%,中、高Cd处理下则下降了5.6%、19.7%;低、中Cd处理下,穗部干重较对照分别增加了0.4%、1.0%,高Cd处理下,下降了3.2%。

成熟期,洛麦23叶片干重在低、中Cd处理下分别较干重增加0.02%、3.7%,高Cd处理下降了16.1%;其茎鞘干重在低Cd处理下较对照增加了8.9%,在中、高Cd处理下分别下降了15.0%、24.3%;其穗部干重随着Cd处理浓度升高较对照依次下降了2.2%、26.3%、42.3%。中育10号叶片干重在低Cd处理下增加了7.1%,中、高Cd处理下却下降了4.7%、7.3%;其茎鞘和穗部的干重随着Cd浓度的升高较各自对照依次下降了2.8%、2.6%、16.1%和4.1%、8.3%、23.7%。

2.2 镉对小麦器官干物质积累量分配比的影响

由表2可知,随着土壤Cd浓度升高,各器官干重分配比的变化趋势因品种、器官及Cd浓度而异。

开花期,洛麦23叶片干重分配比随着Cd处理浓度升高较对照依次下降了10.0%、9.5%、13.5%;茎鞘和

穗部的干重分配比则较各自的对照依次增加了1.2%、2.2%、1.2%和6.3%、11.2%、9.4%。中育10号叶片干重分配比在低、中Cd处理较对照下降了1.1%、7.6%,高Cd处理却稍微增加了0.5%;低、中Cd处理下其茎鞘干重分配比较对照分别增加0.7%、0.2%,高Cd处理下降4.6%;穗部干重分配比在低Cd处理下较对照下降了1.6%,中、高Cd处理下则增加了7.1%、15.3%。

成熟期,洛麦23叶片和茎鞘干重分配比分别较各自对照增加了15.2%、29.3%、26.3%和4.9%、5.5%、14.0%;穗部干重分配比较对照分别下降了5.7%、8.6%、13.3%。中育10号叶片干重分配比分别较对照增加了10.5%、12.8%、15.1%;低Cd处理下其茎鞘干重分配比较对照没有变化,在中、高Cd处理下则增加了3.4%、4.1%;穗部干重分配比较对照分别下降了1.5%、2.7%、5.3%。

正常情况下,开花期到成熟期叶、茎鞘干重分配比呈下降趋势,而穗部干重分配比呈升高趋势。成熟期洛麦23叶和茎鞘干重分配比在CK、低、中、高Cd处理下较开花期依次下降了50.5%、36.7%、29.3%、27.2%和40.3%、38.1%、38.4%、32.8%;穗干重分配比较开花期增加了149.8%、121.5%、105.2%、97.9%。成熟期中育10号叶和茎鞘干重分配比在CK、低、中、高Cd处理下较开花期下降了53.3%、47.8%、42.9%、

46.4%和39.0%、39.4%、37.1%、33.4%;穗干重分配比较开花期增加了187.9%、188.3%、161.7%、136.5%。

2.3 镉对小麦干物质转移量的影响

表3显示,正常情况下,不同器官花前同化物转移量大小依次为茎鞘>叶>穗轴+颖壳。洛麦23叶片和茎鞘以及穗轴+颖壳同化物转移量在低、中、高Cd处理下较各自对照分别下降了53.5%、75.9%、82.9%和2.8%、24.2%、42.9%以及101%、25.2%、62.5%。中育10号叶片同化物转移量随着土壤Cd浓度升高依次较对照下降了13.2%、27.1%、30.1%;茎鞘同化物转移量在低Cd处理下较对照增加了24.7%,中、高Cd处理下分别下降了21.1%、39.0%;随着Cd处理浓度升高,穗轴+颖壳同化物转移量依次增加了37.6%、39.1%、4.0%。

