

水土保持耕作及施肥对盛花期大豆光合生理的影响*

黄茂林¹ 梁银丽^{1,2**} 韦泽秀¹ 周茂娟¹ 吴燕¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所 杨凌 712100)

摘要 依据陕西安塞田间试验,采用LI-6400便携式光合仪,在自然条件下对黄土丘陵区旱作农田传统翻耕化肥(CF)、翻耕有机肥(CM)、翻耕无肥(CN)、免耕化肥(NF)、免耕有机肥(NM)、免耕无肥(NN)等处理下盛花期大豆叶片的净光合速率、气孔导度、水分利用效率及影响因子日变化进行了研究。结果表明:6种不同处理的大豆叶片净光合速率日变化均为双峰曲线,峰值分别在11:30、16:00出现。NM、NF处理对提高大豆净光合速率有明显的促进作用,其中以有机肥(NM)最为显著。气孔导度与蒸腾速率之间达极显著正相关($P<0.01$, $r=0.9994$)。气孔导度日变化也为双峰,峰值分别出现在11:30、16:00。不同处理下,大豆的水分利用效率呈单峰曲线,峰值出现在10:00,低谷出现在13:00以后。其中,NF、NM处理能显著提高大豆盛花期的水分利用效率。相关分析表明:气孔导度、蒸腾速率、叶温、光合有效辐射及基于叶温的蒸汽压亏缺是大豆光合作用的促进因子,而胞间 CO_2 浓度、空气 CO_2 浓度、空气相对湿度则为主要的限制因子。CF、NF处理在8:30~10:20和13:00,CM、NN处理在8:30、11:30~13:00、17:30,CN、NM处理则在8:30、13:30各影响因子与净光合速率相关程度较高,相关系数一般在 ± 0.9 以上。在黄土丘陵区旱作农田大豆最适宜的管理方式为NM、NF。

关键词 水土保持耕作 施肥 光合速率 水分利用效率 旱作农田 大豆

中图分类号: S157.2; S565.1; Q945.11 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2009)03-0448-06

Effect of conservation tillage and fertilization on photosynthetic physiology of soybean at full-bloom stage

HUANG Mao-Lin¹, LIANG Yin-Li^{1,2}, WEI Ze-Xiu¹, ZHOU Mao-Juan¹, WU Yan¹

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract Based on field plot experiments in the Ansai region, Shaanxi Province, the paper analyzed net photosynthetic rate, stomatal conductance and water-use efficiency in soybean leaves at full-bloom stage under different tillage and fertilization. The LI-6400 portable photosynthesis system was used in the analysis. The treatments included plow tillage with chemical fertilizer (CF), plow tillage with organic fertilizer (CM), non-fertilized plow tillage (CN), fertilized no-tillage (NF), no-tillage with organic manure (NM) and non-fertilized no-tillage (NN). The results show that diurnal variation of net photosynthetic rate of soybean follows the typical bimodal curve in the different treatments; peaking at 11:30 and 16:00. NM and NF treatments, especially NM, significantly enhance net photosynthetic rate of soybean. A significant correlation exists between stomatal conductance and net photosynthetic rate ($P<0.01$), with a correlation coefficient of 0.9994. Diurnal variation of stomatal conductance is also a bimodal, peaking at 11:30 and 16:00. In different treatments, water-use efficiency of soybean follows a uni-peak curve, highest at 10:00 and lowest after 13:00. NM and NF treatments have a significantly enhancing effect on soybean water-use efficiency. Correlation analysis shows that stomatal conductance ($Cond$), evaporation ratio (Tr), leaf temperature (Tl), photosynthetically active radiation (PAR) and supplemental vapor pressure deficit ($Vpdl$, based leave temperature) are positive factors of photosynthesis in soybean. On the other hand, inter-cell CO_2 concentration (Ci), air CO_2 concentration (CO_2R) and air relative humidity ($RH-R$) mainly limit photosynthesis in soybean. CF & NF at 8:30~10:20 and 13:00; CM & NN at 8:30, 11:30~13:00 & 17:30; and CN & NM at 8:30 & 13:30 have significant correlation be-

* 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB2-05-01)、国家科技支撑项目(2006BAD09B07)、中国科学院安塞站和中国科学院水土保持研究所领域前沿项目(SW04302)资助

** 通讯作者: 梁银丽(1957~),女,博士,研究员,博士生导师,主要从事农业生态及作物生理生态研究。E-mail: liangyl@ms.iswc.ac.cn
黄茂林(1969~),男,生态硕士,主要从事农业生态及作物生理生态研究。E-mail: huangmaolin007@126.com

收稿日期: 2008-08-31 接受日期: 2009-01-09

tween impacting factors and net photosynthetic rate, with a correlation coefficient of ± 0.9 . The optimum management modes for growing soybean in dry farmlands on the Hilly Loess region are NM and NF.

