

渭北黄土区农林复合系统中大豆辣椒的光合生理特性

彭晓邦¹, 蔡靖¹, 姜在民², 张远迎³, 张硕新^{1,4,*}

(1. 西北农林科技大学林学院, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学生命学院, 陕西杨凌 712100;

3. 西北农林科技大学理学院, 陕西杨凌 712100; 4. 陕西秦岭森林生态系统国家野外科学观测研究站, 陕西杨凌 712100)

摘要:研究了农林复合系统不同处理对大豆、辣椒的光合特性和叶绿素荧光参数的影响。结果表明,从单作到距李子 1m 处,随着距李子树越近,遮光愈多。各处理大豆、辣椒的光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)和蒸腾速率(Tr)表现出与光合有效辐射(PAR)基本一致的日变化模式,且与单作相比,各处理大豆、辣椒的光合速率、气孔导度和蒸腾速率均有不同程度的降低。相关性分析结果表明二者的光合速率、气孔导度及蒸腾速率均与光合有效辐射呈正相关关系。随着遮荫程度的提高,大豆、辣椒叶绿素含量和表观量子效率(Φ)升高,光饱和点(LSP)和光补偿点(LCP)降低。二者叶绿素荧光参数最大光能转换效率(F_v/F_m)、PS II 电子传递量子效率(Φ_{PSII})以及光化学猝灭系数(qP)均有不同程度的升高,而非光化学猝灭系数(qNP)却逐渐降低。说明大豆、辣椒能适应弱光环境,在较低的光照条件下正常生长。

关键词:农林复合;光合特性;荧光参数;黄土区

文章编号:1000-0933(2009)06-3173-08 中图分类号:Q142, Q945, Q948, S181 文献标识码:A

Photosynthetic characteristics of soybean and pepper in an agroforestry system in the Loess Area of the Northern Wei River, Shaanxi, China

PENG Xiao-Bang¹, CAI Jing¹, JIANG Zai-Min², ZHANG Yuan-Ying³, ZHANG Shuo-Xin^{1,4,*}

1 College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2 College of Life Sciences, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

3 College of Science, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

4 Qingling National Forest Ecosystem Research Station, Yangling, Shaanxi 712100, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6): 3173 ~ 3180.

Abstract: Photosynthetic characteristics and parameters of chlorophyll fluorescence of soybean and pepper were examined in an agroforestry system. The results indicated that photosynthetic active radiation (PAR) was reduced significantly from full daylight at 1m from the tree (*Prunus salicina*) row. The diurnal variations of photosynthetic rate (P_n), stomata conductance (G_s) and transpiration rate (Tr) of soybean and pepper were similar to photosynthetic active radiation, and they were lower in the agroforestry system compared to full daylight. The PAR was highly correlated with P_n , G_s and Tr of the both crops. The content of total chlorophyll and apparent quantum yield (Φ) of both crops increased and light compensation point (LCP) and light saturation point (LSP) decreased with increasing degree of shade. Meanwhile the F_v/F_m , Φ_{PSII} and qP were significantly higher than those under full daylight in treatments of both crops, but qNP decreased with increasing degree of shade, which indicated that soybean and pepper had strong adaptability to low irradiance.

Key Words: Agroforestry; photosynthetic characteristics; chlorophyll fluorescence parameters; Loess Area

农林复合系统是一种传统的土地利用和经营方式。由于其在解决农林“争地”矛盾、改善生态环境、提高

基金项目:国家林业科技支撑计划资助项目(2006BAD03A05-3)

收稿日期:2008-04-10; 修订日期:2008-06-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sxzhang@nwsuaf.edu.cn

自然资源利用率、增加农民收入、促进生态和经济协调发展等方面的重要作用^[1-6]不仅受到众多发展中国家和地区的普遍关注^[7,8],而且也受到一些发达国家如美国、英国、澳大利亚等的高度重视^[9-11]。近年来,我国学者就农林复合系统在氮素平衡、土壤理化性状和水分生态特征等^[12-14]方面做了一系列研究,但复合系统光合生理特性方面的报告却未曾见到。本文以渭北黄土区具有代表性的李子-大豆和李子-辣椒农林复合模式为对象,研究农林复合系统中不同处理对大豆、辣椒的光合特性和叶绿素荧光参数的影响,为深入研究农林复合系统对农作物生长发育和生理生态过程的影响提供依据,以期为进一步解析复合系统光能竞争机理、提高复合系统的光能利用效率提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地设在陕西省岐山县境内的南社头村(34°19'36"N, 107°37'16"E)和永尧村(34°19'41"N, 107°38'40"E),各类农林复合经营模式总面积达 10hm²。试验区地处渭北黄土塬区,属温带大陆性季风气候。全年平均日照时数为 2185h,平均气温 11.6℃,无霜期 164d。年平均降水量 679mm,基本上能满足作物生长的需要,但由于受季风气候影响,年内季节性分布不均匀,6~9 月份降水量约占全年 70%。试验区土壤以黄土母质发育成的黄壤土为主,有机质含量在 4.45% 左右,速全氮含量 0.116%,速效磷含量 0.098%。

