doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.016

# 滴灌对间作枣棉光合特性与水分利用的影响

李发永[1]　劳东青[2,3]　孙三民[1,3]　姚宝林[1,3]　孙留东[1,3]

(1. 塔里木大学水利与建筑工程学院, 阿拉尔 843300; 2. 塔里木大学信息工程学院, 阿拉尔 843300;
3. 塔里木大学现代农业工程自治区高校重点实验室, 阿拉尔 843300)

**摘要**: 在南疆沙漠绿洲区对滴灌间作枣棉不同种植和灌水模式下的光合特性进行了研究,并分析了间作枣棉节水条件下的水分利用状况。试验设置 9 个处理,分别为枣棉间距 80 cm(J-1)、100 cm(J-2)、120 cm(J-3)、对照单作枣树(CK-Z)、单作棉花(CK-M)和灌水定额 45 mm(G-1)、60 mm(G-2)、75 mm(G-3)、90 mm(G-4)。研究表明,新梢生长期枣树需水量较棉花大,其光合速率和蒸腾速率在滴灌定额较低时(45 mm,G-1 处理)显著低于 G-2、G-3、G-4、CK-Z 4 个处理,而此阶段(棉花蕾期)水分对棉花光合速率和蒸腾速率的影响较小,但过高的灌水量(90 mm)也会使棉花光合速率降低;气孔导度变化与蒸腾速率变化相似,枣树新稍生长期 G-2 处理显著高于其他处理,低灌水处理 G-1 分别比 G-2、G-3、G-4 处理降低了 70.85%、64.37%、39.66%。花期后枣树需水量较大,气孔导度以 G-4 处理最高。棉花蕾期以 G-2 处理最高,花期后,低灌水定额时(G-1、G-2)气孔导度也较低,铃后期各处理气孔导度显著降低,与花铃期相比分别降低了 14.34%、31.83%、54.23%、43.03%、47.71%。枣棉间距对枣树和棉花光合速率 $P_n$、气孔导度 $G_s$、胞间 $CO_2$ 浓度 $C_i$ 的影响主要在盛花期后,而对蒸腾速率的影响则贯穿整个生育期;不同种植间距下棉花的水分利用效率($WUE_{yield}$)由大到小表现为 CK-M、J-3、J-2、J-1,不同灌水定额下棉花的 $WUE_{yield}$ 由大到小表现为 CK-M、G-2、G-3、G-2、G-4;不同种植间距下枣树的 $WUE_{yield}$ 由大到小表现为 J-3、CK-Z、J-2、J-1,不同灌水定额下枣树的 $WUE_{yield}$ 由大到小表现为 G-1、G-3、CK-Z、G-2、G-4。采用光合分配计算各生育阶段的水分利用效率($WUE_{Pn}$)与基于产量的水分利用效率($WUE_{yield}$)并不一致;棉花蕾期水分利用效率 $WUE_{Pn}$ 与全生育期水分利用效率 $WUE_{yield}$ 显著相关,其他 2 个生育期与之无显著相关关系。

**关键词**: 枣树; 棉花; 间作; 滴灌; 光合; 水分利用效率

**中图分类号**: S275.6; S344.2; S274.1　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2016)12-0119-11

# Effects of Drip Irrigation on Photosynthetic Characteristics and Water Use Efficiency of Jujube - Cotton Intercropping System

Li Fayong[1]　Lao Dongqing[2,3]　Sun Sanmin[1,3]　Yao Baolin[1,3]　Sun Liudong[1,3]

(1. *College of Water Resources and Architectural Engineering*, *Tarim University*, *Aral* 843300, *China*
2. *College of Information Engineering*, *Tarim University*, *Aral* 843300, *China*
3. *Key Laboratory of Autonomous Region for Modern Agricultural Engineering*, *Tarim University*, *Aral* 843300, *China*)

**Abstract**: The photosynthetic characteristics of jujube - cotton intercropping system under different cropping patterns and drip irrigation modes were studied in the southern desert oasis region of Xinjiang. The objective was to analyze the water use of cotton in intercropping system under water-saving conditions. Totally nine treatments were carried out, which were jujube - cotton spacing of 80 cm (J-1), 100 cm (J-2) and 120 cm (J-3), the control monoculture of jujube (CK-Z), control monoculture of cotton (CK-M) and different irrigation quotas of G-1 (45 mm), G-2 (60 mm), G-3 (75 mm) and G-4 (90 mm). Results showed that water demand of jujube at shoots growing stage was relatively larger than cotton, photosynthesis and transpiration rate with lower drip irrigation quota (45 mm) were significantly lower than those of other four treatments, but at this stage (cotton was at bud stage), the

收稿日期: 2016-04-13　修回日期: 2016-06-24

**基金项目**: 国家自然科学基金项目(51169024、51569030)

**作者简介**: 李发永(1982—),男,副教授,主要从事极端干旱区农业水土环境研究,E-mail: lisen8279@163.com

moisture had less effect on photosynthesis and transpiration rate of cotton. In addition, excessive irrigation (90 mm) also could reduce cotton photosynthetic. Changes of stomatal conductance were similar with transpiration rate, these parameters of jujube for G-2 treatment at shoot growth stage were significantly higher than those of other treatments, but G-1 was lower than G-2, G-3 and G-4 by 70.85%, 64.37% and 39.66%, respectively. The water demand of jujube after flowering stage was increased. Stomatal conductance of G-4 was the highest of all the treatments. The highest stomatal conductance of cotton was obtained in G-2 at bud stage, after flowering, the lower irrigation quota treatments (G-1 and G-2) also had lower stomatal conductance, when it came into the later stage of growth, stomatal conductance for each treatment was significantly decreased, compared with that at the flowering stage and boll-forming stage, it was decreased by 14.34%, 31.83%, 54.23%, 43.03% and 47.71%, respectively. Effects of spacing of jujube intercropping with cotton on cotton photosynthetic rate $P_n$, stomatal conductance $G_s$, intercellular $CO_2$concentration $C_i$ were mainly occurred after the period of flowering, but the effects of transpiration rate were throughout the whole growth period. Water use efficiency of cotton with different planting spacings was in decreasing order of CK-M, J-3, J-2 and J-1, and that for different irrigation quotas was in decreasing order of CK-M, G-2, G-3, G-2 and G-4. Water use efficiency of jujube with different planting spacings was in decreasing order of J-3, CK-Z, J-2 and J-1, and that for different irrigation quotas was in decreasing order of G-1, G-3, CK-M, G-2 and G-4. It was found that photosynthetic distribution based $WUE_{Pn}$ at different growth stages was not consistent with yield based $WUE_{yield}$. Cotton at bud stage had a high WUE even at low quota of irrigation, but after entering the flowering stage, WUE was closely related to irrigation quota. $WUE_{yield}$ of cotton for the whole growth period and $WUE_{Pn}$ of cotton at bud stage was significantly related, $WUE_{Pn}$ of other two growth stages had no significant correlation with $WUE_{yield}$.

**Key words**: jujube; cotton; intercropping; drip irrigation; photosynthetic; water use efficiency

## 引言

近年来,随着南疆种植结构的调整,红枣种植面积日益扩大。但是,由于南疆水资源极度匮乏,加上多数果园未实施有效的节水措施,当地农民仅追求产量和经济效益,大量的灌溉用水使本来就相对脆弱的生态系统日益恶化。随着滴灌技术的推广应用[1-2],越来越多的学者尝试将滴灌用于红枣灌溉,并取得了很好的节水效果[3]。但单一的种植模式不仅浪费了大量的土地资源,同时产生了巨大的无效蒸发,水土利用效率较低。枣棉间作作为一种复合生态系统,能够提高土地利用效率[4]。然而,复合系统本身具有复杂的竞争关系,此种竞争关系受种群间生理生态相互作用的影响,与单作相比其光合效率和水分利用效率均存在较大差异[5]。光合作用是植物干物质积累的基本方式,间作改变了系统间的光环境。焦念元等[6]研究了玉米花生间作系统,发现间作有利于玉米穗位叶对光能的吸收,叶片固碳羧化能力增强,光合速率提高,具有显著的产量间作优势。冯晓敏等[7]研究了豆科-燕麦间作系统,间作提高了燕麦的叶绿素含量和净光合速率,改变了叶绿素构成,使燕麦衰老延缓。国外学者也在这方面开展了大量的研究[8-9],NARESH 等[10]研究玉米-小麦间作系统发现,与单作玉米相比,间作能够增加光截获量、遮阴率,减少蒸发,同时具有更高的气孔导度和叶面温度。刘英超等[11]对玉米间作马铃薯的研究发现全生育期间作玉米水分利用率高于单作,间作体系水分捕获量高于单作,苗期和成熟期间作相对单作对水分利用更高效。但国内学者对作物水分利用效率方面的研究大多集中在单作方面[12-14],在间作方面研究较少,国外学者则已经进行了大量的研究[15-18],CHIMONYO 等[19]分别研究了高粱-豇豆和高粱-葫芦间作系统表明与单作高粱相比二者分别提高水分利用效率 54.65%和 46.98%。由于棉花种植密度远大于枣树,虽然其单株耗水量比枣树少,但其群体的耗水量不容忽视,在枣棉间作系统中其水分利用效率也应引起重视。虽然国内外学者在间作作物生理生态方面开展了一定的研究,但是对节水体系下农林复合体系生理生态的研究较少。本文对枣棉光合速率和水分利用效率进行研究,以揭示滴灌条件下枣棉的生理生态过程和水分利用状况,为南疆水土资源的合理利用提供理论基础