Key words Conservation tillage, Fertilization, Photosynthetic rate, Water-use efficiency, Dryland farming, Soybean

(Received Aug. 31, 2008; accepted Jan. 9, 2009)

大豆是世界上五大经济作物之一,是人类优质蛋白质和食用油脂的重要来源。陕北是陕西省春大豆的主产区,占全省大豆播种总面积的 41%^[1],在水土保持耕作及施肥条件下,研究陕北黄土丘陵沟壑区旱作大豆光合及水分的高效利用具有重要的现实意义。大豆需水量较高,而根系较不发达,是豆类作物中对缺水比较敏感的一种^[2],水分制约了大豆在黄土丘陵沟壑旱作农区的发展。而免耕施肥则是水土保持耕作中最主要的措施之一,在半干旱地区具有显著的保水、保土、保护环境等效应,特别是能在最大减少用水条件下提高作物的水分利用效率^[3,4]。关于大豆光合机理的研究,国内外学者报道很多^[5-15],关于保护性耕作对大豆光合作用及水分利用效率变化的研究还比较鲜见^[16],特别是有关水土保持耕作^[17]及施肥^[18]对黄土丘陵沟壑区大豆光合方面的研究还未见报道。本文以免耕配以不同肥料为处理,以传统翻耕配以不同肥料为对照,分析了大豆光合特征、气孔导度、水分利用效率及光合与各影响因子之间的关系,为确定合理的黄土丘陵区旱作农业管理措施提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

试验于 2007 年 4~10 月下旬在中国科学院安塞水土保持试验站内田间小区进行。试验站位于黄土高原中部丘陵沟壑区,北纬 36°51'30",东经 109°19'23",海拔 1 068~1 309 m。年均气温 8.8℃,年均降雨量 500 mm,属典型的梁峁状丘陵沟壑区,一年一熟。试验地土壤属黄绵土, pH 为 8.5,有机质 8.8 mg·kg⁻¹,全氮 22.4 mg·kg⁻¹,全磷 14.0 mg·kg⁻¹。供试大豆品种为“晋豆 20 号”。

1.2 试验设计

试验共设 6 个处理(NF-免耕化肥, NM-免耕有机肥, NN-免耕无肥, CF-翻耕化肥, CM-翻耕有机肥, CN-翻耕无肥),随机区组设计,3 次重复,共 18 个小区,小区面积 2.5 m×5 m。免耕(N): 上季作物收获后留茬,不扰动土壤;翻耕(C): 播种时人工铁锹深翻 20 cm;有机肥(M): 16 675 kg·hm⁻²羊粪肥作底肥,于播种前一次全部施入;化肥(F): 施纯 N(尿素, 46%N) 230 kg·hm⁻², P₂O₅ 150 kg·hm⁻², 播种前开沟一次施入。大豆前茬为玉米, 2007 年 4 月

20 日播种,株距 27 cm,行距 50 cm,整个生育期按常规管理,实行旱作农业,无人工灌溉。

1.3 测定方法及指标

采用美国 LI-COR 公司生产的 LI-6400 便携式光合仪在自然条件下对盛花期大豆光合生理特征进行活体测定。依据天气预报,选定晴朗无风、光照充足的 2007 年 8 月 1~4 日测定,数据采用 4 天相同时刻的平均值。7:00~18:00 每隔 1.5 h 测定 1 次,在植株顶部向下第 3 片正常成熟叶片中部测定,每小区重复测定 5 株,取平均值。

测定指标为净光合速率 $[Pn, \mu\text{mol}(\text{CO}_2) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$ 、气孔导度 $[Cond, \mu\text{mol}(\text{H}_2\text{O}) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$ 、细胞间 CO₂ 浓度 $[Ci, \mu\text{mol}(\text{CO}_2) \cdot \text{mol}^{-1}]$ 、蒸腾速率 (Tr) 、叶温 (Tl) 、空气 CO₂ 浓度 (CO_2R) 、空气相对湿度 $(RH-R)$ 、光合有效辐射 (PAR) 、基于叶温的蒸汽压亏缺 $(VpdL)$ 。水分利用效率 (WUE) 用 Pn/Tr [$\mu\text{mol}(\text{CO}_2) \cdot \text{mmol}^{-1}(\text{H}_2\text{O})$] 表示^[19]。

