



# 不同时期水分胁迫对御旱基因型大豆生理特性和产量的影响

闫春娟<sup>1</sup>, 王文斌<sup>1</sup>, 王昌陵<sup>1</sup>, 陈艳秋<sup>1</sup>, 张立军<sup>1</sup>, 韩 进<sup>1,2</sup>, 都梓月<sup>1,2</sup>, 李盛有<sup>1</sup>

(1. 辽宁省农业科学院作物所, 辽宁 沈阳 110161; 2. 东北农业大学 农学院, 黑龙江 哈尔滨 150030)

**摘 要:**为探讨御旱基因型大豆应答干旱胁迫生理和产量的响应机制,以御旱型辽豆 14 和干旱敏感型辽豆 21 为试验材料,分析不同生长阶段及抗性品种间的变化规律。2021 和 2022 年连续两年分析水分胁迫对大豆株高、叶面积指数、叶绿素含量、器官生物量、器官含水量、根冠比等生理特性,产量及相关性状的影响。结果表明:随着生育进程的推进,各处理植株的株高、叶面积指数、各器官生物量逐渐累积,整体表现为:鼓粒期 > 结荚期 > 开花期 > 营养生长期。各个时期控水土壤干旱胁迫使植株的叶绿素含量、叶面积指数、株高、各器官含水量降低,但使植株的根冠比提高。相同水分条件下,叶绿素含量整体表现为辽豆 21 > 辽豆 14。植株各器官含水量表现为辽豆 14 > 辽豆 21。2021 年结荚期和鼓粒期控水时,辽豆 14 的叶面积指数和株高高于辽豆 21。同一时期控水,土壤水分提高使大豆根、茎、叶、叶柄、荚皮的干重提高,2020 年结荚期和鼓粒期控水时,御旱基因型辽豆 14 的叶柄干重均显著高于干旱敏感型辽豆 21。适宜土壤水分含量条件下两个品种的单株荚数、单株粒数和单株产量较高。各个时期控水,品种差异均显著影响大豆的单株荚数、单株粒数、百粒重和单株产量。同一时期相同水分条件下,大豆的单株荚数、单株粒数和单株产量表现为:辽豆 14 > 辽豆 21;而百粒重则表现为:辽豆 21 > 辽豆 14。本研究揭示了御旱基因型大豆应答干旱胁迫的生理特征,对指导我国大豆抗旱生产栽培具有重要的理论价值。

**关键词:**水分胁迫;大豆;御旱基因型;产量;生理特性

## Effects of Water Stress in Different Phases on Physiological Characteristics and Yield of Drought-avoidant Soybean

YAN Chunjuan<sup>1</sup>, WANG Wenbin<sup>1</sup>, WANG Changling<sup>1</sup>, CHEN Yanqiu<sup>1</sup>, ZHANG Lijun<sup>1</sup>, HAN Jin<sup>1,2</sup>, DU Ziyue<sup>1,2</sup>, LI Shengyou<sup>1</sup>

(1. Crop Institute of Liaoning Academy of Agricultural Science, Shenyang 110161, China; 2. College of Agriculture of Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** In order to explore the response mechanism of drought-avoidant soybean genotypes to drought stress, the drought-avoidant soybean Liaodou 14 and drought-sensitive soybean Liaodou 21 were used as experimental materials, the change law of different growth stages and different drought resistance varieties was analyzed. The effects of water stress on plant height, leaf area index, chlorophyll content, organ biomass, organ water content, root-shoot ratio, yield and related traits were analyzed in two consecutive years. The results showed that, with the advancement of the growth process, the plant height, leaf area index and biomass of each organ gradually accumulated under the condition of water control treatment, and the overall performance was: pod filling stage > podding stage > flowering stage > vegetative stage. In general, under soil drought stress condition, the chlorophyll content, leaf area index, plant height and water content of each organ of the plant decreased, but the root to shoot ratio of the plant increased when soil water was controlled at each period. In addition, the chlorophyll SPAD value generally showed as follows: Liaodou 21 > Liaodou 14. While the water content of each organ was as follows: Liaodou 14 > Liaodou 21 under the same water condition. In 2021, when soil water was controlled at podding stage and pod filling stage, the effects of varieties on leaf area index and plant height were as follows: Liaodou 14 > Liaodou 21. Moreover, soil water content increased the dry weight of root, stem, leaf, petiole and pod at the same water control period. The dry weight of petiole of Liaodou 14 was significantly higher than that of Liaodou 21 when water was controlled in podding stage and pod filling stage in 2020. Generally, soil water content increased pods number per plant, seeds number per plant and yield per plant for both varieties. Besides, pods number per plant, seeds number per plant, 100-seed weight and yield per plant were generally significantly affected by varieties during water control at the same stage. Furthermore, pods number per plant, seeds number per plant and yield per plant showed as follows: Liaodou 14 > Liaodou 21, while the 100-seed weight showed as follows: Liaodou 21 > Liaodou 14. Therefore, the results could clarify the physiological advantages of drought-tolerant soybean in response to drought stress and further enriched the theoretical knowledge of soybean stress resistant cultivation.

**Keywords:** water stress; soybean; drought-avoidant variety; yield; physiological characteristics

收稿日期:2023-11-10

基金项目:国家自然科学基金(32301782,32101795);国家大豆产业技术体系(CARS-004-CES11)。

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

通讯作者:王文斌(1968—),男,硕士,研究员,主要从事大豆育种与栽培研究。E-mail:wbwang@163.com。

大豆(*Glycine max*)是世界上主要的油料作物,随着新冠疫情在全球范围内持续发酵,中国大豆进口贸易迎来挑战<sup>[1]</sup>。作为中国最大的大豆生产基地,东北地区大豆播种面积经历 2009—2015 年连续下滑后,2017 年已经基本恢复至 500 万  $\text{hm}^2$ ,该地区大豆产量约占中国大豆总产量的 50%<sup>[2-4]</sup>。即便如此,我国大豆产量仅能满足需求的 13.0%<sup>[5]</sup>。大豆具有较高的营养价值,但单产水平较低,干旱是限制东三省大豆产量形成的最主要自然灾害。因此,研究干旱胁迫对植物的生理和形态等各方面的影响,探索其响应规律,这对于揭示植物对干旱的适应能力和抗旱机理具有重要意义。

干旱胁迫会引起植物体内水分亏缺、扰乱植物体内源库流的正常运行,导致植物生长受阻和产量降低<sup>[6]</sup>。长期而严重的干旱胁迫可抑制植株生长发育,导致植物外观矮小和生物量降低,甚至死亡<sup>[7]</sup>。干旱胁迫不仅会引起植物个体大小的变化,还会引起植物生物量分配改变。干旱胁迫下,植物根冠比增加,功能根数目及长度增加<sup>[8]</sup>。叶绿素是植物进行光合作用的物质基础,其含量可以反映植物的光合能力与生长情况,许多研究表明水分不足降低了植株的叶绿素含量<sup>[9-10]</sup>。为抵消干旱的负面影响,植物进化出了大量的适应性策略,例如增强根系生长以进入更深的土层,进而改善水分和营养吸收,关闭气孔以减少蒸腾性水分损失等<sup>[11-13]</sup>。另外植株需要同步调节大量基因的表达以适应干旱逆境<sup>[14]</sup>。有研究表明,干旱胁迫所引起的差异表达基因,主要集中于光合作用、脂质代谢、蛋白质生物合成等生物学过程<sup>[15-17]</sup>。植株的抗旱能力存在基因型差异<sup>[18]</sup>,通常抗旱基因型受干旱胁迫的抑制程度较低<sup>[19-20]</sup>。抗旱性强的品种具有较高的叶片含水量<sup>[21-22]</sup>,水分亏缺时能保持较高的叶绿素值<sup>[23-24]</sup>。

