文章编号:1000-7601(2015)04-0041-08 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2015.04.07

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

叶 林[1],杨 峰[1],苏本营[1],张 静[1,2],刘卫国[1],杨文钰[1]

(1.四川农业大学农学院,农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室, 四川 成都 611130;
2.四川农业大学园艺学院, 四川 成都 611130)

摘 要: 探讨了 1.6 m 和 2.0 m 带宽不同玉米行距下玉豆带状套作系统共生期水分分布及水分利用率的变化。结果表明:随着玉米行距的增加,地面上玉米叶片空间分布不同,形成窄行部叶面积指数高于宽行,导致土壤水分蒸发、穿透降雨量和土壤水分都表现为玉米行 < 玉豆行 < 大豆行,玉豆带状套作共生期穿透降雨量分布不均和玉米大豆对土壤水分吸收是造成土壤含水量分布不均的主要因素;两种带宽下带状套作玉米产量和群体产量随玉米行距的增加表现为先增加后持平,在玉米行距为 50 cm 时,带状套作玉米产量和群体产量最高;两种带宽下玉米行距为 50 cm 时带状套作水分利用率最大,分别为 23.06 kg·hm^{-2}·mm^{-1}和 26.60 kg·hm^{-2}·mm^{-1},总体上较单作提高了 38.92%和 22.98%;两种带宽下水分当量比分别为 1.45 ~ 1.66 和 1.60 ~ 1.79,2.0 m 带宽比 1.6 m 带宽更加有利用于提高农田的水分利用效率,玉米行距在 40 ~ 50 cm 时更能有效提高群体的水分利用效率。

关键词: 玉豆带状套作;土壤水分;水分利用率;水分当量比

中图分类号: S157.4^{+}2 **文献标志码:** A

Effects of different field patterns on water distribution and water use efficiency in maize – soybean relay strip intercropping systems

YE Lin[1], YANG Feng[1], SU Ben-ying[1], ZHANG Jing[1,2], LIU Wei-guo[1], YANG Wen-yu[1]

(1. *College of Agronomy, Sichuan Agricultural University/Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in Southwest, Ministry of Agriculture, Chengdu, Sichuan* 611130, *China*;
2. *College of Gardening, Sichuan Agricultural University, Chengdu, Sichuan* 611130, *China*)

Abstract: This paper was about the changes in water distribution and water use efficiency in maize rows with 1.6 m and 2.0 m width under the maize-soybean strip intercropping systems during the symbiotic period. It was shown that with the increase of maize rows, spatial distribution of maize leaves on the ground was different. LAI of narrow rows was higher than that of wide rows, resulting in soil evaporation, throughfall, and soil moisture in the order of maize rows < maize-soybean rows < soybean rows. Uneven distribution of throughfall and the differences in abilities of maize and soybean absorbing moisture were the main reasons for the uneven distribution of soil moisture during the symbiotic period. When distance between maize rows became large, the group yield and maize yield were first increased and then remained steadily, reaching the highest with a maize rows distance at 50cm. When maize rows distance was 50 cm, the water use efficiencies of the two width strips were the highest, 23.06 kg·hm^{-2}·mm^{-1} and 26.60 kg·hm^{-2}·mm^{-1}, respectively. Overall speaking, water use efficiencies by the maize-soybean relay strip intercropping were 38.92% and 22.98% higher than those by monoculture. The water equivalent ratios were 1.45 ~ 1.66 and 1.60 ~ 1.79 under cultivations with two kinds of strip width. 2.0 m strip width could improve more of water use efficiency of farmland than 1.6 m strip width. When maize rows were 40 cm to 50 cm, maize – soybean relay strip intercropping could improve water use efficiency.

Keywords: maize-soybean relay strip intercropping; soil moisture; water use efficiency; water equivalent ratio

收稿日期:2014-05-25
基金项目:科技部 973 项目(2011CB100400);农业部大豆产业技术体系专项(CARS – 04 – PS19);国家自然科学基金青年项目(31301277)
作者简介:叶 林(1988—),四川仁寿人,硕士研究生,主要从事作物高产理论与技术研究。E-mail:leafye2525@sohu.com。
通信作者:杨文钰(1958—),四川大英人,博士生导师,主要从事作物高产栽培及生理研究。E-mail:wenyu.yang@263.net。

