

枣棉间作系统棉花产量的形成与影响因素

段志平,刘天煜,张永强,焦超,栾鹏飞,杨涛,石岩松,
田钰泉,郝向东,李鲁华,张伟

(石河子大学农学院/新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室,新疆石河子832003)

摘要:枣棉间作条件下,通过设置两行枣树之间种植4行棉花(Int-4)与2行棉花(Int-2)两种不同的间作模式,研究一年生枣树对间作棉花的产量形成与影响因素。结果表明,不同间作模式棉花在盛花期前LAI、SPAD及光合生理特性差异不显著,盛花期后差异显著。与单作棉花相比,Int-4间作模式下棉花的株高、LAI及净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(Tr)和产量比单作下降5.85%、10.40%、15.51%、13.26%、9.18%和41.61%,其胞间 CO_2 浓度(C_i)比单作增加4.18%;Int-2间作模式下棉花的株高、LAI及净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(Tr)和产量比单作下降3.10%、5.39%、11.80%、9.25%、6.09%和47.74%,其胞间 CO_2 浓度(C_i)比单作增加0.84%;SPAD差异不显著。而经济收入表现为间作4行棉花模式>间作2行棉花模式>单作棉花,4行枣棉间作与2行枣棉间作相比,株高、LAI和干物质质量分别显著下降2.85%、5.29%和6.85%,Int-4产量比Int-2显著增加11.73%,而SPAD值和光合生理特性差异不显著。因此在枣棉间作系统中,适当增加棉花种植密度有利于棉花高产,同时有利于经济收入的增加。

关键词:枣棉间作;间作模式;光合特性;经济效益;产量

中图分类号:S344.2

文献标志码:A

Formation and influencing factors of cotton yield in jujube-cotton intercropping system

DUAN Zhi-ping, LIU Tian-yu, ZHANG Yong-qiang, JIAO Chao, LUAN Peng-fei, YANG Tao,
SHI Yan-song, TIAN Yu-quan, HAO Xiang-dong, LI Lu-hua, ZHANG Wei

(College of Agriculture, Shihezi University/Key laboratory of Oasis Agro-Ecology, Xinjiang Production and
Construction Crops, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

Abstract: Setting up two jujube-cotton intercropping systems, we is planted 4 rows of cotton or 2 rows of cotton between two rows of jujube, to study on the yield formation and influencing factors of one-year jujube on intercropping cottons. The results indicated that there were no significant differences in leaf area index, SPAD value and photosynthetic physiological characteristics in different intercropping patterns before flowering period, while there was significant difference after flowering period. Compared with 1-row cotton, the plant height, leaf area index and net photosynthetic rate, stomatal conductance, transpiration rate and yield of cotton in Int-4 intercropping pattern decreased by 5.85%, 10.4%, 15.51%, 13.26%, 9.18% and 41.61%, and the intercellular CO_2 concentration increased by 4.18%, respectively. The plant height, leaf area index and net photosynthetic rate, stomatal conductance, transpiration rate and yield of cotton in Int-2 intercropping model decreased by 3.10%、5.39%、11.80%、9.25%、6.09% and 47.74%, and the intercellular CO_2 concentration increased by 0.84%, respectively. There was no significant difference in SPAD value. The economic income from high to low was: Int-4>Int-2>1-row cotton.

收稿日期:2017-03-13

修回日期:2018-04-03

基金项目:国家自然科学基金(31460335,31560376),中国博士后科学基金面上项目(2015M582737),石河子大学高层次人才科研启动资金专项(RCZX201422)

作者简介:段志平(1990-),男,山西右玉人,硕士研究生,研究方向为绿洲生态与农作制度,E-mail:d_zhiping12@163.com。

通信作者:李鲁华(1967-),女,教授,主要从事耕作学与农业生态学研究,E-mail:shziluhua@163.com。

张伟(1979-),男,新疆玛纳斯人,博士,副教授,主要从事耕作学与农业生态学研究,E-mail:bluesky2002040@163.com。

Compared to Int-2, the plant height, leaf area index and dry matter of Int-4 decreased markedly by 2.85%, 5.29% and 6.85%, respectively. The yield of Int-4 was significantly increased by 11.73% compared to Int-2. However, there were no significant difference in SPAD value and photosynthetic physiological characteristics in Int-4 and Int-2. So we concluded that appropriate increase of cotton planting density is beneficial to the high yield of cotton in the jujube-cotton intercropping systems, it is also conducive to increase economic income.

Keywords: Jujube-cotton intercropping; intercropping pattern; photosynthesis treats; economic benefit; yield

果树与粮棉间作可提高土地利用效率,提高单位面积经济收入,同时在防风固沙、调节气候、改善生态环境等方面也有十分突出的作用^[1-3]。在新疆地区果农复合种植模式已发展为提高农民经济收入的重要农业经营模式,如枣—粮、枣—棉、杏—棉、杏—粮等果农复合种植系统^[4]。枣棉间作是新疆地区比较常见的果农复合种植系统之一,其本身是一个结构相对复杂、环境异质性相对较高的系统。枣棉间作系统可实现枣树与棉花的双重收益,但枣树会直接影响间作棉花冠层上方的光合分布,使得间作棉花的光合特性发生变化,而有效的光合作用是作物产量形成的基础^[5-9],因此研究枣树和棉花之间如何最优化光热资源配置是提高枣棉间作系统产量的核心问题。有研究表明农林间作系统中由于林木的遮荫作用,引起农作物接收光合有效辐射相对减弱,从而导致农作物的产量降低^[10-11],也有研究表明枣棉间作系统中不同的棉花种植密度会影响棉花冠层结构,从而影响棉花光合作用和产量^[12]。

