

利用荚果厚度变化评价大豆鼓粒期的耐旱性

李得孝¹ 梁福琴² 汪勇¹ 王中华^{1*} 樊晨²

(1. 西北农林科技大学 农学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 延安农业科学研究所, 陕西 延安 716099)

摘要 为探讨以鼓粒速率作为大豆耐旱性评价指标,采用盆栽试验,先以汾豆65和中作3088为试验材料,在鼓粒期设置干旱胁迫(短期)和正常灌水(对照)处理,测定大豆荚果厚度变化,并用新建的方法对7个大豆材料的鼓粒期耐旱性进行初步比较。结果表明:大豆鼓粒期遭遇短期干旱胁迫,处理期鼓粒速率明显下降甚至停滞,复水后出现快速鼓粒现象(补偿效应),但后续鼓粒速率明显低于对照处理。中作3088适应干旱胁迫的能力优于汾豆65。在同等鉴定条件下,耐旱性较好的大豆材料表现为延迟萎蔫、胁迫期鼓粒速率较高、复水后鼓粒速率能较好恢复等特征。通过平均抗旱系数和隶属函数值综合评定,鲁96150、邯豆5号和秦豆11号鼓粒期耐旱性较强,中黄35和秦豆8号鼓粒期耐旱性一般,而汾豆65和中黄30鼓粒期耐旱性较弱。综上所述,大豆受旱后以荚果厚度表示的鼓粒速率发生明显变化,可用于大豆鼓粒期耐旱性的评价。

关键词 大豆;干旱胁迫;荚果厚度;鼓粒速率;鼓粒期;盆栽试验

中图分类号 S565.101

文章编号 1007-4333(2017)08-0009-09

文献标志码 A

Evaluation of soybean drought tolerance based on dynamics of pod thickness

LI Dexiao¹, LIANG Fuqin², WANG Yong¹, WANG Zhonghua^{1*}, FAN Chen²

(1. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. Institute of Yan'an Agricultural Science, Yan'an 716099, China)

Abstract Pot experiment was adopted to explore the possibility of soybean drought tolerance of Fendou 65 and Zhongzuo 3088 under drought stress conditions and well-watered treatment at seed filling stage. Tolerance to drought stress with the established method of 7 soybean cultivars was evaluated. The results showed that: Soybean seed filling rate decreased or even stopped when soybean suffered drought stress for several days at seed filling stage; Pod thickness appeared a sharp compensation increase after re-watering, but the late seed filling rate of drought-stressed soybeans was lower than that of under well-watered treatment; Zhongzuo 3088 displayed higher tolerance to drought stress than Fendou 65; Under the same conditions of drought stress, drought-tolerant soybean was characterized as delayed canopy wilting, higher seed filling rate in the period of drought stress, and better compensation ability for seed filling after re-watering. Based on the comparison of average drought resistance coefficient and subordinate function value at seed filling stage, Lu 96150, Handou 5 and Qindou 11 were ranked as higher tolerance cultivar, Zhonghuang 35 and Qindou 8 as normal tolerance cultivar, and Fendou 65 and Zhonghuang 30 as less tolerance cultivar. In conclusion, soybean seed filling rate estimated by pod thickness was well responded to drought stress indicating its potential to evaluate soybean drought tolerance at seed filling stage.

Keywords soybean; drought stress; pod thickness; seed filling rate; seed filling period; pot experiment

收稿日期: 2016-08-01

基金项目: 国家大豆产业技术体系(CARS_04); 西北农林科技大学唐仲英育种专项

第一作者: 李得孝, 副教授, 主要从事大豆遗传育种研究, E-mail: lidexiao@nwsuaf.edu.cn

梁福琴, 高级农艺师, 主要从事大豆试验研究及示范推广, E-mail: yankslfq@126.com

通讯作者: 王中华, 教授, 主要从事作物遗传育种研究, E-mail: zhonghuawang@nwsuaf.edu.cn

大豆是重要的粮油兼用作物,在世界各地广为栽植。在所有影响大豆产量的因子中,干旱对大豆产量的影响最为严重^[1]。鼓粒期干旱对大豆产量影响最大,其次是花荚期干旱,营养生长期干旱影响最小^[2]。在旱作条件下,大豆的水分临界期主要是种子萌芽期、开花结荚期和鼓粒期。大豆萌芽期遭遇干旱,严重影响大豆出苗,难以保证群体密度。开花结荚期遭遇干旱,大豆落花落荚严重,有效结荚减少。大豆鼓粒期遭遇干旱,主要影响大豆鼓粒进程和籽粒品质。大豆成株期干旱胁迫主要在田间进行,干旱处理时期包括开花、结荚和鼓粒等整个生殖生长期^[1]。单独开展鼓粒期干旱胁迫的研究主要涉及干旱胁迫下大豆产量、形态指标、农艺性状和籽粒品质的改变^[3-5]。Ohashi等^[6]从R5(鼓粒期)开始进行13 d干旱处理,发现干旱处理期间大豆荚果厚度增加很少,而荚果厚度的日变化表现为白天收缩晚上扩张,其中干旱处理白天收缩的幅度大,夜晚扩张的幅度小。

