**DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.180245**

吴贤忠, 李毅, 高志永, 董建国. 白膜、黑膜全年覆盖下的土壤水、热、盐变化[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(11): 1701−1709
WU X Z, LI Y, GAO Z Y, DONG J G. Variations in soil moisture, heat and salt under year round mulching of white and black film[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(11): 1701−1709

# 白膜、黑膜全年覆盖下的土壤水、热、盐变化*

吴贤忠[1,2], 李 毅[1**], 高志永[3], 董建国[4,5]

(1. 甘肃农业大学林学院 兰州 730070; 2. 甘肃民族师范学院物理与水电工程系 合作 747000; 3. 杨凌职业技术学院水利工程分院 杨凌 712100; 4. 中国科学院/教育部水土保持与生态环境研究中心 杨凌 712100; 5. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院 杨凌 712100)

**摘 要:** 地膜覆盖因能有效地增温保墒增产而在黄土丘陵区旱作农林生产中广泛应用。为明确不同薄膜覆盖的差异以及连续覆膜条件下的土壤水热盐变化特征, 于 2015 年 7 月 1 日—2017 年 6 月 30 日在陕北米脂进行野外连续覆膜定位观测, 试验设裸地(CK)、白色薄膜(WF)与黑色薄膜(BF)3 种处理, 利用 GS3 仪器监测 0~150 cm 深度的土壤水分、温度和电导率。结果表明: 1)连续覆盖两年后, 两种覆膜处理平均土壤含水量为 16.9%, CK 为 13.6%, 土壤储水量分别达 314.56 mm、204.44 mm, 具体表现为土壤含水量 BF 在 0~15 cm 高于 WF($P$<0.05), 15~30 cm 低于 WF($P$<0.05); 0~150 cm, WF 和 BF 总储水量差异不显著, 与 CK 差异显著($P$<0.05); 在作物生育期覆膜平均较 CK 提高储水量 60.8 mm。2)膜覆盖下近地面日温差 WF 大于 BF, 0~150 cm, 两种覆膜周年土壤平均温度无显著差异, 较 CK 高 1.3 ℃($P$<0.05); 气温较高条件下 WF 比 BF、CK 缩短冻融时间分别达 8 d 和 24 d, WF 更有利于土壤解冻和早春土壤增温。3)周年土壤表层盐分高, 其中 0~30 cm 土层电导率为 BF>WF>CK, 30~50 cm 土层为 WF>BF>CK, 但土壤总体盐分较低, 无土壤盐渍化趋势, 50 cm 以下 3 种处理盐分没有差异。综合而言, WF 较 BF 更能提高表层土壤温度, BF 较 WF 更能提高表层土壤水分, 覆膜保墒增温, 延长作物生长时间。研究成果可为黄土丘陵区旱作农业覆膜应用提供土壤水热盐调控依据, 也为果园和林地常年连续覆膜提供参考。

**关键词:** 薄膜覆盖; 水盐运移; 土壤温度; 连续覆膜; 水分恢复; 黄土丘陵区
**中图分类号:** S152.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2018)11-1701-09

# Variations in soil moisture, heat and salt under year round mulching of white and black film*

WU Xianzhong[1,2], LI Yi[1**], GAO Zhiyong[3], DONG Jianguo[4,5]

(1. Forestry Institute, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Department of Physics and Hydraulic Engineering, Gansu Normal University for Nationalities, Hezuo 747000, China; 3. Department of Water Conservancy, Yangling Vocational & Technological College, Yangling 712100, China; 4. Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Education, Yangling 712100, China; 5. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** Plastic film mulching in agriculture is known as the “white revolution”, which has played a decisive role in agriculture in

* 国家重点研发计划项目(2017YFC0504703)和甘肃省高等学校科研项目(2015A-154)资助
** 通信作者: 李毅, 主要从事水土保持研究。E-mail: liyi@gsau.edu.cn
吴贤忠, 主要从事水土保持与水资源高效利用研究。E-mail: wxz315@163.com
收稿日期: 2018-03-12 接受日期: 2018-06-17
* This study was supported by the National Key Research and Development Project of China (2017YFC0504703) and the Scientific Research Project of Gansu University (2015A-154).
** Corresponding author, E-mail: liyi@gsau.edu.cn
Received Mar. 12, 2018; accepted Jun. 17, 2018

semi-arid areas. With the wide application of black and white films in agro-forestry production, many scholars have focused on the studies of mechanisms and functions of film mulching. It was found that film mulching not only promote crop growth, but also accelerate soil moisture lose. However, previous studies were conducted on white mulch tests under condition of growing crops. In order to clarify the differences between black and white film mulching and the ecological benefits under continuous film mulching, the field experiment of continuous film mulching without crop were conducted in Mizhi, northern Shaanxi, from July 1st, 2015 to June 30th, 2017. The experiment included three treatments, white film mulching of ridge (WF), black film of ridge (BF) mulching and no mulching of ridge (CK). In the experiment, the ridge was 50 cm wide, 20 cm high with 20 cm wide furrow. Each treatment was repeated three times and soil moisture, temperature, and electrical conductivity were measured at depths of 5 cm, 15 cm, 30 cm, 50 cm, 75 cm, 100 cm, 125 cm and 150 cm using GS3 instrument. The results indicated that: 1) after two consecutive years of film mulching, soil moisture contents under two film mulching treatments and CK were 16.9% in average and 13.6%, and soil water storage capacity were 314.56 mm and 204.44 mm. Soil moisture content under BF was higher at 0–15 cm ($P < 0.05$) and lower at 15–30 cm ($P < 0.05$) than that of WF. At 0–150 cm, the total water storage of WF and BF was not significantly different, but significantly different from that of CK ($P < 0.05$). During the crop growth period, the average soil water storage with film mulching was 60.8 mm higher than that of CK. The daily temperature difference near soil surface under WF was greater than that under BF. At 0–150 cm, there was no significant difference in the average soil temperature between WF and BF in two years, which was 1.3 ℃ higher than that of CK ($P < 0.05$). At higher temperatures, WF decreased the freeze-thaw time by 8 days and 24 days compared with BF and CK, respectively, which was more conducive for soil thawing and soil warming in early spring. Annual soil salt content was higher in shallow soil, and was in the order of BF > WF > CK at 0–30 cm soil layer, WF > BF > CK at 30–50 cm soil layer. The results also revealed that soil salt content was low and no difference among treatments below 50 cm depth. No salinization of soil was observed under CK, BF and WF treatments. Overall, WF was more beneficial for improving surface soil temperature than BF, but it was the opposite for soil water moisture. Film mulching may increase soil temperature and prolong crop growth time. The research results could provide a basis for reasonable soil water-heat-salt regulation by film mulching in semi-arid Loess Hilly Region, and also provide a reference for the continuous film mulching technique in orchard and woodland.