大豆的蒸腾系数高,需水量大,抗旱力相对较弱,初遇干旱胁迫时,大豆通过延长主根和增加根冠比来提高作物吸水能力适应干旱,但随干旱胁迫程度的加深和时期的延长,植物体内蛋白质合成减慢,植物细胞组织的分裂减缓,细胞质膜透性增大,相对电导率和丙二醛含量增加,最后导致生物膜的结构与功能发生变性,生长发育减缓,严重时会造成植株永久性萎蔫直至死亡<sup>[25-26]</sup>。干旱胁迫会引发大豆种子生理代谢功能紊乱,抑制株高生长和干物质积累,究其原因干旱胁迫抑制了大豆“源—

库”的正常运行,干旱导致根系吸水不畅,叶片气孔关闭致使“源”出现问题,进而造成“库”的亏缺,由此正是干旱胁迫下植株生长发育变慢的原因<sup>[27-28]</sup>。当前,有关干旱胁迫对大豆农艺和生理性状的影响前人已做了大量研究,但较少以御旱基因型大豆为研究对象。据此本研究探讨干旱胁迫对御旱基因型和干旱敏感型大豆生理特性和产量的影响,以期高效利用水肥资源的旱地农业生产提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

供试品种为御旱型辽豆 14 和干旱敏感型辽豆 21,均为辽宁省农业科学院选育的优良大豆品种。

### 1.2 试验设计

试验于 2020 和 2021 年在辽宁省沈阳市(41°49'N,123°32'E)辽宁省农业科学院电动可移动温室中进行。

供试土壤为发育于黄土母质的典型棕壤,采自辽宁省农业科学院试验田 0~20 cm 耕层土壤,前茬作物为大豆。2020 年土壤有机质含量 0.982%,全氮 0.138%,全磷 0.134%,全钾 2.380%,碱解氮  $89 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,有效磷  $18.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,有效钾  $116 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,pH6.68。2021 年土壤有机质含量 0.978%,全氮 0.146%,全磷 0.128%,全钾 2.594%,碱解氮  $109 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,有效磷  $17.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,有效钾  $144 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,pH6.84。

使用普通塑料桶,高 28 cm,上口直径 30 cm,下口直径 26 cm,每盆装土 18 kg。塑料桶放置于全自动遮雨棚中。二因素随机区组设计,二因素为品种和水分处理,品种为辽豆 14 和辽豆 21,设 3 个水分水平。水分设置分别为:干旱(W1),土壤含水量为田间持水量的 50%;轻度干旱(W2),土壤含水量为田间持水量的 60%;适宜水分(W3),土壤含水量为田间持水量的 80%。分别在大豆营养生长期(2020 年 5 月 20 日—6 月 13 日;2021 年 6 月 1—30 日)、开花期(2020 年 6 月 15 日—7 月 7 日;2021 年 7 月 1—14 日)、结荚期(2020 年 7 月 9 日—8 月 1 日;2021 年 7 月 16 日—8 月 11 日)和鼓粒期(2020 年 8 月 3—20 日;2021 年 8 月 12—27 日)进行水分调控,各处理组合在非控水时期保持适宜水分(W3)。每 1~2 d 测定土壤水分含量,采用称重法,补充水分至设定值。每盆播 4 粒,出苗后定苗 2 株,2020 年重复 6 次,其中 3 次重复用于各时期控水结束后取

样测定各器官生物量等指标,另外3次重复用于测定产量及其构成要素等指标。2021年重复3次,分别于各时期控水结束后测定各器官生物产量等指标。

1.3 测定项目及方法

每次控水结束后,采用 SPAD-502 叶绿素仪测定植株倒3叶的叶绿素 SPAD 值。取样测定植株的株高,植株各器官(根、茎、叶、叶柄和豆荚)的鲜重和干重,干重测定于 105 ℃ 杀青 30 min,80 ℃ 烘至恒重,测定并计算植株各器官的含水量、根冠比和叶面积指数,单位器官含水量(%)=[单位器官鲜重-单位器官干重]/单位器官鲜重×100<sup>[29]</sup>;根冠比为根干物重与地上部干物重的比例<sup>[30]</sup>;叶面积的测定采用称重法,叶面积指数为单位土地上作物叶片的总面积与占地面积的比值<sup>[30]</sup>。成熟后测定并计算单株产量、单株荚数、单株粒数和百粒重。

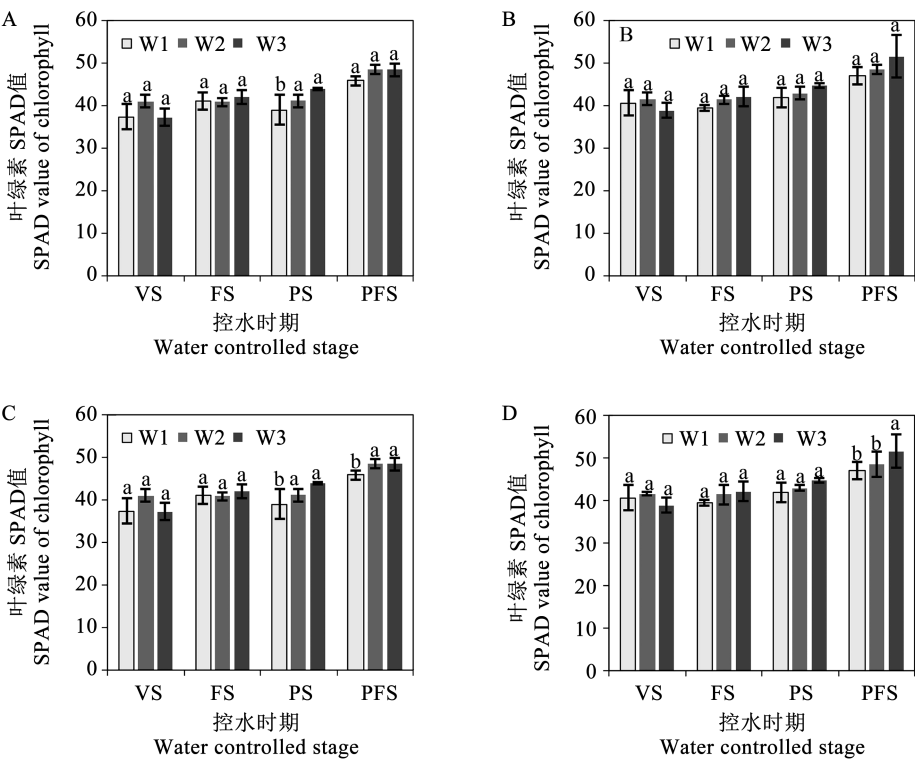
1.4 数据分析

采用 Excel 2003 对数据进行处理和绘图分析,采用 DPS 9.01 进行数据的统计分析。

2 结果与分析

2.1 大豆叶绿素 SPAD 值分析

不同时期控水条件下,御旱品种辽豆 14 与干旱敏感型品种辽豆 21 叶绿素 SPAD 值如图 1 所示,土壤干旱使植株的叶绿素 SPAD 值整体降低。2020 年,只有结荚期(PS)控水条件下,干旱胁迫使御旱型品种辽豆 14 叶绿素的 SPAD 值显著降低(图 1A);2021 年结荚期控水条件下,干旱胁迫使御旱型辽豆 14 叶绿素 SPAD 值显著降低(图 1C);2021 年鼓粒期(PFS)控水条件下,干旱胁迫使干旱敏感型品种辽豆 21 的叶绿素 SPAD 值显著降低(图 1D)。相同条件下(相同年份、相同控水时期、相同水分处理),辽豆 14 叶绿素 SPAD 值整体低于辽豆 21(图 1)。



注:A. 2020 年辽豆 14;B. 2020 年辽豆 21;C. 2021 年辽豆 14;D. 2021 年辽豆 21。VS. 营养生长期;FS. 开花期;PS. 结荚期;PFS. 鼓粒期。不同小写字母表示 0.05 概率水平上差异显著。下同。

Note: A. Liaodou 14 in 2020; B. Liaodou 21 in 2020; C. Liaodou 14 in 2021; D. Liaodou 21 in 2021. VS. Vegetative stage; FS. Flowering stage; PS. Podding stage; PFS. Pod filling stage. Different letter mean significant at the 0.05 probability level. The same below.