和建议。

## 1　试验设计

### 1.1　研究区概况

试验区位于新疆阿拉尔市塔里木大学现代农业工程重点实验室节水灌溉试验基地(40°20′47″～41°47′18″N、79°22′33″～81°53′45″E)，占地面积31 m×44.5 m，属大陆性干旱气候区，降水量稀少，蒸发量大，气候干燥。年降水量40.1～82.5 mm，年蒸发量1 976.6～2 558.9 mm。多年平均气温10.8℃，1月份平均气温－8℃，7月份平均气温25℃。年太阳总辐射量544.115～590.155 J/cm$^2$，年日照时数2 855～2 967 h，无霜期205～219 d，风沙浮尘天气较多，主要集中在春季和夏季。春季升温快而不稳，秋季降温快。初始土壤的理化性质(0～60 cm土层平均值)见表1。2014年降水量为66.5 mm。

**表1　测试土壤60 cm土层理化性质**

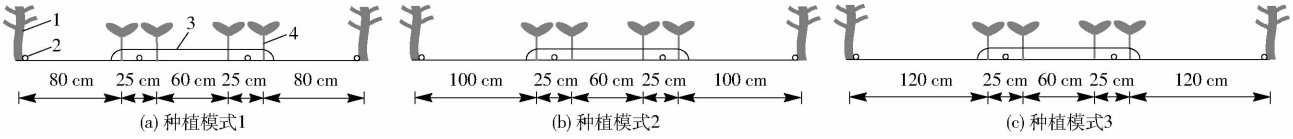
**Tab.1　Physico-chemical properties of tested soil in depth of 0～60 cm**

| 参数 | 土壤质地 | 含水率/% | 总盐质量比/(mg·kg$^{-1}$) | 碱解氮质量比/(mg·kg$^{-1}$) | 硝态氮质量比/(mg·kg$^{-1}$) | 速效磷质量比/(mg·kg$^{-1}$) | 速效钾质量比/(mg·kg$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 数值 | 砂壤土 | 10.25 | 0.84 | 36.56 | 24.19 | 35.17 | 0.59 |

### 1.2　试验设计

#### 1.2.1　间作枣棉种植模式

间作系统选用5年生、长势均匀的红枣(*Ziziphus zizyphus*)枣树，以酸枣(*Ziziphus jujuba* Mill.)为砧木嫁接而成，最大冠幅约为120 cm。棉花种子为新疆塔里木河种业股份有限公司生产的新中棉49号。具体种植模式如图1所示。图中只代表3种处理的种植模式，实际种植时处理间相互独立，有足够宽度(大于3 m)的隔离带，保证各处理间不产生相互影响。




(a) 种植模式1　(b) 种植模式2　(c) 种植模式3

图1　滴灌枣棉间作大田布置

Fig.1　Layouts of jujube－cotton intercropping system under drip irrigation

1. 枣树　2. 滴灌带　3. 地膜　4. 棉花植株

#### 1.2.2　小区布置与灌水施肥方式

田间设置9个试验小区，小区采用随机区组设计，每个小区3个重复。共2部分试验内容，其中处理J－1、J－2、J－3分别表示枣棉间距分别为80、100、120 cm。根据2012、2013年的灌水试验，得出最优灌水定额为75 mm，灌水最适宜次数为12次。其中，新稍期每10 d灌水1次，共2次；花期每7 d灌水一次，共6次；果实膨大期每7 d灌水1次，共4次，全生育期灌溉定额900 mm最优，2014年气象条件与2012、2013年差异不大。因此，本年度3个处理的灌水定额为75 mm，全生育期灌水12次，灌溉定额为900 mm。为了进一步研究水分胁迫下枣棉对水分竞争的影响及水分利用差异，另设置了G－1、G－2、G－3、G－4 4个灌水量试验小区，滴灌定额分别为45、60、75、90 mm，全生育期滴灌12次，滴灌时间间隔同上。以滴灌单作棉花CK－M和滴灌单作枣树CK－Z为对照，灌水定额为75 mm，全生育期灌水12次，灌溉定额900 mm。各处理施肥量一致，全生育期施肥3次，施肥周期以枣树生育期为主，花期1次，幼果期1次，果实膨大期1次，N、$P_2O_5$、$K_2O$质量比为2∶1∶1，肥料采用当地常用的水溶性滴灌肥，全生育期施肥量为2 250 kg/hm$^2$。

### 1.3　试验方法

#### 1.3.1　光合性能指标测定

在各小区内选取枣树冠外围中上部枝条上从顶端数第6～8片生长一致的向阳健康成熟叶片[20－21]和棉花倒4主茎叶[22]，分别于6月15日(枣树为新梢生长期，棉花为蕾期)、7月14日(枣树为盛花期，棉花为盛花期—铃期)、8月20日(枣树为果树膨大期，棉花为铃后期)上午12∶00利用自然光照，用LI－6400型光合仪对叶片进行活体测定，每个处理测定3个叶片，共9次重复，测定项目包括净光合速率($P_n$)、蒸腾速率($T_r$)、气孔导度($G_s$)、胞间$CO_2$浓度($C_i$)等光合指标。

#### 1.3.2　耗水量

采用水量平衡原理计算各生育期耗水量，其计算式为

$$E_T = R + I - F \pm Q + \Delta W_S \tag{1}$$

其中

$$\Delta W_S = S_{W1} - S_{W2} \tag{2}$$

$$S_W = 10\rho hw \tag{3}$$

式中　$E_T$——单作枣树或棉花耗水量

$R$——降水量，采用小型气象站观测资料

$I$——灌溉水量

$Q$——地下水上移或下渗量,mm,由于试验地地下水位埋深 3 m 以下,所以不存在地下水上移或下渗,取 $Q=0$

$F$——深层渗漏量,滴灌不考虑,取 $F=0$

$\Delta W_S$——土壤贮水量的变化量

$S_{W1}$——枣树或棉花根区初始土层平均贮水量,mm

$S_{W2}$——枣树或棉花某一生育期结束时土层平均贮水量,mm

$S_W$——土壤水分总贮存量,mm

$\rho$——土壤容重,g/cm$^3$

$h$——土层厚度,取 80 cm

$w$——土壤质量含水率,%

土壤含水率测定:全生育期每 7 d 取土一次,取土深度为 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm、60 ~ 80 cm,采用烘干法测定土壤含水率。

间作枣树和棉花耗水量计算:间作大田作物耗水量应是枣树和棉花耗水量之和,枣树和棉花生育特点及种植密度均不相同,如果通过简单的田间分割后,使用水量平衡原理计算出的数值并不能真实反映间作枣棉的耗水状况,考虑到间作与单作种植密度不同,因此对枣树或棉花进行密度折减[4],然后按折减比例计算间作枣树或棉花耗水量,即

$$E_{TS}=E_T P_a \tag{4}$$

其中

$$P_a=\frac{\rho_a}{\rho_A}$$

式中 $P_a$——密度折减系数

$\rho_a$、$\rho_A$——间作、单作系统中枣树或棉花的种植密度,株/hm$^2$

$E_{TS}$——间作枣树或棉花耗水量,mm

**1.3.3** 水分利用效率

基于产量的枣树和棉花全生育期水分利用效率计算式为

$$WUE_{\text{yield}}=\frac{Y_c}{E_{TS}} \tag{5}$$

式中 $Y_c$——枣树或棉花产量,各处理单独测产,kg/hm$^2$

基于光合分配的枣树和棉花水分利用效率计算式为

$$WUE_{Pn}=\frac{P_n}{T_r} \tag{6}$$

式中 $P_n$——各处理不同生育期枣树或棉花光合速率,μmol/(m$^2$·s)

