



不同耐旱型大豆生理特性对不同降雨条件的响应

闫春娟, 王文斌, 曹永强, 孙旭刚, 宋书宏, 王昌陵, 张立军

(辽宁省农业科学院 作物所, 辽宁 沈阳 110161)

摘要:为明确不同耐旱基因型大豆生理性状对不同降雨气候条件的响应,田间条件下,以耐旱型品种辽豆 14 和干旱敏感型品种辽豆 21 为研究对象,探讨半干旱地区阜新和湿润半湿润地区沈阳对两品种生理特性及产量的影响。分别比较大豆植株 V4、R2、R4 和 R6 时期的叶绿素含量、株高、植株各部位鲜重、干重。结果表明:一般而言,在湿润半湿润地区沈阳种植的大豆植株的叶绿素含量高于半干旱地区阜新。一般情况下,植株根、茎、叶、叶柄和豆荚的含水量均表现为,同一时期,同一品种,沈阳的值高于阜新,但部分取样时期处理间未达显著差异水平;品种对根含水量的影响则因取样时期和地点的不同而表现出差异;大豆植株茎、叶、叶柄、豆荚的含水量均表现为,同一时期,同一地点,耐旱品种辽豆 14 的值高于干旱敏感型品种辽豆 21,但多数情况下处理间未达到显著差异水平。植株各部位器官生物量的变化表现为,除 R4 期植株的根生物量和茎生物量、R6 期的豆荚生物量表现为,同一品种辽豆 14 阜新种植高于沈阳种植,且差异不显著外;其它各时期各器官的生物量均表现为,同一品种辽豆 14 或者辽豆 21,沈阳种植均高于阜新种植。成熟期大豆植株的器官分配比例表现为:子粒 > 荚皮 > 根、茎。子粒的分配比例为,辽豆 14 > 辽豆 21;而荚皮、根、茎的分配比例则为,辽豆 21 > 辽豆 14。大豆单株荚数与产量变化相一致。干旱胁迫降低了单株荚数、每荚粒数、单株产量和小区产量却提高了百粒重。辽豆 14 的单株荚数、每荚粒数、单株产量和小区产量均高于辽豆 21,但百粒重却低于辽豆 21。本研究结果明确了耐旱型大豆应答干旱胁迫的生理优势,丰富了辽宁省大豆抗逆栽培的理论知识。

关键词:生理特性;大豆;耐旱型;降雨特征

Response of Physiological Characteristics of Different Drought-tolerant Soybean Varieties to Different Rainfall Climatic Conditions

YAN Chun-juan, WANG Wen-bin, CAO Yong-qiang, SUN Xu-gang, SONG Shu-hong, WANG Chang-ling, ZHANG Li-jun

(Crop Institute of Liaoning Academy of Agricultural Science, Shenyang 110161, China)

Abstract: Field experiments were conducted to study the effects of different rainfall climatic conditions on the physiological characteristics of different soybean varieties. Compared the chlorophyll content, plant height, fresh and dry weight of soybean plant at V4, R2, R4 and R6 stages. Results indicated that, in general, the chlorophyll content of Shenyang located in humid and semi-humid area were higher than that of Fuxin located in semi-arid region. Generally, plant root water content, stem water content, leaf water content, petiole water content and bean pod moisture content had the similar change trends, the value of Shenyang in the same cultivar were higher than that of Fuxin, but the difference were not significant between some sampling periods, the effect of varieties on root water content was different at different sampling periods and locations. In general, stem water content, leaf water content, petiole water content and bean pod moisture content of soybean plants all showed that the value of Liaodou 14 was higher than that of Liaodou 21 in the same period and the same location, but in most cases it did not reach significant differences level between treatments. The changes of the biomass of different parts of the plant showed that, except for root biomass, stem biomass of R4 and bean pod biomass of R6, the value of Fuxin was higher than that in Liaodou 14 in Shenyang, and the difference was not significant. The biomass of other organs in all stages showed that the value of Shenyang were higher than the value of Fuxin with the same variety, but only a few significant differences were found among the treatments. The organs distributed proportion of soybean plants at mature stage showed the order of seed > pod > root or stem. Liaodou 14 had higher seed distribution ratio than Liaodou 21, while showed lower the distribution ratio of the pods, roots and stems. This tendency of pods per plant was consistent with yield. Drought stress reduced the pods per plant, seeds per pods, yield per plant and plot yield, but increased the 100-seed weight. Liaodou 14 showed higher pods per plant, seeds

收稿日期:2018-01-02

基金项目:辽宁省创新人才培养计划(2014027, 2015029);国家大豆产业技术体系(CARS-004-CES11);国家重点研发计划(2016YFD0100201-01, 2017YFD0101304-2);辽宁省中央引导地方科技发展专项(2017108006)。

第一作者简介:闫春娟(1983-),女,硕士,助理研究员,主要从事大豆育种与栽培研究。E-mail:yanchunjuan1983@163.com。

通讯作者:宋书宏(1964-),男,博士,研究员,主要从事大豆育种与栽培研究。E-mail:sshun@163.com;

曹永强(1977-),男,硕士,研究员,主要从事大豆遗传育种与栽培生理研究。E-mail:yongqiangcao@hotmail.com。

per pods, yield per plant and plot yield than Liaodou 21, but lower 100-seed weight than Liaodou 21. Therefore, the results could clarify the physiological advantages of drought-tolerant soybean in response to drought stress and further enrich the theoretical knowledge of soybean resistant cultivation in Liaoning province.