植物的耐旱机制通常归为3类:躲旱(Drought escape)、避旱(Dehydration avoidance)和耐旱(Dehydration tolerance)^[7]。植物抗旱性是一个抽象概念,是多基因控制的数量性状。评价大豆耐旱性的指标有产量性状指标,生长发育指标,形态学指标和生理生化指标等,其中生长速率,株高,分枝数,主茎节数,叶片数,叶面积,根条发育和干物质积累等生长发育指标都可以用来评定品种抗旱性差异^[1]。为了汇总不同指标的抗旱信息,前人采用过综合抗旱系数、综合抗旱指数和抗旱隶属函数值等多种方法,其中刘学义^[8]提出的模糊隶属函数法已在多种作物的抗旱性研究中采用。祁旭升等^[9]比较了9种抗旱性评价方法(未包含隶属函数法),提出采用改进抗旱指数法可以兼顾抗旱性和丰产性。冠层延迟萎蔫(Canopy delayed wilting)是大豆垂直根系发育较好的反应,因此可用于大豆成株期耐旱性评价^[10],已有大豆萎蔫等级相关QTL定位与验证的报道^[11-12]。国内也在探索利用萎蔫等级和萎蔫天数评价大豆苗期耐旱性的可能性^[13]。需要指出的是,在苗期和成株期对萎蔫等级的评价方法并不相同。

大豆鼓粒速率通常用粒重的变化来度量^[14-17]。近年的研究表明,荚果厚度的变化也可度量大豆干物质积累情况^[6],进而可用于估计大豆鼓粒速率^[18-20]。干旱胁迫对于大豆鼓粒速率的影响尚未见报道。本研究利用荚果厚度估算大豆鼓粒速率,以

期探讨鼓粒期干旱胁迫对于大豆鼓粒速率的影响。

1 材料与与方法

试验材料包括汾豆65,中黄30,中黄35,邯豆5号,秦豆8号,秦豆11号和鲁96150。

在防雨棚设置盆栽试验。盆钵用PVC管制成,装入等体积的土壤,底部用塑料封口,防止水分渗透和根系外延。每盆定植3株大豆。每次按盆等量浇水,进入开花期后逐日浇水,防止出现干旱。进入盛花期后,挂牌标记同日开花的主茎花朵,并剔除同节位其余花蕾,每株标记花朵要达到10朵。

试验分2组:第一组为小管径组(PVC管径0.110 m,管高0.50 m),主要研究干旱处理日数对大豆荚果厚度动态(鼓粒速率)的影响。以汾豆65和中作3088作试验材料,每个材料种14盆,在快速鼓粒期(标记荚果厚度超过4 mm)进行干旱胁迫处理。其中,中作3088设3个处理:旱3 d(7月23日—26日),旱4 d(7月23日—27日)和对照(正常灌水)。而汾豆65在鼓粒期设干旱和对照(正常灌水)2个处理,干旱处理3 d后复水(7月22日—25日),每个处理设7次重复。

第二组为大管径组(管径0.160 m,管高0.80 m),主要评价不同大豆品种的抗旱性强弱。每个材料3盆,每盆定苗3株。快速鼓粒期分别设干旱和对照处理,以控水后叶片清晨持续萎蔫的日期作为干旱胁迫起始日,连续处理4 d。

指标测定:进入鼓粒期(R5)后,隔日测定荚果厚度(精度0.01 mm),测定工作在荚果变色时(R7)结束^[18]。在干旱处理至复水次日期间,要逐日测定荚果厚度,之后恢复为隔日测定。植株收获后阴干荚果,对标记荚果籽粒进行单粒称重(精度0.01 g)。

数据处理:逐一核对每个粒位的荚果厚度动态,剔除过早停止发育籽粒的数据。荚果增厚速率用线性方程模拟。抗旱系数DRC(Drought-resistant coefficient)=旱地性状值/水地性状值^[1]。抗旱隶属函数值(Subordinate function value, SFV) = $\frac{X_{ij} - X_{j\min}}{X_{j\max} - X_{j\min}}$ ^[8]。利用Excel和SAS软件进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对大豆荚果厚度变化的影响

由于小管径的盆钵蓄水量有限,每日补充的水

量只够 3 株大豆 1 d 的消耗,所以在控水次日清晨即可观察到大豆叶片萎焉,说明干旱处理的严重度已经超过了植株自我调节的范围(土壤含水量达到植物萎焉点)。清晨萎焉现象出现后持续处理 3 d,全株叶片多数会枯干。复水后过夜,几近停止生长的大豆荚果厚度重新快速增加(超过对照),但之后

测定的荚果厚度增速一直低于对照,说明复水当日荚果厚度的快速增长只是一种补偿性增长,而干旱造成的损伤并没有因复水而消除。另外,观测显示,复水过夜时荚果厚度过快增长(>0.70 mm)可能导致荚果背缝线裂开,相关籽粒的鼓粒进程也会终止。

