

# 旱地冬小麦秸秆带状覆盖不同模式的水分效应

李 瑞<sup>1</sup>,程宏波<sup>2</sup>,王 芳<sup>1</sup>,柴雨葳<sup>1</sup>,陈玉章<sup>1</sup>,常 磊<sup>1</sup>,黄彩霞<sup>3</sup>,柴守玺<sup>1</sup>

(1.甘肃省干旱生境作物学重点实验室/甘肃农业大学农学院,甘肃 兰州 730070;2.甘肃农业大学生命科学与技术学院,甘肃 兰州 730070;  
3.甘肃农业大学工学院,甘肃 兰州 730070)

**摘 要:**在黄土高原半干旱雨养条件下以露地种植为对照(CK),设置了4种玉米整秆带状覆盖方式:带状3行(MS3),带状4行(MS4),带状5行(MS5),带状6行(MS6),比较研究了不同带幅对冬小麦产量、土壤水分变化的影响。结果表明:适宜带幅(MS3、MS4)的秸秆带状覆盖能显著改善土壤水分状况并提高冬小麦产量和水分利用效率,MS3、MS4分别较CK增产69.1%、41.3%,水分利用效率提高88.1%、39.1%。MS3与MS4对土壤含水量在不同时期、不同土层均具有增墒和降墒的双重效应,但增墒效应更为突出,全生育期平均分别较CK提高土壤含水量1.00和0.35个百分点。MS3可以显著改善土壤水分在各生育时期各土层的分布情况,其在播种期~越冬期、返青期~孕穗期的供水效果,以及60cm以下土层对60cm以上土层的水分补给效果均好于其它处理,有利于冬小麦生长、成穗,提高穗粒数,因此MS3更适合黄土高原半干旱雨养地区的冬小麦生产。

**关键词:**冬小麦;秸秆覆盖;带幅;土壤水分;产量;雨养农业区

**中图分类号:**S343.1 **文献标志码:**A

## Effect of straw strip mulching of different model on soil moisture content of winter wheat in arid region

LI Rui<sup>1</sup>, CHENG Hong-bo<sup>2</sup>, WANG Fang<sup>1</sup>, CHAI Yu-wei<sup>1</sup>, CHEN Yu-zhang<sup>1</sup>,  
CHANG Lei<sup>1</sup>, HUANG Cai-xia<sup>3</sup>, CHAI Shou-xi<sup>1</sup>

(1. Gansu Provincial Key Lab of Arid land Crop/College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;  
2. College of Life Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;  
3. College of Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

**Abstract:** The research has been conducted on the Loess Plateau which is characterized by semi-arid climate and rain-fed conditions. Four belt mulching groups of whole corn stalk of MS3, MS4, MS5, MS6 were set up in contrast to open field cultivation, so as to study the effect of different treatments on the winter wheat yield and soil moisture content. The results showed that the appropriate straw strip mulching could significantly improve soil moisture content and water use efficiency, as evidenced by the winter wheat yield increased by 69.1% and 41.3% respectively with MS3 and MS4, and water use efficiency by 88.1% and 39.1%, compared to CK. MS3 and MS4 had dual effects on the increase and the decrease of soil moisture content in different soil layers during different periods. The increase effect on soil moisture content was more significant. The soil moisture content was increased by 1.00 and 0.35 percent respectively, treated by MS3 and MS4 compared to CK during the whole growth period. Moreover, MS3 could remarkably improve the distribution of soil moisture in different soil layers at different growth stages, as well as water supply effect from the sowing-wintering stage to the green-booting stage. In addition, the water recharge effect to soil layers below and above 60 cm was superior to other treatments, which was good for the growth, the spike formation and the increase of grain number per spike of winter wheat. Therefore, MS3 is of greater benefit

收稿日期:2017-02-17

修回日期:2018-04-08

**基金项目:**国家自然科学基金项目(31560365);公益性行业(农业)科研专项资助项目(201303104);现代农业产业技术体系建设专项资助项目(CARS-3-2-49)

**作者简介:**李瑞(1988-),男,甘肃会宁人,硕士,研究方向为作物栽培与生态生理。E-mail: 1243879469@qq.com。

**通信作者:**柴守玺(1962-),教授,博士生导师,主要从事小麦栽培育种和生态生理研究。E-mail: sxchai@126.com

to winter wheat production on the Loess Plateau characterized by semi-arid climate and rain-fed conditions.

