

南疆地区田间配置对枣棉间作 耗水特性的调控效应

徐 鹏^{1,2}, 陈国栋^{1,2}, 吴全忠^{1,2}, 翟云龙^{1,2},
冯福学³, 李 玲^{1,2}, 万素梅^{1,2}, 王沛娟^{1,2}

(1.塔里木大学植物科学学院,新疆 阿拉尔 843300;2.中国农业科学院棉花研究所 塔里木大学棉花科学学院,新疆 阿拉尔 843300;
3.甘肃农业大学水利水电工程学院,甘肃 兰州 730070)

摘 要:为探明果园间作水分高效利用机理,提出适合南疆地区最优的果园间作模式,在大田试验条件下对枣棉间作系统进行研究,以种植模式(枣棉间作和枣、棉单作)和田间配置(棉花种植行数分别为 2、4、6 行;棉花株距分别为 10 cm 和 12.5 cm)为参试因子,共 9 个处理,田间随机排列,共 27 个小区,小区面积为 3 m×10 m。测定了各处理的耗水特征、产量、水分利用效率(WUE)和水分当量比(WER)等指标。结果表明:种植模式显著影响复合群体的耗水特性,枣棉间作耗水量较单作加权平均增加 9.5%,棵间蒸发量降低 11.4 mm,蒸散比降低 13.5%。棉花种植行数显著影响复合群体的耗水特性,间作 6 行棉花较间作 2 行棉花耗水量增加 9.1%~13.9%;间作 6 行棉花分别较间作 4 行和 2 行棉花提高土壤贮水消耗量 35.2 mm 和 66.3 mm,棵间蒸发量分别降低 24.2 mm 和 33.7 mm,蒸散比分别降低 16.0%和 22.2%;棉花株距变化仅对土壤贮水消耗量有显著影响,I3 处理(间作棉花 4 行)土壤贮水消耗量较 I4(间作棉花 2 行)高 24.4 mm,I1(株距 10 cm)较 I2(株距 12.5 cm)高 14.7 mm。枣棉间作群体对 40~60 cm 土层土壤贮水消耗量最高,20~40 cm 土层次之,80~100 cm 土层最低;单作枣树对土壤深层水分利用较多,单作棉花则主要消耗浅层土壤中的水分,枣棉间作能够较好地利用土壤各层的水分。就土壤贮水利用而言,增加棉花行数或减小株距有助于促进 40~80 cm 土层土壤贮水的利用。不同枣棉间作处理的 WER 都大于 1,说明枣棉间作较单作提高了农田 WUE。间作棉花种植行数为 4 行、株距为 12.5 cm 时,枣棉间作综合效益最优,产量为 7 460 kg·hm⁻²,WUE 为 11.37 kg·mm⁻¹·hm⁻²,WER 为 1.34。

关键词:枣棉间作;田间配置;耗水特性;水分利用效率

中图分类号:S344.2 **文献标志码:**A

Effects of field collocation patterns on water consumption characteristics of jujube-cotton intercropping system in Southern Xinjiang

XU Peng^{1,2}, CHEN Guo-dong^{1,2}, WU Quan-zhong^{1,2}, ZHAI Yun-long^{1,2},
FENG Fu-xue³, LI Ling^{1,2}, WAN Su-mei^{1,2}, WANG Pei-juan^{1,2}

(1. College of Plant Science, Tarim University, Alar, Xinjiang 843300, China;

2. College of Cotton Science, Institute of Cotton Research of CAAS and Tarim University, Alar, Xinjiang 843300, China;

3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: In order to explore the mechanism of high water utilization efficiency in fruit-crop intercropping, we conducted the best fruit-crop intercropping pattern suitable for southern Xinjiang and jujube-cotton intercropping system was studied in the field. Planting modes (intercropping and single cropping) and field allocation (cotton planting rows were 2, 4 and 6; cotton plant spacing was 10 cm and 12.5 cm, respectively) were used as test factors. The number of rows planted was 10 rows and plant spacing was 10 and 12.5 cm. A total of 9 treatments and 3 repetitions per treatment were randomly arranged in 27 plots with a plot area of 3 m×10 m. The water consumption

收稿日期:2018-11-08

修回日期:2019-08-18

基金项目:国家自然科学基金(31601272,31560377);塔里木大学校长基金(TDZKJC201606)

作者简介:徐鹏(1990-),男,陕西城固人,硕士,研究方向为农业可持续发展理论与研究。E-mail:18193707786@163.com

通信作者:陈国栋(1986-),男,副教授,博士,主要从事作物高产栽培理论与技术研究。E-mail:cgdzky@163.com

characteristics, yield, water use efficiency and water equivalence ratio of each treatment were determined. The results showed that planting mode significantly affected water consumption characteristics of composite population. Water consumption of jujube-cotton intercropping increased by 9.5% on average compared with single cropping. Inter-tree evaporation decreased by 11.4 mm and evapotranspiration ratio (E/ET) by 13.5%. The number of rows planted in cotton significantly affected the water consumption characteristics of the composite population. The water consumption of intercropping 6 rows of cotton increased by 9.1%~13.9% compared with intercropping 2 rows of cotton. Intercropping 6 rows of cotton increased soil water storage consumption by 35.2 mm and 66.3 mm, respectively, compared with intercropping 4 rows and 2 rows of cotton. Inter-tree evaporation decreased by 24.2 mm and 33.7 mm, respectively. E/ET decreased by 16.0% and 22.2%, respectively. The variation of cotton plant spacing only had a significant effect on soil water storage consumption. Soil water storage consumption in I3 treatment (intercropping cotton 4 lines) was 24.4 mm higher than that in I4 treatment (intercropping cotton 2 lines). I1 (plant spacing 10 cm) is 14.7 mm higher than I2 (plant spacing 12.5 cm). Intercropping group of jujube and cotton had the highest water consumption for soil storage in 40~60 cm soil layer, followed by 20~40 cm soil layer, 80~100 cm soil layer was the lowest. Single-cropping jujube trees made more use of deep soil moisture. Cotton monocropping mainly consumed water in shallow soil. Intercropping of jujube and cotton could make better use of water in different soil layers. As far as the utilization of soil water storage was concerned, increasing the number of rows of cotton or decreasing the plant spacing was helpful to promote the utilization of soil water storage in 40~80 cm soil layer. The WER of different intercropping treatments of jujube and cotton were all greater than 1, which indicated that jujube and cotton intercropping improved WUE compared with monoculture. When the number of intercropping rows and plant spacing were 4 and 12.5 cm, the comprehensive benefit of jujube and cotton intercropping was the best, the yield was $7\,460\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, WUE was $11.37\text{ kg}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{hm}^{-2}$, and WER was 1.34.

