

甘肃旱作大豆全膜双垄种植的土壤水热及产量效应*

杨封科^{1,3**} 王立明^{2,3} 张国宏^{2,3}¹甘肃省农业科学院,兰州 730070; ²甘肃省农业科学院旱地农业研究所,兰州 730070; ³农业部西北作物抗旱栽培与耕作重点开放实验室,兰州 730070)

摘要 以晋豆 23 为材料,在甘肃省农业科学院镇原试验站进行田间试验,研究了全膜双垄沟播(FMRFC)、覆膜沟播(FMFC)、覆膜条播(FMSC)和露地条播(NMSC,CK)4个处理的水热及产量效应.结果表明:在大豆生育期降水量为 246.3 mm(干旱年)和 407 mm(丰水年)两种年型下,各覆盖处理 0~20 cm 土层平均地温在 24 h 内呈“S”型变化,并随生育进程波动振幅缩小.各覆盖处理使大豆苗期(VE~V3)至鼓粒期(R6)0~20 cm 土层平均土壤温度显著提高 0.5~2.5 °C,并使全生育期平均地温提高 1.3~1.6 °C.各覆盖处理分别加速了大豆植株对 0~120 cm 土层土壤水分的消耗,但使 0~200 cm 土层的平均含水量和贮水量分别提高了 1.2%~1.4%和 62.7~70.3 mm.与 CK 相比,FMRFC 和 FMFC 在旱年增温增湿作用显著,改善了大豆株高、分枝数、单株荚数和百粒重等经济性状,使水分利用效率分别提高 47.7%~56.3%和 33.3%~35.4%,产量分别提高 27.7%~51.1%和 10.2%~25.2%,是旱作大豆优选的抗寒抗旱覆盖种植方式.

关键词 土壤水热效应 全膜双垄 产量 旱作 大豆

文章编号 1001-9332(2013)11-3145-08 **中图分类号** S152.7, S152.8 **文献标识码** A

Effects of plastic film mulching with double ridges and furrow planting on soil moisture and temperature and soybean yield on a semiarid dryland of Gansu Province, Northwest China.

YANG Feng-ke^{1,3}, WANG Li-ming^{2,3}, ZHANG Guo-hong^{2,3} (¹Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China; ²Institute of Dryland Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China; ³Key Laboratory of Northwest Drought-resistant Crop Farming, Ministry of Agriculture, Lanzhou 730070, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2013, 24(11): 3145-3152.

Abstract: Taking soybean cultivar Jindou 23 as test object, a field experiment was conducted at the Zhenyuan experimental station of Gansu Academy of Agricultural Sciences to study the effects of various plastic mulching treatments on the soil moisture and temperature and soybean grain yield on a semiarid dryland of Northwest China. Four treatments were installed, *i. e.*, plastic film mulching with double ridges and furrow planting (FMRFC), plastic film mulching without ridges and with furrow planting (FMFC), plastic film mulching with strip planting (FMSC), and no mulch strip planting (NMSC, CK). During the drought year (the precipitation in soybean growth period was 246.3 mm) and wet year (407 mm), the daily soil temperature in 0-20 cm layer in all mulching treatments varied in “S” shape, and its fluctuation became smaller with soybean growth. The mulching treatments raised the daily average soil temperature in 0-20 cm layer by an average of 0.5-2.5 °C from the seedling (VE-V3) to seed filling (R6) stage, with the average soil temperature in whole growth period raised by 1.3-1.6 °C. Both in dry year and in wet year, mulching treatments promoted the soil moisture consumption in 0-120 cm layer by soybean, but increased the average soil moisture content and water storage in 0-200 cm layer by 1.2%-1.4% and 62.7-70.3 mm, respectively. As compared to CK, treatments FMRFC and FMFC had significant effects in improving the soil temperature and moisture environment in dry year, and greatly improved the yield-related traits such as plant height, branching number, pods per plant, and 100-seed mass. FMRFC increased the yield by 27.7%-51.1% and raised the water use efficiency (WUE) by 47.7% -

* 现代农业产业技术体系项目(nycytX-004)、国家科技支撑计划项目(2012BAD05B03)和甘肃省科技支撑计划项目(1204NKCA108)资助。

** 通讯作者. E-mail: yang_fk@163.com

2013-04-07 收稿, 2013-08-23 接受。

56.3%, whereas FMFC increased the yield by 10.2%–25.2% and raised the WUE by 33.3%–35.4%, as compared to CK. It was suggested that FMRFC and FMFC could be the most efficient planting systems for the soybean production in the dryland farming of Northwest China.

Key words: soil moisture and temperature effect; plastic film mulching with double ridges and furrow planting; yield; dryland farming; soybean.

大豆(*Glycine max*)是耕地用养结合和经饲兼备性作物,在维系北方旱区旱地生产力和经济可持续发展中具有重要的作用^[1].大豆喜温,根系不发达,生长需水量大,对低温和缺水敏感^[2-5],在北方旱区因各生育阶段都易出现冷害^[2],加上常遇早春干旱^[4],产量低而不稳^[6].地膜覆盖由于其显著的增温增湿作用,广泛应用于粮棉油^[7-10]、烟草^[11]、西甜瓜^[12]、果园和茶园^[13-14]的抗旱丰产栽培,并取得了理想的效果.但生产上将地膜覆盖应用于大豆丰产栽培的时间较晚^[15],研究者对地膜覆盖大豆的栽培方式、密度、行距、光合作用、水分利用效率等进行了深入的探讨^[16-18],但对促进大豆抗寒抗旱丰产栽培的研究报道不多,尤其是对地膜覆盖大豆的土壤水热及产量效应更鲜有报道.本文在田间试验条件下,以全膜双垄集雨种植为主要覆盖栽培方式,研究了土壤的水热及产量效应,以探明地膜覆盖模式的增温增湿抗寒抗旱增产机理,为旱作大豆高产栽培提供理论依据及技术支撑.