**Keywords:** winter wheat; maize straw mulching; belt width; soil moisture; yield; rain-fed agricultural region

土壤水分是影响作物生长的主要因子,我国西北的半干旱雨养区土壤贫瘠,春季多风少雨,气候异常干旱,尤其是水分极度匮乏,严重限制了该区的农业发展,因此抗旱保墒农业势在必行。我国的秸秆资源极为丰富,大量焚烧秸秆给生态环境造成了严重污染,而且大大降低了土地肥力<sup>[1]</sup>。在降雨量少蒸发量大的半干旱雨养区进行秸秆带状覆盖具有重大意义,研究发现<sup>[2-4]</sup>,秸秆覆盖有利于土壤团聚体结构的形成,通过提高土壤孔隙度、持水性、通透性和土壤有机质含量,来有效调节植物对水、肥、气、热的需要,为作物高产提供了有利的条件。秸秆覆盖后能改善农田小气候,进而改善作物的生长环境,通过改良土壤结构来控制水土和有机碳的流失,抑制无效耗水,增加降水下渗,蓄水保墒效果十分显著<sup>[5-9]</sup>。目前国内外研究对于秸秆覆盖方式主要为全地面均匀覆盖,由于降温显著、影响作物出苗及生长,对其增产增效的争议颇多。我国自 20 世纪 70 年代后期就对免耕秸秆覆盖开始进行了系统研究,秸秆覆盖能明显减弱土壤蒸发,能极显著提高水分利用效率和作物产量<sup>[10]</sup>。秸秆覆盖在旱地更能极大地蓄水保墒,促进冬小麦分蘖和根系生长,明显提高了生物量,有效节水并增产<sup>[11-12]</sup>。王昕等<sup>[13]</sup>研究表明,适量的秸秆覆盖下玉米的增产幅度可高达 16.9%,水分利用效率能增加 4.3~5.6kg·hm<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup>。巩杰<sup>[14]</sup>研究也表明,在降雨有限的旱作区进行秸秆覆盖能显著改善 0~40cm 的土壤墒情,从而使水分利用效率提高 9.61%~20.93%,小麦产量可提高 12.47%~29.63%。许翠萍<sup>[15]</sup>认为,秸秆覆盖能明显抑制土壤无效蒸发,促进冬小麦生长,水分利用效率能较露地对照提高 4.6%~25.2%。范颖丹等<sup>[16]</sup>发现,秸秆带状覆盖下冬小麦全生育期 0~200cm 土层的平均含水量高于地膜覆盖和露地对照,籽粒产量较露地对照提高 5%~16.7%。但陈素英等<sup>[17]</sup>认为,秸秆覆盖能降低冬小麦穗数,降低温度,延迟了生育期使得灌浆时间缩短,千粒重减

小,从而影响了产量。还有学者<sup>[18-20]</sup>发现,秸秆覆盖并不能增加水分利用效率,甚至影响了出苗和分蘖,从而造成减产。

针对秸秆均匀覆盖降温问题,柴守玺团队<sup>[21]</sup>于近年研究提出“玉米整秆带状覆盖小麦栽培新技术”。该技术主要利用玉米整秆、采取“种的地方不覆、覆的地方不种”,种植带和覆盖带相间排列,不减少播种量、局部密植。该技术解决了秸秆覆盖保墒与降温的矛盾,提高降水入渗率,为玉米秸秆资源开辟了再利用新途径。柴守玺团队 2013、2014 两年的研究表明,该技术可较传统露地种植增产 30% 以上,产量与甘肃省目前主推的全膜覆土穴播技术相近。本试验以常规播种为对照,通过对 4 种不同带幅的玉米整秆带状覆盖方式对冬小麦产量和 0~200cm 土壤水分的影响研究,旨在发现不同覆盖带幅对冬小麦土壤水分在生育时期、土层间变化的影响,以期对秸秆带状覆盖技术寻求最佳覆盖模式,为该技术在半干旱雨养小麦主产区的推广应用提供可行性理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2015 年 9 月~2016 年 7 月在甘肃省通渭县平襄镇甘肃农业大学试验基地进行,该区为黄土高原雨养农业典型代表区,土壤为典型黄绵土。试验基地属半湿润半干旱季风气候,海拔 1760m,年日照时数 2100~2430 h,年均温 6.6℃,无霜期 120~170 d,年蒸发量>1500 mm,年均降水量 380.2 mm,其中约 68.0%在 6~9 月集中降落。试验点冬小麦生育期多年平均降水量为 268.9 mm,约占全年降水量的 70.7%。试验年度冬小麦生育期总降水量 194.8 mm,比常年同期降水量低 27.6%,其中≥5mm 的有效降水 112.8 mm,占全生育期降水量的 57.9%,主要集中在 4~6 月份(见表 1)。

表 1 2015~2016 年冬小麦生育期降水量/mm

Table 1 Precipitation of winter wheat growing stage from 2015 to 2016

时间 Time	9月 Sep.	10月 Oct.	11月 Nov.	12月 Dec.	1月 Jan.	2月 Feb.	3月 Mar.	4月 Apr.	5月 May	6月 Jun.	7月 Jul.	总计 Sum.
≥5mm 有效降水量 Effective precipitation ≥5mm	12.6	0	6.2	0	0	0	0	20.8	39.8	33.4	0	112.8
总降水量 Total precipitation	17.4	12.1	18.7	5.1	1	3.9	5.4	35.2	53.7	42.3	0	194.8
多年平均 Annul average	23.45	28.65	5.3	1.3	2.1	2.6	19.2	27.3	65.7	48.45	44.8	268.9