$T_r$——各处理枣树或棉花不同生育期蒸腾速率,mmol/(m$^2$·s)

## 2 结果与分析

### 2.1 不同灌水处理对枣棉光合特性的影响

枣树和棉花各生育期水分利用不同,因此,水分可能导致枣棉生育期内光合速率出现差异[23]。图 2a 分析表明新梢生长期 G-1 处理光合速率显著低于 G-2、G-3、G-4、CK-Z 4 个处理($P<0.05$),而处理 G-2、G-3、CK-Z 差异不显著。因此,新梢生长期灌水量 45 mm 时枣树已产生水分胁迫,光合作用受到抑制,而灌水量过高的 G-4 处理光合速率与 G-2 处理相比显著减小,减小比例达 24.17%,但比 G-1 处理高 47.09%。因此可以认为水分胁迫对新梢生长期光合速率($P_n$)的影响最大,其次过量灌水也能使其显著降低,而灌水量 60 mm 和 75 mm 时枣树 $P_n$相对较高;盛花期时灌水量较低的处理与新梢生长期相似,其光合速率显著低于 G-2、G-3、G-4 处理,而其他 3 个灌水处理 $P_n$差异不显著($P>0.05$),该阶段枣树需水量较高。但是,单作对照处理 CK-Z(75 mm)比间作 G-3 处理(75 mm)降低达 11.77%,但未达显著水平($P>0.05$),原因可能是单作时该阶段枣树需水量已出现亏缺,但是间作时棉花的盈余水量及枣树发达的侧根系改善了这一状况。果实膨大期处理 G-1、G-2 已出现明显的水分亏缺,光合速率显著低于其他 3 个处理。而间作 G-3 处理比单作 CK-Z 处理显著降低达 19.55%。

与枣树相比,棉花蕾期(对应枣树为新梢生长期)光合速率受水分影响较小,图 2b 表明间作处理 G-1、G-2、G-3 差异不显著,但过高的灌水处理 G-4 显著低于其他 3 个处理,间作处理 G-3 比单作处理 CK-M 低 14.39%。因此,与枣树不同,棉花蕾期受株高限制光合速率与单作相比易受抑制,而需水量比枣树低,处理内灌水定额在 45 ~ 75 mm 范围未见光合速率受到抑制,但是过高的灌水量(90 mm)则使棉花光合速率降低;进入盛花期—铃期(对应枣树为盛花期)后,水分引起的光合速率差异较为显著,由大到小表现为:G-3、G-2、G-4、G-1,表明此时水分胁迫和过量灌水均易造成棉花光合速率降低;铃后期(对应枣树为果实膨大期)各处理棉花光合速率均有所降低,相对盛花期—铃期阶段,分别降低了 1.05%、35.02%、13.57%、27.25%、16.54%,表明铃后期光合速率逐渐降低,干物质累积趋于完成。但灌水适中的处理 G-3 显著高于其他处理。

图 2c 分析表明,枣树新梢生长期蒸腾速率与该阶段枣树的光合速率变化相似,水分胁迫能显著降

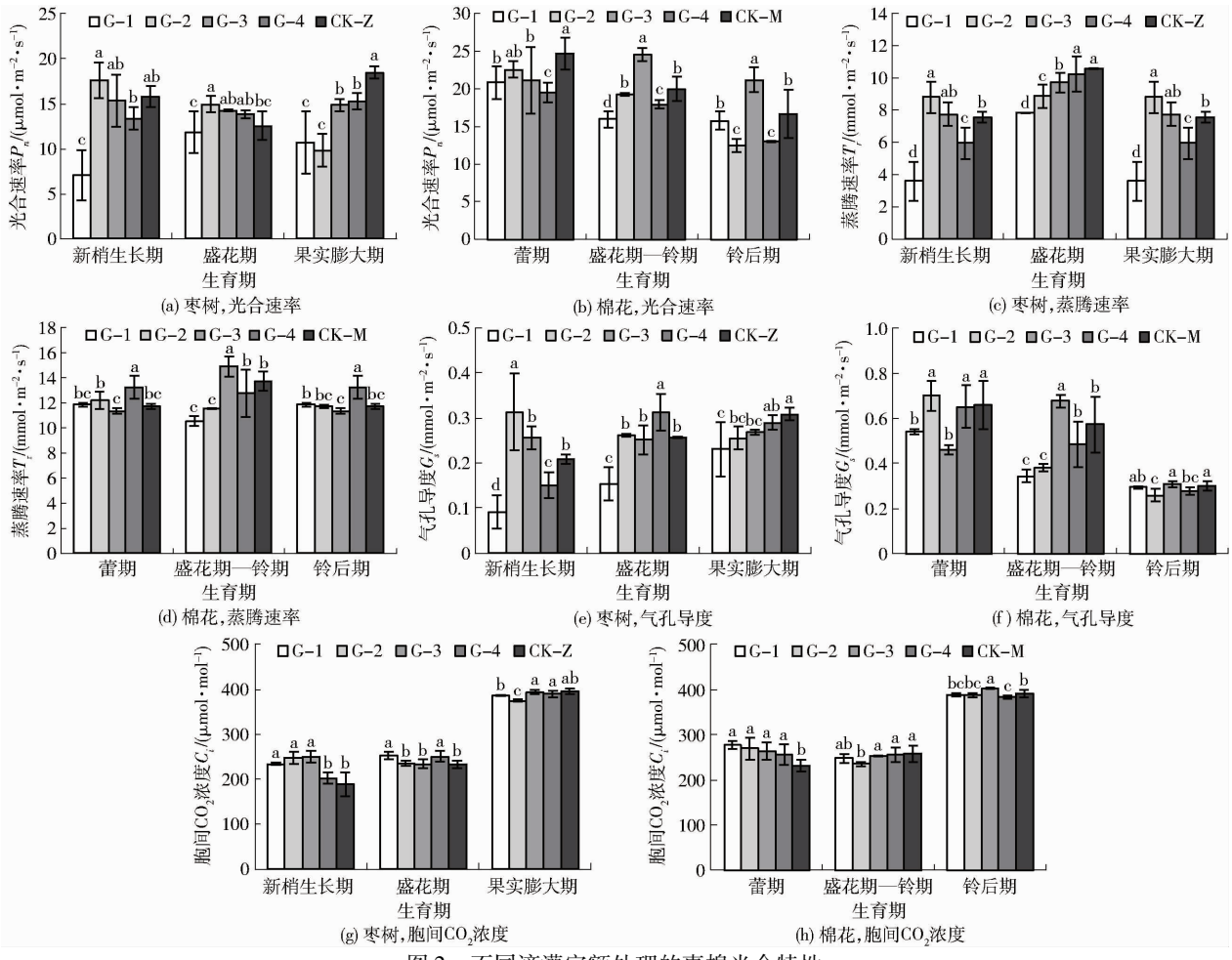



图 2　不同滴灌定额处理的枣棉光合特性

Fig. 2　Photosynthetic characteristics of jujube and cotton under different drip irrigation quotas

低枣树的蒸腾速率,与其他 3 个间作处理相比分别降低了 59.27%、53.68%、39.80%,而高定额灌水处理 G-4 显著低于 G-2、G-3($P<0.05$),相同灌水定额下间作和单作处理差异不显著($P>0.05$);盛花期蒸腾速率 G-4 处理显著高于其他 3 个处理,此阶段枣树需水量较高,高灌水定额有利于枣树的蒸腾;果实膨大期蒸腾速率的变化与新梢生长期极为相似,水分胁迫显著降低了枣树的蒸腾速率,高定额灌水也能导致蒸腾速率降低。由图 2d 可知,棉花蕾期相同灌水量时,间作棉花蒸腾速率与对照差异不显著($P<0.05$),而间作处理间 G-4 处理显著高于其他 3 个处理;进入盛花期后,蒸腾速率的变化与此阶段光合速率的变化非常相似,均以 G-3 处理显著大于其他处理,相同灌水定额下间作 G-3 处理比单作 CK-M 处理高 8.09%。铃后期由于需水量下降,低灌水定额处理 G-1 蒸腾速率并无明显降低。相同灌水定额下间作和单作处理差异不显著($P>0.05$)。

