

光能竞争对农林复合生态系统生产力的影响

彭晓邦¹, 蔡 靖^{1,4}, 姜在民^{2,4}, 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: 农林复合生态系统是改善渭北黄土区脆弱生态环境、促进该区域经济发展的重要举措。以该区具有代表性的核桃 (*Juglans regia* L.)、李子 (*Prunus salicina*)、绿豆 (秦豆 6 号)、辣椒 (陕椒 981) 农林复合模式为对象, 研究不同农林复合系统对光能分布、农作物生长、生产的影响。研究结果表明, 不同复合模式下, 玉米、辣椒的光合有效辐射、光合速率、生物量及产量均有不同程度的下降, 且距树行愈近, 影响愈大。叶片水势与玉米、辣椒的光合速率、地上部分生物量以及产量不相关或负相关。而 10~20cm 土壤含水量与绿豆的生物量和产量以及辣椒的地上部分生物量正相关。但绿豆、辣椒的生产量与其光合有效辐射呈显著正相关性, 这说明, 农林复合系统中光能竞争是导致间作绿豆、辣椒产量下降的主要原因。

关键词: 农林复合; 光合有效辐射; 光合速率; 生产力; 黄土区

文章编号: 1000-0933(2009)01-0545-08 中图分类号: Q147, S181 文献标识码: A

Effects of light competition on crop productivity in an intercropping agroforestry ecosystem

PENG Xiao-Bang¹, CAI Jing^{1,4}, JIANG Zai-Min^{2,4}, ZHANG Yuan-Ying³, ZHANG Shuo-Xin^{1,4,*}

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

2 College of Life Science, 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(1): 0545 ~ 0552.

Abstract: Agroforestry is the most effective way to restore the disturbed lands on the Loess Plateau and to develop the currently poor local economy. In order to study the potential benefits of tree-based intercropping systems, photosynthesis, growth and yield of mung bean (Qindou 6) and pepper (Shanjiao 981) were studied by measuring photosynthetic active radiation (*PAR*), plant water deficit and soil moisture in a 4-year-old plantation of walnut (*Juglans regia* L.) and plum (*Prunus salicina*) grown at a spacing of 5 m × 3 m on the Loess Plateau. The effects of tree competition significantly reduced the *PAR*, the Net photosynthetic rate (*P_n*), growth and yield of individual mung bean or pepper plants growing near (within 1m near) to tree rows. In 2007, daily plant water deficits were not significantly correlated with the *P_n* and growth and yield of the both crops. However, the soil moisture (20cm depth) was significantly correlated with biomass and yield of the crops. The *PAR* was highly correlated with growth and yield of the both crops, which indicated that competition for light is one of the key factors impacting crop yield. Possible remediation strategies are suggested that may reduce competitive interactions between the tree and crop species.

Key Words: agroforestry; photosynthetic active radiation (*PAR*); net photosynthetic rate (*P_n*); crop productivity; Loess Area

基金项目: 国家林业科技支撑计划资助项目 (2006BAD03A05-3)

收稿日期: 2008-03-02; 修订日期: 2008-10-12

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

农林复合 (agroforestry), 又称混农林业, 立体林业或农用林业, 是一种传统的土地利用和经营方式。我国是推行农林复合系统较早的国家之一, 也是世界上农林间作面积最大的国家^[1]。随着“人口剧增、粮食短缺、资源危机、环境恶化”等全球性问题的日益严峻, 农林复合系统不仅受到众多发展中国家和地区的普遍关注^[2,3], 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^[4~6]。庞爱权等^[7~12]研究表明: 复合农林业, 在解决农林“争地”矛盾、改善生态环境、提高自然资源利用率、增加农民收入、促进生态和经济协调发展等方面具有重要的作用与意义。因此, 复合农林业可为农业和农村可持续发展的研究提供一种新的思维和新的领域。本文以渭北黄土区具有代表性的核桃、李子、绿豆、辣椒农林复合模式为对象, 研究不同农林复合系统对光能分布、农作物生长、生产的影响, 为合理设计、管理、调控该地区果农复合提供一定的理论依据, 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 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*) 和主要农作物绿豆 (秦豆 6 号)、辣椒 (陕椒 981) 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: 核桃-绿豆、核桃-辣椒、李子-绿豆、李子-辣椒、单作绿豆和单作辣椒, 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。绿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 15 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

