

垄膜沟秸秆种植方式对夏玉米水热效应的影响

陈光杰^{1,2}, 冯浩^{2,3}, 吴淑芳^{1,2}, 郭慧莉^{1,2}, 张彬彬^{1,2}, 胡亚瑾⁴

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100;
3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4. 三门峡黄河明珠(集团)有限公司, 河南 三门峡 472000)

摘要: 针对黄土高原半干旱区降水短缺且时空分配不均, 严重地制约了半干旱区农业发展的现状, 通过研究垄膜沟秸秆种植方式下夏玉米水热效应, 揭示其保水调温和作物增产的机理。试验于2014—2015年在陕西杨凌设置了露地处理(CK)与垄膜沟秸秆处理(RMFS)田间试验。结果表明: 垄膜沟秸秆种植方式可以提高表层土壤含水量; 土壤温度主要表现出“高温低调, 低温高调”的现象; 缩短作物生育历时及调节作物耗水量以改善水分的供需平衡, 显著地提高土壤水分利用效率和积温利用效率, 2 a土壤水分利用效率和积温利用效率分别提高了39.85%, 43.34%。垄上覆膜沟内覆秸秆处理通过改善土壤水热交互状态, 提升作物产量, 是一种适宜有效的覆盖集雨措施。

关键词: 水热效应; 垄膜沟覆秸秆; 夏玉米; 水分利用效率; 积温利用效率

中图分类号: S152.7; S152.8

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)03-0162-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcb.2017.03.028

Effects of Plastic Film Combined with Straw Mulching on Soil Hydrothermal Regime of Summer Maize

CHEN Guangjie^{1,2}, FENG Hao^{2,3}, WU Shufang^{1,2}, GUO Huili^{1,2}, ZHANG Binbin^{1,2}, HU Yajin⁴

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100;
2. Institute of Water Saving Agriculture in Arid and Semi-arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 3. Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 4. Sanmenxia Yellow River Mingzhu Group, Sanmenxia, Henan 472000)

Abstract: In view of the fact that shortage and uneven temporal and spatial distribution of rainfall in the semi-arid area of the Loess Plateau, this paper aimed to study the hydrothermal regime of the ridge-furrow planting mode, and reveal the mechanism of hydrothermal regulation and the enhancement of crop yield. Field experiments of open field treatment (CK) and plastic film combined with straw mulching treatment (RMFS) were conducted in 2014 and 2015 in Yangling, Shaanxi. The results showed that the plastic film combined with straw mulching cultivation had effects on the growth of summer maize, and the mulching could improve soil moisture condition. Soil temperature showed a phenomenon of ‘lowering the temperature when the temperature was high, and vice versa’. The RMFS treatment shortened the duration of crop growth and adjusted soil water consumption to improve the balance between water supply and demand. Soil water use efficiency and thermal time use efficiency was increased by 39.85% and 43.34% in the RMFS treatment within two years, respectively. Although water consumption could not be saved and soil thermal time was not increased, soil water use efficiency and thermal time use efficiency were significantly improved. In short, ridge covered plastic mulching with furrow covered with straw mulching treatment improved crop yield by improving the hydrothermal interaction regime. Plastic film combined with straw mulching treatment is a suitable effective practice to collect rainwater harvesting.

Keywords: soil hydrothermal regime; plastic film combined with straw mulching; summer maize; water use efficiency; thermal time use efficiency

黄土高原地区是我国粮食的主产区,其可利用耕地占全国耕地的 40%^[1],然而,该地区降雨量不足且年均分配不足^[2],严重制约了农田生产力的提高。研究如何提升农田水分利用效率,协调水分供需平衡的矛盾,是实现黄土高原地区农业可持续发展的核心问题。

农田集雨及其覆盖技术作为干旱半干旱地区农业发展的主要农艺技术^[3],广泛应用于黄土高原地区^[4-5]。农田集雨技术核心即沟垄集雨技术,该技术通过改变微地形,利用垄面产流,沟内集水,改善农田水热状况,已成为干旱地区主要的农田抗旱手段^[6-7]。覆盖技术则能抑制土壤无效蒸发,调节地温和农田小气候,进而提高作物产量。目前,沟垄集雨技术和覆盖技术相结合的覆盖集雨技术已突显出多重效果,并成为西北地区农业发展的主要措施^[8]。其中,垄覆地膜沟覆秸秆技术已被认为是该地区种植夏玉米最有效的增产措施^[9-11]。垄膜沟秸秆覆盖使农田 SPAC 系统更加复杂,土壤、作物、气候和生态相互作用,相互影响,其可以有效地调节土壤水热、改善土壤肥力^[12];减少蒸发蒸腾比,提高光合作用,改变物候期^[13];调节作物冠层光、温、热条件^[14],对农田小气候和作物生长过程产生了显著的影响。