Keywords: jujube-cotton intercropping; field collocation pattern; water consumption characteristic; water use efficiency

枣棉间作系统是一种集约化利用土地资源的农林间作复合系统^[1-3]。这种整合方式通过充分利用土地资源,增加间作系统作物多样性,实现果树和棉花的经济效益最大化^[4]。新疆地处亚欧大陆腹地,特殊的地理环境造成了水分的不均衡性,近年来,各地的水资源匮乏,出现了需求大于供给的局面^[5-6],南疆阿拉尔垦区位于塔里木盆地腹地,水资源的缺乏加之农业生产上灌溉水资源的浪费,使农果间作面积逐年缩减,农果间作的产量和效益随之降低,这与响应国家“稳棉、增粮、兴畜、促果”战略的农果间作发展理念不符,所以现阶段急需基于限量供水的农林间作节水增效理论和技术研究^[7-9]。目前,许多学者认为合理的农林间作复合系统种植模式可以有效增加农林生产系统效益、提高水分利用率^[10-12],也有研究者认为农林间作复合系统需要从物种组合、种植结构、田间配置、水肥运筹等方面进行研究,建立一套能够指导间作制度应用的理论体系^[13-15],为农果间作技术体系的应用提供技术支撑。

间作系统田间配置主要指不同作物在复合群体中的占地比、株行距以及两种作物共处期的长短

而产生的空间占有量。不同田间配置方式的研究中,例如前人研究认为花生大垄双行生产力最高,群体结构种植配置适宜,能够充分利用光能、灌水量、土壤贮水量等,提高产量和水分生产力^[16-17]。武进普等^[18]认为,间作种植比单作种植需水量大,耗水量随不同灌水量的提高而增加,同时利用少耕留茬的技术措施,可在间作模式中通过提高灌水量来降低作物的耗水量。柴强等^[19]认为,与传统灌溉模式相比,交替灌溉可显著降低间作的耗水量。冯福学等^[20]认为间作耗水量随灌水量和施氮量的增大而提高,水分利用率随灌水量的增大而减小,在施氮量 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、灌溉定额 337.5 mm 时,既能高产,又能提高水分利用率。陈国栋等^[21]认为在中等灌水水平下,间作作物的产量高于低灌水水平,与高灌水水平差异不显著,且水分利用率最高。纵观以往有关对间作水分利用的研究,大部分都是针对作物与作物间作的耗水机制研究,但对于农果间作复合系统耗水特性的研究较少,本研究以枣树间作棉花为对象,在不同田间配置下,通过研究间作复合系统耗水特征、产量、水分利用效率和水分当量等指标来分析田间配置对枣棉间作耗水特性的调控效

应,为南疆地区农果间作技术的建立提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验在塔里木大学园艺试验站(40°32′20″N, 81°17′57″E)进行。试验区位于新疆塔里木盆地北部,属暖温带大陆干旱荒漠区,海拔1 015 m,无霜期220 d,多年平均降水量约47 mm,年蒸发量约2 218 mm,年平均气温10.8℃,≥0℃和≥10℃的积温分别为3 910℃和4 113℃;年均太阳辐射610 kJ·cm⁻²,日照时数2 900 h,4—10月平均日照长9.5 h。土地资源广阔,光热资源丰富,日照时数长,昼夜温差大,降水稀少,适于发展林果业和种植棉花。土壤类型为粘壤土,土壤容重1.29 g·cm⁻³,碱解氮33.6 mg·kg⁻¹,速效钾107.3 mg·kg⁻¹,速效磷18.7 mg·kg⁻¹,有机质7.79 g·kg⁻¹,总盐2.01 g·kg⁻¹。枣园间作是当前塔里木盆地作物种植的重要模式之一,其中枣棉间作效益较好,试验期间有效降雨量77.6 mm,高于多年平均降雨量,为典型丰水年(图1)。

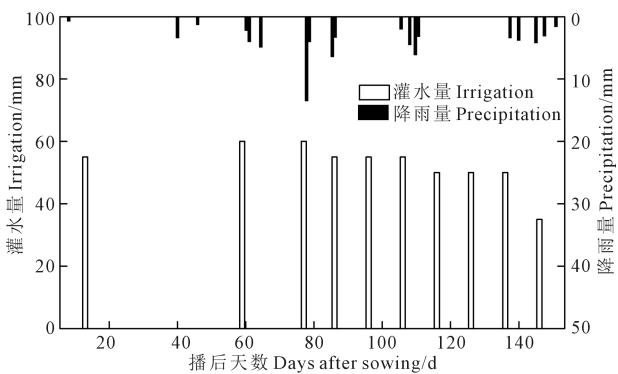


图1 棉花生育期内灌水量和降雨量分布情况
Fig.1 Irrigation amount and precipitation distribution during the cotton growth period

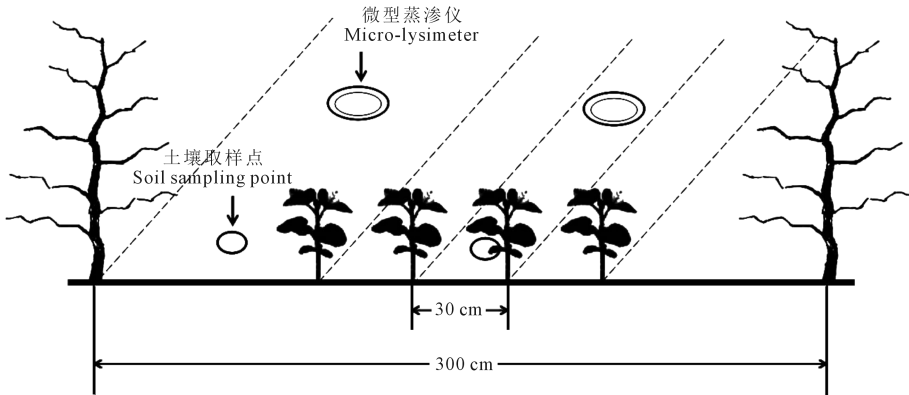


图2 枣树间作棉花田间示意图
Fig.2 Field layout of jujube-cotton intercropping

1.2 试验设计

试验设2种植植模式(间作和单作)和2种田间配置模式(枣树行间棉花种植行数和棉花株距),以枣树、棉花单作为对照料,共9个处理(表1),每处理3次重复,田间随机排列,共27个小区,小区面积为3 m×10 m。棉花采用地膜覆盖,灌溉方式为滴灌,灌溉制度见图1。