气孔导度和胞间 $CO_2$ 浓度决定着植物叶片与大气 $CO_2$ 进行物质交换的能力,与植株光合作用密切相关,也是作物重要的光合性能参数。图 2e 表明气孔导度的变化与蒸腾速率的变化相似,枣树新稍生长期 G-2 处理显著高于其他处理,低灌水处理 G-1 显著低于其他处理,分别比 G-2、G-3、G-4 处理低了 70.85%、64.37%、39.66%。过量灌水 G-4 处理也能导致气孔导度降低。但进入花期后枣树需水量较大,气孔导度以 G-4 处理最高,间作 G-3 处理和对照 CK-Z 处理差异不显著($P>0.05$)。果实膨大期 G-2、G-3、G-4 处理差异均不显著;图 2f 分析表明棉花蕾期以 G-2 处理最高,而盛花期—铃期,低灌水定额时(G-1、G-2)气孔导度则显著降低,G-3 处理显著高于其他处理($P<0.05$)。进入铃后期各处理气孔导度显著降低,与盛花期—铃期相比分别降低了 14.34%、31.83%、54.23%、43.03%、47.71%。

对图 2g、2h 分析可知,胞间 $CO_2$ 浓度受灌水量的影响较小,各生育期其值随机性较大,但总体而言,无论枣树或棉花 G-3 处理全生育期胞间 $CO_2$ 浓度均较高。

综上分析可以得出,灌水量对枣树和棉花的影响在不同生育期表现出不同的特征,新梢生长期枣树需水量较棉花大,其光合和蒸腾速率在滴灌定额

较低时(45 mm)易受到抑制,而此阶段即棉花蕾期时水分对棉花光合速率和蒸腾速率的影响较小,由于棉花植株较矮,更易受间作枣树的影响而降低光合速率。但进入花期后,棉花的光合作用和蒸腾作用转变成水分主导型,此阶段易受水分影响。因此,棉花盛花期—铃期和铃后期灌水定额可以控制在45~75 mm,花铃期灌水定额控制在75 mm左右为宜;而灌水量对枣树全生育期内光合速率和蒸腾速率均有显著影响,全生育期灌水定额可控制在75 mm。

## 2.2 不同种植间距对枣棉光合特性的影响

图3a分析表明,种植间距对枣树光合速率的影响表现为随枣棉间距的增加,枣树 $P_n$ 也相应增加。但新梢生长期和果实膨大期J-2(间距100 cm)和J-3(间距120 cm)处理的 $P_n$ 差异并不显著($P<0.05$),因此考虑土地利用效率,间距100 cm对枣树而言是合适的。图3b中棉花 $P_n$ 在蕾期各间作处理间差异不显著($P>0.05$),但是各处理比CK-M分别降低了5.10%、9.71%、10.80%。表明蕾期间作后由于棉花植株较矮受枣树影响较大。进入花期后间作处理和单作处理间的差异逐减小,甚至大于单作处理。间作处理间的J-1处理显著低于J-2、J-3处理。铃后期各处理差异不显著。

图3c、3d中枣树蒸腾速率随种植间距的增大也逐渐增大,各生育期表现一致。其中果实膨大期J-2和J-3处理差异不明显,其他间作处理间均有显著差异($P<0.05$),表明枣棉种植间距对枣树有显著影响。棉花也表现出相似的规律。

图3e、3f分析得出无论枣树或棉花其气孔导度在新梢生长期或蕾期J-2处理均显著大于其他间作处理($P<0.05$)。其中枣树在盛花期后气孔导度受枣棉种植间距影响较大,随种植间距的增加气孔导度也逐渐增加,而J-2和J-3处理差异不显著($P>0.05$),棉花在蕾期、盛花期—铃期与枣树相似,但是在铃后期各处理气孔导度均较低。

枣树新梢生长期胞间 $CO_2$ 浓度以J-2处理显著高于其他间作处理,如图3f所示,但J-1和J-3处理差异不显著,盛花期后,随着枣棉种植间距的增加,各处理胞间 $CO_2$ 浓度也逐渐增加,果实膨大期各处理无显著差异;图3g分析表明棉花胞间 $CO_2$ 浓度无明显规律,特别是盛花期后各间作处理间差异均不显著。

由上述分析可知,枣棉种植间距对枣树和棉花

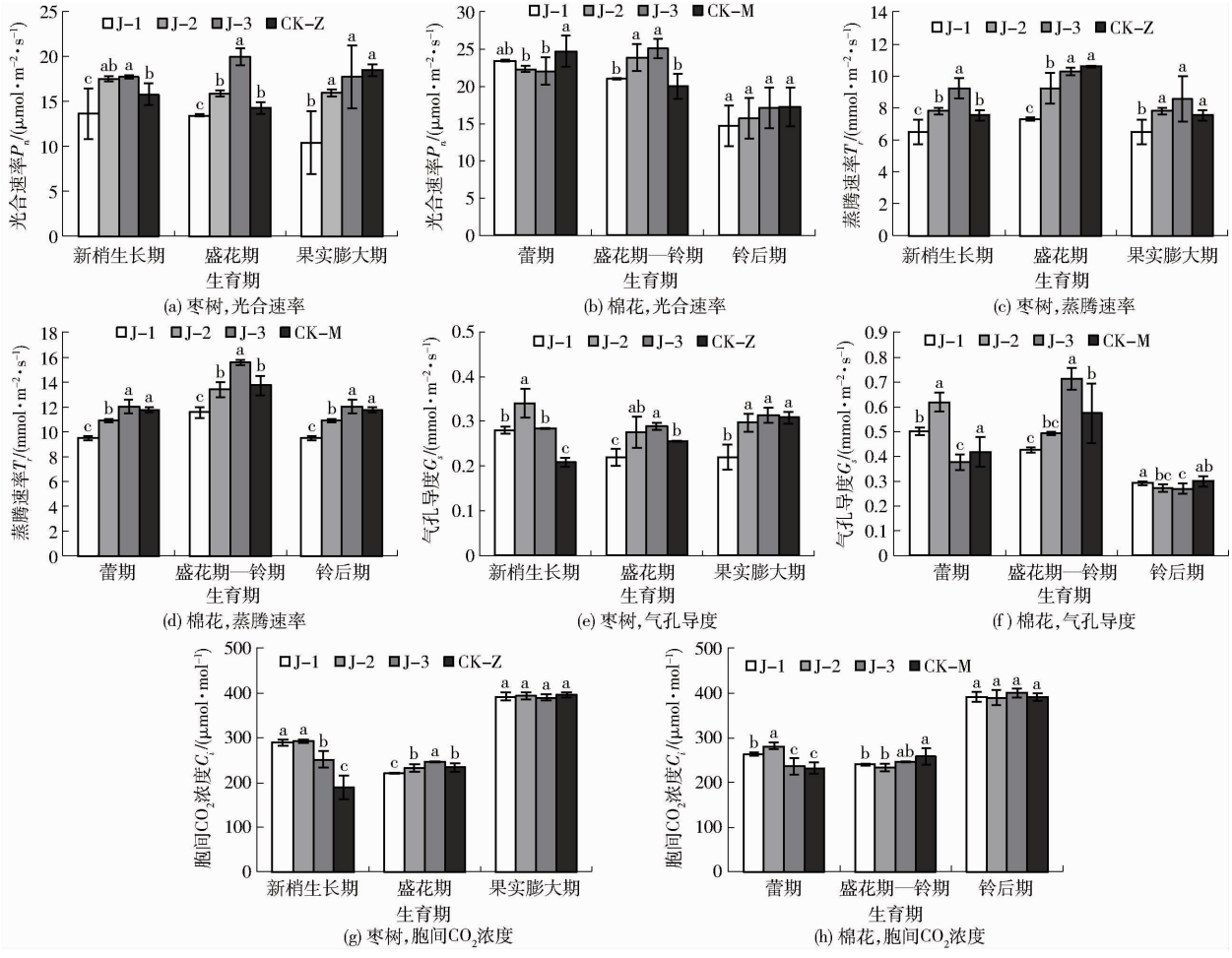



图3 不同种植间距下的枣棉光合特性

Fig. 3 Photosynthetic characteristics of jujube and cotton under different planting spacings

光合速率 $P_n$、气孔导度 $G_s$、胞间 $CO_2$ 浓度 $C_i$ 的影响主要集中在盛花期以前，而对蒸腾速率的影响则贯穿整个生育期。综合考虑枣棉的光合特性和土地利用效率，枣棉种植间距选择 100 cm 为宜。