**Keywords:** Film mulching; Water-salt movement; Soil temperature; Continuous film mulching; Water recovery; Loess Hilly Region

地膜在农业中的应用被称为是“白色革命”，对世界农业的发展起到巨大推动作用，尤其是在半干旱区的旱作农业中地膜覆盖发挥了决定性作用。目前薄膜的应用不仅仅限于干旱和半干旱区，南方也较为普遍，不但是农作物应用地膜覆盖，林业应用也十分广泛，尤其是很多果园采用常年持续覆盖地膜，而且黑色薄膜应用也呈现增加趋势。由于膜覆盖对农林业发展的重要性，多年来众多学者对地膜覆盖的机理和功能做了大量研究报道。主要包括地膜覆盖能显著改善土壤水热条件，降低土壤水分的无效蒸发和热量散失，提高作物产量[1-3]。起垄与覆膜相结合，有利于增温保墒，提高水分利用效率，促进作物生长[4-6]。如马忠明等[7]基于大田对比试验，发现起垄覆膜具有很好的集雨作用，可提高旱砂田西瓜(*Citrullus lanatus*)生长前期土壤水分，加快作物生长，提高作物产量及品质。侯慧芝等[8]研究表明，全膜覆盖垄沟种植能显著提高马铃薯(*Solanum tuberosum*)生育期土壤温度。王红丽等[9-10]试验表明全膜覆盖增温有利于小麦(*Triticum aestivum*)拔节，在干旱的年份膜覆盖的增产和土壤水分利用效率更高，在黑膜全地膜覆盖垄沟种植试验中发现同样具有显著的增温保墒效果。谢军红等[11]认为全膜双垄沟播具有明显的增产增效和提高水分利用效率的作用，是理想的玉米(*Zea mays*)种植模式。李佳旸等[12]认为起垄覆膜垄沟集雨能有效改善土壤水分环境，缓解果树生育期内水分供需矛盾，并建议陕北黄土丘陵区山地雨养苹果(*Malus domestica*)园采用其保墒措施。张坤等[13]研究发现果园起垄覆黑膜在果树生长期间能降低蒸发，较长时间的保持土壤水分和提高土壤水分的利用效率。盐随水动，水分在温度梯度下的运动决定了盐分总的运动与变化趋势[14]。在咸水灌溉或者地下水水位浅的条件下，覆膜具有明显的抑制盐分表聚的作用[15-16]，旱作条件下，降雨淋溶使土壤表层脱盐，盐分向下层土壤运移，在蒸发蒸腾作用下，盐分又上移在表层土壤中而形成表聚，覆膜因阻挡降水直接冲刷而导致膜下硝酸盐出现表聚现象[17]。膜覆盖应用的研究虽然较多，由于以往研究多集中在白色地膜覆盖的试验，而且均在种植作物的情况下进行，地膜覆盖增加的土壤水分往往被作物生长消耗，主要表现为膜覆盖下作物生长好于无覆盖处理的作物生长，在此情况下很难确定膜覆盖能够增加土壤水分的多少，一些研究提到的膜覆盖提高土壤水分值也只是短期内作物没有利用完的部分水分值，不是完整值，从长时间尺度看地膜覆盖促进作物生长还会加剧土壤水分的干化[18-20]。另外，目前对连续长期膜覆盖下的土壤

水分、温度、盐分变化以及黑色膜与白色膜覆盖对比鲜见报道[21-22]。近年来有研究表明, 非生育期是黄土区土壤水分减少的关键时期[23-24], 冬季覆盖措施可以促进非生育期土壤水分向深层运移[25], 因此, 在半干旱区进行无作物生长情况下的黑、白膜连续全年覆膜土壤水、热、盐运移规律观测分析研究, 对今后合理选择不同薄膜, 确定覆盖时间及进一步提高农田土壤水分具有重要意义。

## 1　研究区概况及研究方法

### 1.1　研究区概况

研究区位于中国典型黄土高原丘陵沟壑区陕西省米脂县远志山(108°49′E, 37°25′N, 坡度为21°~39°), 样地海拔890 m, 属于中温带半干旱性气候区。该区年均气温8.5 ℃, 年≥0 ℃积温3 281 ℃, 年辐射总量582.7 kJ·cm$^{-2}$, 年日照时数2 372.7 h, 年均无霜期165 d, 年均降水量451.6 mm, 主要集中在7—9月, 年潜在蒸发量为1 600 mm左右。试验区土壤为黄绵土, 土壤容重为1.29~1.31 g·cm$^{-3}$, 参考美国农业部土壤分类图(USDA Soil Texture Triangle), 0~150 cm土壤中粉粒含量最高(47.62%~50.10%), 其次为砂粒(43.88%~46.53%), 黏粒含量最低(5.89%~7.06%), 为粉质壤土。试验地土壤全氮、全磷、全钾平均质量分数依次为34.7 mg·kg$^{-1}$、2.9 mg·kg$^{-1}$、101.8 mg·kg$^{-1}$, 有机质质量分数2.1 mg·kg$^{-1}$, pH为8.6, 饱和持水量为39.8%, 田间持水量为23.4%(质量含水率), 地下水埋深超过50 m。

### 1.2　研究方法

#### 1.2.1　试验设计

试验布设于研究区水平阶地上, 无作物种植, 布设时间为2015年7月1日至2017年6月30日, 设计垄宽50 cm, 垄高20 cm, 沟宽20 cm, 垄上覆膜, 选取白色薄膜(WF)和黑膜(BF)2种覆盖处理, 以裸地无覆盖作为对照(CK), 每个处理重复3次, 试验地面积为3.6 m×2.3 m, 小区面积为1.2 m×2.3 m, 3个小区随机区组排列, 为避免小区之间土壤水热互相影响, 提高小区水热观测数据的精确度, 各个小区间用牛毛毡隔离, 试验地周边挖1 m深槽, 埋设厚塑料布将周边土壤隔离, 以防止周边土壤水分对试验小区产生影响。试验布设见图1。