供试棉花品种为瑞杂一号,2018年4月13日播种,于10月8日进行第一次收获;枣树为成龄(第五年)灰枣,株行距配置为1 m×3 m,于10月20日收获。施肥情况按照红枣、棉花施肥标准,各处理间红枣和棉花的施肥量、灌水量均一致,试验地其他管理措施同大田。

1.3 测定指标及计算方法

1.3.1 土壤含水量 在棉花播前和收获后用取土烘干法分别测定0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm等5个土层的土壤含水量,于棉花带中央和枣树与棉花中央设2个取样点(图2),以2个点的平均值作为一个小区的土壤含水量测定值。

表1 试验处理及代码

Table 1 Experiment design and treatment codes			
种植模式 Planting pattern	田间配置模式 Field collocation pattern		处理代码 Treatment codes
	棉花种植行数 Rows of cotton	棉花株距 Row space/cm	
枣树间作棉花 Jujube-cotton intercropping	2	10.0	I1
		12.5	I2
	4	10.0	I3
		12.5	I4
	6	10.0	I5
		12.5	I6
单作枣树 Sole jujube	0	—	J
单作棉花 Sole cotton	10	10.0	C1
	10	12.5	C2

1.3.2 土壤贮水量与土壤贮水消耗量 不同土层的土壤贮水量为:

$$W = \theta m \times \rho b \times H \times 10$$

式中, W 为土壤贮水量(mm), θm 为土壤质量含水量(%), ρb 为土壤干容量($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), H 为土壤深度(cm),10为单位转换系数。土壤贮水消耗量计算公式为: $\Delta W = W_{\text{播前}} - W_{\text{收后}}$ 。

1.3.3 棵间蒸发量 用自制的微型蒸渗仪(Micro-Lysimeter)测定。微型蒸渗仪用内径 10 cm、壁厚 5 mm、高 15 cm 的 PVC 管制作。每次取土时将其垂直压入作物行间土壤内,使其顶面与地面齐平,取原状土,然后用塑料胶带封底;另用内径为 12 cm 的 PVC 管做成外套,固定于行间,使其表面与附近土壤持平,操作时不能破坏周围土体结构。用电子天平称重测定,3 d 内重量的差值为蒸发量(mm)。为保证微型蒸渗仪内部的土壤水分剖面与周围土壤相一致每隔 3~5 d 更换原状土 1 次,降雨或灌溉后立即更换。间作小区均安置两套微型蒸渗仪(图 2),单作小区安装一套,间作各小区棵间蒸发量为小区内蒸渗仪测定值的平均值。

1.3.4 作物阶段耗水量与总耗水量 作物阶段耗水量为:

$$ET = P + I + \Delta W(t_1 - t_2) + K$$

式中, P 为 t_1 至 t_2 生育阶段降水量(mm), I 为 t_1 至 t_2 生育阶段灌溉量(mm), $\Delta W(t_1 - t_2)$ 为 t_1 至 t_2 生育阶段土壤贮水消耗量(mm), K 为阶段内地下水补给量(mm)。由于试区地下水位极深不存在向上的水流量,在节水灌溉条件下,水分渗漏量和径流量可以忽略不计。全生育期总耗水量为:

$$ET = P + I + \Delta W$$

1.3.5 水分利用效率与水分当量比 作物水分利用效率为:

$$WUE = Y/ET$$

式中, WUE 为水分利用效率($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$), Y 为经济产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); ET 为生育期总耗水量(mm)。

间作水分当量比为:

$$WER = WER_j + WER_c = WUE_{ji}/WUE_{js} + WUE_{ci}/WUE_{cs}$$

式中, WER 为间作水分当量比, WER_j 、 WER_c 为间作系统中红枣、棉花的相对水分利用效率, WUE_{ji} 、 WUE_{js} 、 WUE_{ci} 、 WUE_{cs} 分别表示间作、单作红枣水分利用效率和间作、单作棉花水分利用效率。当 $WER < 1$ 时,说明间作相对于单作降低了农田系统的水分利用效率;当 $WER > 1$ 时,说明间作提高了水分利用效率。

1.3.6 蒸散比(E/ET) 是棵间蒸发占蒸散量的比例,用于衡量水分利用率高低的指标, E/ET 越大表示水分利用率越低。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2007 进行数据整理,用 SPSS 17.0 进行方差分析和显著性检验(LSD 法),用 origin 9.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 田间配置对农田总耗水量及其来源的影响

种植模式和田间配置对农田总耗水量、灌溉水消耗量、降水消耗量及土壤贮水量消耗量均有显著影响,南疆地区作物耗水主要来源于灌溉水(表 2)。3 种植模式的耗水量比较,枣棉间作模式的总耗水量最大,单作棉花次之,单作枣树最小。以单作作物耗水量平均值为对照,与间作作物耗水量平均值进行比较,结果发现,枣棉间作耗水量较单作增加 9.5%,说明极端干旱区间作群体的总耗水量高于单作。在不同田间配置下间作耗水量比较,总耗水量随着棉花行数的增加而显著增加,随着棉花株距的增大而减少,但差异不显著。与单作相比,4 行棉花处理和 6 行棉花处理耗水量分别增加 6.9%~10.9%和 14.7%~16.9%,且增加趋势显著。不同间

