

DOI: 10.5846/stxb201707141277

艾鹏睿, 马英杰, 马亮. 干旱区滴灌枣棉间作模式下枣树棵间蒸发的变化规律. 生态学报, 2018, 38(13): - .

Ai P R, Ma Y J, MA Liang. Study on evaporation variation of jujube trees under drip irrigation of jujube and cotton intercropping in an arid area. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(13): - .

## 干旱区滴灌枣棉间作模式下枣树棵间蒸发的变化规律

艾鹏睿, 马英杰\*, 马 亮

新疆农业大学水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052

**摘要:**为明确枣树单、间作棵间土壤蒸发及水分耗散特征。通过大田试验,采用 MLS 测定枣树单、间作棵间土壤蒸发,并对其土壤蒸发的变化规律和气象因素、土壤因素及边界效应进行试验研究。试验结果表明:枣树棵间土壤蒸发在各生育期均出现不同的差异性。单、间作棵间土壤蒸发量及植株蒸腾量存在显著差异且总体上单作高于间作。对外部影响因素进行研究,枣树棵间土壤蒸发与太阳辐射、土壤含水量等呈现良好的函数关系。但日均温仅与单作棵间土壤蒸发相关性较高,而与间作相关性较差。对间作枣树边界效应进行判别,间作棉花显著影响间作枣树行间棵间土壤蒸发量,且棉花叶面积指数与行间棵间土壤蒸发量呈现良好二次函数关系。该研究在一定程度上体现了间作模式的优势,为其对减少无效水分消耗,提高水分利用效率提供理论依据。

**关键词:**枣/棉间作;棵间土壤蒸发;滴灌;叶面积指数

## Study on evaporation variation of jujube trees under drip irrigation of jujube and cotton intercropping in an arid area

AI Pengrui, MA Yingjie\*, MA Liang

College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China

**Abstract:** This study was conducted in order to clarify the characteristics of soil evaporation and water dissipation in jujube trees and intercropping trees. On the basis of field experiments, we examined the changes in soil evaporation, meteorological factors, soil factors, and boundary effect by means of micro-lysimeter monitoring of the soil evaporation of jujube trees and intercropping. The following results were obtained. Soil evaporation differed at the different growth stages of jujube trees. There were significant differences in soil evaporation and transpiration between single and intercropping trees, and it was generally higher in monoculture than with intercropping. Investigation of external influencing factors indicated that the soil evaporation of jujube trees showed a good functional relationship with solar radiation and soil water content. Although the daily average temperature was related to the soil evaporation of single cropping trees, the correlation with intercropping was poor. When the boundary effect of intercropping jujube tree was analyzed, it was found that intercropping cotton significantly affected soil evaporation between intercropped jujube trees, and the leaf area index of cotton showed a good 2-fold relationship with soil evaporation. To some extent, this study reveals the advantages of the intercropping model, which provides a theoretical basis for reducing inefficient water consumption and improving water-use efficiency.

**Key Words:** jujube tree/cotton intercropping; soil evaporation; drip irrigation; leaf area index

基金项目:国家自然科学基金项目(51369029);新疆水利科技专项(G201704)

收稿日期:2017-07-14; 网络出版日期:2018-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xj-myj@163.com

在农田水分循环过程中,蒸散(棵间土壤蒸发与作物蒸腾)是土壤水分消耗的主要途径,其时、空变化过程直接影响作物生理发育和灌溉制度的优化与管理。棵间土壤蒸发是指土壤受外界条件影响而造成的土体水分流失,并没有直接参与作物生长发育及最终产量的形成,隶属于无效耗水范畴。相关研究表明:在整个生育期内,棵间土壤蒸发虽因地域、外界环境、作物种类不同而差异显著,但占总蒸散量的比例也常常高达的40%以上<sup>[1-4]</sup>。因此减少这部分耗水(棵间土壤蒸发)对于提高水分利用效率和发展农田节水事业具有重要意义<sup>[5-6]</sup>。

间作是我国农业遗产的重要组成部分,由于可以发挥农作物的共生、互补和群体特性,提高水、土、肥利用率等优点,因此具有良好的应用前景并深受国内外学者重视。在国内外众多研究中,关于棵间土壤蒸发研究主要集中在玉米/小麦等众多农作物间作模式的模型构建<sup>[2,7-8]</sup>和机理分析<sup>[9-10]</sup>,通过试验验证,总结出叶面积指数、气温、土壤是影响棵间土壤蒸发的关键因素。而对于农林复合间作模式,其研究方向多集中在种间竞争和种植模式<sup>[11-12]</sup>,未见棵间土壤蒸发研究。由于农林复合模式与农作物间作模式相比,在种植模式和种间竞争关系上均存在着很大的差异,往往导致作物边界条件更加复杂,不同生育期的土壤蒸发影响因素也难以用统一的标准衡量,所以针对农林复合模式间作模式棵间土壤蒸发还需加以深入研究和探讨。

利用微型蒸发器(Micro-lysimeters, MLS)测定土壤蒸发,并通过特定的间作边界系统分析,用以研究间作条件下棵间土壤蒸发规律是一种简单、廉价、方便而又非常有效的方法。为此本文采用MLS测定枣棉间作模式棵间土壤蒸发,通过分析和论证枣树棵间土壤蒸发与作物的叶面积指数、主要气象因素等指标的关联程度,探讨单作与间作两种不同种植模式下枣树棵间土壤蒸发的变化规律及影响因子。最终为估算农田土壤水分动态、制定合理的灌溉制度、尽可能的减少无效棵间土壤蒸发损失提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验方法