1.2 试验材料

本研究以当地主要经济树种李子(*Prunus salicina*)和主要农作物大豆(秦豆 8 号)、辣椒(陕椒 981)为研究对象。李子树栽植于 2003 年,但在不同复合模式中生长状况各不相同(表 1)。试验共设六个处理:单作大豆(CK₁)、单作辣椒(CK₂)、李子大豆间作模式中距李子 1m 处(T₁)、李子大豆间作模式中距李子 2.5m 处(T₂)、李子辣椒间作模式中距李子 1m 处(T₃)和李子辣椒间作模式中距李子 2.5m 处(T₄),单作和间作的生产管理相同。李子株行距为 3 m × 5 m,树带行向为南北方向。大豆和辣椒的行向与树的方向一致,栽培时距离树行两侧各 50 cm,株行距分别为 20 cm × 40 cm 和 40 cm × 60 cm(单作与间作相同)。每棵树周围选取 12 个样点,分别位于树行东西两侧(垂直于树行方向上)1m 和 2.5m 处(图 1)。

1.3 研究方法

1.3.1 光合作用的测定

选择晴朗无云的天气,利用 Licor-6400 便携式光合测定系统(美国,LI-COR 公司制造)测定各植物的净光合速率(P_n , $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$)、蒸腾速率(T_r , $\text{mmolm}^{-2}\text{s}^{-1}$)、气孔导度(G_s , $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$)以及光合有效辐射(PAR , $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$)等其它主要生理指标和环境因子。测定时间从 9:00 至 17:00,每 2h 测定 1 次。测试时选取长势相近的健康植株,选取充分伸展、无病虫害的健康叶。每个指标测 3 个重复,每个重复记录 3 个数据,最后取平均值。利用 Licor-6400 便携式光合测定系统的可调光源在 CO_2 浓度为 $350\mu\text{molmol}^{-1}$ 下测定光响应曲线($P_n\text{-}PAR$), PAR 范围为 $0 \sim 2000\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$,根据光响应曲线拟合的对数方程求得光补偿点(LCP)、光饱和点(LSP)及表观量子效率(Φ)。

表 1 实验区复合系统中李子的生长特征

Table 1 Characteristics of plum intercropped with soybean and pepper in the experimental fields

生长特征 Characteristics	大豆间作 Intercropping soybean	辣椒间作 Intercropping pepper
树高 Tree height (m)	3.4	3.3
胸径 Diameter at breast height (cm)	6.2	5.8
冠深 Depth of live crown (m)	2.5	2.4
冠幅半径 Uean radius of crown (m)	1.8	1.6