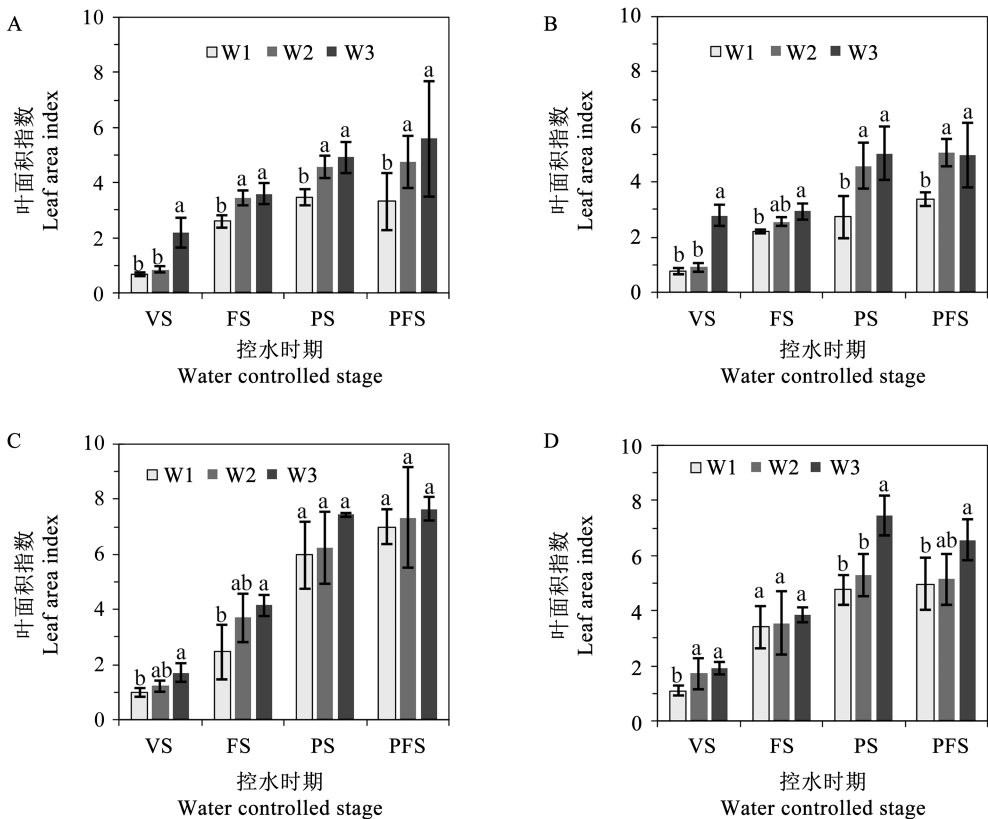
图 1 各时期水分胁迫对不同基因型大豆叶绿素 SPAD 值的影响

Fig. 1 Effecty of water stress on chlorophyll SPAD values of different soybean genotypes

2.2 大豆叶面积指数分析

如图 2 所示,随着植株的不断生长,植株叶面积指数逐渐增加。干旱(W1)和轻度干旱(W2)使植株的叶面积指数整体降低。2020 年各个时期控水条件下,干旱胁迫均使植株的叶面积指数显著降低(图 2A 和 B)。营养生长期(VS)和开花期(FS)控水条件下,干旱胁迫使御旱型品种辽豆 14 的叶面积

指数显著降低(图 2A 和 C);营养生长期(VS)、结荚期(PS)、鼓粒期(PFS)控水条件下,干旱胁迫使干旱敏感型品种辽豆 21 的叶面积指数显著降低(图 2B 和 D)。2021 年品种对叶面积指数的影响表现为,结荚期(PS)和鼓粒期(PFS)控水时,同一条件下,御旱型辽豆 14 的值均高于干旱敏感型辽豆 21 的值(图 2C 和 D)。



注:A. 2020 年辽豆 14;B. 2020 年辽豆 21;C. 2021 年辽豆 14;D. 2021 年辽豆 21。  
Note: A. Liaodou 14 in 2020; B. Liaodou 21 in 2020; C. Liaodou 14 in 2021; D. Liaodou 21 in 2021.

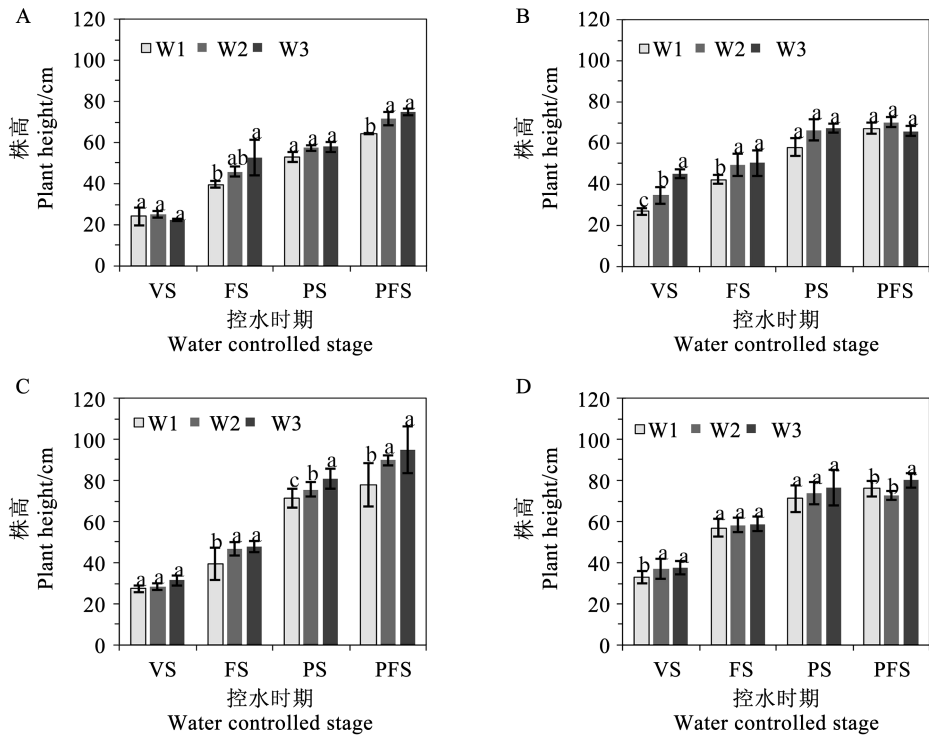
图 2 各时期水分胁迫对大豆叶面积指数的影响

Fig.2 Effects of water stress on leaf area index of different soybean genotypes

2.3 大豆株高分析

如图 3 所示,随着植株的不断生长,植株株高逐渐增加,一般情况下,干旱胁迫使大豆植株的株高降低。2020 年各个时期控水条件下,只有开花期(FS)和鼓粒期(PFS)控水时,干旱胁迫使御旱品种辽豆 14 植株的株高显著降低;只有营养生长期(VS)和开花期(FS)控水条件下,干旱胁迫使干旱

敏感型品种辽豆 21 的株高显著降低(图 3A 和 B)。2021 年花期(FS)、结荚期(PS)、鼓粒期(PFS)控水条件下,干旱胁迫使御旱型品种辽豆 14 的株高显著降低(图 3C 和 D)。营养生长期和鼓粒期控水时,干旱胁迫下干旱敏感型品种辽豆 21 的株高显著降低。2021 年结荚期和鼓粒期控水条件下,辽豆 14 的株高均高于辽豆 21。



注: A. 2020 年辽豆 14; B. 2020 年辽豆 21; C. 2021 年辽豆 14; D. 2021 年辽豆 21。  
Note: A. Liaodou 14 in 2020; B. Liaodou 21 in 2020; C. Liaodou 14 in 2021; D. Liaodou 21 in 2021.