表 2 不同处理田间耗水量的水分来源及其占总耗水量的比例

Table 2 Source of water consumption and its proportion to total water consumption in different treatments

处理 Treatment	总耗水量/mm Total water consumption	灌水量 Irrigation		降雨量 Precipitation		土壤贮水消耗量 Soil water storage consumption	
		数量/mm		数量/mm		数量/mm	
		数量/mm Amount	比例/% Percentage	数量/mm Amount	比例/% Percentage	数量/mm Amount	比例/% Percentage
I1	644.7bcd	525	81.44	77.60	12.04	42.10c	6.53
I2	630.0cd	525	83.34	77.60	12.32	27.40d	4.34
I3	680.6ab	525	77.14	77.60	11.40	78.00b	11.46
I4	656.2bc	525	80.01	77.60	11.83	53.60c	8.16
I5	717.4a	525	73.18	77.60	10.82	114.80a	16.01
I6	703.6a	525	74.61	77.60	11.03	101.00a	14.36
J	607.1d	525	86.48	77.60	12.78	4.50f	0.74
C1	617.7d	525	84.99	77.60	12.56	15.10e	2.44
C2	615.8d	525	85.26	77.60	12.60	13.20e	2.14

注:同列数据后不同字母表示 LSD 检测在 $P<0.05$ 水平上差异显著,下同。
Note: Values in the same column show significant difference at $P<0.05$ level, the same below.

作处理间比较,6 行棉花处理较 2 行棉花处理显著增加耗水量 9.1%~13.9%,I5 和 I6 处理较 I4 分别显著增加耗水量 9.3%和 7.2%,I3 处理较 I2 处理显著增加耗水量 8.0%。同时,由表 2 可知,间作土壤贮水量与总耗水量的比例显著高于单作,以 3 种模式的平均数进行比较,间作土壤贮水量消耗量较单作棉花高 53.0 mm,较单作枣树高 62.7 mm,较单作加权高 57.9 mm,说明间作群体较单作有利于土壤贮水的利用。土壤贮水消耗量随着棉花行数的增加、株距的减小而显著增大,6 行棉花处理分别较 4 行和 2 行棉花处理显著提高土壤贮水消耗量 35.2 mm 和 66.3 mm,I3 较 I4、I1、I2 处理分别高 24.4、35.9 mm 和 50.6 mm,I1 较 I2 处理高 14.7 mm。由此表明,在一定的范围内,增加枣棉间作群体中棉花的行数或减小棉花株距有利于促进土壤贮水的利用。

2.2 田间配置对土壤贮水消耗量垂直分布的影响

如图 3 所示,不同处理生育期内 0~100 cm 土层的土壤贮水消耗量受种植模式和田间配置的影响。土壤贮水消耗量除 I2 处理 60~100 cm 土层低于单作枣树外,间作处理 5 个土层都显著高于单作。单作枣树主要消耗 60~100 cm 土层的土壤水分,单作棉花则主要消耗 0~60 cm 土层的土壤水分,且棉花株距影响 60~80 cm 土层的土壤贮水消耗量。分析间作群体的土壤贮水消耗量,40~60 cm 土层土壤贮水消耗量最高,20~40 cm 土层次之,80~100 cm 土层最低。不同田间配置下间作土壤贮水消耗量比较,6 行棉花处理 0~60、80~100 cm 土层土壤贮水消耗量显著高于 4 行和 2 行棉花处理,4 行棉花处理 40~80 cm 土层土壤贮水消耗量显著高于 2 行

棉花处理;20~80 cm 土层(6 行棉花)、0~100 cm 土层(4 行棉花)和 0~20、60~100 cm 土层(2 行棉花)土壤贮水消耗量随着棉花株距的减小而显著增大。上述结果说明,单作枣树对土壤深层水分利用较多,单作棉花则主要消耗浅层土壤中的水分,枣棉间作能够较好地利用土壤各层的水分,就土壤贮水利用而言,增加棉花行数或减小株距有助于促进 40~80 cm 土层土壤贮水的利用。

2.3 田间配置对各生育时期农田棵间蒸发量 (E)、阶段耗水量 (ET) 及 E/ET 的影响

不同处理生育期内的棵间蒸发量主要受种植模式和田间配置的影响,而且不同时期棵间蒸发量对田间配置的响应不同(图 4)。3 种植模式下比较,棵间蒸发总量表现为单作枣树最大,枣棉间作次之,单作棉花最小,分别为 267.0、222.5 mm 和 200.8 mm;与单作加权平均比较,间作棵间蒸发总量较单作低 11.4 mm,说明在一定程度间作群体较单作能够抑制农田蒸发。不同田间配置下比较,6 行棉花处理棵间蒸发总量较 2 行和 4 行棉花分别降低 33.7 cm 和 24.2 cm;改变棉花株距各处理间的棵间蒸发量无显著差异。

不同处理作物生育期内的蒸散比因种植模式和田间配置的不同而不同(图 5),3 种植模式下比较,枣棉间作 E/ET 较单作加权平均低 13.5%。不同田间配置下比较,6 行棉花处理 E/ET 值较 4 行和 2 行棉花分别低 16.0%和 22.2%,I3、I4 处理 E/ET 值较 I2 处理分别低 10.1%和 8.0%,同总蒸发量相似,改变棉花株距各处理间的 E/ET 值无显著差异。

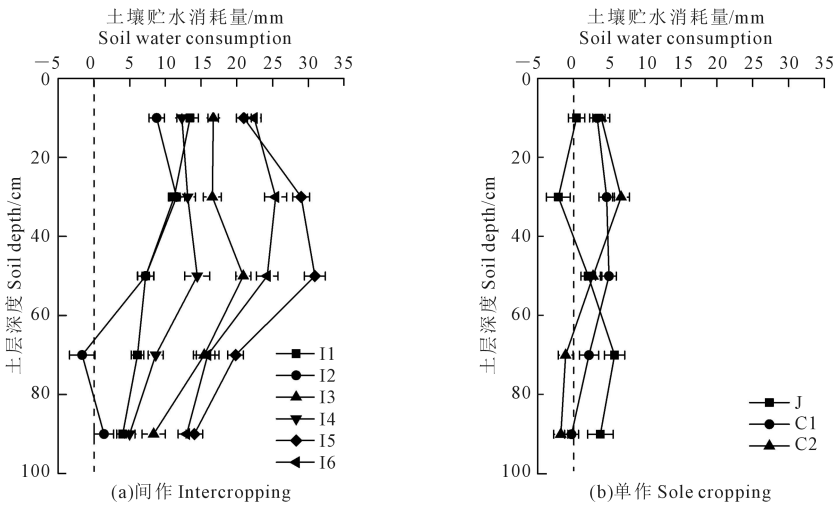


图 3 不同处理全生育期 0~100 cm 土层土壤贮水消耗量

Fig.3 Soil water consumption in 0~100 cm soil layer of whole growth period under different treatments