### 2.3　基于产量的枣棉全生育期 WUE 分析

表 2 为全生育期各间作处理和单作处理 CK－M 棉花全生育期的耗水量、产量和水分利用效率，不同种植间距各处理棉花耗水量由大到小表现为：J－2、J－3、J－1，产量表现由大到小为：J－2、J－3、J－1，J－2 和 J－3 处理差异不显著，水分利用效率由大到小表现为：CK－M、J－3、J－2、J－1，J－2、J－3 处理和 CK－M 均无显著差异（$P>0.05$），因此从产量和水分利用效率的角度考虑，J－2 处理即枣棉间距为 100 cm 以上时对棉花产量已经无较大影响。

不同灌水定额对棉花耗水量由大到小表现为：G－4、G－3、G－2、G－1，产量由大到小表现为：G－4、G－3、G－2、G－1，其中 G－3 处理和 G－4 处理差异不显著（$P>0.05$），水分利用效率由大到小表现为：G－1、G－2、CK－M、G－3、G－4，其中 G－1、G－2、G－3 处理和 CK－M 差异不显著，而 G－1、G－2 处理产量显著低于 G－3 处理（$P<0.05$），因此综合考虑棉花产量和水分利用效率，G－3 处理即灌水定额 75 mm 最佳。

枣树的耗水与棉花有所不同，表 3 表明，不同种植间距的各处理枣树耗水量由大到小表现为：J－2、J－1、J－3，但各处理间差异较小。产量由大到小表现为：J－3、J－2、J－1，差异显著（$P<0.05$）。水分利用效率由大到小表现为：J－3、CK－Z、J－2、J－1，J－3 处理和对照 CK－Z 差异不显著（$P>0.05$）。因此，枣棉种植间距对枣树产量的影响较大，由于枣树为矮化密植冠幅较大，如果没有足够的生长空间，会导致严重减产。枣棉种植间距 120 cm 时枣树水分利用效率和产量均较高。

不同灌水定额对枣树耗水量的影响表现为：G－4、G－3、G－2、G－1，产量由大到小表现为：G－4、G－3、G－2、G－1，和棉花相似，G－3 和 G－4 处理差异不显著（$P>0.05$）。水分利用效率由大到小表现为：G－1、G－3、CK－M、G－2、G－4，G－1 处理虽然水分利用效率最高，但其经济产量较低，G－3 与 G－1 处理和 CK－Z 均差异不显著（$P>0.05$），G－4 处理水分利用效率最低且与其他各处理差异显著（$P<0.05$）。因此综合考虑产量和水分利用效率，G－3 处理即灌水定额 75 mm 最优。

综合以上分析可知，种植间距对枣树的影响大于棉花，枣棉种植间距 120 cm 时能够显著提高枣树产量和水分利用效率，棉花则要求 100 cm 以上即可。灌水定额对枣树和棉花产量均有显著影响，灌水定额低时虽然水分利用效率高，但经济产量较低，分析表明 75 mm 的灌水定额适宜于枣棉间作系统的无差别滴灌。

**表 2　不同处理棉花耗水、产量及水分利用效率**

**Tab. 2　Water consumption, yield and water use efficiency of different cotton treatments**

| 处理 | 灌水定额/mm | 灌溉定额/mm | 枣棉间距/cm | 棉花耗水量 $E_{TS}$/mm | 籽棉产量/（kg·hm$^{-2}$） | 水分利用效率 $WUE_{yield}$/（kg·hm$^{-2}$·mm$^{-1}$） |
|---|---|---|---|---|---|---|
| J－1 | 75 | 900 | 80 | 439 | 2 959.57 ± 133.20$^{b}$ | 6.74$^{b}$ |
| J－2 | 75 | 900 | 100 | 462 | 3 541.56 ± 181.53$^{a}$ | 7.66$^{a}$ |
| J－3 | 75 | 900 | 120 | 451 | 3 522.01 ± 266.41$^{a}$ | 7.80$^{a}$ |
| G－1 | 45 | 540 | 95 | 278 | 2 373.84 ± 87.20$^{c}$ | 8.54$^{a}$ |
| G－2 | 60 | 720 | 95 | 353 | 2 962.88 ± 118.71$^{b}$ | 8.38$^{a}$ |
| G－3 | 75 | 900 | 95 | 480 | 3 698.88 ± 94.05$^{a}$ | 7.70$^{a}$ |
| G－4 | 90 | 1 080 | 95 | 574 | 3 836.36 ± 87.20$^{a}$ | 6.69$^{b}$ |
| CK－M | 75 | 900 | | 890 | 7 186.71 ± 612.09 | 8.07$^{a}$ |

**表 3　不同处理枣树耗水、产量及水分利用效率**

**Tab. 3　Water consumption, yield and water use efficiency of different jujube treatments**

| 处理 | 灌水定额/mm | 灌溉定额/mm | 枣棉间距/cm | 枣树耗水量 $E_{TS}$/mm | 红枣产量/（kg·hm$^{-2}$） | 水分利用效率 $WUE_{yield}$/（kg·hm$^{-2}$·mm$^{-1}$） |
|---|---|---|---|---|---|---|
| J－1 | 75 | 900 | 80 | 589 | 4 862.42 ± 157.33$^{c}$ | 8.26$^{c}$ |
| J－2 | 75 | 900 | 100 | 592 | 5 741.38 ± 181.26$^{b}$ | 9.70$^{b}$ |
| J－3 | 75 | 900 | 120 | 585 | 6 822.71 ± 171.45$^{a}$ | 11.67$^{a}$ |
| G－1 | 45 | 540 | 95 | 389 | 4 319.25 ± 155.17$^{c}$ | 11.11$^{a}$ |
| G－2 | 60 | 720 | 95 | 477 | 4 871.88 ± 118.56b$^{c}$ | 10.22$^{b}$ |
| G－3 | 75 | 900 | 95 | 626 | 6 698.91 ± 197.33$^{a}$ | 10.70$^{ab}$ |
| G－4 | 90 | 1 080 | 95 | 788 | 6 828.15 ± 187.02$^{a}$ | 8.66$^{c}$ |
| CK－Z | 75 | 900 | | 862 | 8 903.84 ± 212.19 | 10.33$^{b}$ |

### 2.4 基于光合分配的枣棉不同生育期 WUE 分析

通过光合速率和蒸腾速率计算出各生育期的水分利用效率如表4所示,由表4可知,不同枣棉种植间距各间作处理蕾期 $WUE_{Pn}$ 由大到小为:J-1、CK-M、J-2、J-3,盛花期—铃期为:J-1、J-2、J-3、CK-M,但 J-1 和 J-2 处理差异不显著($P>0.05$),铃后期为 J-1、J-2、CK-M、J-3,但均差异不显著($P>0.05$)。综上,间作处理间枣棉种植间距越小棉花水分利用效率越高,这与基于产量和耗水的 WUE 规律并不一致,可能与田间郁闭程度有关,种植间距越小郁闭程度越高,易导致蒸腾速率降低。

灌水量对棉花水分利用效率的影响由大到小表现为:蕾期 CK-M、G-4、G-3、G-2、G-1,间作处理间随灌水量的增多而逐渐减小,但 G-2、G-3、G-4 处理差异不显著($P>0.05$);盛花期—铃期 G-2、G-3、G-1、CK-M、G-1,但 G-3 和 G-2 处理差异不显著;铃后期 G-3、CK-M、G-1、G-2、G-4,G-2 和 G-4 处理差异不显著($P>0.05$)。上述分析表明棉花蕾期时,即使在较低的灌水量下也具有较高的 $WUE_{Pn}$,但是进入盛花期后 $WUE_{Pn}$ 与灌水定额密切相关。从水分利用角度考虑,蕾期采用低灌水量 45~60 mm,盛花期后采用高灌水量 75~90 mm 较优,这与对光合特性的分析结果一致。

不同枣棉种植间距下枣树各处理的 $WUE_{Pn}$ 见表5,其中,新梢生长期由大到小为:J-2、CK-Z 和 J-1、J-3,但间作系统3个处理与单作处理差异均不显著($P>0.05$)。表明此阶段种植间距对 $WUE_{Pn}$ 的影响较小,盛花期由大到小为:J-3、J-1、J-2、CK-Z,J-1 和 J-2 处理差异不显著($P>0.05$),但均显著低于 J-3 处理($P<0.05$),说明此阶段种植间距对枣树的 $WUE_{Pn}$ 有显著影响。种植间距加大,净光合速率 $P_n$ 增大,但是如果扩展为裸地其蒸腾量也相应增加,导致水分利用效率较低。果实膨大期由大到小为:CK-Z、J-3、J-2、J-1,J-3 和 J-2 处理差异不显著($P>0.05$),但均显著低于 CK-Z,由于进入了关键生育期后期,加上气温下降,此时枣树的蒸腾速率有所下降,单作系统水分利用效率提高,间作水分利用效率与花期相比也有一定的增加。