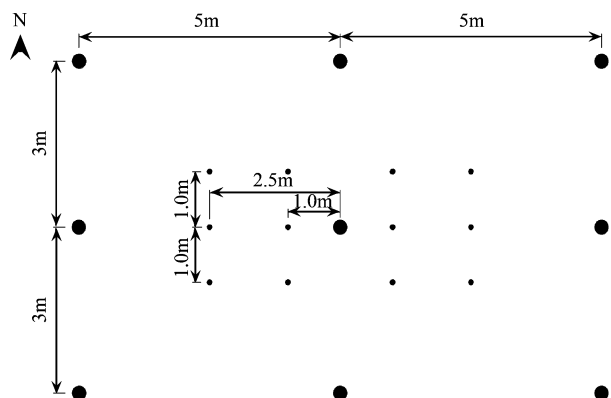


图 1 实验区样点布设示意图

Fig. 1 Sketch of sampling spots in the experimental fields

1.3.2 叶绿素荧光参数的测定

利用脉冲调制式荧光仪 FMS-2.02 (Hansatech, UK) 于 9:00 ~ 11:30 时测定叶绿素荧光参数, 选取生长较为一致的叶片进行活体测定。叶片暗适应 30min 后测定初始荧光 (F_0), 随后给一个强闪光 ($6000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 脉冲时间 0.7s) 测定最大荧光 (F_m), 自然光下适应 20min, 荧光基本稳定时, 测定稳态荧光 (F_s), 之后再施加一次强闪光 ($6000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 脉冲时间 0.7s), 记录光适应下的最大荧光 (F'_m), 同时将叶片遮光, 暗适应 3s 后打开远红光, 5s 后测定光适应下最小荧光 (F'_0)。参考 Schreiber 等^[15] 计算出光系统 II (PS II) 最大光能转换效率 (F_v/F_m)、PS II 电子传递量子效率 (Φ_{PSII})、光化学猝灭系数 (qP)、非光化学猝灭系数 (qNP) 等参数, 其中 $F_v/F_m = (F_m - F_0) / F_m$; $\Phi_{PSII} = (F'_m - F_s) / F'_m$; $qP = (F'_m - F_s) / (F'_m - F'_0)$; $qNP = (F_m - F'_m) / (F_m - F'_0)$ 。

1.3.3 叶绿素含量的测定

利用 CM-1000 叶绿素测定仪 (Spectrum, USA) 于 9:00 ~ 11:30 测定相对叶绿素含量指数。选取测定光合特性参数的叶片进行活体测定, 测量时手持 CM-1000 叶绿素测定仪夹住叶片, 沿着叶脉方向移动测定, 每株植物测定 5 个叶片, 每叶片重复 5 ~ 6 次。

1.3.4 数据分析

所有数据均通过 Microsoft Office Excel 2003 进行整理, 方差分析、相关性分析以及其它统计分析处理均采用 SPSS 软件, 图表处理采用 Excel 软件。

2 结果与分析

2.1 不同处理大豆、辣椒光合有效辐射的日变化

大豆的光合有效辐射强度从单作 (CK_1)、间作模式中距李子 2.5m 处 (T_2) 到间作模式中距李子 1m 处 (T_1) 逐渐减弱 (图 2)。其中单作 (CK_1) 和距李子 2.5m 处 (T_2) 大豆的光合有效辐射日变化趋势均呈“单峰型”曲线, 且峰值均出现在 13:00 时。而距李子 1m 处 (T_1) 大豆的光合有效辐射日变化为“双峰型”曲线, 谷值出现在 13:00 时。不同处理辣椒的光合有效辐射日变化趋势与大豆的基本一致 (图 3), 与单作相比, 距李子 2.5m 和距李子 1m 两个处理大豆、辣椒的光合有效辐射强度分别下降了 16.7%、32.5%、12.3% 和 26.8%, 这与取样点的分布 (图 1) 及各复合模式中树的生长状况 (表 1) 有直接关系。