## 1.2 试验设计

试验共设5个处理(见表2),其中玉米整秆带状覆盖处理4个(MS3,MS4,MS5,MS6),以无覆盖露地条播为对照(CK)。小区面积140m<sup>2</sup>,3次重复,随机区组排列。

风干玉米整秆覆盖量为9000kg·hm<sup>-2</sup>,于10月中旬(越冬前)铺在覆盖带上,冬小麦供试品种为

兰天26号,播种量均为225kg·hm<sup>-2</sup>,与当地常规播量一致,行距17cm,播种深度5cm,播后耧平,秸秆带状覆盖各个处理均不同程度的提高了行播量,以保持亩播量与CK的一致。各处理所施纯氮150kg·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>120kg·hm<sup>-2</sup>,作为基肥一次性施入,后期不再追肥,在开花期进行1次“一喷三防”作业。

表2 试验处理描述

Table 2 Description of different treatments

代码 Code	处理 Treatment	具体措施 Description of treatments
MS3	带状3行 Maize straw 3	播种带宽34cm,覆盖带宽51cm,总幅宽85cm,每种植带均匀密植条播3行 The sowing width is 34cm, the mulching width is 51cm, the total width is 85cm, with 3 rows of wheat planted evenly in each zone.
MS4	带状4行 Maize straw 4	播种带宽51cm,覆盖带宽49cm,总幅宽100cm,每种植带均匀密植条播4行 The sowing width is 51cm, the mulching width is 49cm, the total width is 100cm, with 4 rows of wheat planted evenly in each zone.
MS5	带状5行 Maize straw 5	播种带宽68cm,覆盖带宽52cm,总幅宽120cm,每种植带均匀密植条播5行 The sowing width is 68cm, the mulching width is 52cm, the total width is 120cm, with 5 rows of wheat planted evenly in each zone.
MS6	带状6行 Maize straw 6	播种带宽85cm,覆盖带宽50cm,总幅宽135cm,每种植带均匀密植条播6行 The sowing width is 85cm, the mulching width is 50cm, the total width is 135cm, with 6 rows of wheat planted evenly in each zone.
CK	露地对照 Conventional tillage	无覆盖露地条播 No cover

## 1.3 测定项目与方法

### 1.3.1 土壤水分测定

(1)在小麦播种期、越冬期、返青期、拔节期、孕穗期、开花期、灌浆期、乳熟期及蜡熟期,各小区分0~20、20~40、40~60、60~90、90~120、120~150、150~180和180~200cm共8个土层分别取土样,各处理取样位置均在小麦行间,用烘干法测定土壤含水量。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%。

(2)土壤贮水量、作物耗水量的计算

土壤贮水量计算公式为:

$$W = h \times \rho \times \omega \times 10$$

式中, $W$ 为土壤贮水量(mm); $h$ 土层深度(cm); $\rho$ 为土壤容重( $g \cdot cm^{-3}$ ),本试验各土层 $\rho$ 平均为1.250  $g \cdot cm^{-3}$ ;  $\omega$ 为土壤含水量。

农田耗水量计算公式为:

$$ET = \Delta W + P + I - D + W_g - R$$

$$\Delta W = W_1 - W_2$$

式中, $ET$ 为小麦生育期农田总耗水量(mm), $\Delta W$ 为生育期土壤贮水量变化量(mm); $P$ 为 $\geq 5$ mm有效降雨量; $I$ 为灌溉量(mm); $D$ 为灌溉后土壤水向下层流动量(mm); $W_g$ 为深层地下水利用量(mm); $R$ 为地表径流(mm); $W_1$ 、 $W_2$ 分别为播前和收获时的土壤贮水量(mm)。本试验无灌溉条件,地下水位

在10m以下,冬小麦生育期无地表径流,故 $I$ 、 $D$ 、 $W_g$ 和 $R$ 可忽略不计。

(3)水分利用效率

$$WUE = Y/ET$$

式中, $WUE$ 为水分利用效率( $kg \cdot hm^{-2} \cdot mm^{-1}$ ), $Y$ 为籽粒产量( $kg \cdot hm^{-2}$ ), $ET$ 为小麦生育期总耗水量(mm)。

1.3.2 农艺指标测定 在收获期采集植物样品,每小区随机选取3个采样点,每点取20株,沿根茎结合处剪去根系后,进行考种。冬小麦产量数据采用全区收获法确定,现场称鲜重,取样测定含水量后按13%含水量折算籽粒产量。

1.3.3 土壤温度测定 于越冬前将直角地温计埋入各小区小麦行间,从越冬期至蜡熟期分5、10、15、20、25cm共5个土层,在各生育时期选择干燥的晴天,分别在6:00、13:00和19:00做3次测定,取平均值。

## 1.4 数据处理

采用Microsoft Excel 2007和SPSS19.0软件处理和分析数据,用LSD法进行多重比较,显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 产量及重要指标差异

