

秸秆带状覆盖对旱地冬小麦产量的影响

李博文¹,杨长刚¹,兰雪梅¹,宋亚丽¹,李守蕾¹,常磊¹,
韩凡香¹,程宏波²,黄彩霞³,柴守玺¹

(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:为探索利于西北黄土高原旱作麦田可持续发展的覆盖保墒栽培新技术,通过大田试验研究了不同覆盖方式(秸秆带状覆盖:BSC,旧膜二茬利用:PAH,露地条播:CK)和不同施肥量(纯氮、P₂O₅ 分别为:90、120、150 kg·hm⁻²)对旱地冬小麦产量的影响。结果表明,覆盖方式与施肥量对冬小麦产量、产量三因素、生育期耗水量及水分利用效率有显著影响,且二者互作效应显著。秸秆带状覆盖下,籽粒产量达到 5 305.0 kg·hm⁻²,较 PAH 和 CK 分别显著增加 24.0%和 37.5%,水分利用效率达 10.8 kg·hm⁻²·mm⁻¹,较 PAH 和 CK 分别显著提高 20.6%和 33.3%,且同等施肥量下 BSC 的产量和水分利用效率均显著高于 PAH 和 CK。从产量三因素看,BSC 单位面积穗数较 PAH 和 CK 分别显著提高 27.0%和 42.2%,而穗粒数分别降低 14.3%和 6.7%,千粒重分别降低 2.3%和 6.8%,差异均达显著水平。与 CK 相比,BSC 和 PAH 全生育期表现为显著的增墒效应,其中返青前以 BSC 保墒效果最好,拔节后则以 PAH 保墒效果最好。比较全生育期 0~25 cm 土壤温度差异,BSC 越冬前表现为增温效应,较 CK 高 1.2℃,返青后表现为降温效应,较 CK 低 1.8℃;而 PAH 全生育期表现为增温效应,平均较 CK 高 0.9℃。通径分析表明,秸秆带状覆盖主要是通过改善土壤水热条件,显著提高单位面积穗数,从而提高冬小麦产量。

关键词: 秸秆带状覆盖;旱地;冬小麦;产量;土壤水分;土壤温度
中图分类号: S343.1 **文献标志码:** A

Effects of bundled straw covering on yield of dryland winter wheat in semiarid region

LI Bo-wen¹, YANG Chang-gang¹, LAN Xue-mei¹, SONG Ya-li¹, LI Shou-lei¹, CHANG Lei¹,
HAN Fan-xiang¹, CHENG Hong-bo², HUANG Cai-xia³, CHAI Shou-xi¹

(1. College of Agronomy, Gansu Agricultural University/ Gansu Provincial Key Lab of Aridland Crop, 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: With the purpose to probe new mulching cultivation technology for sustainable development of winter wheat in northwest Loess Plateau, a field experiment was conducted to study the effects of different mulching patterns (bundled straw covering: BSC, mulching with used plastic film after harvest: PAH, uncovered and row – seeding: CK) and fertilization treatments (pure N and P₂O₅: 90 kg·hm⁻², 120 kg·hm⁻², 150 kg·hm⁻²) on the yield of dryland winter wheat. The results showed that mulching patterns and fertilizer amount had significant effects on grain yield, yield components, water consumption amount and water use efficiency (WUE), and their interaction effect was also significant. The grain yield reached 5 305.0 kg·hm⁻² under BSC, which was 24.0% and 37.5% higher than that under PAH and CK, and the WUE reached 10.8 kg·hm⁻²·mm⁻¹, which was 20.6% and 33.3% higher than that under PAH and CK, respectively. Under same fertilizer amount, the yield and WUE of BSC were significantly higher than those of PAH and CK. In aspects of yield components, the spike number per unit area of BSC was 27.0% and 42.2% higher than

收稿日期:2015-12-11
基金项目:现代农业产业技术体系建设专项资助项目(CARS-3-2-49);公益性行业(农业)科研专项(201303104);盛彤笙科技创新基金(GSAU-STIS-1512)
作者简介:李博文(1990—),男,甘肃庆阳人,硕士研究生,主要从事作物栽培与生态生理研究。E-mail: 837808901@qq.com。
通信作者:柴守玺(1962—),男,甘肃会宁人,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。

that of PAH and CK, respectively; however, the grain number per spike reduced by 14.3% and 6.7%, and the 1000-grain weight reduced by 2.3% and 6.8%, respectively. Compared to CK, both BSC and PAH increased soil moisture significantly during the whole growth period, in which BSC was the best before the revival stage, and PAH was the best after the jointing stage. By comparing the difference of soil temperature in 0 ~ 25 cm during the whole growth period, it was found that BSC showed a warming effect before wintering, being 1.2℃ higher than CK, but it showed a cooling effect after revival stage, being 1.8℃ lower than CK; PAH showed a warming effect during the whole growth period, being 0.9℃ higher than CK in average. Based on path analysis, it was concluded that BSC increased the spike number per unit area and the yield of winter wheat mainly by improving soil hydrothermal condition.

