

结荚期短期干旱和复水对大豆 (*Glycine max*) 叶片光合和产量的影响

王 磊, 王鹏程, 张 彤, 张恒月, 丁圣彦*

(河南大学生态科学与技术研究所; 河南省植物逆境生物学重点实验室, 开封 475001)

摘要: 以大豆为研究对象, 研究结荚期土壤水分的短期变动对大豆叶片光合生理生态以及最后产量形成的影响。研究发现, 与叶片的水分状况相比, 大豆的叶片气孔对土壤水分的匮乏更加敏感, 在实验的第 2 天, 处理组叶片气孔导度降为对照的 24.9% ($P < 0.01$), 但是叶片水势和对照相差不显著 ($P > 0.05$); 随着土壤干旱的进行, 处理组叶片的净光合速率、蒸腾速率等都显著下降, 但 $\Phi PS II$ 只有在第 3 天才出现显著的下降。复水后第 3 天, 净光合速率比对照高 24.3% ($P < 0.01$), 表现出了明显的旱后超补偿效应; 研究发现, 结荚期即使短期的土壤水分干旱, 也会对大豆后期的生物量的分配产生较大的影响, 使处理组的豆干重降低 13.9% ($P < 0.01$), 根茎比增加 35.3% ($P < 0.05$), 收获指数减少 17.4% ($P < 0.05$)。

关键词: 大豆; 干旱; 结荚期; 光合; 产量

文章编号: 1000-0933(2009)06-3328-07 中图分类号: Q142.9, Q945, S314 文献标识码: A

Effect of short-term drought and rewatering during the pod-setting stage on leaf photosynthesis and yield of the soybean

WANG Lei, WANG Peng-Cheng, ZHANG Tong, ZHANG Heng-Yue, DING Sheng-Yan*

Institute of Ecological Science and Technology of Henan University The Key Laboratory of Plant Stress Biology of Henan Province, Kaifeng 475001, China
Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6): 3328 ~ 3334.

Abstract: Global climate change is likely to drive up regional drought frequencies, aggravating China's water shortage problem. Therefore, it is imperative to strengthen researches on crops adapting to the soil drought and agricultural water use efficiency. Soybean is an important source of high-quality protein and edible oil with relatively high water requirement. With an underdeveloped root system, it is the most drought-sensitive bean species. The number of pods per soybean plant is determined during the early stage of pod development. This stage is characterized by active cell division in the young ovules and is marked by rapid pod expansion. Drought stress occurring at this stage significantly increases the rate of pod abortion thus decreasing final seed yield. Therefore, this research focused on the effect of short-term soil water shortage during the pod-setting stage on leaf photosynthetic physioecology and final yield of the soybean, to provide a theoretical basis for water-saving cultivation and high-efficiently water using of soybean. It showed that leaf stomata appeared to be more sensitive to soil water content than leaf water content. On the second day of the experiment, leaf g_s of the treatment group decreased to 24.9% of that of the CK ($P < 0.01$), but there was no statistically significant difference in leaf water potential ($P > 0.05$). Along with the water withholding, both leaf net photosynthetic rate and transpiration rate of the treatment group declined significantly during the drought, but $\Phi PS II$ only dropped on the third day of the experiment. On the third day after rewatering, net photosynthetic rate of the treatment group was 24.3% higher than that of the CK, showing a marked ultra-compensation effect after drought stress. Average seed dry weight, root/shoot ratio and harvest index of the treatment group were respectively 13.9% lower ($P < 0.01$), 35.3% higher ($P < 0.05$), and 17.4% lower ($P < 0.05$) than those

基金项目: 河南大学特聘教授科研基金资助项目; 河南省教育厅自然科学研究资助项目(2008B180004)

收稿日期: 2008-02-26; 修订日期: 2008-06-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: syding@henu.edu.cn

of the CK. These results suggest that even a short-term drought during the pod-setting stage could influence later biomass distribution markedly.