正常情况下,各器官花前同化物转移率大小依次为叶>茎鞘>穗轴+颖壳。两个品种小麦同化物转移率随着土壤Cd浓度增加的变化趋势与同化物转移量的变化趋势基本一致。洛麦23叶片和茎鞘以及穗轴+颖壳同化物转移率在低、中、高Cd处理下较各自对照分别下降了50.7%、68.4%、71.9%和8.8%、8.8%、20.6%及19.7%、20.4%、51.7%。随着土壤Cd浓度升高,中育10号叶片同化物转移率依次下降了13.3%、16.7%、17.6%;低Cd处理下茎鞘同化物转移率相对

表1 Cd对小麦花期和成熟期各器官干物质积累的影响(kg·hm⁻²)
Table 1 Effects of cadmium on dry weights on anthesis and mature(kg·hm⁻²)

品种	器官	开花期				成熟期			
		0 ¹⁾	10	50	100	0	10	50	100
洛麦23	叶	1 561.6±80.3a	1 478.6±93.7b	1 199.0±105.0c	9 56.3±77.6d	1 032.2±62.8a	1 032.4±99.5a	1 071.3±109.6b	865.9±72.9c
	茎鞘	4 489.2±302.5b	4 783.6±294.1a	3 729.9±231.0c	3 227.6±263.1d	3 573.4±13.5b	3 893.9±365.5a	3 036.2±245.5c	2 704.7±222.6d
	穗	1 740.7±125.6b	1 943.5±73.8a	1 627.2±21.5c	1 351.1±133.4d	5 785.9±16.8a	5 658.1±378.1a	4 263.3±21.1b	3 337.5±76.1c
中育10	叶	1 868.0±33.4a	1 866.2±89.4a	1 632.1±25.8b	1 580.9±14.1c	1 209.5±118.0b	1 295.2±9.66a	1 152.3±3.8c	1 120.8±64.1c
	茎鞘	6 432.9±421.9b	6 531.8±500.6a	6 075.5±146.7c	5 165.8±84.6d	5 416.5±65.9a	5 264.7±53.7b	5 273.5±459.2b	4 545.9±89.4d
	穗	1 858.5±50.2b	1 865.4±66.8ab	1 876.2±32.1a	1 799.2±100.5c	7 389.3±621.7a	7 084.7±521.4b	6 776.1±653.9c	5 639.7±384.0d

注:同一行数据后不同字母(a,b,c,d)表示差异达5%显著水平(处理间)。¹⁾表示Cd处理浓度,mg·kg⁻¹。下同。

Note: The data within a column followed by the different letter are significantly different at $P=0.05$ (a, b, c, d) level, respectively. ¹⁾ indicated Cd concentrations, mg·kg⁻¹. The same below.

表2 Cd对小麦花期和蜡黄期各器官干物质的分配比(%)
Table 2 Effects of cadmium on ratios of dry weights on anthesis and mature(%)

品种	器官	开花期				成熟期			
		0	10	50	100	0	10	50	100
洛麦23	叶	20.0±1.52a	18.0±0.32b	18.1±1.97b	17.3±1.58c	9.9±0.66d	11.4±0.06c	12.8±1.20b	16.5±0.08a
	茎鞘	57.6±3.45b	58.3±1.89a	58.9±1.74a	58.3±1.47a	34.4±0.13c	36.1±3.33b	36.3±3.65b	39.2±3.69a
	穗	22.3±1.24c	23.7±2.45b	24.8±2.34a	24.4±2.00a	55.7±5.31a	52.5±4.81ab	50.9±1.84b	48.3±4.44c
中育10	叶	18.4±1.33a	18.2±1.42a	17.0±1.53b	18.5±0.37a	8.6±0.03b	9.5±0.87a	9.7±0.01a	9.9±0.09a
	茎鞘	63.3±3.58a	63.8±5.89a	63.4±3.27a	60.4±5.11b	38.6±3.48b	38.6±2.11b	39.9±3.47a	40.2±3.22a
	穗	18.3±1.92c	18.0±0.62c	19.6±1.11b	21.1±0.49a	52.7±3.98a	51.9±4.91ab	51.3±2.22ab	49.9±3.59b

表 3 Cd 对小麦各器官干物质转移的影响
Table 3 Effects of cadmium on dry weights translocation of each organ