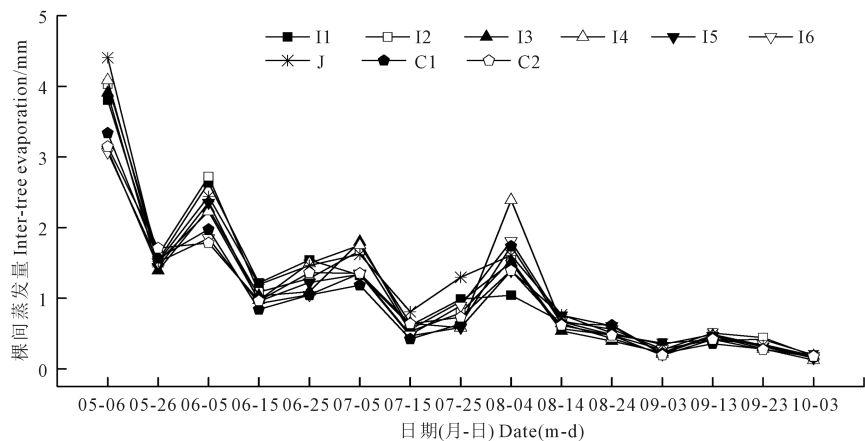
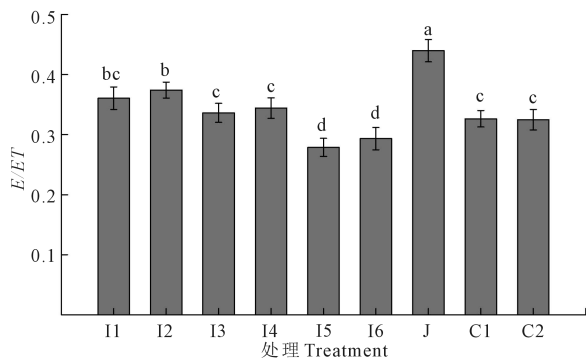


图 4 不同处理生育阶段棵间蒸发量动态变化

Fig.4 Dynamic change of inter-tree evaporation during cotton growth stage in different treatments



注:图中小写字母表示处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著。
Note: The lowercase letters in the figure indicate that there is a significant difference between treatments at $P<0.05$ level.

图 5 不同处理的蒸散比

Fig.5 Soil evaporation to evapotranspiration ratio in different treatments

为进一步明确枣棉间作耗水特征,分析了不同处理各生育时期 E 、 ET 及 E/ET 的变化,结果表明(表 3),苗期 E/ET 值最大,为 42.43;花铃期次之,为 21.05;吐絮期最小,为 10.89。花铃期 E 最大,为 64.98 mm,苗期次之,为 38.83 mm,吐絮期最小,为 11.04 mm。花铃期 ET 同样最大,为 310.88 mm,蕾期次之,为 143.82 mm,苗期最小,为 92.10 mm。说明苗期是减少土壤无效蒸散的关键时期,花铃期是间作棉田耗水的主要时期。

不同种植模式,各生育时期 E 、 ET 及 E/ET 的变化趋势基本一致。单作枣树的 E 和 E/ET 值都最高, E 最高为 79.79 mm(棉花花铃期), E/ET 值最大为 52.02 mm(棉花苗期),枣棉间作 ET 最高,为 320.31 mm(棉花花铃期)。田间配置影响各生育时期 E 、 ET 及 E/ET ,苗期间作 2 行棉花处理的 E 和 E/ET 最大,分别较 4 行、6 行处理高 20.2% 和 15.3%、28.5% 和 33.5%,6 行棉花处理的 ET 最大,

分别较 2 行和 4 行处理高 8.4% 和 15.8%;蕾期 2 行、4 行棉花处理的 E 和 E/ET 显著高于 6 行棉花处理,分别较 6 行处理高 14.2% 和 13.7%、27.2% 和 21.0%,6 行棉花处理的 ET 最大,较 2 行处理高 11.5%;花铃期各处理的 E 差异不显著, ET 和 E/ET 除 I3 外无显著差异。吐絮期 2 行棉花处理的 E 最大,分别较 4 行、6 行处理高 23.6%、15.2%,2 行、4 行棉花处理的 E/ET 显著高于 6 行棉花处理,分别较 6 行处理高 37.1%、53.0%,6 行棉花处理的 ET 分别较 2 行和 4 行处理高 18.8% 和 45.6%,2 行棉花处理的 ET 较 4 行处理高 22.6%。棉花株距影响花铃期、吐絮期 ET 和 E/ET ,花铃期 I3 处理的 ET 最大, E/ET 最小,吐絮期 I3 处理的 ET 最小, E/ET 最大。结果表明,增加棉花行数有利于减少无效蒸散量,棉花行数为 4 行时,减少棉花株距能够显著提高间作水分的有效性。

2.4 田间配置对枣棉间作产量、水分利用效率和水分当量比的影响

种植模式和田间配置对经济产量和水分利用效率具有显著的影响。与单作加权平均比较,枣棉间作较单作经济产量增加 36.9%, WUE 提高 24.8%;随棉花种植行数的增加,间作棉花产量、间作群体产量和间作棉花 WUE 、间作群体 WUE 均呈先增大后减小的趋势,间作 4 行棉花处理的棉花产量、群体产量和棉花 WUE 、群体 WUE 分别较间作 2 行高 42.2%、8.1% 和 37.1%、4.4%,较间作 6 行高 7.9%、14.0% 和 14.8%、21.2%;红枣产量和 WUE 呈降低趋势,间作 6 行棉花处理的红枣产量和 WUE 分别较间作 2 行低 28.5% 和 35.3%,较间作 4 行低 17.5% 和 22.5%,间作 4 行棉花处理的红枣产量和 WUE 分别较间作 2 行低 13.7% 和 16.6%;随着株距的增大,棉