Key Words: soybean; drought; pod-setting stage; photosynthesis; yield

随着全球气候的变化,区域性干旱出现的频率将会增加,农业生产中的水资源短缺也将会持续加剧^[1]。因此,有必要加强有关植物尤其是作物对土壤干旱适应性的研究,提高农业生产的水分利用效率。

大豆是人类优质蛋白和食用油脂的重要来源,但大豆需水量较高,根系不发达,是豆类作物中对缺水最为敏感的一种^[2]。在干旱条件下,大豆叶片的光合速率以及水势都会显著下降^[3];在轻度土壤干旱过程中,大豆叶片气孔导度的下降可能主要受根源 ABA 的控制,但是随着土壤干旱的进行,叶片细胞膨压的降低可能在气孔导度的下降中起到主要作用^[4]。大豆每株的豆荚数主要是由豆荚发育的早期阶段所决定的,在豆荚发育的早期阶段,在幼小的胚珠中存在着活跃的细胞分裂和迅速的豆荚生长,这些过程都对干旱相当敏感,干旱胁迫发生在这个阶段将大大地增加豆荚的败育,降低产量^[5]。

干旱对植物的影响是一个从适应、伤害、修复到补偿的过程^[6],前期有关干旱胁迫对大豆生长发育的研究较多,但多集中于在土壤水分匮乏过程中其产量、叶片光合、可溶性物质含量和抗氧化系统等变化上^[7-9],而对逐步水分亏缺及复水过程中大豆光合生理生态的研究还很少,对前期干旱胁迫对后期大豆生物量分配影响的研究还不多。因此,本研究拟通过研究大豆结荚期土壤水分的短期变动对叶片光合生理生态以及最后产量形成的影响,为大豆的节水栽培和水分高效利用提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 实验材料

实验材料选用河南省大面积种植的大豆(*Glycine max*)品种,郑 92116(Zheng92116,购自开封市种子公司),大豆生长的土壤用营养土和沙土按 1:3 的比例配成,混匀后将土壤装入内径为 24.5 cm,高度为 21.0 cm 的塑料盆中,土壤的饱和含水量为 47.8%。于 2006 年 7 月 3 日在河南大学生命科学学院楼顶实验台进行种植,每盆种 5~6 株,每个处理 5 个重复,共种植 10 盆。

1.2 实验方法

在生长过程中保持充足的水分供应,土壤含水量采用称重法进行控制,每天傍晚补水,使各盆的土壤相对含水量(土壤相对含水量 = 土壤含水量/土壤饱和含水量)保持在 70.0% 左右,当大豆生长到一定高度时进行定苗,每盆保留 3 株生长基本一致的种苗。

从 8 月 24 日开始进行控水实验,这时是大豆的结荚期,控水实验共持续 6d。对照组(CK)土壤相对含水量始终保持在 70.0% 左右,处理组(T)自然干旱,在实验的第 3 天中午进行复水,使土壤相对含水量恢复到对照的水平。

大豆叶片水势用 HR-33T 露点微伏压计(美国 WESCOR 公司生产)进行测定;叶片净光合速率、蒸腾速率等指标用 LI-6400 便携式光合作用测定仪(美国 LI-COR 公司生产)进行测定。测定时,在同一天的实验过程中,叶室中温度都根据外界数值而设定为一恒定值,从而保证测定过程中各组外界环境的相对一致性。测定过程中,使用红蓝光源,将叶室内光合有效辐射(photosynthetic active radiation, PAR)设置为 1100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;叶片叶绿素荧光参数用 FMS-2 叶绿素荧光仪(英国 Hansatech 公司生产)进行测定。其中,除了叶片水势的测定在 8:00,其余各项指标的测定均在 9:00 进行,叶绿素荧光值也在 12:00 测定,测定时选用植物最上部充分展开的叶片。

在 2006 年 9 月 24 日进行生物量的测定,将每盆中的 3 株植株作为一个整体进行取样,将根、茎、叶、豆和豆荚分开,先在 105℃ 的烘箱中杀青 10min,然后在 75℃ 的条件下烘干至恒重。

实验数据采用 5 个重复的平均值 \pm 标准差(standard deviation, mean \pm S. D.),用 SPSS(10.0)软件进行数

据分析,用 t 检验进行 2 个处理组间的显著性差异分析。

2 结果与分析

2.1 干旱和复水过程中环境因子的变化

表 1 表示的是在测定过程中各项环境因子的变化,它们是通过 LI-6400 便携式光合作用测定系统测定的。从表 1 中可以看出,在实验过程中,每天环境因子的变化是很大的。温度(temperature, T)的变化范围为: 25.6 ~ 32.4℃;相对湿度(relative humidity, RH)的变化范围为: 61.1% ~ 76.9%;大气 CO_2 浓度(CO_2 concentration in the atmosphere, $CO_{2\text{atm}}$)的变化范围为: 373 ~ 430 $\mu\text{mol/mol}$ 。