Keywords: Physiological characteristics; Soybean; Drought-tolerant variety; Rainfall characteristics

自 1996 年以来,我国已由世界上最大的大豆出口国转变为最大的进口国,因此提高大豆产量,增强国际竞争力,振兴我国大豆产业的任务已迫在眉睫。辽宁省隶属北方春大豆生产区,干旱是限制辽宁省西部地区作物生长的最主要自然灾害,提高品种的抗旱性是最为经济有效的措施,既减少产量的损失也避免水资源的浪费,因此深入了解耐旱型大豆对于干旱逆境的响应,是对作物进行合理调控、实现大豆种植节水的前提。

耐旱大豆品种在形态和生理功能上存在异于常规品种的特异性。耐旱性强的品种生育期短、叶片较小且厚,水分亏缺时保持较高的叶绿素值^[1-3]。有研究指出,耐旱品种一般具有较发达的根系,利于干旱逆境下植株吸收更多土壤水分^[4-6]。也有一些研究指出,干旱逆境下,耐旱品种一般具有更高的根和叶片含水量^[7-8]。但这些研究多为同一时期的比较且主要针对根和叶片含水量。据此,本研究进一步探讨不同生育时期,耐旱基因型大豆叶绿素含量、各部位器官的含水量、生物产量等对不同降雨气候条件的响应,以期对辽宁省大豆抗旱生产栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试品种为耐旱型品种辽豆 14 和干旱敏感型品种辽豆 21,二者均为辽宁省农业科学院选育的优良大豆品种。辽豆 14,亚有限结荚习性,株高 89.3 cm,白花,灰毛。辽豆 21,亚有限结荚习性,株高 87.6 cm,紫花,灰毛。

1.2 试验设计

试验于 2015 年在辽宁省沈阳(N41°49', E123°32')和阜新(N42°13', E121°72')进行。其中沈阳为湿润-半湿润地区,年均降雨量 716.2 mm,年均气温 6~8℃,≥10℃活动积温 3 300~3 400℃,无霜期 155~180 d。阜新为半干旱地区,年均降水量 500 mm,年均气温 7.2℃,≥10℃活动积温 3 298.3℃,无霜期 150 d。

试验将辽豆 14 和辽豆 21 分别种植在阜新和沈阳。试验共 4 个处理,分别为:F14-阜新(干旱)+辽豆 14;F21-阜新(干旱)+辽豆 21;S14-沈阳(非干旱)+辽豆 14;S21-沈阳(非干旱)+辽豆 21。小区设 8 行区,行长 7 m,垄距 0.6 m,小区面积 33.6 m²,重复 3 次。密度设 16.67 万株·hm⁻²。

1.3 测定项目与方法

分别在大豆的 4 节期(V4)、盛花期(R2)、盛荚期(R4)、鼓粒期(R6),测定植株倒三叶的叶绿素含量,叶绿素含量的测定采用 SPAD-502 叶绿素仪测定。同时在这 4 个时期取样测定株高、植株各部位鲜重、干重(105℃杀青 30 min,80℃烘至恒重)、计算植株各部位含水量,各部位鲜重的测定将电子秤充电后带入试验田,放入挡风盒子中,为避免水分的流失,取样后直接称鲜重。植株各器官含水量(%)=(器官鲜重-器官干重)/器官鲜重×100。

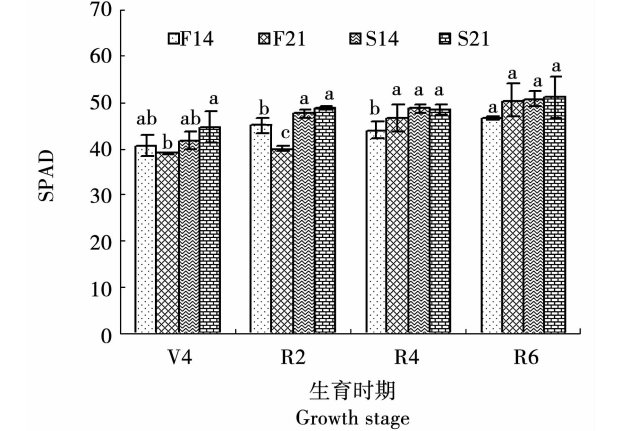
1.4 数据分析

用 Excel 2003 对数据进行处理和绘图分析,用统计分析软件 DPS 7.05 进行数据的统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同降雨条件对不同耐旱型大豆品种叶绿素含量的影响

