

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.024

不同覆盖方式对土壤水热与夏玉米生长的影响

冯浩^{1,2} 刘匣^{1,3} 余坤^{1,3} 丁奠元^{1,3} 张浩杰^{1,3} 褚晓升^{1,3}

(1. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100;
3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为探求西北半湿润地区不同覆盖方式对农田土壤水热和作物生长的定量影响, 试验对比研究了平作不覆盖(CK)、秸秆覆盖平作种植(SM)、地膜覆盖平作种植(PM)和垄覆地膜沟覆秸秆(SPM)4种覆盖方式对夏玉米土壤水分、温度、作物生长、产量和水分利用效率的影响。结果表明: 覆盖处理在各生育期内0~260 cm土壤贮水量都显著高于对照($P < 0.05$), 夏玉米生育期0~30 cm土层内平均温度表现为: PM > SPM > CK > SM(其中15 cm时土壤温度CK > SPM), 垄覆地膜沟覆秸秆能够有效地聚集降雨。夏玉米地上部生物量随生育进程的动态变化符合Logistic生长模型, SPM处理地上部生物量理论值最大, 快速累积期提前, 最快累积速率较大, 持续时间较长。SM、PM和SPM处理2年夏玉米产量平均值分别较CK处理提高15.4%、23.3%和28.4% ($P < 0.05$)。水分利用效率分别较CK处理提高10.2%、31.2%和28.0% ($P < 0.05$), 各覆盖处理间差异不显著。综合分析, 垄覆地膜沟覆秸秆可明显改善农田土壤水热状况, 增加干物质积累量, 提高夏玉米产量和水分利用效率, 是该研究中最适合本地的覆盖栽培方式。

关键词: 夏玉米; 覆盖; 土壤水分; 温度; 产量; 水分利用效率

中图分类号: S513 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)12-0192-11

Effects of Different Mulching Patterns on Soil Moisture, Soil Temperature and Summer Maize Growth

Feng Hao^{1,2} Liu Xia^{1,3} Yu Kun^{1,3} Ding Dianyuan^{1,3} Zhang Haojie^{1,3} Chu Xiaosheng^{1,3}

(1. Chinese National Academy of Water-saving Agriculture in Arid Region, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China
3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The influence of different field mulching treatments on soil water content, soil temperature, crop growth, final yield and water use efficiency was studied during the summer maize growing season in the semi-humid region of Northwest China. The mulching treatments included the flat plot with straw mulching (SM), flat plot with plastic film mulching (PM), ridge-furrow planting with film mulching over ridge and wheat straw mulching over furrow (SPM), and flat plot without mulching (control treatment, CK). The results showed that water content of mulching treatments in soil layer of 0~260 cm depth was significantly larger than that of CK during maize growing period ($P < 0.05$). The average soil temperature in the soil layer of 0~30 cm depth showed a decreasing trend of PM, SPM, CK and SM, and the average soil temperature of CK was larger than that of SPM when the soil layer was 0~15 cm depth. The development of maize aboveground biomass can match well with the logistic curve. Moreover, the average yields of SM, PM and SPM in the two-year experiment were increased by 15.4%, 23.3% and 28.4% compared with that of CK, respectively ($P < 0.05$). The water use efficiencies of SM, PM and SPM were increased by 10.2%, 31.2% and 28.0% compared with that of CK, respectively ($P <$

收稿日期: 2016-05-03 修回日期: 2016-05-28

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2013AA102904)和高等学校学科创新引智计划(111计划)项目(B12007)

作者简介: 冯浩(1970—),男,研究员,博士生导师,主要从事水土资源高效利用研究,E-mail: nercwsi@vip.sina.com

0.05)。By comparison, the SPM can collect rainwater more effectively than other treatments and had the largest aboveground biomass in theory. In the treatment of SPM, the rapid dry matter accumulation period was earlier, and the cumulative rate was the fastest with a longer accumulation period, which meant that the SPM can significantly improve the soil water-heat conditions, increase the accumulation amount of crop dry matter, promote crop growth and improve water use efficiency. Therefore, the SPM was the better choice for local farmers in the semi-humid region of Northwest China.

Key words: summer maize; mulching; soil water; temperature; yield; water use efficiency

引言

水资源短缺是制约我国易旱地区农业持续发展的重要因素。降雨是农业生产的主要水分来源,干旱缺水、降雨年际分布不均匀易造成粮食产量的大幅度减少。而且陕西关中地区粮食生产潜力有待提高的空间比较大^[1]。大量研究表明,覆盖可以有效地减少土壤水分的无效蒸发,改善土壤水热条件,提高作物产量和水分利用效率。通过覆膜技术实现自然降水的有效聚集^[2],提高雨养农业的抗旱能力是解决陕西地区干旱缺水提高作物产量的重要途径^[3]。

国内外学者对于覆盖对作物生长的影响做了大量研究,表明地膜覆盖可以阻挡水分的垂直蒸发,促进水分的横向运移^[4],改善作物供水条件、抑制土壤蒸发^[5]、减少水分亏缺、提高作物出苗率^[6],使生物产量、经济产量和水分利用效率均提高^[7]。但也有研究表明长期覆膜会导致土壤温度升高,土壤通气性变差,造成根系大量死亡和根系活动下降,导致产量降低^[8]。秸秆覆盖能提高土壤含水量^[9],减少土壤蒸发^[10],并在腐烂后改善土壤水分与养分供应状况^[11-12],同时,改变土壤与大气的界面层状况,影响土壤的通透性和持水性^[13]。陈素英等^[14]的研究表明秸秆覆盖在高温时降低根部土壤温度,为作物生长创造适宜的土壤环境,可防止夏玉米早衰。垄沟集雨种植不仅能够减少土壤水分的蒸发^[15],提高入渗深度^[16],减少土壤蒸发面积,还能收集降雨量^[17],延长水分的有效期,改善作物的生长微环境,提高水分利用效率^[18],从而调节作物水分的供需平衡。

以往对于覆盖技术的研究很多,但大多基于对生育期内水分、温度的影响,对典型降雨集雨效应的研究较少,在结合水热状况的条件下针对不同覆盖方式对降雨后水分、温度的影响以及对作物生长的影响缺乏系统深入的研究。本文通过 2 a 田间试验,对比研究了不同覆盖方式对生育期内水分、温度,一次降水后水热变化以及对作物生长和产量的影响。探究不同覆盖方式对农田土壤水热和作物生

长的定量影响,以期在选择合理的覆盖模式提供参考,并为北方旱作农业覆盖技术的完善和生产实践提供基础资料。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

试验地设在陕西省杨凌西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室灌溉试验站(108°24'E,34°20'N,海拔高度 521 m),属于暖温带半湿润大陆性季风气候区,四季分明,多年平均气温 13~15℃,多年平均降水量在 630 mm 左右,降水量年际分布不均,主要集中在 7—10 月份,无霜期为 213 d 左右。试验时间为 2014 年 6 月—2015 年 10 月。供试土壤为中壤土(砂粒:粉粒:粘粒质量比为 8:73:19)。0~1 m 土层的平均田间持水率为 23%,凋萎含水率为 8.5%(均为质量含水率),土壤 pH 值为 8.20,平均容重为 1.37 g/cm³。该站地下水埋深在 5 m 以下,其向上补给量可忽略不计。耕层土壤养分含量(质量比):有机碳 8.14 g/kg,全氮 0.95 g/kg,全磷 0.83 g/kg,全钾 20.42 g/kg,速效磷 20.91 mg/kg,速效钾 287 mg/kg。