试验于2016年4—11月在新疆阿克苏地区红旗坡农场新疆农业大学林果实验基地内进行(80°14'E, 41°16'N, 海拔1133 m)。试验区属于典型的大陆性温带干旱沙漠气候,昼夜温差悬殊。试验区地势平缓,0—100 cm土壤质地见表1,地下水埋深超过10 m。

表1 研究区土壤质地组成  
Table 1 Soil texture components in the study area

土层	密度 Soil density / (g/cm <sup>3</sup> )	土壤粒径比例 Soil particle size ratio/%				土壤性质 Soil properties
		<0.002 mm	0.002—0.05 mm	0.05—2 mm	>2 mm	
0—20	1.38	7	56.5	36.5	0	粉砂壤土
20—40	1.42	7.2	67.9	24.9	0	粉砂壤土
40—60	1.4	2.9	15.8	81.3	0	壤砂土
60—80	1.38	0.1	1.7	98.2	0	细砂
80—100	1.35	0.2	8	91.8	0	细砂

供试作物为棉花,品种为新陆中49号;枣树品种为灰枣,树龄5年。棉花于2016年4月19日播种,11月3日收获;枣树于2016年4月24日进入萌芽期,11月15日收获。枣树株距1 m,行距4 m,南北向双管滴灌灌溉,滴灌带距树干0.3 m。棉花采用一膜1管4行种植,株距8 cm,行距20—40—20 cm。间作种植模式及棉花滴灌带布置方式见图1。试验共设置4个处理,每个处理各设置3个重复,其作物灌溉制度见表2,施肥及作物管理依当地实际情况进行。

### 1.2 测定指标

#### 1.2.1 土壤含水率

已有研究表明:幼龄枣树根系吸水主要集中在0—100 cm土层,因此本文主要研究0—100 cm枣树根区土

壤水分变化情况,计算枣树根区蒸散量采用水量平衡法:

表 2 枣树/棉花田间试验设计

Table 2 Field experiment design of jujube tree/ cotton

	生育阶段 Growth period	萌芽期 Germination	花期 Florescence	幼果期 Young fruit	果实发育期 Fruit development	成熟期 Mature	合计 Total
枣树 Jujube	灌水定额 Irrigation quota/mm	35	35	35	35	35	280
	灌水次数 Irrigation times	2	2	2	2	0	8
	生育阶段 Growth period	苗期 Seedling stage	蕾期 Bud stage	花期 Florescence	铃期 Boll period	吐絮期 Boll opening	合计 Total
棉花 Cotton	灌水定额 Irrigation quota/mm	37.5	37.5	37.5	37.5	37.5	187.5
	灌水次数 Irrigation times	0	1	2	2	0	5

Z2 处理:枣树单作,枣树灌溉定额如上

Z2M2 处理:枣棉间作,枣树、棉花灌溉定额如上

Z1M2 处理:枣棉间作,枣树减少 50%灌溉量,棉花不变

Z2M1 处理:枣棉间作,枣树不变,棉花减少 50%灌溉量

注:果树生育后期需进行控水处理,因此在枣树成熟期未进行灌溉。

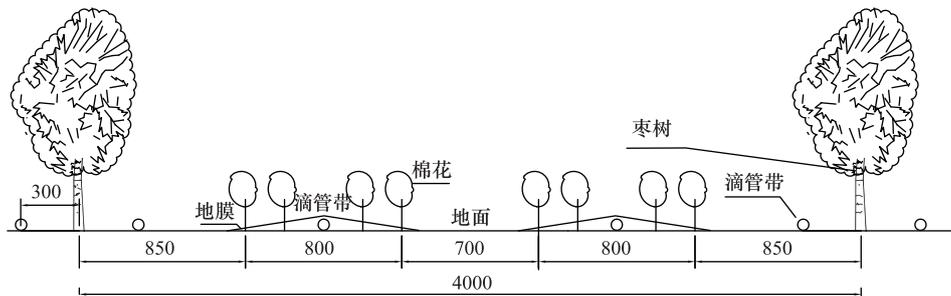


图 1 枣树/棉花间作种植模式示意

Fig.1 Intercropping jujube tree/ cotton planting mode

$$ET_c = I + P - \Delta S - R - D \quad (1)$$

式中: $ET_c$  为作物蒸散量(mm); $I$  为灌溉量(mm); $P$  为降雨量(mm); $\Delta S$  为土体贮水的变化量(mm); $R$  为地表径流量(mm); $D$  为深层渗漏量(mm)。

由于在干旱区采用滴灌灌溉,地表径流量假设为 0 mm。地下水埋深超过 10 m,深层渗漏量设为 0 mm。土体贮水量采用 TRIME-IPH 土壤水分测定系统测量。测定时间为每次灌水前、后,雨后需加测。每个处理设 3 组 Trime 探测管。枣树单作布设 5 根,分别布设在枣树株间距树干 30、50 cm 处和行间 30、50、70 cm 处;枣棉间作布设 7 根,分别布设在枣树株间距树干 30、50 cm 处和行间 30、50、70、100、125 cm 处。