由图 1 所示,一般情况下,沈阳植株的叶绿素含量高于半干旱地区阜新,且在 V4 期和 R2 期,S21 显著高于 F21;R2 期和 R4 期,S14 显著高于 F14。品种对叶绿素含量的影响则因生育时期和取样地点的不同而表现各异,V4 期和 R2 期,阜新地区是辽豆 14 的叶绿素 SPAD 值高于辽豆 21,且 R2 期差异显著,而沈阳地区,则是辽豆 21 的值更高,但差异不显著;R4 期和 R6 期,阜新地区,辽豆 21 的叶绿素 SPAD 值高于辽豆 14,且 R4 期差异显著,沈阳地区,R4 期辽豆 14 的值高,而 R6 期辽豆 21 的值高,但差异均不显著。



不同小写字母分别表示差异达 5% 显著水平。下同。
Different lowercase mean significant difference at 5% level, respectively. The same as follow.

图 1 不同耐旱型大豆叶绿素含量的变化
Fig. 1 The change in SPAD value of soybean between different drought-tolerant soybean varieties

2.2 不同降雨条件对不同耐旱基因型大豆品种株高的影响

如图2所示,随着植株的不断生长,株高逐渐增大,V4时期沈阳地区的辽豆21株高显著高于其它处理;R2和R4期处理间株高均未达到显著差异水平;R6期以F14处理株高最高且显著高于其它处理。

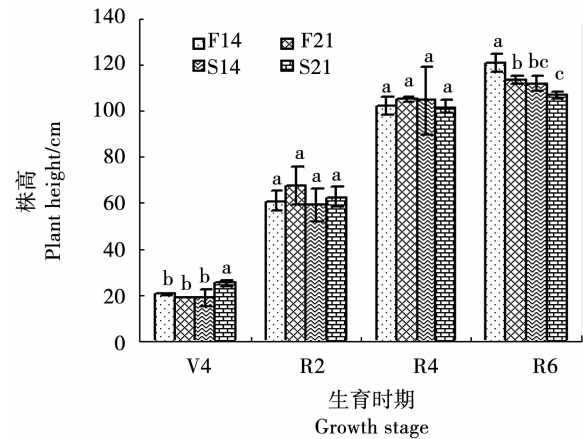


图2 不同耐旱型大豆株高的变化

Fig. 2 The change in plant height between different drought-tolerant soybean varieties

2.3 不同降雨条件对不同耐旱基因型大豆植株含水量的影响

2.3.1 根含水量的变化 如图3所示,一般情况下植株根含水量表现为,同一品种,沈阳地区的根含水量高于阜新地区,且在V4和R4期,处理S21显著高于F21,处理S14高于F14;R2期,S14和S21显著高于F14和F21;而R6期,处理间差异不显著。而品种间根含水量的变化则因取样时期和地点的不同而表现出差异。

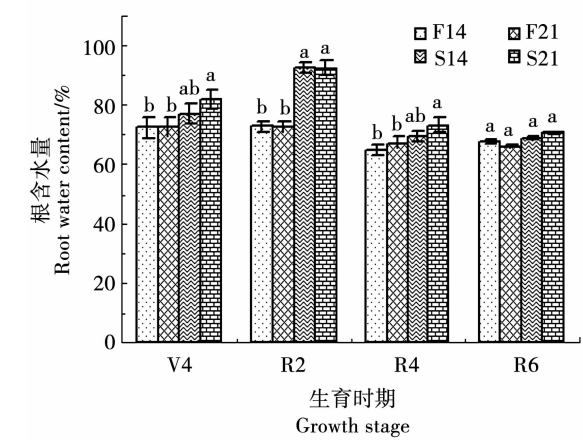


图3 不同耐旱型大豆根含水量的变化

Fig. 3 The change in root water content between different drought-tolerant soybean varieties

2.3.2 茎含水量的变化 如图4所示,一般情况下,植株茎含水量表现为,同一品种,沈阳地区的茎含水量高于阜新地区,且V4时期S14显著高于F14。同一地点,辽豆14茎含水量高于辽豆21,在V4时期S14显著高于S21,R4时期F14显著高于F21,这可能是辽豆14更耐旱的原因之一。