结果期是植物最关键的生育期, 在绿豆的鼓粒期和辣椒的结果期, 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 , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、光合有效辐射 (PAR , $\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$) 以及其它主要生理指标和环境因子。测定时间 9:00~17:00, 每 2h 测定 1 次。除单作外, 测试时在每个试区的 12 个固定样点上选取具有代表性的绿豆、辣椒各 12 株, 每株选取长势相近、充分伸展、无病虫害的健康叶 3 片, 每个指标测 3 个重复, 每个重复记录 3 个数据, 每种复合模式 3 个重复试验小区, 最后取平均值。

1.3.2 土壤含水量和植物水势的测定

在绿豆、辣椒结果期, 在每种土地利用方式内布设 3 块样地, 在每块样地内按“S”形布设 5 个土壤取样点, 用土钻法人工取土, 取土深度为 20cm, 每 10cm 为一层, 每个点各取 1 次, 共 5 个重复。然后利用烘箱烘干, 称重后计算土壤含水量, 5 次重复的平均即为该样地土壤的平均含水量。

表 1 试验区绿豆、辣椒复合系统中核桃、李子的生长特征

Table 1 Characteristics of trees intercropped with mung bean and pepper in the experimental fields

项目 Item	核桃 Walnut	李子 Plum
绿豆间作 Intercropping mungbean		
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 crown (m)	1.8	2.5
冠幅半径 Mean radius of crown (m)	0.9	1.8
辣椒间作 Intercropping pepper		
树高 Tree height (m)	2.9	3.3
胸径 Diameter at breast height (cm)	3.4	5.8
冠深 Depth of live crown (m)	1.7	2.4
冠幅半径 Mean radius of crown (m)	0.7	1.6

植物叶片水势利用 Psypro 露点水势仪(美国, WESCOR 公司制造)在 6:00 ~ 8:00 进行测定,测定前仪器预热 30min。每样株采长势良好、无病虫害的功能叶 3 片,每个处理共采 9 片,迅速剪碎混合后取适量样品立即放入样品盒进行测定。每种复合类型重复 3 次,最后取平均值。

1.3.3 生物量和产量的测定

在每个试区的 12 个固定样点上选取绿豆、辣椒各 12 株,带回实验室,测定其地上部分生物量、株高、叶片数量、叶重及叶面积。其中叶面积用 LI-COR3100(美国, LI-COR 公司制造)叶面积仪测定。每种复合模式 3 个重复试验小区,最后取平均值。

在生长季末,于树行两边分别取 3m × 2m 样方地上绿豆和辣椒,在 70℃ 烘干至恒重,用精确至 0.01 g 的电子天平称重,测定其生物量和产量。每种复合类型重复 3 次,最后取平均值。

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 光合有效辐射在不同复合模式中的日变化

由图 2 可以看出,绿豆的光合有效辐射强度从单作、距核桃 2.5m、距李子 2.5m、距核桃 1m 到距李子 1m 逐渐减弱。其中单作、距核桃 2.5m 和距李子 2.5m 处绿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。而距核桃 1m 和距李子 1m 处绿豆的光合有效辐射日变化为“双峰型”曲线,谷值均出现在 13:00 时。不同复合模式下辣椒的光合有效辐射日变化趋势与绿豆的基本一致(图 3),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。