表 1 测定过程中环境因子的变化

Table 1 The changes of the environmental factors during the course of measurement

项目 Item	时间 Time (d)					
	1	2	3	4	5	6
温度 T (°C)	31.5 ± 0.060	32.4 ± 0.060	28.9 ± 0.020	32.4 ± 0.047	31.7 ± 0.074	25.6 ± 0.034
相对湿度 RH (%)	61.6 ± 0.52	66.1 ± 0.36	70.7 ± 0.35	66.7 ± 0.21	76.9 ± 0.28	72.0 ± 0.28
大气 CO_2 浓度 $\text{atm}CO_2$ ($\mu\text{mol/mol}$)	415 ± 3.71	424 ± 3.20	396 ± 4.24	401 ± 4.18	430 ± 1.11	373 ± 0.58

2.2 干旱和复水过程中土壤相对含水量和大豆叶片水势的变化

干旱和复水过程中各组土壤相对含水量的变化如图 1。从中可以看出,在实验过程中,对照组的土壤相对含水量始终保持在 70.0% 左右。处理组的土壤相对含水量在第 2 天降为 28.5%,第 3 天降为 18.8%,然后复水,使土壤相对含水量恢复到对照的水平。

图 2 所示的是在实验过程中对照组和处理组大豆叶片水势随时间的变化,从中可以看出,在实验的前 2 d,对照组和处理组的叶片水势相差不显著 ($P > 0.05$)。随着干旱的进行,处理组叶片水势急剧下降,在第 3 天降为 -1.48 MPa,和对照相比差异极显著 ($P < 0.01$)。复水后处理组的叶片水势可以得到恢复,并在复水后的第 1 天就达到对照的水平 ($P > 0.05$)。

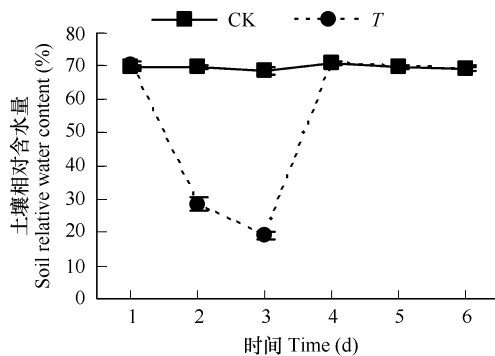


图 1 土壤相对含水量的变化

Fig. 1 The changes of the soil relative water content

平均值 ± 标准差,下同 Error bars show the S. D., the same below

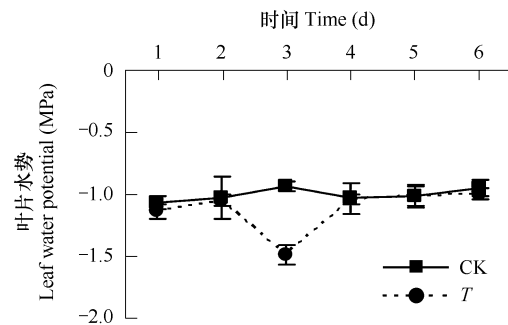


图 2 叶片水势的变化

Fig. 2 The changes of the leaf water potential

2.3 干旱和复水过程中大豆叶片净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(g_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i)的变化

光合作用是作物生长发育和产量形成的基础,图 3a 表示的是实验过程中大豆叶片 P_n 的变化。在实验的第 2 天,处理组的净光合速率降为对照的 61.8% ($P < 0.01$),第 3 天降为对照的 28.9% ($P < 0.01$)。复水后,净光合速率急剧上升,并在实验的最后比对照高出 17.0% ($P < 0.01$)。图 3b 表示的是 T_r 的变化,在第 2 天蒸腾速率降为对照的 45.5% ($P < 0.01$),第 3 天降为对照的 20.1% ($P < 0.01$),复水后第 3 天高出对照 47.1%