### 1.2.2 棵间土壤蒸发

棵间土壤蒸发采用 MLS(微型蒸发器)进行测定,布设位置为行间、株间各一个,株间距树 50 cm,行间距树 40 cm。MLS(微型蒸发器)采用 PVC 管制成,内部桶高 15 cm,内径 11 cm,外部桶高 20 cm,内径 12 cm。每次取土时,将内桶垂直压入土壤,使其顶面与地面平齐,然后取出内桶,削去多余土壤,并用纱网封住底部,放入外桶内,使其表层与附近土壤持平。然后每天 10:00 使用精度为 0.01 g 电子天平称重。取行、株间内桶重量变化值的平均值,折合成 mm,作为该树的棵间蒸发量。

为使微型蒸发器内部土壤水分与周围土壤保持一致,内部土体需每两天更换一次;降雨后立刻更换土体;

灌溉后,由于土体较为湿润,且取土难度较大,因此选择隔一天进行取土。

### 1.2.3 棉花叶面积指数

棉花叶面积采用万深 LA-S 仪器进行直接测定。测定时间从 6 月 11 日起,每隔 10 d 每个处理选取 3 棵植株作为样本进行测定,直至生育期结束。

### 1.2.4 气象数据

使用 Watchdog 小型自动气象站全天候自动观测气温、辐射、降雨等常用气象数据,30 min 测定一次。其生育期内降雨量与参考作物腾发量变化趋势见图 2。

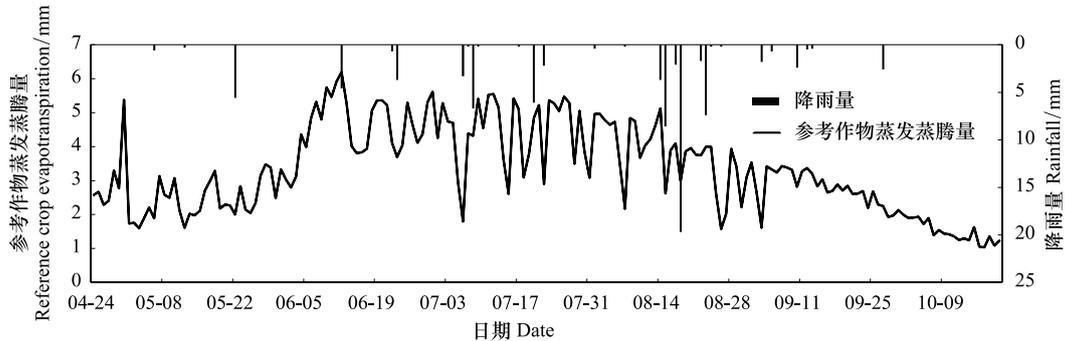


图 2 试验站参考作物蒸发蒸腾量及降雨量变化趋势

Fig.2 Daily and monthly changing process of crop evapotranspiration and precipitation

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理下作物棵间土壤蒸发变化规律

表 3 为不同处理条件下枣树各生育阶段作物蒸散量与棵间土壤蒸发量及比例关系。由于 TRIME 管在棉花播种当天进行布设,布设后一个月左右测定数值精准度较差,因此缺少 5 月 22 日之前土壤水分变化情况和棵间土壤蒸发实测值。9 月以后枣树需要进行控水,不进行灌水,致使到枣树成熟期时,土地表面异常干燥,土壤棵间土壤蒸发用 MLS 已经无法测定。因此缺少 9 月份以后棵间土壤蒸发量。

从表 3 中可以看出,由于萌芽展叶期仅枣树进行灌溉,Z2、Z2M2、Z2M1 的 3 个处理棵间土壤蒸发与蒸散量基本无差异,日均棵间土壤蒸发量在 1.40—1.47 mm/d 之间,日均蒸散量在 2.79—2.92 mm/d 之间,阶段土壤棵间土壤蒸发占蒸散量比例在 48%—53%之间。Z1M2 处理由于灌溉量较小,蒸发量与蒸散量相对较弱。但当枣树进入花期后,三个处理棵间蒸发开始出现差异,单作棵间蒸发开始显著高于间作棵间蒸发,差幅在 8%—10%之间。说明间作种植开始对棵间蒸发产生一定影响,使其棵间蒸发开始出现下降,并一直延续到果实膨大期。这是由于枣树在萌芽展叶期,间作棉花长势较弱,各处理株高均不到 20 cm,对枣树棵间蒸发基本无影响。但随着生育期的推移,棉花株高和叶面积指数迅速提升,逐渐影响到枣树的棵间蒸发,致使棵间蒸发出现一定程度的下降。

从枣树全生育期来看:在充分灌溉条件下,单作棵间土壤蒸发占总蒸散量的 50%,间作棵间土壤蒸发占总蒸散量的 48%,单、间作棵间土壤蒸发差异明显,间作(Z2M2)相比于单作,可以减少约 32 mm 土壤蒸发量。因此间作种植可以在一定程度上减少棵间蒸发,减少枣树不必要的水分消耗。

为对比不同灌水定额枣树行、株间棵间蒸发的影响,本文选取枣树生育中后期(花期至果实膨大期)日均棵间土壤蒸发量进行对比,其结果如图 3 所示。由图 3 可知,各处理日均棵间蒸发量大小为:Z2>Z2M2>Z2M1>Z1M2 处理,说明单作棵间蒸发显著高于间作。间作棵间蒸发量也与灌水量密切相关,当枣树灌水量增大时,棵间蒸发量升高。对比 Z2M2 和 Z1M2 处理,发现当减少枣树灌溉量时,将会对株间棵间蒸发产生较大影响,而对于行间,由于棉花对其进行一定水分补给,影响程度较之株间相对减弱。对比 Z2M2 和 Z2M1 处理,

