

# 干旱胁迫对不同生育阶段大豆产量形态建成的影响

刘丽君, 林 浩, 唐晓飞, 蒲国峰

(黑龙江省农业科学院 大豆研究所, 黑龙江 哈尔滨 150086)

**摘 要:**在盆栽条件下,以12个大豆品种(系)为材料,分别在V1~V5, R1~R4, R5~R8期进行干旱胁迫处理,并测定了根系形态指标、干物质积累、光合生理指标、农艺性状及产量的变化。结果表明:苗期干旱胁迫对大豆根系形态影响较大,根体积、根径、根系伸长、根系总表面积都有增大的趋势,而其它时期的干旱胁迫均使根形态发育减缓;干旱胁迫使大豆各生育阶段地上和地下干物重明显降低,并增加植株根冠比;不同生育时期干旱胁迫导致大豆叶肉细胞的净光合率( $P_n$ )值降低,苗期气孔导度( $Cond$ )品种间差异明显,花荚期和鼓粒期干旱胁迫使大豆叶片 $Cond$ 大幅度下降。叶肉细胞间 $CO_2$ 浓度( $C_i$ )和蒸腾速率( $Tr$ )的变化趋势与气孔导度基本一致;水分胁迫导致大豆产量降低,品种间差异显著,不同生育阶段,品种的抗旱性表现不同,全生育时期都抗旱的品种较少。

**关键词:**大豆;干旱胁迫;产量

中图分类号:S565.1

文献标识码:A

文章编号:1000-9841(2011)03-0405-08

## Drought Stress Influence Soybean Yield Morphogenesis in Different Growth Stages

LIU Li-jun, LIN Hao, TANG Xiao-fei, PU Guo-feng

(Soybean Research Institute, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, Heilongjiang, China)

**Abstract:** Seasonal drought is a main environmental factor limited soybean yield in northeast China. Our objective was to determine how drought stress imposed on soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] at various growth stages affected plant characteristics. Twelve soybean cultivars were grown under greenhouse conditions and subjected to normal water supply (17%–18% soil-available water) and drought stress (8%–9% soil-available water) during seedling (V1–V5), flowering (R1–R4) and seed filling (R5–R8) stages. Root morphological traits including length, diameter, volume and surface area were all promoted by stress during seedling, while were inhibited by stress in other periods. Dry matter accumulation was decreased and root/shoot ratio was increased by stress in all tested periods. Drought stress at three periods all declined photosynthetic rate ( $P_n$ ), and stress at flowering and seed-filling declined intercellular  $CO_2$  concentration ( $C_i$ ), transpiration rate ( $Tr$ ) and stomatal conductance ( $Cond$ ). The decrease of seed yield caused by stress varied with varieties significantly. The performance of drought tolerance varied with growth periods, only a few cultivars showed resistant to drought stress at all growth stages.

**Key words:** Soybean; Drought stress; Yield

近年来黑龙江省干旱问题已越发突出,除春旱外,夏季干旱,秋季伏旱每年都有发生,因此深入研究大豆生育阶段干旱对大豆产量和生长的影响,掌握大豆抗旱性表达的变化,对解决生产问题尤为重要,许多学者已从抗旱指标筛选、抗旱性评价等方面进行了研究<sup>[1-10]</sup>,为大豆抗旱性研究提供基础数据,该文重点研究干旱胁迫对不同生育阶段大豆产量形态建成的影响,为抗旱性育种与栽培提供技术支撑。

### 1 材料与方法

#### 1.1 试验设计

选用12个大豆品种,在活动式防雨篷内进行

盆栽试验,分别在苗期—分枝期(V1~V5)、开花—结荚期(R1~R4)、鼓粒—成熟期(R5~R8)干旱胁迫处理14 d,分别以各对应时期正常水分处理为对照。采用称重法控制水分(正式试验前做精确预备试验,根据蒸腾量及时补水,并定期抽取土样来烘干测定土壤含水量),干旱胁迫组土壤含水量为8%~9%,对照组为17%~18%。采用随机区组排列,10次重复,定期调整盆栽位置,以消除“边际效应”的影响。2008年5月10日播种,每盆装土15 kg,待子叶出土后,每盆留壮苗4株。分别在3个胁迫时期后,测定干物质积累量、根系形态指标、光合生理指标以及农艺性状。

收稿日期:2011-03-15

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2009BADA8B02);大豆产业技术体系资助项目。

第一作者简介:刘丽君(1958-),女,研究员,从事大豆遗传育种研究。E-mail:nlcyssbel@126.com。

## 1.2 测定项目与方法

1.2.1 根系形态测定 取根系用流水小心冲洗,下部用铁纱网滤过细小须根,用根系系统分析仪、爱普森-4870 立体扫描仪对根系进行扫描,软件分析其根长、根毛空间总表面积、根体积、平均根茎、总根毛数等指标。

1.2.2 干物量测定 取地上部植株,冲洗干净后置于烘箱,110℃杀青,后90℃恒温烘干后称重,根干重为根系形态测定结束后烘干,称重。

1.2.3 光合指标测定 采用便携式光合系统测定仪 LI-6400 (LI-COR Lincoln, USA), 设定光强的光量子数为  $1\ 500\ \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  叶室温度 25℃、 $\text{CO}_2$  浓度为  $350\ \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ , 测定叶片净光合速率 ( $P_n$ )、蒸腾速率 ( $T_r$ )、细胞间隙  $\text{CO}_2$  浓度 ( $C_i$ ) 及气孔导度 ( $Cond$ ) 均取 9 片叶片分别进行测定,取平均值;计算水分利用率 (叶片瞬时水分利用效率 ( $LWUE$ ) = 叶片光合速率/叶片蒸腾速率)

1.2.4 农艺性状及产量 均采用常规方法测定株高、节数、单株荚数、单株粒数和百粒重。

## 1.3 数据分析

采用 Excel 2003 和 DPS 7.05 进行数据分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 干旱胁迫对不同生育阶段大豆根系发育的影响

由表 1 可以看出,苗期干旱胁迫对大豆根系形态影响较大,干旱胁迫使大豆根长、3D 总表面积比对照明显增加,根体积、平均根径都有所增加,但品种间有差异,丰收 24、绥农 28、M1 在干旱条件下根体积和平均根径有所减少。干旱诱导根系伸长,根系总表面积增大,根体积和平均根茎也有增大的趋势,根尖数变化趋势不明显。