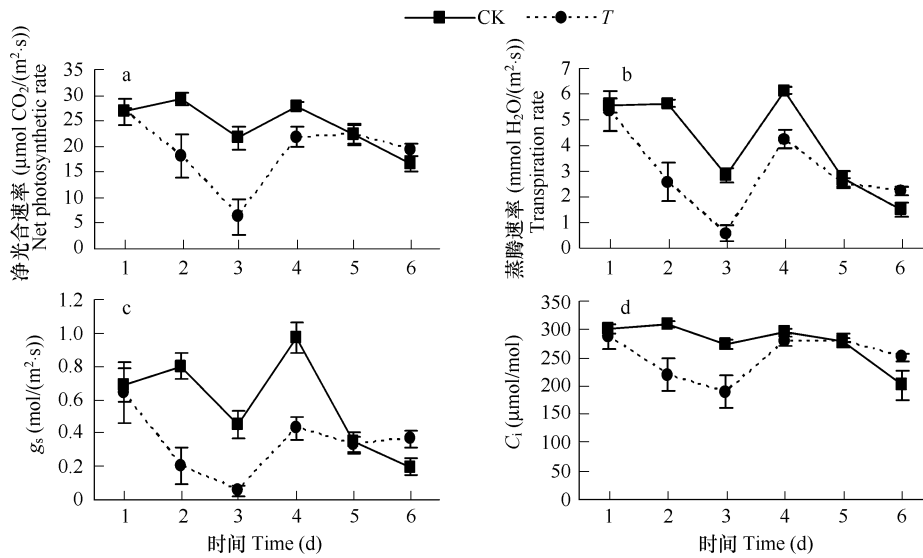


图3 干旱和复水过程中大豆叶片 P_n(a)、T_r(b)、g_s(c) 和 C_i(d) 的变化

Fig. 3 Changes in leaf net photosynthetic rate (a), transpiration rate (b), g_s(c) and C_i(d) of soybean during the course of drought and rewating

(*P* < 0.01)。

图 3c 表示的是实验过程中大豆叶片 g_s 的变化。在实验的第 2 天,处理组叶片气孔导度开始显著下降,在第 2、3 天分别降为对照的 24.9% 和 11.2%。复水后,处理组的叶片气孔导度开始上升,在复水后第 1 天和第 2 天恢复为对照的 44.1% 和 93.7%,在实验的最后比对照高 84.5% (*P* < 0.01)。实验过程中叶片 C_i 的变化如图 3d,从实验的第 2 天开始处理组 C_i 开始降低,在实验的最后高出对照 24.3% (*P* < 0.01)。

2.4 干旱和复水过程中叶片叶绿素荧光值的变化

ΦPS II 表示的是 PS II 的实际光能转化效率,它反映 PS II 反应中心在有部分关闭情况下的实际原初光能捕获效率,是在叶片没有经过暗适应而在光下直接测到的^[10]。图 4 所示的是实验过程中大豆叶片 ΦPS II 在 9:00 和 12:00 的变化。在实验的第 3 天,处理组叶片的 ΦPS II 和对照组的相比呈极显著差异 (*P* < 0.01),在 9:00 和 12:00 分别降为对照的 81.5% 和 45.3%,复水 1d 后,处理组叶片的 ΦPS II 在 9:00 和 12:00 就都恢复到了对照组的水平 (*P* > 0.05)。

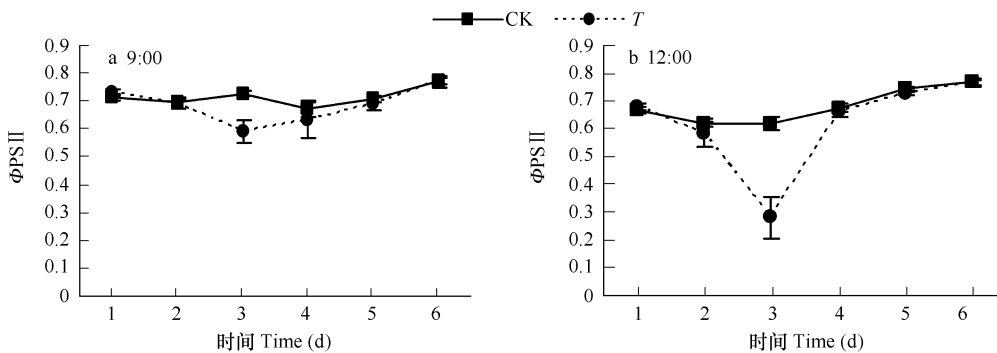


图 4 干旱和复水过程中大豆叶片 ΦPS II 的变化

Fig. 4 The changes of ΦPS II in leaf of soybean on the course of drought and rewating