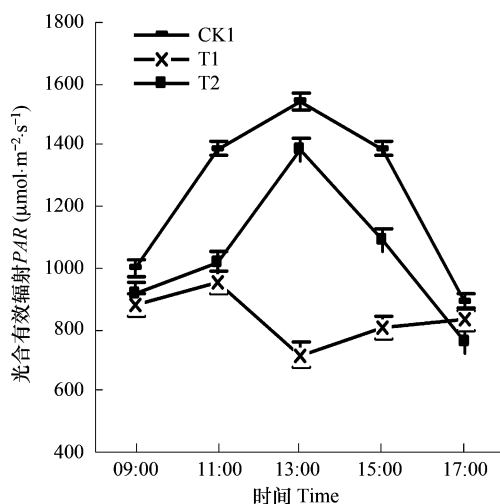


图 2 不同处理大豆光合有效辐射的日变化

Fig. 2 Diurnal PAR of treatments of soybean

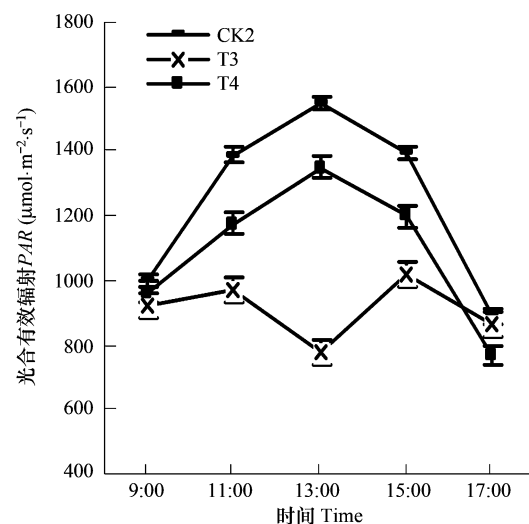


图 3 不同处理辣椒光合有效辐射的日变化

Fig. 3 Diurnal PAR of treatments of pepper

2.2 不同处理大豆、辣椒光合速率的日变化

如图 4 所示, 除距李子 1m 处 (T_1) 外, 其他处理大豆的净光合速率日变化均呈“单峰型”曲线, 且峰值均出

现在 13:00 时,分别为 $21.2\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、 $17.1\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。各处理大豆净光合速率的日均值表现为单作 CK₁ ($17.72\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$) > 距李子 2.5m 处 T₂ ($14.7\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$) > 距李子 1m 处 T₁ ($12.0\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$)。辣椒的光合速率日变化趋势与大豆相似,除距李子 1m 处的光合速率日变化表现为“双峰型”曲线外,其他处理辣椒的净光合速率日变化均呈“单峰型”曲线(图 5)。不同处理辣椒净光合速率的日均值表现为单作 CK₂ ($15.22\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$) > 距李子 2.5m 处 T₄ ($13.08\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$) > 距李子 1m 处 T₃ ($10.68\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$)。总之,各复合模式中大豆、辣椒的净光合速率日均值都低于单作。方差分析结果表明,在不同处理中大豆、辣椒光合速率间存在显著性差异($P < 0.05$),但辣椒的光合速率与光合有效辐射的相关显著性高于大豆(表 2)。

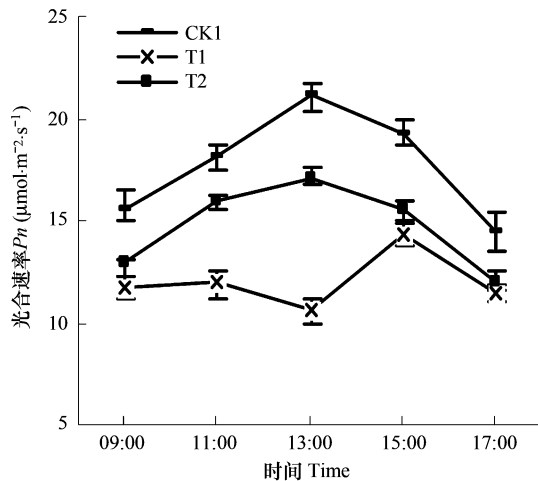


图 4 不同处理大豆光合速率的日变化
Fig. 4 Diurnal P_n of treatments of soybean

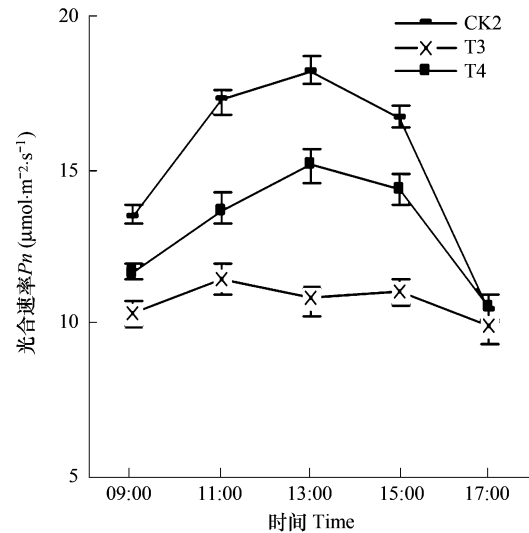


图 5 不同处理辣椒光合速率的日变化
Fig. 5 Diurnal P_n of treatments of pepper

表 2 不同处理光合有效辐射与光合速率、气孔导度及蒸腾速率的相关系数

Table 2 Correlation analyses between PAR and P_n , G_s , Tr of treatments

处 理 Treatment	光合速率 P_n ($\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	气孔导度 G_s ($\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 Tr ($\text{mmolm}^{-2}\text{s}^{-1}$)
CK1	0.6525a	0.4572a	0.4433a
T1	0.5542b	0.5637b	0.4876b
T2	0.6133c	0.6664c	0.6123c
CK2	0.7211a	0.3343a	0.5333a
T3	0.8613b	0.6611b	0.6604b
T4	0.7944c	0.5889c	0.7111c

同列标有不同字母表示显著差异 Different letters in the same column indicate significantly difference at $P < 0.05$

2.3 不同处理大豆、辣椒气孔导度的日变化

不同处理大豆、辣椒的气孔导度日变化曲线与其光合速率的日变化曲线相似(图 6、图 7),除距李子 1m 处二者的气孔导度日变化表现为“双峰型”曲线外,其他处理大豆、辣椒的气孔导度日变化均呈“单峰型”曲线,且峰值均出现在中午 13:00 时。从单作到距李子 1m,大豆、辣椒的气孔导度日均值分别表现为 CK₁ ($0.0856\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$) > T₂ ($0.0698\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$) > T₁ ($0.0432\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$) 及 CK₂ ($0.0562\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$) > T₄ ($0.046\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$) > T₃ ($0.0304\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$)。方差分析结果表明,在不同处理中大豆、辣椒气孔导度存在显著性差异($P < 0.05$),且二者的气孔导度均与光合有效辐射呈显著正相关关系(表 2)。