1.2 试验设计

设置平作不覆盖(CK)、秸秆覆盖平作种植(SM)、地膜覆盖平作种植(PM)和垄覆地膜沟覆秸秆(SPM)4种处理,采用随机区组试验设计,每个处理设 3 个重复,共 12 个小区,小区方向为东西走向,面积为 10 m²(5 m×2 m),每个小区之间有宽 0.5 m 的保护行。

播种前,先进行人工翻耕、整地、施肥,不同处理小区统一施肥水平:施氮肥 225 kg/hm²,施磷肥 90 kg/hm²。基肥在播种前通过人工翻耕一次性翻入 0~15 cm 耕层土壤内,生育期内不追肥。试验所用地膜为普通聚乙烯塑料薄膜,膜宽统一裁成 60 cm,膜厚 0.01 mm,秸秆为上季作物小麦秸秆,原状还田,覆盖量 4 000 kg/hm²。按照试验设计均匀覆盖,同一小区位置及秸秆覆盖量不变。

供试夏玉米品种为秦龙 11,东西行种植,人工穴播,播种密度为 52 000 株/hm²,行距为 60 cm。于

2014年6月19日播种,2014年10月11日收获;
2015年6月11日播种,2015年10月8日收获。

1.3 观测指标

1.3.1 土壤温度

使用 EM50 (Environmental logging system, Decagon Devices, Inc. USA) 土壤多参数自动检测系统检测土壤温度和含水率。在每个处理安装一组 EM50, 埋设深度分别为 15、30、50、70、100 cm (各土层深度探头位置布置在小区中部), 数据采集器设置为每小时自动记录数据 1 次。

1.3.2 土壤水分

使用 EM50 和时域反射仪 Trime-TDR 测定土壤含水率, EM50 连接有 5 个探头, 测定深度分别为 15、30、50、70、100 cm (各土层深度探头位置布置在小区中部)。TDR 测定土层深度为 0~260 cm (TDR 管安装在各小区中心部位), 自地表以下每 20 cm 为一个测量深度间隔。所有小区每 7 d 测定一次土壤体积含水率, 降水前后加测。

土壤贮水量的计算公式为

$$H = \sum_{i=1}^n 10\theta_i h_i \quad (1)$$

式中 H ——土壤贮水量, mm

θ_i ——第 i 层土壤体积含水率, %

h_i ——第 i 层土壤厚度, cm

n ——测土壤体积含水率时的层序, 每 20 cm 为一层

玉米耗水量采用土壤水量平衡公式计算, 即

$$ET = \Delta W + P + I + K \quad (2)$$

式中 ET ——玉米耗水量, mm

ΔW ——收获期与播种期土壤剖面水分含量之差(按 260 cm 计), mm

P ——玉米生育期内的降水量, mm

I ——生育期灌溉量, mm, 旱作 $I=0$

K ——时段内地下水的补给量, mm

由于试验田地下水埋深在 5 m 以下, 可视 $K=0$; 降水入渗深度不超过 2 m, 可视深层渗漏量为 0。

1.3.3 作物生长指标

(1) 生物量的测定: 在玉米各生育期内, 每个小区的中间 2 行选取生长状况良好、具有代表性的 1 株玉米, 从茎基部切断, 获得完整的地上部, 然后在 105℃ 杀青 30 min, 在 75℃ 恒温条件下干燥至质量恒定后称量, 记录夏玉米的干物质质量。

采用 Logistic 生长方程^[19] (又名自然生长方程) 对玉米的地上部生物量进行回归分析, 得出回归参数 a 和 b 的样本估计值, 并进行方程特征值的估算。

Logistic 生长方程为

$$Y = \frac{K_m}{1 + ae^{-bt}} \quad (3)$$

式中 Y ——玉米某一时期地上部生物量, t/hm²

t ——播种后天数, d

a 、 b ——方程待定系数, 是生物学特征值

K_m ——地上部生物量理论最大值

其中 a 、 b 和 K_m 都是大于 0 的参数。

设 T_1 、 T_2 为快速生长期起始和结束时间, d; T_0 为最快生长点的时间, d; V_{\max} 为最快生长点的最快累积速率, t/(hm²·d), 对 Logistic 生长方程进行一阶和二阶求导为

$$T_1 = \frac{1}{b} \ln \frac{a}{2 + \sqrt{3}} \quad (4)$$

$$T_2 = \frac{1}{b} \ln \frac{a}{2 - \sqrt{3}} \quad (5)$$

$$T_0 = \frac{a}{b} \quad (6)$$

$$V_{\max} = \frac{bK_m}{4} \quad (7)$$

(2) 考种测产: 玉米成熟后, 每个小区随机取 10 株玉米, 收获后人工脱粒, 测定穗粒数、百粒质量、穗长等性状, 人工脱粒测干质量, 干燥后称总质量, 然后计算出单位面积产量。

(3) 水分利用效率(WUE)计算公式为

$$WUE = \frac{Y}{ET} \quad (8)$$

式中 WUE ——水分利用效率, kg/(hm²·mm)

Y ——单位面积玉米产量, kg/hm²

1.3.4 降雨等气象资料

气象资料由西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室灌溉试验站提供。

1.4 统计分析方法

试验数据采用 Excel 2010 进行数据整理, 运用 SPSS 16.0 中非线性回归子程序进行生长曲线拟合, 并用 SPSS 对数据进行单因素方差分析, 采用最小显著差异法(LSD)进行显著性检验($P < 0.05$), 使用 SigmaPlot 10.0 作图。

2 结果与分析

2.1 不同覆盖方式下 0~260 cm 土壤贮水量变化

土壤贮水量的变化主要取决于生育期内降水量、气温以及作物耗水量等多种因素。2014 年和 2015 年夏玉米生育期内降水量分别为 380.3 mm 和 283.9 mm, 夏玉米生育期内的逐日降水量和日均气温分布如图 1 所示。因为降水的入渗深度主要在

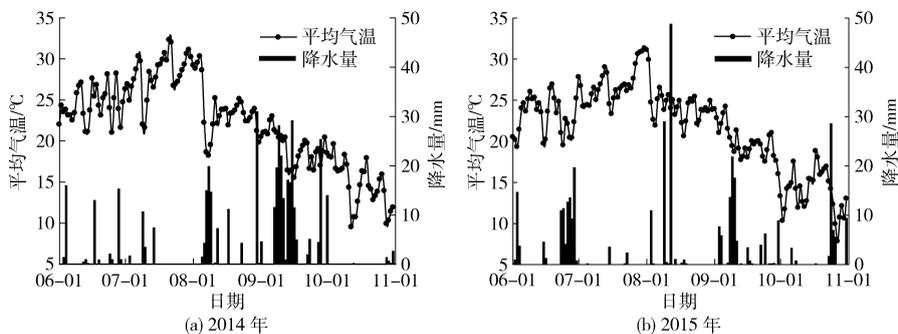


图 1 2014 年和 2015 年夏玉米生育期内逐日降水量和平均气温分布

Fig. 1 Daily distributions of rainfall and average temperature during growth seasons of summer maize in 2014 and 2015

0~200 cm内^[20],所以本研究探讨不同覆盖处理对0~260 cm土壤贮水量变化的影响。

由图 2(Trime-TDR 测定)可以看出,作物耗水量和降水量综合影响着土壤贮水量的变化。土壤贮水量的变化趋势与降水量的变化趋势基本一致。2014 年土壤贮水量最高出现在灌浆期,2015 年出现在苗期,这是由该研究区域的降水特征和夏玉米生长发育特点决定的。在 2014 年和 2015 年夏玉米生育期内,夏玉米苗期 CK 处理 0~260 cm 土壤贮水量显著低于 SM、PM 和 SPM 处理,各覆盖处理间差异不显著。这可能是由于覆盖处理可显著降低土壤蒸发,减少水分的消耗。拔节期—抽雄期,作物各项生长指标开始增大,耗水量增加,土壤贮水量出现减小趋势;2014 年降水集中在玉米生育后期,灌浆期降水量增加,土壤贮水量出现增大趋势,灌浆期—成熟期降水量减小,作物耗水使得土壤贮水量出现减小