表 1 参试大豆材料与干旱处理情况

Table 1 Information of tested soybeans and drought stress processing

材料 Material	选育单位 Developed by	百粒重/g 100-seed weight	日期/(月一日) Date			
			花期标记 Flower tagged	控水 No-watered	叶片萎焉 Leaf wilting	复水 Re-watered
汾豆 65 Fendou 65	山西省农业科学院经济作物研究所 英文	20	06-26	07-21	07-23	07-24
中作 3088 Zhongzuo 3088	中国农业科学院作物科学研究所	20	06-26	07-23	07-24	07-27
中黄 30 Zhonghuang 30	中国农业科学院作物科学研究所	20	06-30	07-22	07-25	07-28
中黄 35 Zhonghuang 35	中国农业科学院作物科学研究所	16	06-26	07-22	07-25	07-28
邯豆 5 号 Handou 5	河北省邯郸市农业科学院	22	07-02	07-22	07-27	07-30
秦豆 8 号 Qindou 8	陕西省农垦科研中心	18	07-02	07-22	07-27	07-30
秦豆 11 号 Qindou 11	陕西省杂交油菜研究中心	19	07-02	07-22	07-27	07-30
鲁 96150 Lu 96150	山东省农科院作物研究所	25	07-06	07-25	07-27	07-30

汾豆 65 在控水后荚果厚度增速停滞($0.006 0 \pm 0.026 4$ mm/d),而复水后过夜,荚果厚度增加量($0.478 0 \pm 0.090 5$ mm/d)略高于对照同期的日增量($0.442 0 \pm 0.081 1$ mm/d),但差异不显著,之后测定的荚果厚度增长速率一直低于对照(图 1

(a)和表 2)。干旱处理 3 d 显著影响了汾豆 65 的籽粒发育,表现为干旱处理的最大荚果厚度、单粒重、鼓粒后期荚果增厚速率和鼓粒期平均增厚速率都明显低于对照,说明汾豆 65 对干旱胁迫比较敏感。

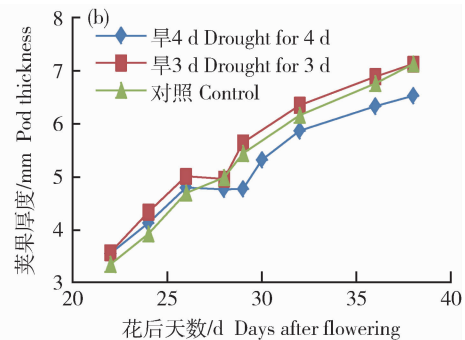
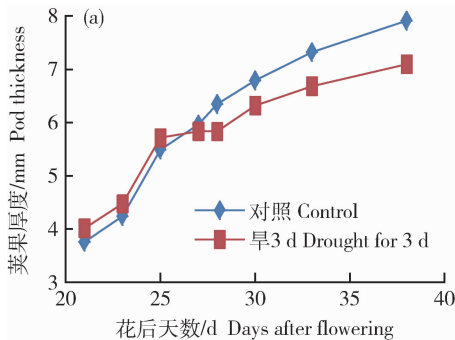


图 1 干旱处理后汾豆 65(a)和中作 3088(b)荚果厚度的变化

Fig. 1 Changes of pod thickness of Fendou 65 (a) and Zhongzuo 3088 (b) after drought treatment

中作 3088 干旱处理 3 d, 荚果厚度也停止增加, 但复水后荚果厚度相关指标虽低于对照, 但差异不显著, 说明中作 3088 能耐受 3 d 的干旱胁迫(图 1(b)和表 2), 干旱胁迫若再延长 1 d, 则复水后荚果厚度的相关指标显著低于对照, 说明严重干旱造成的损害在复水后并不能有效恢复。表明干旱处理的时间长短对于评价大豆的耐旱性很重要。

同样是干旱处理 3 d, 中作 3088 的后期鼓粒速率可以恢复到对照的 88.49%, 而汾豆 65 只有对照的 69.56%, 说明中作 3088 的鼓粒恢复能力强于汾豆 65, 即前者适应干旱的能力更强。

2.2 利用荚果厚度变化评价大豆耐旱性

从表 3 可以看出, 换更大盆径和高度的 PVC 管做试验, 从停止供水日算起, 不同材料在控水后 3~5 d 开始出现清晨叶片萎蔫现象(表 1), 其中汾豆 65、中黄 35 和中黄 30 在停水后 3 d 出现清晨萎蔫现象, 而秦豆 8 号、邯豆 5 号、秦豆 11 号和鲁 96150 的叶片萎蔫再延迟 2 d。而且在干旱处理期间, 汾豆 65、中黄 35 和中黄 30 的荚果厚度基本停止生长, 而鲁 96150 为 0.227 4 mm/d, 邯豆 5 号为 0.126 6 mm/d、秦豆 8 号为 0.090 0 mm/d 和秦豆 11 号为 0.081 6 mm/d 仍在缓慢生长。说明后者耐受干旱的能力更强, 其中尤以鲁 96150 最为突出。