#### 1.2.2　测定项目及方法

试验数据采集自2015年7月1日开始, 土壤水分、温度、电导率数据采集于距地表5 cm、15 cm、30 cm、50 cm、75 cm、100 cm、125 cm、150 cm处分别埋设美国Decagon公司生产的GS3土壤水分、温度、电导率传感器, 仪器精度土壤体积含水量为±3%, 土壤温度为±1 ℃, 电导率为±10%, 利用Em 50数据采集器, 以30 min为步长采集土壤不同深度的含水量($\theta$, cm$^3$·cm$^{-3}$)、温度($T$, ℃)和电导率($s$, mS·cm$^{-1}$)。考虑到土壤水分探针在监测冬季土壤水分的不准确性, 冬季土壤水分数据采用内插法获得。土壤储水量计算采用公式(1):

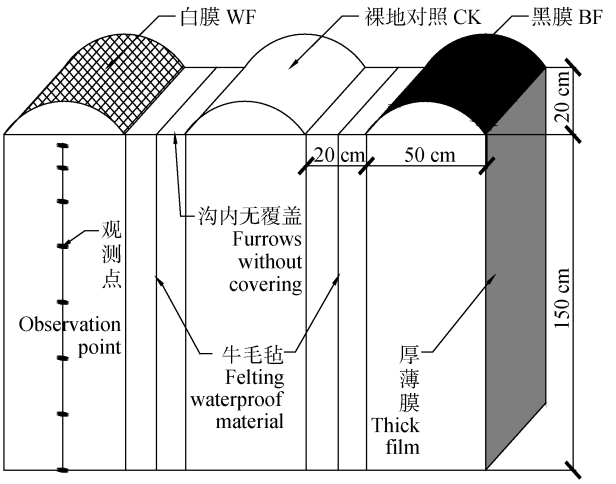


**图 1**　试验布设示意图

Fig. 1　Test arrangement

WF: white film mulching; BF: black film mulching; CK: bare land.

$$W=10H\times\theta \quad (1)$$

式中: $W$为土壤储水量, mm; $H$为土层深度, cm; $\theta$为土壤体积含水量, cm$^3$·cm$^{-3}$。

$$\Delta W=W_{初}-W_{末} \quad (2)$$

式中: $W_{初}$为时段初土壤储水量, mm; $W_{末}$为时段末土壤储水量, mm。

在距试验地100 m处布设有小型自动气象站, 监测步长为10 min, 用于测定降雨(mm)、气温(℃)、净辐射(w·m$^{-2}$)、相对湿度(%)、风速(m·s$^{-1}$)等气象指标。

#### 1.2.3　资料统计与分析

利用Microsoft Excel 2010与SPSS 23.0进行数据统计与分析, 方差分析采用Duncan新复极差法进行显著性检验($P$<0.05), 采用Origin 9.0软件绘图, 采用Surfer 12软件绘制等值线图。

## 2　结果与分析

### 2.1　黑、白膜覆盖下土壤水分特征变化

长期覆膜对土壤水分变化的影响十分显著, 本研究按照周年降水量特点, 将土壤水分划分为水分补充期(7—10月)、水分损失期(11—翌年3月)、水分补充过渡期(4—6月)3个阶段。试验的3种处理在不同时期的土壤储水量如图2所示。试验期间的两个土壤水分补充期各处理土壤储水量均呈现增长趋势, 0~150 cm土层内两个土壤水分补充期WF、BF处理土壤储水量接近, 为272.0 mm、316.0 mm, 分

别增加 52.42 mm、41.87 mm 左右, CK 处理两次土壤水分补充期土壤储水量分别为 257.68 mm、255.32 mm, 分别增加 36.54 mm、45.06 mm。以上分析看出, 膜覆盖不但土壤储水量明显高于 CK, 而且第 2 年土壤储水量高于第 1 年, CK 土壤储水量两年几乎相等。从当年土壤储水量增加值看, 膜覆盖第 2 年新增储水量小于第 1 年, 也小于 CK, 说明原有土壤水分在 18.5%以上的情况下增加土壤储水量难度会加大。土壤水分补充期正值作物生长关键期, 膜覆盖下显著的水分增加是作物增产的关键。土壤水分损失期各处理的土壤水分呈现损失下降的特点, 0~150 cm 土层内两个土壤水分损失期 WF 处理减少水分很小, 平均值为 1.45 mm, BF 处理减少水分平均值为 1.47 mm, WF 处理和 BF 处理土壤储水量减少几乎一样, CK 处理两个土壤水分损失期储水量损失平均值 22.55 mm, 大约是两种膜覆盖处理的 15 倍。由图 3 可看出, 0~15 cm 土层, BF 处理土壤含水率高于 WF 处理, 差异显著($P$<0.05); 15~30 cm 土层, WF 处理土壤含水率高于 BF 处理, 差异显著($P$<0.05); 0~30 cm 土层土壤储水量 WF 处理和 BF 处理分别为 54.24 mm、55.68 mm, 二者基本相同。30 cm 土层以下, 两种覆膜处理无显著差异, 0~150 cm 各层土壤中 CK 处理的土壤含水率均显著低于两种膜覆盖处理。

试验结果还表明(图 3), 两种膜覆盖整体土壤水分表现出逐年增加, 明显好于 CK 处理。0~30 cm 土层, 两种膜覆盖第 1 年平均含水量为 16.6%, 第 2 年为 18.4%, 增加 10.8%; CK 处理第 1 年平均含水量为 13.3%, 第 2 年为 12.4%, 减少 7.1%。30~50 cm 土层, 两种膜覆盖第 1 年平均含水量为 15.8%, 第 2 年为 17.1%, 增加 8.4%; CK 处理第 1 年平均含水量为 15.4%, 第 2 年为 14.4%, 减少 6.2%。50 cm 以下土层, 两种膜覆盖第 1 年平均含水量为 16.3%, 第 2 年为 16.6%, 增加 1.7%; CK 处理第 1 年平均含水量为 14.7%, 第 2 年为 13.8%, 减少 6.3%。也就是说, 两种膜覆盖措施更有利于土壤深层水分的恢复, 这对前期干化土壤的水分修复有着十分重要的意义。

