

玉米大豆对农林复合系统小气候的光合响应

彭晓邦¹, 仲崇高¹, 沈平¹, 张硕新^{1,2,*}

(1. 西北农林科技大学林学院, 陕西杨凌 712100; 2. 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:对黄土区核桃(*Juglans regia* L.)-(玉米+大豆)、李子(*Prunus salicina*)-(玉米+大豆)农林复合系统小气候效应的研究表明,在玉米和大豆的花期,农林间作系统与对照地相比可以降低农田地面温度 1.7—1.9℃,减低风速 55%—67%,提高相对湿度 6.9%—8.4%,降低光合有效辐射强度 13.9%—24.5% 和大气 CO₂ 浓度 5.3—10.9 μmol·mol⁻¹。本研究中,单作大豆叶片光合速率午间变化主要受到非气孔的限制作用。逐步回归分析结果表明,光合有效辐射强度和大气 CO₂ 浓度是影响林下作物光合速率的主要环境因子。林下小气候可能是作物避免“午休”现象的主要原因。

关键词:光合速率;小气候;农林复合系统

Photosynthetic response of maize and soybean to the microclimatic in an agroforestry system

PENG Xiaobang¹, ZHONG Chonggao¹, SHEN Ping¹, ZHANG Shuoxin^{1,2,*}

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

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

Abstract: The microclimatic effect of intercropping walnut (*Juglans regia* L.) and plum (*Prunus salicina*) with corn (*Zea mays*) and soybean (*Glycine max*) was studied in an agroforestry system in central China. The results indicated that the intercropping system, compared to a monocrop system containing only non-tree, crop species, increased the relative humidity by 6.9% to 8.4%, decreased surface soil temperatures by 1.7 to 1.9℃, reduced wind speed by 55% to 67%, reduced photosynthetic active radiation (PAR) by 13.9% to 24.5% and air CO₂ concentration by 5.3—10.9 μmol·mol⁻¹. Changes in the net photosynthetic rate of soybean leaves at noon were primarily attributed to limitation of non stomatal factor. PAR and ambient air CO₂ concentration were the dominant factors influencing net photosynthesis rate as shown by multiple stepwise regression analysis. The microclimatic of the intercropping system was the key factor preventing midday depression of photosynthesis that appeared in the monocropping system.

Key Words: net photosynthetic rate (*P_n*); microclimatic; agroforestry system

农林复合系统由于其良好的生态效益和经济效益,目前已被世界上许多国家和地区的农业生产所采用^[1-5]。生态效应及其机理问题一直是复合农林业的重要研究内容之一,其中小气候效应尤为主要,也是其它功能和效应的基础。关于农林复合系统的小气候效益,国内外已有不少报道^[6-9],但多是研究复合系统小气候特征及其与农作物生产力的关系,而就复合系统林下作物对复合系统微环境因子的生理响应方面的研究报道却未曾见到。光合作用是植物生长发育的基础和生产力高低的决定性因素,同时又是一个对环境条件变化很敏感的生理过程。植物叶片光合作用日变化是植物生产过程中物质积累与生理代谢的基本单元,也是分析环境因素影响植物生长和代谢的重要手段。因此,对复合系统各植物光合作用的研究至关重要。本文以渭

基金项目:国家林业科技支撑计划资助项目(2006BAD03A05-3)

收稿日期:2008-11-20; **修订日期:**2009-01-05

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

北黄土区具有代表性的核桃(*Juglans regia* L.)-(玉米+大豆)、李子(*Prunus salicina*)-(玉米+大豆)农林复合模式为对象,研究林下作物玉米、大豆对复合系统小气候的光合响应,以期为进一步研究农林复合系统的增产机制和优化模式提供依据。