品种	处理浓度/ mg·kg ⁻¹	叶		茎鞘		穗轴+颖壳		贡献率/%
		转移量/kg·hm ⁻²	转移率/%	转移量/kg·hm ⁻²	转移率/%	转移量/kg·hm ⁻²	转移率/%	
洛麦 23	0	529.4±33.4a	33.9±2.64a	915.8±23.8a	20.4±1.59a	255.5±15.4a	14.7±1.54a	39.5±1.99a
	10	246.2±10.3b	16.7±0.33b	889.8±52.3b	18.6±0.34b	229.6±20.1b	11.8±0.03b	34.6±1.54b
	50	127.7±5.64c	10.7±1.23c	693.8±41.6c	18.6±0.21b	191.0±20.0c	11.7±0.23b	34.8±0.39b
	100	90.4±4.28d	9.5±0.84c	522.9±38.1d	16.2±1.23c	95.8±1.33d	7.1±0.68c	34.1±0.87c
中育 10	0	658.5±41.3a	35.3±2.50a	1016.4±37.0b	15.8±1.62b	212.8±18.5c	11.4±0.31b	32.9±1.59b
	10	571.1±3.80b	30.6±2.34b	1267.2±21.8a	19.4±1.63a	292.9±14.0a	15.9±0.93a	38.5±3.66a
	50	479.8±5.73c	29.4±0.84b	802.0±65.2c	13.2±1.11c	296.1±13.2a	15.8±1.19a	30.4±2.54c
	100	460.0±31.2d	29.1±3.02b	619.9±38.8d	12.0±0.20c	221.4±5.99b	12.3±1.03b	30.0±0.09c

照增加了 22.8%,中、高 Cd 处理下则下降了 16.5%、24.1%;穗轴+颖壳同化物转移率随着 Cd 浓度升高较对照依次升高了 39.5%、38.6%、7.9%。

表 3 同时显示,镉胁迫整体上抑制了小麦叶片、茎鞘、穗轴+颖壳花前储藏的同化物对籽粒灌浆的贡献率,抑制程度因品种 Cd 浓度和品种而异。随着 Cd 处理浓度升高,洛麦 23 叶片、茎鞘、穗轴+颖壳花前储藏的同化物贡献率依次较对照下降了 12.4%、11.9%、13.7%;中育 10 号叶片、茎鞘、穗轴+颖壳花前储藏的同化物贡献率在低 Cd 处理下较对照增加了 17.0%,中、高 Cd 处理下则下降了 7.6%、8.8%。

2.4 镉对小麦叶面积指数的影响

由表 4 可知,镉胁迫对小麦叶面积指数的影响因品种和 Cd 浓度而异。开花期,洛麦 23 叶面积指数随着 Cd 浓度升高较其对照依次下降了 13.0%、17.6%、

38.3%;中育 10 号叶面积指数在低、中 Cd 处理下较对照分别升高了 7.4%、6.3%,高 Cd 处理则下降了 23.2%。

2.5 镉对小麦籽粒灌浆速率、产量的影响

由表 5 可知,整个灌浆期间两个品种小麦在各个处理下籽粒灌浆速率都呈现先升高后下降的变化趋势,洛麦 23 灌浆速率最高点因 Cd 处理浓度而异,但是都出现在花后 10~20 d,中育 10 号各个处理下籽粒灌浆速率最高点都出现在花后 10~15 d。计算两个品种小麦灌浆期间的平均灌浆速率显示,低 Cd 处理下洛麦 23 平均灌浆速率较对照上升了 4.3%,中、高 Cd 处理则分别下降了 11.3%、24.9%。中育 10 号平均灌浆速率随着 Cd 浓度升高较对照依次下降了 1.6%、13.1%、21.7%。

表 6 显示,Cd 胁迫下,两个品种小麦的籽粒产量都随着 Cd 处理浓度的升高而不断下降。其中,3 个 Cd 处理下,洛麦 23 籽粒产量较对照依次下降了 8.3%、34.3%、51.6%;中育 10 号依次下降了 3.7%、9.5%、29.3%。数据同时显示,随着土壤 Cd 浓度升高,洛麦 23 穗数和穗粒数依次较对照下降了 3.4%、12.9%、20.1%和 7.3%、22.3%、28.2%;低 Cd 处理下洛麦 23 千粒重较对照增加了 2.3%,中、高 Cd 处理下则下降