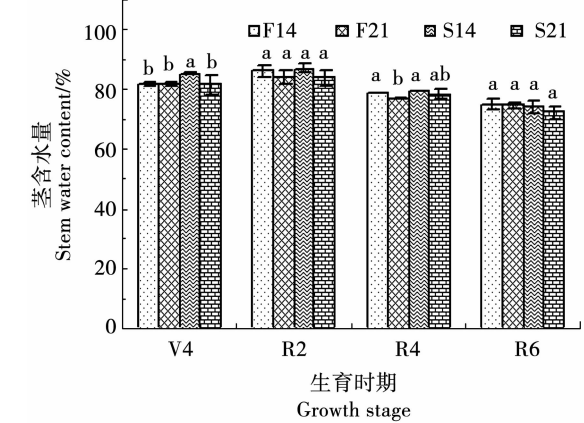


图4 不同耐旱型大豆茎含水量的变化

Fig. 4 The change in stem water content between different drought-tolerant soybean varieties

2.3.3 叶含水量的变化 由图5可知,一般而言,植株叶含水量表现为,同一品种,沈阳地区的叶含水量高于阜新地区,且V4和R4时期处理间差异显著。而品种间叶含水量的变化表现为,同一地点,耐旱型品种辽豆14的值高于干旱敏感型品种辽豆21。

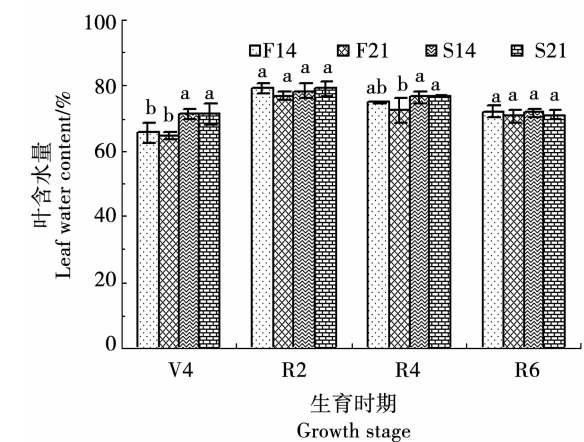


图5 不同耐旱型大豆叶含水量的变化

Fig. 5 The change in leaf water content between different drought-tolerant soybean varieties

2.3.4 叶柄含水量的变化 由图6可知,一般情况下,植株叶柄含水量表现为,同一品种,沈阳地区的叶柄含水量高于阜新地区,且V4时期S21显著高于F21。同一地点,耐旱型品种辽豆14叶柄含水量略高于干旱敏感型品种辽豆21。

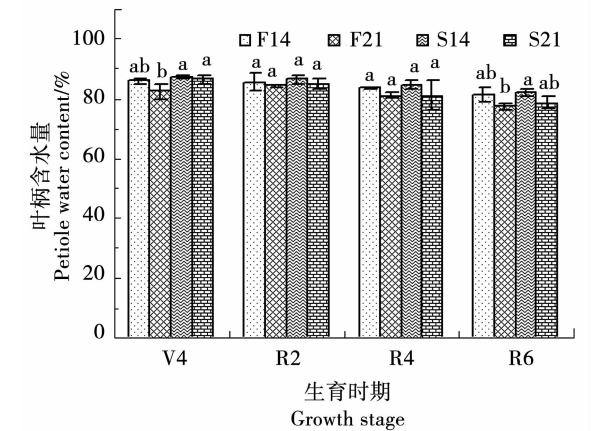


图6 不同耐旱型大豆叶柄含水量的变化

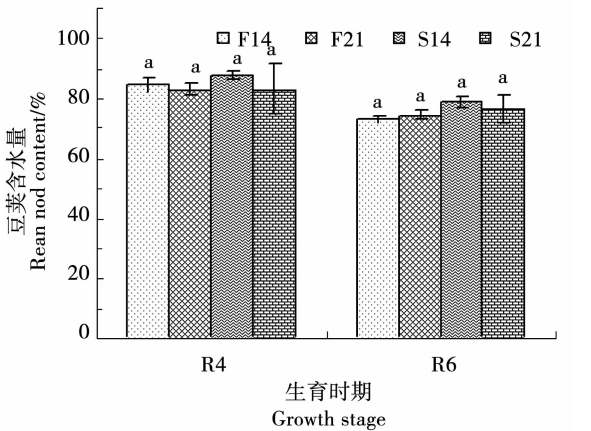


图7 不同耐旱型大豆豆荚含水量的变化

Fig. 6 The change in petiole water content between different drought-tolerant soybean varieties

Fig. 7 The change in bean pod water content between different drought-tolerant soybean varieties

2.3.5 豆荚含水量的变化 由图7可以看出,植株豆荚含水量表现为,同一品种,沈阳地区的豆荚含水量高于阜新地区,但各时期处理间差异并不显著。同一时期,同一地点,耐旱型品种辽豆14豆荚含水量略高于干旱敏感型品种辽豆21,但各时期处理间未达到显著差异水平。