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,属暖温带半湿润大陆性季风气候。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,由于与果树间作,枯枝落叶长期积累以及该区以有机肥为主,导致试区有机质含量在 7.45% 左右,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核桃(*Juglans regia* L.)、李子(*Prunus salicina*)和主要农作物玉米(沈单 10 号)、大豆(秦豆 8 号)为研究对象。核桃和李子均栽植于 2003 年,但生长状况各不相同(表 1)。试验共设 6 个处理:单作玉米 CK₁、单作大豆 CK₂、李子-玉米 T₁、李子-大豆 T₂、核桃-玉米 T₃和核桃-大豆 T₄,单作和间作的生产管理相同。核桃和李子株行距均为 3 m × 5 m,树带行向为南北方向。玉米和大豆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 60 cm × 40 cm 和 40 cm × 20 cm(单作与间作相同)。每棵树周围选取 12 个样点进行观测,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 测定方法

在玉米的开花吐丝期(8 月上旬)和大豆的盛花期(8 月上旬),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)在 12 个观测点测定各植物的光合速率(*Pn*)、气孔导度(*Gs*)、细胞间 CO₂ 浓度(*Ci*)以及光合有效辐射(*PAR*)和大气 CO₂ 浓度(*Ca*)。风速(*WS*)、大气温度(*T*)和大气相对湿度(*RH*)用 Kestrel4500(美国制造)便携式气象监测仪测定。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。

本研究中的所有数据均为典型观测值对应时刻的平均值,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 SAS 软件,图表处理采用 Excel 软件。

表 1 试验区玉米、大豆复合系统中核桃、李子的生长特征

Table 1 Characteristics of trees intercropped with corn and soybean in the experimental fields

项目 Item	核桃 <i>Juglans regia</i> L.	李子 <i>Prunus salicina</i>
大豆间作 Intercropping soybean		
树高 Tree height/m	3.1	3.4
胸径 Diameter at breast height/cm	3.5	6.2
冠深 Depth of live grown/m	1.8	2.5
冠幅半径 Mean radius of crown/m	0.9	1.8
玉米间作 Intercropping corn		
树高/m	2.9	3.3
胸径/cm	3.4	5.8
冠深/m	1.7	2.4
冠幅半径/m	0.7	1.6

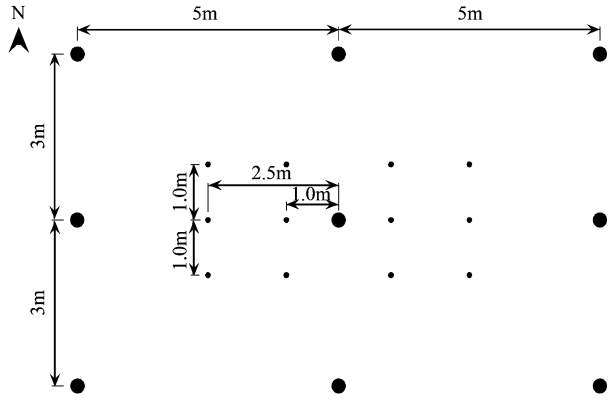


图 1 试验区样点布设示意图

Fig. 1 Sketch of sampling spots in the experimental fields

2 结果与分析

2.1 农林复合系统小气候的日变化

2.1.1 光合有效辐射在不同复合模式中的日变化

玉米、大豆的光合有效辐射强度从单作(CK₁、CK₂)、与核桃间作(T₃、T₄)到与李子间作(T₁、T₂)逐渐减弱(图2)。不同复合模式玉米、大豆的光合有效辐射日变化趋势均呈“单峰型”曲线,但峰值出现在一天中的不同时间。不同复合模式中玉米的光合有效辐射强度与单作相比分别降低了20.2%(T₁)和13.9%(T₃),而大豆的分别降低了24.5%(T₂)和16.7%(T₄)。光合有效辐射强度的不同程度减低与各复合模式中果树的生长状况(表1)及复合系统中树木的行间距有直接的关系。