在单独降低棉花灌水量之后,枣树行、株间蒸发量均有下降,但行间下降幅度较高。该情况是由于在减少棉花灌溉量后,棉花根区田间含水量相对较低,枣树根区含水量相对较高,枣树水分有向棉花运移的趋势,行间由于距离棉花根区较近,受影响程度较高,株间距棉花根区较远,受影响程度较弱。

表 3 不同处理条件下枣树各生育阶段实际蒸散量与棵间土壤蒸发量及比例关系

Table 3 The relationship between actual evapotranspiration and soil evaporation and proportion in different growth stages of jujube trees under different treatments

	生育阶段 Growth period	萌芽展叶期 Germination	花期 Florescence	幼果期 Young fruit	果实膨大期 Fruit development	合计 Total
处理 Treatment	日期 天/d	5/22—5/31 10	6/1—7/5 35	7/6—8/3 29	8/4—9/15 43	5/22—9/15 117
	$ET_0$	27.19	160.61	129.94	161.80	479.54
	日均 $ET_0$	2.72	4.59	4.48	3.76	4.10
Z2 处理 Z2 treatment	$E$	14.75	86.74	65.60	55.76	222.85
	$E_d$	1.47	2.48	2.26	1.30	1.90
	$ET$	27.92	148.31	128.63	139.17	444.02
	$ET_d$	2.79	4.24	4.44	3.24	3.80
	$E/T$	53%	58%	51%	40%	50%
Z2M2 处理 Z2M2 treatment	$E$	13.98	70.53	54.48	51.73	190.72
	$E_d$	1.40	2.02	1.88	1.20	1.63
	$ET$	29.21	128.97	119.23	125.41	402.81
	$ET_d$	2.92	3.68	4.11	2.92	3.44
	$E/T$	48%	55%	46%	41%	47%
Z1M2 处理 Z1M2 treatment	$E$	12.82	55.41	48.79	39.29	156.31
	$E_d$	1.28	1.58	1.68	0.91	1.34
	$ET$	29.21	93.17	111.07	127.29	360.74
	$ET_d$	2.92	2.66	3.83	2.96	3.08
	$E/T$	44%	59%	44%	31%	43%
Z2M1 处理 Z2M1 treatment	$E$	14.13	70.05	53.01	47.04	184.23
	$E_d$	1.41	2.00	1.83	1.09	1.57
	$ET$	28.54	123.64	121.08	119.44	392.71
	$ET_d$	2.85	3.53	4.18	2.78	3.36
	$E/T$	50%	57%	44%	39%	47%

其中  $E$  为阶段总蒸发量, Stage total evaporation;  $E_d$  为日均蒸发量, Daily evaporation;  $ET$  为阶段总蒸散量, Stage total evapotranspiration;  $ET_d$  为日均蒸散量, Daily evapotranspiration;  $E/ET$  为棵间土壤蒸发占总蒸散量的百分比, Percentage of soil evaporation to total evapotranspiration.

## 2.2 土壤含水量对棵间土壤蒸发的影响

土壤水分是土壤蒸发、植被蒸腾最直接的水分来源,因此土壤水分(土壤含水量)与棵间土壤蒸发关系密切。而由前人研究可知,气象因素对棵间蒸发影响程度较高,为减弱气象因素对棵间土壤蒸发的影响,本文采用棵间土壤相对蒸发量  $E/ET_0$  代表棵间土壤蒸发强度与表层土壤含水量(0—10 cm 土壤体积含水量)进行相关性分析。其中参考作物蒸发蒸腾量  $ET_0$  采用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式计算。

表 4 土壤含水量与  $E/ET_0$  相关性分析

Table 4 Soil water content and  $E/ET_0$  correlation analysis

相关系数 Correlation	Z2 处理 Z2 treatment	Z2M2 处理 Z2M2 treatment	Z1M2 处理 Z1M2 treatment	Z2M1 处理 Z2M1 treatment
土壤含水量 Soil moisture content	0.771 **	0.716 **	0.591 **	0.672 **

由表 4 可知,各处理土壤含水量与  $E/ET_0$  均成极显著正相关,说明土壤含水量与棵间蒸发关系密切,且当土壤含水量越大,枣树棵间土壤蒸发强度也就越大。前人研究认为土壤含水量与  $E/ET_0$  呈指数关系,文中以 Z2 处理为例(图 4),通过对比两者拟合结果,认为二次函数拟合程度优于指数函数。从图 4 中可以看出二次函数  $R^2$  显著高于指数函数。以实际数值带入拟合方程,求得均方根误差 RME 指数 = 13%, RME 二次 = 12%。

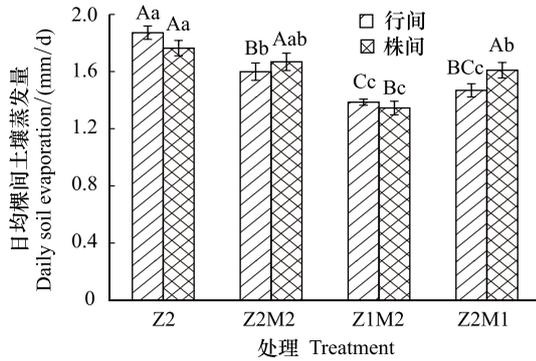


图 3 各处理枣树生育中后期株、行间日均棵间土壤蒸发量

Fig.3 Each treatment's row middle and inter jujube tress of the daily water consumption in middle and late growth stage