高于F21;茎生物量表现为,S21值最高并显著高于其它处理的茎生物量。R2时期,大豆植株的根、茎、叶、叶柄生物量表现为,S14高于F14,S21高于F21,其中叶生物量处理间达显著差异。R4时期,大豆植株的根、茎生物量表现为,S14低于F14,S21高于F21,但处理间差异不显著;叶、叶柄、豆荚生物量均表现为,S14高于F14,S21高于F21。R6时期,大豆植株的根、茎、叶、叶柄生物量均表现为,S14高于F14,S21高于F21;豆荚生物量表现为,F14高于S14,S21高于F21。

2.4 不同降雨条件对不同耐旱型大豆生物量的影响

如表1所示,V4时期,大豆植株的根、叶、叶柄生物量表现为:同一品种,湿润半湿润地区沈阳的值高于半干旱地区阜新的值,即S14高于F14,S21

表1 大豆生物量的变化					
Table1 Variation of biomass in treatments of soybean					
(g·株 ⁻¹)					
生育时期 Growth stage	部位 Part	F14	F21	S14	S21
V4	根 Root	0.91 ± 0.04 bA	1.08 ± 0.16 abA	1.36 ± 0.13 aA	1.36 ± 0.26 aA
	茎 Stem	1.18 ± 0.07 bAB	1.19 ± 0.27 bAB	1.10 ± 0.30 bB	2.11 ± 0.34 aA
	叶 Leaf	3.52 ± 0.17 aA	3.49 ± 0.76 aA	3.90 ± 0.82 aA	4.73 ± 0.82 aA
	叶柄 Petiole	0.64 ± 0.03 bA	0.67 ± 0.28 abA	0.97 ± 0.25 abA	1.11 ± 0.16 aA
R2	根 Root	3.75 ± 0.64 aA	3.79 ± 0.62 aA	3.90 ± 0.34 aA	3.87 ± 1.08 aA
	茎 Stem	6.09 ± 1.38 abA	5.28 ± 0.38 aA	6.93 ± 0.86 aA	7.28 ± 0.55 aA
	叶 Leaf	8.64 ± 0.65 bA	7.52 ± 0.95 bA	10.64 ± 0.59 aA	10.13 ± 3.39 aA
	叶柄 Petiole	4.36 ± 1.14 aA	3.39 ± 0.82 bA	4.61 ± 0.48 aA	4.10 ± 1.37 aA
R4	根 Root	6.22 ± 1.94 aA	4.13 ± 1.08 aA	5.84 ± 2.10 aA	4.52 ± 1.66 aA
	茎 Stem	17.98 ± 1.33 aA	16.61 ± 3.18 aA	17.43 ± 1.04 aA	18.04 ± 2.36 aA
	叶 Leaf	18.10 ± 1.00 aA	14.51 ± 3.29 bA	18.26 ± 2.48 aA	16.80 ± 1.58 abA
	叶柄 Petiole	11.30 ± 1.68 abA	7.57 ± 1.85 bA	11.72 ± 1.81 aA	9.10 ± 1.18 abA
	豆荚 Bean pod	1.10 ± 0.59 aA	1.84 ± 1.03 aA	1.11 ± 0.29 aA	1.36 ± 0.50 aA

续表 1

生育时期 Growth stage	部位 Part	F14	F21	S14	S21
R6	根 Root	3.51 ± 0.78 bA	3.67 ± 0.43 bA	4.67 ± 0.46 abA	6.10 ± 1.72 aA
	茎 Stem	16.61 ± 0.92 bB	18.30 ± 1.01 bBA	18.93 ± 2.49 bAB	21.66 ± 1.19 aA
	叶 Leaf	11.33 ± 3.05 bA	13.09 ± 1.99 bA	14.75 ± 1.61 abA	18.12 ± 1.10 aA
	叶柄 Petiole	7.31 ± 1.59 aA	8.24 ± 0.53 aA	9.18 ± 1.13 aA	8.75 ± 0.76 aA
	豆荚 Bean pod	16.87 ± 3.47 aA	17.79 ± 2.91 aA	13.18 ± 4.62 aA	18.32 ± 7.76 aA

2.5 不同降雨条件对不同耐旱型大豆成熟期器官分配的影响

由图 8 可知,成熟期大豆植株的器官比例表现为:子粒>荚皮>根、茎,其中以子粒比例最高,各处理均高于 55%,且辽豆 14 的子粒比例高于辽豆 21;同一品种,沈阳地区的子粒比例高于阜新地区,即:S14>F14;S21>F21。荚皮分配比例为 20%~23%,表现为,任一地点,辽豆 21 的荚皮比例

高于辽豆 14;同一品种,沈阳地区的荚皮比例高于阜新地区。根和茎的分配比例均为 7%~10%,且均表现为,无论任一地点,干旱敏感型品种辽豆 21 的值高于耐旱型品种辽豆 14;而不同降雨气候对其影响并未表现出明显的规律。