1.4 数据分析

试验数据采用 SAS V8 处理软件进行统计分析。单尾检验重复间的差异显著性,新复级差法检验处理间的差异显著性水平。

2 结果与分析

2.1 免耕施肥对盛花期大豆光合特性日变化的影响

2.1.1 对净光合速率日变化的影响

由图 1 可知,盛花期大豆净光合速率在 6 种处理水平下的日变化曲线均呈双峰型,峰值在 11:30、16:00 出现,其中免耕化肥、免耕有机肥高于其他处理,有肥高于无肥,免耕高于翻耕。从 7:00 开始不同处理下大豆净光合速率逐渐增大,于 11:30 达到第 1 个高峰,之后逐渐下降,其中 NM、NF 降幅较小,光合午休程度浅,其他处理则降幅较大,光合午休程度较深;第 2 个高峰出现在 16:00,之后则急剧下降,且降幅较大。总体来看,大豆净光合速率在不同时段及不同处理间差异显著, NM 在 7:00、13:00、14:00 及 17:30 这 4 个时段最高,尤以 11:30 差异极显著, NF 在 8:30、11:30 及 16:00 最高。大豆净光合速率从大到小依次为 NM > NF > CM > CF > NN > CN。因而,免耕配以肥料对提高大豆的净光合速率有明显的促进作用,其中以施用有机肥最明显。

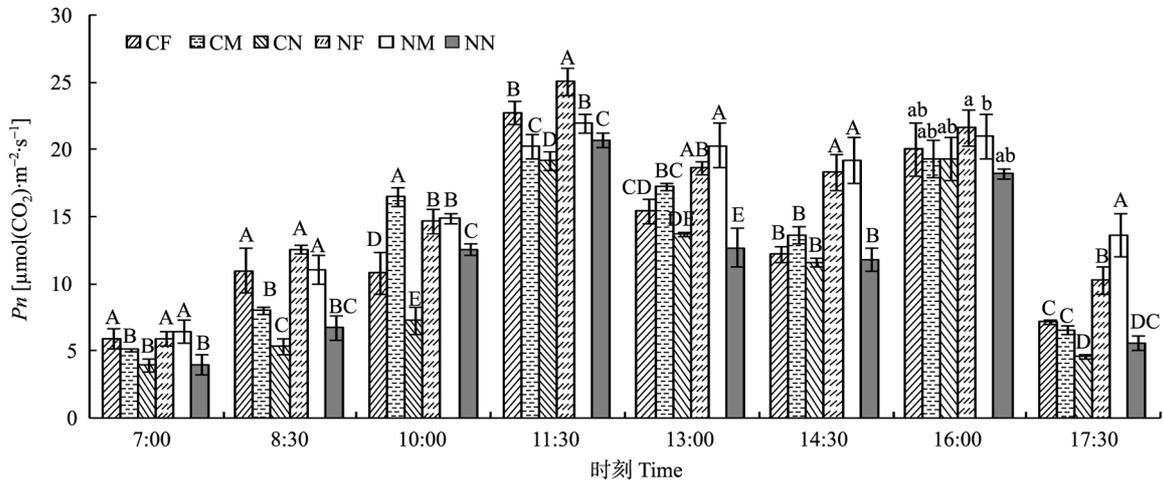


图 1 不同处理下盛花期大豆叶片净光合速率的日变化

Fig.1 Diurnal variation of net photosynthetic rate of soybean under different treatments

2.1.2 对气孔导度日变化的影响

由表 1 可知, 6 种处理下盛花期大豆气孔导度日变化也呈双峰曲线, 峰值出现在 11:30、16:00。方差分析表明, 这两高峰时段不同处理之间差异不显著, 其他时段不同处理之间差异显著或极显著。NN、CN 气孔导度在 7:00、8:30、10:00 3 个时段比较大, 而 NF、NM 则在 13:00、14:30、17:30 这 3 个时段比较高。说明大豆在两个光合高峰阶段, 不同处理之间净光合速率的显著差异可能不是由气孔导度引起的, 其他时段大豆净光合速率变化可能与气孔导度有关。此外, 整个下午的气孔导度总体上高于上午。

2.1.3 对蒸腾速率和气孔导度相关性的影响

蒸腾作用是作物进行水气交换的一个重要生理过程, 蒸腾随大豆叶温的升高而增大, 达到一定程度引起反馈调节, 气孔部分关闭从而导致一定程度的光合午休^[6]。大豆蒸腾速率的变化趋势基本与气孔导度一致。相关分析表明, 盛花期大豆一天的总体蒸腾速率与总体气孔导度达极显著正相关, 相关系数为 0.999 4^{**}。在不同处理间, 大豆蒸腾速率与气孔导度显著正相关的有 CF、NF、NM, 相关系数分别为 0.812 3^{*}、0.760 7^{*}、0.781 2^{*}; 极显著正相关的为 CM、CN, 相关系数分别为 0.893 6^{**}、0.831 0^{**}; 不