开花—结荚期干旱胁迫下品种的根长值、根总表面积、平均根径、根尖数与自身对照相比均降低,只有黑农 59、哈 5489、丰收 24 和黑农 44 比对照有所增加,表明这一时期根系发育已基本完成,这 4 个品种对水分胁迫有很好适应性,能迅速通过根伸长等方式来适应胁迫环境。

鼓粒—成熟期干旱胁迫下,大豆根系出现衰老退化,大多数品种的根长、根总表面积、根体积、平均根径和根尖数均较各自对照有不同程度的降低,只有黑农 56、哈 5489 在干旱条件根系发育较好。

### 2.2 干旱胁迫对不同生育阶段大豆干物重及根冠比的影响

2.2.1 苗期干旱胁迫对大豆干物重及根冠比的影响 苗期干旱胁迫使地上部干重有所下降(图 1),根系干重也明显较对照减小,但品种间差异明显。

其中降幅较大是黑农 46 和 M1,降幅较小是黑农 59 和 M3,而黑农 59 和黑农 50 地上部干重在干旱处理下比对照有小幅升高。可见,干旱对黑农 59 和 M3 地上部干重和根干重影响最小。就总生物量而言,哈 5489 和黑农 46 表现较好,但这 2 个品种在干旱条件下降幅明显,与生产上表现相符,2 个品种均为喜肥水品种,同化物积累能力较强。

苗期干旱促进根系发育,干旱胁迫使大豆根冠比升高(图 1)。其中黑农 56 和丰收 24 品种间差异不明显,而绥农 28、M1、M2 表现特殊,其干旱胁迫根冠比略有降低,表明其根系对水分条件反应不敏感,表现出其根部生长量滞后于地上部生长量,不利于水分吸收和营养物质的转运。结合不同品种间干物重变化情况来看,分析品种的抗旱性,不能用单一指标来进行判断,仅用某一指标来说明抗旱性强弱是不准确的。

2.2.2 开花—结荚期干旱胁迫对大豆干物重及根冠比的影响 开花—结荚期干旱胁迫使地上部干重和地下根系干重明显减少(图 2),根系干重品种间差异明显。从根系干重变化看,只有黑农 59 较对照有所上升,呈适旱性的表现,其余品种均下降,降幅较大的是 M1 和 M2,分别为 47% 和 46%,降幅较小的品种是哈 5489 和绥农 28,分别为 8% 和 11%,可见黑农 59 大豆在花荚期根系发育活力较强,显现出该品种独特的根系发育特性。

该时期水分胁迫使地上部干重均下降,但降幅不同,降幅较大的品种为黑农 46 和丰收 24,分别达到了 51% 和 53%;降幅较小的品种是哈 5489 和绥农 28,分别达到了 19% 和 27%。可见该时期干旱胁迫对地上部生长有明显的抑制作用,严重影响着地上部干物质的积累,进而影响到了光合产物的积累、分配和运输。

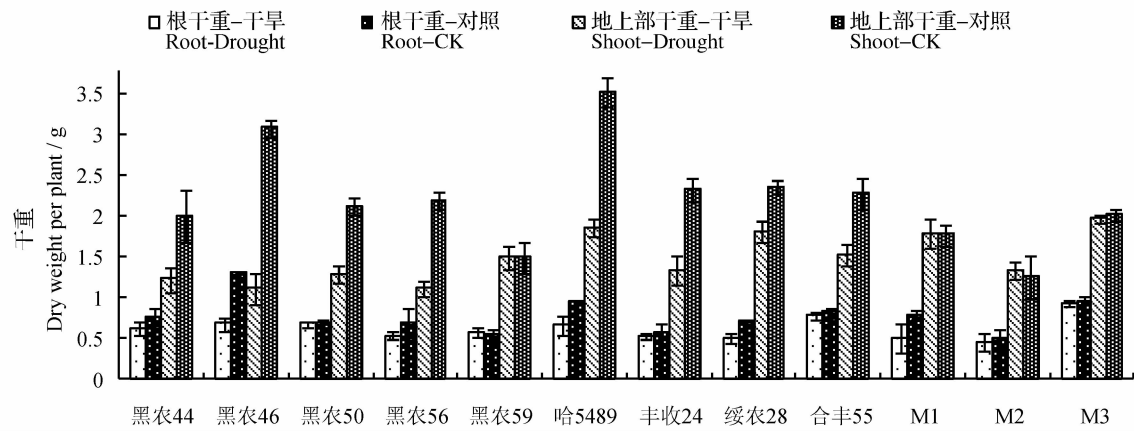
开花—结荚期干旱胁迫促进根系发育,许多研究表明根冠比的增大程度与抗旱性呈显著正相关。干旱胁迫使大豆根冠比增加。其中根冠比增幅最大的为黑农 59 (23.9%),其次为丰收 24 (56%)。仅从根冠比这个指标来看,抗旱性最好的是黑农 59,最差的为 M2。

2.2.3 鼓粒—成熟期干旱胁迫对大豆干物重及根冠比的影响 鼓粒—成熟期是大豆的生殖生长期,干旱胁迫使所有品种地上部干重均下降(图 3)。对于根干重,除黑农 56 较对照增长 2.54 倍,其它品种均下降,其中降幅较大的是 M2 和 M3,分别为 56% 和 47%,降幅较小的品种是黑农 44 和黑农 46,分别为 1% 和 10%,可见黑农 56 根系活力较强,具有很好的适旱性。

表 1 干旱胁迫对不同生育时期大豆干重及根系形态的影响

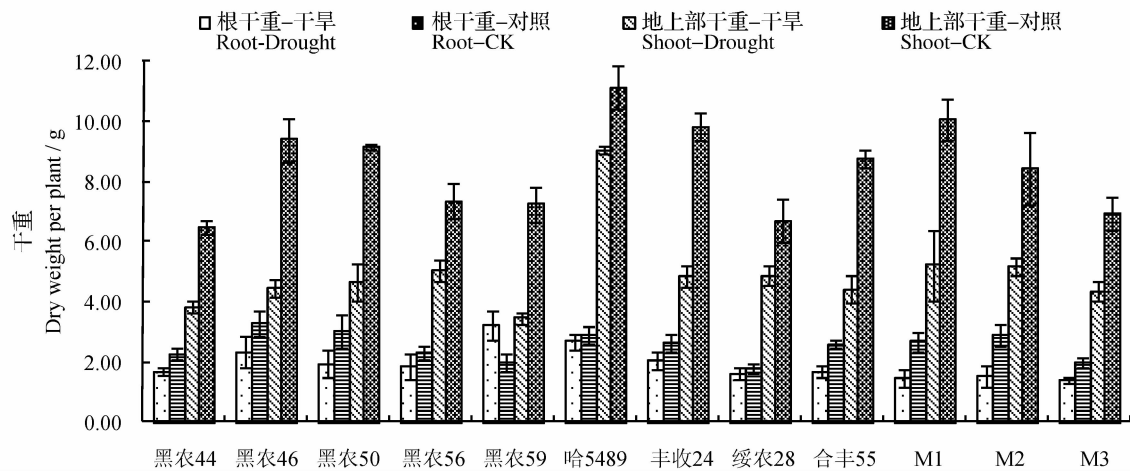
Table 1 Effects of drought stress on soybean dry weight and root conformation at different growing stages