表 4 Cd 对小麦开花期叶面积指数的影响
Table 4 Effects of cadmium on leaf area indexes at anthesis

处理浓度/ mg·kg ⁻¹	0	10	50	100
洛麦 23	8.91±0.73a	7.75±0.68b	7.34±0.35c	5.50±0.14d
中育 10	9.07±0.52b	9.74±0.94a	9.64±0.23a	6.97± 0.36c

表 5 Cd 对小麦籽粒灌浆速率的影响(mg·d⁻¹)
Table 5 Effects of cadmium on grain filling velocitys of wheats(mg·d⁻¹)

品种	处理浓度/ mg·kg ⁻¹	花后天数/d					
		0~5	5~10	10~15	15~20	20~25	25~30
洛麦 23	0	1.37±0.06a	2.23±0.02a	2.24±0.13c	2.28±0.21a	2.03±0.01b	0.39±0.01a
	10	1.30±0.11b	2.18±0.02b	3.02±0.26a	2.0±0.10b	2.36±0.26a	0.13±0.01b
	50	1.2±0.05c	1.7±0.16c	2.6±0.01b	2.04±0.09b	1.7±0.15c	0.11±0.06c
	100	1.19±0.05c	1.27±0.08d	1.6±0.12d	2.02±0.09b	1.74±0.05c	0.09±0.04c
中育 10	0	1.13±0.05ab	2.35±0.15b	3.24±0.14a	2.72±0.20a	1.68±0.13a	0.32±0.03a
	10	1.17±0.12a	2.35±0.25b	3.26±0.18a	2.58±0.17b	1.56±0.11b	0.34±0.01a
	50	1.03±0.09b	2.43±0.01a	2.92±0.05b	2.14±0.11c	1.31±0.02c	0.11±0.01b
	100	0.84±0.01c	2.31±0.11b	2.65±0.07c	1.74±0.08d	1.32±0.03c	0.09±0.03c

了 3.0%、15.6%。中育 10 号穗数在低、中 Cd 处理下分别较对照增加了 0.5%、3.1%，高 Cd 下降了 9.4%；随着 Cd 浓度升高，其穗粒数和千粒重较对照下降了 4.4%、9.4%、12.3%和 0.2%、3.2%、10.8%。

2.6 镉胁迫下小麦生长量、生物量与籽粒产量的相关性

由表 7 可知,Cd 胁迫下叶片干重与茎鞘、穗部干重及叶片同化物转移率都呈极显著正相关;与灌浆速率、产量及产量性状也都呈极显著正相关。茎鞘干重与茎鞘同化物转移率、穗重极显著正相关,与灌浆速率显著正相关,与产量及产量性状都呈极显著正相关。叶片同化物转移率与产量、穗数、穗粒数呈极显著正相关,与灌浆速率、千粒重相关性不显著。茎鞘同化物转移率与产量、穗数呈显著正相关,与灌浆速率、穗粒数、千粒重呈显著正相关。穗轴+颖壳同化物转移率与产量、穗粒数、千粒重呈显著正相关,与灌浆速率相关性不显著。叶面积指数与穗数、千粒重、产量极显著正相关,与灌浆速率、穗粒数显著正相关,与穗重、叶重极显著正相关,与茎鞘中显著正相关。灌浆速率与