近年来,枣棉间作种植系统不仅在南疆地区得到大力发展,在北疆地区也得到逐步推广,并逐步成为新疆绿洲生态系统的重要组成部分。然而,关于棉花的光合特性变化及肥、水等条件对棉花生长和产量构成研究多集中于单作棉田,对枣棉间作系统中的棉花光合特性及农艺性状变化研究却较少。因此,本研究拟通过不同的棉花间作种植模式来研究单作与间作、间作与间作中棉花的形态特征、光合特性、产量及经济效益的变化规律,探明枣棉间

作系统中枣树与棉花间的互作机理,为在北疆地区更好地推广实行枣棉间作复合农业生态系统提供理论指导。

1 材料和方法

1.1 试验概况与设计

试验于 2016 年在新疆生产建设兵团第八师一五〇团十五连(86°03'E,45°04'N)定位试验田进行,该地区干旱少雨、蒸发旺盛,昼夜温差较大,风沙天气频发,沙丘连绵起伏,是典型的沙漠干旱地区,无霜期约 170d,土壤类型为沙壤土。该地种植红枣 46.67 hm²。枣树于 2009 年栽植,每年 3 月中旬平茬(自地面 10 cm 以上部分全部修剪)。枣棉间作有两种配置模式,分别为在两行枣树之间种植 4 行棉花(Int-4)和在两行枣树之间种植 2 行棉花(Int-2),棉花单作为大田种植,作为对照。具体株行距配置如图 1。试验采用随机区组设计,3 次重复。

供试棉花品种为新陆早 48,采用膜下滴灌,栽培管理与大田生产一致,播种期为 2016 年 4 月 25 日,打顶日期为 7 月 20 日左右,收获日期为 10 月 1 日左右。棉花播前施入底肥,尿素 260kg·hm⁻²,磷酸二铵 130kg·hm⁻²。棉花整个生育期灌溉 8 次,每次灌水 625m³·hm⁻²,全生育期灌水约为 5000m³·hm⁻²,随水滴肥,每次灌水时追施尿素 26kg·hm⁻²,磷酸二铵 13kg·hm⁻²。试验区枣树品种为冬枣“赞皇”,由于每年都要进行平茬整枝,枣树树龄为一年,枣树行距 2.8m,株距 1.4m。

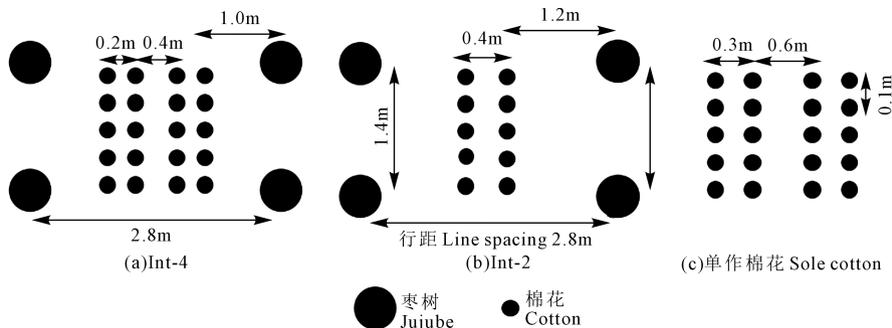


图 1 枣棉间作与单作棉花株行距配置

Fig.1 The planting space in sole cropping and jujube-cotton intercropping systems

1.2 测定项目及方法

1.2.1 单、间作棉花株高的测定 在棉花苗期、蕾期、花铃期和吐絮期,每个处理分别选取具有代表性的10株棉花,测量其株高,计算平均值并记录。

1.2.2 单、间作棉花叶面积和干物质质量测定 在棉花苗期、蕾期、花铃期和吐絮期,分别在每个处理选取长势良好的3株棉花,将其叶片、茎秆、棉铃分离。首先利用叶面积仪(LI-3100c)测定棉花叶面积,利用公式计算叶面积指数^[13]。然后将叶片、茎秆和棉铃分别装入牛皮纸袋,放入烘箱,在105℃下杀青30min,之后调至80℃烘干至恒重并称量。

1.2.3 单、间作棉花叶绿素含量的测定 于棉花苗期、蕾期、花铃期、叶絮期,分别在各处理中选取长势良好的5株棉花,利用spad-502叶绿素仪测定棉花功能叶(倒四叶)的SPAD值,每张叶片测定3次取平均值。

1.2.4 单、间作棉花光合特性测定 于棉花苗期、蕾期、花铃期、叶絮期,选定晴朗的天气进行测定。在每个处理中选取长势良好的5株棉花,利用LI-6400光合仪,测定每株棉花功能叶(倒四叶)的光合参数,包括净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和蒸腾速率(Tr)。测定一般在上午11点进行,每张叶片测定三次取平均值。

1.2.5 单、间作棉花及枣树的产量测定 在棉花吐絮期分别于每个处理测产小区调查收获株数和单株结铃数,然后选取具有代表性的棉株20株,测定铃重和衣分,最后计算皮棉产量。同时在间作的两种不同种植模式中采摘鲜枣称重,计算鲜枣产量,并通过调查市场价格来评估经济收入。

1.2.6 数据分析 棉花叶面积指数、产量为包括枣树在内的占地面积的单位总面积的值,枣树产量亦是包括棉花在内的占地面积的单位总面积的值。采用MS Excel 2010进行数据整理分析,使用SPSS 22.0进行方差分析,其中多重比较分析用LSD法,不同小写字母表示差异达到5%的显著水平,利用SigmaPlot 10.0作图。