抗旱和耐旱大豆品种应该具备如下特征: 干旱胁迫期有较高的鼓粒速率(耐胁迫能力强)和复水后可以较好地恢复鼓粒进程(恢复性好), 最终单粒重受影响较小(产量高)。表 4 列出了相关指标的抗旱系数, 并依据荚果厚度衍生的 3 个鼓粒速率指标和最大荚果厚度指标, 综合评价大豆材料鼓粒期的耐旱性强弱。平均抗旱系数(DRC)和隶属函数值(SFV)的排序结果是一样的: 鲁 96150、邯豆 5 号和秦豆 11 号属于鼓粒期耐旱品种, 而汾豆 65 和中黄 30 耐旱性较差。其中汾豆 65 不耐旱的结论再一次被证实。

为了探究干旱处理过程中鼓粒速率变化和最大荚果厚度对粒重的影响, 分别计算这些指标与平均单粒重的相关性(表 4)。结果显示, 处理期鼓粒速率与单粒重关系最密切($r=0.910\ 2$), 而复水当日的鼓粒速率与单粒重没有关系($r=0.063\ 5$)。因此, 在综合分析大豆品种的耐旱性时没有将复水当日的鼓粒速率纳入。

3 结论与讨论

盆栽方法是植物干旱胁迫研究中常用的方法。

利用盆栽试验鉴定植物耐旱性时, 通常都采取控制盆钵体积、土壤质量和浇水量等方法, 希望使干旱胁迫条件尽可能一致, 但随着大豆生长, 植株大小不一, 蒸腾量出现较大差异, 此时再利用称重等手段都难以保证材料遭受的水分胁迫程度相当。即便采用相同的控水日数, 植物遭受干旱胁迫的程度也并不一致, 因而关于材料成株期耐旱性强弱的结论偏差较大。因此, 干旱胁迫控制一直是大豆耐旱性鉴定试验中的关键步骤。本研究中利用大小不同的 2 种 PVC 管制作盆栽容器, 其中管径较小的盆由于容积有限, 蓄纳的水分也有限, 因此在控水次日便出现受旱症状; 而管径较大的盆从控水到植株萎蔫的时间约为 3~5 d。由于小管径盆栽试验中干旱胁迫出现早且旱情发展快, 因此, 小管径试验只能采用短期胁迫处理, 能快速评价大豆受旱后的反应情况, 但不能用于筛选延迟冠层萎蔫(Delayed Canopy wilting)的抗旱材料。大管径盆在控水后干旱胁迫出现晚且胁迫发展也相对缓慢, 可进行较长时间的干旱胁迫, 用于评价大豆冠层延迟萎蔫情况和耐旱性强弱。

大豆成株期的耐旱性只有在植株真正遭遇干旱时才能有效鉴别。研究显示, 大豆遭遇干旱胁迫, 首先表现为叶片萎蔫; 随着干旱胁迫程度加深, 鼓粒速率下降直至停滞; 一旦复水, 籽粒将出现补偿性快速增长, 但干旱胁迫的后效将持续存在, 表现为籽粒鼓粒速率相对下降, 从而导致最终粒重变小。叶片暂时萎蔫不会影响大豆鼓粒速率, 因此, 短期的干旱并不会导致产量明显下降。如果旱情持续发展, 叶片出现永久萎蔫甚至枯死, 叶片同化产物运输和根系水分供应严重不足, 难以保证物质向籽粒的运输, 荚果的正常鼓粒就会延缓甚至被抑制。因此, 叶片萎蔫可以作为大豆遭受干旱胁迫的起点, 干旱处理期和复水后鼓粒速率的变化可以反映大豆鼓粒期耐旱性的强弱。

鼓粒期抗旱性强的大豆品种在受到干旱胁迫后, 鼓粒速率下降较小, 解除干旱后鼓粒速率恢复较好, 能持续鼓粒进程, 最终粒重不受影响或受影响较小。据此, 鲁 96150, 邯豆 5 号和秦豆 11 号被鉴定为鼓粒期耐旱品种, 而汾豆 65 和中黄 30 的鼓粒期耐旱性较弱, 中黄 35 和秦豆 8 号鼓粒期耐旱性中等。本研究结果与前人的报道可以相互印证。如王敏等^[21]鉴定秦豆 8 号对花荚期干旱比较敏感。李占军等^[22]认为邯豆 5 号抗旱性较好。王兴荣等^[23]将鲁 96150 鉴定为 2 级抗旱品种。董友魁等^[24]也指

表 2 鼓粒期干旱对大豆荚果生长的影响
Table 2 Effect of drought stress at seed filling stage on soybean pod development