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验设计

试验于2009—2010年在甘肃省农业科学院镇原旱农试验站(35°30' N, 107°29' E)试验田进行.试验地为黑垆土,土壤肥力中等,有机质含量约10.0 g·kg⁻¹、全氮0.75 g·kg⁻¹、碱解氮60 mg·kg⁻¹、速效磷8.5 mg·kg⁻¹、速效钾240 mg·kg⁻¹,pH为8.4.2009年大豆生育期降水量246.3 mm,较常年偏少112.5 mm,属干旱年份;2010年大豆生育期降水量407 mm,属丰水年份.研究区降水主要集中在7—9月,占大豆生育期降水的80%以上.

试验以晋豆23号为供试品种,采用山东三塑集团有限公司生产的0.008 mm聚乙烯吹塑农用薄膜,设全膜双垄种植(FMRFC)、覆膜沟播(FMFC)、覆膜条播(FMSC)和露地条播(NMSC,CK)4个处理,各处理具体措施:1)全膜双垄种植:春播前顶凌起大小双垄,小垄宽40 cm、垄高15 cm,大垄宽60 cm、垄高10 cm,用宽120 cm的薄膜全地面覆盖,

在大小垄相接处形成的播种沟内播种;2)覆膜沟播:春播前顶凌等距开沟,沟深15 cm、宽20 cm、间距30 cm,采用120 cm地膜全地面覆盖,沟内均匀点播种植;3)覆膜条播:春播前用120 cm顶凌平覆膜条带播种;4)露地条播:等行距露地点播种植.所有处理平均行距50 cm,株距12~14 cm,每穴播1~2粒,播种深度3~4 cm,密度18万穴·hm⁻²左右,保苗22.5万株·hm⁻²左右.

试验地前作糜子,各处理于秋季作物收获后耕翻整地,一次性施入磷酸二铵150 kg·hm⁻²、尿素120 kg·hm⁻²做基肥.采用随机区组排列,3次重复,小区面积6 m×4.5 m=27 m².2009年5月10日前后播种,9月28日前后收获;2010年5月5日播种,9月26日收获.

1.2 测定项目与方法

1.2.1 土壤含水量的测定 参考Fehr等^[19]的方法界定大豆生育进程,分别于播前、苗期(VE~V3)、分枝期(V4~Vn)、开花期(R2)、鼓粒期(R6)和成熟期(R8),用土钻采集土样,烘干法测定0~200 cm土层含水量,测定步长为20 cm,同时采用环刀法测定土壤容重.土壤含水量的计算公式为:土壤含水量=(土壤鲜质量-土壤干质量)/土壤干质量×100%.

1.2.2 土壤贮水量的计算 土壤贮水量公式:

$$S_w = d \times r \times w / 10$$

式中: S_w 为土壤贮水量(mm); d 为土层厚度(cm); r 为土壤容重(g·cm⁻³); w 为土壤含水量(%).

1.2.3 农田耗水量的计算 参考李开元等^[20]的方法,用简化的水分平衡方程式计算: $ET = P - \Delta W$.式中: ET 为作物耗水量; P 为降水量; ΔW 为时段末与时段初的土壤贮水量之差(单位均为mm).耗水强度(mm·d⁻¹)=各生育阶段大豆田耗水量(mm)/生育阶段天数(d).

1.2.4 作物水分利用效率的计算 参考王红丽等^[7]的方法计算,简化公式为: $WUE = Y / ET$.式中: Y 为作物籽粒产量(kg·hm⁻²); ET 为作物耗水量(mm).

1.2.5 地温测定 地温测定参考Cook等^[21]的方法,于大豆播前、苗期(VE~V3)、分枝期(V4~Vn)、开

花期(R2)、鼓粒期(R6)和成熟期(R8),用地温计测定0~40 cm 土层地温,测定步长为10 cm,每小区测定1个位点,全天24 h 每隔2 h 测定1次。

1.2.6 室内考种及产量分析 成熟后每小区取样10株,测定株高、分枝数、主茎节数、单株荚数、荚粒数及百粒重等,全小区收获计产。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 软件对数据进行处理和绘图,采用 SPSS 18 统计分析软件进行不同覆盖方式的差异显著性检验(LSD法, $\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同覆盖处理的增温效应

2.1.1 大豆生育关键期根层地温日变化 覆盖处理0~20 cm 土层平均地温在24 h 内均呈先降后升再降的“S”型变化(图1),变幅随着生育进程逐渐减弱,而且这一趋势不受降水量的影响。在8:00—10:00 出现低谷值,16:00—18:00 出现高峰值,24:00 至次日2:00 出现次峰值。苗期(5月5日—6月2日)FMRFC和FMFC 0~20 cm 土层的平均温度全天都