枣树在新梢生长期的 $WUE_{Pn}$ 由大到小表现为:G-4、CK-Z、G-3、G-2、G-1,其中G-1、G-2、

**表4 基于光合分配的棉花的不同生育阶段 $WUE_{Pn}$**

**Tab.4 Photosynthetic distribution based $WUE_{Pn}$ of cotton at different growth stages**

| 处理 | 蕾期 | | | 盛花期—铃期 | | | 铃后期 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $P_n$/(μmol·m$^{-2}$·s$^{-1}$) | $T_r$/(mmol·m$^{-2}$·s$^{-1}$) | $WUE_{Pn}$/(μmol·mmol$^{-1}$) | $P_n$/(μmol·m$^{-2}$·s$^{-1}$) | $T_r$/(mmol·m$^{-2}$·s$^{-1}$) | $WUE_{Pn}$/(μmol·mmol$^{-1}$) | $P_n$/(μmol·m$^{-2}$·s$^{-1}$) | $T_r$/(mmol·m$^{-2}$·s$^{-1}$) | $WUE_{Pn}$/(μmol·mmol$^{-1}$) |
| J-1 | 23.47±0.10 | 9.48±0.19 | 2.48$^{a}$ | 21.04±0.03 | 11.55±0.44 | 1.82$^{a}$ | 14.68±2.71 | 9.48±0.19 | 1.55$^{a}$ |
| J-2 | 22.33±0.45 | 10.89±0.12 | 2.05$^{b}$ | 23.86±1.82 | 13.37±0.64 | 1.79$^{a}$ | 15.72±2.68 | 10.89±0.11 | 1.45$^{a}$ |
| J-3 | 22.06±1.84 | 12.03±0.54 | 1.84$^{c}$ | 25.12±1.33 | 15.56±0.19 | 1.61$^{b}$ | 17.08±2.71 | 12.03±0.54 | 1.41$^{a}$ |
| G-1 | 20.83±2.14 | 11.87±0.14 | 1.75$^{c}$ | 25.28±1.53 | 16.41±1.01 | 1.55$^{bc}$ | 15.78±1.25 | 11.87±0.14 | 1.33$^{b}$ |
| G-2 | 22.58±1.03 | 12.25±0.70 | 1.85$^{bc}$ | 19.25±0.16 | 11.60±0.57 | 1.66$^{a}$ | 12.51±0.89 | 12.25±0.70 | 1.03$^{c}$ |
| G-3 | 21.17±4.43 | 11.37±0.25 | 1.86$^{bc}$ | 24.53±0.87 | 14.93±0.79 | 1.64$^{ab}$ | 21.20±1.61 | 11.37±0.25 | 1.87$^{a}$ |
| G-4 | 27.54±2.71 | 13.27±0.90 | 2.07$^{ab}$ | 17.94±0.52 | 12.80±1.89 | 1.43$^{c}$ | 13.05±0.09 | 13.27±0.90 | 0.99$^{c}$ |
| CK-M | 24.73±0.21 | 11.74±0.16 | 2.11$^{a}$ | 20.00±0.77 | 13.72±0.15 | 1.46$^{bc}$ | 17.19±0.21 | 11.74±0.21 | 1.46$^{b}$ |

**表5 基于光合分配的枣树不同生育阶段 $WUE_{Pn}$**

**Tab.5 Photosynthetic distribution based $WUE_{Pn}$ of jujube at different growth stages**

| 处理 | 新梢生长期 | | | 盛花期 | | | 果实膨大期 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $P_n$/(μmol·m$^{-2}$·s$^{-1}$) | $T_r$/(mmol·m$^{-2}$·s$^{-1}$) | $WUE_{Pn}$/(μmol·mmol$^{-1}$) | $P_n$/(μmol·m$^{-2}$·s$^{-1}$) | $T_r$/(mmol·m$^{-2}$·s$^{-1}$) | $WUE_{Pn}$/(μmol·mmol$^{-1}$) | $P_n$/(μmol·m$^{-2}$·s$^{-1}$) | $T_r$/(mmol·m$^{-2}$·s$^{-1}$) | $WUE_{Pn}$/(μmol·mmol$^{-1}$) |
| J-1 | 13.62±2.86 | 6.51±0.77 | 2.09$^{ab}$ | 13.43±0.13 | 7.30±0.09 | 1.84$^{b}$ | 10.35±3.50 | 6.51±0.77 | 1.59$^{c}$ |
| J-2 | 17.52±0.29 | 7.79±0.22 | 2.25$^{a}$ | 15.88±0.38 | 9.20±0.96 | 1.73$^{b}$ | 15.93±0.36 | 7.79±0.22 | 2.04$^{b}$ |
| J-3 | 17.75±0.18 | 9.23±0.63 | 1.92$^{b}$ | 19.91±0.91 | 10.26±0.23 | 1.94$^{a}$ | 17.72±3.50 | 8.56±1.40 | 2.07$^{b}$ |
| G-1 | 7.06±2.83 | 3.58±1.23 | 1.97$^{b}$ | 11.84±2.31 | 7.83±0.03 | 1.51$^{bc}$ | 10.65±3.44 | 3.58±1.23 | 2.97$^{a}$ |
| G-2 | 17.59±2.00 | 8.80±0.99 | 2.00$^{b}$ | 14.94±0.94 | 8.86±0.75 | 1.68$^{bc}$ | 9.83±1.81 | 8.80±0.99 | 1.12$^{c}$ |
| G-3 | 15.30±2.90 | 7.74±0.73 | 1.98$^{b}$ | 14.23±0.13 | 9.71±0.60 | 1.46$^{c}$ | 14.84±0.68 | 7.74±0.73 | 1.92$^{b}$ |
| G-4 | 13.34±1.22 | 5.95±0.96 | 2.24$^{a}$ | 13.85±0.46 | 10.26±1.11 | 1.35$^{c}$ | 15.28±0.90 | 5.95±0.96 | 2.57$^{ab}$ |
| CK-Z | 15.75±1.20 | 7.55±0.33 | 2.09$^{ab}$ | 12.55±1.61 | 10.59±0.05 | 1.19$^{c}$ | 18.45±0.69 | 7.55±0.33 | 2.44$^{ab}$ |

G－3 处理差异不显著($P>0.05$),而显著低于 G－4 处理。说明枣树前期新梢生长较快,干物质迅速积累,所需水分较多。进入花期后各处理 $WUE_{Pn}$ 均有所降低,由大到小为:G－2、G－1、G－3、G－4、CK－Z,但各间作处理间差异不显著($P>0.05$)。果实彭大期 $WUE_{Pn}$ 由大到小为:G－1、G－4、CK－Z、G－3、G－2、G－1 处理的 $WUE_{Pn}$ 较高主要是其蒸腾速率过低造成的,表明枣树处于严重的水分胁迫状态,易造成烧苗。而 G－3 处理的蒸腾速率和 $WUE_{Pn}$ 适中。因此总体上,枣树全生育期可以采用 G－3 处理的灌水定额,即 75 mm。

### 2.5　棉花水分利用效率相关性分析

诸多研究表明作物的干物质积累与水分和产量相关,但是由于光合速率只能反映其某一时段或某一生育期的干物质转化状况,如果能够确定某一生育期的 $WUE_{Pn}$ 和 $WUE_{yield}$ 显著相关,则可以利用这一规律监控提高此生育期的 $WUE_{Pn}$,获得更高的经济产量。为了明确间作棉花各生育期 $WUE_{Pn}$ 与全生育期 $WUE_{yield}$ 的关系,对二者进行了线性回归分析,分析结果见表 6。表明棉花蕾期 $WUE_{Pn}$ 与 $WUE_{yield}$ 决定系数 $R^2$ 为 0.66,$P=0.03<0.05$ 达到了显著水平,因此,棉花蕾期水分利用效率 $WUE_{Pn}$ 与全生育期水分利用效率 $WUE_{yield}$ 显著相关,模型参数见表 6。但对棉花盛花期—铃期和铃后期相关分析表明决定系数为 0.05 和 0.04,$P$ 值为 0.91 和 0.93,均大于 0.05,表明盛花期—铃期和铃后期 $WUE_{Pn}$ 与 $WUE_{yield}$ 无显著相关性。