产量极显著正相关。

3 讨论

3.1 Cd 对小麦各器官干物质积累、转移及叶面积指数的影响

小麦灌浆期间籽粒在不断增重,随着叶片逐渐衰老,其光合能力逐渐下降,叶片、茎鞘和茎秆等营养器官中的贮存物质向穗部转移。所以,在这期间这些营养器官干物质转移量、干物质转移效率和转移干物质对籽粒的贡献率是衡量灌浆期的物质转移的重要指标。小麦籽粒灌浆物质的来源,按形成时间的先后可以分为两部分:一部分是花前贮存于营养器官中,花后转移到籽粒中的同化产物;另一部分是花后的同化产物,包括直接输送到籽粒中的光合产物和开花后形成的暂贮藏性物质向籽粒的再转移^[10-12]。黄冬芬^[13]等研究表明,Cd 抑制了水稻生育期干物质的积累量,导致有效穗数及穗颖花数减少,产量下降。

表 1 显示,镉胁迫下,洛麦 23 和中育 10 号的叶

表 6 Cd 对小麦籽粒产量及产量性状的影响

Table 6 Effects of cadmium on yields and their factors of wheats

品种	处理浓度/mg·kg ⁻¹	穗数/spike·m ⁻²	穗粒数/grain·spike ⁻¹	千粒重/g	产量/kg·hm ⁻²
洛麦 23	0	348±13.25a	35.5±0.79a	43.6±1.03b	4 300.7±25.66a
	10	336±21.32b	32.9±1.59b	44.6±0.22a	3 944.3±36.84b
	50	303±12.31c	27.6±2.13c	42.3±2.03c	2 827.1±129.27c
	100	278±5.32d	25.5±1.88d	36.8±1.51d	2 082.2±100.71d
中育 10	0	382±9.41b	40.6±1.25a	46.3±2.74a	5 743.6±66.41a
	10	384±18.51b	38.8±1.21b	46.2±3.87a	5 532.2±45.33ab
	50	394±11.67a	36.8±0.85bc	44.8±0.65b	5 196.0±203.95b
	100	346±25.46c	35.6±5.14c	41.3±5.21c	4 061.9±24.86c

表 7 Cd 对小麦生长量、生物量与籽粒产量相关性的影响

Table 7 Relations among growth masses, biomasses ang yields

项目	叶重	茎鞘重	穗重	叶转移率	茎鞘转移率	穗轴+颖壳转移率	叶面积指数	灌浆速率
茎鞘重	0.95**							
穗重	0.97**	0.95**						
叶转移率	0.85**	0.80*	0.85**					
茎鞘转移率	-0.05	0.84**	0.88**	-0.14				
穗轴+颖壳转移率	0.74*	0.65	0.74*	0.67*	0.94**			
叶面积指数	0.82**	0.79*	0.83**	0.59	0.73*	0.86**		
灌浆速率	0.80**	0.69*	0.84**	0.62	0.52	0.6	0.77*	
穗数	0.94**	0.96**	0.97**	0.86**	0.71*	0.80**	0.85**	0.73*
穗粒数	0.96**	0.94**	0.97**	0.94**	0.68*	0.68*	0.72*	0.77*
千粒重	0.89**	0.80**	0.92**	0.66	0.71*	0.75*	0.88**	0.94**
产量	0.97**	0.96**	0.99**	0.88**	0.70*	0.73*	0.84**	0.81**

注:* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平相关显著性(品种间)。
Note:* and ** indicated significant difference at $P=0.05$ and $P=0.01$ level, respectively.

片、茎鞘干物质积累量在成熟期较对照的下降幅度要小于开花期的下降幅度,但是,成熟期穗部干物质积累量的下降幅度却较开花期大。表2显示,镉胁迫下,开花期洛麦23和中育10号叶片干重分配比较对照是下降的,成熟期其分配比较对照却是上升的;镉胁迫下,两个品种小麦在开花期茎鞘分配比较对照有所增加,成熟期茎鞘干重分配比较对照的增长幅度明显大于开花期;镉胁迫下,开花期两个品种小麦穗部干重分配比较对照有所增加或轻微下降,成熟期其穗部干重分配比较对照持续下降,且下降幅度较开花期大。由此说明,灌浆期间Cd可能损伤了“叶-茎鞘-穗”这一同化物运输途径,导致同化物不能顺利从叶和茎鞘运往穗部贡献给籽粒,部分同化物滞留在叶片、茎鞘。因为同化物运输途径受阻,势必抑制叶、茎鞘的干物质转移量,导致转移率下降,进而影响叶、茎鞘干物质对籽粒灌浆的贡献率。表3的数据表明,镉胁迫下叶、茎鞘转移量受抑,转运率下降,对籽粒贡献率较对照降低。数据显示,洛麦23的叶、穗轴+颖壳同化物转移率及对籽粒贡献率在各个Cd处理下较对照的下降幅度明显大于中育10号。由此说明,中育10号干物质转移率及对籽粒贡献率受Cd抑制程度明显小于洛麦23。Cd胁迫下,作物体内的螯合肽中的Cys巯基能与Cd螯合,形成各种络合物,从而排除部分Cd毒,缓解Cd对作物生长的毒害^[14]。相同镉胁迫水平下,中育10号体内可能产生更多的螯合肽,所以其同化物运输途径受损伤也相应较洛麦23轻,最终表现为干物质转移率及对籽粒贡献率受Cd抑制程度较小。