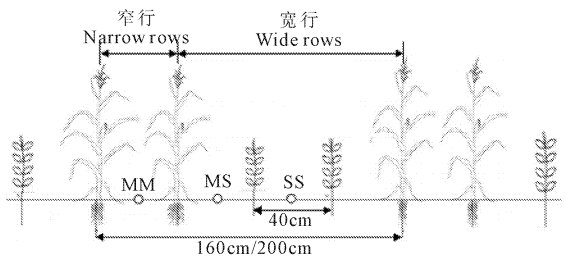
水资源短缺是制约农业生产发展最重要的限制因子之一[1-2]。对雨养农业而言,高效利用雨水资源和极大化作物水分生产率尤为重要[3],如何将有限的水资源更好地被作物吸收利用,是雨养农业的核心[4]。间套复种是充分利用资源、提高土地产出率的集约农业技术,是增加农田生物多样性,提高农田生态系统服务的有效措施[5],合理的间套作可以提高农田系统的生产力、农田水分和水分利用效率[4,6-7]。对间套作的水分利用率(WUE)研究较多,董宛麟[4]、Walker[8]和 Gaiser[9]研究发现在间作种植条件下,作物对水分的需求量没有增加,但却能提高作物的水分利用率。而 Droppelmann[10]研究结果表明:土壤水分有效性比较高时,玉米和豇豆间作的 WUE 都高于玉米和豇豆单作;在土壤水分有效性比较低时,间作豇豆的 WUE 要高于单作豇豆,但间作玉米却低于单作玉米。王照霞等[11]对青贮玉米豌豆间作对产量和水分利用效率的影响进行了研究,结果表明:合理的间作方式可以提高复合群体水分利用效率。GAO[12]在研究冬小麦与春玉米套作的水分利用率时,得出套作水分利用率为 21.72 kg·hm^{-2}·mm^{-1},相比单作玉米减少了 23.0%,比单作小麦增加了4.0%。虽然对间套作水分利用的研究较多,但是对于间套作提高群体水分利用率机理的研究很少。本研究从田间降雨再分配、土壤蒸发、土壤水分变化、群体产量及水分利用率出发,以水分当量比(WER)为评价指标,以期为玉豆带状套作群体种植高效水分利用研究提供一定的理论技术依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2012—2013 年在四川农业大学仁寿现代化农业生产基地(N30°4′16″,E104°12′53″)进行,供试玉米品种为川单 418,大豆品种为南豆 12。试验采用单因素随机区组设计,玉米大豆带状套作复合种植采用 1.6 m 和 2.0 m 带宽田间配置,大豆固定行距 40 cm,因素为不同的玉米行距,6 个水平,A1:0.2 m,A2:0.3 m,A3:0.4 m,A4:0.5 m,A5:0.6 m,A6:0.7 m,单作玉米和单作大豆采用 70 cm 行距种植作为对照,共 8 个处理,每处理重复 3 次,每个处理 3 带,每带长 5 m,1.6 m 和 2.0 m 带宽下每处理种植小区面积分别为 24 m^2 和 30 m^2。玉米的密度为 60 000 株·hm^{-2},大豆密度为 100 000 株·hm^{-2},每穴一株。在 1.6 m 和 2.0 m 带宽下带状套作玉米株距分别为 20.9 cm 和 16.7 cm,大豆株距分别为 12.5 cm 和 10.0 cm,单作玉米和单作大豆的株距分别为 23.8 cm 和 14.3 cm。

2012 年采用 1.6 m 带宽种植,玉米于 4 月 3 日采用定向移栽种植,大豆于 6 月 10 日播种,7 月 28 日玉米收获,11 月 4 日大豆收获;2013 年采用 2.0 m 带宽种植,玉米于 4 月 4 日采用定向移栽种植,大豆于 6 月 17 日播种,7 月 25 日玉米收获,10 月 31 日大豆收获。玉米底肥每 667m^2 配置施猪粪水 40 担(40 kg·担$^{-1}$,含 N 0.18%,P_2O_5 0.12%,K_2O 0.08%),过磷酸钙 40 kg(含 P_2O_5 12%),氯化钾 10 kg(含 K_2O 60%),其他管理同大田。仁寿多年平均温度为 17.9℃,多年平均降雨量为 912.4 mm,且降雨多集中在 6—8 月(图 2),试验地为沙壤土坡耕地,坡度约为 12.3°,0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30 cm 土壤容重分别为 1.33、1.34、1.52 g·cm^{-3}。



注:MM、MS 和 SS 分别代表玉米行间、玉豆行间和大豆行间中间位置。下同。

Note: MM, MS and SS stand for the places of maize-maize rows, maize-soybean rows and soybean – soybean rows. The same below.

图 1 玉米大豆带状种植模式

Fig.1 Maize-soybean strip intercropping systems

1.2 测定方法

在大豆出苗后用直尺测定单株玉米宽行和窄行中的每片叶片的长(a_i,cm)和宽(b_i,cm),每个小区随机选定 3 株,窄行和宽行的玉米叶片分开测量,其叶面积计算公式为 $LA_{玉} = 0.75\sum_{i=1}^{n} a_i \times b_i$;大豆叶片面积采用打孔法测量。则窄行 LAI 用窄行部全部玉米叶片面积除窄行部土地面积,宽行 LAI 用全部宽行部玉米叶片面积与全部大豆叶片面积之和除宽行土地面积。

在玉米行中间、玉米大豆行中间及大豆行中间位置(图 1)测量穿透降雨、土壤蒸发和土壤含水量。穿透降雨采用自制直径为 16 cm 的圆形集雨器收集降雨(最大收集 124.4 mm 的降雨),重复 3 次;试验地为斜坡地,在玉米大豆种植前和收获后取 0 ~ 100 cm 土壤,采用烘干法每隔 10 cm 分一层测量土壤含水量从而计算土壤贮水量变化量,在共生期时测量