2 结果与分析

2.1 间作与单作棉花产量及产量构成分析

在枣棉间作系统中,枣树的存在会影响棉花冠层结构布局,引起光合特性的变化,进而影响棉花的产量形成。由表1可知,间作与单作棉花的产量构成因素收获株数、成铃数、单铃重均呈显著性差异,而单株结铃数、衣分无显著性差异。单作棉花的皮棉产量为2248.3 kg·hm⁻²,4行枣棉间作棉花的皮棉产量为1312.7 kg·hm⁻²,2行枣棉间作棉花的皮棉产量为1174.9 kg·hm⁻²,间作比单作分别降低41.61%和47.74%,4行枣棉间作比2行间作高11.73%,差异显著。间作棉花的收获株数比单作分别降低28.26%和49.41%,2行枣棉间作棉花的收获株数比4行枣棉间作降低了29.48%。2行枣棉间作中棉花单铃重最大,其次为单作和4行枣棉间作,可能是因为间作2行棉花密度较小,有利于发挥棉花个体优势,因此单铃重较高,但由于无法发挥棉花群体优势、收获株数较少,因而最终产量较低。试验结果表明,棉花在产量形成过程中必须保持一定的收获株数和较高的成铃数、铃重、衣分才能进一步提高产量,同时表明在北疆地区实行适合的高密度间作栽培种植是极具发展潜力的。

2.2 间作与单作棉花影响产量形成因素分析

2.2.1 间作与单作棉花株高的动态变化 株高可间接地反映棉花的生长状况。棉花具有无限生长习性,而且营养生长和生殖生长并进期长。株高过高表明棉花营养生长旺盛,会造成棉花冠层荫蔽,不利于光合作用的进行与产量的形成;株高过低则棉花无法发挥个体优势,也不利于产量增加。由图2可知,随着整个生育期的推进,在不同处理中棉花株高表现为先快速增长、后缓慢增长,最后趋于稳定。棉花生育初期主要为营养生长,株高快速增长,花期以后,营养生长与生殖生长并进,生殖生长逐渐增强,株高增长缓慢,生育后期以生殖生长为主,株高趋于稳定。

表1 间作与单作棉花产量及产量构成因素的比较

Table 1 The comparison of yield and components of intercropping and solecropping cotton

处理 Treatment	收获株数 Harvested number of plant per hectare /(10 ⁴ plant · hm ⁻²)	单株结铃数 Boll number per plant/个	成铃数 Number of bolls per hectare /(10 ⁴ 个 · hm ⁻²)	单铃重 Boll weight/g	衣分 Lint percentage /%	皮棉产量 Lint yield /(kg · hm ⁻²)
单作 Sole	15.18a	6.13a	93.05a	5.96ab	40.54a	2248.3a
间作 Intercropping(4)	10.89b	5.75a	62.62b	5.29b	39.63a	1312.7b
间作 Intercropping(2)	7.68c	5.98a	45.93c	6.37a	40.16a	1174.9c

注:不同小写字母表示差异水平显著。Note: Different lowercase letters indicate significant difference levels ($P<0.05$).

间作与单作相比,棉花苗期株高差异不明显,盛花期之后差异显著,可能是由于棉花处于苗期时枣树处于萌芽期和展叶期,枣树个体较小,对间作棉花基本没有形成遮荫,而在棉花盛花期之后由于枣树与棉花共生期较长,枣树个体逐渐增大,进入开花期与坐果期,一年生枣树株高为 $1.23 \pm 0.16\text{m}$,对间作棉花产生遮荫影响。在棉花整个生育期,Int-4 间作模式下的棉花平均株高比单作显著下降 5.85%,Int-2 间作模式下的棉花平均株高比单作显著下降 3.10%。而在间作 4 行棉花与间作 2 行棉花两种间作模式中,间作棉花整个生育期内株高差异不显著,Int-4 间作模式中的棉花平均株高比 Int-2 下降 2.85%。

2.2.2 间作与单作棉花叶面积指数动态变化 叶面积指数反映了作物群体冠层结构。叶面积过小则不利于叶片截获光能,叶面积过大,则会影响作物冠层结构的合理布局。由图 3 可知,间作与单作棉花叶面积指数随着生育期的推进,均呈“单峰型”曲线变化。棉花苗期以营养生长为主,叶面积增长迅速,此时枣树处于萌芽展叶期,二者之间影响较小;棉花花期之后进入生殖生长,叶面积增长缓慢,此时枣树开花结果,果实逐渐膨大,对间作棉花产生一定影响;棉花吐絮期之后叶面积逐渐下降,此时枣树果实逐渐成熟,枣树个体达到最大,对其间种植的棉花产生遮荫影响。

间作与单作相比,在整个生育期内存在显著性差异,单作峰值为 4.95,间作 4 行棉花峰值为 3.68,间作 2 行棉花峰值为 3.17。单作棉花的叶面积指数远高于间作棉花,可能是由于随着枣树个体逐渐长大对间作棉花造成遮荫,进而影响间作棉花的叶面积指数。Int-4 间作模式下棉花的平均叶面积指数比单作棉花显著下降 10.40%,Int-2 间作模式下的棉花叶面积指数比单作显著下降 5.39%。而在间作

4 行棉花与间作 2 行棉花两种间作模式中,间作棉花的叶面积指数也存在显著性差异,可能是由于 2 行棉花配置中种植棉花密度较小,造成棉花叶面积指数较小,Int-4 间作模式下的棉花平均叶面积指数比 Int-2 模式显著下降 5.29%。