趋势。成熟期,SM、PM 和 SPM 处理土壤贮水量较 CK 处理分别增加 8.4%、11.2% 和 10.1% ($P < 0.05$)。2015 年降水量变化较均匀,2015 年夏玉米生育期内,各处理在不同生育期 0~260 mm 土壤贮水量变化特征与 2014 年基本一致,拔节期降水量减小,作物蒸发蒸腾强烈,土壤贮水量减小,覆盖处理与对照处理间差异显著;在抽雄期和灌浆期,降水量增加,但作物生长旺盛,耗水量增加,两者综合作用导致土壤贮水量变化不大;成熟期作物耗水量开始减少,降水量减小,使得土壤贮水量变化不大,SM、PM 和 SPM 处理土壤贮水量较 CK 处理分别增加 6.5%、6.7% 和 4.2% ($P < 0.05$),SM、PM 和 SPM 处理间差异不显著。2014 年和 2015 年成熟期土壤贮水量表现为:PM > SM > SPM > CK,2 a 成熟期 SM、PM 和 SPM 土壤贮水量平均值较 CK 处理分别增加 7.5%、9.0% 和 7.2%。

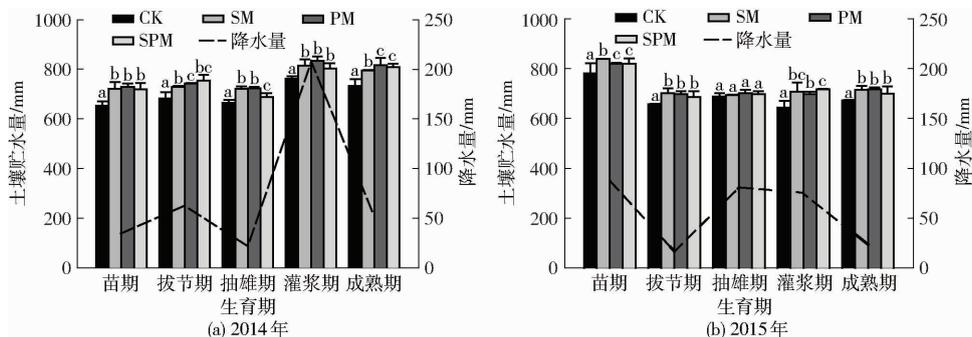


图 2 2014 年和 2015 年不同处理夏玉米不同生育期 0~260 cm 土壤贮水量的变化

Fig. 2 Soil water storage of 0~260 cm soil depths at different growth stages of summer maize under different treatments in 2014 and 2015

2 a 试验结果表明,在夏玉米生长前期土壤贮水量的变化主要受降水和土壤蒸发的影响;拔节期以后,作物各项生长指标迅速增加,生长速率加快,作物蒸腾消耗水分较多。覆盖处理与对照处理土壤贮水量呈显著性差异。2015 年抽雄期对照处理接纳降水较多,夏玉米生长消耗较少,与覆盖处理差异不显著。其余各生育期覆盖处理和对照处理 0~260 cm 贮水量呈显著性差异,说明覆盖处理具有较好的蓄水保墒作用,能显著提高 0~260 cm 土

壤贮水量。

2.2 土壤温度变化动态

土壤温度是影响作物生长发育的重要因素之一,其变化是随太阳辐射和大气温度变化而吸收和释放能量的过程^[21]。不同覆盖方式对土壤温度的影响不同,适宜的土壤温度能够促进作物生长并提高作物产量。

不同覆盖方式下土壤温度变化与大气温度变化趋势基本一致,相对于大气温度有一定的滞后性

(图3, EM50测定)。不同覆盖方式对土壤温度的影响主要表现在夏玉米生长前期, 后期差异不明显。2014年夏玉米生育期各处理15 cm的平均土壤温度高于30 cm; 2015年夏玉米生育期CK、PM处理15 cm的平均土壤温度高于30 cm, SM和SPM处理15 cm的平均土壤温度低于30 cm, 可见秸秆覆盖对

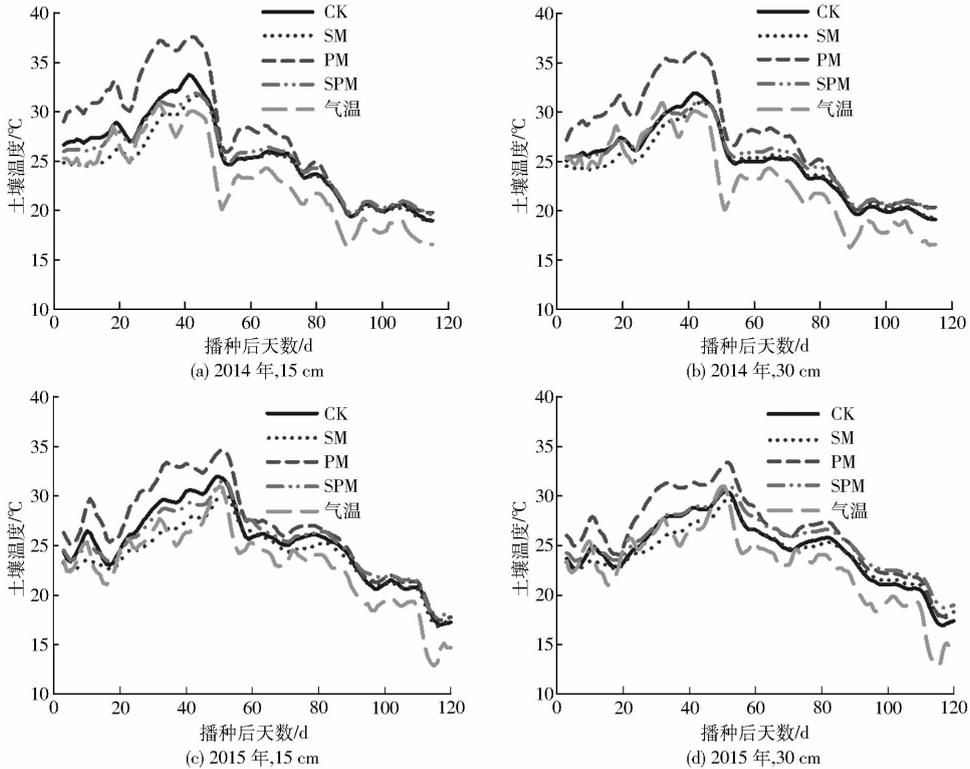


图3 2014年和2015年夏玉米生长季15 cm和30 cm土壤温度的动态变化

Fig. 3 Variations of soil temperature at depths of 15 cm and 30 cm for summer maize under different treatments in 2014 and 2015