从表3可知,秸秆带状覆盖对冬小麦产量和水

分利用效率有不同程度影响,总体来看,随播种带加宽产量和水分利用效率逐渐降低,MS3 和 MS4 产量分别较 CK 显著提高 69.1%、41.3%,水分利用效率提高 88.1%、39.1%;MS5、MS6 的产量和水分利用效率与 CK 均无显著差异。

比较产量结构因素可见,处理间单位面积穗数和穗粒数差异较大,变异系数(CV)分别为 15.3%和 11.7%,而千粒重较稳定(CV 值为 4.4%)。覆盖处理中,MS3、MS4 显著提高了穗数和穗粒数,其中 MS3 的穗数、穗粒数分别高于对照 20.2%、37.4%,MS4 较 CK 分别提高 13.5%、27.3%;MS5 和 MS6 穗数分别比 CK 显著低 8.0%、17.9%,而穗粒数分别增加 20.0%和 26.7%。相关分析表明,冬小麦产量与单位面积穗数显著正相关( $r=0.902^*$ )。由分析可见,MS3、MS4 增产主要是因为适宜的带幅利于提高单位面积穗数和穗粒数。

不同秸秆带状覆盖对小麦营养生长有不同程度影响。其中 MS4 和 MS3 分别较 CK 显著增加株高 18.5%和 16.7%,MS5、MS6 则与 CK 差异不显著。秸秆带状覆盖处理均较 CK 显著提高收获指数,以 MS3 增幅最大(9.2 个百分点),MS4、MS6、MS5 增幅相近(5.4~6.5 个百分点)。

比较各个处理的土壤温度发现,秸秆带状覆盖能降低冬小麦全生育期 0~25cm 土层的土壤平均温度,不同程度地减缓了冬小麦的生育进程,MS3 和 MS4 分别较 CK 降低了 1.7℃和 2.2℃,MS5 和 MS6 分别较 CK 降低了 0.9℃和 0.8℃,倒春寒发生的时间正值 MS5 和 MS6 的冬小麦孕穗期,导致相当一部分小麦因为冻害严重而未能抽穗,MS3 和 MS4 因为生育进程更加滞后,使得冻害对孕穗的影响较小。

秸秆带状覆盖处理小麦全生育期耗水量随带幅的增大而增加,其中 MS3 较 CK 显著降低 10.0%,

而 MS4、MS5、MS6 分别较 CK 高出 1.5%、6.3%、10.2%,MS6 与 CK 差异达到显著水平。相关分析表明,冬小麦产量与土壤耗水量显著负相关( $r=-0.828^*$ )。

## 2.2 土壤含水量差异

2.2.1 全生育期 0~200cm 土壤平均含水量 从图 1 可知,秸秆带状覆盖能影响冬小麦全生育期的土壤平均含水量,且随着播种带幅的增大而降低,其中 MS3 的土壤含水量最高,蓄水保墒效果最好,较 CK 显著提高 1.00 个百分点,其次是 MS4 较 CK 显著提高 0.35 个百分点,而 MS5、MS6 与 CK 的差异不显著。

2.2.2 不同生育时期 0~200cm 土壤平均含水量 从图 2 可见,随着冬小麦生育时期的推进,各处理 0~200 cm 土壤平均含水量总体呈递减趋势,且随种植带幅加大,秸秆带状覆盖处理从播种期到蜡熟期土壤含水量的降幅也增大,各处理降幅依次为:MS6 (6.89 个百分点)>MS5(6.48 个百分点)>MS4(5.98 个百分点)>CK(5.83 个百分点)>MS3(4.79 个百分点)。比较各生育阶段土壤含水量降幅可见,各处理均在返青期~孕穗期的降幅最大,处理间仅 MS3 (3.31 个百分点)与 CK(3.26 个百分点)相近,其它处理降幅为 3.93~4.33 个百分点,均显著高于 CK。

比较各生育时期处理间变异系数可见,处理间差异依次为:蜡熟期(7.77%)>拔节期(7.21%)>越冬期(6.65%)>孕穗期(6.38%)>灌浆期(5.72%)>乳熟期(5.03%)>返青期(3.95%)>开花期(2.24%),各生育时期处理间极差值 0.64~2.47 个百分点,最大极差值出现越冬期的 MS3 与 MS6 之间,最小极差值则出现在开花期的 MS3 与 MS5 之间。

表 3 产量及主要指标差异

Table 3 Difference of grain yield and main index

处理 Treatment	产量 Yield /(kg·hm <sup>-2</sup> )	穗数 SN /(10 <sup>4</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	穗粒数 GNS	千粒重 GW/g	株高 PH/cm	单株干重 DMW/g	水分利用效率 WUE /(kg·hm <sup>-2</sup> ·mm <sup>-1</sup> )	收获指数 HI/%	耗水量 ET/mm	土壤温度 ST/℃
MS3	2144.9a	371.9a	20.2a	35.85a	54.3a	2.43a	9.22a	35.3a	232.7c	15.35bc
MS4	1791.5b	350.9a	18.7a	33.93bc	55.2a	2.47a	6.82b	32.6b	262.5b	14.86c
MS5	1314.1c	284.5bc	17.7ab	32.67cd	48.3b	2.08a	4.78c	31.5b	275.0ab	16.21ab
MS6	1268.1c	253.8c	19.3a	32.35d	48.3b	2.56a	4.45c	32.1b	285.1a	16.32ab
CK	1268.2c	309.3b	14.7b	34.92ab	46.5b	2.25a	4.90c	26.1c	258.6b	17.13a
最大差异率 PR/%	69.1	46.5	37.4	10.8	18.5	23.1	107.2	36.1	22.5	15.3
变异系数 CV/%	25.4	15.3	11.7	4.4	7.8	8.1	33.3	10.9	7.5	5.6
CI	1	0.902*	0.653	0.686	0.908*	0.358	0.989**	0.79	-0.828*	-0.798