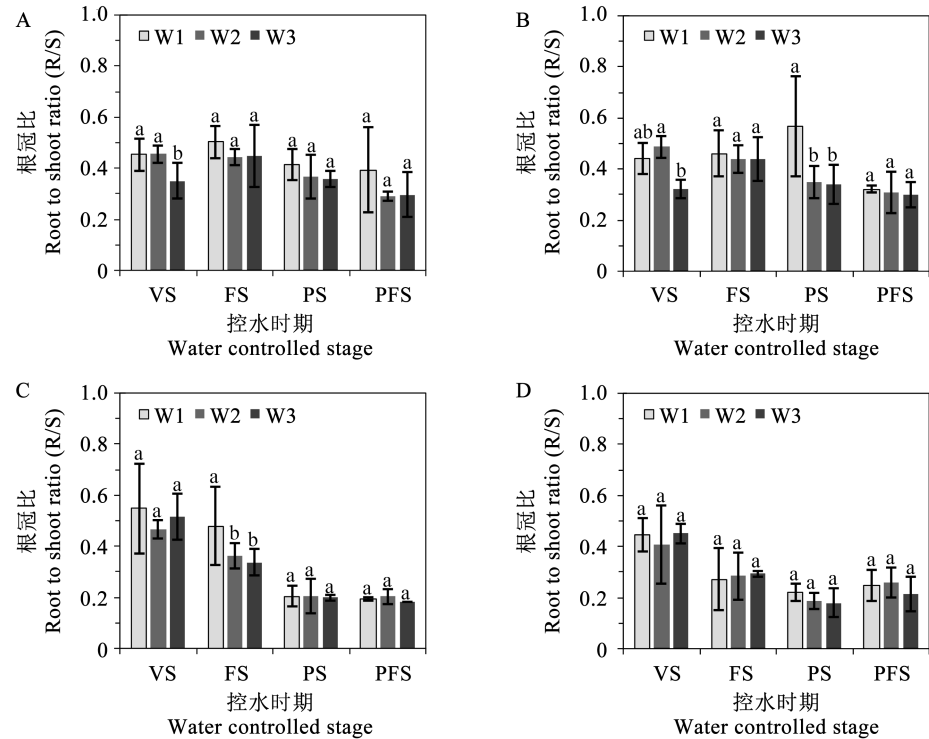
图 3 各时期水分胁迫对大豆株高的影响

Fig. 3 Effects of water stress on plant height of different soybean genotypes

2.4 大豆根冠比分析

如图 4 所示,干旱胁迫使植株的根冠比整体提高。2020 年只有营养生长期 (VS) 控水条件下,辽豆 14 处理间达到显著差异水平;只有营养生长期

(VS) 和结荚期 (PS) 控水条件下,辽豆 21 处理间达到显著差异水平 (图 4A 和 B)。2021 年只有开花期控水条件下,辽豆 14 处理间达到显著差异水平 (图 4C 和 D)。



注: A. 2020 年辽豆 14; B. 2020 年辽豆 21; C. 2021 年辽豆 14; D. 2021 年辽豆 21。  
Note: A. Liaodou 14 in 2020; B. Liaodou 21 in 2020; C. Liaodou 14 in 2021; D. Liaodou 21 in 2021.

图 4 各时期水分胁迫对大豆根冠比的影响

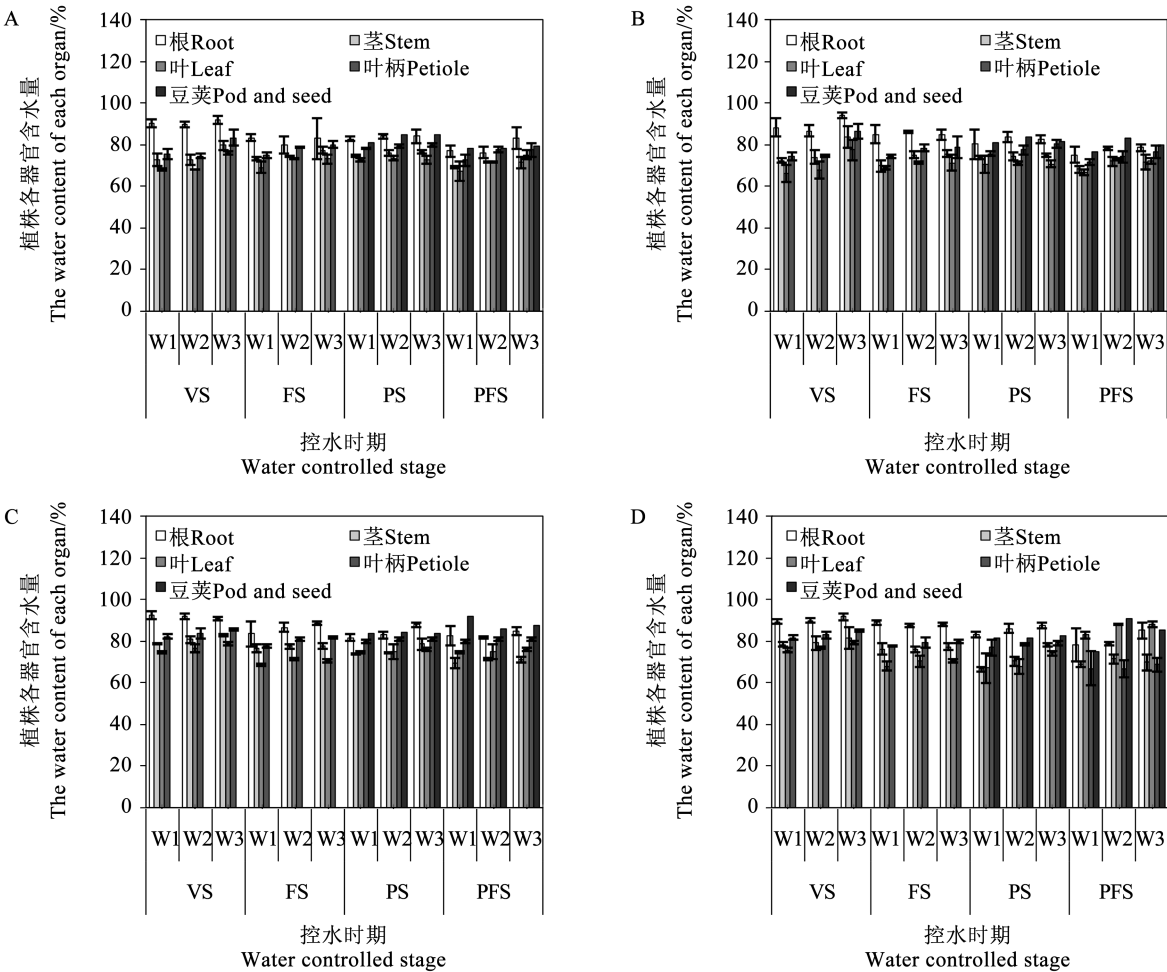
Fig. 4 Effects of water stress on root to shoot ratio of different soybean genotypes



2.5 大豆各器官含水量分析

如图 5 所示,植株各器官含水量由高到低表现为:根>叶柄>茎>叶。同一条件下,即同一年份、同一控水时期、同一品种,地上部各器官(茎、叶、叶

柄、豆荚)含水量整体表现为,适宜水分(W3)的含水量高于干旱(W1)和轻度干旱(W2)含水量。而同一条件下,植株茎、叶、叶柄、豆荚器官含水量一般表现为:御旱型辽豆 14 高于干旱敏感型辽豆 21。



注: A. 2020 年辽豆 14; B. 2020 年辽豆 21; C. 2021 年辽豆 14; D. 2021 年辽豆 21。  
Note: A. Liaodou 14 in 2020; B. Liaodou 21 in 2020; C. Liaodou 14 in 2021; D. Liaodou 21 in 2021.