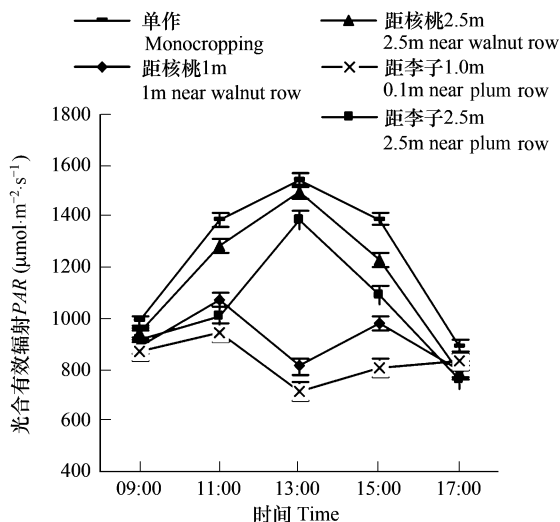


图 2 不同复合模式中绿豆光合有效辐射的日变化

Fig. 2 Diurnal PAR within mung bean plots for monocropping, walnut and plum plots

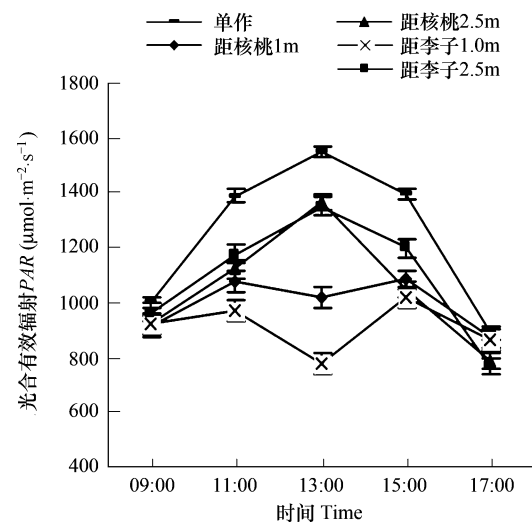


图 3 不同复合模式中辣椒光合有效辐射的日变化

Fig. 3 Diurnal PAR within pepper plots for monocropping, walnut and plum plots

2.2 不同复合模式中绿豆、辣椒光合速率的日变化

如图4所示,除距李子1m处外,其他复合模式下绿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19.3、16.2、18 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 和15.1 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。不同复合模式中绿豆净光合速率的日均值表现为单作(15.52 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) > 距核桃2.5m(14.56 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) > 距核桃1m(13.28 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) > 距李子2.5m(12.52 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) > 距李子1m(10.04 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)。辣椒的光合速率日变化趋势与绿豆相似,除距李子1m处的光合速率日变化表现为“双峰型”曲线外,其他复合模式下辣椒的净光合速率日变化均呈“单峰型”曲线(图5)。不同复合模式中辣椒净光合速率的日均值表现为单作(15.22 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) > 距核桃2.5m(13.92 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) > 距李子2.5m(13.08 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) > 距核桃1m(11.7 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) > 距李子1m(10.68 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)。总之,各复合模式中绿豆、辣椒的净光合速率日均值都低于单作。方差分析结果表明(表3),在不同复合模式下绿豆、辣椒光合速率间存在显著性差异($P < 0.05$),但辣椒的相关显著性高于绿豆(表2)。

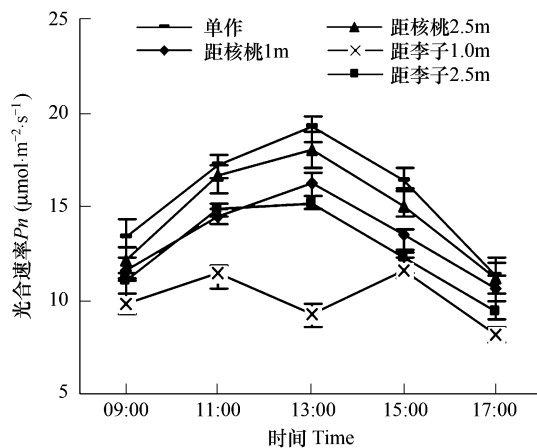


图4 不同复合模式中绿豆光合速率的日变化

Fig. 4 Diurnal P_n within mung bean plots for monocropping, walnut and plum plots