注:\*,\*\*分别表示在 0.05 水平上相关性显著和极显著。

Note:\*,\*\* indicate correlation significant and highly significant at the 0.05 level.

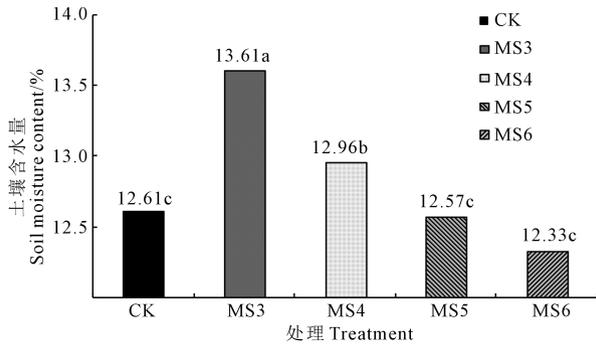
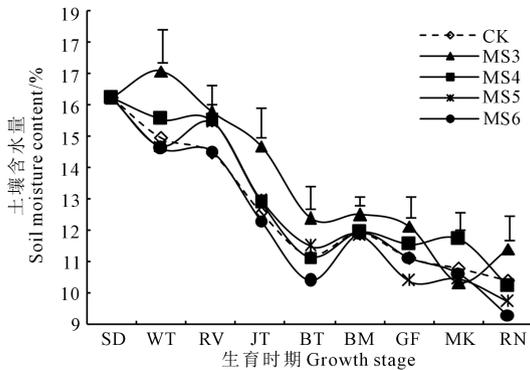


图 1 全生育期 0~200cm 土壤平均含水量

Fig.1 Mean soil moisture content in 0~200cm soil layers at whole growth stages



注:误差线代表  $LSD_{0.05}$ 。SD:播种期;WT:越冬期;RV:返青期;JT:拔节期;BT:孕穗期;BM:开花期;GF:灌浆期;MK:乳熟期;RN:蜡熟期

Note: Error bars show the  $LSD_{0.05}$ . SD: seeding; WT: wintering; RV: revival; JT: jointing; BT: booting; BM: blooming; GF: grain-filling; MK: milking; RN: ripening

图 2 各生育时期 0~200cm 土壤平均含水量

Fig.2 Mean soil moisture content in 0~200cm soil layers at different growth stages

比较各生育阶段秸秆带状覆盖土壤含水量与 CK 的差值可见,MS3 和 MS4 在播种期~越冬期、返青期~孕穗期、开花期~蜡熟期均较 CK 具有显著增墒作用,其中 MS3 依次较 CK 增墒 1.07、1.55、0.67 个百分点,MS4 依次较 CK 增墒 0.30、0.43、0.31 个百分点。而 MS5 仅在返青期~孕穗期较 CK 增墒 0.48 个百分点,在播种期~越冬期、开花期~蜡熟期分别较 CK 降墒 0.13 和 0.43 个百分点;MS6 在上述各生育阶段分别较 CK 降墒 0.17、0.33、0.29 个百分点。

比较各个处理在各生育时期土壤含水量的变异系数发现:MS5 (18.9%) > MS6 (18.7%) > MS3 (17.4%) > MS4 (17.0%) > CK (16.9%),说明秸秆带状覆盖加剧了时期间的土壤水分波动,其中 MS3 在各时期变异系数最小,即水分波动较小,时期间土壤供水较稳定。

2.2.3 不同土层全生育期土壤平均含水量 从图 3 可知,无覆盖露地(CK)的土壤含水量随土层加深而增加,在 180~200cm 土层达到最高(16.12%),比 0~20cm 增加了 5.7 个百分点。秸秆带状覆盖对土壤水分在土层间的分布有一定的影响,总体来看随着土层深度的增加,土壤含水量表现出先减后增的趋势。在 0~60 cm 土层由于蒸腾耗水和蒸发耗水的双重作用,秸秆带状覆盖的土壤含水量随土层加深而逐渐下降,各覆盖处理均在 40~60cm 土层达到最低,平均为 10.58% (10.42%~10.71%),处理间差异不显著;60cm 土层以下总体随土层加深而逐渐增大,其中 MS4、MS5、MS6 与 CK 的变化趋势一致,均在 180~200 cm 土层含水量达到最高,平均为 15.96% (15.42%~16.66%),以 MS4 最高、MS6 最低;而 MS3 在 60~120cm 土层中含水量剧增,且在 90~120 cm 土层达到最高为 16.70%,而 120 cm 以下又总体呈下降趋势,至 180~200 cm 土层含水量为 15.59%。MS3 在 60~120 cm 土层含水量显著高于其它处理 3.82~4.63 个百分点,即对 0~60 cm 土层的供水补给能力好于其它处理。