2.2.3 间作与单作棉花倒四叶 SPAD 值的动态变化 叶片的叶绿素含量与叶片的光合性能密切相关,已有研究表明在一定范围内随着叶绿素含量的增加,叶片的净光合速率增加。而 SPAD 值可间接的反映作物叶绿素含量。由图 4 可知,随着棉花整个生育进程的推移,单作与间作棉花倒四叶的 SPAD 值逐渐增大,吐絮期达到最大,在吐絮期之后开始有所下降,但下降幅度不大,而在棉花花铃期,倒四叶 SPAD 值维持在 60~70 之间,这有利于棉花光合作用的进行。

间作与单作相比,间作 4 行棉花配置与 2 行棉花配置相比,倒四叶 SPAD 值均无明显差异,表明虽然间作条件下一年生枣树对棉花有一定遮荫影响,但对叶片 SPAD 值影响不大。可能是由于在单作与间作系统中,大田管理一致,包括灌水与施肥等管理措施均保持一致,而叶片叶绿素含量与水肥条件等也有很大的关系,因此间作与单作相比,倒四叶叶片 SPAD 值差异不显著。Int-4 间作模式下棉花的平均 SPAD 值比单作下降 4.45%,Int-2 间作模式下棉花的平均 SPAD 值比单作下降 2.23%,不同的间作模式相比,Int-4 的平均 SPAD 值比 Int-2 下降 2.28%。

2.2.4 间作与单作地上部单株干物质积累 干物质积累是作物产量形成的基础。由图 5 可知,随着生育期的推进,间作棉花与单作棉花的干物质积累表现为“S”型曲线,即棉花蕾期增长缓慢,从花期到铃期快速增长,盛铃期过后棉花开始吐絮,干物质积累下降,这可能与叶面积指数的变化规律有着很大的关系。

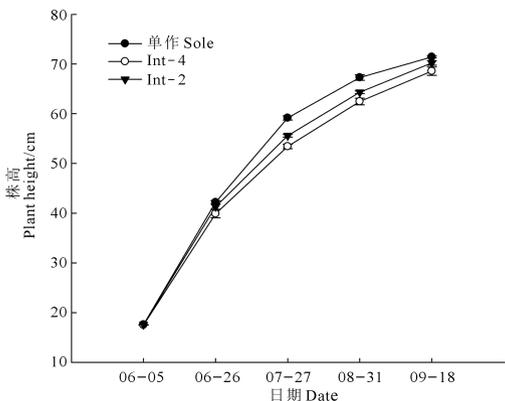


图 2 间作与单作棉花株高动态变化

Fig.2 The dynamic changes of plant height for cotton in intercropping and sole cropping system

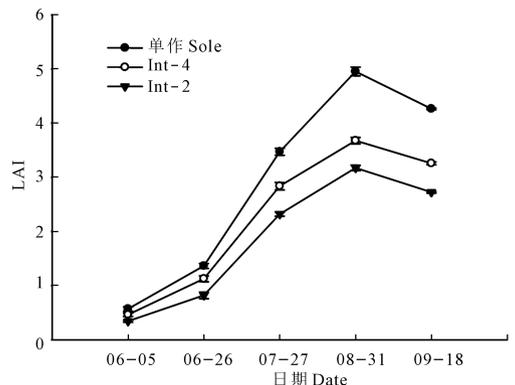


图 3 间作与单作棉花叶面积指数动态变化

Fig.3 The dynamic changes of LAI for cotton in intercropping and sole cropping system

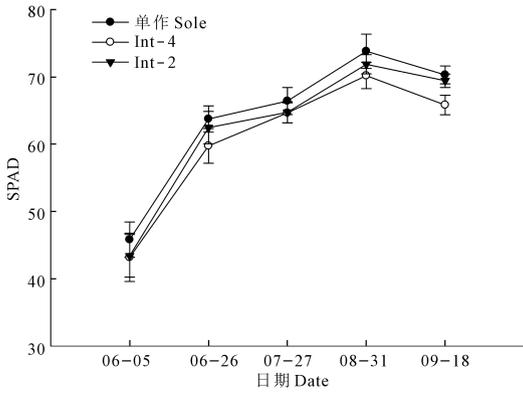


图 4 间作与单作棉花倒四叶 SPAD 值的动态变化
Fig.4 The dynamic changes of SPAD value of fourth leaf from top for cotton in intercropping and sole cropping systems

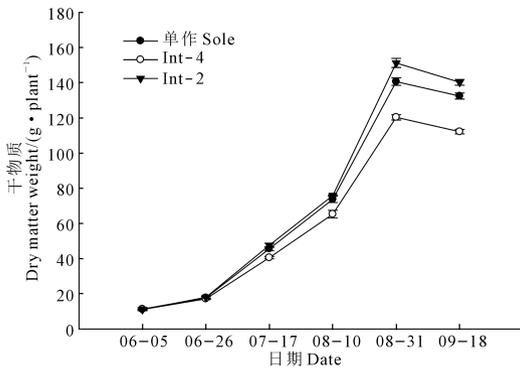


图 5 间作与单作棉花地上部干物质积累的动态变化
Fig.5 The dynamic changes of above-ground dry matter accumulation for cotton in intercropping and sole cropping systems

表 2 间作与单作棉花地上部干物质积累动态特征值

Table 2 The dynamic characteristic value of above-ground dry matter accumulation for cotton in intercropping and sole cropping systems

处理 Treatment	$Y_m/(g \cdot plant^{-1})$	t_1/d	t_2/d	t_m/d	$V_m/(g \cdot plant^{-1} \cdot d^{-1})$	T/d
单作 Sole	157.02	67	118	92	2.00	51
间作 Intercropping (4)	123.40	64	112	87	1.51	48
间作 Intercropping (2)	166.76	68	119	94	1.67	51

注: Y_m 为最大累积量; t_1 为快速累积期起始时期; t_2 为快速累积期终止时期; t_m 为最大累积速率出现时期; V_m 为最大累积速率; T 为快速累积持续期。

Note: Y_m —The maximal biomass; t_1 —The starting date of fleet accumulation period; t_2 —The terminating date of fleet accumulation period; t_m —Time reached maximal rate of accumulation; V_m —The maximal speed of accumulation; T —The duration of fleet accumulation.