图 5 各时期水分胁迫对不同基因型大豆各器官含水量的影响

Fig. 5 Effects of water stress on the water content of each organ in different soybean genotypes

2.6 大豆各器官生物量分析

2.6.1 营养生长期控水大豆各器官生物量分析  
2020 和 2021 年营养生长期控水对御旱基因型和干旱敏感型大豆植株各器官干重的影响如表 1 所示:土壤水分含量对大豆根、茎、叶、叶柄的干重均有显著影响,且土壤水分均为正效应,即适宜土壤水分含量条件下植株各器官的干重较高。2021 年,品种差异显著影响了大豆根器官的干重,即御旱品种辽豆 14 根器官干重显著高于干旱敏感型品种辽豆 21。2021 年,二者互作显著影响了大豆的根干重。  
2.6.2 开花期控水大豆各器官生物量分析  
开花期控水对御旱基因型大豆植株各器官干重的影响如表 2 所示:适宜土壤水分含量条件下植株各器官的干重较高,2020 年,土壤水分含量显著影响大豆叶干重

和叶柄干重。2021 年品种显著影响叶干重,御旱基因型辽豆 14 的叶干重低于干旱敏感型品种辽豆 21。  
2.6.3 结荚期控水大豆各器官生物量分析  
如表 3 所示,除 2020 年的根干重和 2021 年根和茎干重,土壤水分均显著影响了结荚期各器官的干重,且为正效应,即适宜土壤水分含量时植株各器官的干重较高。2020 年品种显著影响了叶柄干重,御旱型辽豆 14 的叶柄干重显著高于干旱敏感型辽豆 21。  
2.6.4 鼓粒期控水大豆各器官生物量分析  
如表 4 所示,2021 年水分显著影响鼓粒期叶柄干重,且为正效应。2021 年品种显著影响了茎、叶的干重,且御旱基因型辽豆 14 茎、叶干重高于干旱敏感型辽豆 21。品种和土壤水分含量以及二者互作对各器官干重的影响均未达到显著差异水平。

表 1 营养生长期控水对不同基因型大豆植株各器官干重的影响

Table 1 Effects of water stress on dry weight of each organ of different soybean genotypes water controlled at vegetative stage

单位:g

处理 Treatment			2020				2021			
项目 Item	品种 Variety	水 Water	根干重 Root dry weight	茎干重 Stem dry weight	叶干重 Leaf dry weight	叶柄干重 Petiole dry weight	根干重 Root dry weight	茎干重 Stem dry weight	叶干重 Leaf dry weight	叶柄干重 Petiole dry weight
各器官干重 Dry weight of each organ	辽豆 14	W1	4.27 c	0.95 b	4.01 b	1.07 b	2.00 b	1.22 c	1.84 a	0.69 c
	Liaodou 14	W2	5.22 c	1.13 ab	4.23 b	1.14 b	1.96 bc	1.35 b	2.08 a	0.79 c
		W3	6.26 b	2.11 a	8.54 a	2.68 a	2.76 a	1.75 a	2.64 a	1.10 ab
	辽豆 21	W1	4.48 c	1.03 ab	3.59 b	0.83 b	1.76 c	1.35 bc	1.84 a	0.83 bc
	Liaodou 21	W2	5.97 c	1.10 ab	4.01 b	1.00 b	2.16 b	1.97 b	2.70 a	1.07 ab
		W3	6.23 a	2.38 a	8.46 a	2.51 a	2.68 a	2.13 a	2.71 a	1.18 a
平均值 Means	辽豆 14 Liaodou 14		5.25 a	1.40 a	5.59 a	1.63 a	2.24 a	1.44 a	2.41 a	0.86 b
	辽豆 21 Liaodou 21		5.56 a	1.50 a	5.35 a	1.45 a	2.20 a	1.81 a	2.19 a	1.03 a
		W1	4.38 b	0.99 b	3.80 b	0.95 b	1.76 c	1.28 b	1.84 b	0.76 b
		W2	5.59 ab	1.12 b	4.12 b	1.07 b	2.16 b	1.66 ab	2.39 ab	0.93 b
		W3	6.24 a	2.25 a	8.50 a	2.59 a	2.68 a	1.94 a	2.68 a	1.14 a
方差分析 Analysis of variance	品种 Varieties		ns	ns	ns	ns	* *	ns	ns	ns
	水 Water		*	***	***	***	***	*	*	*
	品种 × 水 Varieties × Water		ns	ns	ns	ns	* *	ns	ns	ns

注:ns. 没有显著性差异;不同小写字母分别表示 0.05 概率水平上差异显著;\*、\*\* 和 \*\*\* 分别表示 0.05,0.01 和 0.001 概率水平上差异显著。下同。

Note: ns. Non-significant differences; Different lowercase letters mean significant differences at 0.05 probability levels; \*, \*\* and \*\*\* indicate significant differences at 0.05, 0.01 and 0.001 probability levels, respectively. The same below.

表 2 开花期控水对不同基因型大豆植株各器官干重的影响

Table 2 Effects of water stress on dry weight of each organ of different soybean genotypes water controlled at flowering stage

单位:g

处理 Treatment			2020				2021			
项目 Item	品种 Variety	水 Water	根干重 Root dry weight	茎干重 Stem dry weight	叶干重 Leaf dry weight	叶柄干重 Petiole dry weight	根干重 Root dry weight	茎干重 Stem dry weight	叶干重 Leaf dry weight	叶柄干重 Petiole dry weight
各器官干重 Dry weight of each organ	辽豆 14	W1	5.82 a	3.81 a	5.78 b	1.97 ab	5.48 a	4.16 b	5.55 b	2.53 a
	Liaodou 14	W2	5.84 a	4.32 a	6.68 ab	2.21 a	5.84 a	5.46 ab	7.62 ab	3.24 a
		W3	6.11 a	4.70 a	7.02 a	2.42 a	6.44 a	6.53 ab	8.77 ab	3.80 a
	辽豆 21	W1	5.08 a	3.57 a	5.80 b	1.65 b	5.08 a	7.21 a	9.11 ab	3.65 a
	Liaodou 21	W2	5.22 a	3.82 a	6.23 ab	1.67 b	5.22 a	6.69 ab	8.74 ab	3.62 a
		W3	5.86 a	4.52 a	7.06 a	1.96 ab	6.19 a	7.23 a	9.56 a	4.18 a
平均值 Means	辽豆 14 Liaodou 14		5.92 a	4.28 a	6.49 a	1.81 a	5.92 a	5.39 b	7.31 a	3.19 a
	辽豆 21 Liaodou 21		5.39 a	3.97 a	6.37 a	1.94 a	5.50 a	7.05 a	9.14 a	3.82 a
		W1	5.45 a	3.70 a	5.79 b	2.19 a	5.29 a	5.69 a	7.33 a	3.09 a
		W2	5.53 a	4.07 a	6.46 ab	2.20 a	5.53 a	6.08 a	8.18 a	3.43 a
		W3	5.99 a	4.61 a	7.04 a	1.76 b	6.32 a	6.88 a	9.17 a	3.99 a
方差分析 Analysis of variance	品种 Varieties		ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns
	水 Water		ns	ns	*	*	ns	ns	ns	ns
	品种 × 水 Varieties × Water		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns





2.7 大豆产量及其构成要素分析

由表5可以看出,除结荚期和鼓粒期的百粒重外,各个时期控水,品种均显著影响了大豆植株的单株荚数、单株粒数、百粒重和单株产量,同一时期,同一水分条件下,大豆的单株荚数、单株粒数和单株产量表现为:辽豆14>辽豆21;而百粒重表现为:辽豆21>辽豆14。

土壤水分含量使两个品种的单株荚数、单株粒数和单株产量整体提高,营养生长期,适宜土壤水分含量条件下单株产量显著较高;开花期和结荚期,适宜土壤水分含量条件下单株产量显著较高;鼓粒期,适宜土壤水分含量条件下单株荚数、单株粒数、百粒重和单株产量显著较高。

营养生长期控水,品种以及二者互作显著影响了单株荚数和百粒重;开花期和结荚期控水,二者互作显著影响了单株荚数、单株粒数和单株产量;鼓粒期控水,二者互作显著影响了单株荚数、单株粒数、百粒重和单株产量。