时期 Stage	品种 Cultivar	根长 Main root length/cm			根 3D 总表面积 Root surface area/cm <sup>2</sup>			根体积 Root volume /cm <sup>3</sup>			平均根径 Root diameter/cm			根尖数 NTIPS Total number of root tips		
		干旱 Drought	对照 CK	降幅 Change/%	干旱 Drought	对照 CK	降幅 Change/%	干旱 Drought	对照 CK	降幅 Change/%	干旱 Drought	对照 CK	降幅 Change/%	干旱 Drought	对照 CK	降幅 Change/%
苗期 Seedling	Heinong44	1156.53bc	780.04b	48.27	60.38bc	35.44cde	70.37	2.48b	1.27cd	95.28	0.52bcde	0.46c	13.04	1886.00b	2136.50a	-11.72
	Heinong46	845.54d	719.90bc	17.45	47.32cd	45.24bc	4.60	2.10b	2.11b	-0.478	0.56abc	0.59a	-5.08	1226.25de	1076.00cd	13.96
	Heinong50	948.26cd	620.17bc	52.90	55.14c	35.55cde	55.10	2.52ab	1.46c	72.608	0.58ab	0.56ab	3.57	1519.67bcde	1101.33cd	37.98
	Heinong56	1050.66cd	622.20bc	68.86	51.28c	25.81def	98.69	1.97b	0.84d	134.528	0.49cde	0.41d	19.51	1625.25bcde	1690.50b	-3.86
	Heinong59	1198.89bc	1150.17a	4.24	56.78c	49.81b	13.99	2.21b	1.74bc	27.018	0.49cde	0.44cd	11.36	1723.20bcd	1796.00ab	-4.05
花期— 结荚期 Flowering— podding	Ha5489	1198.89bc	1150.17a	4.24	51.54c	34.57cde	49.09	2.31b	1.61bc	43.48	0.57abc	0.59a	-3.39	1160.50e	1120.50cd	3.57
	Fengshon24	790.27d	656.73bc	20.33	34.91de	28.21def	23.75	0.96c	2.25b	-57.33	0.44e	0.44cd	0	1630.80bcde	1871.33ab	-12.85
	Suinong28	1050.82cd	357.17d	194.21	54.79c	19.22f	185.07	0.81c	2.25b	-64.00	0.52bcde	0.54b	-3.70	1904.60b	726.00d	162.34
	Heifeng55	955.84cd	718.84bc	32.97	57.62c	37.36bcd	54.23	2.74ab	1.61bc	70.19	0.60a	0.55b	9.09	1291.80cde	1311.20c	-1.48
	M1	1588.80a	1377.37a	15.35	73.66ab	73.24a	0.57	2.25b	3.05a	-26.23	0.45de	0.53b	-15.09	2631.67a	1792.40ab	46.82
鼓粒— 成熟期 Pod-filling —maturity	M2	500.49e	481.68cd	3.91	26.60e	22.32ef	19.18	1.11c	0.82d	35.37	0.53abcd	0.47e	12.77	687.33f	940.00cd	-26.88
	M3	1371.91ab	1311.19a	4.63	77.13a	73.35a	5.15	3.41a	3.23a	5.57	0.56abc	0.56ab	0	1754.80bc	1715.00b	2.32
	Heinong44	1170.15cd	964.29cd	21.35	97.58abc	101.24bcd	-3.62	6.44bcd	8.63cd	-25.38	0.83bc	1.04b	-20.19	1667.75de	1261.50d	32.20
	Heinong46	1254.16bc	1260.44b	-0.50	107.74ab	123.21ab	-12.56	7.92abc	10.54b	-24.86	0.84b	0.99bc	-15.15	1907.50bc	1934.75b	-1.41
	Heinong50	1023.96de	1072.82c	-4.56	92.35bc	130.60a	-29.29	6.20cd	13.27a	-53.28	0.83bc	1.22a	-31.97	1483.00f	1454.75cd	1.94
鼓粒— 成熟期 Pod-filling —maturity	Heinong56	1467.61a	1582.77a	-7.28	106.79ab	132.69a	-19.52	6.13cd	8.82c	-30.50	0.72cde	1.15a	-37.39	1985.25b	2424.75a	-18.13
	Heinong59	878.95e	890.51de	-1.30	111.25ab	87.11cde	27.71	8.79	6.88e	27.76	1.48a	0.94cd	57.45	1303.00g	1390.50cd	-6.29
	Ha5489	1508.53a	1500.87a	0.51	124.31a	117.81ab	5.52	8.10ab	7.27cde	11.42	0.82bc	0.79e	3.80	1763.33cd	2323.00a	-24.09
	Fengshon24	1363.89ab	1298.74b	5.02	99.23abc	107.94abc	-8.07	5.72de	7.12de	-19.66	0.72bcde	0.83de	-13.25	2228.00a	2313.33a	-3.69
	Suinong28	999.76de	1042.62c	-4.11	77.69c	81.07de	-4.17	4.81def	4.97fg	-3.22	0.77bcd	0.77e	0	1560.00ef	1482.25c	5.25
鼓粒— 成熟期 Pod-filling —maturity	Heifeng55	967.52e	1000.10cd	-3.26	76.58c	87.29cde	-12.27	4.23ef	5.99ef	-29.38	0.74bcde	0.87de	-14.94	1475.00f	1435.25cd	2.77
	M1	549.56f	762.02e	-27.89	37.06d	65.32e	-43.26	1.97g	4.35g	-54.71	0.68de	0.87de	-21.84	866.00h	1268.00cd	-31.70
	M2	707.16f	884.62de	-20.06	44.87d	75.99de	-40.95	2.24g	5.16fg	-56.59	0.64e	0.86de	-25.58	1225.00g	1240.00d	-1.21
	M3	647.63f	961.97cd	-32.68	50.37d	86.81cde	-41.98	3.08fg	6.22ef	-50.48	0.78bcd	0.90cd	-13.33	930.50h	1364.75cd	-31.82
	Heinong44	505.00e	1127.46cd	-55.21	45.14f	96.71bcd	-53.32	3.19de	6.49cd	-50.85	0.89ab	0.86bcde	3.49	1716.67b	3265.75a	-47.43
鼓粒— 成熟期 Pod-filling —maturity	Heinong46	1311.88a	1352.93ab	-3.03	102.91d	112.07b	0	6.38b	7.32cd	-12.84	0.78bc	0.83bcde	-6.02	4994.33a	2271.00e	119.92
	Heinong50	1014.31bc	1054.87de	-3.85	72.89de	94.07cd	-22.52	4.12cd	6.89cd	-40.20	0.72cde	0.89bcde	-19.10	2301.00ab	3558.75a	-35.34
	Heinong56	1314.70a	785.10f	67.46	122.32a	75.29e	62.47	8.94a	2.87f	211.50	0.93a	1.14ab	-18.42	2591.00ab	1707.00c	51.79
	Heinong59	799.62d	1363.27a	-41.35	58.65ef	103.09bc	-43.11	3.43cde	6.18cd	-44.50	0.73cd	0.77de	-5.19	2831.25ab	3699.25a	-23.46
	Ha5489	1088.06b	1311.18abc	-17.02	123.60a	79.97de	54.56	9.76a	3.87ef	20.00	0.97a	0.61e	59.02	3310.00ab	3212.33a	3.04
鼓粒— 成熟期 Pod-filling —maturity	Fengshon24	888.41cd	1291.58abc	-31.22	68.11de	102.72bc	-49.4	2.42e	6.57cd	-63.17	0.55e	0.82cde	-32.93	2142.25b	2449.75b	-12.55
	Suinong28	1080.98bc	926.96ef	16.62	68.11de	94.80bcd	-28.15	3.39cde	5.59de	-39.36	0.61cde	1.00abcd	-39.00	1953.50b	2502.50b	-21.94
	Heifeng55	929.02bcd	1177.91abcd	-21.13	67.74de	105.93bc	-36.05	3.35cde	7.74c	-56.72	0.68cde	0.84abcde	-19.05	2839.50ab	1713.25c	65.74
	M1	1075.23bc	1230.77abcd	-12.64	67.92de	106.56bc	-36.26	3.40cde	5.37de	-36.70	0.61de	0.85bcde	-28.24	4402.00ab	3322.00a	32.51
	M2	1086.59b	1153.76bcd	-5.82	88.08c	138.07a	-36.21	5.82b	13.86a	-58.01	0.70bc	1.22a	-42.62	2880.00ab	3192.33a	-9.78
鼓粒— 成熟期 Pod-filling —maturity	M3	1059.30bc	1219.79abcd	-13.16	77.63cd	138.61a	-43.99	4.48c	11.82b	-62.10	0.74cd	1.11abc	-33.33	3037.67ab	3390.67a	-10.41