2014年15 cm平均土壤温度表现为: PM > CK > SPM > SM, 2015年15 cm平均土壤温度表现为: PM > SPM > CK > SM。处理CK、SM、PM和SPM 2 a玉米季15 cm平均土壤温度分别为25.3°C、24.3°C、27.2°C和25.3°C, SM处理土壤平均温度较CK处理降低1.0°C, PM处理土壤平均温度较CK处理增加1.9°C, SPM处理的增温效果不显著。原因是地膜覆盖能够抑制潜热交换, 并减弱了土壤与外界显热交换, 使得温度升高较大, 而秸秆覆盖能够减少太阳的直接辐射, 增强光波反射, 使得土壤温度降低, 而垄覆地膜沟覆秸秆结合地膜的增温效应和秸秆覆盖的降温效应, 使得增温效果不显著。2 a夏玉米季30 cm平均土壤温度均表现为: PM > SPM > CK > SM。处理CK、SM、PM和SPM平均土壤温度分别为24.6°C、24.3°C、26.8°C、25.3°C, SM处理平均土壤温度较CK降低了0.3°C, PM处理平均土壤温度较CK增加了2.2°C, SPM处理平均土壤温度较CK增加了0.7°C。可见, 秸秆覆盖对土壤温度的影响主要表现在表层15 cm左右, 且随着土层深度的增加

温度的影响在第2季比较明显。原因是夏玉米生长季气温较高, 土壤热量由浅层向深层传递, 表现为浅层土壤温度高于深层。秸秆覆盖能够减少太阳对地面的直接辐射, 在夏玉米生长季具有降低土壤温度的作用, 且秸秆覆盖对浅层土壤温度的影响较大, 而对深层土壤温度的影响较小。

对土壤温度的影响减小。

试验结果表明, 不同覆盖处理对土壤温度的影响趋势大体一致。地膜覆盖能够增加土壤温度, 秸秆覆盖可降低土壤温度, 垄覆地膜沟覆秸秆综合地膜覆盖和秸秆覆盖对土壤温度的影响不明显。

2.3 降水后土壤含水率和土壤温度变化

探索不同覆盖方式对降水后土壤含水率和温度的影响对于研究覆盖条件下降水聚集和作物生长具有重要意义。图4为2014年8月30日—9月1日的一次降水, 降水量为35.5 mm。从图中可以看出, 各处理土壤含水率的变化随着时间的变化呈现先增加后减小的趋势(EM50测定)。其中, CK和PM处理土壤含水率的变化主要集中在0~70 cm土层内, 而SM和SPM处理土壤含水率的变化在0~50 cm土层内。在0~15 cm土层, CK、SM、PM和SPM处理降水后1 d土壤含水率较降水前1 d分别增加3.7、1.8、0.2、4.3个百分点。在0~30 cm土层, CK、SM、PM和SPM处理降水后1 d土壤含水率较降水前1 d分别增加3.7、1.9、0.1、3.6个百分点。

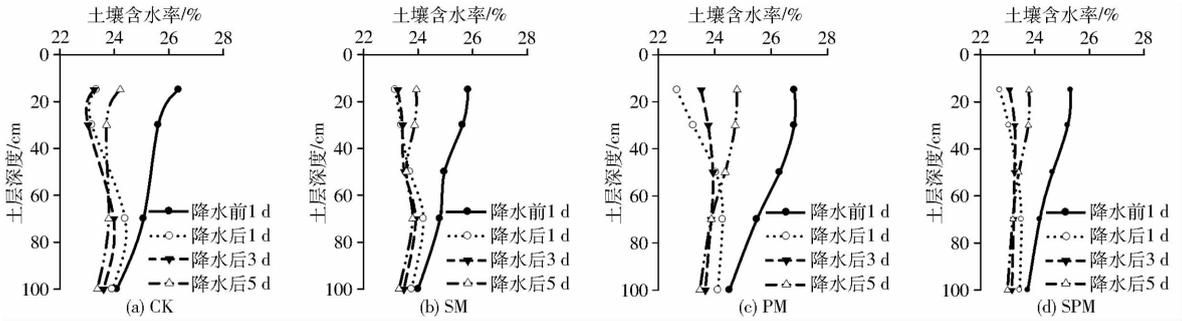


图 4 2014 年夏玉米生长季一次降水后土壤含水率的动态变化

Fig. 4 Variation of soil moisture after a rain of summer maize under different treatments in 2014

CK、SM、PM 和 SPM 处理降水后 1 d 不同土层的平均土壤含水率较降水前 1 d 分别增加 1.8、0.9、0.2、2.0 个百分点。这是各覆盖处理对降水的聚集效果和水分入渗综合作用的结果。可见全膜覆盖可将降水隔离在膜外,不利于降水的入渗;秸秆覆盖截留一部分降水,使其不能完全入渗;垄作覆膜沟覆秸秆的集水效果最显著,可以有效地将降水聚集并利用。降水后 5 d 相对于降水后 1 d 土壤含水率的变化量表现为 SPM > CK > SM > PM, 降水后 5 d 相对于降水后 3 d 土壤含水率的变化量表现为: SPM > CK > SM > PM, 此时正处于夏玉米营养生长阶段,而且气温高,土壤蒸发强烈,导致对照土壤含水率变化量较大。垄作覆膜沟覆秸秆处理集水效果较好,可减少土壤蒸发,同时作物生长状况最好,耗水量相对较大,综合作用导致土壤含水率变化最大。

由图 5 可知,降水后土壤温度降低,土壤温度的变化主要表现在浅层,随着土层深度的增加,土壤温度变化幅度变小。在 0~50 cm 土层内土壤温度的变化呈现先降低后升高的趋势;在 50~100 cm 土层内,土壤温度随着降雨时间的变化逐渐降低。这与温度的传递速度和传递距离有关系。降水前 1 d 和降水后 1 d 0~15 cm 的土壤温度均表现为: PM > SPM > CK > SM。且降水后 1 d 和降水前 1 d 0~15 cm 土层的温度差异最明显,处理 CK、SM、PM 和 SPM 的温度差分别为 3.0、2.7、4.2、2.6℃。降水前后各土层土壤温度的平均值均表现为: PM > SPM > CK > SM。各个土层降水前后 CK、SM、PM 和 SPM

处理的平均土壤温度分别为 24.1、24.0、25.4、24.6℃。可见,地膜覆盖对土壤温度的增温效果最显著,秸秆覆盖能够降低土壤温度,垄覆地膜沟覆秸秆综合地膜和秸秆覆盖的增降温效应,在一定程度上相互抵消,在生育后期增加土壤温度,且能降低降水前后温度的变化差异。

不同覆盖方式对一次降水后土壤含水率和土壤温度的影响表明地膜覆盖能显著增加土壤温度,但是地膜覆盖能够阻挡降水的入渗,使得降水补充较少;秸秆覆盖能够降低土壤温度,而且秸秆能够截留一部分水分,使得土壤水分不能完全入渗;垄覆地膜沟覆秸秆在夏玉米生育后期能够增加土壤温度,且能调节土壤温度的变化幅度,而且垄作能够有效地聚集降水,显著增加土壤含水率。可见垄覆地膜沟覆秸秆集蓄水、减蒸于一体,为夏玉米生长创造良好的水热条件。

2.4 地上部生物量的 Logistic 生长模型

干物质积累是决定作物产量高低的关键因素之一,以时间为变量,利用 Logistic 生长模型可定量描述作物的自然生长过程。表 1 是不同覆盖方式下夏玉米地上部生物量动态生长模型的拟合参数和特征值。可见,不同覆盖方式下夏玉米地上部生物量随生育进程的 Logistic 模型拟合效果良好(决定系数 $R^2 > 0.9$, $P < 0.01$),各处理间夏玉米地上部生物量理论最大值均表现为: SPM > PM > SM > CK。