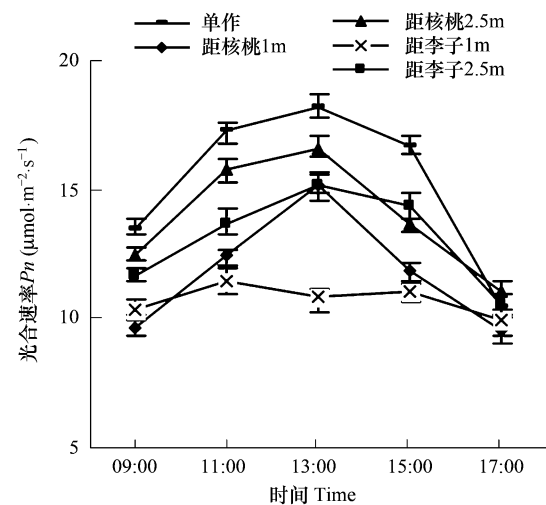


图5 不同复合模式中辣椒光合速率的日变化

Fig. 5 Diurnal P_n within pepper plots for monocropping, walnut and plum plots

表2 不同复合模式中(单作、与核桃间作和与李子间作)绿豆和辣椒的生理生长特征

Table 2 Treatment differences (monocropping, walnut and plum) for mung bean and pepper intercrop in 2007

变量 Measurement	绿豆 Mungbean			辣椒 Pepper		
	单作 Monocropping	核桃间作 Walnut	李子间作 Plum	单作 Monocropping	核桃间作 Walnut	李子间作 Plum
光合有效辐射 PAR($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	1238a	1030a	933a	1244a	1020ab	1001ab
光合速率 P_n ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	15.52a	13.9a	11.3ab	15.2a	12.8ab*	11.9b*
叶片水势 Leaf water deficit(MPa)	-1.62b	-1.55a	-1.43a	-1.51a	-1.44a	-1.41a
0~10cm 土壤含水量 0~10cm Soil moisture (%)	21.019a	21.026b	21.19b	21.223a	21.528b	21.251ab
10~20cm 土壤含水量 10~20cm Soil moisture (%)	21.308a	21.462b	21.61b	21.311a	21.607b	21.344ab
株高 Height (cm)	56.6ab	46.2b	39.4b	83.1b	77.9b	69.8ab
叶面积 Leaf area(cm^2)	1106.2a	788.6a	548.2ab	1708.4ab	1661.7a	1547.2ab
叶重 Leaf mass (g)	3.2a	2.02a	1.76b	6.8a	5.4b	5.1ab
生物量 Biomass (g)	11.2a	9.65ab	9.05b	14.6a	13.1ab*	12.7ab*
产量 Yield (t/hm^2)	1.3a	0.81b	0.75b	1.45a	0.77ab	0.71b

表中的数值为12个样点的平均值;不同字母表示差异水平显著($P < 0.05$);* 差异水平显著性为0.01 Values are means of 12 locations; Within each crop value in each row followed by the same letter are not significantly different ($P < 0.05$); * The significant at the 0.01 level

2.3 不同复合模式中绿豆、辣椒的生物量和产量

相对于单作而言,在不同间作模式下绿豆、辣椒地上部分的生物量均有不同程度的降低(图6、图7)。其变化趋势与光合有效辐射的变化趋势一致,均表现为单作>距核桃2.5m>距李子2.5m>距核桃1m>距李子1m。相关性分析结果表明,光合有效辐射强度与其地上部分生物量显著正相关(表4)。在各复合模式中,间作绿豆和辣椒的株高、叶面积和叶重与单作的相比都有不同程度的降低(表2、表3),方差分析结果表明不同处理间存在显著性差异($P < 0.05$)。如表2所示,在绿豆-核桃间作和绿豆-李子间作复合模式中绿豆的产量与单作绿豆的产量相比分别降低了37.69%和42.31%;而辣椒-核桃和辣椒-李子间作与其单作相比,产量分别降低了46.9%和51.03%。在绿豆间作的不同模式中,各处理绿豆产量降低程度分别表现为距李子1m(55.38%)>距核桃1m(49.23%)>距李子2.5m(29.23%)>距核桃2.5m(26.15%);在辣椒间作的不同模式中,各处理辣椒产量降低程度分别表现为距李子1m(58.62%)>距核桃1m(56.55%)>距李子2.5m(43.45%)>距核桃2.5m(37.24%)(表3)。