2.2.5 间作与单作棉花倒四叶净光合速率 (P_n) 的变化 光合作用是作物干物质和产量形成的基础。而净光合速率是指光合作用速率减去呼吸作用速率,是评价植物光合作用强弱的一项重要指标。由图 6 可知,在单作与枣棉间作系统中,棉花倒四叶净光合速率表现为单峰型曲线,从棉花苗期到花铃期呈上升趋势,在花铃期达到最高,之后下降,单作峰值为 $31.77 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$,4 行棉花间作峰值为 $26.63 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$,2 行棉花间作峰值为 $27.22 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$,一定程度上净光合速率较高有利

间作棉花与单作棉花相比,在棉花处于苗期、蕾期时,由于一年生枣树处于开花期,对树间棉花的影响不明显,因此棉花干物质的积累差异不显著,而随着棉花生育期的后移,枣树开始坐果,果实逐渐膨大,需要吸取更多的水分养分,因此对树间棉花产生较大影响,间作棉花与单作棉花干物质积累存在显著性差异。Int-4 间作模式下单株棉花干物质积累量比单作棉花显著下降 13.00%,Int-2 间作模式下单株棉花干物质积累量比单作显著下降 6.60%。2 行棉花间作模式明显高于单作和 4 行棉花间作模式,这可能是由于 2 行棉花间作密度小,有利于棉花发挥个体优势,养分和水分吸收能力较强,因而干物质积累量较大。Int-4 间作模式的单株干物质积累比 Int-2 显著下降 6.85%。经方程模拟,由表 2 可知,2 行棉花间作的最大累积量为 $166.76 g/株$,最大累积日期较晚,出现在出苗后第 94 天,快速累积持续期为 51d。而 4 行棉花间作模式与单作相比,棉花生育后期干物质质量显著低于单作,最大累积速率在出苗后 87d,而单作最大累积速率出现在出苗后第 92d,快速累积持续期比单作少 3d,日最大累积量比单作少 $0.49 g/(d \cdot 株)$,最大累积日期提前,说明 4 行棉花间作模式中积累的干物质较少,进而影响到产量的增加。

于棉铃的发育与铃重的增加。

间作与单作相比,在棉花苗期,叶片净光合速率基本没有差异,这可能是因为此时枣树处于萌芽展叶期,个体较小并未对间作棉花造成遮荫,因此对间作棉花叶片净光合速率没有影响;而在棉花花铃期时,枣树个体逐渐增大处于果实膨大期,对间作棉花造成较大程度的遮荫,因而降低了叶片净光合速率,与单作相比存在显著性差异,大约减少了 14.32%~22.13%。在棉花整个生育期内,Int-4 间作棉花的净光合速率比单作下降 15.51%,Int-2 间

作棉花的净光合速率比单作下降 11.80%，间作棉花净光合速率峰值低，持续时间较短，不利于光合产物的积累，对后期产量及品质影响较大。而间作 4 行棉花配置与间作 2 行棉花配置之间差异不显著，Int-4 间作棉花的净光合速率比 Int-2 下降 4.21%。

2.2.6 间作与单作棉花倒四叶气孔导度 (G_s) 的变化 叶片气孔导度表示的是气孔张开的程度，对作物蒸腾作用有着直接的影响，反映了作物蒸腾速率的强弱。同时还决定着 CO_2 的供应，直接影响着作物的光合作用。由图 7 可知，在单作与枣棉间作系统中，棉花倒四叶气孔导度表现为单峰型曲线。从苗期到花铃期逐渐上升，在花铃期达到最大值，之后下降。单作峰值为 $0.91 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，4 行棉花间作峰值为 $0.62 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，2 行棉花间作峰值为 $0.62 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，表明 CO_2 的供应充足，有利于作物光合作用的进行。棉花吐絮期之后气孔导度急剧下降，可能是因为温度升高导致叶片气孔关闭，减小了叶片的气孔导度。

间作与单作相比，在棉花苗期时，叶片气孔导度无明显差异，可能是由于棉花苗期枣树处于萌芽期，个体较小对间作棉花没有影响；在棉花花铃期，单作叶片气孔导度显著高于间作棉花叶片，间作叶片气孔导度大约减少 31.87%~46.03%，可能是由于棉花花铃期时枣树处于果实膨大期，枣树个体较大，对间作棉花形成遮荫，因此间作棉花叶片气孔导度较小。在棉花整个生育期内，Int-4 间作棉花的气孔导度比单作下降 13.26%，Int-2 间作棉花的气孔导度比单作下降 9.25%。而间作 4 行棉花配置与间作 2 行棉花配置之间差异不显著，Int-4 间作棉花的气孔导度比 Int-2 下降 4.42%。