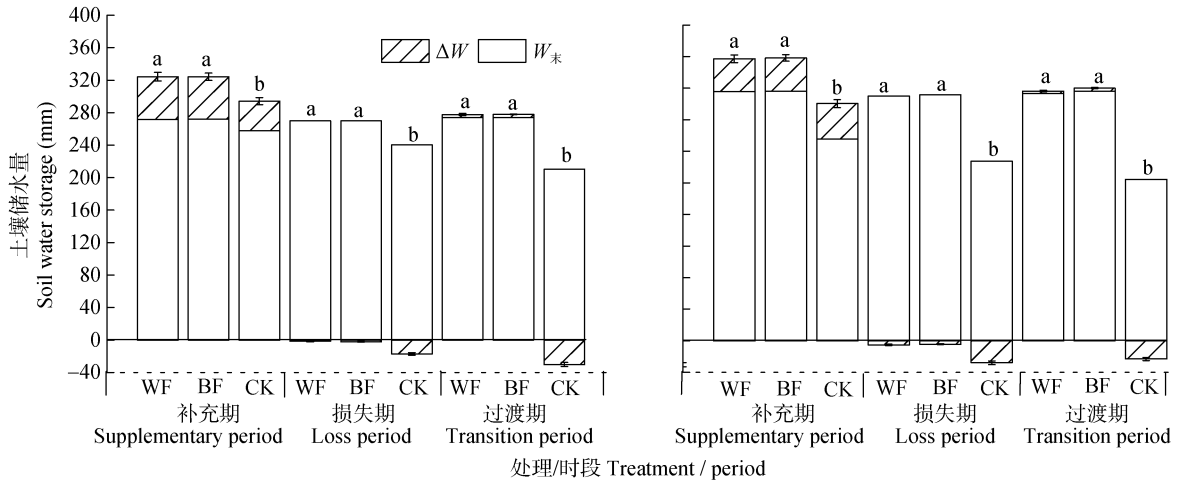


**图 2** 不同覆膜处理下周年不同时段的土壤储水量变化

Fig. 2 Changes of soil water storage at different times under different film treatments

WF、BF、CK 分别为白膜处理、黑膜处理和裸地对照。$\Delta W$ 为时段初期与末期土壤储水量变化量, $W_{末}$为时段末土壤储水量。不同小写字母表示不同处理之间差异达显著水平($P$<0.05)。WF: white film mulching; BF: black film mulching; CK: bare land. $\Delta W$: change in soil water storage from the beginning to the end of the period; $W_{末}$: soil water storage at the end of the period. Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments ($P$ < 0.05).

## 2.2 黑、白膜覆盖土壤温度变化特征

冬季的气温决定土壤冻融期的长短, 周年地膜覆盖可以缩短土壤冻融期。如图 4 所示, 图中红色 0 ℃线为冻融曲线。在气温骤降(2015 年 12 月 16 日降至 −8.4 ℃)情况下(图 4a、c、e), 两种覆膜处理下 30 cm 土层冻结较 CK 推迟 6 d, 5 cm 土层两种覆膜处理的融解时间较 CK 提前 3 d; 在气温较高的 2016 年(图 4b、d、f), 两种覆膜处理在近地表层(5 cm 土层)冻结可推迟 20 d, 30 cm 土层 WF 处理较 CK 融解提前 13 d, BF 处理较 CK 融解提前 5 d。覆膜缩短土壤冻融时间的作用, 对于促进植物提前发芽, 延长作物生长期具有积极意义。

图 4a-f 所示, 由两年平均温度可以看出, 植物生育期(4—10 月), 0~50 cm 土层 WF、BF、CK 处理分别为 17.36 ℃、16.46 ℃、15.43 ℃, WF 处理土壤温度略高于 BF 处理, CK 土壤温度最低。其中 4—5 月, WF、BF、CK 处理的平均温度为 18.16 ℃、16.79 ℃、15.78 ℃, 最高温度为 30.81 ℃、27.07 ℃、24.40 ℃, WF 处理分别高于 BF 处理、CK 3.74 ℃、6.41 ℃, 可见 WF 处理在该时段增温效果最为显著。最低温度存在于土壤最底层, 分别为 8.32 ℃、8.08 ℃、7.92 ℃,

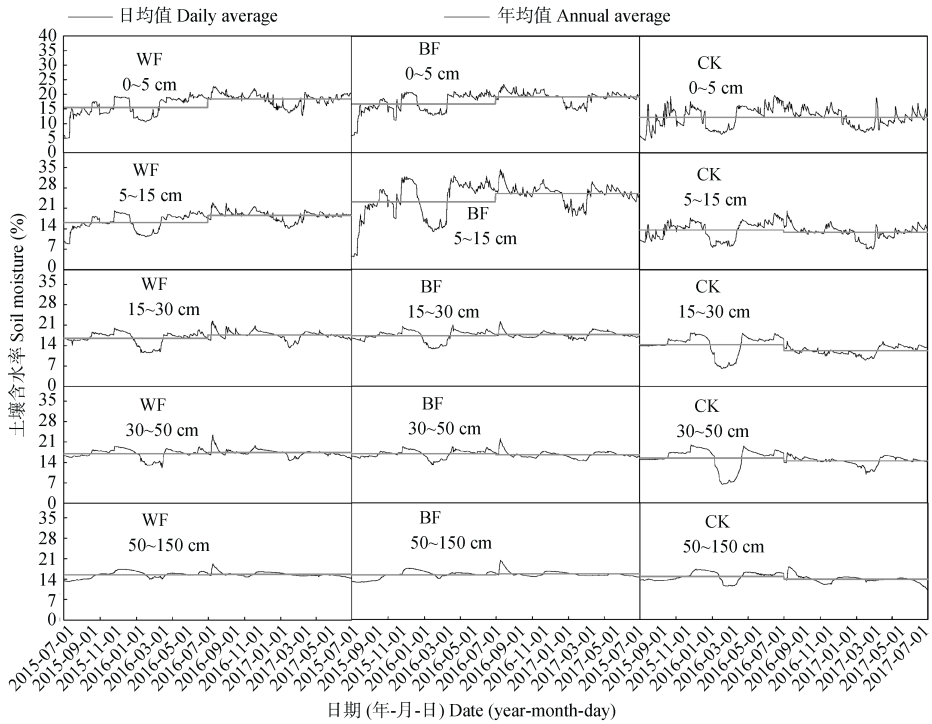


**图 3　不同覆膜处理下不同深度土壤含水率动态变化**

Fig. 3　Dynamics of soil moisture in different soil depths under different film treatments

WF、BF、CK 分别为白膜处理、黑膜处理和裸地对照。WF: white film mulching; BF: black film mulching; CK: bare land.