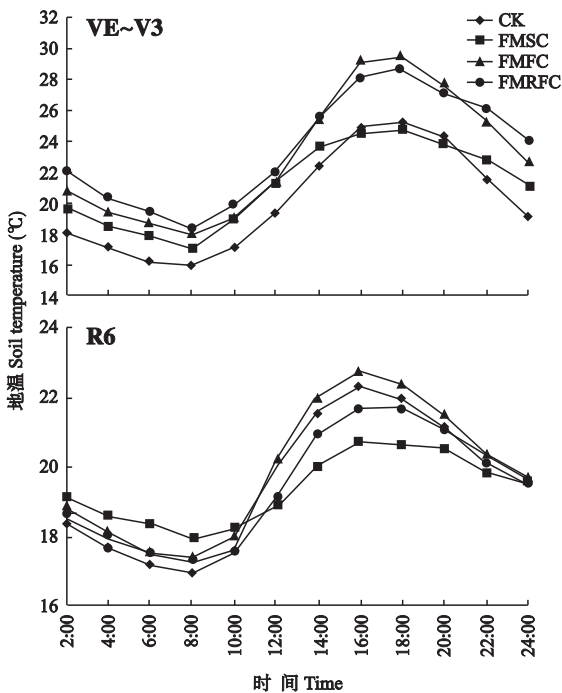


图1 不同覆盖处理大豆关键生育期0~20 cm 地温日变化(2009—2010 两年平均)

Fig. 1 Diurnal change of soil temperature in 0~20 cm at key growth stages of soybean under different mulching methods (average of 2009 and 2010).

FMRFC:全膜双垄 Plastic film mulching with double ridges and furrow planting; FMFC:覆膜沟播 Plastic film mulching without ridges with furrow planting; FMSC:覆膜条播 Plastic film mulching with strip planting; NMSC(CK):露地条播 No mulch strip planting. VE~V3:苗期 Seedling stage; R6:鼓粒期 Seed filling stage. 下同 The same below.

高于 FMSC 和 CK,日较差大,24 h 平均地温比 CK 提高了0.4~3.3 °C,增温作用比较明显。鼓粒期(7月26日—8月8日)各处理0~20 cm 土层地温均以12:00 为转折点,之前高于CK,之后低于CK,日较差小,比苗期变化平稳,FMRFC 和 FMFC 的24 h 平均地温比 CK 增加了0.3 °C. 表明覆盖处理能有效提高苗期根层地温,还有均衡生育期地温的作用。

2.1.2 大豆全生育期地温变化 与CK 相比,不同覆盖处理均有效提高了大豆生育期根层土壤温度,以0~10 cm 耕作层增温效果显著,10~20 cm 次之。增温最大的时期在大豆苗期(VE~V3,5月16日—6月2日)至鼓粒期(R6,7月26日—8月8日),增温的范围为0.5~2.5 °C,并随土壤深度的增加增幅减小(图2)。20~40 cm 土层土壤温度也有提高但不明显。各覆盖处理使大豆苗期0~20 cm 土层土壤温度比对照提高0.7~1.3 °C,并保持在21 °C 以上,这对促进大豆种子萌发、根系发育、培育壮苗,抵御黄土旱塬早春寒,促进高产奠定了基础。方差分析表明,大豆整个生育期各覆盖处理间土壤耕层平均温度无明显差异,但平均比露地条播高1.2~1.6 °C。覆盖处理的增温效果均表现为全膜双垄沟播>覆膜沟播>覆膜条播>露地条播。

2.2 不同覆盖处理的土壤水分效应

2.2.1 0~200 cm 土层土壤水分含量的垂直变化 如图3 所示,不论降水年型如何,随着大豆生育进程、根系下扎深度的增加和营养生长旺盛程度的增强,作物耗水量逐步增加,对0~200 cm 土层土壤含水量产生了不同的影响。从分枝期(V4~Vn,6月2日—6月21日)至成熟期(R8,9月28日),种植第1年,覆盖处理分别加速了大豆植株对0~60 cm、0~100 cm 和0~40 cm 土层土壤含水量的消耗,第2年消耗水分的土层均依次加深了20 cm。两种年型覆盖处理各层次的土壤含水量和0~200 cm 土层的贮水量均高于CK,干旱年份(2009年)分别增加了0.9%~2.5%和12.22~31.81 mm,丰水年份(2010年)分别增加了0.5%~3.0%和6.81~38.73 mm,增加的水分主要集中在0~100 cm 土层,分别占0~200 cm 土层水分总增量的92.1%(2009年)和88.2%(2010年)。

2.2.2 0~200 cm 土层土壤含水量全生育期动态变化 由图4 所示,大豆全生育期各处理0~200 cm 土层土壤平均含水量不同年型都表现为播种至开花逐渐下降,开花后逐步上升的变化趋势。干旱年份(2009年)总体上呈下降的变化趋势,虽然在开花后