比较各土层处理间变异系数可见,处理间差异以 60~150 cm (6.73%~14.15%) 最大,其次为 150~200 cm 土层(3.29%),0~60 cm 土层最小(2.47%)。各土层处理间极差值为 0.29~4.63 个百分点,最大极差值出现在 90~120 cm 土层的 MS3 与 MS6 之间,最小极差出现在 40~60 cm 土层 MS4 与 MS6 之间。

比较各土层秸秆带状覆盖土壤含水量与 CK 的差值可见,在 0~60 cm 土层各覆盖处理总体较 CK 增墒 0.43 (0.23~0.55) 个百分点,增墒幅度以 MS5 最高、MS6 最低;在 60~200 cm 土层,MS3 与 MS4 较 CK 分别显著增墒 1.33 和 0.25 个百分点,MS5、MS6 则较 CK 显著降墒 0.39、0.58 个百分点。

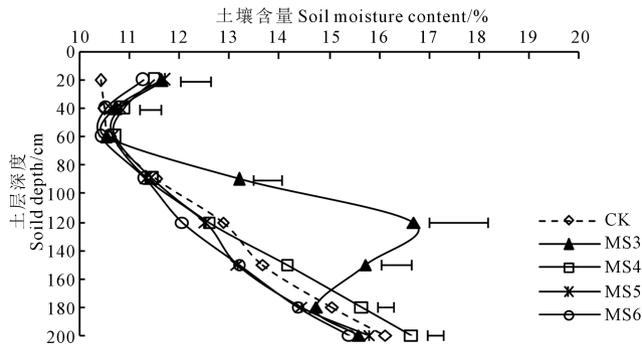


图 3 不同土层全生育期土壤平均含水量

Fig.3 Mean soil moisture content of different soil layers at whole growth period

比较不同处理间土壤含水量的变异系数发现: MS3 (17.8%) > MS4 (17.6%) > CK (17.0%) > MS6 (14.8%) > MS5 (14.5%), 说明 MS3 和 MS4 对土层间水分波动具有加剧作用, MS5、MS6 则具有平抑作用。

2.2.4 土壤水分的时空动态 由表 4、表 5 可知, 秸秆带状覆盖在不同生育时期、不同土层均具有增墒和降墒的双重效应。统计比较各覆盖处理在 8 个生育时期、8 个土层总计 64 个测定点较 CK 增墒点次比例, 依次为: MS4 (68.8%) > MS3 (62.5%) > MS5 (45.3%) > MS6 (34.4%)。秸秆带状覆盖在各生育阶段的增墒点次依次为: 越冬期~返青期(62.5%~

71.9%) > 拔节期~开花期(50.0%~56.3%) > 灌浆期~蜡熟期(31.3%~50.0%); 土层间依次为: 0~60 cm (46.9%~96.9%) > 60~200 cm (31.25%~53.1%)。

各处理在不同时期、不同土层的增墒点次分布差异较大。其中 MS3、MS4 在各时期各土层总体均较 CK 增墒, 但 MS3 在各时期 0~200 cm 8 个土层的平均增墒幅度为 -0.41~2.15 个百分点, MS4 为 -0.16~1.00 个百分点, 总体上 MS3 的增墒效果大于 MS4, 即增墒效果一方面决定于增墒点次, 另一方面决定于增墒幅度。MS5、MS6 的增墒点次主要分布在越冬期~返青期、0~40 cm 土层, 其它各时期各土层则基本为降墒。

表 4 秸秆带状覆盖各生育时期增墒点次比例/%

Table 4 The increased percentage point of soil moisture content at different growth stages

处理 Treatment	越冬期 Wintering	返青期 Revival	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	开花期 Blooming	灌浆期 Filling	乳熟期 Milking	蜡熟期 Ripening	全生育期 Growth
MS3	87.5	75.0	75.0	62.5	75	50	25	50	62.5
MS4	75.0	75.0	75.0	50.0	50	87.5	100	37.5	68.8
MS5	37.5	87.5	62.5	75.0	25	25	37.5	12.5	45.3
MS6	50.0	50.0	12.5	12.5	50	37.5	37.5	25	34.4

表 5 秸秆带状覆盖各土层增墒点次比例/%

Table 5 The increased percentage point of soil moisture content at different soil layers

处理 Treatment	土层 Soil layer/cm							
	0~20	20~40	40~60	60~90	90~120	120~150	150~180	180~200
MS3	100.0	37.5	50.0	87.5	100	87.5	25.0	12.5
MS4	100.0	75.0	62.5	37.5	25.0	87.5	100.0	62.5
MS5	100.0	50.0	37.5	37.5	37.5	25.0	37.5	37.5
MS6	87.5	62.5	37.5	25.0	25.0	12.5	12.5	12.5