土壤表层 0 ~ 30 cm 土壤含水量变化;行间土壤蒸发量采用王健[13]改良小型蒸发器(内外筒直径分别为 40 mm 和 50 mm,高 15 cm)。

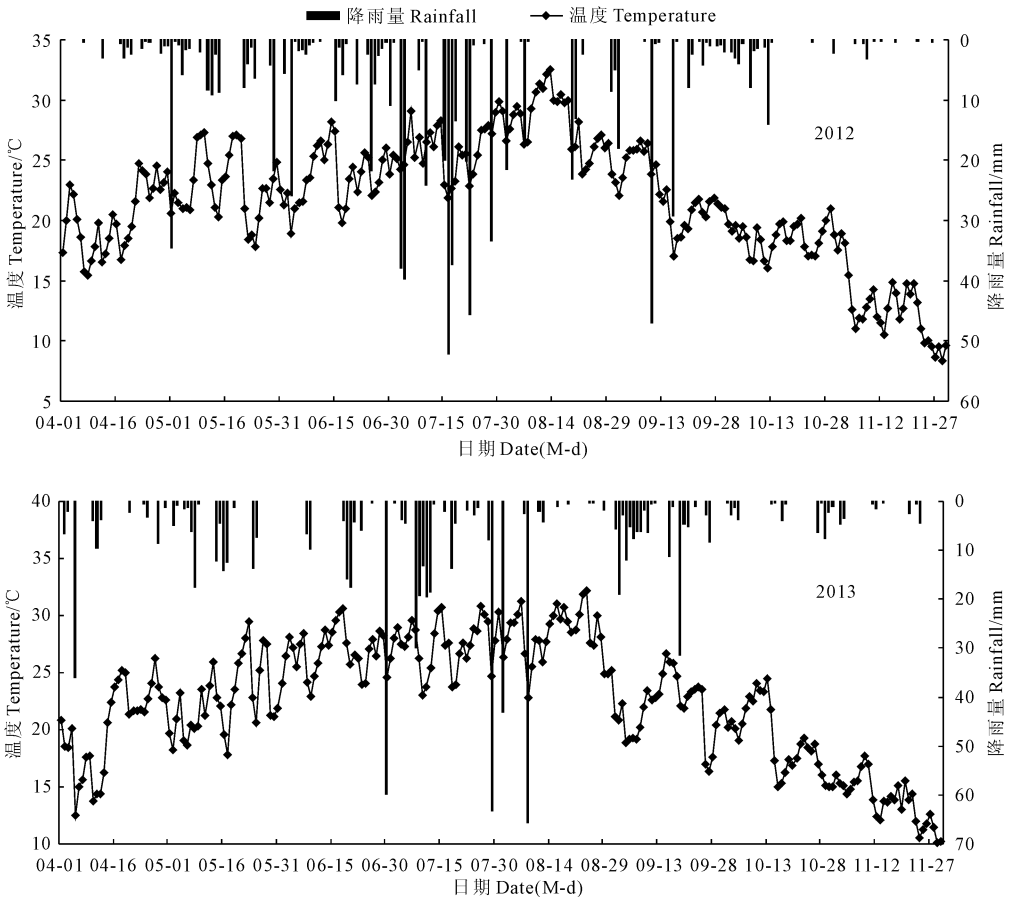


图 2　2012—2013 年玉豆带状套作种植季的温度和降雨量

Fig.2　Rainfalls and temperatures during 2012 and 2013 growth seasons

土地当量比(Land equivalent ratio, LER)为同一农田中 2 种或 2 种以上作物间混作时的收益与各个作物相应单作的收益之比的和,是衡量间混作比单作增产程度的一项重要指标[4,6,14]。其计算公式为:$LER = LER_M + LER_S = \frac{Y_{M,I}}{Y_{M,S}} + \frac{Y_{S,I}}{Y_{S,S}}$,式中 LER_M, LER_S 分别表示带状套作中玉米、大豆的相对产量即偏土地当量比,$Y_{M,I}$, $Y_{M,S}$表示套作和单作中玉米产量;$Y_{S,I}$和 $Y_{S,S}$表示套作和单作中大豆产量,单位为 $kg \cdot hm^{-2}$。

由于该地区地下水较深,作物吸收的地下上升水很少,可忽略不计,继而计算单作和套作中水分利用率,计算公式如下:作物耗水量或蒸散量(mm) $ET = R + G + \Delta W - SI - Q$, G 为农田灌溉量(mm), R 为降雨量(mm), Q 为径流量(mm), ΔW 为土壤贮水量变化量(mm), SI 为土壤水渗漏量(mm);土壤贮水量 $W = \sum \Delta Q_i \times Z_i$, Q_i 为土壤某一层次体积含水量(%), Z_i 为土壤层次厚度(cm), i 为土壤层次;土壤水渗漏量 SI 采用龚元石法计算[15] $SI = W - FK$, W 为土壤贮水量, FK 为田间持水量。根据实际观测发生径流情况,采用 SCS 径流模型[16],其计算公式为:$Q = (R - 0.2S)^2/(R + 0.8S)$, S 为流域饱和储水量(mm),其计算公式为 $S = 25400/CN - 254$, CN 为径流曲线数,为无量纲参数。水分利用率(Water use efficiency) $WUE = Y/ET$, Y 为玉米大豆产量($kg \cdot hm^{-2}$)。

水分当量比(Water equivalent ratio, WER)表示间套作体系中水分利用效率的提高或减少,计算公式[4,12]为: $WER = WER_M + WER_S = \frac{WUE_{M,I}}{WUE_{M,S}} + \frac{WUE_{S,I}}{WUE_{S,S}}$,式中 WER_M、WER_S 分别表示玉豆带状套作中玉米和大豆的相对水分利用效率, $WUE_{M,I}$、$WUE_{M,S}$、$WUE_{S,I}$、$WUE_{S,S}$分别表示套作、单作玉米水分利用效率,套作、单作大豆水分利用效率。$WER > 1$,说明相对于单作,套作提高了农田水分利