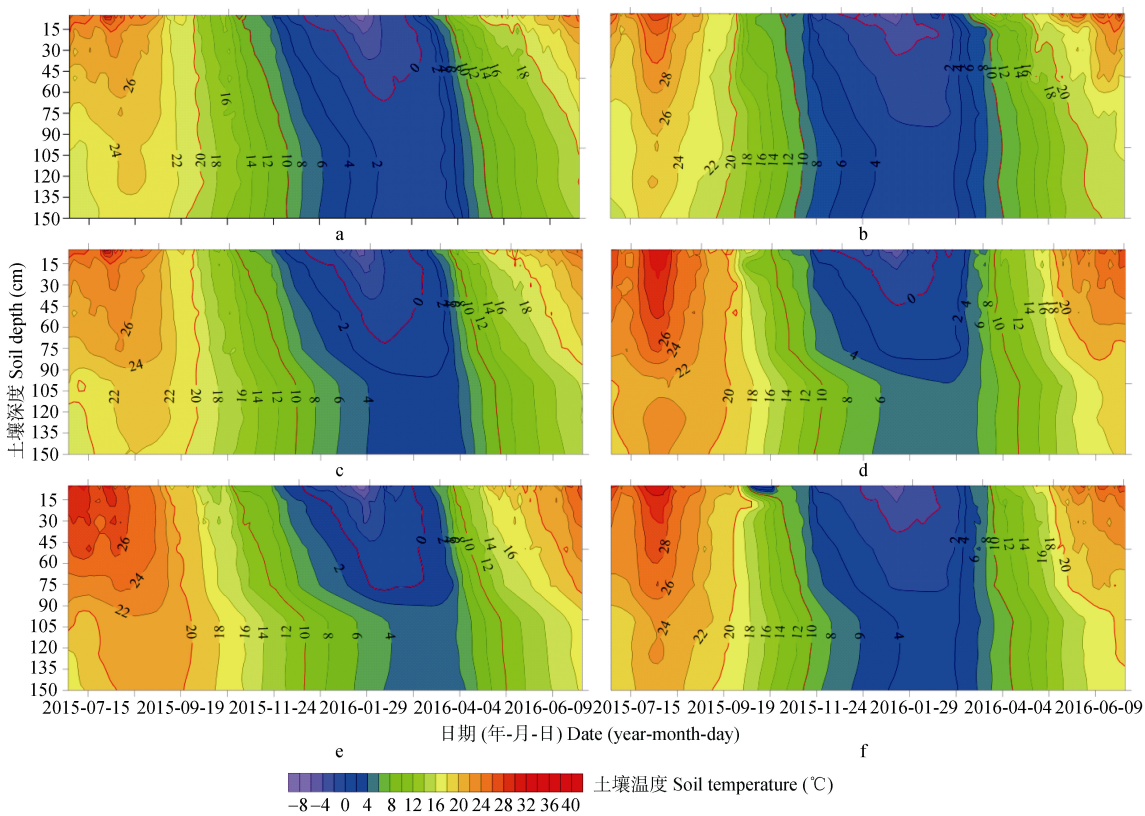


**图 4　不同覆膜处理下土壤温度时空变化等值线图**

Fig. 4　Temporal and spatial variation contours of soil temperature during the experiment period under different film treatments

WF、BF、CK 分别为白膜处理、黑膜处理和裸地对照。a、c、e 别为 WF、BF、CK 处理 2015 年 7 月—2016 年 6 月期间土壤温度变化; b、d、f 分别为 WF、BF、CK 处理 2016 年 7 月—2017 年 6 月期间土壤温度变化。WF: white film mulching; BF: black film mulching; CK: bare land. Figure a, c and e show soil temperature change from July 2015 to June 2016 under treatments of WF, BF and CK, respectively. Figure b, d and f show soil temperature change from July 2016 to June 2017 under treatments of WF, BF and CK, respectively.

WF 处理高于 CK 处理 0.4 ℃。从周年变化来看，0~150 cm 土层内两种覆膜处理年平均温度接近，高于 CK 处理 1.3 ℃左右。

近地表是土壤水分蒸发和能量传输的活跃和关键地带。选择 3 个典型晴天(2016 年 5 月 9—11 日)和 3 个典型阴天(2016 年 5 月 12—14 日)，分别绘制 3 日大气温度和 3 种处理 15 cm 土层的时平均温度昼夜变化曲线(图 5)。根据图 5a、5b，晴天与阴天 CK 的土壤温度均最低，分别为 19.53 ℃、18.93 ℃，WF 处理土壤温度比 CK 分别高 1.85 ℃、1.32 ℃，BF 处理比 CK 分别高 0.7 ℃、0.82 ℃，WF 处理在太阳辐射下提高温度快，升温最高(图 5a)。晴天 WF 处理温度变化为 18.72~24.05 ℃，较 CK 的最大值和最小值高 2.35 ℃和 1.3 ℃，较 BF 处理的最大值和最小值高 1.7 ℃和 0.6 ℃；阴天 3 种处理土壤温度整体呈现下降趋势，BF 处理土壤温度降幅最小。

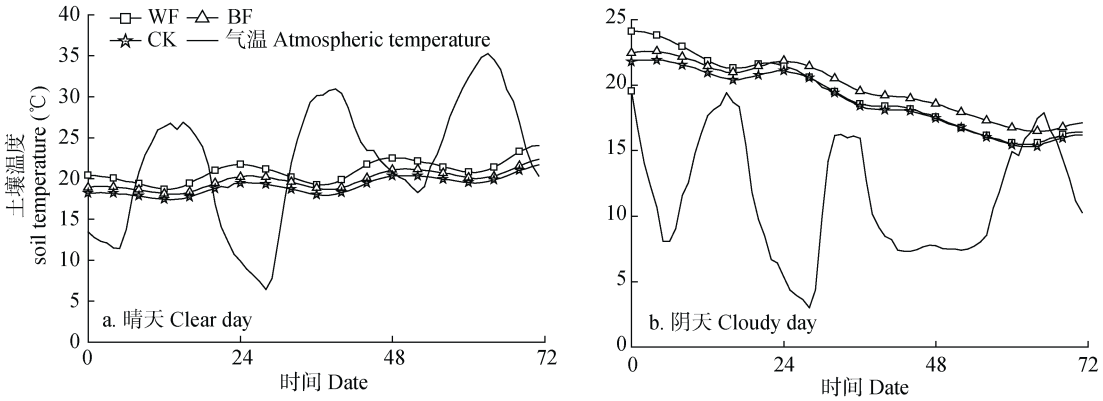


**图 5　不同覆膜处理下 0~15 cm 土层土壤温度的昼夜变化动态**

Fig. 5　Dynamics of daily soil temperature of 0–15 cm layer under different treatments

WF、BF、CK 分别为白膜处理、黑膜处理和裸地对照。WF: white film mulching; BF: black film mulching; CK: bare land.