显著的为 NN, 相关系数为 0.697 5。

2.1.4 对细胞间 CO₂ 浓度日变化的影响

由图 2 可知, 盛花期大豆的细胞间 CO₂ 浓度日变化近似于开口向上的二次曲线, 低谷出现在 11:30。不同处理对大豆胞间 CO₂ 浓度的影响主要在 7:00~13:00 时段, 其中 CF、CN 在 9:00 前胞间 CO₂ 浓度较高, 在光合高峰期 11:30 胞间 CO₂ 浓度则达到最低点, 其值分别为 135.5 μmol(CO₂)·mol⁻¹、130.5 μmol(CO₂)·mol⁻¹。此后由于气孔部分关闭和非气孔因素的抑制^[1,19], 胞间 CO₂ 浓度在 13:00 出现了 1 个小高峰。NN 胞间 CO₂ 浓度的小高峰出现在 11:30~13:00, 在 $P < 0.01$ 水平下极显著高于其他处理, 达到 212.8±3.0 μmol(CO₂)·mol⁻¹; NF 胞间 CO₂ 浓度的小高峰出现在 10:00, CN 在 13:00, CF、CM、NM 则未出现小高峰。此外, 下午 C_i 浓度较高, 说明有关光合酶活性降低。

2.2 免耕施肥对盛花期大豆水分利用效率的影响

盛花期大豆水分利用效率是单峰曲线, 峰值出现在 10:00, 上午高而下午低, 不同处理之间的差异主要在上午, 且差异显著(图 3)。下午不同处理之间差异不明显, 水分利用效率基本一致, 且成一条水平下滑线。上午 NF 水分利用率峰值最高, 为 11.9

表 1 不同处理下盛花期大豆叶片气孔导度的日变化

Tab.1 Diurnal variation of stomatal conductance of soybean under different treatments

处理 Treatment	7:00	8:30	10:00	11:30	13:00	14:30	16:00	17:30
CF	0.06±0.01b	0.11±0.11ABb	0.15±0.05ABbc	0.40±0.02	0.13±0.03Bc	0.18±0.01Bb	0.66±0.10	0.24±0.02Ab
CM	0.09±0.03ab	0.14±0.05ABab	0.20±0.03ABab	0.28±0.03	0.20±0.02ABab	0.18±0.03Bb	0.44±0.17	0.28±0.02Aab
CN	0.09±0.03ab	0.13±0.01ABab	0.18±0.06ABabc	0.37±0.02	0.15±0.01ABbc	0.15±0.02Bb	0.68±0.22	0.31±0.07Aab
NF	0.09±0.05ab	0.10±0.01Bb	0.16±0.03ABabc	0.25±0.01	0.22±0.07Aa	0.37±0.17Aa	0.55±0.11	0.35±0.09Aa
NM	0.06±0.01b	0.12±0.01ABb	0.13±0.02Bc	0.33±0.01	0.19±0.04ABAB	0.34±0.06Aa	0.68±0.21	0.33±0.02Aa
NN	0.12±0.05a	0.17±0.04Aa	0.22±0.01Aa	0.33±0.01	0.12±0.02bc	0.17±0.01Bb	0.43±0.43	0.11±0.01Bc

同列不同大小写字母分别表示 $P < 0.01$ 及 $P < 0.05$ 水平下差异显著。Different capital and small letters in the same column denote respectively significant differences in $P < 0.01$ and $P < 0.05$ levels.

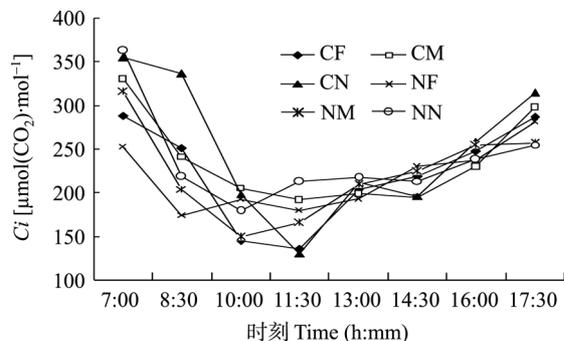


图 2 不同处理下大豆细胞间 CO₂ 浓度日变化
Fig.2 Diurnal change of CO₂ concentration of soybean under different treatments

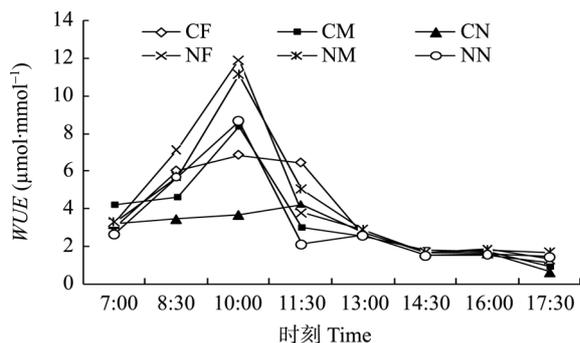


图 3 不同处理下盛花期大豆水分利用效率的日变化
Fig. 3 Diurnal variation of water use efficiency of soybean under different treatments