2.5 结荚期干旱和复水对大豆产量和生物量分配的影响

水分作为影响作物生长发育的主要因素之一,影响着作物的生理生化过程,最终以植物各部分生物量的累积、产量的形成体现出来。结荚期干旱和复水对大豆后期生物量分配的影响如图 5,研究发现,虽然结荚期

短期的干旱和复水,也能对大豆后期的生物量分配产生比较大的影响,处理组的豆干重与对照相比降低了 13.9% ($P < 0.01$),根的干重提高了 25.3% ($P < 0.05$),其它各部分产量之间没有显著差异。

根茎比的变化,常常反映出植物为了最大化的获取资源而采取的生物量最优分配策略,也就是植物通过调节分配各器官的生物量,以保证自身能够最大化的吸收受限资源^[11]。图 6 表示的是在实验过程中结荚期干旱和复水对后期大豆根茎比和收获指数的影响,在本实验中,与对照相比,处理组的根茎比增加了 35.3% ($P < 0.05$)。收获指数(Harvest Index)是作物收获时经济产量(籽粒、果实等)与生物产量之比,又名经济系数,其生理本质反映了作物同化产物在籽粒和营养器官上的分配比例。研究发现,在实验过程中,处理组的收获指数减少了 17.4% ($P < 0.05$)。

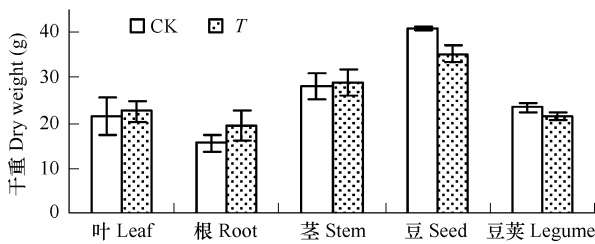


图 5 结荚期干旱和复水对大豆生物量分配的影响

Fig. 5 The effects of drought and rewatering on the biomass distribution of soybean

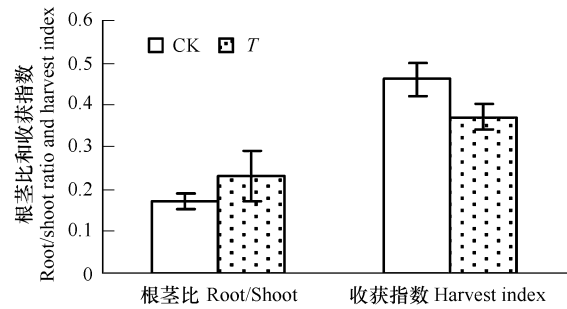


图 6 结荚期干旱和复水对大豆根茎比和收获指数的影响

Fig. 6 The effects of drought and rewatering on the Root/Shoot ratio and harvest index of soybean

3 讨论

水是影响植物光合作用和蒸腾作用的最重要的环境因子之一。不同水分状况对植物的生理功能和生长发育的影响不同^[12,13],但是干旱限制光合主要是通过气孔关闭还是通过代谢损伤,还存在着比较大的争论^[14]。当前,已经获得了许多转基因作物,它们也表现出了一定的抗旱性,但是它们在农艺性状、生长发育上还都表现出不同程度的缺点^[15-17],这就进一步说明了对于作物在干旱逆境下生理生态机制的研究还不够,还应当对这一生理生态机制进行更深入的研究^[18]。

研究发现,在实验的第 2 天,虽然处理组土壤相对含水量降为 28.5%,但是它的叶片水势和对照组相差不显著 ($P > 0.05$),第 3 天处理组的叶片水势降为 -1.48MPa ,复水后第 1 天就恢复到了对照的水平 ($P > 0.05$)。Koichi Miyashita 等的研究也发现^[19],在四季豆 (*Phaseolus vulgaris*) 遭受自然干旱时,虽然土壤含水量在前 5d 一直下降,但是叶片水势并没有下降,直到第 6 天叶片水势才明显降低。在实验的第 2 天,处理组的叶片 g_s 就开始显著下降,降为对照的 24.9%,而叶片水势和对照相比不显著,这可能是由于随着土壤干旱的进行,大豆的根部产生化学信号物质,这些非水力根源信号 (non-hydraulic root-sourced signal, NRS) 物质向上运输,导致了叶片 g_s 的大幅下降,从而减少大豆叶片水分的过多散失^[20,21]。