2014 年和 2015 年夏玉米生长季,不同覆盖方式下夏玉米地上部生物量动态累计变化规律基本一

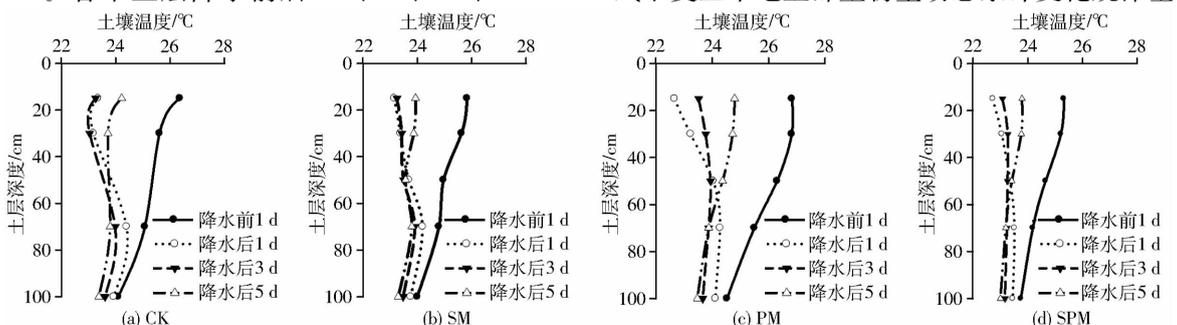


图 5 2014 年夏玉米生长季一次降水后土壤温度的动态变化

Fig. 5 Variations of soil temperature after rain of summer maize under different treatments in 2014

致。2014年和2015年SM、PM、SPM处理地上部生物量理论最大值分别较CK高27.7%、28.4%、33.6%和14.0%、19.4%、22.4%；其2年平均值分别较CK高20.8%、23.9%、28.0%。连续2a夏玉米快速生长期的起始时间均表现为：CK > SM > SPM > PM，SM、PM和SPM处理的快速生长期2a的平均值分别较CK处理提前0.4、6.2、4.4 d。最快生长点的时间表现为：SM > CK > SPM > PM。与CK处理相比，SM、PM和SPM处理快速生长期的持续时间

较长，2a的平均值分别较CK处理延长2.7、1.0、3.6 d。2个生长季夏玉米最快生长点的最快累积速率为0.20~0.30 t/(hm²·d)，覆盖处理的速率普遍高于对照处理。可见覆盖方式为夏玉米生长创造良好的水热条件，提高夏玉米生长速率，并延长夏玉米的快速生长时间，有利于夏玉米生物量的形成，其中垄覆地膜沟覆秸秆地上部生物量理论值最大，最快累积速率较大，持续时间最长，最有利于地上部生物量的形成。

表1 不同覆盖模式下夏玉米地上部生物量动态生长模型参数特征值

Tab.1 Characteristic parameters of above-ground biomass dynamic growth models of summer maize under different mulching patterns

年份	处理	拟合参数			R ²	快速生长期特征值				
		$K_m/(t \cdot \text{hm}^{-2})$	a	b		T_1/d	T_2/d	T_0/d	$\Delta T/d$	$V_{\max}/(t \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{d})^{-1})$
2014	CK	10.4	237.7	0.077	0.999**	53.9	88.2	71.1	34.2	0.20
	SM	13.3	177.2	0.072	0.997**	53.6	90.2	71.9	36.6	0.24
	PM	13.3	151.3	0.076	0.998**	48.7	83.4	66.0	34.7	0.25
	SPM	13.9	140.3	0.073	0.997**	49.7	85.8	67.7	36.1	0.25
2015	CK	14.1	292.8	0.075	0.998**	58.2	93.3	75.7	35.1	0.26
	SM	16.1	200.3	0.069	0.995**	57.7	95.9	76.8	38.2	0.28
	PM	16.9	147.0	0.072	0.996**	51.0	87.6	69.3	36.6	0.30
	SPM	17.3	121.5	0.065	0.998**	53.6	94.1	73.8	40.5	0.28

注： ΔT 为快速生长期持续时间；**表示在 $P < 0.01$ 水平差异显著。

2.5 夏玉米产量和水分利用效率

2014年和2015年不同覆盖方式对夏玉米产量和水分利用效率的影响如表2所示。2014年覆盖处理果穗长、穗粒数和百粒质量都显著高于对照处理($P < 0.05$)。2a夏玉米穗粒数都表现为：PM > SPM > SM >

CK，百粒质量表现为：SPM > SM > PM > CK。原因是穗粒数增加的同时，导致单个籽粒分配的营养物质减少，进而干物质积累量减少，且PM处理较高的土壤温度(图3)促进作物早衰，使得生育期提前，缩短了夏玉米营养生长的历程，从而使得百粒质量降低。

表2 不同覆盖方式对夏玉米产量、作物耗水量及水分利用效率的影响

Tab.2 Effects of different mulching patterns on grain yield, evapotranspiration (ET) and water use efficiency (WUE) of summer maize

年份	处理	果穗长/cm	穗粒数/粒	百粒质量/g	产量/(kg·hm ⁻²)	ET/mm	WUE/(kg·(hm ² ·mm) ⁻¹)
2014	CK	15.5 ± 0.6 ^a	382.0 ± 23.5 ^a	23.1 ± 1.2 ^a	4 920.1 ± 470.2 ^a	277.8 ± 11.5 ^a	17.7 ± 3.6 ^a
	SM	17.2 ± 0.4 ^b	502.4 ± 25.0 ^b	27.5 ± 1.0 ^b	5 928.5 ± 286.5 ^b	281.4 ± 5.1 ^a	21.1 ± 1.4 ^b
	PM	17.2 ± 1.3 ^b	537.8 ± 16.8 ^b	26.1 ± 0.4 ^{ab}	6 135.2 ± 74.6 ^b	246.6 ± 4.7 ^b	24.9 ± 2.1 ^b
	SPM	17.8 ± 0.7 ^b	511.6 ± 21.3 ^b	28.6 ± 1.2 ^b	6 307.9 ± 263.1 ^b	260.5 ± 6.3 ^c	24.2 ± 3.3 ^b
2015	CK	13.0 ± 0.6 ^a	417.5 ± 18.0 ^a	25.4 ± 0.3 ^a	5 387.4 ± 393.7 ^a	324.1 ± 13.0 ^a	16.6 ± 0.3 ^a
	SM	13.2 ± 0.6 ^a	433.2 ± 22.3 ^a	32.0 ± 0.2 ^b	5 970.2 ± 206.8 ^a	357.7 ± 9.3 ^b	16.7 ± 1.0 ^{ab}
	PM	17.7 ± 0.1 ^b	547.7 ± 7.5 ^b	28.0 ± 0.9 ^c	6 575.8 ± 119.5 ^b	326.6 ± 15.6 ^a	20.1 ± 2.4 ^{ab}
	SPM	16.6 ± 0.3 ^b	498.0 ± 15.8 ^c	32.2 ± 0.5 ^b	6 927.0 ± 156.5 ^b	352.4 ± 7.2 ^b	19.7 ± 1.3 ^b

注：同列数值后不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

2014年和2015年各覆盖处理的夏玉米产量显著($P < 0.05$)高于对照处理，表现为：SPM > PM > SM > CK。2015年夏玉米产量明显高于2014年，原因为2014年夏玉米生育前期降水较少，主要集中在后期，前期土壤蒸发强烈，难以满足作物生长需求，从而造成产量降低。SM、PM和SPM处理2a夏玉

米产量平均值分别比CK处理提高15.4%、23.3%和28.4% ($P < 0.05$)。生育期内作物耗水量覆盖处理与对照处理间差异不明显，但是覆盖处理能够显著提高水分利用效率，SM、PM和SPM处理2a夏玉米水分利用效率平均值分别比CK处理提高10.2%、31.2%和28.0% ($P < 0.05$)。且SPM处理