材料 Material	处理 Treatment	处理前荚果 厚度/mm Pod thickness before treatment	鼓粒速率/(mm/d) Seed filling rate estimated by pod thickness				最大荚果 厚度/mm Maximum pod thickness	平均单 粒重/g Average seed weight
			处理期 Treatment stage	复水当日 Re-watered day	鼓粒后期 Late stage	鼓粒期 Seed filling stage		
汾豆 56 Fendou 56	早 3 d Drought for 3 d	5.719 1±0.493 7 a	0.006 0±0.026 4 a	0.478 0±0.090 5 a	0.096 0±0.010 5 a	0.177 0±0.027 2 a	7.093 0±0.346 9 a	0.156 0±0.010 8 a
	对照 CK	5.489 5±0.292 8 a	0.383 0±0.0315 b	0.442 0±0.081 1 a	0.138 0±0.016 8 b	0.251 0±0.029 8 b	7.910 0±0.182 8 b	0.183 0±0.020 3 b
中作 3088 Zhongzuo 3088	早 3 d Drought for 3 d	4.335 1±0.703 7 a	-0.050 4±0.050 5 b	0.681 6±0.035 5 a	0.161 5±0.016 7 a	0.217 5±0.017 5 a	7.134 0±0.457 1 a	0.145 9±0.0238 a
	早 4 d Drought for 4 d	4.131 9±0.486 2 a	-0.007 7±0.006 5 b	0.546 8±0.030 8 b	0.111 6±0.003 5 b	0.183 7±0.014 4 b	6.533 0±0.330 0 b	0.109 3±0.0324 b
对照 CK	对照 CK	3.929 4±0.620 8 a	0.231 7±0.076 1 a	0.451 7±0.020 7 c	0.182 5±0.013 3 a	0.233 9±0.013 8 a	7.132 0±0.398 3 a	0.163 0±0.0154 a

注：数据表示方式为均值±标准误(差)。其中处理前荚果厚度、最大荚果厚度和平均单粒重显示均值±测定标准差；复水当日鼓粒速率按成对数据进行比较估计，其他鼓粒速率用荚果厚度与花后天数的线性方程斜率表示。每列数据后面的小写字母表示同一材料不同处理间差异的显著性($P<0.05$)。

Note: Data is shown as mean ± standard error for different seed filling rate estimated by pod thickness and mean ± standard deviation for pod thickness before treatment, maximum pod thickness, and average seed weight. Seed filling rate in re-watered day was estimated as paired data, and other seed filling rates were estimated by the linear function of pod thickness against days after flowering. Different letters after the data in each column indicate the significant difference between various treatments within a material.

表 3 不同大豆品种对鼓粒期干旱处理的反应
Table 3 Response of different soybeans to drought stress during seed filling stage

材料 Material	处理 Treatment	萎蔫 天数/d Days to wilting	处理前荚果 厚度/mm Pod thickness before treatment	鼓粒速率/(mm/d) Seed filling rate estimated by pod thickness			最大荚果 厚度/mm Maximum pod thickness	平均单粒重/g Average seed weight	
				处理期 Treatment stage	复水当日 Re-watered day	鼓粒后期 Late stage			鼓粒期 Seed filling stage
汾豆 65 Fendou 65	干旱 Drought	3	5.314 8±0.571 2	0.013 3±0.058 1	0.249 1±0.042 1	0.098 2±0.016 7	0.107 4±0.011 1	7.349 0±0.474 1	0.163 9±0.029 3
	对照 CK		5.130 6±0.904 6	0.379 1±0.129 9	0.255 3±0.039 8	0.164 3±0.013 9	0.246 2±0.020 6	9.015 3±0.591 2	0.205 9±0.038 7
中黄 35 Zhonghuang 35	干旱 Drought	3	4.955 5±0.572 7	0.033 0±0.032 2	0.516 7±0.043 3	0.084 7±0.016 1	0.140 9±0.013 4	6.758 6±0.299 7	0.116 2±0.020 1
	对照 CK		5.181 9±0.619 5	0.183 9±0.015 1	0.189 4±0.013 0	0.115 3±0.010 9	0.165 3±0.013 9	7.460 0±0.628 8	0.159 4±0.029 7
中黄 30 Zhonghuang 30	干旱 Drought	3	4.817 1±0.658 8	0.035 8±0.034 6	0.455 8±0.062 4	0.106 6±0.022 1	0.159 3±0.015 0	7.472 1±0.982 8	0.175 9±0.039 6
	对照 CK		4.401 8±0.736 9	0.287 8±0.027 2	0.409 2±0.029 4	0.180 1±0.014 6	0.258 8±0.020 1	8.570 8±0.381 6	0.215 8±0.018 8
秦豆 8 号 Qindou 8	干旱 Drought	5	4.141 3±0.796 7	0.090 0±0.028 9	0.568 9±0.028 4	0.109 9±0.005 2	0.218 6±0.016 2	7.221 3±0.605 1	0.179 1±0.025 7
	对照 CK		3.392 0±0.586 1	0.265 1±0.003 5	0.259 0±0.029 8	0.163 9±0.005 5	0.276 6±0.016 7	7.219 5±0.534 4	0.179 0±0.026 9
邯豆 5 号 Handou 5	干旱 Drought	5	4.136 7±0.560 6	0.126 6±0.028 9	0.522 3±0.025 6	0.113 3±0.022 6	0.249 8±0.015 3	7.502 7±0.710 1	
	对照 CK		3.765 2±0.539 8	0.254 2±0.006 1	0.192 0±0.027 7	0.161 1±0.013 9	0.230 4±0.011 8	6.921 1±0.508 2	
秦豆 11 号 Qindou 11	干旱 Drought	5	4.193 4±0.718 6	0.081 6±0.051 5	0.529 7±0.018 5	0.130 3±0.003 6	0.254 2±0.015 9	6.852 9±0.571 6	
	对照 CK		4.053 2±0.628 1	0.265 5±0.035 2	0.257 3±0.051 2	0.160 3±0.020 6	0.225 8±0.007 2	6.696 4±0.463 3	
鲁 96150 Lu 96150	干旱 Drought	5	4.099 3±0.231 2	0.227 4±0.048 0	0.541 7±0.017 9	0.226 5±0.022 7	0.306 4±0.009 8	7.604 2±0.294 2	0.247 4±0.026 9
	对照 CK		4.304 8±0.877 3	0.383 6±0.082 9	0.296 1±0.035 1	0.243 7±0.011 7	0.317 8±0.011 6	7.740 9±0.313 9	0.220 9±0.015 5