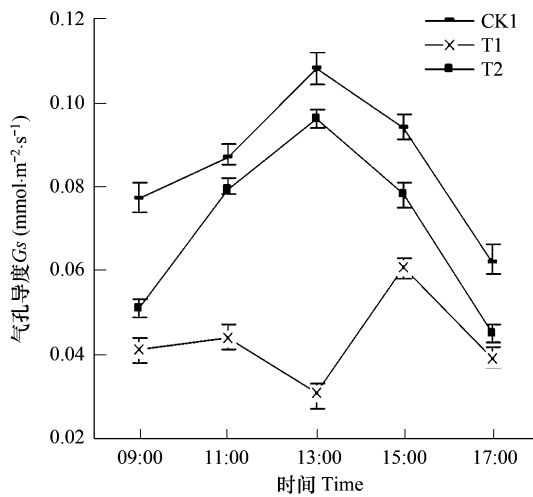


图6 不同处理大豆气孔导度的日变化
Fig. 6 Diurnal Gs of treatments of soybean

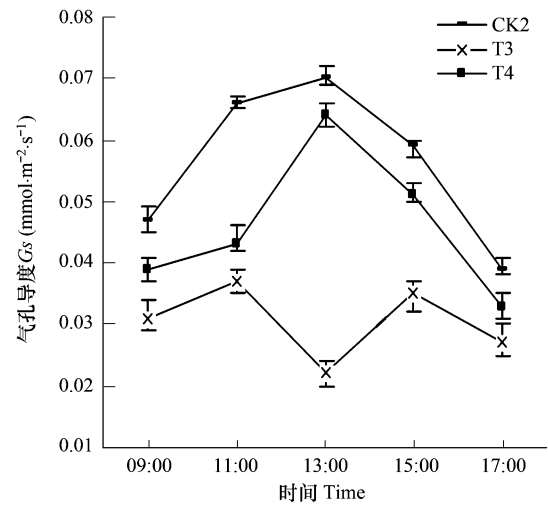


图7 不同处理辣椒气孔导度的日变化
Fig. 7 Diurnal Gs of treatments of pepper

2.4 不同处理大豆、辣椒蒸腾速率的日变化

不同处理大豆、辣椒的蒸腾速率日变化曲线与其光合速率及气孔导度的日变化曲线相似(图8、图9)。除距李子1m处大豆、辣椒的气孔导度日变化表现为“双峰型”曲线外,其他处理两者的气孔导度日变化均呈“单峰型”曲线,且峰值均出现在中午13:00时。从单作到距李子1m,大豆、辣椒的蒸腾速率日均值分别表现为CK₁(4.424mmolm⁻²s⁻¹) > T₂(3.896mmolm⁻²s⁻¹) > T₁(3.188mmolm⁻²s⁻¹)及CK₂(4.18mmolm⁻²s⁻¹) > T₄(3.812mmolm⁻²s⁻¹) > T₃(2.862mmolm⁻²s⁻¹)。方差分析结果表明,在不同处理中大豆、辣椒蒸腾速率存在显著性差异($P < 0.05$),二者的蒸腾速率均与光合有效辐射呈正相关关系(表2)。