μmol(CO₂)·mmol(H₂O), 其次是 NM, 其值为 11.2 μmol(CO₂)·mmol(H₂O), CN 最低, 其值为 3.66 μmol(CO₂)·mmol(H₂O)。其原因主要是上下午环境温度的急剧变化。下午的高温和空气相对湿度的急剧降低使得气孔导度比上午增大, 蒸腾加剧, 从而导致水分利用效率降低至一天的最低值。

2.3 大豆净光合速率与各影响因子的相关性

对不同处理净光合速率与各影响因子的相关分析可以看出(表 2), 净光合速率与 *Cond*、*Tr*、*Tl*、*PAR* 以及 *Vpdl* 呈正相关, 而与 *Ci*、*CO₂R*、*RH-R* 为负相关。但是, 一天内不同时段, 不同处理净光合速率与各影响因子的相关性并不遵从整体的变化趋势。从表 3 可以看出, 6 种处理的净光合速率在 7:00 与 *Ci* 为

负相关, 而在 11:30、16:00 则呈正相关; 与 *Tr* 在 10:00、11:30 及 16:00 为正相关; 与 *Cond* 则在 11:30、16:00 呈正相关, 特别是在 11:30 相关显著或极显著。

一天中, 不同处理的净光合速率与各影响因子相关性不同。CF 处理净光合速率与 *Cond*、*Ci* 在 7:00~9:00、13:00~15:00 为负相关, 在 10:00~11:30、16:00 呈正相关, 且极显著; 与 *Tr* 在 7:00~9:00、17:30 为负相关, 其他时段则呈正相关; 与 *PAR* 在 7:00~9:00、13:00 为负相关, 其他时段呈正相关。NF 处理净光合速率与 *Cond*、*Ci*、*Tr* 在 7:00~9:00、13:00 为负相关, 其他时段呈正相关; 与 *PAR* 则基本呈正相关。CM 处理净光合速率与 *Cond*、*Ci*、*Tr* 在 7:00、14:30、17:30 为负相关, 而在 11:30~13:30 呈正相关, 且极显著。NM 处理净光合速率与 *Cond* 只在 13:00 为负相关, 与 *Tr* 则在 10:00、14:30、17:30 为负相关。光合速率与各影响因子相关程度比较高, 相关系数在 ±0.9 以上的处理及时段 CM 为 8:30、11:30、17:30, NM 为 8:30、13:30~16:30, CN 为 8:30、13:00、17:30, NN 为 8:30、11:30、17:30。

3 结果与讨论

大豆光合日变化一般有单峰、双峰、波动型和平缓型^[5], 主要由地理位置、生育阶段、土壤水分、光、热、湿等因素及品种组合引起。本研究表明, 盛花期“晋豆 20”在陕北安塞净光合速率日变化为双峰曲线, 在 11:30、16:00 出现峰值。免耕有机肥、免耕化肥净光合速率比较高, 光合午休程度浅, 这与陈甲瑞等^[20]的结论基本一致。且大豆免耕有机肥比免耕化肥光合速率稍高一些。

关于光合午休是由气孔部分关闭, 细胞间 CO₂ 浓度下降引起的报道很多^[6-9]。也有报道指出, 大豆光合午休是气孔导度和光抑制共同作用的结果^[10]。本试验表明, 在光合的高峰期, 净光合速率与耕作方式和施肥有关, 而非气孔导度变化引起的; 其他时段则是免耕施肥、气孔导度等因素共同作用的结果。光合高峰期不同处理气孔导度差异不显著, 光

表 2 盛花期大豆叶片净光合速率与各影响因子的相关性
Tab. 2 Correlation between net photosynthetic rate of soybean and influencing factors

处理 Treatment	<i>Cond</i>	<i>Ci</i>	<i>Tr</i>	<i>Tl</i>	<i>CO₂R</i>	<i>RH-R</i>	<i>PAR</i>	<i>Vpdl</i>
CF	0.749 1 †	-0.233 8	0.720 6 †	0.553	-0.595 5	0.001 5	0.693 6	0.311 4
CM	0.584 8	-0.836 2 *	0.633 4	0.700	-0.684 1	-0.360 3	0.926 8 †	0.520 7
CN	0.581 5	-0.617 1	0.678 4	0.581	-0.686 8	-0.200 5	0.693 3	0.305 6
NF	0.577 5	-0.400 4	0.677 8	0.636	-0.744 4*	-0.499 7	0.768 8 †	0.707 9 †
NM	0.685 5	-0.299 7	0.763 5 †	0.816 *	-0.877 0* †	-0.703 1	0.830 8 †	0.774 2 †
NN	0.741 5 †	-0.655 1	0.665 4	0.457	-0.563 7	-0.127 2	0.548 8	0.186 1