注: 数据表示方式为均值±标准误(差)。其中处理前荚果厚度、最大荚果厚度和平均单粒重显示均值±测定标准差; 复水当日鼓粒速率按成对数据进行比较估计; 其他鼓粒速率用荚果厚度与花后天数的线性方程斜率表示, 其中处理期鼓粒速率用复水前连续 3 d 的荚果厚度估计。

Note: Data is shown as mean±standard error for pod thickness and mean±standard deviation for pod thickness before treatment, maximum pod thickness, and average seed weight. Seed filling rate in re-watered day was estimated as paired data, and other seed filling rates were estimated by the linear function of pod thickness against days after flowering. The seed filling rate at treatment stage was estimated on the base of continuous data of three days before re-watered.

表 4 大豆鼓粒相关指标的抗旱系数

Table 4 Drought-resistance coefficients (DRC) of different indexes related to seed filling

材料 Material	干旱期鼓 粒速率 Seed filling rate during drought stress	后期鼓 粒速率 Seed filling rate at late stage	鼓粒期 平均速率 Average seed filling rate	最大荚果 厚度 Maximum pod thickness	平均单 粒重 Average seed weight	复水当日 速率 Seed filling rate after re-watered	平均抗旱 系数* Average DRC	排序 Rank	平均抗旱 隶属 函数值 Average SFV
汾豆 65 Fendou 65	0.035 1	0.597 7	0.436 2	0.815 2	0.796 0	0.975 7	0.471 0	7	0.004 3
中黄 35 Zhonghuang 35	0.179 4	0.734 6	0.852 4	0.906 0	0.729 0	2.728 1	0.668 1	5	0.405 7
中黄 30 Zhonghuang 30	0.124 4	0.591 9	0.615 5	0.871 8	0.815 1	1.113 9	0.550 9	6	0.157 7
秦豆 8 号 Qindou 8	0.339 5	0.670 5	0.790 3	1.000 2	1.000 6	2.196 5	0.700 1	4	0.495 1
鲁 96150 Lu 96150	0.592 8	0.929 4	0.964 1	0.982 3	1.120 0	1.829 4	0.867 2	1	0.846 8
邯豆 5 号 Handou 5	0.498 0	0.703 3	1.084 2	1.084 0		2.720 3	0.842 4	2	0.774 9
秦豆 11 号 Qindou 11	0.307 3	0.812 8	1.125 8	1.023 4		2.058 7	0.817 3	3	0.729 3
与粒重相关性 r	0.910 2*	0.684 6	0.570 1	0.779 5	1.000 0	0.063 5			

注：抗旱系数=干旱处理与对照处理相应指标的比值；抗旱隶属函数值= $(X_{ij} - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ 计算没有包含平均粒重和复水当日速率的数据。

Note: Drought-resistance coefficient (DRC) = observed value of indicator from drought-stressed plant divided by counterpart from well-watered plant (control), subordinate function value (SFV) = $(X_{ij} - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$, and the average seed weight and seed filling rate after re-watered is not involved in the calculation of average DRC and SFV.