用效率；*WER* < 1，说明套作降低了农田的水分利用效率。

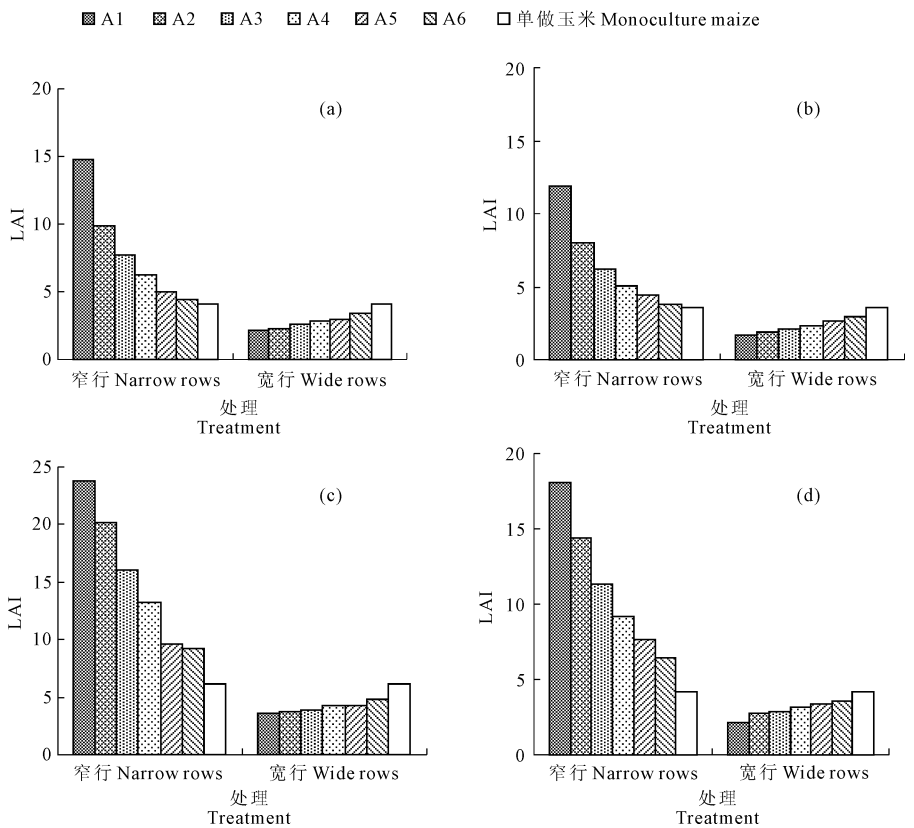
1.3 数据分析

试验数据采用 Excel 2003 进行试验数据汇总及整理，并用 DPS7.05 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 玉豆带状套作系统中窄行与宽行叶面积指数差异

计算窄行 LAI 只包含了玉米分布在窄行中的叶片面积，计算宽行 LAI 包含了玉米分别在宽行内叶片面积和大豆植株所有叶片面积。从图 3 中可看出随着玉米行距的增加，玉豆带状套作系统中窄行 LAI 递减，宽行 LAI 递增，且差异显著（$P < 0.05$）。在两个带宽中 A1 ~ A6 处理窄行 LAI 显著大于宽行 LAI（$P < 0.05$），而单作玉米植株两边 LAI 差异不显著（$P > 0.05$）。随着玉米窄行行距增加，宽行与窄行之间的 LAI 差异减小。玉米窄行与宽行之间 LAI 差异显著及同时期窄行与宽行不同处理差异显著，主要是由于行距差异造成，A1 处理窄行行距只有 20 cm，而宽行行距达 140 cm 和 180 cm，导致窄行部叶片分布紧凑，LAI 大；宽行部叶片分布松散，LAI 小。2012 年与 2013 年同处理窄行部 LAI 有差异主要是由气候差异造成。



注：(a)、(b)分别是 1.6 m 带宽下吐丝期、灌浆期的 LAI；(c)、(d)分别是 2.0 m 带宽下吐丝期、灌浆期的 LAI。

Note: (a) and (b) stand for silking and filling stages with strip width of 1.6 m; (c) and (d) stand for silking and filling stages with strip width of 2.0 m.

图 3 宽行和窄行玉米叶面积指数(LAI)变化

Fig.3 Changes of maize LAI on narrow rows and wide rows

2.2 玉豆带状套作系统中田间降雨再分布

由于前期大豆较小，不能对降雨形成遮挡，故测出的单作大豆之间降雨量即为大气实际降雨量。两种带宽下各测了两次共生期降雨。在表 1 中，2 m 带宽的两次降雨测量表明各带状套作处理玉米行（位置 MM）与大豆行（位置 SS）的穿透降雨量差异显著。从 A1 ~ A5 处理各位置穿透降雨量中可以发现玉米行 < 玉豆行 < 大豆行。最大穿透降雨量都在带状套作大豆行中，比大气实际降雨量高出 26.03% 和5.57%。而在 1.6 m 带宽中，两次降雨测量都表明 A1 ~ A3 处理玉米行（位置 MM）与大豆行（位置 SS）的穿透降雨量差异显著，最大降雨量也在套作大豆行中，比实际大气降雨高了 65.27% 和 40.00%。表明：降雨在降落的过程中受到了玉米叶片的遮挡，致使玉米行与玉豆行的降雨转移到大豆行之间，使大豆行之间穿透降雨量高于大气实际降雨量。