土壤水热状况是提供作物生长发育最主要的条

件,作物的产量形成往往是两者交互作用的结果^[15],研究垄膜沟秸秆种植方式下土壤水热效应具有重要的意义。但目前针对地膜秸秆二元覆盖模式下的农田土壤水热运移和分布缺乏系统的研究,并且大多是水热单因子分析,很少涉及到两者的综合影响作用。本文通过 2 年大田试验,对比垄膜沟秸秆处理与露地处理的水热交互状况,及其对作物产量、水分利用效率和土壤温度利用效率的影响,以期为干旱半干旱地区合理的农业种植方式提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

研究区位于黄土高原南部旱作区的陕西杨凌西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院(34°16′ 56″N, 108°4′ 30″E),海拔 521 m,年平均降雨量 635.5 mm,降水量季节分配不均,主要集中在夏季(7—9 月份);多年平均蒸发量为 1 440 mm,属大陆性暖温带季风型半湿润气候区;年平均气温为 12.9 ℃,年昼夜温差平均为 11.5 ℃,日照时数为 2 196 h,无霜期为 169~200 d。试验时间为 2014 年 6—10 月和 2015 年 6—10 月,0—100 cm 土层的基本物理性质见表 1。该研究区地下水埋深较深,可忽略其向上补给量。

表 1 试验区土壤基本物理性质

土层 深度/cm	容重/ (g·cm ⁻³)	田间 持水量/%	0.02~2 mm 砂粒/%	0.02~0.002 mm 粉粒/%	<0.002 mm 黏粒/%
0—20	1.27	22.17	30.46	41.63	27.91
20—40	1.57	26.43	57.15	26.36	16.49
40—60	1.40	26.24	65.02	21.57	13.41
60—80	1.35	26.03	34.25	44.52	21.23
80—120	1.39	25.18	49.21	32.12	18.67

1.2 试验设计

供试玉米品种为秦龙 11,分别于 2014 年 6 月 19 日和 2015 年 6 月 14 日播种,人工穴播,行距 60 cm,穴距 40 cm,播种量 51 332 株/hm²,分别于 2014 年 10 月 11 日和 2015 年 10 月 9 日收获,生育期分别为 114 d 和 118 d。供试土壤为中壤土,基肥用量分别为 N 225 kg/hm²,

P₂O₅ 150 kg/hm²,K₂O 150 kg/hm²,肥力中等,一次施入,生育期不再施肥。供试地膜为厚 0.008 mm 的普通白色聚乙烯塑料农用地膜。

试验处理采用随机区组设计,每个处理重复 3 次,各小区面积为 10 m²(2 m×5 m)。试验区周围设置 0.5 m 宽的作物保护带。试验处理设置见表 2。

表 2 田间试验处理

编号	处理	处理说明
CK	露地平作	露地不覆膜
RMFS	垄膜沟秸秆	垄作,垄、沟宽均为 60 cm,垄上覆膜,垄沟覆秸秆,覆盖量为 4 000 kg/hm ² ,垄侧种植

1.3 测定指标及方法

1.3.1 气象数据 试验所需气象资料由西北农林科技大学灌溉试验站提供。由图 1 可知,夏玉米 2 个生育期的降雨量分别为 380.3,283.9 mm,有效降雨量(>5 mm)分别为 344.1,246.9 mm;平均气温分别为 23.0,23.4 ℃,变幅分别为 14.3~32.3,11.7~31.9 ℃。

1.3.2 土壤水分和土壤温度 为了了解在生育期内土壤水热的动态变化,本试验中采取 ECH₂O 水热传

感器与 EM50 数据采集器(Environmental logging system, USA)对土壤水分及温度进行动态监测和自动记录,测量深度分别为 15,30,50,70,100 cm,测量间隔为 1 h。并采用时域反射仪 Trim-TDR 隔时段测定,降雨之后加测,0—100 cm 土壤深度测定间隔为 10 cm,100—260 cm 土壤深度测定间隔为 20 cm。定时采用土钻法进行含水率校准,以保证试验数据的准确性和可靠性。