出中黄 35 在鼓粒期干旱情况下百粒重和单株粒重降幅较大。

前人依据干旱胁迫条件下产量和其他农艺性状的变化评价大豆成株期耐旱性的高低，而这些指标都是静态测定值，难以揭示大豆成株期耐旱的本质。本研究利用荚果厚度变化有效度量大豆遭受干旱胁迫期间和复水后的鼓粒速率变化，从“源库流”的角度揭示大豆遭遇干旱胁迫后“库”和“流”的变化，为大豆鼓粒期耐旱性评价提供了新的思路。今后的大豆耐旱性研究中，可以考虑从“源流库”角度探讨叶片光合作用和根系营养吸收、物质转运速率（鼓粒速率）、库容和生物量变化（产量及其构成因子，最大荚果厚度，其他农艺性状）与干旱胁迫的关系，更科学

全面地评价大豆耐旱性。

总之，本研究用下端封口的小管径 PVC 管做盆栽容器设置干旱处理，并以植株叶片萎蔫作为干旱胁迫起始的形态指标，用荚果厚度度量了干旱胁迫对大豆灌浆速率的影响，并据此对多个大豆材料的鼓粒期抗旱性进行了评价，为大豆鼓粒期抗旱性鉴定提供了新的方法，筛选出的抗旱大豆品种可用于旱地栽培和大豆抗旱育种。从“源库流”角度研究大豆鼓粒期遭遇干旱后的反应，有利于深化我们对大豆耐旱机制的理解。

参考文献 References

[1] 刘学义. 干旱[M] // 林汉明, 常汝镇, 邵桂花, 刘忠堂. 中国大

- 豆耐逆研究,北京:中国农业出版社,2009:1-50
- Liu X Y. Drought[M]. In:Lin H M,Chang R Z,Shao G H,Liu Z T. eds. Research on Tolerance to Stress in Chinese Soybean. Beijing:Chinese Agricultural Press,2009:1-50 (in Chinese)
- [2] 闫春娟,王文斌,涂晓杰,王昌陵,张立军,杜强,宋书宏. 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, Wang C L, Zhang L J, Du Q, Song S H. Effect of drought stress at different growth stage on yield and root characteristics of soybean[J]. *Soybean Science*, 2013, 32(1):59-62,67 (in Chinese)
- [3] 郭数进,杨凯敏,霍瑾,周永航,王燕平,李贵全. 干旱胁迫对大豆鼓粒期叶片光合能力和根系生长的影响[J]. 应用生态学报,2015,26(5):1419-1425
- Guo S J, Yang K M, Huo J, Zhou Y H, Wang Y P, Li G Q. Influence of drought on leaf photosynthetic capacity and root growth of soybeans at grain filling stage[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(5):1419-1425 (in Chinese)
- [4] 张敬荣,高继国,李辰仁,郑慧琴,李文芙,朱祥春. 开花至鼓粒期干旱对大豆籽粒化学品质的影响[J]. 大豆科学,1996,15(1):84-90
- Zhang J R, Gao J G, Li C R, Zheng H Q, Li W F, Zhu X C. The effect of dry condition from flowering to seeding stages on chemical composition in soybean[J]. *Soybean Science*, 1996, 15(1):84-90 (in Chinese)
- [5] 郑伟,杨国珍,郭泰,王志新,李灿东,张振宇,张茂明,王庆胜,郭美玲,刘忠堂. 鼓粒期干旱对黑龙江省不同年代育成大豆品种根系的影响[J]. 作物杂志,2014(6):39-43
- Zheng W, Yang G Z, Guo T, Wang Z X, Li C D, Zhang Z Y, Zhang M M, Wang Q S, Guo M L, Liu Z T. Influence of seed-filling period drought on the roots of Heilongjiang Province soybean varieties bred in different areas[J]. *Crops*, 2014(6):39-43 (in Chinese)
- [6] Ohashi Y, Nakayama N, Saneoka H, Mohapatra P K, Fujita K. Difference in the responses of stem diameter and pod thickness to drought stress during the grain filling stage in soybean plants[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2009, 31(2):271-277
- [7] Carrow R. Drought avoidance characteristics of diverse tall fescue cultivars[J]. *Crop Science*, 1996, 36(2):371-377
- [8] 刘学义. 大豆抗旱性评价方法探讨[J]. 中国油料,1986(4):23-26
- Liu X Y. Evaluation methods of soybean droughtresistance[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Science*, 1986(4):23-26 (in Chinese)
- [9] 祁旭升,刘章雄,关荣霞,王兴荣,苟作旺,常汝镇,邱丽娟. 大豆成株期抗旱性鉴定评价方法研究[J]. 作物学报,2012,38(4):665-674
- Qi X S, Liu Z X, Guan R X, Wang X R, Gou Z W, Chang R Z, Qiu L J. Comparison of evaluation methods for drought-resistance at soybean adult stage[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(4):665-674 (in Chinese)
- [10] King C A, Purcell L C, Brye K R. Differential wilting among soybean genotypes in response to water deficit [J]. *Crop Science*, 2009, 49(1):290-298
- [11] Abdel-Haleem H, Carter J T E, Purcell L C, King C A, Ries L L, Chen P, Schapaugh J W, Sinclair T R, Boerma H R. Mapping of quantitative trait loci for canopy-wilting trait in soybean (*Glycine max* L Merr)[J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2012, 125(5):837-846
- [12] Hwang S, King C A, Ray J D, Cregan P B, Chen P, Carter J T E, Li Z, Abdel-Haleem H, Matson K W, Schapaugh J W, Purcell L C. Confirmation of delayed canopy wilting QTLs from multiple soybean mapping populations [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2015, 128(10):2047-2065
- [13] 王伟,姜伟,张金龙,苗龙,赵团结,盖钧镒,李艳. 大豆种质的耐旱性鉴定及耐旱指标筛选[J]. 大豆科学,2015,34(5):808-818
- Wang W, Jiang W, Zhang J L, Miao L, Zhao T J, Gai J Y, Li Y. Selection of drought-tolerant soybean and evaluation of the drought tolerance indices[J]. *Soybean Science*, 2015, 34(5):808-818 (in Chinese)
- [14] Egli D B, Legget J E, Wood J M. Influence of soybean seed size and position on the rate and duration of filling[J]. *Agronomy Journal*, 1978, 70(1):127-130
- [15] 苏黎,张仁双,宋书宏,董钻,谢甫绋,王晓光. 不同结荚习性大豆开花结荚鼓粒进程的比较研究[J]. 大豆科学,1997,16(3):237-244
- Su L, Zhang R S, Song S H, Dong Z, Xie F T, Wang X G. Comparative studies on flowering pod setting and seed filling of soybeans with different podding habits[J]. *Soybean Science*, 1997, 16(3):237-244 (in Chinese)
- [16] Jiang Z F, Ding J J, Han Y P, Teng W L, Zhang Z C, Li W B. Identification of QTL underlying mass filling rate at different developmental stages of soybean seed[J]. *Euphytica*, 2013, 189(2):249-260
- [17] 王晓光,董钻,谢甫绋. 不同结荚习性大豆荚粒形成的比较研究[J]. 辽宁农业科学,1998,(1):20-23
- Wang X G, Dong Z, Xie F T. Comparative studies on pod and seed establishment of soybeans with different podding habits [J]. *Liaoning Agricultural Sciences*, 1998, (1):20-23 (in Chinese)
- [18] 李得孝,王晶,刘修杰,胡超,刘义. 利用荚果厚度模拟大豆鼓粒进程的研究[J]. 中国农业大学学报,2014,19(1):29-36
- Li D X, Wang J, Liu X J, Hu C, Liu Y. Seed-bulging simulation with pod thickness in soybean (*Glycine max* (L) Merri)[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2014, 19(1):29-36 (in Chinese)
- [19] 李得孝,刘修杰,胡超,陈见生,周和吾. 大豆节位和粒位对荚果厚度的影响[J]. 大豆科学,2014,33(6):841-847
- Li D X, Liu X J, Hu C, Chen J S, Zhou H W. Effect of node and seed position on pod thickness related indexes in soybean[J]. *Soybean Science*, 2014, 33(6):841-847 (in Chinese)
- [20] 李得孝,陈见生,刘修杰. 基于大豆荚果厚度模拟评价黄淮夏大