2.1.2 风速在不同复合模式中的分布特征

如图3所示各间作系统的风速均明显低于单作系统。李子-玉米(T₁)和核桃-玉米(T₃)复合系统的日均风速分别为0.34m·s⁻¹和0.44m·s⁻¹,比单作玉米(CK₁)的风速分别降低了66%和56%。李子-大豆(T₂)和核桃-大豆(T₄)复合系统的日均风速分别为0.36m·s⁻¹和0.5m·s⁻¹,比单作大豆(CK₂)的风速分别降低了67%和55%。可见复合系统具有明显的降低风速的作用,这与王学雷,张劲松等的研究结果一致^[10-11]。

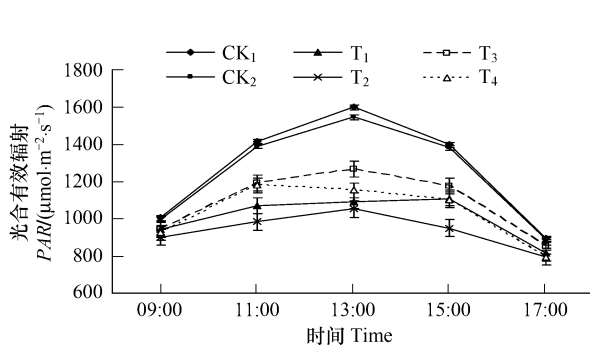


图2 不同复合模式光合有效辐射的日变化

Fig. 2 Diurnal PAR within different intercropping systems

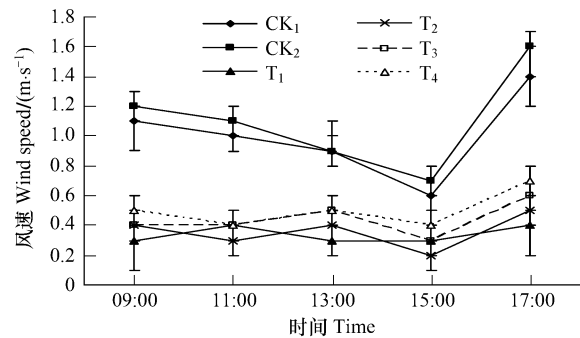


图3 风速在不同复合模式中的分布特征

Fig. 3 Wind speed distribution in different intercropping systems

2.1.3 大气CO₂浓度在不同复合模式中的日变化

由图4可以看出,单作玉米(CK₁)的大气CO₂浓度日变化呈“W”型,这与徐克章等^[12-13]的研究发现相同。但其它模式中大气CO₂浓度的日变化趋势均呈“V”型,且谷值出现在一天中的不同时间。各间作系统的大气CO₂浓度均低于单作系统。李子-玉米(T₁)和核桃-玉米(T₃)复合系统的大气CO₂浓度日均值比单作玉米(CK₁)的大气CO₂浓度日均值分别降低了10.9μmol·mol⁻¹和9.4μmol·mol⁻¹,而李子-大豆(T₂)和核桃-大豆(T₄)复合系统的大气CO₂浓度日均值比单作大豆(CK₂)的CO₂浓度分别降低了6.4μmol·mol⁻¹和5.3μmol·mol⁻¹。方差分析结果表明,各处理间CO₂浓度差异显著($P < 0.05$)。复合系统的大气CO₂浓度较单作系统低,可能与复合系统的设计、通风条件等有直接的关系。

2.1.4 大气温度在不同复合模式中的日变化

大气温度的变化趋势与光合有效辐射强度的变化趋势相似(图5),单作系统和复合系统大气温度的日变化趋势均呈“单峰型”曲线,且单作系统的温度高于复合系统。李子-玉米(T₁)和核桃-玉米(T₃)复合系统的大气温度日均值分别为32.3℃和32.4℃,比单作玉米(CK₁)的大气温度日均值分别降低了1.8℃和1.7℃。李子-大豆(T₂)和核桃-大豆(T₄)复合系统的大气温度日均值分别为32.3℃和32.5℃,比单作大豆(CK₂)的大气温度分别降低了1.9℃和1.7℃。由此可见,复合系统具有降低大气温度的功能。这与张劲松等^[14]在太行山的研究结果一致。