## 2.3　黑、白膜覆盖对土壤盐分的影响

试验两年内不同处理土壤电导率在土壤剖面的动态变化如图 6 所示。不同处理下土壤盐分与水分(图 3)变化趋势基本一致，符合盐随水走的运移规律。由图 6 中两年平均土壤盐分可以看出，3 种处理土壤表层盐分最高，随着土壤加深盐分逐渐降低，

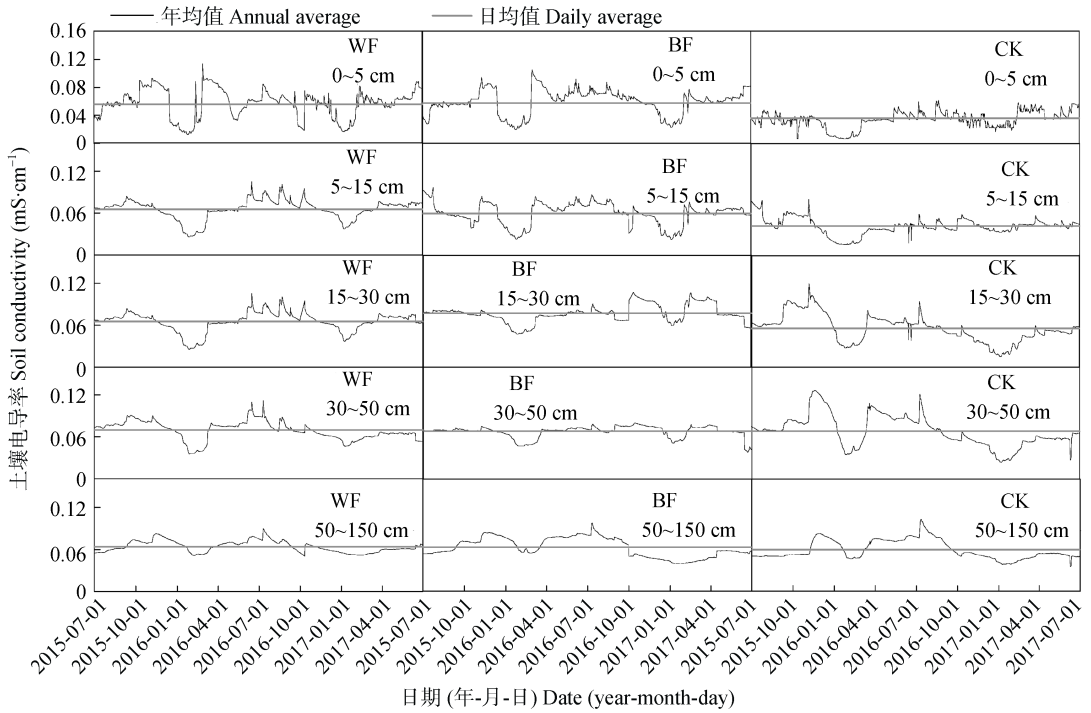


**图 6　不同覆膜处理下不同深度土壤平均电导率动态变化**

Fig. 6　Dynamics of soil electrical conductivity in different soil depths under different treatments

WF、BF、CK 分别为白膜处理、黑膜处理和裸地对照。WF: white film mulching; BF: black film mulching; CK: bare land.

50 cm 以下 3 种处理没有差异。0~30 cm 土层, CK 土壤平均盐分最低, BF 处理较 CK 高 46.9%, WF 处理较 CK 高 40.8%, BF 处理显著高于 WF 和 CK 处理($P$<0.05); 30~50 cm 土层, WF 处理土壤平均盐分显著高于 BF 处理和 CK($P$<0.05), BF 处理与 CK 接近($P$>0.05)。图 6 也一定程度反映出随土壤深度增加盐分变化减弱的规律。为了更清晰分析盐分变化与土壤深度之间的关系, 利用经典统计分析方法对两年内不同深度土层盐分的均值、均方差($E$)、变异系数(CV)进行分析(图 7)。从图 7 可以看出, 0~50 cm 土层中, 0~5 cm 土层土壤盐分变化最为明显, 0~15 cm 土层变化较为明显。在水分补充期(7—10 月)、水分损失期(11 月—翌年 3 月)、水分过渡期(4—6 月), 0~5 cm 土层 WF 和 BF 处理土壤盐分变异相近, 3 个时期的变异值分别为 0.56、0.51、0.58, 较 CK 高 56.9%、56.1%、65.5%; 0~15 cm 土层, WF 和 BF 处理土壤盐分变异相同, 3 个时期的变异值分别为 0.35、0.37、0.32, 较 CK 高 10.6%、17.3%、42.3%。0~5 cm 土层盐分变异周年内 4—6 月最大, 这是因为该阶段是由旱季转向雨季, 土壤水分变化幅度较大所致。膜下土壤表层盐分聚集, 连续覆膜两年后, 两种覆膜处理电导率最大值为 0.14 mS·cm$^{-1}$, CK 最大值为 0.12 mS·cm$^{-1}$, WF、BF、CK 年平均值分别为 0.069 mS·cm$^{-1}$、0.077 mS·cm$^{-1}$、0.068 mS·cm$^{-1}$(图 6), 土壤盐分含量均处于较低水平[26]。由此可见长期地膜覆盖条件下土壤盐分并没有达到土壤次生盐渍化的程度。

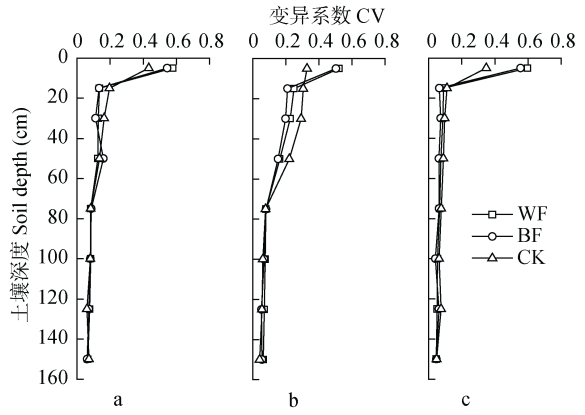


**图 7**　不同覆膜处理下不同深度土壤盐分变异特征

Fig. 7　Variation coefficients of soil electrical conductivity in different soil depths under different treatments

WF、BF、CK 分别为白膜处理、黑膜处理和裸地对照。图 a、b 和 c 分别代表 7—10 月、11 月—翌年 3 月和 4—6 月。WF: white film mulching; BF: black film mulching; CK: bare land. a: July to October; b: November to March of the next year; c: April to June.