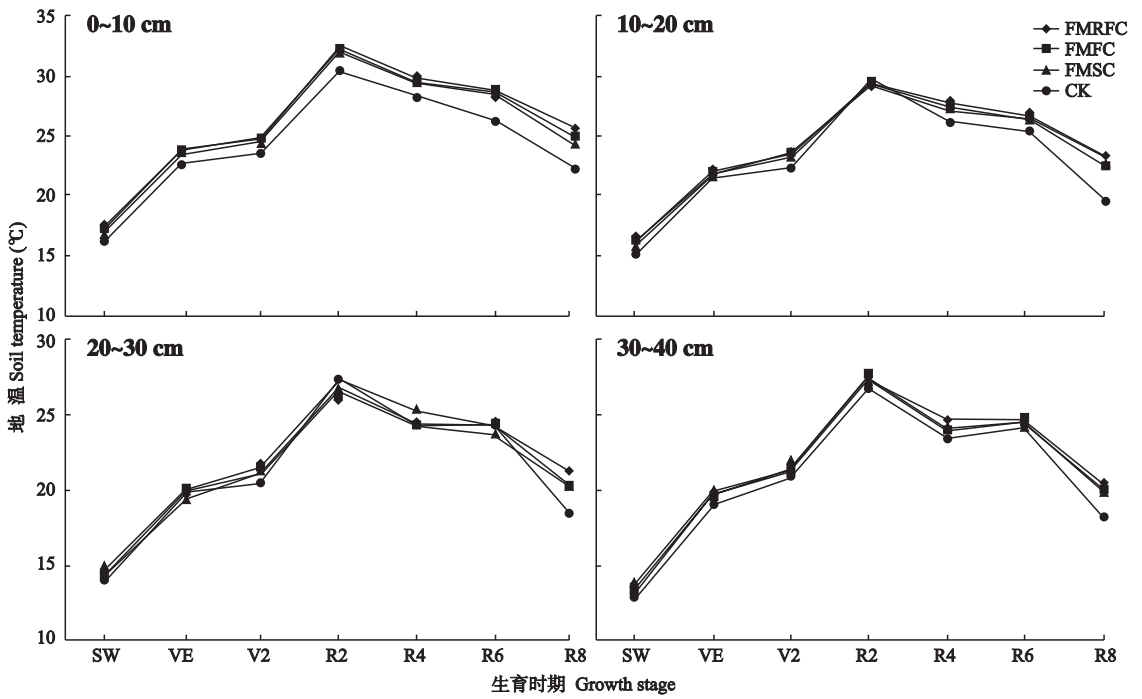


图2 不同覆盖处理大豆全生育期地温动态变化(2009—2010 两年平均)

Fig. 2 Soil temperature dynamis at whole growth stage of soybean under different mulching methods (average of 2009 and 2010).

SW:播种期 Sowing; VE:出苗 Emergence; V2:苗期 Seedling; R2:开花期 Flowering; R4:结荚期 Pod setting; R6:鼓粒期 Seed filling; R8:成熟期 Maturity. 下同 The same below.

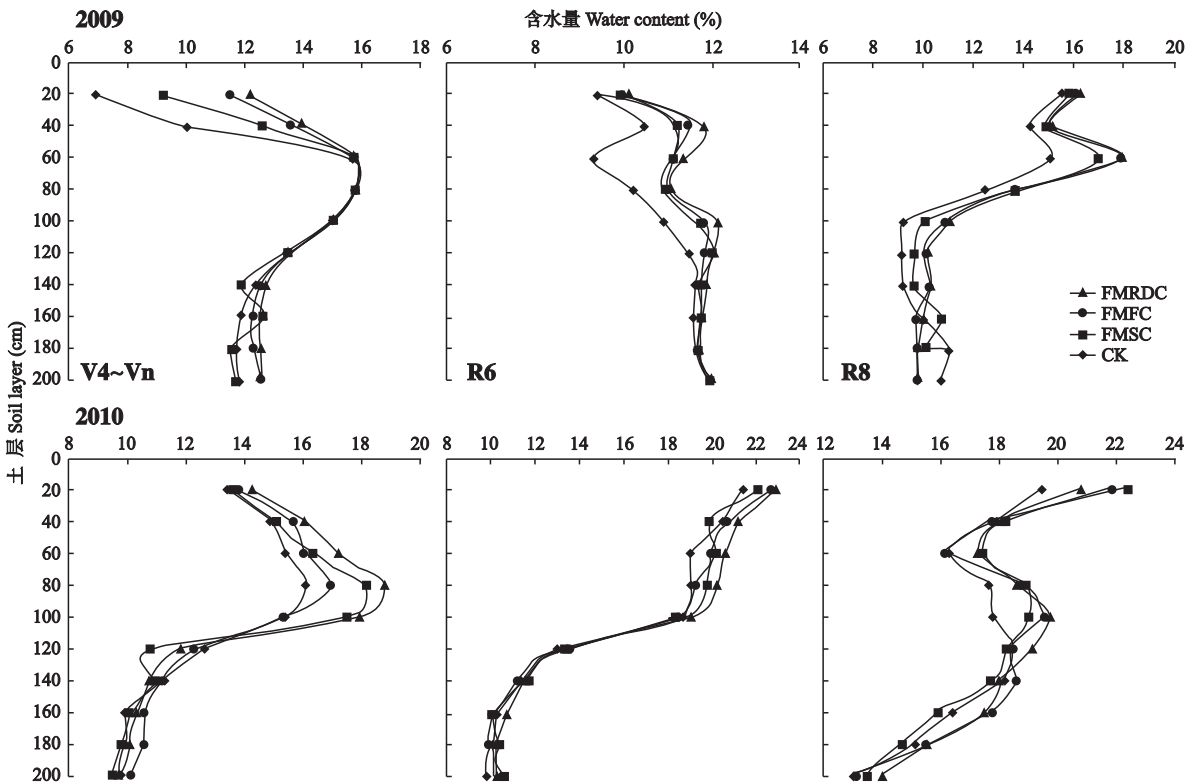


图3 不同覆盖处理大豆生育期不同土层土壤含水量变化

Fig. 3 Changes of soil water content in different layers at growth stages of soybean under different mulching methods.

V4 ~ Vn:分枝期 Branching.