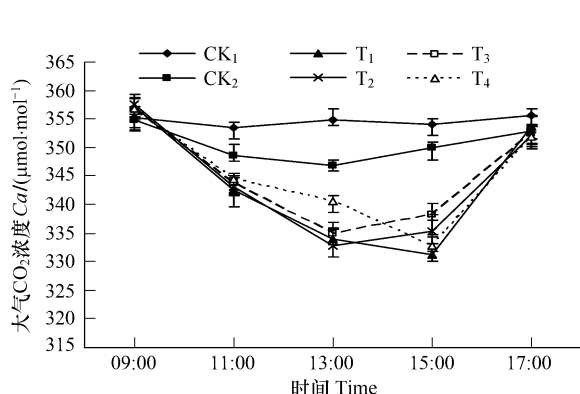
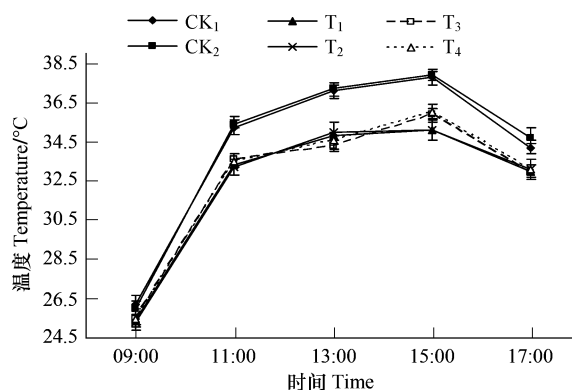
图4 不同复合模式大气 CO₂ 浓度的日变化Fig. 4 Diurnal CO₂ within different intercropping systems

图5 不同复合模式大气温度的日变化

Fig. 5 Diurnal Temperature within different intercropping systems

2.1.5 大气相对湿度在不同复合模式中的日变化

如图6所示,单作系统和复合系统的大气相对湿度日变化趋势均呈“V”型,且谷值均出现在下午15:00时。李子-玉米(T₁)和核桃-玉米(T₃)复合系统的大气湿度日均值分别为53.88%和53.26%,比单作玉米(CK₁)的大气湿度日均值分别提高了8.2%和6.9%。李子-大豆(T₂)和核桃-大豆(T₄)复合系统的大气湿度日均值分别为53.7%和53.3%,比单作大豆(CK₂)的大气湿度分别提高了8.4%和7.6%。由此可见,复合系统具有提高大气湿度的功能。该结果与李俊祥等^[15]的研究结论一致。

2.2 不同复合模式中玉米、大豆光合速率的日变化

如图7所示,各复合模式中玉米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(CK₁)33 μmol m⁻² s⁻¹、(T₁)16.9 μmol m⁻² s⁻¹和(T₃)27.35 μmol m⁻² s⁻¹。不同复合模式中玉米净光合速率的日均值表现为 CK₁ (25.8 μmol m⁻² s⁻¹) > T₃ (19.77 μmol m⁻² s⁻¹) > T₁ (14.74 μmol m⁻² s⁻¹)。大豆的光合速率日变化趋势与玉米相似,除单作大豆(CK₂)光合速率日变化表现为“双峰型”曲线外,其他复合模式下大豆的净光合速率日变化均呈“单峰型”曲线。不同复合模式中大豆净光合速率的日均值表现为 CK₂ (15.78 μmol m⁻² s⁻¹) > T₄ (15.24 μmol m⁻² s⁻¹) > T₂ (13.55 μmol m⁻² s⁻¹)。总之,各复合模式中玉米、大豆的净光合速率日均值都低于其单作。方差分析结果表明,不同复合模式中玉米、大豆光合速率间差异显著($P < 0.05$)。