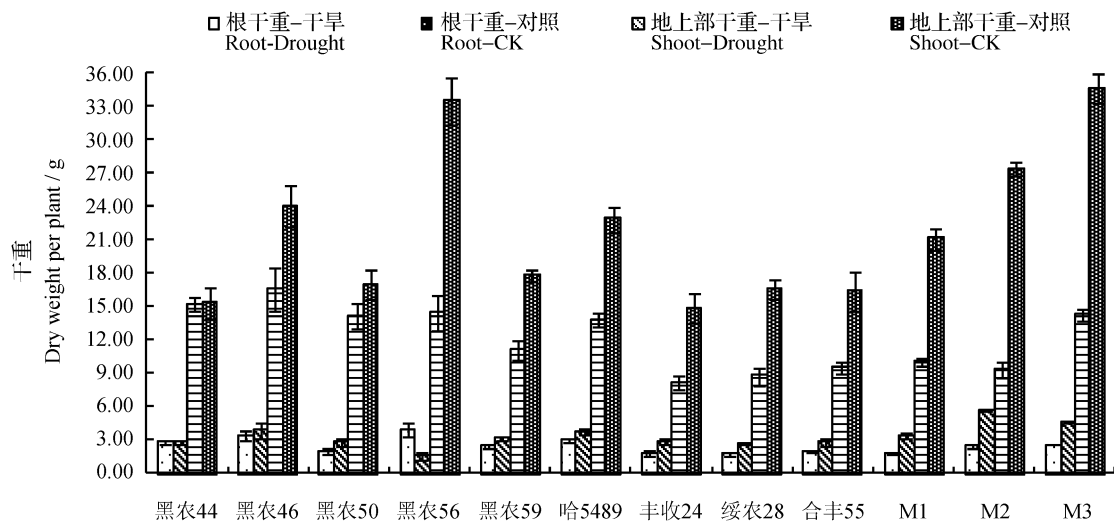
E ã, ¼ 3 \ ] © ! " \ ^ A \* È É

õ %ã, ô ! " ! ! ! ! & \$ ! &



E ä, œ 3 ñ Wc 3 Í . ^ \_ © ! " \ ^ A \* È É

õ %ã, ô ! \$ ! ! " \$ Š & \$ ! &



E ä, d Á 3 ñ Þ ß 3 \ ] © ! " \ ^ A \* È É

õ %ã, ô ! " ! ! ! Š ! " ! & ! & \$ ! &

该时期干旱胁迫使地上部干重均下降,但降幅不同,降幅较大的品种为黑农 46 和丰收 24,分别达到了 51% 和 53%;下降幅度较小的品种有黑农 44 和黑农 50,分别达到了 1% 和 17%。该时期干旱胁迫使地上部叶片衰老加快,部分叶片脱落,影响干物质的积累,进而影响到了光合产物的积累、分配和运输。

鼓粒—成熟期根系生长进入滞缓期,根冠比较苗期和开花—结荚期整体下降。干旱胁迫使大豆根冠比增加。其中根冠比增幅最大的为黑农 56 (49.1%),其次为哈 5489 (33%),黑农 50 根冠比反而下降 16%。仅从根冠比这个为指标来看,该时期抗旱性最好的是黑农 56,最差的为黑农 50。