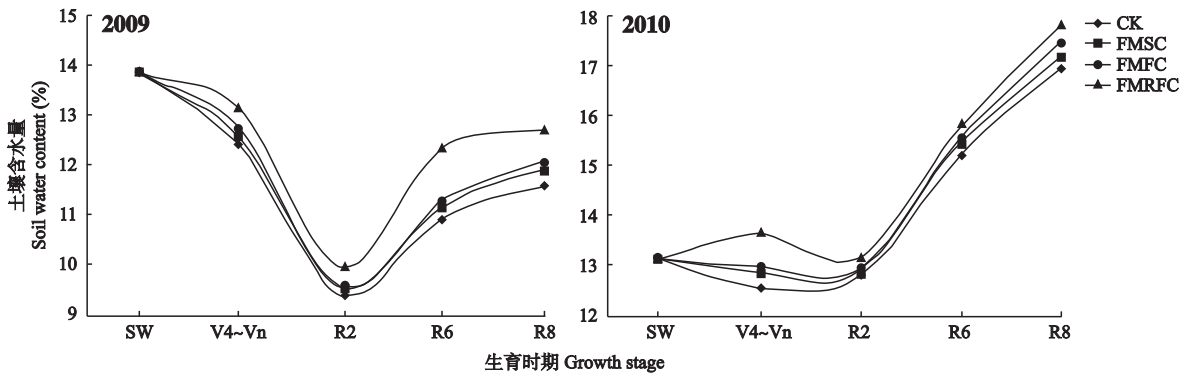


图4 不同覆盖处理0~200 cm 土层土壤水分含量在大豆生育期的动态变化

Fig. 4 Dynamics of soil water content in 0~200 cm during whole growth period of soybean under different mulching methods.

土壤水分含量明显上升,但成熟期土壤水分含量仍比播种时低;而丰水年份(2010年)则表现为总体上升趋势,经开花后土壤水分的快速补充,成熟期土壤水分含量明显比播种时高。无论是干旱年份还是丰水年份,在播前土壤墒情相同的条件下,各生育时期土壤含水量均以 FMRFC 最高,FMFC 次之,CK 最低。两种年型大豆全生育期 0~200 cm 土层的贮水量分别增加了 62.7~70.3 mm。虽然多雨年份大豆各生育时期 0~200 cm 土层含水量均明显高于干旱年份,但覆盖处理对 0~200 cm 土层土壤水分垂直变化的影响均表现为 FMRFC>FMFC>FMSC>CK,其集保水作用也基本接近,表明覆盖栽培在干旱年份更能发挥集雨提墒作用,是提高田间土壤水分含量的有效措施,也是地膜覆盖大豆较露地条播耐旱的主要原因。

2.3 不同覆盖处理的大豆耗水量和耗水特征

由表 1 可知,不同覆盖处理大豆全生育期总耗水量与平均耗水强度在不同年份之间变化趋势相

同,覆膜处理之间差异不明显,但都显著低于 CK ($P<0.01$),均表现为 CK>FMSC>FMFC>FMRFC。各生育阶段的耗水量和耗水强度在干旱年份(2009年)均呈现出前期少、中期多、后期相对较少的变化趋势;丰水年份(2010年)则表现出前期少、中后期多的变化趋势。表明大豆田间耗水量和耗水强度受底墒、作物生长时期、种植方式和降水条件的共同影响。

2.4 不同覆盖处理的大豆产量效应

从表 2 可以看出,覆盖处理由于显著改善了株高、分枝数、单株荚数和百粒重等经济性状,提高了水分利用效率,从而增加了大豆产量。不同年型的总体趋势一致,均为 FMRFC 与 FMFC 之间无明显差异,但都极显著高于 FMSC 和 CK ($P<0.01$)。

不同年型覆盖处理对产量性状的作用程度不同。干旱年份(2009年)覆盖处理对大豆农艺性状的改善程度优于丰水年份(2010年)。与 CK 比,覆盖处理的株高、分枝数、单株荚数和百粒重在干旱年份

表 1 不同覆盖处理大豆田间耗水量和耗水特征

Table 1 Water consumption amount and characteristics of soybean under different mulching methods

年份 Year	处理 Treatment	播种-分枝期 Sowing-branching		分枝-鼓粒期 Branching-seed filling		鼓粒-成熟期 Seed filling-maturity		总耗水量 TWC (mm)	生育期平均 耗水强度 AWCI (mm·d ⁻¹)
		耗水量 WC (mm)	耗水强度 WCI (mm·d ⁻¹)	耗水量 WC (mm)	耗水强度 WCI (mm·d ⁻¹)	耗水量 WC (mm)	耗水强度 WCI (mm·d ⁻¹)		
2009	FMRFC	54.6	1.37	133.6	2.73	99.0	2.06	287.2Aa	2.07Aa
	FMFC	82.5	1.97	134.1	2.74	98.1	2.04	291.2Aa	2.09Aa
	FMSC	73.5	1.75	120.8	2.46	98.0	2.04	292.2Aa	2.10Aa
	CK	86.4	2.06	120.1	2.45	99.9	2.08	306.4Bb	2.20Bb
2010	FMRFC	61.1	1.30	102.0	2.06	124.7	2.42	287.8Aa	1.97Aa
	FMFC	66.1	1.41	102.7	2.08	127.6	2.46	296.4Bb	2.03Ab
	FMSC	67.9	1.44	104.2	2.12	130.6	2.51	302.7Bc	2.07Ab
	CK	70.9	1.51	105.7	2.16	131.8	2.53	308.4Cd	2.11Bc

同列不同大、小写字母分别表示同年不同处理间差异极显著 ($P<0.01$) 和显著 ($P<0.05$)。Different capital and small letters in the same column meant significant difference among treatments in the same year at 0.01 and 0.05 levels, respectively. 下同 The same below. WC: Water consumption; WCI: Water consumption intensity; TWC: Total water consumption; AWCI: Average water consumption intensity during the whole growth period.