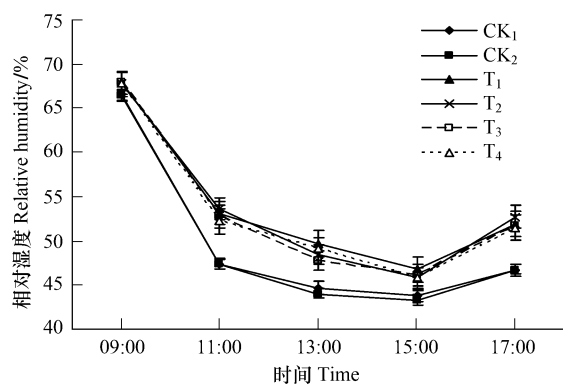


图6 不同复合模式大气相对湿度的日变化

Fig. 6 Diurnal Relative humidity within different intercropping systems

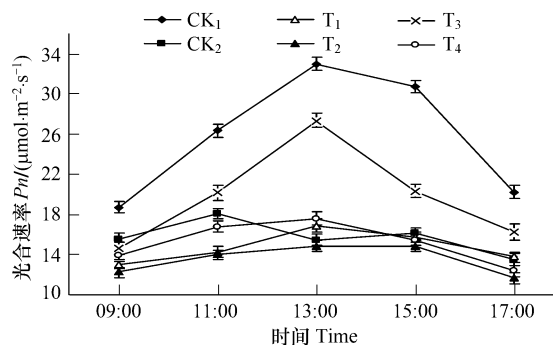


图7 不同复合模式中玉米、大豆光合速率的日变化

Fig. 7 Diurnal Pn of maize and soybean within different intercropping systems

2.3 不同处理玉米、大豆光合速率与气孔导度和细胞间 CO₂浓度的关系

各处理中玉米、大豆的气孔导度日变化趋势与其光合速率的日变化趋势基本一致(图 8),除单作大豆(CK₂)气孔导度日变化表现为“双峰型”曲线外,其他复合模式下二者的气孔导度日变化均呈“单峰型”曲线,且气孔导度的最大值均出现在 13:00—15:00 时。相关分析结果表明:各处理玉米、大豆的光合速率与气孔导度均呈显著的正相关关系($P < 0.05$)。

如图 9 所示,除单作大豆(CK₂)细胞间 CO₂浓度日变化表现为“单峰型”曲线外,其他处理玉米、大豆的细胞间 CO₂浓度日变化均呈“双峰型”曲线,且细胞间 CO₂浓度的最小值均出现在 13:00($P < 0.05$)。相关分析结果表明:各处理玉米、大豆的光合速率与细胞间 CO₂浓度的相关系数均未达到显著水平,说明细胞间 CO₂供应不是导致光合速率变化的直接原因,这与 Farquhar 等^[16]的观点相一致。