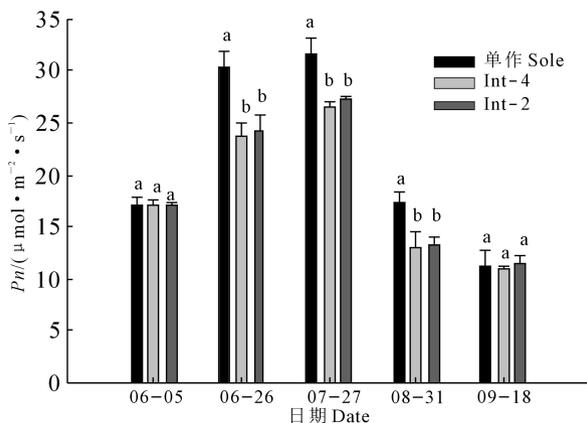


图 6 间作与单作棉花倒四叶 P_n 的动态变化

Fig.6 The dynamic changes of P_n of fourth leaf from top for cotton in intercropping and sole cropping systems

2.2.7 间作与单作棉花倒四叶胞间 CO_2 浓度 (C_i) 的变化 胞间 CO_2 浓度是光合生理生态中的一个重要参数，其作为光合作用的反应物之一，可以提高光合作用速率。由图 8 可知，在单作与枣棉间作系统中，棉花整个生育期内叶片胞间 CO_2 浓度呈现为一个“V”字形，表现为棉花苗期到花铃期胞间 CO_2 浓度下降，在棉花花铃期达到最低值，之后逐渐升高。单作最低值为 $133.82 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ，4 行棉花间作最低值为 $152.34 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ，2 行棉花间作最低值为 $160.17 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ，表明叶片光合速率的增加或减少会导致胞间 CO_2 浓度减少或增加，即胞间 CO_2 浓度与净光合速率呈现反向关系。

间作与单作相比，在棉花苗期，枣树处于萌芽展叶期，对间作棉花影响不显著，因此单、间作棉花胞间 CO_2 浓度无明显差异，而在棉花生育后期差异显著，随着枣树生育时期的推移，枣树个体逐渐增长，对间作棉花遮荫程度增大，因此间作棉花胞间 CO_2 浓度逐渐增加，表明间作棉花净光合速率降低并不是由气孔因素引起，可能与光系统 II 光化学效率降低有关。在盛花期，间作棉花的胞间 CO_2 浓度相比于单作增加 16.77%，在棉花整个生育期，Int-4 和 Int-2 间作模式棉花的胞间 CO_2 浓度分别比单作增加了 4.18% 和 0.84%。间作棉花在盛花期时 4 行间作配置与 2 行间作配置存在显著性差异，Int-4 间作模式下的棉花胞间 CO_2 浓度比 Int-2 间作模式增加了 3.32%。

2.2.8 间作与单作棉花倒四叶蒸腾速率 (T_r) 的变化 蒸腾速率是计算蒸腾作用强弱的一项重要生理指标，是指植物在一定时间内单位叶面积蒸腾的水量。由图 9 可知，在单作与枣棉间作系统中，棉花倒四叶蒸腾速率呈单峰型曲线变化，从棉花苗期

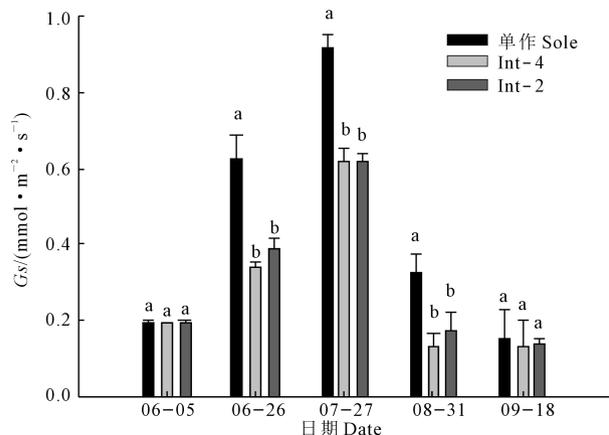


图 7 间作与单作棉花倒四叶 G_s 的动态变化

Fig.7 The dynamic changes of G_s of fourth leaf from top for cotton in intercropping and sole cropping systems

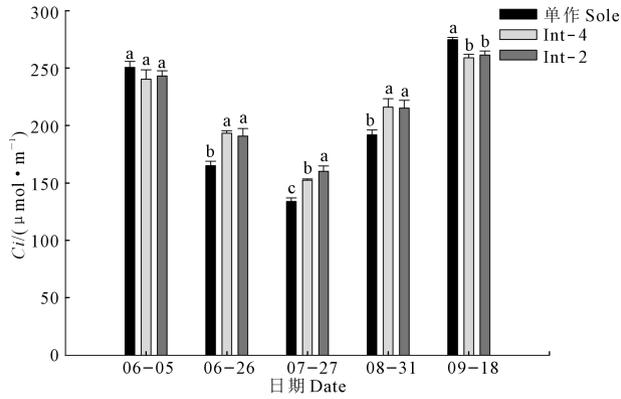
图8 间作与单作棉花倒四叶 C_i 的动态变化

Fig.8 The dynamic changes of C_i of fourth leaf from top for cotton in intercropping and sole cropping systems