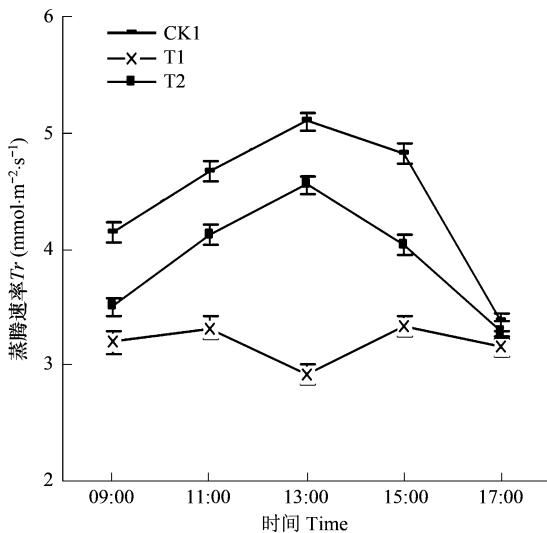


图8 不同处理大豆蒸腾速率的日变化
Fig. 8 Diurnal Tr of treatments of soybean

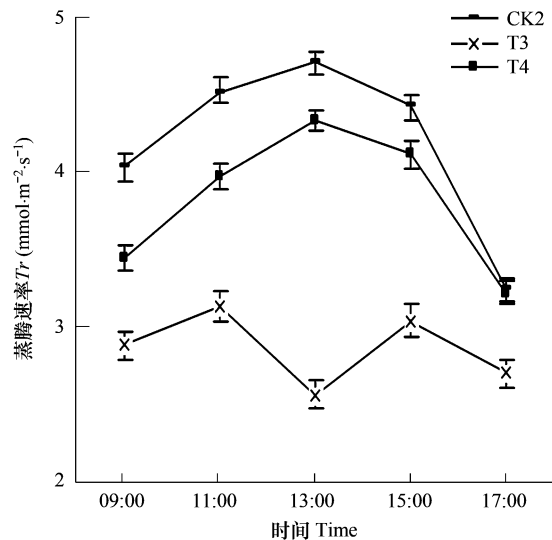


图9 不同处理辣椒蒸腾速率的日变化
Fig. 9 Diurnal Tr of treatments of pepper

2.5 不同处理对大豆、辣椒光合特性参数的影响

从单作到距李子1m处,随着距离李子树越来越近、光合有效辐射强度逐渐减弱,大豆、辣椒的光补偿点和光饱和点逐渐降低(表3),但两者的表观量子效率却表现出相反的变化趋势,随着光合有效辐射强度逐渐减弱大豆、辣椒的表观量子效率逐渐升高(表3)。这说明大豆、辣椒能适应弱光环境,在较低的光照条件下仍

然能够利用弱光,从而保证叶片进行正常的光合作用。

表 3 不同处理对大豆、辣椒光合参数的影响

Table 3 Effects of treatments on photosynthetic parameters of soybean and pepper

处理 Treatment	光补偿点 $LCP(\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1})$	光饱和点 $LSP(\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1})$	表观量子效率 Φ
CK1	76a	1190a	0.0567a
T1	54b	910b	0.0646b
T2	70c	1100c	0.0588c
CK2	81a	1277a	0.0411a
T3	60b	990b	0.0539b
T4	73c	1180c	0.0447c

同列标有不同字母表示显著差异 Different letters in the same column indicate significantly difference at $P < 0.05$

2.6 不同处理对大豆、辣椒叶绿素含量及荧光参数的影响

由表 4 可以看出,不同处理大豆、辣椒叶片的叶绿素含量分别表现为 $CK_1(3.41\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}) < T_2(3.44\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}) < T_1(3.52\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$ 及 $CK_2(2.96\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}) < T_4(3.02\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}) < T_3(3.13\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$ 。说明随着距李子树越来越远、遮光越来越多而大豆、辣椒叶片的叶绿素含量却逐渐升高。从单作到距李子 1m 处,各处理中大豆、辣椒光系统 II (PS II) 最大光能转换效率 (F_v/F_m)、PS II 电子传递量子效率 (Φ_{PSII}) 以及光化学猝灭系数 (qP) 均有不同程度的升高,而二者的非光化学猝灭系数 (qNP) 却逐渐降低。不同处理中大豆、辣椒叶绿素含量及荧光参数存在显著性差异 ($P < 0.05$),说明随着遮荫程度的提高,大豆、辣椒光反应中心 PS II 的光化学效率和潜在活性逐渐上升。

表 4 不同处理对大豆、辣椒叶绿素含量和叶绿素荧光参数的影响

Table 4 Effects of treatments on chlorophyll content and parameters of chlorophyll fluorescence of soybean and pepper

处理 Treatment	叶绿素含量 Chlorophyll content	F_v / F_m	Φ_{PSII}	qP	qNP
CK1	3.41a	2.063a	0.554a	0.732a	0.399a
T1	3.52b	2.272b	0.663b	0.844b	0.323b
T2	3.44c	2.144c	0.571c	0.758c	0.386c
CK2	2.96a	0.825a	0.427a	0.636a	0.419a
T3	3.13b	0.973b	0.488b	0.689b	0.373b
T4	3.02c	0.885c	0.446c	0.675c	0.407c

同列标有不同字母表示显著差异 Different letters in the same column indicate significantly difference at $P < 0.05$