### 2.3 干旱胁迫对大豆光合指标的影响

2.3.1 苗期干旱胁迫对大豆光合指标的影响 由表 2 可知,品种间的净光合速率明显不同,参试品种中最高的是黑农 44,最低为合丰 55,干旱胁迫后大多数品种的净光合速率( $P_n$ )降低,但品种间表现不同,降幅最大的是黑农 44 (44%),其次是黑农 50 (23%),绥农 28 反而增加了 8%。品种间气孔导度( $Cond$ )有明显差异,其中黑农 44 的  $Cond$  最大。干旱胁迫对品种间的  $Cond$  影响存在明显差异,丰收 24、M1、绥农 28、M2 小幅升高,气孔张开程度分别增加为 33%、6%、5%、4%,其它品种则明显降低。大豆品种叶片胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ )和蒸腾速率( $Tr$ )的变化趋势和气孔导度基本一致。

苗期干旱胁迫后,大豆品种间瞬时水分利用率( $P_n/Tr$ )明显不同,哈 5489 最高,黑农 46 次之,黑农 56 最低。

2.3.2 开花—结荚期干旱对大豆光合指标的影响 开花—结荚期干旱使所有大豆品种的净光合速率( $P_n$ )显著降低,降幅最大为黑农 46 (86.38%),其次为黑农 44 (86.13%),降幅最小的为黑农 56 (5.39%)。此时期干旱,大豆品种的气孔导度( $Cond$ )大幅度下降,其中降幅最大的是黑农 46 (90.73%),其次是黑农 44 (87.41%),降幅最小的是黑农 56 (40.74%)。这一时期的干旱胁迫对大豆胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ )和蒸腾速率( $Tr$ )的影响与气孔导度基本一致;而叶片中瞬时水分利用率降低,干旱胁迫下,黑农 56 瞬时水分利用率相对较高,降幅较小,而 M1 品种的降幅最大。

2.3.3 鼓粒—成熟期干旱胁迫对大豆光合指标的影响 鼓粒—成熟期干旱胁迫使大豆的净光合速率( $P_n$ )大幅度降低,降幅最大为黑农 46 (84.53%),降幅最小的为黑农 56 (5.7%),气孔导度( $Cond$ )也有一定幅度下降,降幅最大的是黑农 44 (87.56%),最小的黑农 56 (62.44%),胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ )和蒸

腾速率( $Tr$ )的变化趋势和气孔导度基本一致;叶片中瞬时水分利用率也降低,但干旱条件下,黑农 50 瞬时水分利用效率最高,而黑农 44 最低,且与自身对照相比降幅最大,表明这一时期的干旱对黑农 44 光合生理的影响较大。

### 2.4 干旱胁迫对不同生育阶段大豆产量形成的影响

2.4.1 苗期干旱胁迫对产量的影响 苗期干旱对大豆产量的影响品种间差异较大,其中大豆产量增加的有 M1 (48%)、黑农 50 (25%)、哈 5489 (24%),这些品种在苗期干旱胁迫后,促进了根系的快速发育,促进发挥源库效应,使产量有所增加。其它品种在干旱胁迫后,产量与自身对照相比有所下降,品种产量降低幅度不同:丰收 24 (47%)、黑农 44 (41%)、黑农 56 (38%)、黑农 59 (11%)、合丰 55 (11%),表明这些品种在苗期对干旱敏感,干旱胁迫使大豆株高、节数、单株荚数、单株粒数有所降低(结果未列出)。

2.4.2 花荚期干旱对大豆产量的影响 花荚期干旱对大豆产量影响较大,干旱胁迫使大豆株高、节数、单株粒数、百粒重降低(表 3),减产幅度因品种而宜,产量降幅最大的为 M1 (41.86%),其次是黑农 44 (36.32%);降幅最小的品种为黑农 59 (4.13%)。花荚期是大豆对水分的敏感时期。

2.4.3 鼓粒—成熟期干旱对产量的影响 这一时期水分胁迫使大豆品种的产量有所降低,干旱胁迫使大豆的单株荚数、单株粒数、百粒重下降,而对植株节数没有影响(表 4),表明干旱胁迫显著影响籽粒发育,灌浆速度、叶片光合产物的积累,进而影响产量。此时期干旱胁迫使各品种产量均降低,降幅差异很大,降幅较小的品种是合丰 55 (22.73%) 和黑农 44 (23.47%)。

## 3 讨 论

通过不同生育时期干旱胁迫对大豆产量形态建成的影响分析,发现大豆品种在不同生育时期对干旱的响应不同<sup>[11]</sup>,全生育期均表现为抗旱的品种较少。抗旱性好的品种根系发达,根冠比值高,吸水能力强,表现为减产幅度比较小,不同生育时期干旱对大豆产量构成因子的影响不同,苗期干旱胁迫主要影响大豆株高、节数和单株荚数;花荚期则主要影响株高、节数、单株荚数;而鼓粒—成熟期干旱主要使大豆的单株粒数和百粒重降低。所以应针对不同时期干旱对产量的影响,采取有效的农艺措施<sup>[12-14]</sup>,来减少干旱胁迫造成的损失;或通过生物工程的办法<sup>[15-16]</sup>,使大豆获得抗旱基因,通过耐旱性锻炼选育出抗旱性品种,实现大豆的高产、稳产。

表 2 不同生育时期干旱胁迫对不同大豆品种光合生理的影响  
Table 2 Effects of drought stress on photosynthetic physiological characters of soybean