2.6 不同气候对不同耐旱型大豆产量及其构成要素的影响

由表 2 可知,地点显著影响大豆单株荚数、百粒重、小区产量;基因型显著影响了单株荚数、每荚粒数、百粒重、单株产量和小区产量;二者互作对所有性状的影响均未达到显著差异。多重比较结果可以看出,单株荚数、单株产量和小区产量的变化相一致,即同一地点(降雨条件相同),辽豆 14 高于辽豆 21,即:S14>S21,F14>F21;同一品种,沈阳地区的值高于阜新,即:S14>F14,S21>F21。每荚粒数的变化表现为,同一地点,辽豆 14 高于辽豆 21,即:S14>S21,F14>F21;同一品种,阜新的值高于沈阳,即:F14>S14,F21>S21,即干旱胁迫提高了同一品种的每荚粒数。百粒重表现为,干旱敏感型品种辽豆 21 的值高于耐旱型品种辽豆 14,阜新的值高于沈阳,即干旱胁迫提高了不同干旱敏感型大豆品种的百粒重。

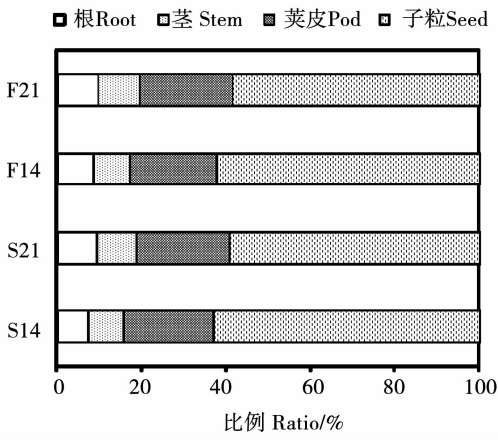


图 8 成熟期处理间器官分配比例
Fig. 8 The organs distribution ratio of soybean between treatments at maturity stage

表 2 不同基因型大豆产量及其构成要素对不同降雨条件的响应

Table 2 Response on yield and yield components of different soybean genotypes to different rainfall conditions						
地点 Location	基因型 Genotype	单株荚数 Pods per plant	每荚粒数 Seeds per pod	百粒重 100-seed weight/g	单株产量 Yield per plant/g	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)
沈阳 Shenyang	辽豆 14 Liaodou 14	84.27 ± 24.16 aA	2.30 ± 0.14 abAB	15.38 ± 0.30 dC	29.82 ± 9.08 aA	3449.44 ± 66.97 aA
	辽豆 21 Liaodou 21	64.27 ± 16.93 abA	1.93 ± 0.32 bB	18.96 ± 0.80 bB	22.80 ± 2.46 bBC	3149.37 ± 278.37 abA
阜新 Fuxin	辽豆 14 Liaodou 14	63.80 ± 1.71 abA	2.55 ± 0.05 aA	17.24 ± 0.76 cB	28.03 ± 0.26 aAB	3191.31 ± 221.23 abA
	辽豆 21 Liaodou 21	44.87 ± 5.16 bA	2.18 ± 0.08 abAB	22.34 ± 0.64 aA	21.83 ± 2.16 bC	2841.08 ± 71.07 bA
方差分析(ANOVA)						
地点 Location		*	ns	***	ns	*
基因型 Genotype		*	*	***	***	*
地点×基因型(L×G)						
Location×Genotype		ns	ns	ns	ns	ns

*: $P<0.05$ 水平存在显著差异; ***: $P<0.001$ 水平存在极显著差异。
*: There is significant difference at $P<0.05$ level; ***: There is extremely significant difference at $P<0.001$ level.

3 讨论

叶绿素是光合色素中重要的色素分子^[9],而光合能力的强弱是判断品种抗旱性能的重要参数^[10],一些研究指出,随着干旱胁迫程度的增强叶绿素含量显著降低^[11],且品种间存在一定差异^[12],与本试验结果相吻合。干旱胁迫诱发植株失水,从而降低植株的含水量,这在许多试验中已被证实^[13-14],本试验结果也表明,大豆植株根、茎、叶、叶柄、豆荚含水量均表现为湿润半湿润地区沈阳的值高于半干旱地区阜新的值。而在干旱胁迫条件下,植株叶片含水量减少程度在一定程度上反映其抗旱性的强弱,保水力越好的植物,其叶片含水量减少越小^[15],本研究结果也发现,一般情况下,大豆植株的茎含水量、叶含水量、叶柄含水量、豆荚含水量均表现为,同一时期,同一地点,耐旱品种辽豆 14 的值高于干旱敏感性品种辽豆 21。干旱胁迫降低植株的生物产量,这在前人的诸多研究中已被证实^[16-17],本研究中也发现,除 R4 期植株的根生物量、茎生物量、R6 期的豆荚生物量表现为,半干旱地区 F14 值高于 S14,且差异不显著外,其它各时期各器官的生物量均表现为,S14 高于 F14,S21 高于 F21,即干旱降低了同一品种的生物产量。