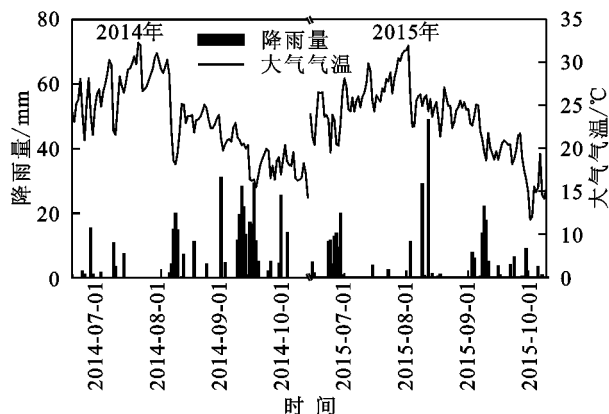


图 1 夏玉米生育期气象数据

储水量的计算公式为：

$$W = \frac{H\theta}{10} \quad (1)$$

式中： W 为土壤储水量(mm)； H 为土层厚度(cm)； θ 为土壤体积含水率(%)。

作物耗水量计算公式为：

$$ET = P + W_1 - W_2 \quad (2)$$

式中： ET 为作物耗水量(mm)； W_1 、 W_2 为作物各生育期的初始和终止的储水量(mm)； P 为生育期内降雨量(mm)。

土壤温度梯度计算公式为：

$$Gra = \frac{\partial T}{\partial Z} \approx \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta T_i}{\Delta Z_i}}{n} \quad (3)$$

式中： Gra 为土壤温度梯度(°C/m)，其为正值时，说明热量向上传输，反之亦然； T_i 为土壤不同测点深度的温度(°C)； Z_i 为土壤测点深度差(m)。

积温计算公式为：

$$TT_s = \sum (T_m - T_b) \quad (4)$$

式中： TT_s 为土壤积温(°C)； T_m 为土壤日平均温度(°C)； T_b 为作物发育阈温度，取 10 °C^[16]。

1.3.3 玉米测产 每个小区选取 12 株代表性植株样本进行产量的测定，单穗脱粒，籽粒脱水烘至恒重，然后根据每公顷的株数计算单位面积的产量。

1.3.4 水分利用效率和积温利用效率 根据籽粒产量和耗水量以及积温，计算水分利用效率和积温利用效率。

水分利用效率计算公式为：

$$WUE = \frac{Y}{ET} \quad (5)$$

式中： WUE 为水分利用效率(kg/(hm²·mm))； Y 为作物籽粒产量(kg/hm²)。

积温利用效率计算公式为：

$$TTUE = \frac{Y}{TT_s} \quad (6)$$

式中： $TTUE$ 为积温利用效率(kg/(hm²·°C))。

1.4 统计方法

所有数据采用实测数据的平均值，用 Excel 2010 和 SPSS 20 软件进行数据处理、方差分析，用 Sigma-Plot 12.5 进行制图。试验中，用最小显著性法(LSD 法)进行方差分析($p < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 全生育期土壤表层水热动态变化

土壤水热状况是影响作物生长过程的重要因素之一，特别是在沟垄覆盖栽培方式下，水分和温度的多维运动，形成了水热联合效应的复杂过程^[17]。针对此过程，本研究分析了不同地表下 15 cm 处的水热动态变化。由图 2、图 3 可知，无论体积含水率还是土壤温度 2 个处理变化规律基本一致，但波动较大，这与降雨和气温密切相关(图 1)。夏玉米全生育期 RMFS 处理土壤含水量均高于 CK 处理，2 a 日平均含水率增加 1.25%，可见垄膜沟覆秸秆二元覆盖集水可有效地提高土壤表层水分。CK 处理和 RMFS 处理在 2 a 的作物全生育期中，日平均地温基本相同，分别为 16.78、16.80 °C，但变化趋势呈现出前期 RMFS 处理低于 CK 处理，后期相反。以抽雄期为界，前期日地温降低 0.24 °C，后期日地温增加 0.28 °C，导致这种现象的主要原因是夏玉米生长前期夏季气温较高，土壤热量由表层传向深层，而二元覆盖阻碍了这种热量的传输，加之，作物生长前期，植株叶片不茂盛致使这种现象更加突出。在后期，气温下降，土壤热量传递现象相反，土壤热量由深层传向表层，覆盖又起到了保温的作用，从而在后期达到增温的效果。

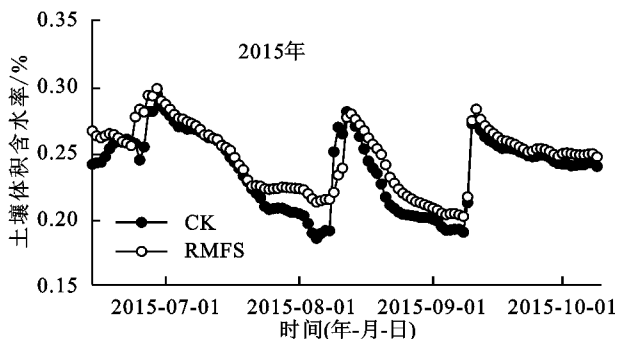
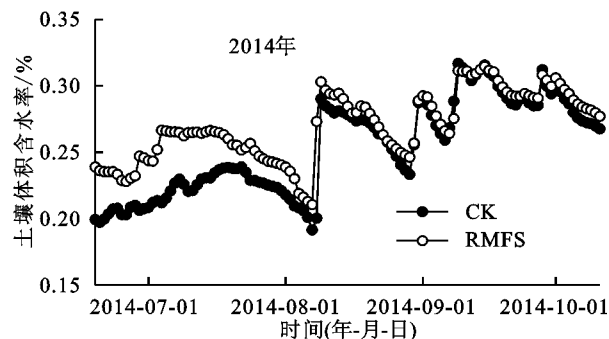