叶面积指数是指作物叶面积与土地面积的比值,是衡量各生育期群体是否合理的一个重要指标。小麦群体在一定叶面积指数范围内,其产量与叶面积指数呈正相关^[15-17]。关丽等^[18]利用高光谱识别模型研究Cd胁迫对水稻生长的影响发现,低剂量Cd促进水稻生长,但是叶面积指数增长有限,土壤Cd浓度升高导致水稻叶片脱落,枝叶密度降低,叶面积指数减少。

本试验表明,高Cd处理下,两个品种小麦叶面积指数都较对照降低。低、中Cd处理下中育10号开花期、成熟期的叶面积指数、洛麦23成熟期的叶面积指数较对照都有所提高;洛麦23开花期的叶面积指数随着Cd处理浓度升高持续降低。计算镉胁迫下两个小麦品种在开花期、成熟期平均叶面积指数显示,洛麦23的平均叶面积指数依次下降3.3%、7.5%、40.7%;而中育10号的平均叶面积指数在低、中Cd

处理下增加了27.1%、17.1%,高Cd处理下降29.2%。显然,洛麦23受Cd的抑制程度要大于中育10号。

3.2 Cd对小麦籽粒灌浆速率、产量及产量性状的影响

Cd胁迫抑制了籽粒贮藏物质合成能力和胚乳细胞的分裂能力,导致籽粒库容量减少,接纳同化物的量也随之减少,最终表现为籽粒重下降^[19]。程旺大等^[20]研究认为,Cd胁迫下水稻的产量、穗数、穗粒数、结实率、粒重都显著降低,而且苗期耐镉性较强的品种受抑制程度要小于苗期耐镉性弱的品种。

本试验表明,低Cd处理下,灌浆期间洛麦23的籽粒平均灌浆速率较对照稍微上升,而中育10号下降;中Cd处理下,洛麦23籽粒平均灌浆速率下降幅度较中育10号小;高Cd处理下,中育10号籽粒平均灌浆速率下降幅度较洛麦23小。表7显示,镉胁迫下籽粒灌浆速率与千粒重极显著正相关,故而洛麦23在低Cd处理下籽粒千粒重下降幅度较中育10号小,但是高Cd处理却大于中育10号。数据同时显示,镉胁迫下洛麦23穗数、穗粒数受抑制程度都较中育10号大,虽然洛麦23籽粒千粒重受抑制较轻,但洛麦23产量下降幅度还是大于中育10号,说明镉胁迫下保持较高的穗数、穗粒数对稳定籽粒产量更重要。