表 1　玉豆带状套作系统不同位置降雨量/mm

Table 1　Rainfalls at different maize-soybean intercropping places

带宽/m Strip width	位置 Place	带状套作 Relay strip intercropping						单作 Monoculture	
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	玉米 Maize	大豆 Soybean
2.0	MM	10.45b	16.30b	23.39b	26.14b	27.72c	34.21b	35.46	—
	MS	16.42b	13.11b	40.04b	27.42b	51.55b	27.62b	—	—
	SS	77.70a	85.59a	82.44a	89.55a	83.10a	95.62a	—	75.87
	AVG	34.86	38.33	48.62	47.70	50.79	52.58	35.46	75.87
	MM	13.44b	17.05c	21.65b	25.98b	36.48b	36.38b	37.93	—
	MS	15.84b	55.43b	29.94b	32.18b	62.30ab	18.81c	—	—
	SS	88.82a	88.72a	69.72a	90.43a	82.80a	86.36a	—	85.66
	AVG	39.37	53.74	40.43	49.53	57.87	34.52	37.93	85.66
1.6	MM	0.08c	0.25c	0.41c	1.11c	1.05b	1.90a	1.14	—
	MS	2.57b	3.88b	1.82b	2.46b	1.05b	1.96a	—	—
	SS	4.63a	5.95a	5.62a	4.38a	2.47a	2.59a	—	3.6
	AVG	2.43	3.36	2.62	2.65	1.68	2.15	1.14	3.6
	MM	7.09c	12.39b	21.25b	26.30b	23.51b	29.31a	30.08	—
	MS	17.62b	22.99b	24.80b	22.49b	16.17b	18.78a	—	—
	SS	52.82a	54.94a	63.20a	42.07a	42.95a	34.34a	—	44.91
	AVG	25.84	30.11	36.42	30.29	27.54	27.47	30.08	44.91

注:小写字母表示 5%显著水平。下同。

Note: Different lowercase letters are significantly different at 0.05 probability levels. The same below.

2.3　玉豆带状套作系统中土壤蒸发分布

从表 2 中可以看出,在 2 m 带宽中带状套作各处理的大豆行之间与玉米行之间的土壤蒸腾量差异显著,而在 1.6 m 带宽中 A1 ~ A4 处理差异显著,A5、A6 处理大豆行之间与玉米行之间的土壤蒸发量差异不显著。在两种带宽中,大豆行之间的土壤蒸发量随着玉米行行距变大而减小,而玉米行之间的土壤蒸发量随玉米行行距变大而增大。带状套作与单作相比,在 1.6 m 和 2.0 m 带宽中,各带状套作的土壤蒸发量都显著低于单作大豆,但在 2.0 m 带宽中带状套作处理的土壤蒸发量显著大于单作玉米,1.6 m 带宽中两者不显著,这主要是由于 2.0 m 带宽下宽行大,玉米对地面遮挡小,1.6 m 带宽下宽行较小,玉米对地面的遮挡大,致使带状套作种植群体的土壤水分蒸发较小,与单作玉米差异不显著。

表 2　玉豆带状套作系统不同位置土壤蒸发量/($mm \cdot d^{-1}$)

Table 2　Soil evaporation capacities at different places in maize-soybean strip intercropping systems

带宽/m Strip width	位置 Place	带状套作 Relay strip intercropping						单作 Monoculture	
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	玉米 Maize	大豆 Soybean
2.0	SS	2.877 a	2.845 a	2.497 a	2.542 a	2.354 a	2.213 a	—	3.036
	MS	2.739 a	2.349 b	2.075 b	2.187 ab	2.468 a	2.224 a	—	—
	MM	2.036 b	2.012 b	2.171 b	2.099 b	2.192 b	2.101 b	2.057	—
	AVG	2.550 b	2.402 bc	2.248 cd	2.276 cd	2.338 cd	2.180 de	2.057 e	3.036 a
1.6	SS	2.393 a	2.505 a	2.161 a	2.046 a	1.986 a	1.947 a	—	2.917
	MS	2.008 b	1.964 b	2.061 ab	1.940 ab	2.093 a	1.858 b	—	—
	MM	1.749 c	1.733 c	1.837 b	1.846 b	2.087 a	1.941 a	1.982	—
	AVG	2.050 b	2.067 b	2.019 b	1.944 b	1.979 b	1.992 b	1.982 b	2.917 a

2.4　玉豆带状套作系统中土壤水分分布

从表 3 中可看出,两种带宽下各测了两次共生期土壤水分,2 m 带宽下两次测量都表现出 A1 ~ A5 处理的大豆行之间的土壤含水量显著大于玉米行之间,而 1.6 m 带宽 A1 ~ A3 处理的大豆行之间的土壤含水量也显著大于玉米行之间。两种带宽下玉米行

之间的土壤含水量都随玉米行距的增大而增大,且与大豆行之间的土壤含水量差异减小。在玉米行的两侧,两带宽下,A1 ~ A4 处理玉米行之间的土壤含水量小于玉豆行之间的土壤含水量。带状套作与单作相比,两种带宽,4 次测量的系统最大含水量都在带状套作中,单作大豆的土壤含水量最低,表明玉米大豆带状套作共生期时有很好的保水作用。