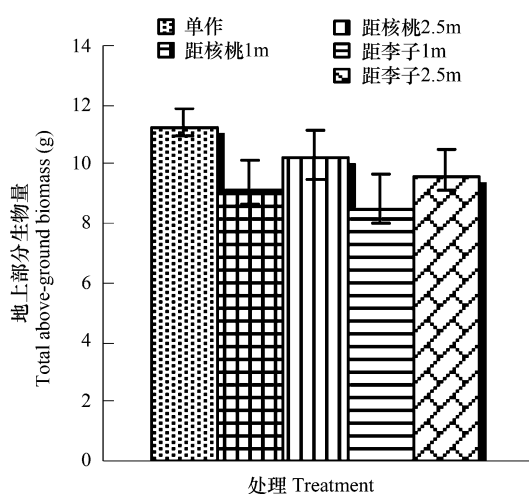


图6 不同复合模式中绿豆地上部分生物量

Fig. 6 Total above-ground biomass of mung bean in relationship to plot location for monocropping, walnut and plum plots

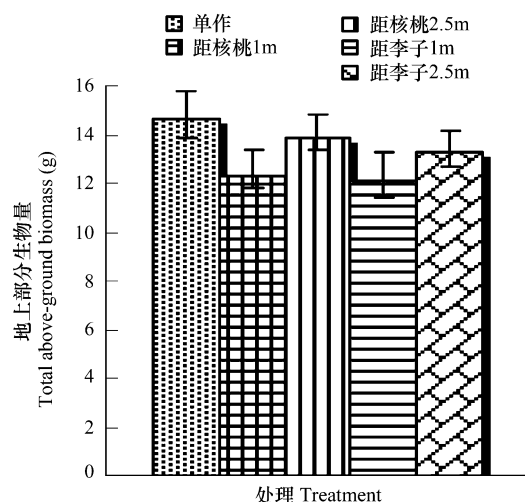


图7 不同复合模式中辣椒地上部分生物量

Fig. 7 Total above-ground biomass of pepper in relationship to plot location for monocropping, walnut and plum plots

2.4 绿豆、辣椒的光合、生长、生物量及产量与生长环境和生理参数的相关性分析

如表4所示,相关性分析结果表明,绿豆和辣椒的光合有效辐射与其净光合速率、地上部分生物量以及产量显著正相关。而净光合速率与生物量和产量也呈显著正相关关系。这正说明光合作用是植物生长发育的基础,而光照是提供作物同化力形成所需要能量的唯一来源。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。相反,叶片水势与绿豆、辣椒的光合速率、地上部分生物量以及产量不相关或负相关。说明叶片水势不是影响试区各植物光合速率及作物产量的主要因素。0~10cm土壤含水量分别与绿豆和辣椒的株高和生物量呈正相关关系;10~20cm土壤含水量与绿豆的生物量和产量以及辣椒的地上部分生物量正相关。这充分说明土壤水分含量对植物生长发育十分重要,是影响作物生物量和产量的主要因素之一。