### 2.3 土壤含水量与小麦生长的相关分析

相关分析表明(表略), 小麦产量与全生育期( $r = 0.965^{**}$ )、越冬期( $r = 0.960^{**}$ )、拔节期( $r = 0.881^*$ )平均含水量显著或极显著相关, 与其它时期(除乳熟期)土壤平均含水量相关虽不显著但相关系数较高( $r = 0.743 \sim 0.862$ ), 说明良好的土壤水分条件是高产的关键。各时期中, 越冬期含水量与有效穗数显著相关( $r = 0.880^*$ ), 蜡熟期则与有效穗数、千粒重显著( $r = 0.904^*$ )或极显著( $r = 0.960^{**}$ )相关, 可见秸秆带状覆盖在越冬期的显著保墒作用有利于越冬保苗, 增加有效穗数, 从而实现增产。土层间 60~150 cm 土壤含水量与小麦产量( $r = 0.834 \sim 0.947^*$ )和有效穗数( $r = 0.726 \sim 0.889^*$ )的相关性较高, 特别是 120~150 cm 土层含水量与产量( $r = 0.947^*$ )、有效穗数( $r = 0.889^*$ )均显著相关, 可见提高 60~150 cm 土层含水量有利于改善深层土壤对主要耗水层(0~60 cm)的供水状态, 从而影响小麦生长、促进增产。

### 3 讨论与结论

本年度试验中, MS3 与 MS4 较露地种植的增产幅度较大, 高于本团队 2013、2014 年在通渭县常河镇<sup>[21]</sup>以及 2015 年在通渭县平襄镇<sup>[22]</sup>同一田块的研究结果。2016 年 4、5 月份发生了 2 次较严重的倒春寒, 且全生育期有效降水量仅为 2014~2015 年度(丰水年)的 37.4%, 小麦拔节~抽穗阶段对温度及水分胁迫较为敏感, 异常气候严重影响了小麦生长、穗分化及抽穗, 试验田块露地的穗数、穗粒数和产量分别较 2014~2015 年度(丰水年)减少 13.7%、50.2% 和 70.3%, 秸秆带状覆盖(3 行)依次降低 18.5%、26.5% 和 49.9%<sup>[22]</sup>, 秸秆带状覆盖(3 行)两年度间的产量差异小于露地, 可见其对异常气候的胁迫具有一定的减缓作用。根据试验年度测定, MS3 和 MS4 处理具有较明显的降温和增墒效应, 全生育期平均较 CK 降温 1.78℃、2.27℃, 增墒 1.00、0.35 个百分点, 使小麦返青~孕穗生育进程较 CK 延迟 3d, 减轻了倒春寒及干旱对穗分化和抽穗的影

响,其穗数、穗粒数均显著高于 CK,导致了较 CK 的增产率比同一田块 2014~2015 年度的高出 25.1%。MS5、MS6 全生育期土壤温度仅较 CK 降低 0.92℃、0.81℃,土壤墒情与 CK 相近,延迟孕穗 1d,且种植带内植株密度大于露地,以致异常气候因素对小麦抽穗的影响强于露地,穗数较 CK 明显减少,从而影响了群体产量。

张树兰等<sup>[23]</sup>发现,由于生育后期的水分胁迫,秸秆均匀覆盖条件下小麦的收获指数较常规种植下降 20%。而本研究中,在干旱年份秸秆带状覆盖能显著提高冬小麦的收获指数,以 MS3 最为显著。这是由于 MS3 在生育后期(开花期~蜡熟期)土壤含水量显著高于其它覆盖处理 0.7 个百分点,有效改善了灌浆阶段土壤的供水条件,对干物质转移、籽粒灌浆有明显的促进,从而提高了籽粒产量与生物产量的比例。

本研究中小麦产量与生育期耗水量显著负相关( $r = -0.828^*$ ),这与王增丽等<sup>[24]</sup>的研究结果( $r = -0.98^{**}$ )大体一致,而与全覆膜小麦的高产建立在高耗水的基础上的结论<sup>[25, 26]</sup>截然不同。其原因可能在于秸秆带状覆盖与地膜全覆盖对土壤水分的消耗不同,地膜全覆盖的土壤水分蒸发耗散接近于零,而秸秆覆盖耗水包括土壤蒸发的无效耗散和植株蒸腾生产的有效耗散,本研究中,由于随种植带幅增宽、植株覆盖度降低,导致土壤蒸发量增大,耗水增加。

本研究 MS3 具有较为适宜的带幅,增强了土壤的蓄水保墒和控温抑蒸能力,促进土壤深层水的运移,增强了深层土壤水分(60~120cm)对主要耗水层(0~60cm)的补给作用,有效改善了 MS3 全生育期土壤水分条件,利于小麦生长成穗,增加产量。综合考虑,秸秆覆盖带状 3 行具有蓄水保墒、节水增产效果的相当优势,是适合西北旱作农业的可持续发展、操作性强的覆盖种植方式。

#### 参考文献:

[1] Yang H, Feng J, Zhai S, et al. Long-term ditch-buried straw return alters soil water potential, temperature, and microbial communities in a rice-wheat rotation system[J]. Soil and Tillage Research, 2016,163: 21-31.