水分利用效率显著高于对照 CK 处理,与 SM、PM 处理无显著性差异。可见,垄覆地膜沟覆秸秆相对适宜的水热条件能够促进夏玉米生长和产量的提高,同时可相对提高夏玉米水分利用效率。

3 讨论

3.1 覆盖方式对土壤贮水量和土壤温度的影响

水热条件是影响作物生长发育,提高作物产量和水分利用效率的重要因素^[22-23]。不同覆盖方式可以不同程度地改变土壤的水分和温度状况从而促进作物生长^[24]。土壤贮水量的变化趋势与降水量的变化趋势基本一致,这与余坤等^[23]的研究结果一致。覆盖处理可显著增加土壤贮水量,除 2015 年抽雄期外,与对照处理呈显著性差异($P < 0.05$) (图 1)。原因一方面为 2015 年抽雄期时,作物处于生殖生长阶段,作物生长耗水量较多,另一方面为这一时期覆盖处理能显著降低土壤水分蒸发,但降水量增加,对照处理有利于降水的接纳与入渗,这一结果和李磊等^[25]、李荣等^[26]和 SHARMA 等^[27]的研究结果类似。覆盖方式可以通过不同程度地聚集降水和减少土壤水分蒸发,为作物生长创造良好的水分环境。

覆盖方式可以明显的调节土壤温度,且随着土层的增加调温作用逐渐减弱^[28],本研究也得出相似的结论。地膜对玉米田间土壤温度的增加幅度在 3℃ 左右^[29],而秸秆覆盖可有效拦截和吸收太阳辐射及地表有效辐射,阻碍土壤与大气间的水热交换,从而降低土壤温度^[30-31]。垄覆地膜沟覆秸秆能够降低土壤温度^[32-33]。本研究结果表明:在 0~15 cm 土层,在夏玉米全生育期内秸秆覆盖土壤温度的平均值较对照处理降低 1℃,地膜覆盖土壤温度增加 1.9℃,垄覆地膜沟覆秸秆对温度的增加效果不显著;在 0~30 cm 土层,秸秆覆盖土壤温度降低 0.3℃,地膜覆盖土壤温度增加 2.2℃,垄覆地膜沟覆秸秆土壤温度增加 0.7℃ (图 2)。垄覆地膜沟覆秸秆对温度的影响与秸秆覆盖量、垄高、垄宽等因素有关,其增降温效应有待进一步研究。可见,地膜覆盖增加土壤温度,秸秆覆盖可以降低土壤温度,垄覆地膜沟覆秸秆结合地膜的增温效应和秸秆的降温效应,在一定程度上相互抵消,使得增温效果不明显,在夏玉米生长季炎热的环境下可为玉米生长创造较好的温度环境。

3.2 降水后土壤含水率和土壤温度变化

研究旱地不同覆盖方式下降水量聚集和土壤温度的差异对夏玉米生长的影响具有重要意义^[30]。不同覆盖栽培方式可通过改变下垫面来提高降水利用效率^[34]。地膜覆盖阻滞了降水的入渗,明显降低

表层土壤含水率^[35],秸秆覆盖层对降水的截获作用可减少降水入渗量^[36],垄覆地膜沟覆秸秆通过微集水技术可以贮存更多的降水,沟覆秸秆又可以有效减少水分蒸发,达到蓄水保墒的目的^[37]。本研究也得出类似结论:降水后 1 d 相对于降水前 1 d 土壤含水率的变化量表现为:SPM > CK > SM > PM,降水后 5 d 相对于降水前 1 d 土壤含水率的变化量表现为:CK > SPM > SM > PM。沟垄覆盖处理能够有效地聚集降水,降水后 1 d 相对于降水前土壤含水率变化最大,分别高于对照、秸秆覆盖、地膜覆盖处理 0.2、1.1、1.8 个百分点;降水后 5 d 对照处理土壤蒸发强烈,土壤含水率的变化量明显高于其他处理,垄覆地膜沟覆秸秆的保墒抑蒸、提高降水入渗量为夏玉米生长创造良好的水分条件,促进夏玉米生长发育。

土壤温度的变化是太阳辐射平衡、土壤热量平衡和土壤热学性质相互作用共同影响的结果,由于降水引起的土壤水分变化直接影响土壤的热力学性质,引起夏季土壤温度降低^[38]。本研究中降水后土壤温度降低 2.6~4.2℃。地膜覆盖处理的土壤温度降低幅度最大,这是由于降水前地膜覆盖土壤温度较高,降水后温度变化导致地膜土壤温度降低,但是降水前后温度变化幅度变大;秸秆对水分和气体的通透性增加,对热量传导较慢或传导阻力较大促使秸秆温度变化幅度减小;而垄覆地膜沟覆秸秆的平抑温度差异最明显,这是由于沟中秸秆对温度的影响占主导地位,可以有效地降低垄上覆膜对土壤温度变化影响的幅度。

3.3 覆盖方式对夏玉米生长和产量的影响

利用 Logistic 生长模型对夏玉米生育期内地上部生物量的模拟结果表明,与对照相比,各覆盖栽培方式的地上部生物量理论最大值较大,快速累积期提前,最快生长点的最快累积速率较大,且持续累积时间较长,这与银敏华等^[3]的研究结果类似。

大量研究结果表明,覆盖栽培可显著提高作物产量和水分利用效率^[39-40]。李荣等^[26]研究发现,不同沟垄覆盖栽培下春玉米产量较对照增加 33.6%~35.2%,平均水分利用效率提高 28.6%~30.6%;陆海东等^[41]研究也表明地膜覆盖较对照增加旱地玉米产量 22.1%,水分利用效率提高 25.3%。杨小敏等^[42]研究的旱地覆盖下小麦产量较不覆盖处理增加 21.9%,水分利用效率提高 17.5%;WANG 等^[40]、高世铭等^[43]对马铃薯和孙继颖等^[44]对大豆的研究都表明不同覆盖方式均能显著提高作物产量和水分利用效率。本研究也得出类似结论,对连续 2 a 不同覆盖方式下夏玉米的研究发现,不同覆盖方式下产量平均值较对照增加

15.4% ~ 28.4%, 水分利用效率提高 10.2% ~ 31.2%。可见,覆盖方式创造的良好水热条件能够显著促进夏玉米地上部生物量的增大,并最终提高夏玉米产量和水分利用效率,其中垄覆地膜沟覆秸秆的综合指标最优。

不同覆盖方式对农田水分状况和土壤温度的影响较复杂,不仅受到土壤质地的影响,而且与气候条件、作物冠层和田间管理措施紧密相关。本试验主要对关中地区不同覆盖方式对夏玉米水热和作物生长的影响进行研究,结果显示覆盖措施为夏玉米创造良好的水热条件,可促进夏玉米生长和产量的提高,其中垄覆地膜沟覆秸秆是本研究最适合当地的覆盖方式。但是因为试验中没有测定土壤蒸发,所以夏玉米耗水和土壤含水率变化的分析不够透彻,需要在今后的研究中深入探讨。

4 结论

(1)覆盖处理具有良好的蓄水保墒作用,能显

著提高 0 ~ 260 cm 土层土壤贮水量。在 0 ~ 15 cm 土层,SM 和 PM 处理 2 a 夏玉米生长季土壤温度的平均值较 CK 处理分别提高了 -1°C 和 1.9°C ,SPM 与 CK 处理差异不明显。

(2)SPM 处理集水效果最佳,CK、SM、PM 和 SPM 处理降水后 1 d 各土层土壤含水率的平均值较降水前 1 d 分别增加 1.8、0.9、0.2、2.0 个百分点。