3 讨论

造成复合模式中绿豆、辣椒减产的原因是多方面,但在某些条件下,可利用光的多少或许是最重要的限制因素。由于太阳方位与高度角的变化,其遮荫范围各不相同,对行间间作绿豆、辣椒而言树的行向、密度、树高和冠幅直接影响其光照强度和交互遮荫时间的长短。本试验研究表明,农林复合严重影响间作绿豆、辣椒的光合有效辐射、地上部分生物量和产量,且距树行愈近,影响愈大。而绿豆、辣椒的生产量与其光合有效辐射呈显著正相关性,这说明,农林复合系统中光能竞争是导致间作绿豆、辣椒产量下降的主要原因。这与

表 3 核桃、李子对绿豆和辣椒生长环境、生理参数以及生物量和产量的影响

Table 3 Effects of tree competition on within plot environmental parameters; physiological parameters (daily mean) of agricultural crops; and crop yield, growth, and biomass

变量 Measurement	农作物 Crop	单作 Monocropping	核桃间作 Walnut		李子间作 Plum	
			距树行 1m 1m walnut	距树行 2.5m 2.5m walnut	距树行 1m 1m plum	距树行 2.5m 2.5m plum
绿豆 Mungbean						
光合有效辐射 $PAR(\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1})$		1238a	910a	1150a	835b	1032a
光合速率 $Pn(\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1})$		15.52a	13.28a	14.56b*	10.04a*	12.52b
叶片水势 Leaf water deficit (MPa)		-1.62b	-1.46a	-1.64a	-1.41a	-1.45a
0~10cm 土壤含水量		21.019a	21.086a	20.966a	21.22b	21.16a
0~10cm Siol moisture(%)						
10~20cm 土壤含水量		21.308a	21.501b	21.423a	21.581a	21.639a
10~20cm Siol moisture(%)						
株高 Height(cm)		56.6ab	42.1a	50.3a	38.2b	40.6a
叶面积 Leaf area(cm^2)		1106.2a	726.6a	850.6a	491.7b	604.7a
叶重 Leaf mass(g)		3.2a	1.81b	2.23a	1.4b	2.12a
生物量 Biomass(g)		11.2a	8.3a	11.0a	7.8a*	10.3a
产量 Yield(t/hm^2)		1.3a	0.66a	0.96a	0.58b*	0.92a
辣椒 Pepper						
光合有效辐射 $PAR(\mu\text{mol s}^{-1}\text{m}^{-2})$		1244a	992a	1048a	911a	1091b
光合速率 $Pn(\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1})$		15.2a*	11.7a	13.9a	10.7b*	13.1ab
叶片水势 Leaf water deficit (MPa)		-1.51a	-1.45a	-1.42a	-1.32a	-1.47a
0~10cm 土壤含水量		21.223a	21.523a	21.533a	21.274b	21.228ab
0~10cm Siol moisture(%)						
10~20cm 土壤含水量		21.311a	21.599a	21.615a	21.371b	21.317a
10~20cm Siol moisture(%)						
株高 Height(cm)		83.1a	75.6b	80.2a	63.3b	76.3ab
叶面积 Leaf area(cm^2)		1708.4a	1625.6ab	1697.8a	1411b	1683.4a
叶重 Leaf mass(g)		6.8a	4.7a	6.1a	4.3ab	5.9a
生物量 Biomass(g)		14.6a	12.3a	13.9a	12.1b*	13.3a
产量 Yield(t/hm^2)		1.45a*	0.63ab*	0.91a	0.6b*	0.82a

不同字母表差异水平显著 ($P < 0.05$); * 差异水平显著性为 0.01 Within each crop value in each row followed by the same letter are not significantly different ($P < 0.05$); * The significant at the 0.01 level

表 4 绿豆、辣椒的光合、生长、生物量及产量与生长环境和生理参数的相关性分析

Table 4 Correlation of mung bean and pepper net assimilation, growth, biomass, and yield with environmental or physiological parameters measured in 2007