图 2 夏玉米全生育期土壤表层 15 cm 处土壤水分动态变化

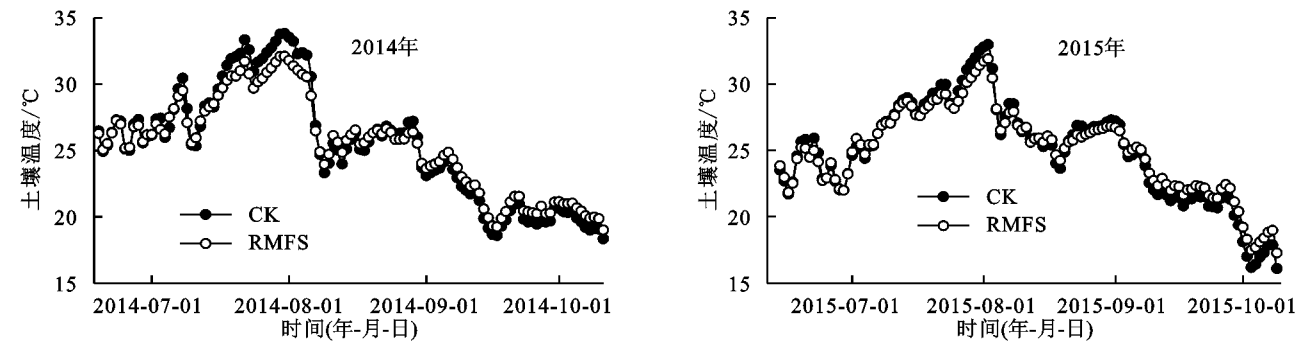


图 3 夏玉米全生育期土壤表层 15 cm 处土壤温度动态变化

以 2014 年夏玉米为例,探究不同生育期的土壤梯度的变化情况。从图 4 可以看出,无论覆盖与否,土壤温度在苗期和拔节期均随土层深度呈现着下降的趋势,而在抽雄期和成熟期趋势相反,由此可以佐证土壤热量传输现象。土壤表层 50 cm 内,CK 处理各个生育期的土壤温度梯度分别为 $-0.12,-0.03,0.03,0.03\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$,

RMFS 处理为 $-0.10,-0.02,0.02,0.01\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$,在数值上,RMFS 处理的土壤梯度均小于 CK 处理,说明垄膜沟覆秸秆有利于减弱外界气温对地温的敏感度。在玉米出苗期,CK 和 RMFS 处理下各土层温度差异较小;拔节期到成熟期,RMFS 处理各层土壤温度均高于 CK 处理,说明覆盖的增温过程主要在作物生长的后期。

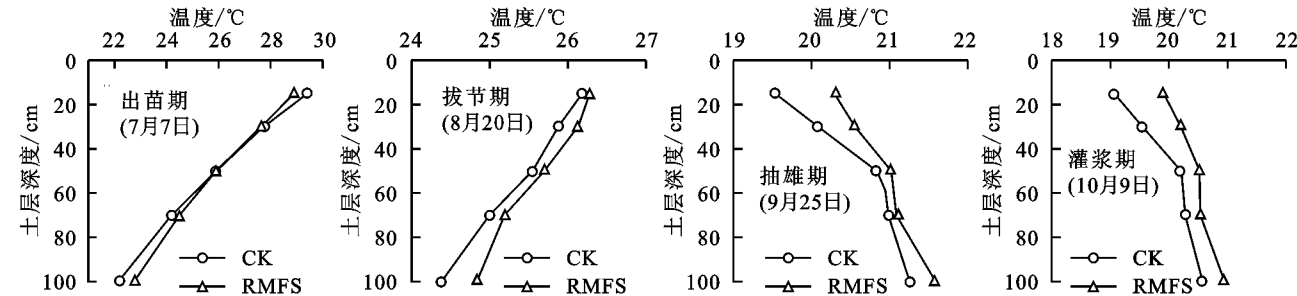


图 4 不同生育期 0—100 cm 土层土壤温度变化动态

2.2 土壤水热对作物生长发育的影响

土壤水热是作物生长发育的关键因子,垄膜沟覆秸秆处理系统地调控土壤水热关系,改变作物的生长发育进程和耗水规律。由图 5 可知,2 a 土壤表层(15 cm 土层)积温的变化趋势基本一致,整体上出现下降的趋势。在苗期和拔节期,与 RMPS 处理相比,CK 处理的 2 a 平均土壤积温分别提高了 10.57,12.18 $^{\circ}\text{C}$,但由于较高积温,未能影响到作物苗期和拔节期