Keywords: bundled straw covering; dryland; winter wheat; yield; soil moisture; soil temperature

西北地区小麦多分布在年降水 250 ~ 600 mm 的内陆地带^[1];该区域冬春少雨干旱,夏秋降水多而集中,降水与小麦生长需水错位严重^[2]。干旱是西北地区小麦产量低而不稳的首要原因^[3];由干旱带来的土壤贫瘠,是制约西北小麦发展的另一个主要因素^[4]。

地膜覆盖是西北旱区运用最成功的抗旱栽培技术。研究表明^[5-6],其保墒增温,改变作物耗水模式,提高水分生产效率,使旱作地区小麦等作物普遍增产 30% 以上^[7]。但随地膜种植的持续运用,其对土壤水肥过度消耗和聚乙烯地膜的“白色污染”问题日益突出,引发人们对覆膜种植可持续生产的思考^[8]。秸秆覆盖是另一项在旱作地区应用较多的抗旱栽培技术,其不但保墒增产,且能改善土壤结构、提高土壤有机质,促进旱地农业可持续发展^[9]。研究表明^[10-12],秸秆覆盖后近地面水热状况改变,土壤导水性增强、降水就地入渗加快,水分蒸发得到有效抑制。对秸秆覆盖下土壤温度变化的研究表明^[13],秸秆覆盖在低温时段具有“增温效应”,高温时段具有“降温效应”,可有效减缓地温剧变对作物造成的伤害。此外,连续秸秆覆盖还能提高土壤孔隙度、增加土壤有机质^[14]。

秸秆覆盖可避免地膜种植对土壤的“白色污染”和秸秆焚烧引起的雾霾污染,也更符合农业可持续发展要求;但在西北旱作区,因地形条件和积温不足等条件制约,尚处于应用探索阶段。秸秆带状覆盖技术^[15]是甘肃农业大学研发的利用玉米整秆局部覆盖种植旱地冬小麦的一种新型旱作覆盖保墒栽培技术,其有效解决了高海拔地区秸秆覆盖种植积温不足的问题;但对其增产机理尚缺乏研究。本研究以西北旱地冬小麦主要种植区生态条件为背景,比较研究不同施肥量和覆盖方式对旱地冬小麦土壤水温和产量及水分利用效率的影响,旨在明确该技术增产机理,为该技术的进一步优化和完善提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2014 年 9 月—2015 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。试验基地为西北黄土高原雨养农业典型代表区,属温带半湿润半干旱性季风气候,海拔 1 760 m,年均温 6.6℃,无霜期 120 ~ 170 d,年蒸发量 > 1 500 mm,年均降水量 380.2 mm,但主要集中于 7—9 月,与当地麦类作物生育期需水错位。试区土壤为典型的黄绵土。

试验年度冬小麦生育期总降水量 318.0 mm,较常年平均多 44.7%,其中冬小麦返青至成熟降水量 254.0 mm,较多年同期高 61.9%。冬小麦生育期各月降水量情况如下:2014 年 9—12 月份分别为 30.8、25.6、5.4 mm 和 0.5 mm,2015 年 1—7 月份分别为 0.9、0.8、27.1、31.8、88.9、39.8 mm 和 66.4 mm,冬小麦生育期 ≥ 5 mm 有效降水量为 301.6 mm。

1.2 试验设计

试验设秸秆带状覆盖(BSC)、旧膜二茬利用(PAH)和露地条播(CK)3 种覆盖方式,每种覆盖方式下设高、中、低 3 种施肥量,相应的施肥量如表 1。试验共 9 个处理,采用完全随机区组设计,3 次重复,小区面积 300 m²(10 m × 30 m)。3 种覆盖方式如下:

表 1 不同处理的施肥量		
Table 1 Fertilizer amount in different treatments		
施肥量 Fertilizer amount	N /(kg·hm ⁻²)	P ₂ O ₅ /(kg·hm ⁻²)
高 High	150	150
中 Moderate	120	120
低 Low	90	90

秸秆带状覆盖(BSC):分秸秆覆盖带和种植带(图 1),两带共 60 cm、相间排列。秸秆覆盖带采用玉米整秆覆盖,覆盖量约 9 000.0 kg·hm⁻²,约为 1 hm⁻²旱地玉米秸秆量。覆盖时秸秆覆盖带与播种

带的两个边行各留 2~5 cm 左右间距,以防止秸秆压苗。每播种带平作穴播 3 行小麦,穴距 12 cm,总宽度约 27 cm,预留覆盖带宽度约 33 cm。本季为二茬免耕,播前将头茬种植带和覆盖带互换,然后采用免耕穴播方式,播种冬小麦,具体技术指标同头茬。