表 3 玉豆带状套作系统不同位置土壤含水量/%

Table 3 Soil water contents at different places in maize – soybean strip intercropping systems

带宽/m Strip width	位置 Place	带状套作 Relay strip intercropping						单作 Monoculture	
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	玉米 Maize	大豆 Soybean
2.0	SS	14.10a	15.64a	14.46a	13.40a	14.87a	13.59a	—	12.37
	MS	13.38b	15.35a	13.63b	12.63ab	12.78b	12.73b	—	—
	MM	12.18c	13.23b	12.66c	12.47b	12.65b	13.56a	13.06	—
	AVG	13.22cd	14.74a	13.58b	12.84e	13.44bc	13.29cd	13.06de	12.37f
	SS	19.29a	21.03a	19.84a	21.24a	21.00a	19.73a	—	18.12
	MS	18.76b	19.42b	18.98b	20.54b	20.11b	19.80a	—	—
	MM	17.97c	19.57b	18.90b	19.78c	18.62c	18.28b	20.30	—
	AVG	18.67d	20.01b	19.24c	20.52a	19.91b	19.27c	20.30ab	18.12e
1.6	SS	22.74a	22.98a	22.77a	22.79b	22.63a	22.17b	—	21.28
	MS	21.35b	22.31a	22.45a	23.33a	22.40a	23.05a	—	—
	MM	20.80b	20.87b	21.46b	21.52c	21.36b	21.82b	21.4	—
	AVG	21.63bcd	22.05abcd	22.23ab	22.55a	22.13abc	22.35ab	21.4cd	21.28d
	SS	25.00a	24.96a	24.80a	24.48b	24.25a	24.30a	—	22.95
	MS	23.39b	24.05b	24.42b	24.85a	23.09b	23.86a	—	—
	MM	23.31b	23.95b	23.49b	24.05b	24.03a	24.08a	23.31	—
	AVG	23.90abc	24.32a	24.23abc	24.46ab	23.79abc	24.08abc	23.31bc	22.95c

2.5 玉米大豆群体产量和土地当量比(LER)

不同带宽、不同空间配置对玉米、大豆产量影响不同。从表 4 中可以看出,A1 ~ A4 处理的玉米产量呈显著递增,且 A4 处理在两种带宽带状套作种植中玉米产量都是最高,带状套作玉米产量都低于单作玉米产量,两种带宽的 A4 处理相比单作玉米降低了 7.59% 和 5.39%。在两种带宽下带状套作种植大豆产量随玉米行距增加呈减小趋势,且都小于单作大豆产量。两种带宽下带状套作种植大豆最高产量比单作大豆低 26.39% 和 8.00%。带状套作群体产量,两种带宽下都呈现 A4 处理最高,同时都显著高于玉米和单作大豆。1.6 m 和 2.0 m 带宽下 LER 分别在 A4 和 A3 处理最高,分别达到了 1.62 和 1.81,但两种带宽下 A3 和 A4 处理之间的土地当量 LER 比差异不显著。1.6 m 和 2.0 m 带宽下大豆产量分别为单作产量的 62.3% ~ 73.6% 和 72.1% ~ 92.0%,表明 1.6 m 带宽对大豆产量的影响较大,2.0 m 带宽更有利于大豆生长。

表 4 不同处理玉米、大豆产量及土地当量比(LER)/(kg·hm^{-2})

Table 4 Yields and land equivalent ratios (LER) of maize and soybean with different treatments

处理 Treatment	1.6 m带宽 1.6 m strip width				2 m带宽 2 m strip width			
	玉米 Maize	大豆 Soybean	群体 Total	LER	玉米 Maize	大豆 Soybean	群体 Total	LER
A1	4906.75 e	1319.10 b	6225.85 c	1.41 b	9037.2 e	1850.9 b	10888.1 e	1.73 b
A2	5956.39 d	1272.65 b	7229.04 b	1.52 ab	9484.8 d	1896.0 b	11380.8 c	1.79 a
A3	6389.06 c	1249.43 b	7638.48 ab	1.57 ab	9983.1 c	1840.9 b	11824.0 b	1.81 a
A4	6826.74 b	1238.73 b	8065.46 a	1.62 a	10282.4 b	1733.4 c	12015.8 a	1.79 a
A5	6609.99 bc	1167.08 b	7777.06 ab	1.55 ab	10183.9 bc	1565.8 d	11749.7 b	1.70 b
A6	6600.98 bc	1117.53 b	7718.51 ab	1.52 ab	9677.5 d	1485.7 d	11163.2 d	1.61 c
玉米 Maize	7387.58 a	—	7387.58 b	—	10868.6 a	—	10868.6 e	—
大豆 Soybean	—	1791.99 a	1791.99 d	—	—	2061.0 a	2061.0 f	—

2.6　玉米大豆水分利用率(WUE)和水分当量比(WER)

从表 5 中可以看出,两种带宽下,带状套作玉米和大豆分别的耗水量与单作差异不显著。而带状套作玉米的水分利用率呈先增加后持平,在 A4 处理时水分利用率最大,而大豆呈递减趋势。带状套作的玉米和大豆水分利用率都显著低于单作,而群体的水分利用率要显著高于单作大豆,低于单作玉米。两种带宽的带状套作种植的 WUE 都是 A4 处理最高,分别达到了 23.06 kg·hm^{-2}·mm^{-1}和 26.20 kg·hm^{-2}·mm^{-1},表现为 A1 ~ A4 处理递增,而后持平。两种带宽下玉豆带状套作的水分当量比 WER 分别为 1.45 ~ 1.66 和 1.60 ~ 1.79,在 A4 和 A3 处理时 WER 达到最大,且两处理之间差异不显著。