(3)夏玉米地上部生物量随生育进程的动态变化符合 Logistic 生长模型,SPM 处理各项指标最优。SM、PM 和 SPM 处理 2 a 夏玉米产量平均值分别较 CK 处理提高 15.4%、23.3% 和 28.4%。水分利用效率平均值分别较 CK 处理提高 10.2%、31.2% 和 28.0%。

(4)垄覆地膜沟覆秸秆能够促进夏玉米生长,提高土壤贮水量,为夏玉米生长创造适宜的水热条件,并可提高夏玉米产量和水分利用效率,是本研究最适宜的覆盖方式。

参 考 文 献

- 石玉琼,李团胜. 陕西关中耕地粮食生产潜力研究[J]. 中国农学通报, 2015,31(13):196-204.
SHI Yuqiong, LI Tuansheng. Farmland grain potential productivity of Guanzhong, Shaanxi Province [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015,31(13):196-204. (in Chinese)
- 上官周平. 西北地区粮食生产及其持续发展[J]. 农业工程学报,1998,14(2):13-18.
SHANGGUAN Zhouping. Grain production and sustainable development in Northwest China[J]. Transactions of the CSAE, 1998, 14(2):13-18. (in Chinese)
- 银敏华,李援农,李昊,等. 垄覆黑膜沟覆秸秆促进夏玉米生长及养分吸收[J]. 农业工程学报,2015,31(22):122-130.
YIN Minhua, LI Yuannong, LI Hao, et al. Ridge-furrow planting with black film mulching over ridge and corn straw mulching over furrow enhancing summer maize's growth and nutrient absorption [J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(22):122-130. (in Chinese)
- 张德奇,廖允成,贾志宽. 旱区地膜覆盖技术的研究进展及发展前景[J]. 干旱地区农业研究,2005,23(1):208-213.
ZHANG Deqi, LIAO Yuncheng, JIA Zhikuan. Research advances and prospects of film mulching in arid and semi-arid areas[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23(1): 208-213. (in Chinese)
- ZHOU Limin, LI Fengmin, JIN Shengli, et al. How two ridges and the furrow mulched with plastic film affect soil water, soil temperature and yield of maize on the semiarid Loess Plateau of China[J]. Field Crops Research,2009,113(1):41-47.
- LI Xiaoyan, GONG Jiadong. Effects of different ridge: furrow ratios and supplemental irrigation on crop production in ridge and furrow rainfall harvesting system with mulches[J]. Agricultural Water Management, 2002, 59(3): 243-254.
- 李巧珍,李玉中,郭家选,等. 覆膜集雨与限量补灌对土壤水分及冬小麦产量的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(2):25-30.
LI Qiaozhen, LI Yuzhong, GUO Jiaxuan, et al. Effects of field rainwater harvesting by plastic mulch and complement irrigation on soil water and yield of winter wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(2): 25-30. (in Chinese)
- 蒋耿民,李援农,周乾,等. 不同揭膜时期和施氮量对陕西关中地区夏玉米生理生长、产量及水分利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(5):1065-1072.
JIANG Gengmin, LI Yuannong, ZHOU Qian, et al. Effects of different uncovering plastic film periods and nitrogen rates on physiology, growth, yield and water use efficiency of summer maize in Guanzhong Region, Shaanxi Province [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(5): 1065-1072. (in Chinese)
- ZHANG Shulan, LÖVDAHL Lars, GRIP Harald, et al. Modelling the effects of mulching and fallow cropping on water balance in the Chinese Loess Plateau[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 93(2):283-298.
- MULUMBA L N, LAL R. Mulching effects on selected soil physical properties[J]. Soil and Tillage Research, 2008, 98(1): 106-111.
- 张喜英,陈素英,裴冬,等. 秸秆覆盖下的夏玉米蒸散、水分利用效率和作物系数的变化[J]. 地理科学进展,2002,21(6): 583-592.
ZHANG Xiyang, CHEN Suying, PEI Dong, et al. Evapotranspiration, yield and crop coefficient of irrigated maize under straw

- mulch conditions[J]. *Progress in Geography*, 2002, 21(6):583–592. (in Chinese)
- 12 邹聪明,王国鑫,胡小东,等. 秸秆覆盖对套作玉米苗期根系发育与生理特征的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(3): 496–500.
ZOU Congming, WANG Guoxin, HU Xiaodong, et al. Effect of straw mulching on root development and physiological characteristics of intercropped maize at seedling stage[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(3): 496–500. (in Chinese)
- 13 王海霞,孙红霞,韩清芳,等. 免耕条件下秸秆覆盖对旱地小麦田土壤团聚体的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(4):1025–1030.
WANG Haixia, SUN Hongxia, HAN Qingfang, et al. Effects of straw mulching on the soil aggregates in dryland wheat field under no-tillage[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(4):1025–1030. (in Chinese)
- 14 陈素英,张喜英,裴冬,等. 秸秆覆盖对夏玉米田棵间蒸发和土壤温度的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2004, 23(4):32–36.
CHEN Suying, ZHANG Xiying, PEI Dong, et al. Soil evaporation and soil temperature in maize field mulched with wheat straw [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2004, 23(4):32–36. (in Chinese)
- 15 寇江涛,师尚礼,王琦,等. 垄沟集雨对紫花苜蓿草地土壤水分、容重和孔隙度的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(6):1336–1342.
KOU Jiangtao, SHI Shangli, WANG Qi, et al. Effect of ridge/furrow rain harvesting on soil moisture, bulk density and porosity in *Medicago sativa* field [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(6):1336–1342. (in Chinese)
- 16 周昌明,李援农,银敏华,等. 连垄全覆盖降解膜集雨种植促进玉米根系生长提高产量[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(7): 109–117.
ZHOU Changming, LI Yuannong, YIN Minhua, et al. Ridge-furrow planting with biodegradable film mulching over ridges for rain harvesting improving root growth and yield of maize[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(7):109–117. (in Chinese)
- 17 ZHOU Limin, JIN Shengli, LIU Chang'an, et al. Ridge-furrow and plastic-mulching tillage enhances maize-soil interactions: opportunities and challenges in a semiarid agroecosystem[J]. *Field Crops Research*, 2012, 126:181–188.
- 18 李吾强,温晓霞,高茂盛,等. 半湿润区旱作起垄覆膜沟播小麦的水分及生理效应研究[J]. *西北农业学报*, 2008, 17(5): 146–151.
LI Wuqiang, WEN Xiaoxia, GAO Maosheng, et al. Studies on water and physiological effect of winter wheat with plastic film mulching in semiarid farmland[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2008, 17(5):146–151. (in Chinese)
- 19 莫惠栋. Logistic 方程及其应用[J]. *江苏农学院学报*, 1983, 4(2):53–57.
MO Huidong. Logistic equation and its application[J]. *Journal of Jiangsu Agricultural College*, 1983, 4(2):53–57. (in Chinese)
- 20 汪星,周玉红,汪有科,等. 黄土高原半干旱区山地密植枣林土壤水分特性研究[J]. *水利学报*, 2015, 46(3):263–270.
WANG Xing, ZHOU Yuhong, WANG Youke, et al. Soil water characteristic of a dense jujube plantation in the semi-arid hilly regions of the Loess Plateau in China[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(3):263–270. (in Chinese)
- 21 陈继康,李素娟,张宇,等. 不同耕作方式麦田土壤温度及其对气温的响应特征——土壤温度日变化及其对气温的响应 [J]. *中国农业科学*, 2009, 42(7):2592–2600.
CHEN Jikang, LI Sujuan, ZHANG Yu, et al. Characteristics of soil temperature and response to air temperature under different tillage systems—diurnal dynamic of soil temperature and its response to air temperature[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(7):2592–2600. (in Chinese)
- 22 COOK H F, VALDES G S B, LEE H C. Mulch effects on rainfall interception, soil physical characteristics and temperature under *Zea mays*, L. [J]. *Soil and Tillage Research*, 2006, 91(1–2):227–235.
- 23 余坤,冯浩,李正鹏,等. 秸秆还田对农田土壤水分与冬小麦耗水特征的影响[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(10):116–123.
YU Kun, FENG Hao, LI Zhengpeng, et al. Effects of different pretreated straw on soil water content and water consumption characteristics of winter wheat[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(10):116–123. (in Chinese)
- 24 强小嫚,周新国,李彩霞,等. 不同水分处理下液膜覆盖对夏玉米生长及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(1):54–60.
QIANG Xiaoman, ZHOU Xinguo, LI Caixia, et al. Effect of liquid film mulching on growth and yield of summer maize under different soil moisture conditions[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(1):54–60. (in Chinese)
- 25 李磊,张强,冯悦晨,等. 全膜双垄沟播改善干旱冷凉区盐渍土水盐状况提高玉米产量[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(5):96–103.
LI Lei, ZHANG Qiang, FENG Yuechen, et al. All-film double-furrow sowing improving water and salt conditions and increasing maize yield in saline soil of cold and arid area[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(5):96–103. (in Chinese)
- 26 李荣,王敏,贾志宽,等. 渭北旱塬区不同沟垄覆盖模式对春玉米土壤温度、水分及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(2):106–113.
LI Rong, WANG Min, JIA Zhikuan, et al. Effects of different mulching patterns on soil temperature, moisture water and yield of spring maize in Weibei Highland[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(2):106–113. (in Chinese)
- 27 SHARMA P K, PARMAR D K. The effect of phosphorus and mulching on the efficiency of phosphorus use and productivity of wheat grown on a mountain Alfisol in the Western Himalayas[J]. *Soil Use and Management*, 2007, 14(1):25–29.
- 28 杨滨娟,黄国勤,钱海燕. 秸秆还田配施化肥对土壤温度、根际微生物及酶活性的影响[J]. *土壤学报*, 2014, 51(1):150–157.
YANG Binjuan, HUANG Guoqin, QIAN Haiyan. Effects of straw incorporation plus chemical fertilizer on soil temperature, root micro-organisms and enzyme activities[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(1):150–157. (in Chinese)