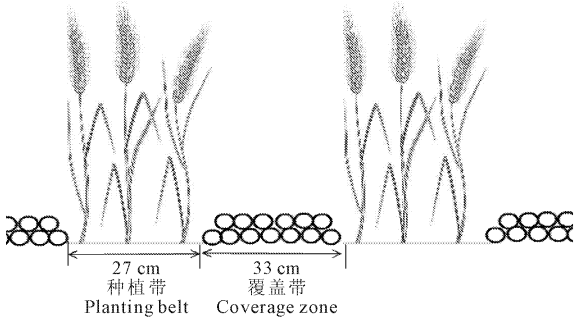


图 1 秸秆带状覆盖示意图

Fig.1 Bundled straw covering pattern

旧膜二茬利用(PAH):前茬为全膜覆土穴播(全地面平作覆膜,膜面覆土 1 cm;平作穴播小麦,行距 20 cm,穴距 12 cm)。

露地条播(CK):播前旋耕整地施肥,地面不覆膜,平作条播小麦,行距 20 cm。

各小区播种量相同,冬小麦供试品种为兰天 26,播种量均为 $270\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,各处理所施氮肥为尿素,磷肥为磷酸二铵。因本研究 BSC 和 PAH 处理均为二茬免耕,播前 7 d 采用穴播的方式将肥料施入,播种时同样采用免耕穴播的方式种植小麦。冬小麦生育期在灌浆前期将叶面肥、杀虫剂和杀菌剂等混合喷施用于防止后期病虫害、干热风 and 冬小麦植株早衰。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤含水量测定及相关指标计算 在冬小麦苗期、越冬期、返青期、拔节期、抽穗期、开花期、灌浆期以及成熟期,按 0~20,20~40,40~60,60~90,90~120,120~150,150~180,180~200 cm 共 8 个土层取土样,从小麦种植行间取土样,用烘干法测定土壤含水量。0~200 cm 平均含水量为 8 个土层含水量的加权平均值。土壤含水量(%)=(土壤鲜重-土壤干重)/土壤干重 $\times 100$ 。

$W=10\times h\times\rho\times\omega$,式中 W 为土壤贮水量(mm), h 为土层深度(cm), ρ 为土壤容重($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), ω 为土壤含水量(%)。

$ET=(W_1-W_2)+P$,式中 ET 为作物生育期耗水量(mm), P 为作物生育期 $\geq 5\text{ mm}$ 有效降雨量, W_1 、 W_2 分别为播前和收获时的土壤贮水量(mm)。

$WUE=Y/ET$,式中 WUE 为水分利用效率($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$), Y 为小麦籽粒产量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), ET 为

农田耗水量(mm)。

1.3.2 土壤温度测定 各小区选择一定点,在小麦各生育时期分 5、10、15、20、25 cm 共 5 个土层分别于小麦种植行间用曲管温度计测定土壤温度。各生育时期测定时,均选在晴朗干燥天气进行,分别在早晨(6:00—6:30)、中午(12:00—12:30)和傍晚(18:00—18:30)分三次测定,土壤日均温为早、中、晚三次测定的平均值。

1.4 产量测定

小麦成熟前一周,从每个小区选 3 点测定单位面积穗数;小麦成熟后按小区收获,脱粒后晒干称重,计算产量,籽粒含水量约为 12.5%。在每个小区随机取 20 株带回室内按国标方法测定穗粒数、千粒重。

1.5 数据处理

数据采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS19.0 统计软件进分析,采用 LSD 法进行差异显著性检验,显著性水平设定为 $\alpha=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 产量及主要农艺指标变化

从表 2 可见,覆盖方式与施肥量对冬小麦产量、产量三因素、生育期耗水量、水分利用效率(WUE)和收获指数均产生显著影响,且二者对冬小麦产量、产量三因素、生育期耗水量和水分利用效率均存在显著互作效应。BCS 的产量达 $5\,305.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,分别较 CK 和 PAH 显著增加 24.0%和 37.5%;高施肥量的产量分别较中、低施肥量显著增加 6.6%和 14.7%;而 BSC 在 3 种施肥量的产量均显著高于同等施肥量的 PAH 和 CK。

进一步比较产量三因素差异,发现 BSC 增产的主要原因是大幅度提高单位面积穗数,而穗粒数和千粒重显著低于 PAH 和 CK。BSC 较 PAH 和 CK 单位面积穗数分别显著增加 42.2%和 27.1%,且高、中施肥量均显著高于同等施肥量的 PAH 和 CK,而千粒重分别显著降低 2.3%和 6.8%,穗粒数则分别显著降低 14.3%和 6.7%。不同施肥量下,单位面积穗数,中施肥量分别较高、低施肥量显著增加 6.6%和 16.8%;穗粒数,中、低施肥量分别较高施肥量增加 12.6%和 11.3%;千粒重,高施肥量较低施肥量显著高 2.7%,而与中施肥量无显著差异。分析覆盖方式与施肥量对产量三因素的影响,发现覆盖方式是引起产量三因素差异的主要因子,不同覆盖方式下单位面积穗数、穗粒数和千粒重的变异系数(18.4%、7.7%和 3.6%)均明显高于不同施肥