各个时期土壤干旱均使植株的单株产量降低,与适宜水分(W3)相比,营养生长期控水条件下,干旱(W1)和轻度干旱(W2)胁迫下,辽豆14单株产量分别下降了26.40%和14.17%;而辽豆21单株产量分别下降了42.80%和26.87%。开花期控水条件下,与W3相比,W1和W2条件下,辽豆14单株产量分别下降了18.58%和9.58%;而辽豆21分别下降了34.67%和7.43%。结荚期控水条件下,与W3相比,W1和W2条件下,辽豆14单株产量分别下降了36.49%和18.64%;而辽豆21分别下降了64.57%和64.01%。鼓粒期控水条件下,与W3相比,W1和W2条件下,辽豆14单株产量分别下降了58.85%和40.63%;而辽豆21分别下降了57.28%和28.71%。

整体而言,各时期土壤干旱条件下,干旱敏感型品种辽豆21产量下降的更多,干旱(W1)胁迫比轻度干旱(W2)胁迫引起两品种单株产量降低更多。比较各时期土壤水分胁迫对单株产量的影响,发现结荚期土壤干旱(W1)和轻度干旱(W2)胁迫引起干旱敏感型品种辽豆21产量下降最多;而鼓粒期土壤干旱(W1)和轻度干旱(W2)胁迫引起御旱型辽豆14产量下降最多。

3 讨论

3.1 水分胁迫对大豆生理特性的影响

叶绿素是植物进行光合作用的主要色素。随着干旱程度加深,植株的叶绿素结构发生改变,含量降低<sup>[31]</sup>,但不同品种间存在一定差异<sup>[32]</sup>,本研究

也发现干旱降低了两品种的叶绿素值,但御旱品种叶绿素值含量更低。叶面积指数一般指单位土地面积上植物叶片总面积占土地面积的倍数,在一定的范围内,作物的产量随叶面积指数的增大而提高。干旱胁迫降低植株的叶面积指数<sup>[33-34]</sup>,但有的品种在干旱胁迫下叶面积指数降低的少<sup>[35]</sup>。本研究发现,各个时期控水,土壤干旱胁迫都降低了植株的叶绿素含量和叶面积指数,但在2021年结荚期和鼓粒期控水时,御旱基因型辽豆14的叶面积指数高于干旱敏感型辽豆21。

根冠比是指植株地下部分与地上部分干重的比值,它能反映植物的生长状况,以及环境条件对地上部与地下部生长的不同影响。胡继超等<sup>[36]</sup>认为干旱胁迫对小麦地上部的影响大于地下部,干物质向根的分配比例升高,导致根冠比增大。本研究发现,一般情况下,干旱胁迫提高了植株的根冠比,即干旱胁迫对地上部的抑制作用大于对根的抑制作用。前人研究表明,干旱胁迫诱发植株失水,导致植株含水量降低<sup>[37-39]</sup>,但干旱胁迫下,抗旱品种有较高的叶水势,含水量值高<sup>[40-41]</sup>。王丽娜等<sup>[42]</sup>的研究指出,干旱逆境下,植株叶片含水量减少程度能反映植株抗旱性的强弱,保水力越好的植物,其叶片含水量值越高。本研究也表明,干旱胁迫降低了大豆植株根、茎、叶、叶柄、豆荚含水量,相同条件下,御旱基因型辽豆14的各器官含水量值一般高于干旱敏感型辽豆21。

作物的生物产量是籽粒产量的基础,有了较高的生物产量才有较高的籽粒产量,而土壤干旱胁迫限制植株生物量的形成<sup>[43-45]</sup>。本研究结果表明,各个时期控水条件下,干旱胁迫限制了大豆根、茎、叶、叶柄、荚粒的形成,降低了植株各器官的干重。研究表明土壤水分胁迫对植株生物产量的影响存在基因型差异<sup>[46]</sup>,有的品种在干旱胁迫下保持更好的生物产量<sup>[47]</sup>。本研究发现,品种对生物产量的影响因取样年份和取样时期的不同而各异。但2020年鼓粒期控水时,御旱品种辽豆14的叶柄干重显著高于干旱敏感型品种辽豆21,即越是到生育后期,辽豆14的叶柄生物量优势越明显。有研究指出辽豆14的衰老是逐步的,而辽豆21衰老的速度更快<sup>[48]</sup>,即在生长后期辽豆14的叶柄衰老速度低于辽豆21,故叶柄干重更具优势。

3.2 水分胁迫对大豆产量的影响

干旱胁迫会抑制植物生长和发育进程、营养物质的合成与转运、光合作用以及基因和蛋白水平表达,改变形态结构和水分分配方向<sup>[49]</sup>。水分匮乏条件下,植株叶绿体解体,叶绿素含量下降,光合速率

表 5 各时期控水对不同基因型大豆单株产量及其构成要素的影响

Table 5 Effect of water stress on yield and yield components of different soybean genotypes controlled at different stages

处理		营养生长期				开花期				结荚期				鼓粒期			
Treatment		Vegetative growth period				Flowering time				Podding stage				Seed-filling stage			
品种	Varieties	水分	Water	单株荚数	Pods number per plant	单株粒数	Seeds number per plant	百粒重	100-seed weight/g	单株产量	Yield per plant/g	单株荚数	Pods number per plant	单株粒数	Seeds number per plant	百粒重	100-seed weight/g
辽豆 14	Liaodou 14	W1	W1	75.50 a	167.50 a	14.40 b	24.20 b	75.83 a	151.50 a	17.74 b	26.77 bc	55.83 b	116.00 b	18.13 a	20.88 b	46.83 c	93.50 c
				81.50 a	178.00 a	15.88 b	28.22 ab	92.33 a	177.50 a	16.83 b	29.73 ab	80.83 a	155.50 a	17.21 a	26.75 b	59.33 b	115.83 b
				74.67 a	166.83 a	19.86 b	32.88 a	74.67 a	166.83 a	19.86 ab	32.88 a	74.67 a	166.83 a	19.86 a	32.88 a	74.67 a	166.83 a
辽豆 21	Liaodou 21	W1	W1	38.83 b	67.00 c	20.19 a	13.43 c	43.50 b	83.00 c	18.48 b	15.34 d	32.50 c	39.83 c	22.95 a	8.32 c	36.67 d	61.83 d
				46.33 b	85.50 bc	20.09 a	17.17 c	44.83 b	70.67 c	22.91 a	16.05 d	32.83 c	48.00 c	17.44 a	8.45 c	54.33 bc	91.50 c
辽豆 21	Liaodou 21	W2	W2	81.50 a	117.67 b	19.96 a	23.48 b	81.50 a	117.67 b	19.96 ab	23.48 c	81.50 a	117.67 b	19.96 a	23.48 b	81.50 a	117.67 b
				77.22 a	170.78 a	16.72 b	28.43 a	80.94 a	165.28 a	18.15 b	29.80 a	70.44 a	146.11 a	18.40 a	26.84 a	65.78 a	125.39 a
				55.56 b	90.06 b	20.08 a	18.03 b	56.61 b	90.44 b	20.45 a	18.29 b	48.94 b	68.50 b	20.12 a	13.42 b	50.44 b	90.33 b
辽豆 21	Liaodou 21	W1	W1	57.17 b	117.25 a	17.30 b	18.82 b	59.67 b	117.25 b	18.11 a	21.06 b	44.17 c	77.92 c	20.54 a	14.60 b	41.75 c	77.67 c
				63.92 b	131.75 a	17.99 ab	22.70 b	68.58 ab	124.08 ab	19.87 a	22.89 b	56.83 b	101.75 b	17.32 a	17.61 ab	56.83 b	103.67 b
				78.08 a	142.25 a	19.91 a	28.19 a	78.08 a	142.25 a	19.91 a	28.19 a	78.08 a	142.25 a	19.91 a	28.19 a	75.75 a	142.25 a
方差分析	品种			**	***	***	***	***	***	*	***	***	***	***	***	***	ns
Analysis of	水			ns	ns	ns	***	*	*	ns	***	***	***	***	***	***	*
variance	品种 × 水			*	ns	*	ns	*	*	*	*	***	*	ns	ns	**	ns