作物在外界环境不断变化的条件下,具有维持自身机能的能力,能够维持自身的新陈代谢和同化产物的分配,使各器官比例协调。这种器官间的比例关系,称之为器官平衡^[18]。先前的研究多数是生育前期大豆各器官的平衡分配^[19-20]。本研究探讨成熟期大豆各器官分配的比例,发现成熟期大豆植株的器官比例表现为:子粒 > 荚皮 > 根、茎。子粒的分配比例为,辽豆 14 > 辽豆 21;同一品种,S14 > F14;S21 > F21。荚皮、根、茎的分配比例为,辽豆 21 的根和茎分配比例高于辽豆 14;且荚皮分配表现为,同一品种,S14 > F14;S21 > F21。

大豆的产量是单株荚数、每荚粒数、百粒重的综合体现,这些构成要素在大豆的发育期间先后连续地表现出来。本研究中地点对大豆单株荚数、单株产量和小区产量的影响一致,降雨和品种主要通过提高单株荚数来实现提高产量的,这与先前研究结果一致^[21]。本研究中,干旱胁迫降低了单株荚数、每荚粒数、单株产量和小区产量,但却提高了百粒重。辽豆 14 的单株荚数、每荚粒数、单株产量和小区产量高于辽豆 21,但百粒重却低于辽豆 21。

4 结论

本研究结果表明:一般而言,大豆植株的叶绿

素含量和各器官的含水量均表现为沈阳的值高于阜新。同一降雨条件下,大豆植株各器官含水量均表现为,耐旱品种辽豆 14 的值高于干旱敏感型品种辽豆 21。植株各器官的生物量表现为,同一品种沈阳的值高于阜新。成熟期大豆植株的器官分配比例表现为:子粒 > 荚皮 > 根、茎。子粒的分配比例为,辽豆 14 > 辽豆 21;而荚皮、根、茎的分配比例则为,辽豆 21 > 辽豆 14。干旱胁迫降低了单株荚数、每荚粒数、单株产量和小区产量,但却提高了百粒重。辽豆 14 的单株荚数、每荚粒数、单株产量和小区产量高于辽豆 21,但百粒重却低于辽豆 21。

参考文献

[1] Sánchez F J, Andrés E F, Tenorio J L, et al. Growth of epicotyls, turgor maintenance and osmotic adjustment in pea plants (*Pisum sativum* L.) subjected to water stress [J]. *Field Crops Research*, 2004, 86: 81-90.

[2] 阎勇,罗兴录,张兴思,等.不同供水条件下玉米耐旱生理特性比较[J].*中国农学通报*,2007, 23(9):323-326. (Yan Y, Luo X L, Zhang X S, et al. Comparison of maize physiological characters under different treatment of irrigation [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(9):323-326.)

[3] Rolando O T, Kenneth L M, Casiana V C, et al. Screening of rice genebank germplasm for yield and selection of new drought tolerance donors [J]. *Field Crops Research*, 2013, 147: 12-22.

[4] Serraj J K, Kumar J, Chandra S, et al. Variation in root traits of chickpea (*Cicer arietinum* L.) grown under terminal drought [J]. *Field Crops Research*, 2004, 88: 115-127.

[5] Chu G, Chen T, Wang Z, et al. Morphological and physiological traits of roots and their relationships with water productivity in water-saving and drought-resistant rice [J]. *Field Crops Research*, 2014, 162(6):108-119.

[6] 赵跃. 辽宁主栽花生品种耐旱性差异及其对干旱胁迫的响应机制研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学,2016. (Zhao Y. Studies on drought resistance and its response to drought stress of main peanut varieties in Liaoning [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016.)

[7] 张海燕,郭忠军,姚正培,等.抗旱、敏旱棉花材料苗期根系特性研究[J].*新疆农业科学*,2014, 51(10): 1772-1776. (Zhang H Y, Guo Z J, Yao Z P, et al. The growing situation of cotton under the simulate hydroponic drought condition [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2014, 51(10): 1772-1776.)

[8] 路之娟,张永清,张楚,等.不同基因型苦荞苗期抗旱性综合评价及指标筛选[J].*中国农业科学*,2017, 50(17):3311-3322. (Lu Z J, Zhang Y Q, Zhang C, et al. Comprehensive evaluation and indicators of the drought resistance of different genotypes of *Fagopyrum tataricum* at seedling stage [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(17):3311-3322.)

[9] 陈雅彬,李凤海.不同玉米品种及亲本苗期抗旱指标测定及抗旱性分析[J].*辽宁农业科学*,2006(2):32-34. (Chen Y B, Li F H. Identification of drought resistance indexes of different maize

varieties and its parents during seedling period [J]. Liaoning Agricultural Sciences, 2006(2):32-34.)