时期 Stage	品种 Cultivar	净光合速率 $P_n/\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$				气孔导度 $G_o/\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$				胞间 $\text{CO}_2$ 浓度 $C_i/\text{mmolCO}_2 \cdot \text{mol}^{-1}$				蒸腾速率 $T_r/\text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$				瞬时水分利用率 $P_n/T_r$			
		干旱		对照	降幅	干旱		对照	降幅	干旱		对照	降幅	干旱		对照	降幅	干旱		对照	降幅
		Drought	CK	Change/%	Change/%	Drought	CK	Change/%	Change/%	Drought	CK	Change/%	Change/%	Drought	CK	Change/%	Change/%	Drought	CK	Change/%	Change/%
苗期 Seedling	Heinong44	6.43d	11.47a	43.93	0.18e	0.32abcde	0.41bcd	66.25	132.83e	154.29a	13.90	4.62cd	8.79a	47.45	1.42e	1.31f	-8.53				
	Heinong46	7.99cd	10.17ab	21.38	0.32abcde	0.41bcd	20.25	146.00bcd	156.63a	6.78	4.30cd	5.15e	16.35	1.89bc	1.98b	4.64					
	Heinong50	7.89cd	10.15ab	22.24	0.26cde	0.36bcd	29.80	135.71cde	145.71b	6.86	5.27bcd	7.02bc	24.87	1.55de	1.45ef	-6.82					
	Heinong56	7.74cd	9.88ab	21.64	0.26bcde	0.41bc	36.00	145.50bcd	150.80ab	3.51	5.64bcd	7.27b	22.46	1.40e	1.37f	-1.86					
	Heinong59	9.73abc	10.16ab	4.23	0.32abcde	0.41bcd	22.70	147.33bc	156.29a	5.73	5.95bc	7.06bc	15.79	1.64cde	1.44ef	-14.15					
花期— 结荚期 Flowering— podding	Ha5489	9.49abc	11.13a	14.76	0.31bcde	0.41bcd	23.89	146.00bd	152.50ab	4.26	4.37cd	5.22e	16.26	2.20a	2.14a	-2.75					
	Fengshou24	11.50a	9.67ab	-18.94	0.41ab	0.30cd	-33.11	143.20bcd	135.50ab	-5.68	8.23a	6.34bcde	-29.88	1.40e	1.55de	9.69					
	Suinong28	11.01ab	10.15ab	-8.52	0.41ab	0.39bcd	-5.36	155.57ab	148.50ab	-4.76	6.82ab	7.17b	4.84	1.62cde	1.44ef	-12.37					
	Hefeng55	8.28cd	8.94b	7.42	0.22de	0.29d	24.71	134.29de	147.88ab	9.19	4.08d	5.74cde	28.86	2.06ab	1.57de	-31.70					
	M1	11.19ab	11.15a	-0.35	0.46a	0.44ab	-6.28	155.14ab	152.88ab	-1.48	6.41b	6.32bcde	-1.55	1.75cd	1.77c	1.23					
	M2	8.70bcd	8.95b	2.78	0.37abc	0.35bcd	-4.25	160.33a	154.83a	-3.55	5.79bcd	5.66de	-2.45	1.49de	1.59de	6.02					
	M3	9.54abc	11.01a	13.29	0.35abcd	0.48ab	27.35	151.29ab	156.29a	3.20	5.60bcd	6.60bcd	15.16	1.71cd	1.67cd	-2.33					
	Heinong44	1.32d	9.51d	86.13	0.05cd	0.41cd	87.41	150.17a	138.56abc	-8.38	1.64bcd	5.21c	68.46	1.64bc	1.84c	10.78					
	Heinong46	1.23d	9.06d	86.38	0.03d	0.37d	90.73	137.83ab	139.57abc	1.25	1.07d	5.11e	79.15	1.07c	1.77c	39.74					
	Heinong50	7.94b	12.70bc	37.47	0.07bcd	0.34d	79.03	96.75e	117.19d	17.44	1.40cd	4.94c	71.65	0.93c	2.64a	64.62					
鼓粒— 成熟期 Pod-filling —maturity	Heinong56	12.28a	12.98bc	5.39	0.22a	0.38cd	40.74	90.07e	127.17cd	29.17	3.66a	5.36bc	31.79	3.66a	2.44b	-49.87					
	Heinong59	8.70b	15.93a	45.40	0.08bcd	0.59bc	86.26	102.83de	130.13bcd	20.97	1.74bcd	6.46ab	73.03	1.74bc	2.50a	30.31					
	Ha5489	9.38b	13.05bc	28.12	0.13bcd	0.38cd	66.20	96.40e	118.02d	18.32	2.20bcd	5.14c	57.25	2.20bc	2.62a	15.98					
	Fengshou24	4.67c	16.16a	71.09	0.10bcd	0.80a	87.16	119.57bcd	142.57ab	16.13	2.14bcd	7.42a	71.20	2.14bc	2.20b	2.91					
	Suinong28	3.50c	10.32d	66.06	0.13bcd	0.39cd	67.02	138.00ab	131.23bcd	-5.16	2.58abc	5.53bc	53.30	2.58ab	1.87c	-38.17					
	Hefeng55	3.70c	12.25c	69.80	0.15abc	0.73ab	79.67	144.88a	146.38a	1.02	2.98ab	6.68a	55.40	2.98ab	1.84c	-62.26					
	M1	5.08c	14.60ab	65.23	0.17ab	0.42cd	59.99	128.40abc	122.80d	-4.56	2.63abc	5.48bc	51.98	2.63ab	2.67a	1.53					
	M2	3.58c	12.76bc	71.91	0.09bcd	0.34d	74.16	126.71abc	119.14d	-6.35	2.16bcd	5.01c	56.97	2.16bc	2.58a	16.34					
	M3	3.97c	14.07bc	71.77	0.08bcd	0.42cd	80.92	110.83cde	126.67cd	12.50	2.06bcd	5.38bc	61.61	2.06bc	2.62a	21.30					
	Heinong44	1.79g	9.24e	80.68	0.05b	0.43f	87.56	158.70a	146.29a	-8.48	1.68f	5.30f	68.23	1.06j	1.74f	39.18					
	Heinong46	1.52g	9.83e	84.53	0.05b	0.40g	87.30	140.86bc	146.18a	3.64	1.18h	5.18f	77.23	1.29j	1.90f	31.88					
	Heinong50	7.12c	12.44d	42.79	0.50a	0.39g	-25.90	100.49f	126.85cde	20.79	1.43g	5.20f	72.58	4.99a	2.39bc	-108.81					
	Heinong56	12.85a	13.63c	5.70	0.23b	0.60c	62.44	98.99f	130.10c	23.92	3.61a	5.55e	34.91	3.56d	2.46bc	-44.81					
	Heinong59	8.71b	15.72b	44.63	0.11b	0.45ef	76.13	104.75f	137.99b	24.09	2.02e	6.31c	68.05	4.31b	2.49b	-73.17					
	Ha5489	9.04b	13.23cd	31.72	0.17b	0.84a	80.11	98.83f	123.87e	20.22	2.36d	6.05d	60.88	3.82c	2.19de	-74.73					
Fengshou24	4.34f	17.90a	75.73	0.13b	0.47e	73.30	136.55cd	146.79a	6.97	2.39d	7.59a	68.49	1.82g	2.36bcd	23.15						
Suinong28	4.29f	12.98cd	66.93	0.14b	0.43f	67.90	145.59b	138.29b	-5.28	2.70c	6.03d	55.19	1.59h	2.15e	26.23						
Hefeng55	5.65d	15.66b	63.91	0.17b	0.75b	77.19	146.77b	146.40a	-0.25	3.04b	6.90b	55.97	1.86g	2.27cde	18.05						
M1	4.82ef	13.68c	64.75	0.19b	0.54d	65.38	137.33cd	129.23cd	-6.27	2.90b	5.70e	49.10	1.66gh	2.40bc	30.85						
M2	5.04e	15.08b	66.56	0.12b	0.44f	73.64	132.15d	125.44de	-5.35	2.29d	5.21f	56.10	2.21f	2.90a	23.87						
M3	5.94d	15.53b	61.73	0.11b	0.43f	73.79	118.47e	129.55cd	8.55	2.25d	5.55e	59.49	2.65e	2.80a	5.53						