在实验的第 2 天,处理组的净光合速率降为对照的 61.8% ($P < 0.01$), g_s 降为 $198.9\text{mmol H}_2\text{O}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,但无论是在上午还是在中午处理组叶片的 $\Phi\text{PS II}$ 和对照相比都没有降低,这说明此时 PSII 的非环式电子传递效率或光能捕获效率并没有下降。Medrano 等认为,气孔导度可以作为干旱诱导的不同光合过程抑制的一个很好指标,并且能够很好评估干旱的气孔和非气孔限制。当植物受到干旱胁迫,在气孔导度下降的过程中,如果 $g_s > 150\text{mmol H}_2\text{O}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,气孔限制在光合作用的下降中起主要作用^[22]。结合 Medrano 等的假说,可以认为,处理组叶片净光合速率在第 2d 的降低主要是由于气孔关闭引起的。在实验的第 3 天,净光合速率降为对照的 28.9% ($P < 0.01$), g_s 降为 $50.7\text{mmol H}_2\text{O}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, C_i 降为对照的 69.3%, $\Phi\text{PS II}$ 降为对照的 81.5%,非气孔限制也开始在光合作用的下降中占重要作用^[22]。在实验的第 6 天,处理组的净光合速率比对

照高 24.3%, 蒸腾速率比对照高 47.1%, g_s 高 84.4%, C_i 高 24.3%, 并且和对照间的差异都达到了极显著的水平, 表现出了显著的旱后超补偿效应, 这也是植物对生长过程中受到的自然或人为伤害而产生的一种适应性^[23]。

作物产量的高低与其在产量与非产量器官间干物质的分配有关, 研究发现, 结荚期即使短期的土壤水分干旱, 也会对大豆后期的生物量以及生物量的分配产生较大的影响。结荚期干旱和复水, 显著降低了后期大豆的经济产量, 提高了根茎比, 降低了收获指数。赵宏伟等的研究发现, 当大豆遭受干旱时, 每株荚数和每荚粒数以结荚期干旱处理降低幅度最大, 单株产量也以结荚期干旱处理的降低幅度最大^[24]。这可能是由于结荚期干旱导致了大豆生殖器官水势的下降, 从而抑制了豆荚的生长, 在这个过程中, ABA 可能起到了很大的作用^[25]。因此, 结荚期干旱对大豆的产量影响很大, 在大豆生产中要特别注意这个生育时期的水分管理。

References:

- [1] Fuhrer J. Agroecosystem responses to combinations of elevated CO₂, ozone, and global climate change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2003, 97: 1–20.
- [2] Zhang M C, He Z P, Tian X L, *et al.* Effects of plant growth regulator SHK-6 on physiological function of soybean leaves under water deficiency. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(9): 1215–1220.
- [3] Liu F L, Christian R J, Mathias N A. Drought stress effect on carbohydrate concentration in soybean leaves and pods during early reproductive development; its implication in altering pod set. *Field Crops Research*, 2004, 86(1): 1–13.
- [4] Liu F L, Andersen M N, Jacobsen S E, *et al.* Stomatal control and water use efficiency of soybean (*Glycine max* L. Merr.) during progressive soil drying. *Environmental and Experimental Botany*, 2005, 54: 33–40.
- [5] Westgate M E, Peterson C M. Flower and pod development in water-deficient soybeans (*Glycine max* L. Merr.). *Journal of Experimental Botany*, 1993, 44: 109–117.
- [6] Shan L. Plant drought resistance and semi-dryland farming. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2007, 25(1): 1–5.
- [7] Wang Q M, Xu X C, Ma Y S, *et al.* Influences of drought stress on physiological and biochemical characters of different soybean varieties in flowering period. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(4): 98–102.
- [8] Yang P H, Li G Q, Guo L, *et al.* Effect of drought stress on plasma membrane permeability of soybean varieties during flowering-podding stage. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2003, 21(3): 127–130.
- [9] Liu X B, Jin J, Wang G H, *et al.* Soybean yield physiology and development of high-yielding practices in Northeast China. *Field Crops Research*, 2008, 105: 157–171.
- [10] Bilger W, Bjorkman O. Role of the xanthophyll cycle in photoprotection elucidated by measurements of light-induced absorbance changes, fluorescence and photosynthesis in leaves of *Hedera canariensis*. *Photosynthesis Research*, 1990, 25: 173–185.
- [11] Wang P, Wang T H, Zhou D W, *et al.* A literature review on the above- and below-ground competition. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(8): 3489–3499.
- [12] Lal A, Edwards G E. Analysis of inhibition of photosynthesis under water stress in the C₄ species *Amaranthus cruentus* and *Zea mays*: electron transport, CO₂ fixation and carboxylation capacity. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1996, 23: 403–412.
- [13] Su P X, Yan Q D. Photosynthetic characteristics of C₄ desert species *Haloxylon ammodendron* and *Calligonum mongolicum* under different moisture conditions. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(1): 75–82.
- [14] Lawson T, Oxborough K, Morison J L, *et al.* The responses of guard and mesophyll cell photosynthesis to CO₂, O₂, light, and water stress in a range of species are similar. *Journal of Experimental Botany*, 2003, 54(388): 1743–1752.
- [15] Shao H B, Chen X Y, Chu L Y, *et al.* Investigation on the relationship of proline with wheat anti-drought under soil water deficits. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2006, 53(2): 113–119.
- [16] Wang J W, Yang F P, Chen X Q, *et al.* Induced expression of DREB transcriptional factor and study on its physiological effects of drought tolerance in transgenic wheat. *Acta Genetica Sinica*, 2006, 33(5): 468–476.
- [17] Shao H B, Liang Z S, Shao M A. Adaptation of higher plants to environmental stresses and stress signal transduction. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(7): 1772–1781.
- [18] Shinozaki K, Dennis E S. Cell signalling and gene regulation global analyses of signal transduction and gene expression profiles. *Current Opinion in Plant Biology*, 2003, 6: 405–409.
- [19] Koichi M, Shigemi T, Toshihiko M, *et al.* Recovery responses of photosynthesis, transpiration, and stomatal conductance in kidney bean following