表 5　不同处理玉米、大豆及群体的水分利用率(WUE)和水分当量比(WER)

Table 5　Water use efficiency and water equivalent ratio (WER) of maize, soybean and total with different treatments

处理 Treatment	1.6 m带宽 1.6 m strip width						2.0 m带宽 2.0 m strip width					
	耗水量 ET/mm		水分利用率 WUE/(kg·hm^{-2}·mm^{-1})			WER	耗水量 ET/mm		水分利用率 WUE/(kg·hm^{-2}·mm^{-1})			WER
	玉米 Maize	大豆 Soybean	玉米 Maize	大豆 Soybean	群体 Total		玉米 Maize	大豆 Soybean	玉米 Maize	大豆 Soybean	群体 Total	
A1	290.51a	274.59a	16.89d	4.80b	17.80d	1.45c	316.3a	301.5a	28.58f	6.14b	23.74f	1.70b
A2	287.25a	273.82a	20.74c	4.65b	20.67c	1.47c	313.7a	301.6a	30.23e	6.29b	24.82d	1.77a
A3	286.98a	273.87a	22.26c	4.56b	21.84c	1.59ab	315.0a	300.5a	31.70c	6.13b	25.78c	1.79a
A4	286.50a	273.54a	23.83b	4.53b	23.06b	1.66a	314.5a	300.0a	32.69b	5.78c	26.20b	1.76a
A5	284.48a	271.88a	23.24bc	4.29c	22.23bc	1.51bc	312.4a	298.7a	32.60b	5.24d	25.62c	1.69b
A6	284.67a	271.68a	23.19bc	4.11c	22.06bc	1.54ab	311.5a	299.0a	31.07d	4.97d	24.34e	1.60c
玉米 Maize	283.55a	—	26.05a	—	26.05a	—	309.4a	—	35.12a	—	35.12a	—
大豆 Soybean	—	269.47a	—	6.65a	6.65e	—	—	297.5a	—	6.93a	6.93g	—

3　讨　论

3.1　不同空间配置对土壤水分的影响

土壤水分是土壤的重要物理指标之一,来源于大气降水、灌溉水以及随毛细管上升的地下水和凝结水。土壤水分状况受到气候、植物、地形及土壤等诸多因子的综合影响,是农作物水分供应的主要来源[17]。玉米行距的不同,导致玉米叶片在地面上空间分布不同,从而导致大气降雨田间再分配表现为:玉米行 < 玉豆行 < 大豆行,表明在同一带状套作配置中,宽行之间的土壤水分来源量高于窄行。随着玉米行距的增加,玉米行之间的土壤蒸发量呈递增趋势,大豆行间的土壤蒸发量呈减小趋势,在同一处理中,土壤蒸发量呈现玉米行 < 玉豆行 < 大豆行,且玉米行显著低于大豆行,这与带状套作不同位置土壤含水量分布规律相同。根据高阳[18]研究发现间套作作物优先在自己的区域吸水。穿透降雨分布不均和玉米大豆对土壤水分的吸收是导致同一配置中土壤含水量呈玉米行 < 玉豆行 < 大豆行的主要因素。根据唐立松[19]研究发现:土壤水分分布不均,处于湿润部分的根系吸收水分,保证作物光合,处于干燥土壤的根系产生 ABA,调节叶片气孔导度,在不降低或少量降低光合作用的前提下,更多地减少作物的蒸腾耗水,提高作物的水分利用率,表明玉豆带状套作土壤水分分布不均可以提高作物水分利用效率。

3.2　不同空间配置对水分利用效率的影响

玉豆带状套作并没有明显提高作物的耗水量。各带状套作处理的玉米和大豆水分利用率较单作低,主要是由于产量低造成。在有关间套作作物 WUE 特征的研究中,前人[20-21]提出间套作水分利用效率较单作有所提高。此试验中带状套作群体水分利用率显著低于单作玉米,是由于其生育期比单作玉米长,耗水量要高于单作玉米,导致群体的水分利用率较单作玉米低,而带状套作群体水分利用率显著高于单作大豆,主要是由于产量差异大造成。两种带宽下玉米行距为 50 cm 时带状套作水分利用率 WUE 最大,分别为 23.06 kg·hm^{-2}·mm^{-1}和 26.60 kg·hm^{-2}·mm^{-1},相比于单作玉米减少了 11.48% 和 25.39%,但比单作大豆提高了 246.77% 和278.07%。由于带状套作与玉米大豆单作的整个生育期长短不同,且单作玉米与单作大豆在两块不同地面生长,总体上单作总体耗水量要高于带状套作,导致单作总体水分利用率分别为 16.60 kg·hm^{-2}·mm^{-1}和 21.30 kg·hm^{-2}·mm^{-1},带状套作比单作水分利用率高出了 38.92% 和 22.98%;而根据叶优良[22]的研究发现:玉米大豆间作显著降低了大豆的 WUE,玉米大豆间作相对于单作 WUE 减少 12.20% ~ 22.98%,这主要