表 3 不同处理下盛花期大豆叶片净光合速率与各影响因子间相关系数的日变化
Tab.3 Diurnal variation of correlation coefficient between net photosynthetic rate of soybean and influencing factors under different treatments

时间 Time	处理 Treatment	<i>Cond</i>	<i>Ci</i>	<i>Tr</i>	<i>Tl</i>	<i>CO₂R</i>	<i>RH-R</i>	<i>PAR</i>	<i>VpdL</i>
7: 00	CF	-0.336 5	-0.547 5	-0.457 8	0.395 9	0.850 8	0.597 6	-0.769 8	0.468 7
	CM	-0.859 9	-0.939 5	-0.797 2	-0.544 0	0.991 8**	0.685 5	-0.746 2	0.665 1
	CN	0.983 3*	-0.597 5	0.987 9**	-0.999 3	0.441 8	-0.999 3**	0.719 6	-0.923 3
	NF	-0.785 0	-0.903 1	-0.811 1	0.866 0	0.815 1	0.058 4	0.815 1	0.479 2
	NM	0.993 2**	-0.115 8	0.977 0*	-0.846 9	-0.958 4*	0.822 2	-0.976 3*	-0.930 0
	NN	0.374 4	-0.906 8	0.473 3	0.441 6	-0.096 2	-0.530 4	0.784 2	0.418 1
8: 30	CF	-0.998 6**	-0.998 7**	-0.996 9**	0.999 6**	0.406 7	0.996 9**	-0.998 7**	0.998 7**
	CM	0.967 2*	0.961 6*	0.968 6*	-0.977 7*	0.976 9*	-0.948 9*	0.976 6*	-0.974 5*
	CN	-0.998 1**	-0.998 5**	-0.998 5**	0.998 5**	-0.999 8**	0.999 9**	0.999 3**	0.998 5**
	NF	-0.936 2	-0.955 6*	-0.945 9	-0.962 2*	0.963 8*	0.962 2*	-0.067 7	-0.962 2*
	NM	0.998 5**	0.996 8**	0.996 8**	-0.998 1	0.991 6**	0.998 9**	0.999 6**	-0.998 9**
	NN	-0.998 6**	-0.999 0**	-0.997 9**	0.999 7**	0.887 2	0.999 4**	-0.999 0**	0.999 0**
10: 00	CF	0.999 8**	0.999 2**	0.999 7**	0.092 2	0.978 5*	0.996 9**	0.729 2	0.998 9*
	CM	0.142 8	-0.027 2	0.956 5*	-0.916 2	-0.232 0	0.795 4	-0.972 3*	0.351 8
	CN	-0.571 4	-0.894 1	0.996 6**	-0.388 2	-0.982 8*	-0.457 7	0.929 1	0.968 5*
	NF	0.995 4**	0.995 0**	0.996 2**	-0.986 7	0.997 1**	-0.555 3	0.886 3	-0.992 2**
	NM	0.076 9	-0.213 0	-0.181 2	-0.976 3	-0.817 7	-0.989 5**	-0.729 1	-0.988 5**
	NN	0.999 9**	0.999 6**	0.999 7**	0.599 7	0.999 1**	-0.599 7	0.990 5**	0.999 2**
11: 30	CF	0.991 1**	0.854 6	0.991 4**	0.600 0	0.523 9	-0.986 8*	0.995 0**	0.977 7*
	CM	0.998 9**	0.997 4**	0.999 2**	0.998 5**	-0.998 1**	-0.998 1**	0.998 5**	-0.998 1**
	CN	0.950 6*	0.959 7*	0.948 1	-0.903 1	-0.297 4	-0.159 1	-0.186 9	-0.924 2
	NF	0.993 0**	0.976 8*	0.996 1**	-0.967 2	-0.278 2	0.957 8*	0.182 6	-0.977 2*
	NM	0.827 8	0.592 1	0.843 7	0.891 0	-0.919 6	0.974 7*	0.760 9	0.904 5
	NN	0.983 9*	0.895 2	0.981 3*	-0.993 1	-0.990 1**	-0.990 1**	-0.989 4**	-0.990 1**
13: 00	CF	-0.987 8**	-0.994 0**	0.839 2	0.963 0	-0.944 1	-0.966 0*	-0.977 1*	0.966 0*
	CM	0.998 9**	0.990 9**	0.999 2**	-0.789 4	-0.919 2	0.997 2**	0.999 5**	-0.998 0**
	CN	-0.965 7*	-0.970 1**	-0.867 5	0.970 1*	-0.978 5*	0.972 2*	0.954 2*	0.962 4*
	NF	-0.975 4*	-0.985 8**	-0.770 3	0.983 2*	-0.992 9**	0.980 3**	0.981 6**	0.980 5**
	NM	-0.942 1	-0.969 4*	-0.860 6	0.948 6	0.947 3	-0.948 6*	-0.933 4	0.948 6*
	NN	0.944 2	-0.966 4*	0.984 4*	0.989 0**	-0.932 2	-0.940 9	0.952 5*	0.933 0
14: 30	CF	-0.834 2	-0.888 0	0.363 2	-0.831 0	-0.188 3	-0.704 7	0.974 7*	0.785 9
	CM	-0.260 0	-0.654 8	-0.445 9	0.113 9	-0.782 0	0.556 7	-0.805 6	-0.023 9
	CN	0.647 3	0.438 9	0.760 4	-0.260 2	0.544 7	-0.735 3	0.972 5*	0.023 1
	NF	0.990 0**	0.880 7	0.870 2	-0.865 8	0.247 1	0.140 0	0.999 9**	-0.999 1**
	NM	0.987 5*	0.927 0	0.991 8	0.974 9*	-0.958 6*	0.968 7*	0.965 5*	-0.991 8**
	NN	0.977 8*	-0.945 8	-0.134 0	0.855 1	0.997 6**	0.999 7**	-0.893 6	-0.659 2
16: 00	CF	0.989 6**	0.885 2	0.999 2**	-0.845 2	-0.793 5	0.984 0*	0.542 0	-0.911 4
	CM	0.968 9*	0.912 0	0.986 2*	-0.993 2**	0.014 7	-0.297 2	0.803 6	-0.995 6**
	CN	-0.127 4	0.912 0	0.218 2	0.672 6	0.997 5**	-0.986 5*	0.961 4*	0.260 1
	NF	0.708 1	0.636 2	0.533 1	-0.961 5*	0.618 5	-0.718 4	0.961 4*	-0.830 2
	NM	0.999 1**	0.997 2**	0.999 3**	0.996 3**	0.609 7	-0.999 3**	0.994 8**	-0.999 6**
	NN	0.972 0*	0.912 7	0.389 1	-0.972 3*	-0.813 2	0.176 6	-0.885 3	-0.973 7*
17: 30	CF	-0.814 3	-0.984 6**	-0.900 0	-0.998 6**	0.933 7	-0.936 1	0.998 7**	-0.973 1*
	CM	-0.980 8**	-0.980 8**	-0.980 8**	-0.980 8*	-0.961 7*	-0.980 8*	0.997 8**	-0.980 8**
	CN	0.933 9	0.900 2	0.929 8	-0.937 9	-0.921 7	-0.928 8	-0.957 3*	-0.046 1
	NF	0.784 6	0.284 1	0.690 5	-0.921 3	-0.231 9	-0.016 8	-0.039 4	-0.762 3
	NM	0.441 1	-0.835 1	-0.240 0	-0.667 1	0.681 2	-0.658 6	0.885 7	-0.517 4
	NN	-0.999 1**	-0.999 1**	-0.999 1**	0.998 1**	0.999 1**	-0.999 1**	0.999 1**	0.998 1**