下降,植株株高和生物量降低,并最终导致产量降低<sup>[50-52]</sup>。本研究发现干旱胁迫降低大豆植株生物量的形成,并最终影响植株的单株产量。大豆不同时期对水分的需求不同,大豆开花期以及花后各时期对水分胁迫最为敏感<sup>[53]</sup>,有研究指出,大豆不同时期干旱引起产量下降程度为:鼓粒期>花荚期>营养生长期<sup>[54]</sup>。本研究发现御早型品种辽豆14鼓粒期产量下降最严重,而干旱敏感型品种辽豆21结荚期土壤干旱胁迫产量下降最严重。赵宏伟等<sup>[55]</sup>的研究也发现,单株产量以结荚期干旱处理降低幅度最大,其次是鼓粒期。一般情况下,相同水分条件下,御早基因型辽豆14产量优于干旱敏感型辽豆21,且除鼓粒期外,各时期土壤干旱胁迫下,御早品种引起的产量降低程度低于干旱敏感型品种辽豆21。大豆的产量是单株荚数、每荚粒数、百粒重的综合体现,本研究发现大豆单株荚数、每荚粒数与产量变化相一致。

4 结论

各个时期干旱胁迫均使植株的叶绿素含量、叶面积指数、株高、各器官含水量降低,但使植株的根冠比提高。各个时期干旱胁迫均使大豆根、茎、叶、叶柄、荚皮的干重降低。整体而言,相同水分条件下,御早基因型辽豆14各个器官的含水量均高于干旱敏感型品种辽豆21;而辽豆14的叶绿素含量值低于辽豆21。

正常土壤水分含量时两个品种的单株荚数、单株粒数和单株产量较高。相同条件下,大豆的单株荚数、单株粒数和单株产量整体表现为:辽豆14>辽豆21;而百粒重则表现为:辽豆21>辽豆14。各时期土壤干旱条件下,干旱敏感型品种辽豆21产量下降程度较大。

参考文献

[1] 许鑫怡,曹历娟,李天祥. 新冠疫情下的中巴大豆贸易:现状、机遇与挑战[J]. 大豆科学, 2021, 40(4): 553-561. (XU X Y, CAO L J, LI T X. China's soybean trade with Brazil under COVID-19: Status quo, opportunities and challenges [J]. Soybean Science, 2021, 40(4): 553-561.)

[2] 侯荣娜,戴旭宏. 中美贸易战视角下振兴东北地区大豆产业发展的政策选择[J]. 农村经济, 2019(12): 26-32. (HOU R N, DAI X H. Policy choice of revitalizing soybean industry in Northeast China from the perspective of sino-US trade war[J]. Rural Economy, 2019(12): 26-32.)

[3] 莫飞,王桂霞,胡明阳. 基于成本视角的东北地区大豆生产现状分析[J]. 大豆科学, 2020, 39(6): 947-953. (MO F, WANG G X, HU M Y. Analysis of soybean production status in Northeast China based on cost[J]. Soybean Science, 2020, 39

(6): 947-953.)

[4] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴(2019)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020: <http://www.stats.gov.cn/> (National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook (2019) [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020: <http://www.stats.gov.cn/>.)

[5] 王甜,庞婷,杜青,等. 田间配置对间作大豆光合特性、干物质积累及产量的影响[J]. 华北农学报, 2020, 35(2): 107-116. (WANG T, PANG T, DU Q, et al. Effects of different field collocation patterns on photosynthetic characteristics and dry matter accumulation and yield in intercropping soybean [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2020, 35(2): 107-116.)

[6] HUSSAIN M, FAROOQ S, HASAN W, et al. Drought stress in sunflower: Physiological effects and its management through breeding and agronomic alternatives [J]. Agricultural Water Management, 2018, 201: 152-166.

[7] 张金政,张起源,孙国峰,等. 干旱胁迫及复水对玉簪生长和光合作用的影响[J]. 草业学报, 2014, 23(1): 167-176. (ZHANG J Z, ZHANG Q Y, SUN G F, et al. Effects of drought stress and re-watering on growth and photosynthesis of Hosta [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2014, 23(1): 167-176.)

[8] 张玉,冷海楠,曹宏杰,等. 干旱胁迫对植物的影响研究[J]. 黑龙江科学, 2022, 13(14): 22-24, 47. (ZHANG Y, LENG H N, CAO H J, et al. Study on the influence of drought stress on botany [J]. Heilongjiang Science, 2022, 13(14): 22-24, 47.)

[9] 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.)

[10] 黄承建,赵思毅,王龙昌,等. 干旱胁迫对苧麻叶绿素含量的影响[J]. 中国麻业科学, 2012, 34(5): 208-212. (HUANG C J, ZHAO S Y, WANG L C, et al. Effect of drought stress on chlorophyll contents in ramie [J]. Plant Fiber Sciences in China, 2012, 34(5): 208-212.)

[11] FAROOQ M, HUSSAIN M, UL-ALLAH S, et al. Physiological and agronomic approaches for improving water-use efficiency in crop plants [J]. Agricultural Water Management, 2019, 219: 95-108.

[12] SAGAR L, PRAHARAJ S, SINGH S, et al. Drought and heat stress tolerance in field crops: Consequences and adaptation strategies [M]//Response of Field Crops to Abiotic Stress. Boca Raton: CRC Press, 2022: 91-102.

[13] LAWSON T, VIALET-CHABRAND S. Speedy stomata, photosynthesis and plant water use efficiency [J]. The New Phytologist, 2019, 221(1): 93-98.

[14] SHARMA A, KUMAR V, SHAHZAD B, et al. Photosynthetic response of plants under different abiotic stresses: A review [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2020, 39(2): 509-531.

[15] TIWARI P, INDOLIYA Y, CHAUHAN A S, et al. Auxin-salicylic acid cross-talk ameliorates OsMYB-R1 mediated defense towards heavy metal, drought and fungal stress [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 399: 122811.

[16] HOSSEINI S Z, ISMAILI A, NAZARIAN-FIROUZABADI F, et al. Dissecting the molecular responses of lentil to individual and