量下产量三因素的变异系数(7.8%、6.4%和1.4%)。进一步分析引起处理间产量差异的主要因素,发现引起处理间产量差异的首要因素是单位面积穗数,处理间单位面积穗数的变异系数(18.2%)明显高于穗粒数(10.3%)和千粒重(3.7%)。相关分析表明,产量与单位面积穗数呈极显著正相关($r = 0.929^{**}$),而与穗粒数($r = -0.623$)和千粒重($r = -0.343$)呈不显著负相关。

表 2 冬小麦产量、耗水量、水分利用效率及主要农艺指标									
Table 2 Grain yield, water consumption amount, water use efficiency and main agronomic traits of winter wheat									
处理 Treatment	穗数 SN ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	穗粒数 GNS	千粒重 GW /g	籽粒产量 GY ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	收获指数 HI	耗水量 WCA /mm	水分利用效率 WUE ($\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$)	0~200cm 土壤含水量 SWC/%	0~25cm 土壤温度 ST/℃
覆盖方式 Mulching patterns (M)									
BSC	455.1a	27.5c	43.7c	5305.0a	0.41b	491.4a	10.8a	16.0a	13.3c
PAH	320.0c	32.1a	44.8b	3858.7c	0.38c	477.1b	8.1c	15.7a	15.2a
CK	358.2b	29.5b	47.0a	4277.0b	0.43a	477.0b	9.0b	14.9b	14.3b
CV/%	18.4	7.7	3.6	16.6	5.6	1.7	14.7	3.4	6.8
施肥量 Fertilizer amount (F)									
高 High	380.6b	30.9a	45.7a	4782.5a	0.42a	476.3b	10.0a	15.8a	14.3a
中 Moderate	405.6a	27.5ab	44.5b	4487.2b	0.40b	482.9a	9.3b	15.4a	14.1a
低 Low	347.1c	30.6a	45.2ab	4171.0c	0.39b	486.4a	8.6c	15.4a	14.4a
CV/%	7.8	6.4	1.4	6.8	3.8	1.1	7.9	1.1	1.0
覆盖方式×施肥量 (M×F)									
BSC	高 High	458.0a	28.8bc	43.1e	5579.6a	0.42abc	492.7ab	11.3a	16.2a
	中 Moderate	459.4a	26.8cd	43.8de	5226.1b	0.41bc	485.2cd	10.8b	15.7abc
	低 Low	448.1ab	26.9cd	44.3cde	5109.2b	0.40cd	496.5a	10.3c	15.9ab
PAH	高 High	314.3de	33.3a	45.9bc	4061.8e	0.40cd	459.7g	8.9e	16.1a
	中 Moderate	342.8cd	31.1ab	43.4e	3850.0f	0.38de	489.5bc	7.9g	15.4abcd
	低 Low	303.0e	31.8ab	45.1bcd	3664.4g	0.36e	482.3de	7.6f	15.6abcd
CK	高 High	369.5c	30.8ab	48.1a	4706.2c	0.44a	476.6ef	9.9d	15.1bcd
	中 Moderate	414.6b	24.6d	46.4b	4385.5d	0.43ab	474.0f	9.2e	15.0cd
	低 Low	290.3e	33.0a	46.3b	3739.3fg	0.42abc	480.3def	7.8g	14.7d
CV/%		18.2	10.3	3.7	15.8	6.1	2.3	14.8	3.3
M		* *	* *	* *	* *	* *	* *	* *	* *
F		* *	* *	*	* *	* *	* *	NS	NS
M×F		* *	*	*	* *	NS	* *	* *	NS

BSC: 秸秆带状覆盖, PAH: 旧二茬利用, CK: 露地条播, M: 覆盖方式, F: 施肥量。SN: 穗数, GNS: 穗粒数, GW: 千粒重, GY: 籽粒产量, HI: 收获指数, WCA: 耗水量, WUE: 水分利用效率, SWC: 0~200 cm 土壤含水量, ST: 0~25 cm 土壤温度。CV: 变异系数。NS、* 和 * * 分别表示无显著差异及在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。同一列数字后的不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

BSC: bundled straw covering, PAH: mulching with used plastic film after harvest, CK: uncovered and row-seeding, M: mulching patterns, F: fertilizer amount. SN: spike number, GNS: grain number per spike, GW: 1000-grain weight, GY: grain yield, HI: harvest index, WCA: water consumption amount, WUE: water use efficiency, SWC: soil water content in 0~200 cm soil layer, ST: soil temperature in 0~25 cm soil layer. CV: variation coefficient. NS, * and * * indicate non-significant, significant at $P < 0.05$ and significant at $P < 0.01$, respectively. Different lowercase letters within a column mean significant difference at $P < 0.05$.