- 豆品种的鼓粒特性[J]. 南京农业大学学报, 2015, 38(1): 8-14
- Li D X, Chen J S, Liu X J. Evaluation of seed-bulging characteristics of summer soybean lines in Huang-Huai Area based on pod thickness simulation[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2015, 38(1): 8-14 (in Chinese)
- [21] 王敏, 杨万明, 侯燕平, 岳爱琴, 李贵全, 杜维俊. 不同类型大豆花荚期抗旱性形态指标及其综合评价[J]. 核农学报, 2010, 24(1): 154-159
- Wang M, Yang W M, Hou Y P, Yue A Q, Li G Q, Du W J. Morphological indexes of drought resistance of soybean accessions and its comprehensive evaluation on flowering and podding stage[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2010, 24(1): 154-159 (in Chinese)
- [22] 李占军, 李敏, 金素娟, 王玉岭. 河北省抗旱高产夏大豆品种筛选[J]. 河北农业科学, 2011, 15(3): 101-102, 105
- Li Z J, Li M, Jin S J, Wang Y L. Screening of drought resistance and high yield summer soybean varieties in Hebei Province[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2011, 15(3): 101-102, 105 (in Chinese)
- [23] 王兴荣, 张彦军, 苟作旺, 祁旭升, 刘章雄. 大豆种质资源抗旱性综合评价[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(5): 17-23, 40
- Wang X R, Zhang Y J, Gou Z W, Qi X S, Liu Z X. Comprehensive evaluation on drought-resistance traits of soybean germplasm resources[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(5): 17-23, 40 (in Chinese)
- [24] 董友魁, 赵洋, 杨爱寻, 刘德恒, 韩艳红, 唐红丽. 干旱胁迫对超高产大豆品种产量形成的影响[J]. 现代农业科技, 2015(2): 9-10, 12
- Dong Y K, Zhao Y, Yang A X, Liu D H, Han Y H, Tang H L. Effect of drought stress on yield components of super-high-yield soybean [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2015(2): 9-10, 12 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