**表 6　基于棉花产量的 $WUE_{yield}$ 与不同生育阶段 $WUE_{Pn}$ 线性相关分析**

**Tab. 6　Linear correlation analysis of yield based $WUE_{yield}$ and $WUE_{Pn}$ at different reproductive stages for cotton**

| 样本对 | 模型 | 模型参数 | | | | 参数估计 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $R^2$ | $F$ 值 | $P$ 值 | 自由度 | 斜率 | 常数项 |
| $WUE_{yield}$－蕾期 $WUE_{Pn}$ | 线性 | 0.66 | 9.78 | 0.03 | 20 | －2.37 | 12.34 |
| $WUE_{yield}$－盛花期—铃期 $WUE_{Pn}$ | 线性 | 0.05 | 0.01 | 0.91 | 20 | －0.28 | 8.11 |
| $WUE_{yield}$－铃后期 $WUE_{Pn}$ | 线性 | 0.04 | 0.01 | 0.93 | 20 | －0.09 | 7.77 |

## 3　讨论

### 3.1　不同灌水处理对滴灌间作枣棉光合特性的影响

水分是影响植物光合作用的重要原料,早在 1941 年 SCHNEIDER 等[24]研究发现水分亏缺能导致苹果叶片光合速率下降。同时水分还能够影响植物蒸腾作用,缺水会够导致气孔导度减小,气孔阻力增大,胞间 $CO_2$ 浓度降低[25]。如韩凯虹等[26]研究表明水分胁迫使甜菜糖分积累期日蒸腾量降低 70.16% ~ 74.81%,日光合量降低 63.48% ~ 69.96%。但是这些研究的对象大多为单作植物,国内对间作系统中水分对作物光合系统的影响研究鲜有报道,虽然赵盼盼等[27]对间作枣棉的光合特性进行了研究,但是研究的假定条件相对单一,且未进行生育期划分,而不同生育期内间作作物的水分竞争关系尚不明确,因此本研究在不同的生育期进行光合特性的测定分析,在一定程度上能够通过光合生理变化体现枣棉不同生育期内对水分的竞争关系。

### 3.2　不同种植间距对滴灌间作枣棉光合特性的影响

枣棉种植间距能够影响间作条带间的遮阴率,从而影响间作作物的光合作用,SU 等[28]研究发现大豆幼苗期间作玉米,能使其净光合速率降低 38.3%,蒸腾速率降低 47%,气孔导度降低 55.4%,并认为玉米遮阴导致了大豆碳同化速率降低和能量缺乏。本研究设置了不同的间作种植间距,研究结果表明随着种植间距的增加,光合速率($P_n$)、蒸腾速率($T_r$)、气孔导度($G_s$)也相应增加,这与上述研究结论一致。但研究也表明,在某些生育期种植间距增加到 120 cm 以上与 100 cm 相比差异已不显著,整个生育期种植间距对蒸腾速率都有较大影响,而对光合速率($P_n$)、蒸腾速率($T_r$)、气孔导度($G_s$)的影响则集中在盛花期以前。

### 3.3　间作滴灌对枣棉水分利用效率的影响

水分利用效率(WUE)是反映植物同化特性的重要参数,其有 3 种表达方式,即作物大田群体的 WUE、作物单株 WUE 和叶片 WUE[29]。本研究选取大田群体 WUE 和叶片尺度的 WUE 进行研究,并分析了二者的相关性。很多学者对大田尺度或叶片尺度上的 WUE 进行了研究[30],但由于叶片尺度的 WUE 属于植物瞬时生理、生化水平上干物质积累与蒸腾速率的比率,其具有较强的时效性。而作物不同生育期的蒸腾速率和光合速率差异较大,因此,$WUE_{Pn}$ 与作物所处的生育期密切相关。但大多数学者只研究了间作作物的群体水分利用和叶片水平的水分利用,忽视了二者的相关关系,探明不同生育期的叶片尺度 WUE 与大田群体 WUE 的内在联系,对作物的生理调控具有重要意义。特别在控水、控肥时,由于间作水分的竞争关系,某一作物在某些生育关键期内势必产生水分亏缺,此时的 $WUE_{Pn}$ 如果与群体 $WUE_{yield}$ 显著相关,可能会造成作物严重减产。

间作系统内部的水分利用更为复杂,影响因子众多,本试验中考虑了种植间距和灌水量 2 个因子。种植间距越小,则枣棉根系重合度越高,在某些生育阶段枣树一旦发生水分亏缺,势必利用棉花根区的水分,从而降低棉花的水分利用效率,本研究表明棉花处理 J-1 的 $WUE_{yield}$ 较低,该结果与这一结论一致。但是不同生育阶段的 $WUE_{Pn}$ 则出现相反的规律,可能是种植间距对蒸腾速率的影响大于光合速率,种植间距减小,蒸腾速率降低较大。灌水定额越大,总灌水量越高,$WUE_{yield}$ 越低,但是 G-1 处理减产严重,并非 $WUE_{yield}$ 越高越好。灌水定额对 $WUE_{Pn}$ 的影响,则是生育期前期灌水量大,$WUE_{Pn}$ 也较大,但是生育期后期则相反,这是由于棉花蕾期正值棉花干物质快速积累期,加上气温较低,蒸腾速率下降,水分充足,光合速率较大。后期随干物质累积趋于完成,水分过多,光合速率反而降低,加上气温较高,蒸腾速率加大,导致 $WUE_{Pn}$ 降低。

## 4 结论

(1)新梢生长期枣树需水量较棉花大,其光合速率和蒸腾速率在滴灌定额较低时(45 mm)易受到抑制,在棉花蕾期时,水分对棉花光合速率和蒸腾速率的影响较小。棉花花期的光合作用和蒸腾作用转变成水分主导型,易受水分影响。而灌水量对枣树全生育期内的光合速率和蒸腾速率均有显著影响。枣棉种植间距对枣树和棉花光合速率 $P_n$、气孔导度 $G_s$、胞间 $CO_2$ 浓度 $C_i$ 的影响主要集中在盛花期后,而对蒸腾速率的影响则贯穿整个生育期。

(2)对基于产量的 $WUE_{yield}$ 分析表明,棉花水分利用效率由大到小表现为:CK-M、J-3、J-2、J-1、G-4、G-3、G-2、G-1,综合考虑产量和水分利用效率,种植间距 100 cm、灌水定额 75 mm 最优。枣树水分利用效率由大到小表现为:J-3、CK-Z、J-2、J-1、G-1、G-3、CK-M、G-2、G-4,综合考虑产量和水分利用效率,枣棉种植间距 120 cm、灌水定额 75 mm 最优。

(3)棉花蕾期时即使在较低的灌水量下也具有较高的 $WUE_{Pn}$,但是进入盛花期后 $WUE_{Pn}$ 与灌水定额密切相关,从水分利用的角度考虑,蕾期采用低灌水量 45 ~ 60 mm、盛花期后采用高灌水量 75 ~ 90 mm 较优。枣树新梢生长期种植间距对 $WUE_{Pn}$ 的影响较小,盛花期枣棉种植间距对枣树的 $WUE_{Pn}$ 有显著影响。分析表明 G-3 处理的 $WUE_{Pn}$ 较适中。因此,枣树全生育期可以采用 G-3 处理的灌水定额,即 75 mm。

(4)蕾期水分利用效率 $WUE_{Pn}$ 与全生育期水分利用效率 $WUE_{yield}$ 显著相关,其他 2 个生育期与之无显著相关关系。

## 参 考 文 献


1 刘洋, 栗岩峰, 李久生, 等. 东北半湿润区膜下滴灌对农田水热和玉米产量的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 93-104.
LIU Yang, LI Yanfeng, LI Jiusheng, et al. Effects of mulched drip irrigation on water and heat conditions in field and maize yield in sub-humid region of Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 93-104. (in Chinese)

2 ROBLES J M, BOTIA P, PEREZ-PEREZ J G. Subsurface drip irrigation affects trunk diameter fluctuations in lemon trees, in comparison with surface drip irrigation [J]. Agricultural Water Management, 2016, 165: 11-21.