比较各处理生育期耗水量发现,BSC 生育期耗水量较 CK 和 PAH 分别显著增加 3.0%;高施肥量的生育期耗水量较中、低施肥量分别显著低 1.4%和 2.1%;而 BSC 在高、低施肥量的生育期耗水量均显著高于同等施肥量的 PAH 和 CK。从水分利用效率上看,BSC 的 WUE 达 $10.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$,较 CK 和 PAH 分别显著提高 20.6%、33.3%;高施肥量的 WUE 达 $10.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$,较中、低肥量分别显著提高 7.8%和 17.0%;而 BSC 在 3 种施肥量的 WUE 均显著高于同等施肥量的 PAH 和 CK。分析处理间收获指数的变化发现,以 CK 收获指数最高,分别较 BSC 和 PAH 显著提高 4.9%和 12.3%;随着施肥量的增加收获指数呈递增趋势,但覆盖方式与施肥量对收获指数无显著互作。进一步分析生育期耗水量、WUE 和收获指数的变异系数发现,覆盖方式与施肥量交互作用最大(2.3%、14.8%和 6.1%)、覆盖方式其次(1.7%、14.7%和 5.6%)、施肥量的影响最弱(1.1%、7.9%和 3.8%),可见覆盖方式的影响

效应明显大于施肥量,起主导作用。

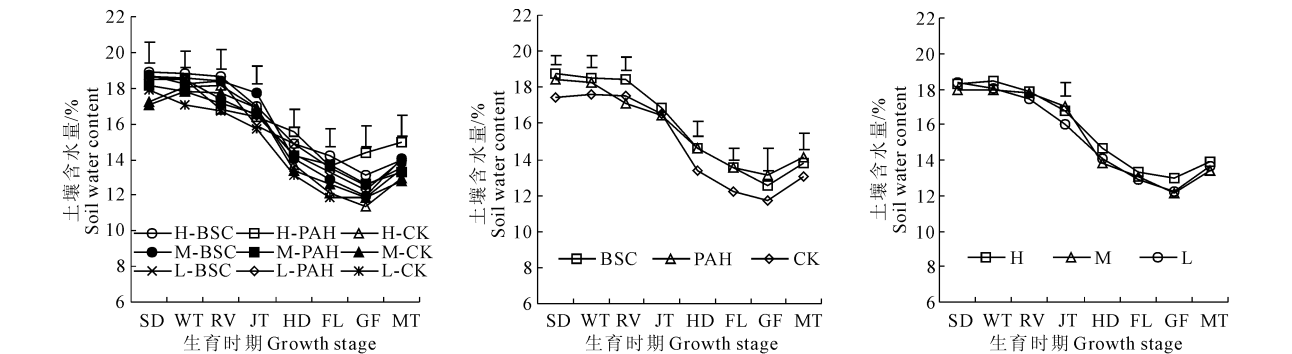
综上所述,半干旱雨养农业区免耕条件下,BSC 能显著提高单位面积穗数,为增产奠定了基础,并能获得较高的水分利用效率,同时适当增加施肥量可进一步提高冬小麦收获指数、籽粒产量和水分利用效率。

2.2 各生育时期土壤水热状况

覆盖方式与施肥量对全生育期 0~200 cm 平均土壤含水量和 0~25 cm 平均土壤温度产生极显著影响,且二者对 0~25 cm 土壤温度的影响存在显著交互作用(表 2)。从不同覆盖方式来看,BSC 较 CK 和 PAH,全生育期 0~200 cm 平均含水量分别高 1.1 和 0.3 个百分点,与 CK 差异显著,但与 PAH 无显著差异;全生育期 0~25 cm 土层平均温度分别显著低 1.0℃和 1.9℃。从不同施肥量来看,高、中、低施肥量下全生育期 0~200 cm 平均含水量和 0~25 cm 土层平均温度均无显著差异,从覆盖方式与施肥量的组合来看,全生育期 0~200 cm 平均含水量以高施肥量的 BSC 和 PAH 最高,显著高于不同施肥量的 CK,但与中、低施肥量的 BSC 和 PAH 无显著差异;全生育期 0~25 cm 土层平均温度以低施肥量的 PAH 最高,显著高于不同施肥量下的 BSC 和 CK,但与中、高施肥量的 PAH 无显著差异,而高施肥量的 BSC 与同等施肥量的 CK 无显著差异。可见,就土壤水分状况而言,不同覆盖方式均可显著改善土壤水分状况,但在覆盖的同时增加或降低施肥量对其影响不大;就土壤温度而言,覆膜整体提高地温,秸秆带状覆盖整体降低地温,但在秸秆带状覆盖的同时适当增加施肥量有助于提高地温,这因秸秆覆盖的同时增加施肥有助于微生物分解秸秆,释放热量^[16]。