表 2 不同覆盖处理大豆产量、农艺性状和水分利用效率

Table 2 Yield, agronomic traits and water use efficiency (WUE) of soybean under different mulching methods

年份 Year	处理 Treatment	株高 Plant height (cm)	分枝数 Branches	单株荚数 Pods per plant	荚粒数 Seed per pod	百粒重 100-seeds mass (g)	籽粒产量 Yield (kg · hm ⁻²)	水分利用效率 WUE (kg · mm ⁻¹ · hm ⁻²)
2009	FMRFC	68.2Aa	7.8Aa	53.6Aa	1.96Aa	26.4Aa	3465Aa	11.7Aa
	FMFC	67.5Aa	7.7Aa	53.4Aa	1.94Aa	26.1Aa	3229Bb	11.1ABa
	FMSC	62.9Bb	7.2Ab	47.1ABb	1.93Aa	24.6Bb	2713Cc	9.3BCb
	CK	44.0Cc	5.4Bc	40.6Bc	1.91Aa	23.8Bc	2293Dd	7.5Cd
2010	FMRFC	90.2Aa	5.5Aa	70.1Aa	1.92Aa	24.2Aa	3584Aa	12.6Aa
	FMFC	89.5Aa	5.4Aa	69.6Aa	1.83Aa	23.9Aa	3564Aa	12.4Aa
	FMSC	89.8Aa	5.4Aa	67.8Aa	1.79Ab	22.6ACb	3252BCb	11.0Bb
	CK	71.5Bb	4.9Bb	63.9Bb	1.72Bb	22.2BCb	2862Dc	9.3Cc

(2009 年) 分别增加了 22.9 ~ 28.2 cm、1.8 ~ 2.2 个、6.5 ~ 13 个和 0.8 ~ 2.6 g, 分别相对提高了 52.0% ~ 65.7%、33.3% ~ 40.7%、16.0% ~ 32.0% 和 3.4% ~ 10.9%; 在丰水年份(2010 年) 分别增加了 18.3 ~ 18.7 cm、0.5 ~ 0.6 个、3.8 ~ 6.2 个和 0.2 ~ 2.0 g, 分别相对提高了 25.6% ~ 26.2%、10.2% ~ 12.2%、5.9% ~ 9.7% 和 0.9% ~ 9.0%, 且干旱年份分枝数和百粒重绝对值高, 丰水年份提高了株高、单株荚数和荚粒数的绝对值. 表明干旱年份覆盖处理增强了大豆补偿生长效应是其增产的重要原因之一.

虽然干旱年份(2009 年) 大豆全生育期平均水分利用效率(WUE)的绝对值略低于丰水年份(2010 年), 但其提高 WUE 的作用要高于丰水年份. 两种年型 FMRFC 处理大豆 WUE 分别较其他处理提高了 5.8% ~ 56.3% 和 1.5% ~ 35.4%. 表明水分利用效率的提高是覆盖栽培特别是早年覆盖栽培增产的主要原因之一.

不同年型覆盖处理增产效应不同. 干旱年份(2009 年) 4 个处理的产量都达到极显著差异 ($P < 0.01$), 以 FMRFC 平均产量最高, 达 3465 kg · hm⁻², 分别较 FMFC、FMSC 和 CK 增产 7.3%、27.7%、51.1%; 丰水年份(2010 年) FMRFC 产量也是最高, 但与 FMFC 差异不显著, 与 FMSC 和 CK 差异极显著 ($P < 0.01$), 增产幅度分别达 0.6%、10.2%、25.2%. 表明覆盖种植干旱年份增产作用大于丰水年份.

3 讨 论

大豆是喜温作物, 在各生长发育阶段对温度都有不同要求, 种子萌发和发育前期对温度很敏感, 若遇低温直接影响产量^[1-2]. 一般温度从 18/12 °C

(昼/夜) 提高到 26/20 °C, 种子产量增加, 超过 26/20 °C, 大豆种子产量下降^[22-24], 全生育期生长最适温度为 20 ~ 25 °C^[24]. 本研究表明, 地膜覆盖使旱作大豆全生育期根层 0 ~ 20 cm 土层土壤温度平均提高 1.3 ~ 1.6 °C, 生育关键期地温均保持在 21 °C 以上, 特别是苗期(VE ~ V3) 至鼓粒期(R6) 增温达 0.5 ~ 2.5 °C, 这对于促进大豆早萌发、根系发育、培育壮苗全苗, 抵御黄土旱塬早春寒, 夺取高产具有重要意义. 覆盖处理 0 ~ 20 cm 土层地温呈“S”型日变化, 变幅随生育进程逐渐缩小, 表明覆盖有均衡大豆生育期地温、避免生育后期高温危害的作用, 这与在玉米^[7]、小麦^[8]、油菜^[10]、大豆^[15] 等作物上的研究结论一致, 与在旱砂田西瓜^[12] 上的研究结论相似.