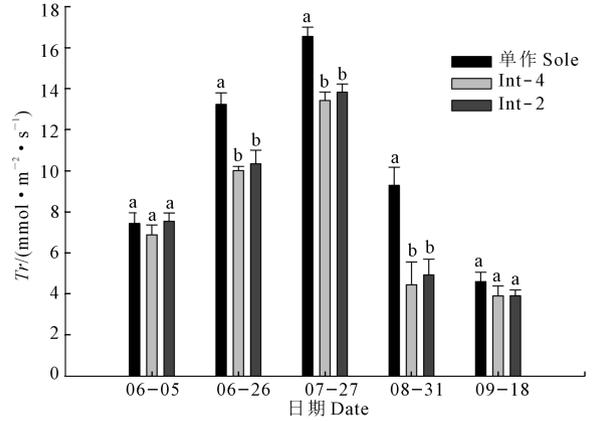
图9 间作与单作棉花倒四叶 Tr 的动态变化

Fig.9 The dynamic changes of Tr of fourth leaf from top for cotton in intercropping and sole cropping systems

到花铃期,蒸腾速率逐渐增强,在花铃期达到最大值,之后随着生育时期的推移而下降,这与净光合速率的变化趋势相一致。在棉花花铃期叶片蒸腾速率相对较高,在盛花期时达到最大值,单作峰值为 $16.55 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,4行棉花间作峰值为 $13.43 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,2行棉花间作峰值为 $13.83 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,吐絮期后棉花以生殖生长为主,叶片蒸腾速率开始下降。

间作与单作相比,在棉花苗期无明显差异,棉花生育后期差异显著,主要是由于棉花花铃期时枣树处于果实膨大期,个体较大,对间作棉花造成遮荫,间作棉花蒸腾速率显著降低。与单作相比,在盛花期间作棉花叶片蒸腾速率下降了17.54%。在整个生育期,Int-4和Int-2间作模式中的棉花蒸腾速率分别比单作平均下降了9.18%和6.09%,而4

行枣棉间作配置与2行枣棉间作配置的棉花叶片蒸腾速率差异不显著,Int-4间作棉花的蒸腾速率比Int-2下降3.29%。

2.3 间作与单作棉花经济效益及最优配置分析

由表3可知,4行枣棉间作条件下其总收入为7.96万元· hm^{-2} ,2行枣棉间作条件下总收入为7.55万元· hm^{-2} ,而单作总收入仅为6.29万元· hm^{-2} ,间作比单作分别高26.55%和20.03%。表明间作可有效地提高农民经济收益,同时由于冬枣品质高、营养丰富、口感极佳,深得广大消费者喜爱,有稳定的市场销售渠道,且可避免繁杂的加工程序,节省人力、物力,因此发展枣棉间作是农林间作系统中较好的选择之一,相比而言4行枣棉间作为最佳种植模式,既可以保证棉花高产又可以实现最大经济收益。

表3 间作与单作棉花经济效益的比较

Table 3 The comparison of economic benefits of intercropping and solecropping cotton

处理 Treatment	皮棉产量 Lint yield /($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	鲜枣产量 Fresh jujube /($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	皮棉价格 Lint price /(元· kg^{-1})	鲜枣价格 Fresh jujube price /(元· kg^{-1})	总收入 Total income /(10^4 元· hm^{-2})
单作 Sole	2248.3	—	28	—	6.29
间作 Intercropping (4)	1312.7	1429.5	28	30	7.96
间作 Intercropping (2)	1174.9	1420.5	28	30	7.55

3 结论与讨论

枣棉间作可有效提高土地生产率,而间作系统中枣树与棉花在水分、养分、光热条件等资源存在着竞争关系,尤其是光照的影响最为突出,主要表现为遮荫影响。由于枣树与棉花共进生育时期长,约150d左右,枣树从开花期至果实成熟期对棉花的遮荫影响尤为显著。有研究表明农林间作种植模式下,林下农作物由于受到林木的遮荫,会导致作物叶绿素含量减少^[14-15],对其光合特性产生一定影

响,光合速率降低,引起了农作物的叶面积指数、干物质质量及产量形成的变化^[5,16]。本研究发现在棉花苗期时枣树处于萌芽期,且树龄为一年,枣树个体较矮,对林下间作棉花基本没有影响,与单作相比,株高、叶面积指数、干物质质量及光合特性均没有明显变化。棉花生育后期,尤其是在棉花花铃期,随着枣树个体的增长对林下间作棉花的遮荫加重,与单作相比,间作棉花的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、蒸腾速率(Tr)显著低于单作棉花,同时在棉花花铃期间作棉花的株

高、叶面积指数(LAI)、干物质质量及产量显著低于单作。分析得出一年生枣树的遮荫会改变棉花冠层内光分布,进而影响棉花的光合作用及形态表现,以及棉花的产量与产量形成。

枣棉间作系统中,不同的种植模式对间作棉花的形态指标也会产生一定的影响^[17-19]。有研究表明,随着密度的增加,棉花 LAI 和产量增加^[20]。本研究发现 2 行棉花间作模式与 4 行棉花间作模式相比,2 行棉花间作模式中的间作棉花株高、干物质等农艺性状显著高于 4 行棉花间作模式,这说明棉花与枣树行间距越小,受到枣树的影响则越大;2 行棉花间作模式中的 LAI 显著低于 4 行棉花间作模式,段云佳等^[21]也得出类似结论,认为枣棉间作系统中棉花中、高密度群体优势明显,LAI 明显高于低密度种植。然而,两种间作模式中,间作棉花的光合特性差异并不显著,这是因为两种间作模式配置中棉花都受到了枣树的遮荫影响,但由于一年生枣树的株高不是很高,对林下不同配置的棉花遮荫情况没有明显的差异,因而对林下间作不同行距的棉花的光合特性影响也基本没有差异;此外与 4 行棉花间作模式相比,2 行棉花间作模式中棉花单铃重较高,但由于收获株数较少,则产量较低,表明 2 行间作模式中间作棉花发挥了个体优势,但没有很好地协调群体与个体间的关系,造成最终的产量较低。因此分析认为 4 行枣棉间作模式中棉花种植密度较为合理,能较好地协调群体与个体之间的关系,进而增加了产量。