花产量呈降低趋势,红枣产量、群体产量呈增加趋势,I5 处理棉花产量较 I6 高 9.0%,I1 处理红枣产量、群体产量较 I2 分别增加 14.4%和 8.1%,I3 处理红枣产量较 I4 增加 9.1%;*WUE* 随株距变化趋势同产量,I5 处理 *WUE* 较 I6 高 6.9%,I1 处理红枣 *WUE*、群体 *WUE* 较 I2 分别增加 14.5%和 8.0%,I3 处理红枣 *WUE*、群体 *WUE* 较 I4 分别增加 13.1%和 6.7%。从枣棉间作综合效益来看,I4 处理产量和水分利用效率均最高,即棉花种植行数为 4 行,株距为 12.5 时,枣棉间作具有最高的产量(7 460 kg · hm⁻²)和水分利用效率(11.37 kg · mm⁻¹ · hm⁻²)。

水分当量比(*WER*)能够较为直观地反映间作种植模式较单作种植模式农田水分利用能力增减的程度。由表 4 可以看出枣棉间作系统 *WER* 均大于 1,说明枣棉间作较单作提高了农田水分利用效率,在水分利用有效性方面具有间作优势。田间配置显著影响枣棉间作系统的水分当量比,总体来看,4 行棉花处理的 *WER* 最高,2 行棉花处理的 *WER* 次之,6 行棉花的 *WER* 最小;2 行和 4 行棉花处理 *WER* 较 6 行棉花处理分别高 20.6%和 13.1%,

I3 和 I4 处理 *WER* 较 I1 处理分别高 10.8%和 7.8%。棉花株距对 *WER* 的影响受棉花行数的影响,棉花行数为 6 行时,减小棉花株距 *WER* 较常规株距提高 6.2%;I4 处理下枣棉间作具有最高的 *WER*(1.34)。

同一灌水量水平下,通过表 4 可以看出,枣棉间作中棉花产量随着株距的增大而减小。与 I1 处理相比,I2 棉花产量下降 29 kg · hm⁻²,I4 处理与 I3 相比棉花产量下降 107 kg · hm⁻²,I6 处理与 I5 相比棉花产量下降 303 kg · hm⁻²,但单作棉花产量随株距的增大而增大,C2 处理比 C1 处理提高 254 kg · hm⁻²,说明 C2 处理株距在 12.5 cm 时,产量最高。I3 处理棉花种植行数为 4 行,株距 10 cm 时,棉花产量最高。与 I1 处理相比,I2 处理红枣产量增加 559 kg · hm⁻²,I4 处理与 I3 相比棉花产量下降 312 kg · hm⁻²,I6 处理与 I5 相比棉花产量下降 38 kg · hm⁻²,说明红枣产量随棉花种植行数的增加产量变化较小。从枣棉间作综合产量来看,I4 枣棉间作处理与其他枣棉间作和单作棉花处理相比,产量最高,表明当棉花种植行数为 4 行,棉花间距为 12.5 时,枣棉间作综合产量为最高(7 460 kg · hm⁻²)。

表 3 不同处理各生育期农田棵间蒸发量(*E*)、耗水量(*ET*)及蒸散比(*E/ET*)的变化

Table 3 Variation of inter-tree evaporation (<i>E</i>), water consumption (<i>ET</i>) and evapotranspiration ratio (<i>E/ET</i>) during each growth stage of cotton in different treatments												
处理 Treatment	苗期 Seeding			蕾期 Budding			花铃期 Flowering and boll-forming			吐絮期 Boll Opening		
	<i>E</i> /mm	<i>ET</i> /mm	<i>E/ET</i> /%	<i>E</i> /mm	<i>ET</i> /mm	<i>E/ET</i> /%	<i>E</i> /mm	<i>ET</i> /mm	<i>E/ET</i> /%	<i>E</i> /mm	<i>ET</i> /mm	<i>E/ET</i> /%
I1	43.60a	89.75b	48.58a	22.00b	141.26ab	15.57b	63.56bc	302.94bc	20.98b	12.18a	110.72b	11.00bc
I2	44.45a	87.76b	50.65a	21.27bc	139.04b	15.30b	63.39bc	297.07bc	21.34b	13.00a	106.08b	12.26b
I3	37.59b	97.47ab	38.57b	21.25bc	149.70ab	14.20c	63.11bc	370.43a	17.04d	11.36b	62.98d	18.04a
I4	35.65bc	92.26ab	38.65b	21.81b	143.91ab	15.15bc	67.27b	306.07bc	21.98b	9.02c	113.91b	7.92e
I5	37.90b	104.54a	36.25b	18.83c	160.21a	11.76d	59.70c	323.76b	18.44d	10.68bc	128.93a	8.28de
I6	38.48b	101.04a	38.08b	19.05c	152.40a	12.50d	66.56b	321.57b	20.70bc	11.18b	128.62a	8.69cde
J	43.91a	84.40b	52.02a	26.78a	134.46b	19.92a	79.79a	289.89c	27.53a	11.85ab	98.35c	12.05b
C1	33.34c	85.94b	38.80b	16.16d	136.57b	11.84d	59.29c	293.46bc	20.20c	9.69c	101.71bc	9.52cd
C2	34.56bc	85.72b	40.32ab	21.76b	136.81b	15.90b	62.11bc	292.72bc	21.22b	10.36bc	100.51bc	10.31c