大豆需水量多, 在豆类作物中对缺水最为敏感^[3-5], 在北方旱区常遇干旱而减产^[5-6]. 许多研究都表明, 地膜覆盖^[6-8]、秸秆覆盖^[9-11]、生草覆盖^[13-14] 和覆盖+沟垄种植^[7-8, 12] 能有效减少土壤水分蒸发, 显著提高作物产量和水分利用效率. 也有研究表明, 作物生长前期地膜覆盖可增加耗水量, 提高水分利用效率, 但因前期水分的过度消耗, 会导致作物生长后期土壤水分条件的恶化而减产^[25-26]. 本试验中, FMRFC 由于有大小两个覆膜垄面的集雨作用, 较大限度地使半干旱区较难利用的 5 ~ 10 mm 常见性降水径流汇集于作物种植沟(即垄沟)内, 两个年型都显著增加了作物根层 0 ~ 100 cm 土层土壤含水量和贮水量, 整个生育期 0 ~ 200 cm 土层各测定层次的土壤含水量和贮水量分别比 CK 高 0.9% ~ 2.5%、62.7 mm(干旱年份, 2009 年) 和 0.5% ~ 3.0%、70.3 mm(丰水年份, 2010 年), 且早年集雨提墒作用更强. 不同覆盖处理在两种年型条件下, 大豆全生育期总耗水量与平均耗水强度都显著低于 CK, FMRFC 耗水量最低, 没有出现生育后期

脱水减产的现象. 表明覆盖特别是 FMRFC 处理是解决北方旱区土壤水分紧缺问题的重要措施.

覆盖种植显著改善了大豆株高、分枝数、单株荚数和百粒重等经济性状, 提高了水分利用效率, 增加了大豆产量, 这与相关研究^[6,15,27]结论一致, 并与在玉米^[7]、小麦^[8,25]等作物上的研究结论相近. 本研究表明, FMRFC 处理显著改善了土壤水热状况, 使作物全生育期都处于相对良好的生长环境, 优化了大豆的经济性状、WUE 的提高作用最大, 因而产量也最高. 2009 年大豆开花期前虽然 CK 0~200 cm 土层土壤含水量不足 10%, 但产量仍达到 2293 kg·hm⁻², 分析其原因认为有两个方面: 一是黄土旱塬气候暖干化使早春土壤增温快, 最大限度地满足了大豆喜温的习性, 使大豆根系发育良好、下扎深度深, 遇旱时能汲取土壤深层水供植株生长发育, 使作物受旱程度轻, 产量几乎不受影响; 二是旱地作物干旱后复水植株生长发育的补偿或超补偿效益所致. 2009 年大豆全生育期降水 246.3 mm, 是同期多年平均降水量 (387 mm) 的 63.6%, 但 81.3% 的降水发生在经历了较长时间干旱后的 7—9 月 (达 200 mm), 干旱后复水的补偿生长作用使 CK 产量受前期干旱的影响较小. 事实上, 干旱区气候向暖干化转型后, 喜温作物生殖生长期延长、产量相对提高是许多研究的共识^[28-29].

FMRFC 处理能显著提高并均衡大豆生育期地温, 有较好的集雨保墒作用, 特别是在旱年增温提墒作用更强, 对促进大豆补偿生长、改善农艺性状和提高 WUE 的作用优于丰水年, 因而具有较好的增产作用, 是北方旱区旱作大豆抗寒抗旱高产栽培的有效种植方式. 但大豆对水分、温度敏感, 产量不仅受单株生产力的影响, 更受群体结构的影响^[18,26]. 因此, FMRFC 处理优化群体结构的方式及其增产效应还有待进一步研究.

参考文献

- [1] Hao J (郝晶), Zhang L-J (张立军), Xie P-D (谢甫娣). Effects of low temperature on defense enzyme activities of different chilling tolerant soybean cultivars during the germination. *Soybean Science* (大豆科学), 2007, **26**(2): 171-175 (in Chinese)
- [2] Zhang D-W (张大伟), Du X-Y (杜翔宇), Liu C-Y (刘春燕), et al. Effect of low-temperature stress on physiological indexes of soybean at germination stage. *Soybean Science* (大豆科学), 2010, **29**(2): 228-232 (in Chinese)
- [3] Liang J-Q (梁建秋), Zhang M-R (张明荣), Wu H-Y (吴海英). Advances in drought tolerance of soybean. *Soybean Science* (大豆科学), 2010, **29**(2): 341-346 (in Chinese)
- [4] Yang P-H (杨鹏辉), Li G-Q (李贵全), Guo L (郭丽), et al. Effect of drought stress on plasma membrane permeability of soybean varieties during flowering-podding stage. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2003, **21**(3): 127-129 (in Chinese)
- [5] Yan C-J (闫春娟), Song S-H (宋书宏), Wang W-B (王文斌), et al. Research outline of water physiology and ecology in soybean. *Soybean Science* (大豆科学), 2010, **29**(3): 514-518 (in Chinese)
- [6] Guo Z-L (郭志利), Sun C-Q (孙常青), Liang N (梁楠). Impacts of plastic mulching on water saving and yield increasing of dry land spring soybean and its density effect. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2007, **15**(1): 205-206 (in Chinese)
- [7] Wang H-L (王红丽), Zhang X-C (张绪成), Song S-Y (宋尚有), et al. Effects of whole field-surface plastic mulching and planting in furrow on soil temperature, soil moisture, and corn yield in arid area of Gansu Province, Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(10): 2609-2614 (in Chinese)
- [8] Xie Y-H (谢英荷), Li T-L (李廷亮), Hong J-P (洪坚平), et al. Effects of nitrogen application and ridge film furrow planting on water use of winter wheat in dry land of South Shanxi. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(8): 2038-2044 (in Chinese)
- [9] Liu D-Q (刘冬青), Xin S-R (辛淑荣), Zhang S-G (张世贵). Effects of difference mulching on the soil environment and yield of cotton in dryland field. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2003, **21**(2): 18-21 (in Chinese)
- [10] Ren J-R (任军荣), Yang J-L (杨建利), Li D-R (李殿荣). Moisture and thermal effect of rape seed cultivated by mulching plastic-film in dry land. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences* (中国油料作物学报), 2001, **23**(3): 34-37 (in Chinese)
- [11] Hu X-M (胡小曼), Li F-L (李佛琳), Yang H-W (杨焕文), et al. Effects of mulching methods on temperature and moisture of soil and growth and quality of flue-cured tobacco. *Chinese Tobacco Science* (中国烟草科学), 2011, **32**(5): 34-38 (in Chinese)
- [12] Ma Z-M (马忠明), Du S-P (杜少平), Xue L (薛亮). Influences of different plastic film mulches on temperature and moisture of soil and growth of watermelon in grave-mulched land. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2011, **31**(5): 1295-1302 (in Chinese)
- [13] Zhang Y (张义), Xie Y-S (谢永生), Hao M-D (郝明德), et al. Effects of different patterns surface mulching on soil properties and fruit trees growth and yield in an apple orchard. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(2): 279-286 (in Chinese)
- [14] Sun L-T (孙立涛), Wang Y (王玉), Ding Z-T (丁