- combined drought and heat stresses by comparative transcriptomic analysis[J]. *Genomics*, 2021, 113(2): 693-705.
- [17] SILVA SANTOS A, DE ANDRADE E M, DE OLIVEIRA SOUSA A R, et al. Transcriptome profile of drought responsive candidate genes in varieties of citrus rootstocks with different tolerance strategies[J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 277: 109838.
- [18] 闫春娟, 宋书宏, 王文斌, 等. 大豆耐旱种质的鉴定[J]. *大豆科学*, 2015, 34(1): 163-167. (YAN C J, SONG S H, WANG W B, et al. Identification of drought stress tolerance in soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] [J]. *Soybean Science*, 2015, 34(1): 163-167.)
- [19] 冯延芝, 赵阳, 王保平, 等. 干旱复水对楸叶泡桐幼苗光合和叶绿素荧光的影响[J]. *中南林业科技大学学报*, 2020, 40(4): 1-8. (FENG Y Z, ZHAO Y, WANG B P, et al. Effects of drought and rewating on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of *Paulownia catalpifolia* seedlings [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2020, 40(4): 1-8.)
- [20] FARQUHAR G D, O'LEARY M H, BERRY J A. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves [J]. *Functional Plant Biology*, 1982, 9(2): 121.
- [21] 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.)
- [22] 路之娟, 张永清, 张楚, 等. 不同基因型苦荬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.)
- [23] SÁNCHEZ F J, DE 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(1): 81-90.
- [24] TORRES R O, MCNALLY K L, CRUZ C V, et al. Screening of rice Genebank germplasm for yield and selection of new drought tolerance donors[J]. *Field Crops Research*, 2013, 147: 12-22.
- [25] 王文斌, 王晓怡, 张明辉, 等. 大豆 (*Glycine max* (L.) Merr.) 叶片抗氧化酶对干旱及复水的响应机制[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2012, 32(3): 193-197. (WANG W B, WANG X Y, ZHANG M H, et al. The response mechanism of antioxidant enzymes to drought and rewating in soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) leaves [J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2012, 32(3): 193-197.)
- [26] CARVALHO A, GAIVÃO I, LIMA-BRITO J. Seed osmopriming with PEG solutions in seeds of three infraspecific taxa of *Pinus nigra*: Impacts on germination, mitosis and nuclear DNA [J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, 456: 117739.
- [27] 李秀芬, 马树庆, 李云峰, 等. 水分胁迫对春大豆出苗和幼苗长势的影响[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(8): 2602-2609. (LI X F, MA S Q, LI Y F, et al. Effects of soil water stress on emergence and seedling growth of spring soybean [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(8): 2602-2609.)
- [28] 秦彬. 外源褪黑素对大豆苗期干旱的缓解效应[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2021. (QIN B. Regulation of exogenous melatonin on drought resistance of soybean seedlings under drought stress [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2021.)
- [29] 闫春娟, 王文斌, 曹永强, 等. 不同耐旱型大豆生理特性对不同降雨条件的响应[J]. *大豆科学*, 2018, 37(3): 359-365. (YAN C J, WANG W B, CAO Y Q, et al. Response of physiological characteristics of different drought-tolerant soybean varieties to different rainfall climatic conditions [J]. *Soybean Science*, 2018, 37(3): 359-365.)
- [30] 闫春娟, 宋书宏, 王文斌, 等. 不同基因型大豆生理特性和产量对不同降雨条件的响应[J]. *节水灌溉*, 2021(5): 8-14. (YAN C J, SONG S H, WANG W B, et al. Response of physiological characteristics and yield of soybean with different genotypes to different rainfall conditions [J]. *Water Saving Irrigation*, 2021(5): 8-14.)
- [31] ZHANG R, MA X, WANG M, et al. Effects of salinity and water stress on the physiological and ecological processes and plasticity of *Tamarix ramosissima* seedlings[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(6): 433-441.
- [32] 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, 32(6): 278-281. (SHOU H X, ZHU D H, CHEN C X, et al. Preliminary study on response of 8 spring soybean varieties to drought and drought resistance index [J]. *Journal of Agricultural Science*, 1991, 32(6): 278-281.)
- [33] FENG R, ZHANG Y, YU W, et al. Analysis of the relationship between the spectral characteristics of maize canopy and leaf area index under drought stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(6): 301-307.
- [34] 李小涵, 武建军, 吕爱锋, 等. 不同 CO<sub>2</sub> 浓度变化下干旱对冬小麦叶面积指数的影响差异[J]. *生态学报*, 2013, 33(9): 2936-2943. (LI X H, WU J J, LYU A F, et al. The difference of drought impacts on winter wheat leaf area index under different CO<sub>2</sub> concentration [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(9): 2936-2943.)
- [35] NADEEM A, AHSAN J, SULEMAN G, et al. Estimation of drought effects on different bread wheat genotypes using morpho-physiological traits [J]. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2022, 104(4): 104483.
- [36] 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.)
- [37] 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, 36(3): 378-380, 366. (ZHAO B S, YI Y J, LIU J Y. Exogenous betaine improves the growth and photo-synthesis of wheat seedlings under drought/salt stress [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2001, 36(3): 378-380, 366.)



[38] 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. )

[39] ZHOU H, ZHOU G, HE Q, et al. Capability of leaf water content and its threshold values in reflection of soil-plant water status in maize during prolonged drought[J]. Ecological Indicators, 2021, 124: 107395.

[40] HOSSAIN M M, LAM H M, ZHANG J. Responses in gas exchange and water status between drought-tolerant and-susceptible soybean genotypes with ABA application[J]. The Crop Journal, 2015, 3(6): 500-506.

[41] REIS L, OLIVEIRA J A, FARNESE F, et al. Chlorophyll fluorescence and water content parameters are good biomarkers for selecting drought tolerant eucalyptus clones[J]. Forest Ecology and Management, 2021, 481: 118682.

[42] 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): 53-58. (WANG L N, KARIM·Ali, 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): 53-58. )

[43] WAN W, LIU Z, LI J, et al. Spatiotemporal patterns of maize drought stress and their effects on biomass in the Northeast and North China Plain from 2000 to 2019[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2022, 315: 108821.

[44] ZHANG Z, TARIQ A, ZENG F, et al. Nitrogen application mitigates drought-induced metabolic changes in *Alhagi sparsifolia* seedlings by regulating nutrient and biomass allocation patterns[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2020, 155: 828-841.

[45] MARCAIDA M, LI T, ANGELES O, et al. Biomass accumulation and partitioning of newly developed Green Super Rice (GSR) cultivars underdrought stress during the reproductive stage[J]. Field Crops Research, 2014, 162: 30-38.

[46] 韩志顺, 郑敏娜, 梁秀芝, 等. 干旱胁迫对不同紫花苜蓿品种形态特征和生理特性的影响[J]. 中国草地学报, 2020, 42(3): 37-43. (HAN Z S, ZHENG M N, LIANG X Z, et al. Effects of drought stress on morphological and physiological characteristics of different alfalfa cultivars[J]. Chinese Journal of Grassland, 2020, 42(3): 37-43. )

[47] KIVUVA B M, GITHIRI S M, YENCHO G C, et al. Screening sweetpotato genotypes for tolerance to drought stress[J]. Field Crops Research, 2015, 171: 11-22.

[48] 闫春娟, 宋书宏, 孙旭刚, 等. 基因型肥料互作下大豆群体的时空分布特征[J]. 大豆科学, 2014, 33(3): 340-346. (YAN C J, SONG S H, SUN X G, et al. Temporal-spatial Distribution Characteristics of Soybean (*Glycine max* L. Merr.) Under Genotype-fertilizer Interaction Condition[J]. Soybean Science, 2014, 33(3): 340-346. )

[49] 王福祥, 肖开转, 姜身飞, 等. 干旱胁迫下植物体内活性氧的作用机制[J]. 科学通报, 2019, 64(17): 1765-1779. (WANG F X, XIAO H Z, JIANG S F, et al. Mechanisms of reactive oxygen species in plants under drought stress[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(17): 1765-1779. )

[50] BAGHBANI-ARANI A, MODARRES-SANAVY S A, MASHHADI-AKBAR-BOOJAR A, et al. Towards improving the agronomic performance, chlorophyll fluorescence parameters and pigments in fenugreek using zeolite and vermicompost under deficit water stress[J]. Industrial Crops and Products, 2017, 109: 346-357.

[51] 闫春娟, 韩晓增, 王守宇, 等. 水钾耦合对大豆干物质积累和产量的影响[J]. 大豆科学, 2007, 26(6): 862-867. (YAN C J, HAN X Z, WANG S Y, et al. Effect of water-potassium coupling on dry matter accumulation and yield of soybean[J]. Soybean Science, 2007, 26(6): 862-867. )

[52] 叶玉秀, 陆大雷, 王飞兵, 等. 干旱胁迫下外源海藻糖对糯玉米幼苗生理特性的影响[J]. 玉米科学, 2020, 28(3): 80-86. (YE Y X, LU D L, WANG F B, et al. Effects of exogenous trehalose on physiological characteristics in waxy maize seedlings under drought stress[J]. Journal of Maize Sciences, 2020, 28(3): 80-86. )

[53] MECKEL L, EGLI D B, PHILLIPS R E, et al. Effect of moisture stress on seed growth in soybeans[J]. Agronomy Journal, 1984, 76(4): 647-650.

[54] 闫春娟, 王文斌, 涂晓杰, 等. 不同生育时期干旱胁迫对大豆根系特性及产量的影响[J]. 大豆科学, 2013, 32(1): 59-62, 67. (YAN C J, WANG W B, TU X J, et al. Effect of drought stress at different growth stage on yield and root characteristics of soybean[J]. Soybean Science, 2013, 32(1): 59-62, 67. )

[55] 赵宏伟, 李秋祝, 魏永霞. 不同生育时期干旱对大豆主要生理参数及产量的影响[J]. 大豆科学, 2006, 25(3): 329-332. (ZHAO H W, LI Q Z, WEI Y X. Effect of drought at different growth stages on main physiological parameters and yield in soybean[J]. Soybean Science, 2006, 25(3): 329-332. )