- 29 王红丽,张绪成,宋尚有,等. 旱地全膜双垄沟播玉米的土壤水热效应及其对产量的影响[J]. 应用生态学报,2011,22(10):2609-2614.
WANG Hongli, ZHANG Xucheng, SONG Shangyou, 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[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(10): 2609-2614. (in Chinese)
- 30 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.
CHEN Yuzhang, CHAI Shouxi, FAN Yingdan, et al. Effects of mulching models on soil temperature and yield of winter wheat in rainfed area[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2014, 35(4): 403-409. (in Chinese)
- 31 王敏,王海霞,韩清芳,等. 不同材料覆盖的土壤水温效应及对玉米生长的影响[J]. 作物学报,2011,37(7):1249-1258.
WANG Min, WANG Haixia, HAN Qingfang, et al. Effects of different mulching materials on soil water, temperature, and corn growth[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(7): 1249-1258. (in Chinese)
- 32 李荣,贾志宽. 沟垄二元覆盖下土壤水湿效应对玉米生长发育的影响[J]. 宁夏农林科技, 2015, 56(9): 26-30.
LI Rong, JIA Zhikuan. Effects of soil water-temperature effect under dual-mulching of ridge and furrow on growth of maize[J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2015, 56(9): 26-30. (in Chinese)
- 33 银敏华,李援农,张天乐,等. 集雨模式对农田土壤水热状况与水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报,2015,46(12):194-211.
YIN Minhua, LI Yuannong, ZHANG Tianle, et al. Effects of different rainwater harvesting patterns on soil hydrothermal regimes and water use efficiency of summer maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 194-211. (in Chinese)
- 34 LIU W Z, HU M J, LI F M, et al. Ecological characteristics of soil water and its relations to landform and vegetation in a small semiarid watershed in a loess hilly area of China[J]. International Journal of Sustainable Development and World Ecology, 2005, 12(3): 326-333.
- 35 殷飞. 不同保水措施对降雨入渗的影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2013(11): 65-67.
YIN Fei. Research on the influence of different soil moisture conservation in rainfall infiltration[J]. China Rural Water and Hydropower, 2013(11): 65-67. (in Chinese)
- 36 王兆伟,郝卫平,龚道枝,等. 秸秆覆盖量对农田土壤水分和温度动态的影响[J]. 中国农业气象, 2010, 31(2): 244-250.
WANG Zhaowei, HAO Weiping, GONG Daozhi, et al. Effect of straw mulch amount on dynamic changes of soil moisture and temperature in farmland[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2010, 31(2): 244-250. (in Chinese)
- 37 胡亚瑾,吴淑芳,冯浩,等. 覆盖方式对夏玉米土壤水分和产量的影响[J]. 中国农业气象, 2015, 36(6): 699-708.
HU Yajin, WU Shufang, FENG Hao, et al. Effects of different mulching models on soil moisture and summer maize yields[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2015, 36(6): 699-708. (in Chinese)
- 38 刘任涛,朱凡,陈林. 降雨增加对沙质草地土壤温度的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(2): 348-354.
LIU Rentao, ZHU Fan, CHEN Lin. Effects of simulated summer rainfall increases on soil temperature in sandy grassland[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(2): 348-354. (in Chinese)
- 39 KAYOMBO B, HATIBU N, MAHOO H F. Effect of micro-catchment rain water harvesting on yield of maize in a semi-arid area [J]. ISCO 2004 - 13th International Soil Conservation Organisation, 2004: 1-4.
- 40 WANG Q, ZHANG E H, LI F M, et al. Runoff efficiency and the technique of micro water harvesting with ridges and furrows, for potato production in semi-arid area[J]. Water Resource Management, 2008, 22: 1431-1443.
- 41 路海东,薛吉全,郝引川,等. 黑色地膜覆盖对旱地玉米土壤环境和植株生长的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(7): 1997-2004.
LU Haidong, XUE Jiquan, HAO Yinchuan, et al. Effects of black film mulching on soil environment and maize growth in dry land[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(7): 1997-2004. (in Chinese)
- 42 杨小敏,郝明德,李龙,等. 黄土区旱地覆盖对小麦养分吸收及水分利用的影响[J]. 麦类作物学报, 2013, 33(5): 1001-1005.
YANG Xiaomin, HAO Mingde, LI Long, et al. Effects of mulching modes on nutrient uptake and water use of winter wheat in dryland of loess region[J]. Journal of Triticeae Crops, 2013, 33(5): 1001-1005. (in Chinese)
- 43 高世铭,张绪成,王亚宏. 旱地不同覆盖沟垄种植方式对马铃薯土壤水分和产量的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 249-256.
GAO Shiming, ZHANG Xucheng, WANG Yahong. Influence of different mulching and furrow-ridge planting methods on soil moisture and yield of potato on dryland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(1): 249-256. (in Chinese)
- 44 孙继颖,高聚林,王志刚,等. 不同覆膜方式对旱作大豆生理特性及水分利用效率的影响[J]. 大豆科学, 2008, 27(2): 251-254, 266.
SUN Jiying, GAO Julin, WANG Zhigang, et al. Effects of covering film on physiological indexes and water use efficiency (WUE) of soy bean in dryland[J]. Soybean Science, 2008, 27(2): 251-254, 266. (in Chinese)