表 3 花期—结荚期干旱胁迫对不同大豆品种农艺性状的影响  
Table 3 Effects of drought stress at flowering-podding on agronomic traits of soybean

品种 Cultivar	株高 Plant height/cm		节数 Nodes of main stem				单株荚数 Pods per plant				单株粒数 Seeds per pod				百粒重 100 – seed weight/g			
	干旱 Drought	对照 CK	降幅 Change /%		干旱 Drought	对照 CK	降幅 Change /%		干旱 Drought	对照 CK	降幅 Change /%		干旱 Drought	对照 CK	降幅 Change /%		干旱 Drought	对照 CK
			Change /%	Change /%			Change /%	Change /%			Change /%	Change /%			Change /%	Change /%		
Heinong44	48.50cd	62.75abcd	22.71	12.50b	13.25abc	5.66	16.50b	17.00ab	2.94	31.50b	37.50ab	16.00	12.54g	17.09f	26.60	17.09f	12.54g	17.09f
Heinong46	57.75b	66.25abc	12.83	14.00ab	13.50abc	-3.70	15.50b	17.50ab	11.43	31.50b	38.25ab	17.65	16.35d	17.00f	3.79	17.00f	16.35d	17.00f
Heinong50	52.67bc	57.75cde	8.80	12.00b	12.00c	0	17.33b	21.00ab	17.46	42.00b	46.50ab	9.68	15.32e	19.12c	19.86	19.12c	15.32e	19.12c
Heinong56	65.67a	68.33ab	3.90	13.00ab	15.67a	17.02	18.33b	27.33ab	32.93	36.33b	50.00ab	27.33	17.44b	17.64e	1.12	17.64e	17.44b	17.64e
Heinong59	43.75d	51.25e	14.63	11.50b	13.50abc	14.81	16.25b	22.75ab	28.57	40.50b	45.00ab	10.00	16.18d	19.66b	17.71	19.66b	16.18d	19.66b
Ha5489	66.67a	70.00a	4.76	15.50a	15.00ab	-3.33	16.50b	18.67ab	11.61	33.50b	41.33ab	18.95	22.71a	24.13a	5.87	24.13a	22.71a	24.13a
Fengshou24	43.75d	54.00de	18.98	12.00b	12.00c	0.00	18.75b	19.50ab	3.85	41.25b	47.25ab	12.70	14.64f	15.39h	4.83	15.39h	14.64f	15.39h
Suinong28	51.33bcd	59.50bode	13.73	13.67ab	14.00abc	2.38	16.67b	17.25ab	3.38	38.75b	39.33ab	1.48	14.42f	19.07c	24.38	19.07c	14.42f	19.07c
Hefeng55	46.50cd	54.00de	13.89	12.75b	13.75abc	7.27	15.50b	16.50b	6.06	33.00b	34.25b	3.65	16.88c	18.45d	8.49	18.45d	16.88c	18.45d
M1	52.50bc	60.67bode	13.46	11.50b	12.67bc	9.21	29.00a	31.50a	7.94	72.67a	78.00a	6.84	9.13i	16.86f	45.88	16.86f	9.13i	16.86f
M2	52.67bc	57.75cde	8.80	13.33ab	14.00abc	4.76	20.75ab	32.00a	35.16	45.75b	63.00a	27.38	12.68g	16.20g	21.73	16.20g	12.68g	16.20g
M3	51.67bcd	54.00de	4.32	13.67ab	13.50abc	-1.23	20.50ab	31.00a	33.87	43.25b	59.00a	26.69	10.60h	12.84i	17.42	12.84i	10.60h	12.84i

表 4 鼓粒期—成熟期水分胁迫对不同大豆品种农艺性状及产量的影响  
Table 4 Effects of drought stress on photosynthetic physiological characters in soybean pod – filling and maturity stages

品种 Cultivar	株高 Plant height/cm		节数 Nodes of main stem				单株荚数 Pods per plant				单株粒数 Seeds per pod				百粒重 100 – seed weight/g			
	干旱 Drought	对照 CK	降幅 Change /%		干旱 Drought	对照 CK	降幅 Change /%		干旱 Drought	对照 CK	降幅 Change /%		干旱 Drought	对照 CK	降幅 Change /%		干旱 Drought	对照 CK
			Change /%	Change /%			Change /%	Change /%			Change /%	Change /%			Change /%	Change /%		
Heinong44	41.33e	55.75cd	25.86	11.67bc	13.75ab	15.15	15.67bc	18.50ab	15.32	30.67bc	39.75ab	22.85	20.24b	21.68b	6.64	21.68b	20.24b	21.68b
Heinong46	52.00bcd	57.00bcd	8.77	12.00bc	13.75ab	12.73	12.00bc	20.75ab	42.17	29.25bc	44.00ab	33.52	18.19d	19.23d	5.43	19.23d	18.19d	19.23d
Heinong50	64.25a	55.50cd	-15.77	13.00abc	14.00ab	7.14	21.25b	19.75ab	-7.59	51.00b	39.25ab	-29.94	15.98f	18.49e	13.59	18.49e	15.98f	18.49e
Heinong56	65.25a	56.00cd	-16.52	12.25bc	11.33b	-8.09	12.00bc	15.67ab	23.40	26.50bc	40.00ab	33.75	15.66f	16.02h	2.27	16.02h	15.66f	16.02h
Heinong59	46.25cde	54.25cd	14.75	11.25bc	13.00ab	13.46	14.00bc	16.75ab	16.42	29.50bc	41.75ab	29.34	18.47c	19.06d	3.11	19.06d	18.47c	19.06d
Ha5489	58.75ab	66.00ab	10.98	13.75ab	15.00ab	8.33	17.25bc	12.50b	-38.00	42.25bc	26.50b	-59.43	23.53a	25.33a	7.08	25.33a	23.53a	25.33a
Fengshou24	42.25de	50.25d	15.92	11.75bc	12.75ab	7.84	11.75bc	17.50ab	32.86	27.50bc	44.50ab	38.20	15.51f	19.41e	20.06	19.41e	15.51f	19.41e
Suinong28	48.75cde	54.50cd	10.55	13.00abc	15.00ab	13.33	9.75c	15.75ab	38.10	23.50c	41.50ab	43.37	17.77e	23.63ab	24.81	23.63ab	17.77e	23.63ab
Hefeng55	46.33cde	50.75d	8.70	15.00a	14.00ab	-7.14	15.67bc	16.75ab	6.47	28.67bc	32.00b	10.42	17.46e	21.64b	19.34	21.64b	17.46e	21.64b
M1	49.00cde	61.50bc	20.33	11.75bc	14.50ab	18.97	31.50a	29.00a	-8.62	78.00a	72.67a	-7.34	9.13h	16.86g	45.88	16.86g	9.13h	16.86g
M2	54.00bc	72.25a	25.26	13.00abc	15.25a	14.75	16.75bc	18.75ab	10.67	35.00bc	41.50ab	15.66	13.19gh	15.51i	14.95	15.51i	13.19gh	15.51i
M3	39.75e	47.67d	16.61	10.50c	12.00ab	12.50	15.00bc	21.00ab	28.57	37.25bc	56.33ab	33.88	14.30g	19.53c	26.78	19.53c	14.30g	19.53c