是由于其间作大豆产量只为单作大豆产量的17.30%～23.50%,而带状套作大豆产量为单作大豆产量的62.3%～92.0%。较间作大豆而言,带状套作大豆有明显的产量优势,这是玉豆带状套作水分利用率WUE高于单作的主要原因。两种带宽下玉豆带状套作种植的水分当量比WER分别为1.45～1.66和1.60～1.79,说明带状套作能够提高农田的水分利用效率,且2.0 m带宽比1.6 m带宽更加有利于提高农田的水分利用效率。在1.6 m和2.0 m带宽下玉米行距为50 cm和40 cm时群体水分当量比WER较大,且两行距下差异不显著,表明玉米行距在40～50 cm时能有效提高群体的水分利用效率。

4 结 论

1) 玉米行距的不同导致了玉米叶片在地上空间分布不同,地面上部LAI影响到作物之间穿透降雨量及土壤水分蒸发,表现为玉米行<玉豆行<大豆行;穿透降雨分布不均和玉米大豆对土壤水分的吸收是土壤水分分布不均的主要因素,土壤水分分布表现为玉米行<玉豆行<大豆行。

2) 套作不会提高作物耗水量,合理空间配置可以提高群体的水分利用效率,在玉米行距为50 cm时群体水分利用率最大,分别为23.06 $kg\cdot hm^{-2}\cdot mm^{-1}$和26.60 $kg\cdot hm^{-2}\cdot mm^{-1}$,虽略低于单作玉米,但显著高于单作大豆,总体上玉豆带状套作较单作提高了群体的水分利用效率20%以上;带状套作水分当量比分别为1.45～1.66和1.60～1.79,2.0 m带宽更加有利于提高作物水分利用效率,玉米行距在40～50 cm时能有效提高群体的水分利用效率。

参 考 文 献:

[1] 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.

[2] 张凤云,吴普特,赵西宁,等.间套作提高农田水分利用效率的节水机理[J].应用生态学报,2012,23(5):1400-1406.

[3] Gamo M. Classification of arid regions by climate and vegetation[J]. Arid Land Study, 1999,1:9-17.

[4] 董宛麟,张立祯,于 洋,等.向日葵和马铃薯间作模式的生产力及水分利用[J].农业工程学报,2012,28:127-133.

[5] Zhu Y Y, Chen H R, Fan J H, et al. Genetic diversity and disease control in rice[J]. Nature, 2000,406:718-722.

[6] Zhang L, Van der Werf W, Zhang S, et al. Growth, yield and quality of wheat and cotton in relay strip intercropping systems[J]. Field Crops Research, 2007,103:178-188.

[7] 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,2011,27:1-8.

[8] Walker S, Ogindo H O. The water budget of rain fed maize and bean intercrop[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2003,28:919-926.

[9] Gaiser T, Barros I D, Lange F M, et al. Water use efficiency of a maize/cowpea intercrop on a highly acidic tropical soil as affected by liming and fertilizer application[J]. Plant and Soil, 2004,263:165-171.

[10] Droppelmann K J, Lehmann J, Ephrath J E, et al. Water use efficiency and uptake patterns in a runoff agroforestry system in arid environment[J]. Agroforestry Systems, 2000,49:223-243.

[11] 王照霞,郭贤仕,马一凡,等.青贮玉米豌豆间作对产量和水分利用效率的影响[J].甘肃农业大学学报,2005,40(4):492-497.

[12] Gao Y, Duan A W, Sun J S, et al. Crop coefficient and water-use efficiency of winter wheat/spring maize strip intercropping[J]. Field Crops Research, 2009,111:65-73.

[13] 王 健,蔡焕杰,康燕霞,等.夏玉米棵间土面蒸发与蒸发蒸腾比例研究[J].农业工程学报,2007,23(4):17-21.

[14] Mao L L, Zhang L Z, Li W Q, et al. Yield advantage and water saving in maize/pea intercrop[J]. Field Crops Research, 2012,138:11-20.

[15] 龚元石,李保国.应用农田水量平衡模型估算土壤水渗漏量[J].水利科学进展,1995,6(1):16-21.

[16] 张秀英,孟 飞,丁 宁.SCS模型在干旱半干旱区小流域径流估算中的应用[J].水土保持研究,2003,10:172-174,249.

[17] 王菊芬,吴伯志.间套作系统中土壤水分研究进展[J].云南农业大学学报,2009,24(2):286-291.

[18] 高 阳,段爱旺,刘战东,等.玉米/大豆间作条件下的作物根系生长及水分吸收[J].应用生态学报,2009,20(2):307-313.

[19] 唐立松,张建龙,李 彦,等.植物对土壤水分变化的响应与控制性分根交替灌溉[J].干旱区研究,2005,22(1):90-93.

[20] Saren B K, Jana P K. Effect of irrigation and intercropping system on yield, water-use, concentration and uptake of nitrogen, phosphorus and potassium in maize(*Zea Mays* L.) and groundnut(arachis hypogaea) grown as sole and intercrop[J]. India Journal of Agricultural Sciences, 1999,69:317-320.

[21] Morris B A, Garrity D P. Resources capture and utilization in intercropping water[J]. Field Crops Research, 1993,34:303-317.

[22] 叶优良.间作对氮素和水分利用的影响[D].北京:中国农业大学,2003.