## 3　讨论

地膜覆盖可降低土壤水分的无效蒸发和热量散失, 增温保墒, 可显著改善土壤水热条件[1-4], 类似报道和研究较多。以往膜覆盖应用和研究多是在作物生长情况下开展, 膜覆盖产生的保墒作用往往很快用于作物生长, 也就是膜覆盖增加的土壤水分会被作物全部利用, 促进作物生长, 而留在土壤中的水分很少, 甚至导致土壤干层, 这就为准确研究膜覆盖下土壤水分效应带来很大干扰。本研究在无作物种植条件下探明黑白膜覆盖土壤近地表层的水分差异, 这可以更精确地确定覆膜可以为植物生长多提供的水量, 也是对以往研究的有益补充和完善。本研究表明, 当地作物生育期黑、白膜覆盖土壤储水量增加较裸地多 60.8 mm, 为作物生长提供了更多的水分, 这是膜覆盖作物增产的主要因素。以往的研究覆膜增加土壤水分要小[20-22]。从年新增土壤水分看, 覆膜第 2 年新增储水量小于第 1 年, 甚至小于裸地处理, 这说明原有土壤水分高的情况下增加土壤储水量难度会加大, 即适度的土壤干化有利于雨水吸收和储水, 或者说保持适当的植物种植耗水有益于增加土壤储水量。同时发现, 0~150 cm 土层, 膜覆盖下逐年土壤水分储量呈增加趋势, 但裸地逐年储水量呈减少趋势, 所以认为长期连年覆膜是一项有利于促进深层水分恢复的措施。以往研究膜覆盖下的水分效应多在作物生育期进行, 很少见到覆膜在冬季减少土壤损失的报道。本试验发现膜覆盖基本可以避免冬季土壤水分损失, 冬季裸地处理土壤储水量损失大约是膜覆盖处理的 15 倍, 这个作用对于抵抗春季干旱有十分积极的意义。另外, 冬季覆膜较裸地可以缩短土壤冻融时间, 更有利于田间作物的提前返青和生长, 延长了植物生长时间, 并在第 2 年的 4—5 月期间显著增温, 这对于农业生产也十分重要。白膜较黑膜更能提高地表温度, 所以对于早期育苗或者需要促进早春发芽时建议采用白膜覆盖。黑膜较白膜更能提高地表水分, 因此在夏季为了提高土壤水分和平抑土壤温度, 防止杂草生长建议采用黑膜覆盖, 这与江燕等[27]的研究结论一致, 与曹寒等[28]的研究结论部分不一致, 可能与作物生长后遮挡太阳辐射有关。

土壤盐渍化是世界上许多干旱和半干旱地区农业产量下降的主要原因[29]。试验观测虽然证明膜覆盖下土壤表层盐分明显高于裸地处理, 但是水分含盐量不变, 因此随着水分含量的波动盐分也波动, 当植物利用造成土壤水分降低时也会降低盐分, 不会造成土壤盐渍化, 这与丁建丽等[30]的观点一致。

## 4 结论

1)两种覆膜处理中, 0~15 cm 土层黑膜较白膜处理土壤水分高, 15~30 cm 土层白膜较黑膜处理土壤水分高, 但 0~150 cm 土层两种覆膜无差异。膜覆盖在作物生育期土壤储水量较裸地增加 60.8 mm, 非生育期土壤水分损失较裸地处理少 21.1 mm。

2)覆膜缩短土壤冻融时间, 白膜覆盖下土壤融解较黑膜覆盖可提前 8 d, 4—5 月白膜增温效果最为显著, 适宜早期育苗或者促进早返青的作物。

3)3 种处理周年土壤盐分均表现为表层高于下层, 0~50 cm 土层 3 种处理存在显著差异, 其中 0~30 cm 土层为黑膜覆盖>白膜覆盖>裸地, 30~50 cm 土层为白膜覆盖>黑膜覆盖>裸地, 50 cm 以下 3 种处理盐分没有差异, 土壤总体盐分较低, 无土壤盐渍化趋势。

## 参考文献 References


[1] 王俊, 李凤民, 宋秋华, 等. 地膜覆盖对土壤水温和春小麦产量形成的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(2): 205–210
WANG J, LI F M, SONG Q H, et al. Effects of plastic film mulching on soil temperature and moisture and on yield formation of spring wheat[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(2): 205–210

[2] 员学锋, 吴普特, 汪有科. 地膜覆盖保墒灌溉的土壤水、热以及作物效应研究[J]. 灌溉排水学报, 2006, 25(1): 25–29
YUAN X F, WU P T, WANG Y K. Study on the effect of irrigation under plastic preservation of soil moisture on soil and crop[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2006, 25(1): 25–29

[3] 张治, 田富强, 钟瑞森, 等. 新疆膜下滴灌棉田生育期地温变化规律[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 44–51
ZHANG Z, TIAN F Q, ZHONG R S, et al. Spatial and Temporal pattern of soil temperature in cotton field under mulched drip irrigation condition in Xinjiang[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 44–51

[4] 李荣, 王艳丽, 吴鹏年, 等. 宁南旱区沟垄覆盖改善土壤水热状况提高马铃薯产量[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 168–175
LI R, WANG Y L, WU P N, et al. Ridge and furrow mulching improving soil water-temperature condition and increasing potato yield in dry-farming areas of south Ningxia[J]. Transactions of the CSEA, 2017, 33(10): 168–175

[5] 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
WANG C R, TIAN X H, LI S X. Effects of plastic sheet-mulching on ridge for rainwater-harvesting cultivation on WUE and yield of winter wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(2): 208–214

[6] 王琦, 张恩和, 李凤民. 半干旱地区膜垄和土垄的集雨效率和不同集雨时期土壤水分比较[J]. 生态学报, 2004, 24(8): 1816–1819
WANG Q, ZHANG E H, LI F M. Runoff efficiency and soil water comparison of plastic-covered ridge and ridge with compacted soil at different rainfall harvesting stages in semiarid area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(8): 1816–1819

[7] 马忠明, 杜少平, 薛亮. 不同覆膜方式对旱砂田土壤水热效应及西瓜生长的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(5): 1295–1302
MA Z M, DU S P, XUE L. Influences of different plastic film mulches on temperature and moisture of soil and growth of watermelon in gravel-mulched land[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(5): 1295–1302