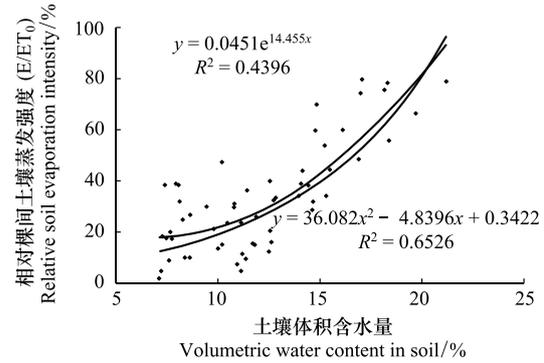


图 4 Z2 处理相对棵间土壤蒸发强度与土壤体积含水量拟合曲线

Fig.4 Z2 treatment fitting curve of relative soil evaporation intensity and soil volumetric water content

### 2.3 间作棉花叶面积指数对枣树棵间蒸发强度的影响

在对农作物棵间蒸发的研究中,棵间土壤蒸发与叶面积指数关系密切,因此在棉花生育中后期会对枣树棵间蒸发造成一定影响。为了尽可能消除土壤含水量、气象因素等对棵间土壤蒸发造成显著影响,本文选取称重第一天,或降雨量较大后第一天的相对棵间土壤蒸发强度  $E/ET_0$  与棉花叶面积指数进行对比分析。但由于棉花叶面积测定时间难以与所选取  $E/ET_0$  对应日期相匹配,因此本文先对棉花叶面积指数进行 2 次函数模拟,通过拟合函数,求解出每日棉花叶面积指数。其拟合结果如图 5 所示。各处理行间相对棵间土壤蒸发强度  $E/ET_0$  与棉花叶面积指数 LAI 拟合值的关系如图 6 所示。

故 Z2M2 处理、Z1M2 处理、Z2M1 处理行间  $E/ET_0$  与拟合 LAI 的关系:

$$\text{Z2M2 处理: } y = -0.0210x^2 - 0.0201x + 0.9110$$

$$R^2 = 0.5536$$

$$\text{Z1M2 处理: } y = -0.0170x^2 - 0.0068x + 0.9117 \quad R^2 = 0.6496$$

$$\text{Z2M1 处理: } y = -0.0384x^2 + 0.0805x + 0.8616 \quad R^2 = 0.5952$$

因此枣树棵间土壤蒸发强度受棉花叶面积指数影响显著,且与叶面积指数的增加而降低,呈现一定函数关系。棉花叶面积指数是影响枣树棵间蒸发的重要因子。

### 2.4 气象因素对作物棵间土壤蒸发的影响

相关研究表明,在表层土壤为田间持水率或接近田间持水率时,土面汽化潜热能以及土面与大气之间水汽压差是影响土壤蒸发的重要条件,而太阳辐射是汽化潜热能量的来源,气温和空气湿度是决定水汽压差的

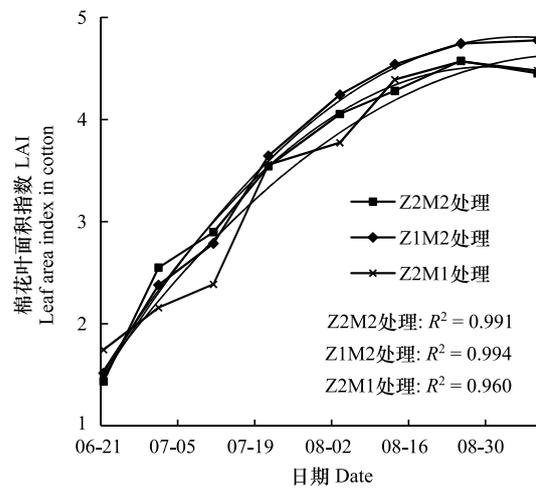


图 5 不同处理条件下棉花叶面积指数

Fig.5 Cotton leaf area index in different treatments

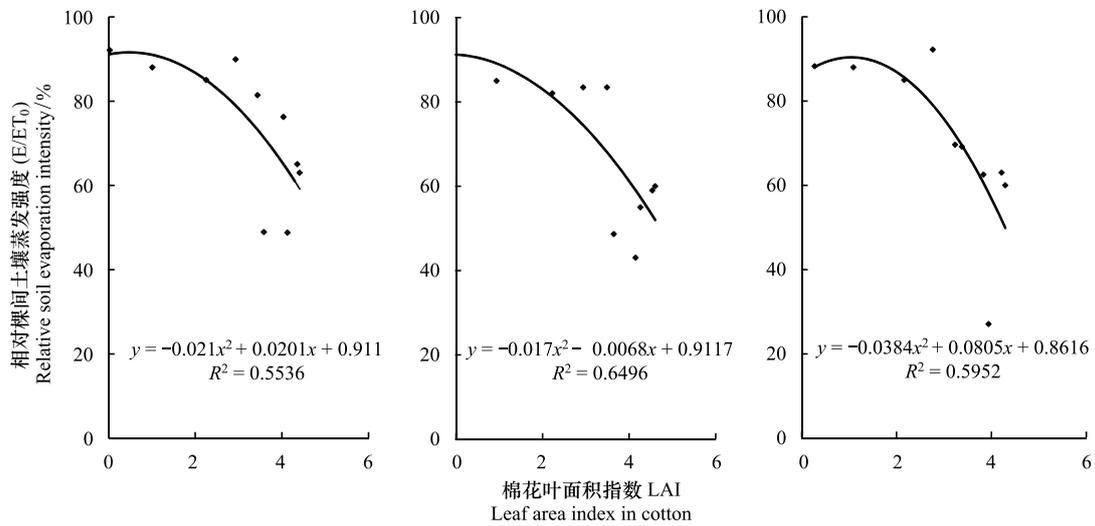


图 6 行间  $E/ET_0$  与棉花 LAI 关系

Fig.6 The relationship between row middle's  $E/ET_0$  and cotton LAI of Z2M2 treatment