3 王成, 李发永, 王龙. 不同灌溉方式对幼龄红枣生长及水分利用效率的影响研究[J]. 节水灌溉, 2012(2): 16-18.
WANG Cheng, LI Fayong, WANG Long. Research on effects of different irrigation methods on growth and water use efficiency for infancy Chinese jujube[J]. Water Saving Irrigation, 2012(2): 16-18. (in Chinese)

4 李发永, 王龙, 王兴鹏, 等. 适宜滴灌定额提高枣棉间作中棉花产量和土地生产效率[J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 105-114.
LI Fayong, WANG Long, WANG Xingpeng, et al. Optimal drip-irrigation amount improving cotton yield and land-use efficiency in jujube-cotton intercropping system of southern Xinjiang[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(14): 105-114. (in Chinese)

5 宋锋惠, 吴正保, 史彦江. 枣棉间作对棉花产量和光环境的影响[J]. 新疆农业科学, 2011, 48(9): 1624-1628.
SONG Fenghui, WU Zhengbao, SHI Yanjiang. The effect of jujube-cotton intercropping system on the cotton yield and light environment [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2011, 48(9): 1624-1628. (in Chinese)

6 焦念元, 李亚辉, 李法鹏, 等. 间作玉米穗位叶的光合和荧光特性[J]. 植物生理学报, 2015, 51(7): 1029-1037.
JIAO Nianyuan, LI Yahui, LI Fapeng, et al. Photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics in ear leaves of intercropped maize [J]. Plant Physiology Journal, 2015, 51(7): 1029-1037. (in Chinese)

7 冯晓敏, 杨永, 任长忠, 等. 豆科-燕麦间作对作物光合特性及籽粒产量的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(9):1426-1434.
FENG Xiaomin, YANG Yong, REN Changzhong, et al. Effects of legumes intercropping with oat on photosynthesis characteristics of and grain yield[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(9): 1426-1434. (in Chinese)

8 MOREIRA A, MORAES L A C, SCHROTH G, et al. Effect of nitrogen, row spacing, and plant density on yield, yield components, and plant physiology in soybean-wheat intercropping [J]. Agronomy Journal, 2015, 107(6): 2162-2170.

9 AJITHKUMAR K, JAYACHANDRAN B K, RAVI V. Influence of shade regimes on photosynthetic rate and stomatal characters of ginger (*Zingiber officinale* R.) [J]. Journal of Spices and Aromatic Crops, 2015, 11(1):26-29.

10 NARESH R K, TOMAR S S, SHAHI U P, et al. Sustainability of maize-wheat cropping system by different legume intercropping and nitrogen level treatments on light distribution, soil temperature and crop productivity[J]. African Journal of Plant Science, 2014,8(4):204 - 213.

11 刘英超, 汤利, 郑毅. 玉米马铃薯间作作物的土壤水分利用效率研究[J]. 云南农业大学学报:自然科学版, 2013, 28(6): 871 - 877.
LIU Yingchao,TANG Li,ZHENG Yi. Researches on soil water use efficiency in maize-potato intercropping system [J]. Journal of Yunnan Agricultural University: Natural Science,2013,28(6): 871 - 877. (in Chinese)

12 党红凯, 曹彩云, 郑春莲, 等. 小麦提前造墒灌水对玉米后期光合与产量的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 127 - 135.
DANG Hongkai, CAO Caiyun, ZHENG Chunlian, et al. Effect of pre-sowing irrigation advancement of winter wheat on photosynthesis and yield of summer maize at later growth stage [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(10):127 - 135. (in Chinese)

13 李元, 牛文全, 许健, 等. 加气滴灌提高大棚甜瓜品质及灌溉水分利用效率[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 147 - 154.
LI Yuan, NIU Wenquan, XU Jian, et al. Aerated irrigation enhancing quality and irrigation water use efficiency of muskmelon in plastic greenhouse [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(1): 147 - 154. (in Chinese)

14 王振华, 裴磊, 郑旭荣, 等. 盐碱地滴灌春小麦光合特性与耐盐指标研究[J]. 农业机械学报, 2016,47(4):65 - 72,104.
WANG Zhenhua, PEI Lei, ZHENG Xurong, et al. Photosynthetic characteristics and salt-tolerance indexes of spring wheat with drip irrigation in saline-alkali soils[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(4):65 - 72, 104. (in Chinese)

15 ROY S, BARMAN M, PUSTE A M, et al. Growth, yield, water use efficiency and competitive functions of intercropping system of maize (*Zea mays* L.) and mungbean (*Vigna radiata* L.) as influenced by irrigation[J]. SAARC Journal of Agriculture, 2016, 13(2): 94 - 107.

16 REN Y, LIU J, WANG Z, et al. Planting density and sowing proportions of maize-soybean intercrops affected competitive interactions and water-use efficiencies on the Loess Plateau, China [J]. European Journal of Agronomy, 2016, 72: 70 - 79.

17 DANESHNIA F, AMINI A, CHAICHI M R. Surfactant effect on forage yield and water use efficiency for berseem clover and basil in intercropping and limited irrigation treatments[J]. Agricultural Water Management, 2015, 160: 57 - 63.

18 BEHARI P, SINGH J B, AGRAWAL R K. Water use efficiency and evapotranspiration of NB hybrid + berseem intercropping system under semi-arid conditions[J]. Range Management and Agroforestry, 2015, 36(1): 76 - 78.

19 CHIMONYO V G P, MODI A T, MABHAUDHI T. Water use and productivity of a sorghum-cowpea-bottle gourd intercrop system [J]. Agricultural Water Management, 2016, 165: 82 - 96.

20 李发永, 姚宝林, 王龙, 等. 南疆绿洲区枣棉滴灌间作的种间光环境及茎流分析[J]. 西北农业学报, 2015, 24(2): 97 - 103.
LI Fayong, YAO Baolin, WANG Long, et al. Light environment and stem flow differences analysis for interspecific of jujube intercrop cotton under drip irrigation in oasis area of Southern Xinjiang [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2015, 24(2): 97 - 103. (in Chinese)

21 卢成达, 郭志利. 花铃期棉花光合日变化研究[J]. 农学学报, 2012,2(6):6 - 9.
LU Chengda, GUO Zhili. Studies on daily changes of the net photosynthetic rate of cotton at blossoming and boll forming stage [J]. Journal of Agriculture, 2012, 2(6):6 - 9. (in Chinese)

22 MELONI D A, OLIVA M A, MARTINEZ C A, et al. Photosynthesis and activity of superoxide dismutase, peroxidase and glutathione reductase in cotton under salt stress [J]. Environmental and Experimental Botany, 2003, 49(1): 69 - 76.

23 丁红, 戴良香, 宋文武, 等. 不同生育期灌水处理对小粒型花生光合生理特性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(9): 1149 - 1157.
DING Hong, DAI Liangxiang, SONG Wenwu, et al. Effects of different growth stage irrigations on small-grain peanut leaf photosynthetic characteristics [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(9): 1149 - 1157. (in Chinese)

24 SCHNEIDER G W, CHILDERS N F. Influence of soil moisture on photosynthesis, respiration, and transpiration of apple leaves [J]. Plant Physiology, 1941, 16(3): 565 - 583.

25 ŻELAWSKI W, KUCHARSKA J, ŁOTOCKI A. Productivity of photosynthesis in Scots pine (*Pinus silvestris* L.) seedlings grown under various soil moisture conditions [J]. Acta Societatis Botanicorum Poloniae, 2015, 38(1): 143 - 155.

26 韩凯虹, 刘玉华, 张继宗, 等. 水分对甜菜光合及叶绿素荧光特性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(5): 463 - 470.
HAN Kaihong, LIU Yuhua, ZHANG Jizong, et al. Effects of water stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of the sugar beet [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2015, 32(5): 463 - 470. (in Chinese)

27 赵盼盼, 赵金祥, 孙勇, 等. 不同水分处理对枣园间作棉花光合特征及水分利用效率的影响[J]. 西北农业学报, 2013, 22(11):54 - 58.

28 SU B Y, SONG Y X, SONG C, et al. Growth and photosynthetic responses of soybean seedlings to maize shading in relay intercropping system in Southwest China [J]. Photosynthetica, 2014, 52(3): 332 - 340.

29 罗亚勇, 赵学勇, 黄迎新, 等. 植物水分利用效率及其测定方法研究进展[J]. 中国沙漠, 2009, 29(4): 648 - 655.
LUO Yayong, ZHAO Xueyong, HUANG Yingxin, et al. Research progress on plant water use efficiency and its measuring methods [J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(4): 648 - 655. (in Chinese)

30 张英华,张琪,徐学欣,等. 适宜微喷灌灌水频率及氮肥量提高冬小麦产量和水分利用效率 [J]. 农业工程学报,2016, 32(5):88 - 95.