[2] 蔡太义,贾志宽,黄耀威,等.中国旱作农区不同量秸秆覆盖综合效应研究进展I.不同量秸秆覆盖的农田生态环境效应[J].干旱地区农业研究,2011,29(5):63-68,74.

[3] 刘爽,张兴义.保护性耕作下黑土水热动态研究[J].干旱地区农业研究,2010,28(6):15-22.

[4] 张吉祥,汪有科,负学锋,等.不同麦秆覆盖量对夏玉米耗水量和生理性状的影响[J].灌溉排水学报,2007,26(3):69-71.

[5] 郭晓霞,刘景辉,张星杰,等.不同耕作方式对土壤水热变化的影

响[J].中国土壤与肥料,2010(05):11-15.

[6] Dossou-Yovo E R, Brüggemann N, Ampofo E, et al. Combining no-tillage, rice straw mulch and nitrogen fertilizer application to increase the soil carbon balance of upland rice field in northern Benin[J]. Soil and Tillage Research, 2016,163:152-159.

[7] Li S, Li Y, Li X, et al. Effect of straw management on carbon sequestration and grain production in a maize-wheat cropping system in Anthrosol of the Guanzhong Plain[J]. Soil and Tillage Research, 2016,157:43-51.

[8] Tomasz G, Kulig B. Effect of mulch and tillage system on soil porosity under wheat (*Triticum aestivum*) [J]. Soil and Tillage Research, 2008,99(2):169-178.

[9] 舒馨,朱安宁,张佳宝,等.保护性耕作对潮土物理性质的影响[J].中国农学通报,2014,30(6):175-181.

[10] Huang Y, Chen L, Fu B, et al. The wheat yields and water-use efficiency in the Loess Plateau; Straw mulch and irrigation effects[J]. Agricultural Water Management, 2005,72(3):209-222.

[11] Li C, Li J, Tang Y, et al. Stand establishment, root development and yield of winter wheat as affected by tillage and straw mulch in the water deficit hilly region of Southwestern China [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016,15(7):1480-1489.

[12] 李金刚,樊高琼,汤永禄,等.耕作措施对四川丘陵旱地小麦前期群体质量和土壤水分的影响[J].西南农业学报,2014,27(5):1852-1857.

[13] 王昕,贾志宽,韩清芳,等.半干旱区秸秆覆盖量对土壤水分保蓄及作物水分利用效率的影响[J].干旱地区农业研究,2009,27(4):196-202.

[14] 巩杰,黄高宝,陈利顶,等.旱作麦田秸秆覆盖的生态综合效应研究[J].干旱地区农业研究,2003,21(3):69-73.

[15] 许翠平,刘洪禄,车建明,等.秸秆覆盖对冬小麦耗水特征及水分生产率的影响[J].灌溉排水,2002,21(3):24-27.

[16] 范颖丹,柴守玺,程宏波,等.覆盖方式对旱地冬小麦土壤水分的影响[J].应用生态学报,2013,24(11):3137-3144.

[17] 陈素英,张喜英,孙宏勇,等.华北平原秸秆覆盖冬小麦减产原因分析[J].中国生态农业学报,2013,21(5):519-525.

[18] 李全起,陈雨海,吴巍,等.秸秆覆盖和灌溉对冬小麦农田光能利用率的影响[J].应用生态学报,2006,17(2):243-246.

[19] 刘婷,贾志宽,张睿,等.秸秆覆盖对旱地土壤水分及冬小麦水分利用效率的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2010,38(7):68-76.

[20] Chen S Y, Zhang X Y, et al. Effects of straw mulching on soil temperature, evaporation and yield of winter wheat: field experiments on the North China Plain[J]. 2007,150(3):261-268.

[21] 柴守玺.一种旱地秸秆带状覆盖作物种植新技术[J].甘肃农业大学学报,2014(5):42.

[22] 李博文.不同覆盖方式和施肥量对旱地冬小麦产量的影响[D].甘肃农业大学,2016.

[23] 张树兰,刘俊梅,黎青慧,等.秸秆覆盖下旱地小麦收获指数降低的原因解析[J].干旱地区农业研究,2014(01):47-51.

[24] 王增丽,冯浩,温广贵.不同预处理秸秆对土壤水分及冬小麦产量的影响[J].节水灌溉,2015,24(4):14-18.

[25] 杨长刚,柴守玺,常磊,等.不同覆膜方式对旱作冬小麦耗水特性及籽粒产量的影响[J].中国农业科学,2015,48(4):661-671.

[26] 宋亚丽,杨长刚,李博文,等.秸秆带状覆盖对旱地冬小麦产量及土壤水分的影响[J].麦类作物学报,2016,36(6):765-772.