- drought stress. *Environmental and Experimental Botany*, 2005, 53: 205 – 214.
- [20] Desikan R, Cheung M K, Bright J, *et al.* ABA, hydrogen peroxide and nitric oxide signaling in stomatal guard cells. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 55: 205 – 212.
- [21] Xiong Y C, Li F M, Zhang T, *et al.* Evolution mechanism of non-hydraulic root-to-shoot signal during the anti-drought genetic breeding of spring wheat. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, 59: 193 – 205.
- [22] Medrano H, Escalona M J, Bota J, *et al.* Regulation of photosynthesis of C₃ plants in response to progressive drought: stomatal conductance as a reference parameter. *Annals of Botany*, 2002, 89: 895 – 905.
- [23] Zhao M, Li J G, Zhang B. The compensatory mechanism in exploring crop production potential. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(10): 1566 – 1573.
- [24] Zhao H W, Li Q Z, Wei Y X. Effect of drought at different growth stages on main physiological parameters and yield in soybean. *Soybean Science*, 2006(3): 329 – 332.
- [25] Liu F L, Mathias N A, Christian R J. Root signal controls pod growth in drought-stressed soybean during the critical, abortion-sensitive phase of pod development. *Field Crops Research*, 2004, 85: 159 – 166.

参考文献:

- [2] 张明才, 何钟佩, 田晓莉, 等. SHK26 对干旱胁迫下大豆叶片生理功能的作用. *作物学报*, 2005, 31(9): 1215 ~ 1220.
- [6] 山仑. 植物抗旱生理研究与发展半旱地农业. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(1): 1 ~ 5.
- [7] 王启明, 徐心诚, 马原松, 等. 干旱胁迫下大豆开花期的生理生化变化与抗旱性的关系. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(4): 98 ~ 102.
- [8] 杨鹏辉, 李贵全, 郭丽, 等. 干旱胁迫对不同抗旱大豆品种花荚期质膜透性的影响. *干旱地区农业研究*, 2003, 21(3): 127 ~ 130.
- [11] 王平, 王天慧, 周道玮, 等. 植物地上竞争与地下竞争研究进展. *生态学报*, 2007, 27(8): 3489 ~ 3499.
- [13] 苏培玺, 严巧娣. C₄ 荒漠植物梭梭和沙拐枣在不同水分条件下的光合作用特征. *生态学报*, 2006, 26(1): 75 ~ 82.
- [23] 赵明, 李建国, 张宾. 论作物高产挖潜的补偿机制. *作物学报*, 2006, 32(10): 1566 ~ 1573.
- [24] 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. *大豆科学*, 2006(3): 329 ~ 332.