合低谷期 CN、NN 处理的细胞间 CO₂ 浓度曾出现过 1 个小高峰, 其他处理或不明显, 或无小高峰。这可能是免耕施肥改变了土壤水分含量和大豆叶片有关光合酶的活性, 从而影响了光合速率。

本试验条件下, 气孔导度在早晨较小, 下午开度高, 这与张瑞鹏^[5]等的研究结果不同, 可能是夜间低温造成的^[17]。安塞 8 月白天气温一般为 25~38.5, 夜间则在 17~25, 影响了气孔导度和蒸腾速率, 使之在早晨较小。下午 16:00 气孔导度最高, 而胞间 CO₂ 浓度并未显著降低, 说明影响大豆光合作用的因素中非气孔限制因素占主要作用。

本试验显示, 大豆的水分利用效率呈单峰曲线, 且出现在上午 10:00。这与王建林^[7]等的结论基本一致。水分利用效率上午高、下午低的原因一是光合产物累积的反馈抑制; 二是环境高温及相对湿度下降引起的蒸腾速率加剧; 三是高温使光合生化体系中关键酶活性的降低。水分利用效率最高的是 NF 及 NM 处理, 最低的是 CN 处理。说明免耕有利于提高作物的水分利用率。因而, 提高陕北安塞田间大豆水分利用效率的途径一是选育适应高温的高活性 RUBP 羧化酶及光合产物运输能力强的品种; 二是改变和加强田间管理, 如水土保持耕作及施肥等; 三是调节环境温度、湿度, 控制蒸腾速率。