表 4 不同田间配置下枣棉间作系统的产量、水分利用效率和水分当量比

Table 4 Yield, water use efficiency and water equivalent ratio of jujube-cotton intercropping system							
处理 Treatment	产量 Yield/kg			水分利用效率 <i>WUE</i> /(kg · mm ⁻¹ · hm ⁻²)			水分当量比 <i>WER</i>
	棉花 Cotton	红枣 Jujube	总计 Total	棉花 Cotton	红枣 Jujube	总计 Total	
I1	2673d	3864c	6537b	4.15d	5.99b	10.14c	1.21b
I2	2644d	4423b	7067ab	4.10d	6.86a	10.96ab	1.27ab
I3	3834b	3421d	7255a	5.63ab	5.03c	10.66bc	1.30a
I4	3727b	3733c	7460a	5.68a	5.69b	11.37a	1.34a
I5	3655b	2933e	6588b	5.09b	4.09d	9.18c	1.13c
I6	3352c	2971e	6323c	4.76c	4.22d	8.99d	1.06d
J	—	5576a	5576d	—	9.18a	9.18c	—
C1	4613a	—	4613e	7.47a	—	7.47e	—
C2	4867a	—	4867e	7.90a	—	7.90e	—

同一灌水量水平下,随着棉花种植行数和株距的增加水分利用效率逐渐降低,与 I1 处理相比, I2 处理棉花水分利用效率降低 0.05%, I4 处理与 I3 相比,红枣水分利用效率增加 0.66%, I6 处理与 I5 相比,红枣水分利用效率提高 0.13%。与 I1 处理相比, I2 处理红枣水分利用效率提高 0.87%, I4 处理与 I3 相比,红枣水分利用效率增加 0.05%, I6 处理与 I5 相比,棉花水分利用效率减小 0.33%,从综合水分利用效率来看,说明水分利用效率与产量有直接的关系,在枣棉间作棉花种植行数为 4 行,株距为 12.5 cm 时,产量最高,水分利用效率也最高 ($11.37 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

3 讨论与结论

多数研究表明,田间不同的配置种植对间作群体都有不同的影响,本研究表明间作群体较单作有利于土壤贮水的利用。土壤贮水消耗量随着棉花行数、株距的减小而显著增大,由此表明,在一定的范围内,增加枣棉间作群体中棉花的行数或减小棉花株距有利于促进土壤贮水的利用,结果与前人研究相似。刘郁娜等^[22]认为杏棉间作系统采用适宜的田间配置,可提高干物质积累量和杏棉间作棉花的产量。王小春等^[23]认为不同的田间配置,种植行数不同,播种量一致处理,在 4 行的田间配置下小麦和玉米间作产量最高。Wang Q 等^[24]认为枣棉间作中种植密度对棉花地上部干物质和产量的影响较为显著,在株距 18 cm 的中间密度中获得最高产量。叶林等^[25]认为玉米种植行距在 40~50 cm 时能够有效提高水分利用效率,李永发等^[26]认为枣棉间作不同种植间距对枣树的影响要远远大于对棉花的影响,枣棉间作种植枣树间距在 120 cm 时、棉花间距在 100 cm 时能显著提高枣树和棉花的产量及水分利用效率。

农林间作系统土壤水分特征是反应土壤水分利用率最重要的指标之一^[27],深根植物和浅根植物根据占据土壤空间的不同,能形成农林间作系统中的互补作用,对农田中的土壤水分利用率得到提高,有利于增加土壤的贮水量,间作可以减小棵间蒸发量,形成小区植物生长小气候,在不增加灌水量的同时增加单位面积综合产量,本研究认为在枣棉间作棉花种植行数为 4 行,株距为 12.5 cm 时,产量最高,水分利用效率得到明显的提高。柴强等^[28]认为小麦间作玉米的棵间总蒸发量显著大于单作的小麦和玉米,间作的生育期延长是棵间总蒸发量增大的原因之一。本研究表明不同处理生育期内

的棵间蒸发量主要受种植模式和田间配置的影响,而且不同时期棵间蒸发量对田间配置的响应不同,棵间蒸发总量表现为单作枣树最大,枣棉间作次之,单作棉花最小,说明在一定程度上间作群体较单作能够抑制农田蒸发,可能在于农田作物间作与农林间作之间具有较大的差别,这些都与种植品种、地力、施肥、喷施农药、天气变化等有关。凌强等^[29]认为保证枣树生育期内正常生长,间作枣树主要影响集中在 0~60 cm 较浅土层的土壤水分,而对 60 cm 以下的土壤含水层影响比较微弱。本研究表明枣棉间作群体的 40~60 cm 土层土壤贮水消耗量最高,20~40 cm 土层次之,80~100 cm 土层最低,这与本研究结论不尽相同,结论差异主要是气候条件不同,与极端干旱条件有关,致使研究结果不同。

种植模式和田间配置对农田总耗水量、灌溉水消耗量、降水消耗量及土壤贮水量消耗量均有显著影响,土壤贮水消耗量随着棉花行数、株距的减小而显著增大,在一定的范围内,增加枣棉间作群体中棉花的行数或减小棉花株距有利于促进土壤贮水的利用。Zhang D 等^[30]认为枣棉间作中棉花叶面积随种植密度的增加而降低,通过优化种植密度来提高产量。本研究表明在枣棉间作土壤贮水利用率方面,单作枣树对土壤深层水分利用较多,单作棉花则主要消耗浅层土壤中的水分,枣棉间作能够较好地利用土壤各层的水分,增加棉花行数或减小株距有助于促进 40~80 cm 土层土壤贮水的利用。枣棉间作中田间配置不同,棵间蒸发量也会不同,不同处理生育期内的棵间蒸发量主要受种植模式和田间配置的影响,而且不同时期棵间蒸发量对田间配置的响应不同,不同田间配置下比较,6 行棉花处理棵间蒸发总量较 2 行和 4 行棉花分别降低 33.7 cm 和 24.2 cm;改变棉花株距各处理间的棵间蒸发量无显著差异。田间配置中不同处理的耗水量及 E/ET 在作物生育期内,蒸散比因种植模式和田间配置的不同而发生改变,棉花株距影响花铃期、吐絮期 ET 和 E/ET,花铃期 I3 处理的 ET 最大, E/ET 最小,吐絮期 I3 处理的 ET 最小, E/ET 最大,可以看出增加棉花行数有利于减少无效蒸发量,棉花行数为 4 行时,减少棉花株距能够显著提高间作水分的有效性。Bai W^[31]等认为随着作物和杏子产量的增加,混合系统的用水效率在很大程度上提高了半干旱地区雨养农业的生产力和水资源利用效率。白伟等^[32]认为土壤水分空间分布表明仁用杏仁和谷子间作水分竞争关系较小,当水分当量比均大于 1 时,表现出较好的水分优势,间作系统水分优势最

为明显,水分当量比达到 1.45。本研究表明枣棉间作系统 *WER* 均大于 1,棉花株距对 *WER* 的影响受棉花行数的影响,棉花行数为 6 行时,减小棉花株距 *WER* 较常规株距提高 6.2%,说明枣棉间作较单作提高了农田水分利用效率,在水分利用有效性方面具有间作优势,因此,南疆地区推广发展适宜的枣棉间作田间配置模式具有重要的实践意义。

参 考 文 献:

[1] 贾微,孙占祥,白伟,等.农林间作复合生态系统研究进展[J]. 辽宁农业科学,2013,(4):41-46.