变量 Measurement	光合速率 Pn ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	叶面积 Leaf area (cm^2)	叶重 Leaf mass (g)	株高 Height (cm)	生物量 Biomass (g)	产量 Yield (t/hm^2)
绿豆 Mungbean						
光合有效辐射 $PAR(\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1})$	0.77**	0.82*	0.84*	0.71*	0.66**	0.82**
光合速率 $Pn(\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1})$		0.81*	0.64**	0.69*	0.84**	0.75**
叶片水势 Leaf water deficit(MPa)	0.17	-0.13	-0.09	0.19	-0.25	0.21
0~10cm 土壤含水量	0.24	0.09	0.45	0.42*	0.51	0.17
0~10cm siol moisture(%)						
10~20cm 土壤含水量	0.52	0.13	0.57	0.38	0.25*	0.61*
10~20cm siol moisture(%)						
辣椒 Pepper						
光合有效辐射 $PAR(\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1})$	0.81**	0.77*	0.75*	0.82*	0.74*	0.63**
光合速率 $Pn(\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1})$		0.59*	0.76*	0.57*	0.69**	0.75*
叶片水势 Leaf water deficit(MPa)	0.11	-0.23	0.37	0.19	-0.12	0.16
0~10cm 土壤含水量	0.54	0.39	0.31	0.44	0.09*	0.21
0~10cm siol moisture(%)						
10~20cm 土壤含水量	0.57	0.24	0.58	0.14	0.31*	0.52
10~20cm siol moisture(%)						

表中的数值为 12 个样点的平均值; ** 相关显著性水平为 0.01; * 相关显著性水平为 0.05 Values are means of 12 locations; ** Correlation is significant at the 0.01 level; * Correlation is significant at the 0.05 level

Newman 等^[13]对泡桐(*Paulownia*)-玉米、泡桐-豆角复合模式的研究结果一致。而 Kang 和 Lowan 等^[14,15]也都将新银合欢(*Leucaena leucocephala*)-玉米复合模式中玉米产量的下降归于光能的竞争。本研究发现:两种间作绿豆的产量与其单作相比分别只降低了 37.69% 和 42.31%;而两种间作辣椒的产量与其单作相比分别降低了 46.9% 和 51.03%。这说明与辣椒相比,绿豆更适合于渭北黄土区农林复合系统。

就土壤水分而言,间作与单作 0~20cm 土壤含水量并没有明显区别(表 2),这可能是由于整个生长季降雨充沛,根系较浅的绿豆、辣椒不会与根系较深的核桃、李子发生水分竞争的原因。但复合模式下绿豆、辣椒 0~20cm 土壤含水量劣高于单作,这或许是由于核桃、李子的“提水作用”引起的土壤水分再分配的结果^[16]。这也是农林复合系统在水分协同利用上具有可操作性的一个重要方面。

农林复合改变光能分布而造成的影响因作物而异,对某些耐荫作物可能具有促进作用。Newman 等^[13,17,18]对泡桐-生姜复合以及张劲松等^[19]对苹果-生姜复合的研究发现,在不同复合模式中生姜的产量均有不同程度的提高。丁瑞兴^[20]研究发现乌柏(*Sapium sebiferum* L.)、茶树(*Camelliasinensis*)间作则有利于提高茶叶产量和品质。这说明在农林复合系统中,作物品种的选择是提高间作农作物产量的有效途径之一。

吴运英和竺肇华^[21]研究发现,在农林复合系统中林木的行间距离是决定树阴对林下作物影响大小的关键因素。为了有效调控树阴对林下作物的影响,他们研究认为当复合系统树行间距为 5~10m 时,该复合模式有利于树的生长、生产;当复合系统树行间距为 15~20m 时,该复合模式既有利于树的生长、生产又对农作物的生长、生产不构成影响;当复合系统树行间距为 30~50m 时,该复合模式则有利于农作物的生长、生产。根据这个研究结论,第二种间距应该是本研究模式的最佳选择。裴保华等^[22]研究发现,通过合理配置设计,修剪和间伐管理,只要间作的平均透光率在 50% 以上,则可防止农作物产量和质量的降低,实现林粮共存。