时长,反而,在 2014 年拔节期由于长时间的无降雨干旱状态,延缓了夏玉米拔节期的时长。但当作物进入抽雄期之后,RMFS 处理因较高的积温而缩短了作物生育期。这表明作物物候是水热共同作用的结果,一方面,干旱造成作物生长发育延缓,另一方面,低温也会导致作物生育期延长。总的来说,垄膜沟秸秆处理增温主要发生在抽雄期之后,即玉米的生育阶段,该阶段能够提升夏玉米干物质的积累速率和转化。

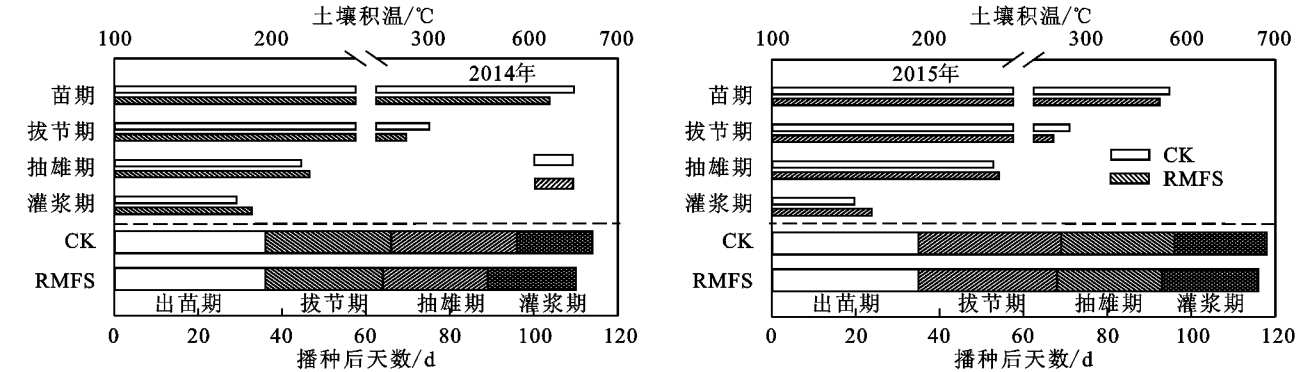


图 5 夏玉米各生育期积温与生长历时

由图 6 可知,作物耗水强度与降雨强度有着相关性,与夏玉米各生育期的生长规律也有着密切的关系。在苗期,由于植株叶片短小,地表裸露,棵间蒸发强烈,所以,CK 耗水强度略大于 RMFS;在拔节期,由于地表未被冠层全部覆盖,导致 2015 年 CK 的耗

水强度显著大于 RMFS,而 2014 年,由于长时间的干旱无雨,CK 处理长期处于受旱状态,耗水量显著降低;在抽雄期,RMFS 处理耗水强度弱于 CK 处理,这可能由于该时段降雨较多,蒸发强度较强导致的,特别是在 2014 年,前期由于干旱,后期降雨较多,促使