试验还表明, 一天中不同时段盛花期的大豆, 其叶片净光合速率的限制因素随不同处理而有所不同。总体来看, 大豆光合作用的促进因子有 *Cond*、*Tr*、*Tl*、*PAR* 及 *Vpdl*, 而主要的限制因子有 *Ci*、CO₂R、*RH-R*。从一天中不同时段、不同处理的相关性与整体相比, 变化很大, 尚需作进一步分析。

本研究着重从免耕施肥的角度对黄土丘陵生态环境脆弱的半干旱地区大豆光合、气孔导度、水分利用效率及影响因子的相关性作了研究, 但由于数据反映的是作物整个生育期中盛花期的变化, 至于免耕施肥对大豆其他生育阶段的光合影响, RUBP 羧化酶是否确为该阶段大豆光合的限制因素, 还需要做进一步深入研究。

参考文献

- [1] 陕西省统计局. 2006 年陕西省统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2006: 235
- [2] 王磊, 胡楠, 张彤, 等. 干旱和复水对大豆叶片光合及叶绿

素荧光的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(9): 3630-3636

- [3] 王兆华, 李立科, 赵二龙, 等. 西部旱作农业的有效新技术——留茬少耕或免耕秸秆全程覆盖[J]. 生态学杂志, 2001, 20(3): 71-73
- [4] 晋小军, 黄高宝. 陇中半干旱地区不同耕作措施对土壤水分及利用效率的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5): 109-112
- [5] 张瑞鹏, 杨德中, 傅连舜, 等. 不同来源大豆品种光合速率日变化及其影响因子的研究[J]. 大豆科学, 2007, 26(4): 491-495
- [6] 高中超, 周宝库, 张喜林. 大豆对干旱胁迫生理生化的响应[J]. 大豆通报, 2007 (5): 27-29
- [7] 王建林, 于贵瑞, 齐华. 东北地区大豆鼓粒期光合特性的研究[J]. 中国农业气象, 2007, 28(3): 322-325, 333
- [8] 李大勇, 徐克章, 张治安, 等. 新老大豆品种叶片光合特性的比较[J]. 中国油料作物学报, 2007, 29(3): 281-285
- [9] 朱保葛. 大豆叶片净光合速率、转化酶活性与籽粒产量的关系[J]. 大豆科学, 2000, 19(4): 346-350
- [10] 蔡柏岩, 葛菁萍, 祖伟. 不同磷肥水平对大豆营养状况和产量品质性状的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(3): 404-410
- [11] 滕云, 张忠学, 魏永霞, 等. 不同氮磷钾配比对东北半干旱区大豆产量及土壤水分的影响[J]. 东北农业大学学报, 2005, 36(3): 273-279
- [12] 韩晓增, 裴宇峰, 王守宇, 等. 水氮耦合对大豆生长发育的影响[J]. 大豆科学, 2006, 25(2): 104-106
- [13] 王景伟, 朱铁林, 王海泽. 水肥耦合对大豆生长发育的正交设计实验研究[J]. 大豆通报, 2007 (6): 17-20
- [14] Wang J. L., Yu G. R., Fang Q. X., et al. Responses of water use efficiency of 9 plant species to light and CO₂ and their modeling[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2): 525-533
- [15] Almaraz J. J., Zhou X. M., Souleimanov A., et al. Gas exchange characteristics and dry matter accumulation of soybean treated with Nod factors[J]. Journal of Plant Physiology, 2007, 164: 1391-1393
- [16] 邵新庆, 沈禹颖, 王堃. 水土保持耕作对夏大豆光合、蒸腾及水分利用效率的影响[J]. 草业学报, 2005, 14(6): 82-86
- [17] 王丽娟, 李天来, 李国强. 夜间低温对番茄幼苗光合作用的影响[J]. 园艺学报, 2006, 33(4): 757-761
- [18] 秦舒浩, 黄高宝. 不同耕作措施下绿洲灌区冬小麦蒸发蒸腾特性及产量效应[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(3): 611-614
- [19] Fischer R. A., Turner N. C. Plant productivity in the arid and semiarid zones[J]. Journal of Plant Physiology, 1978, 29: 277-317
- [20] 陈甲瑞, 梁银丽, 周茂娟, 等. 免耕施肥对玉米光合速率的影响[J]. 水土保持研究, 2006, 13(6): 72-74