在枣棉间作系统中,尽管枣树影响了间作棉花的光合特性及产量形成,但枣树的种植不仅提高了土地利用率,同时由于冬枣品质较好,市场价格较高,可大大提高农民的经济收入,相比单作棉花而言,平均收入将提高 23.29%。因此,合理的枣棉间作布局不仅可改善间作棉花光合效率,有利于间作棉花获得更高的产量,同时可大大提高经济效益^[22]。另外,由于枣棉间作可有效地改善生态气候^[23],因此,在北疆地区大力推广发展农林复合种植具有深远的意义。

参考文献:

[1] Kessler J J, Breman H. The potential of agroforestry to increase primary production in the Sahelian and Sudanian zones of West Africa [J]. *Agroforestry Systems*, 1991, 13: 41 - 62.

[2] Zhang W, Ahanbieke P, Wang B J, et al. Root distribution and interactions in jujube tree/wheat agroforestry system[J]. *Agroforestry Systems*, 2013, 87(4): 929 - 939.

[3] Wang B J, Zhang W, Ahanbieke P, et al. Interspecific interactions alter root length density, root diameter and specific root length in jujube/wheat agroforestry systems[J]. *Agroforestry Systems*, 2014, 88

(5): 835 - 850.

[4] 张玉东,刘春惊,陈瑞萍,等. 南疆杏麦复合类型间作小麦产量及其构成因素的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(4): 179 - 182.

[5] Li F D, Meng P, Fu D, et al. Light distribution, photo-synthetic rate and yield in a paulownia-wheat intercropping system in China [J]. *Agroforestry Systems*, 2008, 74(2): 163 - 172.

[6] Heatherm J, Brian C M, Kimj B. Determining the shade tolerance of American chestnut using morphological and physiological leaf parameters[J]. *Forest Ecology and Management*, 2009, 257(1): 280 - 286.

[7] Wells R, Merdith W R, Williford J R. Canopy photosynthesis and its relationship to plant productivity in near-isogenic cotton lines differing in leaf morphology[J]. *Plant Physiology*, 1986, 82(3): 635 - 640.

[8] Peng X B, Zhang Y Y, Cai J, et al. Photosynthesis, growth and yield of soybean and maize in a tree-based agroforestry intercropping system on the Loess Plateau[J]. *Agroforestry Systems*, 2009, 76: 569 - 577.

[9] Varella A C, Moot D J, Pollock K M, et al. Do light and alfalfa responses to cloth and slatted shade represent those measured under an agroforestry systems[J]. *Agroforestry Systems*, 2011, 81: 157 - 173.

[10] 杨波,龚鹏,车玉红,等. 扁桃棉花间作对棉花产量的影响[J]. *中国农学通报*, 2009, 17: 93 - 97.

[11] Feldhake C M, Belesky D P. Photosynthetically active radiation use efficiency of *Dactylis glomerata* and *Schendonorus phoenix* along a hardwood tree-induced light gradient[J]. *Agroforestry Systems*, 2009, 75: 189 - 196.

[12] 张东升,韩硕,王旗,等. 枣棉间作条件下棉花密度对棉花光合特性及产量影响[J]. *棉花学报*, 2014, 26(4): 334 - 341.

[13] Zhang L, Van der Werf W, Bastiaans L, et al. Light interception and utilization in relay intercrops of wheat and cotton[J]. *Field Crops Research*, 2008, 107(1): 29 - 42.

[14] 牟会荣,姜东,戴廷波,等. 遮荫对小麦旗叶光合及叶绿素荧光特性的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(2): 599 - 606.

[15] 王建华,任士福,史宝胜,等. 遮荫对连翘光合特性和叶绿素荧光参数的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(7): 1811 - 1817.

[16] Wang Q, Han S, Zhang L Z, et al. Density responses and spatial distribution of cotton yield and yield components in jujube/cotton agroforestry[J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 79: 58 - 65.

[17] 郭仁松,林涛,崔建平,等. 配置模式对枣棉间作棉花光合及干物质积累特征的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2013, 31(6): 34 - 38+43.

[18] 徐文修,刘郁娜,胥新强,等. 杏棉间作系统田间配置对生态因子及棉花光合生理参数的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2013, 21(1): 46 - 51.

[19] 刘郁娜,陈飞虎,胥新强,等. 杏棉间作田间配置对棉花生长发育及棉铃时空分布的影响[J]. *棉花学报*, 2013, 25(1): 37 - 44.

[20] Mao L L, Zhang L Z, Zhao X H, et al. Crop growth, light utilization and yield of relay intercropped cotton as affected by plant density and a plant growth regulator[J]. *Field Crops Research*, 2014, 155(1): 67 - 76.

[21] 段云佳,敬碧,张巨松,等. 枣棉间作下不同种植密度对棉花生理特性及产量的影响[J]. *新疆农业科学*, 2011, 48(8): 1373 - 1378.

[22] Haggard J, Rheingans R, Arroyo P, et al. Benefits and costs of intercropping reforestation in the Atlantic lowlands of Costa Rica[J]. *New Forests*, 2003, 25: 41 - 48.

[23] Bainard L D, Koch A M, Gordon A M, et al. Growth response of crops to soil microbial communities from conventional monocropping and tree-based intercropping systems[J]. *Plant Soil*, 2013, 363(1 - 2): 345 - 356.