CK 处理作物“弹性”生长,增加耗水强度;在灌浆期,CK 处理的作物耗水强度小于 RMFS 处理,而在降雨量较少时,这种差距更加显著。与 CK 处理相比,2 a

全生育期 RMFS 处理耗水强度分别增加 39.95%和减少 17.02%,由于耗水强度是蒸发与蒸腾的相互作用的关系,覆盖处理未必可以减少耗水量。

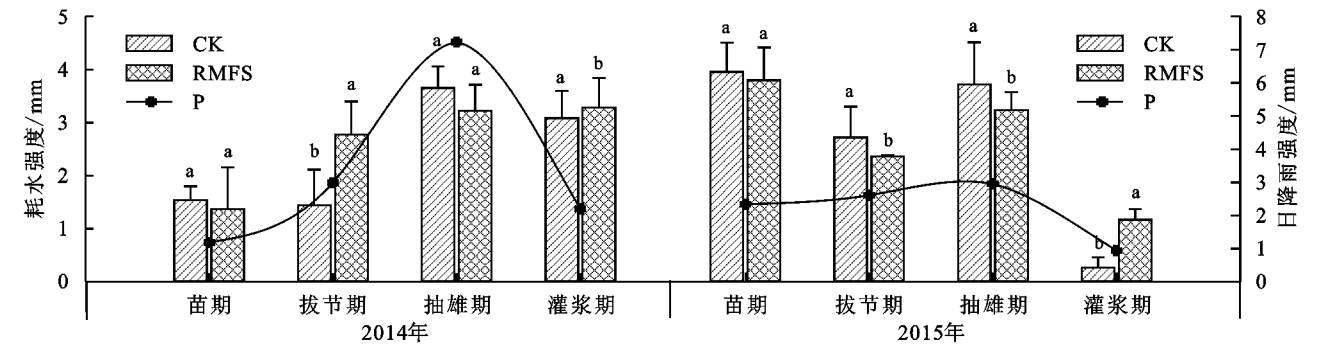


图 6 夏玉米不同生育期 0—260 cm 土层耗水量与降雨情况

2.3 土壤水热对作物生长的综合效应评价

RMFS 处理不仅可以显著增加作物的籽粒产量,还可以显著提高作物的水分利用效率和积温利用效率(表 3),2 a 平均增幅分别为 39.85,43.34% ($p<0.05$)。可见,垄上覆地膜的集雨增温抑蒸作用和沟内覆秸秆的保水调温效应相结合的覆盖方式可以较好地协调水热关系,使增产效应和水热综合转化效应更加突出。2014 年 RMFS 处理耗水量较 CK 有所增加,主要是由于该年降雨不均,拔节期降雨量较少,抽雄期后

降雨密集且较大,导致 CK 处理出现水分胁迫现象,抑制作物的蒸腾,这也是 2014 年作物产量低于 2015 年的主要原因。由此可以看出 RMFS 处理可以延长土壤水分的利用时间,调节时间上的水分供需关系。虽然两年土壤表层总积温并无显著性变化,但覆盖使作物的积温利用效率有所提高,由图 3 可知,RMFS 在前期土壤温度减少,后期增加,这表明作物所处的不同阶段水热状况对于产量的影响程度是不同的,这与作物的生理过程对土壤水热响应的敏感性有着密切的关系。

表 3 不同覆盖方式下夏玉米产量及其水分和积温利用效率

年份	处理	籽粒产量/ (kg · hm ⁻²)	耗水量/ mm	积温/ ℃	水分利用效率/ (kg · hm ⁻² · mm ⁻¹)	积温利用效率/ (kg · hm ⁻² · ℃ ⁻¹)
2014 年	CK	3693.92b	269.61b	1775.59a	13.70b	2.08b
	RMFS	5817.28a	290.38a	1771.10a	20.03a	3.28a
2015 年	CK	5480.22a	361.18a	1759.36a	15.17b	3.11b
	RMFS	6963.93b	340.92b	1769.25a	20.43a	3.94a

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著($p<0.05$)。

3 讨论

土壤水热变化是动态的交互过程,非等温条件下的土壤水热传输最早由 Philip 和 Vires 在 1957 年提出^[18],随后许多学者进行了相关的研究。研究表明,在土壤介质中土壤水分都从暖流区流向冷流区^[19]。而针对覆盖条件下的水热综合作用,一般都认为覆盖改变了土壤热量梯度差,使得土壤水分运动速率有所改变,但对于梯度差的改变有着不同的认识,有研究认为覆盖后加剧了梯度差,从而促使土壤水分向上运移^[20],有的研究表明覆盖有抑制深层水向上运动的作用^[21]。土壤水热运移作为含水率梯度和温度梯度是相互作用的复杂交互现象,研究相当困难和复杂。本研究发现,垄膜沟秸秆二元覆盖方式下,土壤含水量增加,土壤温度在前期低于不覆盖处理,后期高于不覆盖处理,说明了温度对水分的影响是有限的,这与王红丽等^[22]研究的覆膜下水温交互影响的结果存在差异,可能是因为不同覆盖方式导致膜下水分迁移

途径不同。另一方面,秸秆覆盖可以延缓土壤水分入渗速率,在降雨情境下,受水分入渗速率的延缓,覆盖下的土壤温度波动较小,有益于农田生态系统保持稳定的水热变化,减弱了环境对夏玉米的影响^[23]。

土壤水热状况是作物生长发育的基本条件,作物产量往往受两者交互作用的影响。覆盖集雨措施通过抑制蒸发调控土壤水分,提高降水利用效率,同时还可以调节土壤温度。覆盖还有利于加强作物光合作用,减少蒸发蒸腾比,改变物候期,从而提高作物产量。在二元覆盖中,地膜增加地表温度,而秸秆热导率较小,增加地表反射率和近地层气温,提高作物的光合效率,加之,二元覆盖通过抑蒸起到保水的效果,以此达到增产的效果。该种覆盖方式还有利于提高作物根系活性,延长抽雄期之后的发育历时,有利于干物质的积累,另一方面,在沟垄微地形的影响下,光合有效辐射增加,使作物的叶面积扩展,促进光能转化^[24]。然而,一些研究认为有秸秆覆盖情况下会导