[10] 孙继颖,高聚林,薛春雷,等. 不同品种大豆抗旱性能比较研究[J]. 华北农学报,2007,22(6): 91-97. (Sun J Y, Gao J L, Xue C L, et al. Comparative experiment on drought resistant characters of different soybean varieties [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2007, 22(6): 91-97.)

[11] 董守坤,赵坤,刘丽君,等. 干旱胁迫对春大豆叶绿素含量和根系活力的影响[J]. 大豆科学,2011, 30(6): 949-953. (Dong S K, Zhao K, Liu L J, et al. Effect of drought stress on chlorophyll content and root activity of spring soybean [J]. Soybean Science, 2011, 30(6): 949-953.)

[12] 寿惠霞,朱丹华,陈彩霞,等. 8 个春大豆品种对旱境的反应及抗旱指标初探[J]. 浙江农业科学,1991(6): 278-281. (Shou H X, Zhu D H, Chen C X, et al. Responses of 8 spring soybean varieties to dry upland and index of drought resistance [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 1991(6): 278-281.)

[13] 赵博生,衣艳君,刘家尧. 外源甜菜碱对干旱/盐胁迫下的小麦幼苗生长和光合功能的改善[J]. 植物学通报,2001, 18(3): 378-380. (Zhao B S, Yi Y J, Liu J Y. Exogenous betaine improves the growth and photosynthesis of wheat seedlings under drought/salt stress [J]. Chinese Bulletin of Botany, 2001, 18(3): 378-380.)

[14] 郑玉红,蔡庆生,刘建秀. 水分胁迫对几种假俭草的影响[J]. 草地学报,2005,13(2): 102-105. (Zheng Y H, Cai Q S, Liu J X. Response of centipedegrass [*Eremochloa ophiuroides* (Munro.) Hack.] accessions to water stress [J]. Acta Agrestia Sinica, 2005, 13(2):102-105.)

[15] 王丽娜,克热木·伊力,侯江涛. 水分胁迫对扁桃砧木叶片脯氨酸、可溶性蛋白质、质膜透性、相对含水量的影响[J]. 新疆农业大学学报,2006, 29(3): 175-186. (Wang L N, Karim A, Hou J T. Effects of water stress on proline, soluble protein, membrane permeability, relative water content of almond rootstock [J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2006, 29(3): 175-186.)

[16] 李冬琴,曾鹏程,陈桂葵,等. 干旱胁迫对 3 种豆科灌木生物量分配和生理特性的影响[J]. 中南林业科技大学学报,2016, 36(1): 33-39. (Li D Q, Zeng P C, Chen G K, et al. Effects of drought stress on biomass distribution and physiological characteristics in three kinds of leguminous shrubs [J]. Journal of Central South Forestry University, 2016, 36(1): 33-39.)

[17] 胡继超,曹卫星,姜东,等. 小麦水分胁迫影响因子的定量研究. I 干旱和渍水胁迫对光合、蒸腾及干物质积累与分配的影响[J]. 作物学报,2004, 30(4): 315-320. (Hu J C, Cao W X, Jiang D, et al. Quantification of water stress factor for crop growth simulation. I. Effects of drought and waterlogging stress on photosynthesis, transpiration and dry matter partitioning in winter wheat [J]. Acta Agronomica Sinica, 2004, 30(4): 315-320.)

[18] 董钻. 大豆器官平衡与产量[J]. 辽宁农业科学,1981(3): 14-21. (Dong Z. Organ equilibrium and yield on soybean [J]. Liaoning Agricultural Sciences, 1981(3): 14-21.)

[19] 白伟,孙占祥,刘晓晨,等. 苗期水分胁迫对大豆器官平衡和产量的影响[J]. 大豆科学,2009, 28(1): 59-62. (Bai W, Sun Z X, Liu X C, et al. Effect of water stress at seedling on organ equilibrium and yield of soybean [J]. Soybean Science, 2009, 28(1): 59-62.)

[20] 关晓雪,宋书宏,董丽杰,等. 不同结荚习性大豆的器官平衡与产量的关系[J]. 大豆科学,2009, 28(2): 221-224. (Guan X X, Song S H, Dong L J, et al. Relation between organ balance and yield in soybean of different podding habits [J]. Soybean Science, 2009, 28(2): 221-224.)

[21] 闫春娟,宋书宏,王文斌,等. 灌溉对不同基因型大豆生理特性及产量的影响[J]. 大豆科学,2014, 33(6): 945-948. (Yan C J, Song S H, Wang W B, et al. Effect of irrigation on physiological characteristics and yield of different genotype soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) [J]. Soybean Science, 2014, 33(6): 945-948.)