比较各生育时期 0~200 cm 土壤水分和 0~25 cm 土壤温度变化(图 2、图 3),发现不同覆盖方式可显著影响各时期土壤墒情和土壤温度,而不同施肥量下各生育期时期土壤墒情和土壤温度相差不大。从不同覆盖方式来看,各时期 0~200 cm 土壤水分,BSC 在抽穗前平均较 PAH 和 CK 分别显著高 0.6 和 0.9 个百分点,而在抽穗至成熟期仍较 CK 显著高 1.0 个百分点,但与 PAH 无显著差异;各时期 0~25 cm 土壤温度,BSC 在返青前与 CK 无显著差异,但比 PAH 显著低 2.0℃,而在返青至成熟期分别较 PAH 和 CK 显著低 2.3℃和 1.8℃。从不同施肥量来看,高施肥量在各时期的土壤墒情和土壤温度虽普遍大于中、低施肥量,但 3 种施肥量间在各时期普遍无显著差异。从覆盖方式与施肥量的组合来看,各时期 0~200 cm 土壤水分,BSC 显著高于同等施肥量的 CK,但从抽穗期开始明显不如同等施肥量的 PAH;各时期 0~25 cm 土壤温度,BSC 均显著低于同等施肥量下的 PAH,而从返青开始才明显不如同等施肥量的 CK。可见,秸秆带状覆盖可显著改善各生育时期 0~200 cm 土壤墒情,但从返青期开始 0~25 cm 土壤温度明显不如露地种植。

比较处理间土壤水分和温度的变异系数(表 2),覆盖方式(3.4%、6.8%)大于施肥量(1.1%、1.0%),对不同处理间土壤水温差异起主要作用。相关分析表明 0~200 cm 土层平均含水量($r = 0.760^*$)与产量呈显著正相关,0~25 cm 土壤温度($r = -0.784^*$)与产量呈显著负相关。可见,BSC 在全生育期的保墒效应和在生育期后期的降温效应,为冬小麦前期营养生长和后期籽粒形成提供了良好的土壤水热环境,为增产奠定了基础。



注:误差线代表 $LSD_{0.05}$;H、M、F 分别表示高、中和低不同施肥量;SD:播种期;WT:越冬期;RV:返青期;JT:拔节期;HD:抽穗期;FL:开花期;GF:灌浆期;MT:成熟期。下同。

Note: Error bars show the $LSD_{0.05}$; H, M and L mean high, moderate and low fertilizer amount, respectively; SD: seeding; WT: wintering; RV: revival; JT: jointing; HD: heading; FL: flowering; GF: grain-filling; MT: maturity. The same below.

图 2 不同生育时期 0~200 cm 土壤含水量

Fig.2 Soil water content in 0~200 cm profile at different growth stages

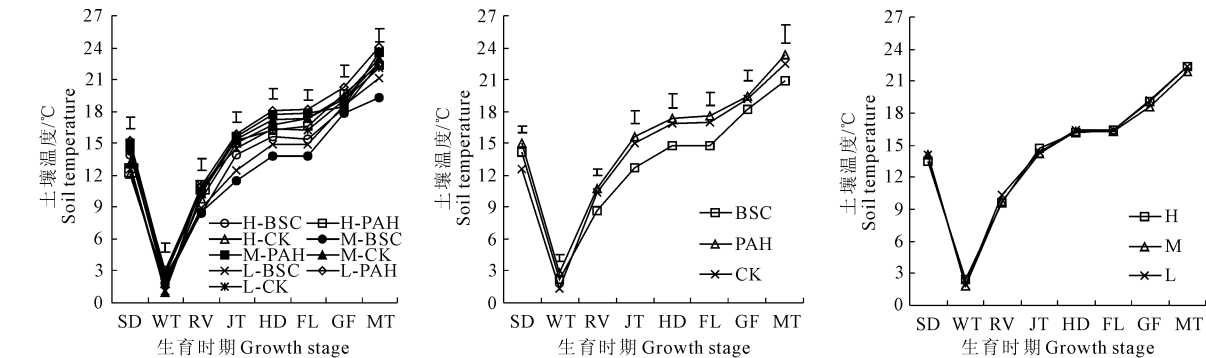


图 3 不同生育时期 0~25 cm 土壤温度

Fig. 3 Soil temperature in 0~25 cm profile at different growth stages

2.3 产量效益机制分析

不同覆盖方式与施肥量下,冬小麦籽粒产量与产量三要素、0~200 cm 平均含水量、0~25 cm 平均温度的相关分析和通径分析结果表明(表 3),冬小麦籽粒产量与单位面积穗数、0~200 cm 平均含水量呈显著正相关、与 0~25 cm 平均温度呈显著负相关,而与其他指标相关不显著。由籽粒产量与上述指标的直接通径系数可以看出,覆盖方式与施肥量对冬小麦产量因素的影响顺序为:单位面积穗数(1.416) > 穗粒数(0.585) > 千粒重(0.256) > 0~200