综上所述,在渭北黄土区农林复合系统中,光能竞争是导致绿豆、辣椒减产的主要原因。与辣椒相比,绿豆更适合于渭北黄土区农林复合系统。在以核桃、李子或类似果树为主的果农复合系统中,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。在以绿豆、辣椒等喜光农作物为主要生产品种时,应加强田间管理,调整树木行间距且对果树定期进行修剪,以减少光能竞争,提高间作农作物产量,进而增加复合系统的产值,优化复合模式。

References:

- [1] Li W H, Lai S D, Luo C J, et al. Agriculture management in China. Beijing: Science Press, 1994. 1—8.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Zink Han F C, Mercer D E. An assessment of agroforestry systems in the southern USA. *Agroforestry Systems*, 1997, 35: 303—321.
- [6] Garrett H E G. Agroforestry practice and policy in the United States of America. *Forestry Ecology and Management*, 1997, 91 (1): 5—15.
- [7] Pang A Q. Economic Evaluation of the Agroforestry Complex System in China. *Journal of Natural Resources*, 1997, 12(2): 176—182.
- [8] Yang X. Position and Function of Agroforestry in Rural Sustainable Development. *Rural Eco-Environ*, 1996, 12(1): 37—41.
- [9] Shulte S. Agroforestry and soil conservation: adoption and profitability in EL Salvador. *Agroforestry Today*, 1997, 9 (4): 16—17.
- [10] Young N. Agroforestry for soil management, CAB International in association with international center for research in Agroforestry. 1997, 90—97.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Newman S M, Bennett K, Wu Y. Performance of maize, beans and ginger as intercrops in *Paulownia* plantations in China. *Agrofor. Syst.*, 1998, 39, 23—30.

- [14] Kang B T, *et al.* Alley cropping maize and leucaena in southern Nigeria. *Plant and Soil*, 1981, 63:165—179.
- [15] Lowan T L, Kang B T. Yield of maize and cowpea in alley cropping system in relation to available light. *Agric. For. Meteorol.*, 1990, 52:349—359.
- [16] Caldwell MM, Richards J H. Hydraulic lift: Water efflux from upper roots improves effectiveness of water uptake by deep roots. *Oecologia*, 1989, 79:1—5.
- [17] Sankar C R, Swamy S M. Influence of light and temperature on leaf area index, chlorophyll content, and yield of ginger. *Journal of Maharashtra University*, 1988, 13(2):216—217.
- [18] Thevathasan N V, Gordon A M, Simpson J A, *et al.* Biophysical and ecological interactions in a temperate tree-based intercropping system. *Journal of Crop Improv.*, 2004, 12(12):339—363.
- [19] 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. *Sci Silvae Sinicae*, 2001, 37(2):74—78.
- [20] Ding R X. Climatic-ecological effect of interplanting tallow trees in tea plantations. *Chin J Appl Ecol*, 1992, 3(2):131—137.
- [21] Wu YY, Zhu Z H. Temperate agroforestry in China. In: Gordon, A. M., Newman, S. M. eds. *Temperate Agroforestry Systems*. CAB International Press, Wallingford, UK, 1997. 149—179.
- [22] Pei B H, Yuan Y X, Wang Y. The effect of simulation tree shading to wheat growth and output. *Journal of Agriculture University of Hebei*, 1998, 21(1):1—5.

参考文献:

- [1] 李文华, 赖世登. 中国农林复合经营. 北京: 科学出版社, 1994.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [7] 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
- [8] 杨修. 农林复合经营在农村可持续发展中的地位 and 作用. *农村生态环境*, 1996, 12(1): 37~41
- [11] 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.
- [12] 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.
- [19] 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.
- [20] 丁瑞兴. 茶园间作乌桕的气候生态效应. *应用生态学报*, 1992, 3(2): 131~137.
- [22] 裴保华, 袁玉欣, 王颖. 模拟林木遮光对小麦生育和产量的影响. *河北农业大学学报*, 1998, 21(1): 1~5.