3 讨论

光合作用是植物生长发育的基础,而光照可以提供作物同化力形成所需要的能量,活化参与光合作用的关键酶,促进气孔开放。而农林复合系统作为一种特殊的栽培模式,光照在作物的生长发育中起着极其重要的作用。本研究中复合系统中不同处理大豆、辣椒的 P_n 、 G_s 和 Tr 日变化模式与 PAR 的日变化模式基本一致,且与单作相比,各处理模式中大豆、辣椒的 P_n 、 G_s 和 Tr 均有不同程度的降低,相关性分析结果表明二者的光合速率、气孔导度及蒸腾速率均与光合有效辐射呈正相关关系(表 2),这说明光合有效辐射是导致各处理大豆、辣椒 P_n 、 G_s 和 Tr 降低的主要因素之一。气孔导度对环境因子的变化十分敏感,凡是影响植物光合作用的各种因素都可能对气孔导度造成影响。根据 Farquhar 和 Sharkey 的观点,只有当光合速率和胞间 CO_2 浓度变化方向相同,且气孔限制值增大,才可以认为光合速率的下降主要是由气孔因素引起^[16]。尽管本研究中各处理大豆、辣椒的气孔导度日变化与其光合、蒸腾速率的日变化趋势基本一致,但大豆、辣椒 G_s 与 P_n 和 Tr 之间的关系有待进一步深入研究。

植物光补偿点和饱和点的高低直接反映了植物对弱光的利用能力,是植物耐荫性评价的重要指标。某种

植物的光补偿点越低,越能在弱光条件下顺利进行光合作用,开始有机物质的正向增长;光饱和点低则表明植物光合速率随光量子通量的增大很快达到最大效率。因此,较低的光补偿点使植物在有限的光条件下能以最大能力利用低光量子密度,进行最大可能的光合作用。量子效率是指光合作用机构每吸收 1 mol 光量子后光合释放的 O_2 摩尔数或同化 CO_2 的摩尔数^[17], Lee 等^[18] 研究认为耐荫植物具有较高表观量子效率,自然状态下捕获光量子用于光合作用的能力较强。由表 3 可以看出,从单作到距李子 1m 处,随着距李子树越来越远、光合有效辐射强度逐渐减弱,大豆、辣椒的光补偿点和光饱和点逐渐降低,但两者的表观量子效率却表现出相反的变化趋势,随着光合有效辐射强度逐渐减弱大豆、辣椒的表观量子效率逐渐升高。这说明大豆、辣椒能适应弱光环境,在较低的光照条件下仍然能够利用弱光,从而保证叶片进行正常的光合作用。

一般认为在弱光条件下,单位叶面积的叶绿体数目减少,单位重量叶绿素含量增加,从而可以提高植物对于弱光的利用率。在本试验中不同遮光处理下大豆、辣椒的叶绿素含量均比对照高,这表明大豆、辣椒可通过提高叶绿素含量来增强对遮荫环境的适应能力。

在低光照条件下,光系统 II 的实际光化学效率(Φ_{PSII})通常较高,因为叶片所吸收的光能中有较大的比例被用于光化学反应中;而在高光照强度条件下,因为叶片所吸收能量中的很大比例通过非光化学过程而散失,所以经过高光照强度光适应的叶片的(Φ_{PSII})较低。这一数值与植物光合速率有很强的线性关系,是一个表征植物光合作用能力高低的变量。光系统 II 的最大荧光效率(F_v/F_m)是衡量植物光能利用能力的大小的指标, F_v/F_m 值大,表明该植物具备大的光能利用潜力。本试验中随着距李子树越近、遮光越多,大豆、辣椒的 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 和 qP 逐渐增大(表 4),说明遮光处理提高了 PS II 反应中心开放比例和 PS II 光化学效率; $qN P$ 随遮光程度的增加而降低(表 4),说明遮光处理降低了 PS II 以热能形式耗散的所吸收的光能,使天线色素所捕获的光能以更高比例用于推动光合电子传递,有利于光合作用的顺利进行。单作处理大豆、辣椒的 $qN P$ 较高,说明叶片吸收的光能以热能的形式耗散比例较大,有利于对 PS II 反应中心的保护,可能是植物对高光照的一种保护机制^[19],有待于进一步深入研究。

综上所述,随着距李子树越近,遮光越多,大豆、辣椒可通过提高叶绿素含量,降低光饱和点及光补偿点和升高表观量子效率来适应弱光环境。荧光参数的变化从光合作用内部变化角度进一步揭示了大豆、辣椒对弱光环境的适应性。据此可以认为:大豆和辣椒是两种能够适应多种光环境的农作物,可在光环境较为复杂的农林复合系统中正常生长。

References:

- [1] Pang A Q. Economic Evaluation of the Agroforestry Complex System in China. *Journal of Natural Resources*, 1997, 12(2):176—182.
- [2] Yang X. Position and Function of Agroforestry in Rural Sustainable Development. *Rural Eco-Environ*, 1996, 12(1):37—41.
- [3] Shulte S. Agroforestry and soil conservation: adoption and profitability in EL Salvador. *Agroforestry Today*, 1997, 9 (4):16—17.
- [4] Jayne M, Monicah M, Daniel M, *et al.* Adoption potential of selected organic resources for improving soil fertility in the central highlands of Kenya. *Agroforestry Systems*, 2009, 76: 467—485.
- [5] Wang Y M, Wang Z L. A Study on the Structure of Agroforests and Their Protective Benefits in the Gully Region of Loess Plateau. *Journal of Soil Water Conservation*, 1992, 6 (4): 54—59.
- [6] Wang Z L, Li H K, Huo X X. Study on Soil Anti-erosion and Anti scour of Prickly Ash at Edges of Terraces in Drought Upland of Weibei. *Research of Soil and Water Conservation*, 2000, 7 (1): 33—37.
- [7] Zhang J S, Meng P. Simulation on water ecological characteristics of agroforestry in the hilly area of Taihang Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24 (6): 1172—1177.
- [8] Zhao Y, Zhang B, Zhao H C, *et al.* Transpiration of *Choerospondias axillaris* in agro-forestry system and its affecting factors. *Chin J Appl Ecol*, 2005, 16(11):2035—2040.
- [9] Buck L E. Agroforestry policy issues and research directions in the U S and less developed countries: insights and challenges from recent experience. *Agroforestry Systems*, 1995, 30 (1/2): 57—73.
- [10] Zink Han F C, Mercer D E. An assessment of agroforestry systems in the southern USA. *Agroforestry Systems*, 1997, 35: 303—321.
- [11] Garret t H E G. Agroforestry practice and policy in the United States of America. *Forestry Ecology and Management*, 1997, 91 (1): 5—15.

- [12] Peng K, Ou Y H, Zhu B. Nitrogen balances and appraisals in agroforestry ecosystem A case study in YanTing experiment station. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2004, 13(3):252-257.
- [13] Xia Q, He B H, Xie Z, Wei Y Z. Study on soil physical and chemical properties of agroforestry of purple soil. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(2):86-89.
- [14] Zhang J S, Meng P. Simulation on water ecological characteristics of agroforestry in the hilly area of Taihang Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(6):1172-1177.
- [15] Schreiber U. Detection of rapid induction kinetics with a new type of high-frequency modulated chlorophyll fluorometer. *Photosynthesis Research*, 1986, 9:261-272.
- [16] Farquhar S P, Sharkey T D. Stomata conductance-and-photosynthesis. *Ann Rev Plant Physi*, 1982, 33:317-345.
- [17] Yu S W. *Plant physiology and molecular biology*. Beijing: Science Press, 1992.
- [18] Lee D W, Bone R A, Tarsis S L, *et al.* Correlates of leaf optical properties in tropical forest sun and extreme 2 shade plants. *Amer J Bot*, 1990, 77(3):370-380.
- [19] Xu K, Guo Y P, Zhang S L, *et al.* Response of strawberry leaves photosynthesis to strong light and its mechanism. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(1):73-78.

参考文献:

- [1] 庞爱权. 中国农林复合系统的经济评价. *自然资源学报*, 1997, 12(2):176-182
- [2] 杨修. 农林复合经营在农村可持续发展中的地位和作用. *农村生态环境*, 1996, 12(1):37-41
- [5] 王佑民, 王忠林. 黄土高原沟壑区混农林的结构及其防护效益研究. *水土保持学报*, 1992, 6(4):54-59.
- [6] 王忠林, 李会科, 贺秀贤. 渭北旱塬花椒地埂林土壤抗蚀抗冲性研究. *水土保持研究*, 2000, 7(1):33-37.
- [7] 张劲松, 孟平. 农林复合系统水分生态特征的模拟研究. *生态学报*, 2004, 24(6):1172-1177.
- [8] 赵英, 张斌, 赵华春, 等. 农林复合系统中南酸枣蒸腾特征及影响因子. *应用生态学报*, 2005, 16(11):2035-2040.
- [12] 彭奎, 欧阳华, 朱波. 农林复合生态系统氮素平衡及其评价——以中国科学院盐亭农业生态实验站为例. *长江流域资源与环境*, 2004, 13(3):252-257.
- [13] 夏青, 何丙辉, 谢洲, 蔚远中. 紫色土农林复合经营土壤理化性状研究. *水土保持学报*, 2006, 20(2):86-89.
- [14] 张劲松, 孟平. 农林复合系统水分生态特征的模拟研究. *生态学报*, 2004, 24(6):1172-1177.
- [19] 徐凯, 郭延平, 张上隆, 等. 草莓叶片光合作用对强光的影响及其机理研究. *应用生态学报*, 2005, 16(1):73-78.