cm 平均含水量(0.128) > 生育期耗水量(0.033) > 0~25 cm 平均温度(−0.021)。由籽粒产量与上述指标的间接通径系数可以看出,穗粒数(−1.202)、千粒重(−0.613)及 0~25 cm 平均温度(−1.047)主要通过减小单位面积穗数而对增加产量起负效应;而 0~200 cm 平均含水量(0.978)和生育期耗水量(0.734)能通过增加单位面积穗数对提高产量起正效应。因此,说明适宜的覆盖方式和施肥量主要是通过提高单位面积穗数,来增加冬小麦产量,而单位面积穗数的提高可归因于土壤水热状况的改善。

表 3 籽粒产量与主要农艺指标及土壤水热特征指标的相关系数和通径分析

Table 3 Correlation coefficients and path coefficients of grain yield with main agronomic traits, soil water content and soil temperature								
指标 Parameter	与籽粒产量的 简单相关系数 Correlation coefficient with yield	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient					
			X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆
X ₁	0.929**	1.416		−0.497	−0.111	0.088	0.015	0.017
X ₂	−0.623	0.585	−1.202		0.057	−0.041	−0.011	−0.012
X ₃	−0.343	0.256	−0.613	0.131		−0.091	−0.005	−0.021
X ₄	0.760*	0.128	0.978	−0.188	−0.183		0.011	0.014
X ₅	−0.784*	−0.021	−1.047	0.303	0.062	−0.069		−0.012
X ₆	0.453	0.033	0.734	−0.211	−0.166	0.056	0.008	

注:*,** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著相关;X₁、X₂、X₃、X₄、X₅ 和 X₆ 分别表示冬小麦穗数、穗粒数、千粒重、0~200 cm 平均土壤含水量、0~25 cm 土壤平均温度和生育期耗水量。
Note: * and ** indicate significant correlation at 0.05 and 0.01, respectively. X₁, X₂, X₃, X₄, X₅ and X₆ indicate spike number, grain number per spike, 1000-grain weight, average soil water content in 0~200 cm profile, average soil temperature in 0~25 cm profile and water consumption amount, respectively.

3 讨论

促进有限水分的高效利用是旱地小麦高产研究的主要课题,而覆盖与施肥是提高作物产量与水分利用效率的有效措施^[4-9,17]。研究发现^[18],地表覆盖能明显抑制土壤水分蒸发,促使土壤水分消耗主要用于作物蒸腾性生产,提高蒸腾蒸发比,使小麦、玉米等作物产量和水分利用效率显著提高。本研究结果表明,BSC 冬小麦产量较 CK 增加 18.60%~

49.5%,WUE 提高 14.9%~45.3%,同时增加施肥量有助于冬小麦产量和 WUE 的提高;这与谷洁^[19]、鲁向晖^[20]等人的研究结果类似。此外,本研究还发现 PAH 较 CK 有减产现象,其减产的主要原因是单位面积穗数较 CK 显著降低,这可能是由于覆膜前期良好的水热条件促使冬小麦群体生长过旺,加剧了土壤水分和养分的消耗,后期脱水脱肥,而导致成穗率降低,最终造成减产^[21-23],而 PAH 收获指数较 CK 显著降低也证明了这一点。国内外研究认

为^[6,24-26],旱地小麦稳产增产的关键是提高单位面积成穗数。本研究 BSC 单位面积穗数显著高于 CK,穗数与产量呈极显著正相关($r = 0.929^{**}$)与上述理论结果一致,通径分析进一步明确土壤水热条件的改善是穗数增加的主要原因。

有研究认为^[26-28],在丰水年份,秸秆覆盖的保水作用并不明显,反而会因降温效应影响籽粒发育,最终导致减产。这与本研究结果不尽相同,本研究发现,BSC 处理保墒效果明显,虽然也表现出降温效应,但并未导致减产,反而大幅增产;分析其原因可能是本研究采用玉米整秆局部覆盖、局部密植的措施,与以往全田秸秆覆盖的处理方式对土壤水热影响的差异较大。相关分析也表明,BSC 处理的保墒和降温效应与冬小麦产量均呈显著正相关($r = 0.760^{*}$ 、 $r = 0.784^{*}$),而通过对各农艺指标变异系数的比较发现,覆盖方式始终起主导作用。因此,从理论和实践上来说,秸秆带状覆盖是一种行之有效的增产、提高水分利用效率的农艺措施。

本研究以冬小麦为例研究了旱地免耕条件下秸秆带状覆盖技术的土壤水热效应,并对其增产、提高水分利用效率的原因做了简单剖析。但是,对土壤水热的研究仅围绕种植带,缺乏对覆盖带与种植带间土壤水热运移的研究。此外,覆盖带和种植带带宽的分配,以及播量、播种方式之间的搭配是否能够最大化的协调产量要素还属未知,未对生理方面的指标和其它作物进行研究,有些机理难以解释,这些问题有待进一步探索。