[2] 董宛麟,张立祯,于洋,等.农林间作生态系统的资源利用研究进展[J].中国农学通报,2011,27(28):1-8.

[3] 许迪,龚时宏,李益农,等.作物水分生产率改善途径与方法研究综述[J].水利学报,2010,41(6):631-639.

[4] 祁卫江,邵成利,王建庆.新疆棉花新品种在枣棉间作模式中的种植表现[J].农业工程技术,2017,37(5):68-69.

[5] 邓铭江.破解内陆干旱区水资源紧缺问题的关键举措——新疆干旱区水问题发展趋势与调控策略[J].中国水利,2018,(6):14-17.

[6] 谢晖,徐永军,侯晓华,等.极端干旱区平原性水库耗水量初步分析——以新疆阿克苏河流域西湖水库为例[J].塔里木大学学报,2016,28(1):83-87.

[7] 朱士江,叶晓思,王斌,等.不同水分调控、生物炭配比对水稻产量与水分利用效率的影响[J].节水灌溉,2018,(1):1-5.

[8] 杨苹,程智敏,陈叙生,等.土壤水分调控对烤烟根系、植株形态及生理特性的影响[J].贵州农业科学,2017,45(9):21-23.

[9] 滕园园,赵财,柴强,等.氮肥后移对玉米间作豌豆耗水特性的调控效应[J].作物学报,2016,42(3):446-455.

[10] 刘朋程,孙红春,刘连涛,等.限量灌溉对不同棉花品种干物质积累分配、产量和水分利用效率的影响[J].棉花学报,2018,30(4):316-325.

[11] 王雪,陈国栋,张金龙,等.枣园间作条件下不同灌水处理对紫花苜蓿产量及水分利用率影响[J].新疆农业科学,2016,53(12):2187-2193.

[12] 罗照霞,柴强.不同供水水平下间甲酚和间作对小麦、蚕豆耗水特性及产量的影响[J].中国生态农业学报,2008,16(6):1478-1482.

[13] 段志平,刘天煜,张永强,等.枣棉间作系统棉花产量的形成与影响因素[J].干旱地区农业研究,2018,36(3):93-100.

[14] 王娟.枣棉间作对棉花生长发育的影响及间作模式优化[D].阿拉尔:塔里木大学,2015.

[15] 张东升.不同棉花密度配置的枣棉间作系统光分布和光能利用率研究[D].石河子:石河子大学,2014.

[16] 蒋春姬,王晓光,郑英杭,等.不同田间配置方式对花生生理特性及产量的影响[J].沈阳农业大学学报,2014,45(3):

270-273.

[17] 蒋春姬,郑英杭,王晓光,等.不同田间配置方式对花生群体光合特性及产量的影响[J].吉林农业大学学报,2014,36(2):134-138.

[18] 武进普,柴强.少耕留茬小麦间作玉米的耗水特性[J].干旱地区农业研究,2014,32(4):122-127.

[19] 柴强,杨彩红,陈桂平.灌溉方式对绿洲灌区小麦间作玉米耗水特性的影响[J].干旱区研究,2014,31(1):105-110.

[20] 冯福学,慕平,赵桂琴,等.西北绿洲灌区水氮耦合对燕麦品种陇燕 3 号耗水特性及产量的影响[J].作物学报,2017,43(9):1370-1380.

[21] 陈国栋,柴强.根系分隔和供水水平对玉米间作豌豆产量和耗水特征的影响[J].西北农业学报,2013,22(12):25-30.

[22] 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.

[23] 王小春,杨文钰,樊高琼.小麦不同密度和田间配置对套作玉米苗期素质和产量的影响[J].西南师范大学学报(自然科学版),2010,35(1):63-67.

[24] Wang Q, Han S, Zhang L, et al. Density responses and spatial distribution of cotton yield and yield components in jujube (*Zizyphus jujube*)/cotton (*Gossypium hirsutum*) agroforestry [J]. European journal of agronomy, 2016, 79:58-65.

[25] 叶林,杨峰,苏本营,等.不同田间配置对玉豆带状套作系统水分分布及水分利用率的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(4):41-48.

[26] 李发永,劳东青,孙三民,等.滴灌对间作枣棉光合特性与水分利用的影响[J].农业机械学报,2016,47(12):119-129.

[27] 郭雄飞,黎华寿,陈红跃.农林间作生态系统研究进展探析[J].绿色科技,2016,(16):176-179.

[28] 柴强,于爱忠,陈桂平,等.单作与间作的棵间蒸发量差异及其主要影响因子[J].中国生态农业学报,2011,19(6):1307-1312.

[29] 凌强,赵西宁,高晓东,等.间作经济作物对黄土丘陵区旱作红枣土壤水分的调控效应[J].应用生态学报,2016,27(2):504-510.

[30] Zhang D, Zhang L, Liu J, et al. Plant density affects light interception and yield in cotton grown as companion crop in young jujube plantations [J]. Field Crops Research, 2014, 169:132-139.

[31] Bai W, Sun Z, Zheng J, et al. Mixing trees and crops increases land and water use efficiencies in a semi-arid area [J]. Agricultural Water Management, 2016, 178:281-290.

[32] 白伟,孙占祥,郑家明,等.风沙半干旱区仁用杏间作对作物产量和水分利用的影响[J].中国农业气象,2017,38(9):574-582.