3.3 不同耐镉性小麦品种产量差异的部分相关因素

研究认为,小麦的生长量和产量取决于叶面积和叶片的净光合速率,在生育后期,功能叶片的光合产物对籽粒的贡献可达80%^[21]。表7显示,镉胁迫下叶面积指数和穗数、穗粒数、千粒重等都呈极显著或显著正相关。由此表明,镉胁迫下要保持产量稳定前提条件就是保持较高的叶面积指数,在叶源端同化物合成量保证的同时,要使同化物尽可能多地往穗部运送进而为小麦籽粒灌浆提供更多供给;其次要保证叶片、茎鞘、穗轴+颖壳转移量及转运率。而镉耐性高的中育10号,正因为都保持着较高的叶面积指数,为较高的产量准备了充足的底物;而且,其叶片同化物转移率较高,同化物可以尽可能多地往穗部运输,从而保证小麦有较高的穗数、穗粒数、穗重,同时其穗轴+颖壳同化物转移率较高,对籽粒贡献率也较高,所以其籽粒总产量较洛麦23高。镉胁迫下,镉耐性弱的洛麦23虽然其茎鞘同化物转移率较高,但是其叶面积指数较低,产生的光合产物总量较中育10号低;再者,其叶片同化物转移率也较低,叶片同化物往外运输严重受阻,所以穗部物质积累的底物供给不足,同时,其穗轴+颖壳转移率较低,对籽粒贡献率也较低,最终导致穗粒数、千粒重或者穗数下降,使籽粒总产

量下降。

4 结论

(1)镉胁迫下,超出一定浓度范围的Cd处理抑制了小麦叶面积指数,破坏了光合产物的运输途径,抑制了叶片、茎鞘同化物转移率,导致叶、茎鞘、穗干物质积累下降;穗数、穗粒数、千粒重减少;最终导致小麦籽粒产量下降;这一临界Cd浓度因品种、器官不同而异。

(2)镉胁迫下,苗期镉耐性较强的中育10号因叶面积指数、叶片同化物转移率、穗轴+颖壳同化物转移率、对籽粒贡献率受抑制程度较低,所以,其保持着较高的穗数和穗粒数,最终表现为产量优于镉耐性较弱的洛麦23。

参考文献:

- [1] 郭艳丽, 台培东, 韩艳萍, 等. 镉胁迫对向日葵幼苗生长和生理特性的影响[J]. 环境工程学报, 2009, 12(3): 2291-2296.
GUO Yan-li, TAI Pei-dong, HAN Yan-ping, et al. Effects of cadmium on the growth and physiological characteristics of sunflower seedlings[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2009, 12(3): 2291-2296.
- [2] 李勇, 黄占斌, 王文萍, 等. 重金属铅镉对玉米生长及土壤微生物的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(11): 2241-2245.
LI Yong, HUANG Zhan-bin, WANG Wen-ping, et al. Effects of heavy metal lead and cadmium on *Zea mays* L. growth and the soil microorganism[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2009, 28(11): 2241-2245.
- [3] 孙建云, 沈振国. 镉胁迫对不同甘蓝基因型光合特性和养分吸收的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2605-2610.
SUN Jian-yun, SHEN Zhen-guo. Effects of Cd stress on photosynthetic characteristics and nutrient uptake of cabbages with different Cd-tolerance[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(11): 2605-2610.
- [4] 葛才林, 络剑峰, 刘冲, 等. 重金属对水稻光合作用和同化物输配的影响[J]. 核农学报, 2005, 19(3): 214-218.
GE Cai-lin, LUO Jian-feng, LIU Chong, et al. Effect of heavy metals on the photosynthesis and photosynthates transformation in rice [J]. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2005, 19(3): 214-218.
- [5] Chien H F, Kao C H. Accumulation of ammonium in rice leaves in response to excess cadmium[J]. *Plant Science*, 2000, 156: 111-115.
- [6] Wang Y-Q, Xiao L-Z, Li S-Y, et al. Effects of combined pollution of Pb and Cd on growth and yield of rice[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2010, 11(5): 168-170.
- [7] 曹莹, 黄瑞冬, 王国骄, 等. 铅和镉复合胁迫对玉米吸收铅特性及产量影响[J]. 玉米科学, 2007, 15(3): 91-94.
CAO Ying, HUANG Rui-dong, WANG Guo-jiao, et al. Effect on absorption characteristics of lead and yield in maize under combined stress of lead and cadmium[J]. *Journal of Maize Science*, 2007, 15(3): 91-94.
- [8] 柳絮, 范仲学, 张斌, 等. 我国土壤镉污染及其修复研究[J]. 山东农业科学, 2007, 6: 94-97.
LIU Xu, FAN Zhong-xue, ZHANG Bin, et al. Research on Cd pollution and its repair technology of soil in China[J]. *Shandong Agricultural Science*, 2007, 6: 94-97.
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [10] 张立言, 刘树欣, 李振国, 等. 高产麦田开花后干物质积累、运转、分配与产量形成[J]. 北京农学院学报, 1988, 3(2): 76-83.
ZHANG Li-yan, LIU Shu-xin, LI Zhen-guo, et al. Accumulation, translocation and distribution of dry matter after anthesis and yield formation in high-yield stands of winter wheat[J]. *Journal of Beijing Agricultural College*, 1988, 3(2): 76-83.
- [11] Mccaig TN, Clarke JM. Seasonal changes in nonstructural carbohydrate levels of wheat and oats grown in semiarid environment[J]. *Crop Sci*, 1982, 22: 963-970.
- [12] Austin R B, Ford M A, Edrich J A, et al. The nitrogen economy of winter wheat[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 1977, 88: 159-167.
- [13] 黄冬芬, 王志琴, 刘立军, 等. 镉对水稻产量和品质的影响[J]. 热带作物学报, 2010, 31(1): 19-24.
HUANG Dong-fen, WANG Zhi-qin, LIU Li-jun, et al. Effect of cadmium on the rice yield and grain quality[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2010, 31(1): 19-24.
- [14] 邹飞波, 张国平. 植物整合肽及其在重金属耐性中的作用[J]. 应用生态学报, 2003, 14(4): 632-636.
WU Fei-bo, ZHANG Guo-ping. Phytochelatin and its function in heavy metal tolerance of higher plants[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(4): 632-636.
- [15] 王天铎. 光合作用与作物产量[J]. 植物生理学通讯, 1988(1): 52-55.
WANG Tian-duo. Photosynthesis and crop yield[J]. *Plant Physiology Communications*, 1988(1): 52-55.
- [16] 冯建波, 肖伟中, 张锁荣, 等. 小麦叶面积指数和产量空间结构性分析[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(32): 14021-14022.
FENG Jian-bo, XIAO Wei-zhong, ZHANG Suo-rong, et al. Spatial structure of leaf area index and yield of wheat[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2008, 36(32): 14021-14022.
- [17] 马新明, 张娟娟, 席磊, 等. 基于叶面积指数(LAI)的小麦变量施氮模型研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(2): 22-26.
MA Xin-ming, ZHANG Juan-juan, XI Lei, et al. Variable nitrogen fertilization model of wheat based on LAI[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(2): 22-26.
- [18] 关丽, 刘湘南. 镉污染胁迫下水稻生理生态表征高光谱识别模型[J]. 生态环境学报, 2009, 18(2): 488-493.
GUAN Li, LIU Xiang-nan. Hyperspectral recognition models for physiological ecology characterization of rice in Cd pollution stress[J]. *Ecology and Environmental Science*, 2009, 18(2): 488-493.
- [19] 陈娟, 孙鉴坤, 方元平. 镉胁迫对水稻颖果胚乳细胞增殖和粒重的影响[J]. 湖北农业科学, 2009, 48(6): 1311-1314.
CHEN Juan, SUN Jian-kun, FANG Yuan-ping. Effects of Cd²⁺ stress on endosperm cells and grain weight of rice caryopsis[J]. *Hubei Agricultural Science*, 2009, 48(6): 1311-1314.
- [20] 范仲学, 单世华, 杨志艺, 等. 重金属镉在五类花生不同部位的分布特征及其对产量的影响[J]. 中国农业科技导报, 2009, 11(5): 102-107.
FAN Zhong-xue, SHAN Shi-hua, YANG Zhi-yi, et al. Effects of Cd stress on distribution characteristics at different parts of five peanut genotypes and their yields[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2009, 11(5): 102-107.
- [21] 郑丕尧. 作物生理学导论[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1992: 121-127.
ZHENG Pi-yao. Crop physiology introduction[M]. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1992: 121-127.