参考文献:

- [1] Wang F H, He Z H, Sayre K, et al. Wheat cropping systems and technologies in China[J]. *Field Crops Research*, 2009, 111(3): 181-188.
- [2] Li S X, Wang Z H, Li S Q, et al. Effect of plastic sheet mulch, wheat straw mulch, and maize growth on water loss by evaporation in dry land areas of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 116: 39-49.
- [3] 房世波,齐月,韩国军,等.1961—2010年中国主要麦区冬春气象干旱趋势及其可能影响[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(9): 1754-1763.
- [4] 张仁陟,李小刚,胡恒觉.施肥对提高旱地农田水分利用效率的机理[J]. *植物营养与肥料学报*, 1999, 5(3): 221-226.
- [5] 王晓峰,田霄鸿,陈自惠,等.不同覆盖施肥措施对黄土旱源冬小麦土壤水分的影响[J]. *应用生态学报*, 2009, 20: 1105-1111.
- [6] 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.
- [7] 温晓霞,韩思明,赵凤霞,等.旱作小麦地膜覆盖生态效应研究[J]. *中国生态农业学报*, 2003, 11(2): 93-95.
- [8] 严昌荣,王序俭,何文清,等.新疆石河子地区棉田土壤中地膜残留研究[J]. *生态学报*, 2008, 28(7): 3470-3474.
- [9] 蔡太义,贾志宽,黄耀威,等.不同秸秆覆盖量对春玉米田蓄水保墒及节水效益的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(S1): 238-243.
- [10] 谢瑞芝,李少昆,李小君,等.中国保护性耕作研究分析——保护性耕作与作物生产[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(9): 1914-1924.
- [11] 谢瑞芝,李少昆,金亚征,等.中国保护性耕作试验研究的产量效应分析[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(2): 397-404.
- [12] 廖允成,韩思明,温晓霞.黄土台塬旱地小麦土壤水分特征及水分利用效率研究[J]. *中国生态农业学报*, 2002, 10(3): 55-58.
- [13] 陈玉章,柴守玺,范颖丹,等.覆盖模式对旱地冬小麦土壤温度和产量的影响[J]. *中国农业气象*, 2014, 35(4): 403-409.
- [14] 张仁陟,黄高宝,蔡立群,等.几种保护性耕作措施在黄土高原旱作农田的实践[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(1): 61-69.
- [15] 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, 12(5): 42.
- [16] 潘剑玲,代万安,尚占环,等.秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(5): 526-535.
- [17] 李青,高志强,孙敏,等.夏闲期施肥与覆盖处理对旱地冬小麦产量和土壤水分利用的影响[J]. *麦类作物学报*, 2011, 31(3): 519-523.
- [18] 方文松,朱自玺,刘荣花,等.秸秆覆盖农田的小气候特征和增产机理研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(6): 123-128.
- [19] 谷洁,高华,方日尧.施肥和秸秆覆盖对旱地作物水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 1998, 14(2): 166-170.
- [20] 鲁向晖,高鹏,王飞,等.宁夏南部山区秸秆覆盖对春玉米水分利用及产量的影响[J]. *土壤通报*, 2008, 39(6): 1248-1251.
- [21] 薛少平,朱琳,姚万生.麦草覆盖与地膜覆盖对旱地可持续利用的影响[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(6): 71-73.
- [22] Gan Y T, Siddique K H M, Turner N C, et al. Chapter Seven-Ridge-furrow mulching systems: an innovative technique for boosting crop productivity in semiarid rain-fed environments[J]. *Advances in Agronomy*, 2013, 118: 429-476.
- [23] Zhang S L, Sadras V, Chen X P, et al. Water use efficiency of dry-land wheat in the Loess Plateau in response to soil and crop management[J]. *Field Crops Research*, 2013, 151: 9-18.
- [24] 王彩绒,田霄鸿,李生秀.沟垄覆膜集雨栽培对冬小麦水分利用效率及产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(2): 208-214.
- [25] Philip A Myburgh. Effect of shallow tillage and straw mulching on soil water conservation and grapevine response[J]. *South African Journal of Plant and Soil*, 2013, 30(4): 219-225.
- [26] Rita Dahiya, Joachim Ingwersen, Thilo Streck. The effect of mulching and tillage on the water and temperature regimes of a loess soil: Experimental findings and modeling[J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 96(1): 52-63.
- [27] Chen S Y, Zhang X Y, Pei D, et al. Effects of straw mulching on soil temperature, evaporation and yield of winter wheat: field experiments on the North China Plain[J]. *Annals of Applied Biology*, 2007, 150(3): 261-268.
- [28] 李玲玲,黄高宝,张仁陟,等.免耕秸秆覆盖对旱作农田土壤水分的影响[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(5): 96-98.