致土壤通气性变差,不利于作物生长^[25],这种情况主要是由于降雨较多,致使土壤水分过多而产生的现象,而对于干旱半干旱地区是很难发生这种情况。本文研究表明,垄膜沟秸秆种植处理显著地提高水分利用效率和积温利用效率,缩短玉米生育期,水分、温度等诸多因素均起到了促进作用。

在干旱半干旱地区,覆盖措施主要起到调温保墒的作用。不同的研究表明,秸秆覆盖降低了土壤表层温度,并导致作物减产^[25],地膜覆盖增加土壤温度,提升作物产量^[26],但也会产生因增温过高导致作物早衰现象^[27]。然而,本文研究发现秸秆和地膜覆盖相结合的覆盖方式实现了保水保墒和“高温低调、低温高调”的双重作用,增强了作物对农田环境变化的适用性。特别是黄土高原南部地区光热资源丰富,垄覆膜沟覆秸秆方式是合理有效的提高作物产量的覆盖措施^[28]。秸秆地膜二元覆盖处理不仅具备了覆盖的保水提墒优点,而且还显著地改善土壤表层的热量分布,解决了高温烧苗、低温影响出苗和生长,并将这些优势转化为最终的作物产量优势。

4 结论

(1)在全生育期,垄覆膜沟覆秸秆处理表层土壤水分均高于平作不覆膜处理;垄覆膜沟覆秸秆处理土壤表层温度显现出“高温低调,低温高调”的现象。

(2)垄膜沟秸秆覆盖在全生育期均能提高土壤水分,提升水分利用效率;调节土壤表层温度,缩短作物物候期。

(3)垄膜沟秸秆覆盖显著地增加玉米籽粒产量,增幅为42.27%,水分利用效率提高39.85%,积温利用效率提高43.34%。

参考文献:

- [1] Zhang S L, Lovdahl L, Grip H, et al. Effects of mulching and catch cropping on soil temperature, soil moisture and wheat yield on the Loess Plateau of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 102(1): 78-86.
- [2] Liu X H, He B L, Yi X, et al. The soil water dynamics and hydraulic processes of crops with plastic film mulching in terraced dryland fields on the Loess Plateau[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(9): 809-825.
- [3] 山仑,康绍忠,吴普特. 中国节水农业[M]. 北京:中国农业出版社,2004:7-12.
- [4] Jia Y, Li F M, Wang X L. Soil quality responses to alfalfa watered with a field micro-catchment technique in the Loess Plateau of China[J]. *Field Crops Research*, 2006, 95(1): 64-74.
- [5] Liu Q F, Chen Y, Liu Y, et al. Coupling effects of plastic film mulching and urea types on water use efficiency and grain yield of maize in the Loess Plateau, China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 15(7): 1-10.
- [6] 李小英,段争虎,刘理臣,等. 黄土高原西部不同集雨保水措施下土壤水分变异特征[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(3): 118-123.
- [7] Ali S, Jan A, Zhang P, et al. Effects of ridge-covering mulches on soil water storage and maize production under simulated rainfall in semiarid regions of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 17(8): 1-11.
- [8] Zhou L M, Jin S L, Liu C A, et al. Ridge-furrow and plastic-mulching tillage enhances maize-soil interactions: Opportunities and challenges in a semiarid agroecosystem[J]. *Field Crops Research*, 2012, 12(6): 181-188.
- [9] Chen Y L, Liu T, Tian X H, et al. Effects of plastic film combined with straw mulch on grain yield and water use efficiency of winter wheat in Loess Plateau[J]. *Field Crops Research*, 2015, 17(2): 53-58.
- [10] Li R, Hou X Q, Jia Z K, et al. Effects on soil temperature, moisture, and maize yield of cultivation with ridge and furrow mulching in the rainfed area of the Loess Plateau, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 11(6): 101-109.
- [11] 李小雁,张瑞玲. 旱作农田沟垄微型集雨结合覆盖玉米种植试验研究[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(2): 45-52.
- [12] 强生才,张恒嘉,莫非,等. 微集雨模式与降雨变律对燕麦大田水生态过程的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(9): 2365-2373.
- [13] 丁瑞霞,贾志宽,韩清芳,等. 宁南旱区微集水种植条件下谷子边际效应和生理特性的响应[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(3): 494-501.
- [14] Tarara J M. Microclimate modification with plastic mulch[J]. *Hortscience*, 2000, 35(2): 169-180.
- [15] Dong B D, Liu M Y, Jiang J W, et al. Growth, grain yield, and water use efficiency of rain-fed spring hybrid millet (*Setaria italica*) in plastic-mulched and unmulched fields[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 143(1): 93-101.
- [16] Bu L D, Liu J L, Zhu L, et al. The effects of mulching on maize growth, yield and water use in a semiarid region [J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 12(3): 71-78.
- [17] 李彩霞,孙景生,周新国,等. 沟灌条件下土壤水热传输与转换研究进展[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(增刊1): 1-5.
- [18] Constantz J. Heat as a tracer to determine streambed water exchanges [J]. *Water Resources Research*, 2010, 44(4): 1-10.
- [19] Joshua W D, Jong E D. Soil moisture movement under temperature gradients[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2011, 53(1): 49-57.
- [20] 张朝勇,蔡焕杰. 膜下滴灌棉花土壤温度的动态变化规律[J]. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(2): 11-15.