重要组成部分<sup>[13-14]</sup>。因此,太阳辐射、气温和空气湿度等气象因子是影响作物棵间土壤蒸发的重要因子因此太阳辐射、气温和空气湿度日均值仅选取有太阳辐射时求均值,对辐射为 0 时忽略。

表 5 给出了当土壤含水量大于 16% (体积含水量) 时不同处理条件下枣树棵间土壤蒸发量与太阳辐射、日均温度、相对湿度的相关系数。由表可以看出:单、间作行、株间棵间蒸发与气象因素相关性虽存在一定差异,但总体上差异较小,各处理趋势相同,说明气象因素对行、株间的差异性的产生不是其主导因素。

单作棵间土壤蒸发与太阳辐射、平均温度呈极显著相关,而与相对湿度相关性较差。间作棵间土壤蒸发与太阳辐射呈极显著相关,而与平均温度、相对湿度相关性较差。而前人研究认为:棵间土壤蒸发与太阳辐射、平均气温、相对湿度相关性较高<sup>[15-16]</sup>。在本文单作中,棵间土壤蒸发与相对湿度相关性较差,可能与农艺措施、作物品种、种植密度有关。而在间作中,可能是由于棉花改变了果树周围的温度与大气温度的温差,造成棵间土壤蒸发与平均温度相关性较差。

表 5 棵间土壤蒸发与辐射、日均温、相对湿度的关系

Table 5 The relationship between soil evaporation and radiation, daily mean temperature, relative humidity

处理 Treatment	行间 Row middle's				株间 Plant middle's			
	Z2 处理	Z2M2 处理	Z1M2 处理	Z2M1 处理	Z2 处理	Z2M2 处理	Z1M2 处理	Z2M1 处理
太阳辐射 Solar radiation	0.823 **	0.659 **	0.686 **	0.647 **	0.780 **	0.777 **	0.658 **	0.690 **
平均温度 Average temperature	0.673 **	0.187	0.217	0.172	0.642 **	0.299	0.219	0.267
相对湿度 Relative humidity	-0.133	0.190	-0.179	0.08	-0.172	0.099	0.111	-0.055

### 3 讨论

在农田灌溉中,棵间土壤蒸发被认为是无效的水分消耗,确定并减少棵间土壤蒸发对于制定高效土壤节水灌溉制度具有重要意义。在对间作土壤棵间蒸发的研究中,前人多对一年生农作物进行研究,而对农林复合间作模式研究较少,一年生作物间作与农林复合间作模式有较大的差异。一年生作物,不论单作和间作皆会显著提高近地表植被覆盖度,加大水分子通过覆盖区域所受到覆盖阻力<sup>[17-18]</sup>,且覆盖阻力与覆盖程度呈现指数上升<sup>[19]</sup>。而果树对提高地表植被的覆盖方式与农作物略有差异,果树能提高植覆盖度的枝条和叶片均围绕着树冠生长。树冠距地表有一定距离,仅能对地表产生一定遮荫效果,难以产生较大的覆盖阻力<sup>[20]</sup>。因此分析农作物棵间土壤蒸发会与果树棵间土壤蒸发的各项指标得出不同的结论。

前人研究认为空气湿度的大小在一定程度上决定着水汽扩散的速度<sup>[21]</sup>,因此相对湿度对棵间土壤蒸发影响程度较高。而对枣树单作棵间土壤蒸发分析后发现,棵间土壤蒸发与相对湿度相关性较弱。说明在树冠底部,空气流动性较强,由植物蒸腾所造成的相对湿度增加被空气流动所掩盖,造成两者基本无相关性。当进行间作种植时,虽有棉花增加近地表土体上层湿度,但可能是由于果树与棉花中间存在较大距离和果树密度相对较低所致,导致间作系统下相对湿度依然与棵间土壤蒸发相关性较差。而农作物地表覆盖度高,种植密度大,植被内部空气流动较小,由植物蒸腾所引起的空气湿度增加难以被空气流动所掩盖,致使相对湿度对农作物棵间土壤蒸发造成显著影响。故由上述可知单作和间作模式差异性主要体现在近地表覆盖程度上。有研究表明<sup>[22-24]</sup>:在裸地和有植被覆盖时,太阳辐射与棵间蒸发均呈现指数关系。本文对单、间作模式下太阳辐射与棵间蒸发进行模拟(图7),同样呈现指数函数关系。说明太阳辐射与棵间蒸发呈现指数函数关系,且该关系不受作物种植模式影响。