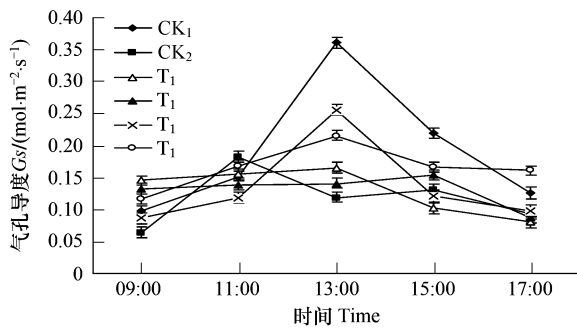


图 8 不同复合模式中玉米、大豆气孔导度的日变化

Fig.8 Diurnal Gs of maize and soybean within different intercropping systems

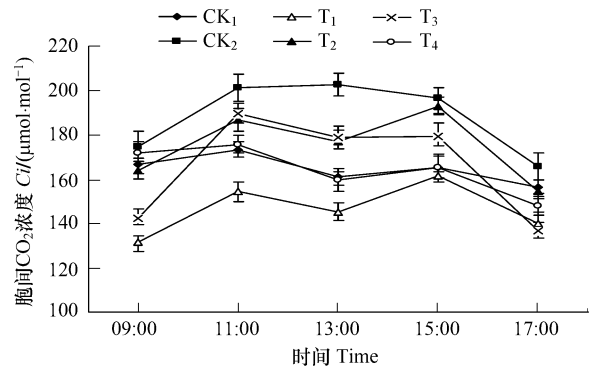


图 9 不同复合模式中玉米、大豆细胞间 CO₂浓度的日变化

Fig.9 Diurnal Ci of maize and soybean within different intercropping systems

2.4 玉米、大豆光合速率与复合系统小气候因子数量关系分析

为了探讨不同处理玉米、大豆光合作用与各气候因子的关系,采用多元逐步回归分析法,以 Y 表示光合速率,对各处理玉米、大豆的光合速率与光合有效辐射强度(X_1)、大气温度(X_2)、大气相对湿度(X_3)、大气 CO₂浓度(X_4)及风速(X_5)的关系进行了回归分析(表 2),以了解不同处理影响玉米、大豆光合作用的主要环境因子及其数量关系。

如表 2 所示,光合有效辐射强度(X_1)是进入方程组频率最高的因子,且与光合速率呈显著或极显著正相关关系。对单作玉米(CK₁)和核桃-大豆(T₄)而言,光合有效辐射强度是进入回归方程的唯一因子。大气 CO₂浓度(X_4)是除光合有效辐射强度(X_1)外出现频率较高的影响因子(表 2),根据 F 测验,光合有效辐射强度的正效应大于大气 CO₂浓度的正效应。大气相对湿度(X_3)也出现在回归方程中,但对光合速率表现出显著的负效应。所以,光合有效辐射强度是影响复合系统玉米、大豆光合速率的主要环境因子。尽管大气温度(X_2)和风速(X_5)没有出现在各回归方程中,但他们是影响大气湿度和大气 CO₂浓度的主要因素,同样也是影响复合系统中林下作物的重要小气候因子。

表 2 不同处理玉米大豆光合速率与环境因子的多元逐步回归分析
Table 2 Multiple regression analysis of environmental factor versus photosynthesis rate of corn and soybean in different treatments

处理 Treatment	多元逐步回归方程 Fitting equation of multiple regression	复相关系数 R^2
CK ₁	$Y = 0.7083 + 0.0199X_1$	0.8865 *
CK ₂	$Y = 9.1025 + 0.0213X_1 - 0.1103X_3$	0.5167 **
T ₁	$Y = 57.0768 + 0.0543X_1 + 0.1232X_4$	0.8281 *
T ₂	$Y = 58.38821 + 0.1303X_4$	0.8765 *
T ₃	$Y = 18.977 + 0.036X_1 + 0.4912X_4$	0.8466 *
T ₄	$Y = 2.4647 + 0.0124X_1$	0.9355 **

*, ** 分别表示 5% 和 1% 水平上的显著性

3 讨论

植物的光合作用是非常复杂的生理生化过程,受光合有效辐射强度、大气温度、大气湿度、大气 CO_2 浓度等众多环境因子的共同制约。本研究结果表明,农林复合系统在改善农田小气候方面效果明显,可以降低农田大气温度、提高相对湿度、减低风速,但同时降低了复合系统的光合有效辐射强度和大气 CO_2 浓度,而光合有效辐射强度和大气 CO_2 浓度与林下作物的光合速率显著正相关,因此复合系统在改善农田小气候的同时降低了玉米、大豆的光合速率。光合速率的降低是导致农作物减产的直接原因^[17-19]。