- 兆堂), *et al.* Effects of ground surface mulching in tea garden on soil water and nutrient dynamics and tea plant growth. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(9): 2291–2296 (in Chinese)
- [15] Wang H-Q (王海泉), Luan X-Y (栾晓燕), Man W-Q (满为群), *et al.* Research progress of the soil ecological effects of soybean with film mulching cultivation. *Soybean Science* (大豆科学), 2009, **28**(2): 337–340 (in Chinese)
- [16] Li L-J (李丽君), Gao J-L (高聚林), Wu X-L (武向良), *et al.* Effects of different film mulching techniques on soil water movement and WUE in soybean field. *Soybean Science* (大豆科学), 2008, **27**(2): 262–266 (in Chinese)
- [17] Sun J-Y (孙继颖), Gao J-L (高聚林), Wang Z-G (王志刚), *et al.* Effects of covering film on physiological indexes and water use efficiency (WUE) of soybean in dryland. *Soybean Science* (大豆科学), 2008, **27**(2): 251–254, 266 (in Chinese)
- [18] Lin H (林浩), Liu L-J (刘丽君), Wu J-J (吴俊江), *et al.* Effects of different cultivation patterns on assimilate accumulation, photosynthetic characteristics and yield formation in soybean. *Soybean Science* (大豆科学), 2009, **28**(3): 456–460 (in Chinese)
- [19] Fehr WR, Caviness CE. Stages of Soybean Development (Special Report 80). Ames: Iowa State University, 1977: 1–12
- [20] Li K-Y (李开元), Li Y-S (李玉山). Study on field water balance of Loess Plateau. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 1995, **9**(2): 41–44 (in Chinese)
- [21] Cook HF, Valdes Gerardo SB, Lee HC. Mulch effects on rainfall interception, soil physical characteristics and temperature under *Zea mays* L. *Soil & Tillage Research*, 2006, **91**: 227–235
- [22] Huxley PA, Summerfield RJ, Hughes P. Growth and development of soybean as affected by tropical daylengths, day/night temperature and nitrogen nutrition. *Annals of Applied Biology*, 1976, **82**: 117–133
- [23] Sionit N, Strain BR, Flint EP. Interaction of temperature and CO₂ enrichment on soybean: Growth and dry matter partitioning. *Canadian Journal of Plant Science*, 1987, **67**: 59–67
- [24] Seddigh M, Jolliff GD. Night temperature effects on morphology, phenology, yield and yield components of indeterminate field-grown soybean. *Agronomy Journal*, 1984, **76**: 824–828
- [25] Chen H-L (陈辉林), Tian X-H (田霄鸿), Wang X-F (王晓峰), *et al.* Effects of different cultivation models on soil water, soil temperature and yield during the winter wheat growth in the Weibei Dry Highland. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30**(9): 2424–2433 (in Chinese)
- [26] Chen Y-Q (陈艳秋), Song S-H (宋书宏), Wang W-B (王文斌), *et al.* Research on the regularity of growth and development and yield component of mulched vegetable soybean. *Soybean Science* (大豆科学), 2007, **26**(3): 439–442 (in Chinese)
- [27] Zhou R-L (周瑞莲), Wang Z-L (王仲礼), Hou Y-L (侯月利), *et al.* The effect of growth temperature on the accumulation pattern of protein, oil and starch of soybean seed in seed filling. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(10): 4635–4644 (in Chinese)
- [28] Zhao J-F (赵俊芳), Guo J-P (郭建平), Ma Y-P (马玉平), *et al.* Change trends of China agricultural thermal resources under climate change and related adaptation countermeasures. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(11): 2922–2930 (in Chinese)
- [29] Hao X-Y (郝兴宇), Han X (韩雪), Ju H (居辉), *et al.* Impact of climatic change on soybean production: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(10): 2697–2706 (in Chinese)

作者简介 杨封科,男,1963年生,博士,研究员.主要从事旱地农业及早区水土资源高效利用研究,发表论文20余篇. E-mail: yang_fk@163.com

责任编辑 张凤丽