在棵间土壤蒸发的研究中,叶面积指数是影响棵间土壤蒸发的重要因素之一。相关研究表明,农作物叶面积指数能反映下垫面状况<sup>[25]</sup>,进而改变作物棵间土壤蒸发。在农作物间作模式下<sup>[8,10]</sup>,叶面积指数均与相对棵间土壤蒸发强度有较高的拟合性,且出现显著降低趋势的指数形式。而本文对叶面积指数和枣树行间棵间土壤蒸发拟合后发现,拟合函数为开口向下的2次函数,且 $R^2$ 低于前人拟合结果。分析认为,棉花在生育初期,对枣树棵间土壤蒸发影响强度较弱,因此前期棵间土壤蒸发仅受枣树本身影响,相对棵间土壤蒸发强度下降缓慢。当棉花生长到一定高度时,对棵间土壤蒸发影响强度提高,枣树行间棵间土壤蒸发受到显著影响,开始呈下降趋势,最终拟合结果出现了开口向下的2次函数,而非前人所拟合出的呈现下降趋势较大的指数函数。

对比枣树单、间作棵间土壤蒸发量,发现间作棵间土壤蒸发显著低于单作棵间土壤蒸发。这一结果与Kubota A<sup>[26]</sup>等结论一致。但柴强等<sup>[27]</sup>对玉米/小麦棵间土壤蒸发研究发现,间作棵间土壤蒸发量低于单作玉米棵间土壤蒸发,高于单作小麦棵间土壤蒸发。这可能是由于两种间作作物的灌溉量和灌溉制度所致,棵间土壤蒸发在一定程度上与土壤含水量关系密切,且随着土壤含水量的升高,棵间土壤蒸发强度越大,且均成抛物线向上形式<sup>[28]</sup>。

本文虽对影响枣树单、间作棵间蒸发的各项指标进行了分析,但如何通过影响这些因子来降低蒸发强度从而达到农业节水目的,还有待进一步研究。其次,间作模式虽然在一定程度能够减少棵间土壤蒸发,但较总生育期耗水量相比,减少幅度相对较小,因此还需要进一步深入研究如何减少果树棵间蒸发,增加水分利用效率。

#### 4 结论

棵间土壤蒸发在农田水量平衡计算中占有重要地位,对研究作物生理发育和灌溉制度的优化与管理都有着极为重要的意义。本文基于MLS测定枣树单、间作模式下棵间土壤蒸发强度。通过分析影响棵间土壤蒸发强度的外部因素以及自身变化规律得出以下结论:

(1)在充分灌溉条件下对比单、间作两种不同种植模式,从枣树棵间土壤蒸发变化过程可以看出:枣树在萌芽展叶期各处理棵间土壤蒸发强度基本一致,而到了枣树生育中后期,单、间作棵间蒸发出现了明显的差

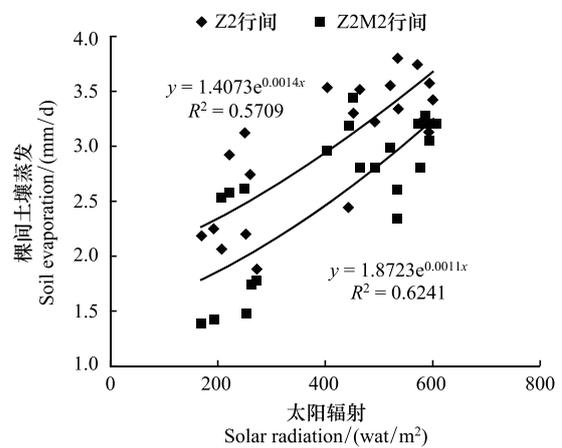


图7 单、间作行间棵间蒸发与太阳辐射关系

Fig.7 The relationship between evaporation of middle and inter monoculture and intercropping and solar radiation

异,说明在该时期棉花已经开始对枣树棵间土壤蒸发有显著影响,致使枣树棵间土壤蒸发在各个生育期出现不同程度的下降,最终导致间作棵间总蒸发量相比单作在整个生育期中减少了约 32 mm。

(2)单、间作棵间土壤蒸发受外界环境影响程度较大。在水分充分供给情况下,单作枣树棵间土壤蒸发与太阳辐射、日均温等气象因素均为显著正相关。间作模式与单作模式存在一定差异,间作枣树棵间土壤蒸发与太阳辐射为显著正相关,但与日均温相关性较弱。在尽可能消除气象因素影响下,相对土壤棵间土壤蒸发  $E/ET_0$  与土壤含水量呈开口下,整体趋势向下的 2 次函数趋势。

(3)间作棵间蒸发量与灌水量密切相关。当灌水量增大时,棵间蒸发量同样升高。间作是一个整体的系统,在减少枣树灌水量或者减少棉花灌水量时,均会引起水分运移,对枣树行、株间棵间蒸发造成不同程度的影响。