本研究中,单作大豆的光合速率日变化趋势表现为“双峰型”曲线,有明显的“午休”现象。许大全等^[20-21]研究提出,造成植物叶片光合速率午间降低的植物自身因素为气孔部分关闭引起的气孔限制和叶肉细胞自身活性下降引起的非气孔限制类,前者使细胞间 CO_2 浓度降低,而后者使细胞间 CO_2 浓度增高。本研究中大豆的光合速率与气孔导度显著相关,当大豆叶片的气孔导度降低时,细胞间 CO_2 浓度却升高,说明单作大豆光合速率降低不是主要由于气孔导度降低引起的,而是非气孔限制起着主要作用。通常,植物的光合日变化在光合有效辐射强度较强的晴天呈“双峰型”,而在光强较弱的阴天呈“单峰型”。由图 7 也可以看出,单作大豆光合速率谷值出现在一天内光合有效辐射最强的时刻(13:00)。这说明高光强与该时期光合“午休”现象有直接关系。但也有研究表明,光合“午休”现象在较低的光合有效辐射强度下(约 $500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)就可以发生^[22],这说明高光强不一定是导致植物光合“午休”现象的直接原因,而可能与植物的生长发育节律和遗传特性有关。但是,高光强是造成多种环境因子日变化(大气温度、大气湿度等)的基本推动力。高光强可以通过降低大气湿度和提高大气温度间接地导致光合“午休”现象的发生,这可能是多种植物光合“午休”现象出现的间接但却是最重要的生态因子。本研究中,单作大豆午后气温高达 37°C (图 5),如此高温必然会对大豆的光合作用产生不利影响,使其蒸腾过度、同化物积累,光合作用减弱,直接造成光合“午休”现象。农林复合系统改善了农田小气候,降低了复合系统的光合有效辐射强度,但却使林下作物避免了“午休”现象的出现。这也是农林复合系统在光能协同利用上具有可操作性的一个重要方面。

农林复合系统的小气候对林下作物的生长发育有着至关重要的作用,科学、合理的设计、管理复合系统,营造一个良好的复合系统小气候有利于林下作物的光合、生长。本研究中,复合系统在改善农田小气候的同时降低了其内部的光合有效辐射强度和大气 CO_2 浓度,影响了林下作物正常的光合作用。应该加强复合系统的田间管理,调整树木行间距,且对果树定期进行修剪,以减少光能竞争,确保系统内外通风,使 CO_2 浓度维持接近常量水平,以保证光合作用的正常进行。

在以核桃、李子或类似果树为主的果农复合系统中,为了使整个复合系统的综合效益最大化,复合物种应该优先选择种植耐荫农作物、生姜或中药材,而非喜光作物。在以玉米、大豆等喜光农作物为主要生产产品种时,应加强田间管理,调整树木行间距且对果树定期进行修剪,以减少不同植物对光、肥、水等资源的竞争,提高间作农作物产量,进而增加整个复合系统的总体产值,提高复合系统的综合效益。

References:

- [1] 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.
- [2] Zhao Y, Zhang B, Zhao H C, Wang M Z. Transpiration of *Choerospondias axillaris* in agro-forestry system and its affecting factors. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(11): 2035-2040.
- [3] 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.
- [4] Zink Han F C, Mercer D E. An assessment of agroforestry systems in the southern USA. *Agroforestry Systems*, 1997, 35: 303-321.
- [5] Garrett H E G. Agroforestry practice and policy in the United States of America. *Forestry Ecology and Management*, 1997, 91 (1): 5-15.
- [6] Lu Q, Yang H X, Ci L J, Zhu Z H, Wu Y Y, Jing Y S. Effect of radiation transmission on crop yield and quality. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(1): 36-44.
- [7] Yin R, Hyde W F. Trees as an agriculture sustaining activity: the case of northern China. *Agroforestry Systems*, 2000, 50 (2), 179-194.