- [21] 李原忠. 不同栽培模式春玉米生长及水分利用效率研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [22] 王红丽, 张绪成, 宋尚有, 等. 西北黄土高原旱地全膜双垄沟播种对玉米季节性耗水和产量的调节机制[J]. 中国农业科学, 2013, 46(5): 917-926.
- [23] 莫非, 周宏, 王建永, 等. 田间微集雨技术研究及应用[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 1-17.
- [24] Liu Y, Yang S J, Li S Q, et al. Growth and development of maize (*Zea mays* L.) in response to different field water management practices: Resource capture and use efficiency [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2010, 150(4): 606-613.
- [25] 高亚军, 李生秀. 旱地秸秆覆盖条件下作物减产的原因及作用机制分析[J]. 农业工程学报, 2005, 21(7): 15-19.
- [26] Liang H, Hu K L, Qin W, et al. Modelling the effect of mulching on soil heat transfer, water movement and crop growth for ground cover rice production system [J]. *Field Crops Research*, 2017, 20(1): 97-107.
- [27] 刘胜尧, 张立峰, 李志宏, 等. 华北旱地覆膜春玉米田水温效应及增产限制因子[J]. 应用生态学报, 2014, 11(3): 197-206.
- [28] 解文艳, 周怀平, 杨振兴, 等. 不同覆盖方式对旱地春玉米土壤水分及作物生产力的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 128-133.
- (上接第 161 页)
- [20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 106-185.
- [21] 王世杰, 张信宝, 白晓永. 南方喀斯特石漠化分区的名称商榷与环境特点[J]. 山地学报, 2013, 31(1): 18-24.
- [22] Feng T, Chen H, Polyakov V O, et al. Soil erosion rates in two karst peak-cluster depression basins of northwest Guangxi, China: Comparison of the RUSLE model with 137 Cs measurements[J]. *Geomorphology*, 2016, 253(3): 217-224.
- [23] 曾昭霞, 王克林, 刘孝利, 等. 桂西北喀斯特森林植物凋落物—土壤生态化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2015, 39(7): 682-693.
- [24] Liu W, Luo Q, Lu H, et al. The effect of litter layer on controlling surface runoff and erosion in rubber plantations on tropical mountain slopes, SW China[J]. *Catena*, 2017, 149(1): 167-175.
- [25] 郭柯, 刘长成, 董鸣. 我国西南喀斯特植物生态适应性与石漠化治理[J]. 植物生态学报, 2011, 35(10): 991-999.
- [26] 何淑勤, 官渊波, 郑子成, 等. 不同植被类型条件下土壤抗蚀性变化特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 17-22.
- [27] 白秀梅, 韩有志, 郭汉清. 关帝山不同植被恢复类型土壤抗蚀性研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 79-84.
- [28] 丛日亮, 黄进, 张金池, 等. 苏南丘陵区主要林分类型土壤抗蚀性分析[J]. 生态环境学报, 2010, 19(8): 1862-1867.
- [29] 徐少君, 曾波. 三峡库区 5 种耐水淹植物根系增强土壤抗侵蚀效能研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(6): 13-18.
- [30] Peng T, Wang S J. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on karst slopes in southwest China[J]. *Catena*, 2012, 90(1): 53-62.
- [31] 赵洋毅, 王玉杰, 王云琦, 等. 渝北水源区水源涵养林构建模式对土壤渗透性的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(15): 4162-4172.
- [32] 王纪杰, 俞元春, 陈容, 等. 不同栽培代次、林龄的桉树人工林土壤渗透性研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(2): 78-82.
- [33] 伏文兵, 戴全厚, 严友进. 喀斯特坡耕地及其浅层孔(裂隙)土壤侵蚀响应试验研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 11-16.
- [34] 付兴涛, 张丽萍, 喻理飞, 等. 植物苗期根系抗侵蚀特性试验研究: 以构树和顶坛花椒为例[J]. 水土保持学报, 2008, 22(3): 5-9.
- [35] Liu Y, Tao Y, Wan K Y, et al. Runoff and nutrient losses in citrus orchards on sloping land subjected to different surface mulching practices in the Danjiangkou Reservoir area of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 110(3): 34-40.