(4)间作棉花对枣树棵间蒸发造成很强的边界效应,致使枣树行间棵间土壤蒸发受到显著影响,对行间棵间蒸发与棉花叶面积指数进行拟合,其结果呈现良好的 2 次函数关系。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 赵娜娜,刘钰,蔡甲冰,于福亮,李传哲. 夏玉米棵间蒸发的田间试验与模拟. 农业工程学报, 2012, 28(21): 66-73.
- [ 2 ] Miao Q F, Rosa R D, Shi H B, Paredes P, Zhu L, Dai J X, Gonçalves J M, Pereira L S. Modeling water use, transpiration and soil evaporation of spring wheat-maize and spring wheat-sunflower relay intercropping using the dual crop coefficient approach. *Agricultural Water Management*, 2016, 165: 211-229.
- [ 3 ] 王幼奇,樊军,邵明安. 陕北黄土高原雨养区谷子棵间蒸发与田间蒸散规律. 农业工程学报, 2010, 26(1): 6-10.
- [ 4 ] Hulugalle N R, Weaver T B, Finlay L A. Fallow soil evaporation in a grey Vertisol under contrasting wheat stubble management practices in cotton cropping systems. *Soil and Tillage Research*, 2017, 165: 41-45.
- [ 5 ] GeorgianaStefan V, Mangiarotti S, Merlin O, Chanzy A. Global modeling of soil evaporation efficiency for a chosen soil type//EGU General Assembly. Vienna Austria; EGU, 2017,118:117-126.
- [ 6 ] 邓洋. 地下浸润灌溉条件下土壤蒸发试验研究. 绿色科技,2016,(05):45-47.
- [ 7 ] 王自奎,吴普特,赵西宁,王玉宝,高莹. 小麦/玉米套作田棵间土壤蒸发的数学模拟. 农业工程学报,2013,29(21):72-81.
- [ 8 ] 刘浩,段爱旺,高阳. 间作种植模式下冬小麦棵间蒸发变化规律及估算模型研究. 农业工程学报,2006,(12):34-38.
- [ 9 ] Fan Z W, An T X, Wu K X, Zhou F, Zi S H, Yang Y M, Xue G F, Wu B Z. Effects of intercropping of maize and potato on sloping land on the water balance and surface runoff. *Agricultural Water Management*, 2016, 166: 9-16.
- [ 10 ] Wang Z K, Wu P T, Zhao X N, Gao Y, Chen X L. Water use and crop coefficient of the wheat - maize strip intercropping system for an arid region in northwestern China. *Agricultural Water Management*, 2015, 161: 77-85.
- [ 11 ] Peng X B, Thevathasan N V, Gordon A M, Mohammed I, Gao P X. Photosynthetic response of soybean to microclimate in 26-Year-Old tree-based intercropping systems in southern Ontario, Canada. *PLoS One*, 2015, 10(6): e0129467.
- [ 12 ] 何春霞,孟平,张劲松,高峻,孙守家. 基于稳定碳同位素技术的华北低丘山区核桃-小麦复合系统种间水分利用研究. 生态学报, 2012, 32(7): 2047-2055.
- [ 13 ] 花圣卓,蔡昕,余新晓. 平坦下垫面植被蒸散特征及对气象因素的响应研究. 水土保持学报, 2016, 30(3): 344-350, 354-354.
- [ 14 ] 刘浩,孙景生,段爱旺,孙磊,申孝军,刘祖贵. 日光温室萝卜棵间土壤蒸发规律试验. 农业工程学报, 2009, 25(1): 176-180.
- [ 15 ] Wilson G W, Fredlund D G, Barbour S L. Coupled soil-atmosphere modelling for soil evaporation. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, 31(2): 151-161.
- [ 16 ] Ritchie J T. Influence of soil water status and meteorological conditions on evaporation from a corn canopy. *Agronomy Journal*, 1973, 65(6): 893-897.
- [ 17 ] Sauer T J, Hatfield J L, Prueger J H. Corn residue age and placement effects on evaporation and soil thermal regime. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60(5): 1558-1564.
- [ 18 ] Novak M D, Chen W J, Hares M A. Simulating the radiation distribution within a barley-straw mulch. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 102(2/3): 173-186.
- [ 19 ] Fuchs M, Hadas A. Mulch resistance to water vapor transport. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(6): 990-998.
- [ 20 ] 袁玉欣,王颖,裴保华. 模拟林木遮荫对小麦生长和产量的影响. 华北农学报, 1999, 14(S1): 54-59.
- [ 21 ] 王政友. 土壤水分蒸发的影响因素分析. 山西水利, 2003, (2): 26-27, 29-29.

- [22] Romano E, Giudici M. On the use of meteorological data to assess the evaporation from a bare soil. *Journal of Hydrology*, 2009, 372(1/4): 30-40.
- [23] 周学雅, 王安志, 关德新, 袁凤辉. 科尔沁草地棵间土壤蒸发. *中国草地学报*, 2014, 36(1): 90-97.
- [24] Hirota T, Fukumoto M. Estimating surface moisture availability for evaporation on bare soil from routine meteorological data and its parameterization without soil moisture. *Journal of Agricultural Meteorology*, 2009, 65(4): 375-386.
- [25] 刘渡, 李俊, 于强, 同小娟, 欧阳竹. 涡度相关观测的能量闭合状况及其对农田蒸散测定的影响. *生态学报*, 2012, 32(17): 5309-5317.
- [26] Kubota A, Safina S A, Shebl S M, Mohamed A E D H, Ishikawa N, Shimizu K, Abdel-Gawad K, Maruyama S. Evaluation of intercropping system of maize and leguminous crops in the Nile delta of Egypt. *Tropical Agriculture and Development*, 2015, 59(1): 14-19.
- [27] 柴强, 于爱忠, 陈桂平, 黄鹏. 单作与间作的棵间蒸发量差异及其主要影响因子. *中国生态农业学报*, 2011, 19(6): 1307-1312.
- [28] Morris R A, Garrity D P. Resource capture and utilization in intercropping: water. *Field Crops Research*, 1993, 34(3/4): 303-317.