## 参考文献

- [1] 刘丽君, 尹田夫, 孟良, 等. 大豆原生质膜及混合细胞器脂肪酸对干旱胁迫的反应[J]. 大豆科学, 1991, 10(1): 46-52. (Liu L J, Yin T F, Meng L, et al. Effect of drought on plasmic membrane and mix organelle fatty acid [J]. Soybean Science, 1991, 10(1): 46-52.)
- [2] 陈建中, 葛水莲, 李磊. 作物抗旱基因工程研究进展[J]. 湖北农业科学, 2009, 48(2): 475-477. (Chen J Z, Ge S L, Li L. Progress of genetic engineering in crop drought tolerance mechanisms [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2009, 48(2): 475-477.)
- [3] 董钻. 大豆产量生理[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 46-49. (Dong Z. Soybean yield physiology [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000: 46-49.)
- [4] 李贵全, 李慧峰, 张海燕, 等. 大豆花荚期抗旱性的鉴定与综合评价[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(6): 96-100. (Li G Q, Li H F, Zhang H Y, et al. Comprehensive evaluation of flowering-podding period drought resistance of soybean [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(6): 96-100.)
- [5] 李岩, 潘海春, 李德全. 土壤干旱条件下玉米叶片内源激素含量及光合作用的变化[J]. 植物生理学报, 2000, 26(4): 301-305. (Li Y, Pan H C, Li D Q. Changes in contents of endogenous phytohormones and photosynthesis in leaves of maize (*Zea mays* L.) in drying soil [J]. Acta Phytobiologica Sinica, 2000, 26(4): 301-305.)
- [6] 李玉梅, 李建英, 王根林, 等. 水分胁迫对大豆幼苗叶片内源激素的影响[J]. 大豆科学, 2007, 26(4): 627-629, 636. (Li Y M, Li J Y, Wang G L, et al. Studies on mechanism of endogenous hormones in soybean seedling under water stress [J]. Soybean Science, 2007, 26(4): 627-629, 636.)
- [7] 刘华玲, 马欣荣. 植物抗旱分子机理研究进展[J]. 世界科技研究与发展, 2006, 28(6): 33-40. (Liu H L, Ma X R. Molecular mechanism of drought resistance in plants [J]. World Sci-Tech R&D, 2006, 28(6): 33-40.)
- [8] 刘晓冰, 金剑, 王光华, 等. 行距对大豆竞争有限资源的影响[J]. 大豆科学, 2004, 23(3): 215-221. (Liu X B, Jin J, Wang G H, et al. Influences of row-spacing on competing limited resources in soybean [J]. Soybean Science, 2004, 23(3): 215-221.)
- [9] 任冬莲, 路贵和, 刘学义. 适用于大豆成苗期抗旱性与根系生长的研究[J]. 中国油料, 1993(1): 37-39. (Ren D L, Lu G H, Liu X Y. Studies on drought-resistant and root growth for soybean seedling [J]. Chinese Oil, 1993(1): 37-39.)
- [10] 任冬莲, 任天佑, 刘学义, 等. 适用于大豆育种应用的抗旱性鉴定技术研究[J]. 华北农学报, 1997, 12(1): 61-64. (Ren D L, Ren T Y, Liu X Y, et al. Studies on the identification methods of soybean drought-resistant suitable for soybean breeding [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 1997, 12(1): 61-64.)
- [11] 谢甫绵, 董钻, 孙艳环, 等. 不同生育期干旱对大豆生长和产量的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 1994, 25(1): 13-16. (Xie F T, Dong Z, Sun Y H, et al. Effect of drought at different growth stages on growth and yield in soybean [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 1994, 25(1): 13-16.)
- [12] 孙义春, 郭有泉, 初元浦. 高寒地区大豆45 cm 双行密植栽培技术模式[J]. 作物杂志, 2007(1): 51-52. (Sun Y C, Guo Y Q, Chu Y P. 45 cm double-row close planting of soybean cultivation practices at Alpine region [J]. Crops, 2007(1): 51-52.)
- [13] 山仑. 旱地农业生理生态基础[M]. 北京: 科学出版社, 1998. (Shan L. The basis of physiological and ecological in dryland agriculture [M]. Beijing: Science Press, 1998.)
- [14] 孙慶, 易自力, 蒋建雄, 等. 植物抗旱基因及其在草坪草中的应用[J]. 生物技术通报, 2007(4): 22-26. (Sun A, Yi Z L, Jiang J X, et al. Gene engineering on plant drought-resistance and use in the turf grass [J]. Biotechnology Bulletin, 2007(4): 22-26.)
- [15] 史兰波, 李云荫. 水分胁迫对冬小麦幼苗几种生理指标和叶绿体超微结构的影响(简报)[J]. 植物生理学通讯, 1990(2): 28-31. (Shi L B, Li Y Y. Effects of water stress on several physiological indicators of winter wheat seedlings and chloroplast ultrastructure [J]. Plant Physiology Communications, 1990(2): 28-31.)
- [16] 唐益苗, 赵昌平, 高世庆, 等. 植物抗旱相关基因研究进展[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(1): 166-173. (Tang Y M, Zhao C P, Gao S Q, et al. Advances in genes related to plant drought tolerance [J]. Journal of Triticeae Crops, 2009, 29(1): 166-173.)