- [8] Wu Y Y, Xiong Q X. Energy balance, water utility and its relationship with the crop yield in paulownia-wheat intercropping field. *Scientia Silvae Sinicae*, 1991, 27(4):410-416.
- [9] Yuan Y X, Jia Y B, Shao J X, Wei H X, Feng C H. A study on distribution law of microclimate factors in poplar-crop intercropping system. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2002, 10(3):21-23.
- [10] Wang X L, Wu Y J. Study on the microclimate effect of forest shelter network in wetland agricultural ecosystem of JangHan plain-lake district. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*. 1999, 8(4):418-422.
- [11] Zhang J S, Meng P, Song Z M, Gao J. An overview on micro-climatic effects of agro-forestry systems in plain agricultural areas in China. *Chinese Agricultural Meteorology*, 2004, 25(3):52-55.
- [12] Xu K Z, Wu Z H, Wang Z. The primary study on the distribution character of irradiance and CO₂ of maize canopies. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2001, 23(3):9-12.
- [13] Pasqule S. Maize canopies under two soil water regimes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, (89):169-184.
- [14] Zhang J S, Meng P, Xin X B, Yin C J. Effects of the Apple-ginger inter-cropping in the hilly land of TaiHang Mountain. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001, 37(2):74-78.
- [15] Li J X, Wan Z H. Microclimatic effect and soil moisture change of poplar-wheat intercropping systems in Huabei Plain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(4):390-394.
- [16] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology*, 1980, 313-317.
- [17] Newman S M, Bennett K, Wu Y. Performance of maize, beans and ginger as intercrops in *Paulownia* plantations in China. *Agroforestry Systems*, 1998, 39, 23-30.
- [18] Kang B T, Wilson G F, Sipkens L. Alley cropping maize and leucaena in southern Nigeria. *Plant and Soil*, 1981, 63:165-179.
- [19] Lowan T L, Kang B T. Yield of maize and cowpea in alley cropping system in relation to available light. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1990, 52:349-359.
- [20] Xu D Q. Ecology, physiology and biochemistry of midday depression of photosynthesis. *Plant Physiology Communications*, 1990, 26(6):5-10.
- [21] Xu D Q, Shen Y G. Diurnal variation in the photosynthetic efficiency in plants. *Acta Phytophysiologica Sinica*, 1997, 23(4):410-416.
- [22] Raschke K, Resemann A. The midday depression of CO₂ assimilation in leaves of *Arbutus undedo* L: diurnal changes in photosynthetic capacity related to changes in temperature and humidity. *Planta*, 1986, 168:546-558.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 赵英, 张斌, 赵华春, 王明珠. 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.
- [6] 卢琦, 阳含熙, 慈龙骏, 竺肇华, 吴运英, 景元书. 农桐间作系统辐射传输对农作物产量和品质的影响. *生态学报*, 1997, 17(1):36-44.
- [8] 吴运英, 熊勤学. 桐麦间作地能量平衡和水分利用状况及其与产量的关系. *林业科学*, 1991, 27(4):410-416.
- [9] 袁玉欣, 贾渝彬, 邵吉祥, 魏红侠, 冯长红. 杨粮间作系统小气候水平分布特征研究. *中国生态农业学报*, 2002, 10(3):21-23.
- [10] 王学雷, 吴宜进. 汉江平原湖区农田防护林的小气候效应研究. *长江流域资源与环境*, 1999, 8(4):418-422.
- [11] 张劲松, 孟平, 宋兆民, 高峻. 我国平原农区复合农林业小气候效应研究概述. *中国农业气象*, 2004, 25(3):52-55.
- [12] 徐克章, 武志海, 王珍. 玉米群体冠层内光和 CO₂ 分布特征的初步研究. *吉林农业大学学报*, 2001, 23(3):9-12.
- [14] 张劲松, 孟平, 辛学兵, 尹昌君. 太行山低山丘陵区苹果生姜间作系统综合效应研究. *林业科学*, 2001, 37(2):74-78.
- [15] 李俊祥, 宛志沪. 淮北平原杨-麦间作系统的小气候效应与土壤水分变化研究. *应用生态学报*, 2002, 13(4):390-394.
- [20] 许大全. 光合作用“午睡”现象的生态、生理与生化. *植物生理学通讯*, 1990, 26(6):5-10.