[8] 侯慧芝, 王娟, 张绪成, 等. 半干旱区全膜覆盖垄上微沟种植对土壤水热及马铃薯产量的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(10): 1582–1590
HOU H Z, WANG J, ZHANG X C, et al. Effects of mini-ditch planting with plastic mulching in ridges on soil water content, temperature and potato yield in rain-fed semiarid region[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(10): 1582–1590

[9] 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 H L, ZHANG X C, SONG S Y, 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

[10] 王红丽, 张绪成, 于显枫, 等. 黑色地膜覆盖的土壤水热效应及其对马铃薯产量的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(16): 5215–5226
WANG H L, ZHANG X C, YU X F, et al. Effect of using black plastic film as mulch on soil temperature and moisture and potato yield[J]. Acta Ecologica sinica, 2016, 36(16): 5215–5226

[11] 谢军红, 柴强, 李玲玲, 等. 黄土高原半干旱区不同覆膜连作玉米产量的水分承载时限研究[J]. 中国农业科学, 2015, 48(8): 1558–1568
XIE J H, CHAI Q, LI L L, et al. The time loading limitation of continuous cropping maize yield under different plastic film mulching modes in semi-arid region of Loess Plateau of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(8): 1558–1568

[12] 李佳旸, 王延平, 韩明玉, 等. 陕北黄土丘陵区山地苹果园的土壤水分动态研究[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(5): 749–758
LI J Y, WANG Y P, HAN M Y, et al. Soil moisture dynamics of apple orchards in loess hilly area of northern Shaanxi Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(5): 749–758

[13] 张坤, 王发林, 刘小勇, 等. 旱地果园起垄覆膜集雨措施对树体水分利用的影响[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(3): 68–71
ZHANG K, WANG F L, LIU X Y, et al. Effect of ridging the land and covering plastic film for rainfall collection on water use of apple trees in dry land orchard[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(3): 68–71

[14] 张殿发, 郑琦宏, 董志颖. 冻融条件下土壤中水盐运移机理探讨[J]. 水土保持通报, 2005, 25(6): 14–18
ZHANG D F, ZHENG Q H, DONG Z Y. Mechanism of soil salt-moisture transfer under freeze-thawing condition[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2005, 25(6): 14–18

[15] 张俊鹏, 冯棣, 郑春莲, 等. 咸水灌溉对土壤水热盐变化及棉花产量和品质的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 161–167
ZHANG J P, FENG D, ZHENG C L, et al. Effects of saline water irrigation on soil water-heat-salt variation and cotton yield and quality[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 161–167

[16] 齐智娟, 冯浩, 张体彬, 等. 河套灌区不同覆膜方式膜下滴灌土壤盐分运移研究[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 301–308
QI Z J, FENG H, ZHANG T B, et al. A study on soil salinity movement of drip irrigation under different film mulching treatment in Hetao Irrigation District[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(2): 301–308

[17] 蒋锐, 郭升, 马德帝. 旱地雨养农业覆膜体系及其土壤生态环境效应[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(3): 317–328
JIANG R, GUO S, MA D D. Review of plastic film mulching system and its impact on soil ecological environment in China's rainfed drylands[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(3): 317–328

[18] 柴守玺, 杨长刚, 张淑芳, 等. 不同覆膜方式对旱地冬小麦土壤水分和产量的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(5): 787–796
CHAI S X, YANG C G, ZHANG S F, et al. Effects of plastic mulching modes on soil moisture and grain yield in dryland winter wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(5): 787–796

[19] 杜延军, 李自珍, 李凤民. 半干旱黄土高原地区地膜覆盖和底墒对春小麦生长及产量的影响[J]. 西北植物学报, 2004, 24(3): 404–411
DU Y J, LI Z Z, LI F M. Effects of plastic film mulch and pre-sowing soil water on growth and yield of spring wheat in semi-arid areas of Loess Plateau[J]. Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica, 2004, 24(3): 404–411

[20] 王俊, 李凤民, 贾宇, 等. 半干旱地区播前灌溉和地膜覆盖对春小麦产量形成的影响[J]. 中国沙漠, 2004, 24(1): 77–82
WANG J, LI F M, JIA Y, et al. Effects of plastic film mulching and pre-sowing irrigation on yield formation of spring wheat[J]. Journal of Desert Research, 2004, 24(1): 77–82

[21] 邓妍, 高志强, 孙敏, 等. 夏闲期深翻覆盖对旱地麦田土壤水分及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(1): 132–138
DENG Y, GAO Z Q, SUN M, et al. Effects of deep plowing and mulch in fallow period on soil water and yield of wheat in dryland[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(1): 132–138

[22] 缪凌. 黄土丘陵区不同覆盖下的干化土壤水分恢复试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016: 28–30
MIAO L. Study on water restoration of dried soil under different mulching on the loess hilly region[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016: 28–30

[23] 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 X, ZHOU Y H, WANG Y K, et al. Soil water characteristic of a dense jujube plantation in the semi-arid hilly Regions of the Loess Plateau in China[J]. Shuili Xuebao, 2015, 46(3): 263–270

[24] 吴贤忠, 李毅, 汪有科. 半干旱黄土丘陵区植物休眠期覆盖对土壤水热变化的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 182–186
WU X Z, LI Y, WANG Y K. Effects of film mulching on soil moisture and temperature changes during plant dormancy period in Semiarid Loess Hilly Region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(3): 182–186

[25] 靳姗姗, 汪星, 汪有科, 等. 不同覆盖措施对减少枣林休眠期土壤水分损失的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 153–160
JIN S S, WANG X, WANG Y K, et al. Effects of typical mulching patterns on soil water loss in jujube land during dormancy period[J]. Transactions of the CSEA, 2016, 32(14): 153–160

[26] 李娟, 陈超, 王昭. 基于不同变换形式的干旱区土壤盐分高光谱特征反演[J]. 水土保持研究, 2018, 25(1): 197–201
LI J, CHEN C, WANG Z. Inversion of high spectral characteristics of soil salt in arid area based on different transform forms[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(1): 197–201

[27] 江燕, 史春余, 王振振, 等. 地膜覆盖对耕层土壤温度水分和甘薯产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(6): 627–634
JIANG Y, SHI C Y, WANG Z Z, et al. Effects of plastic film mulching on arable layer soil temperature, moisture and yield of sweet potato[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(6): 627–634

[28] 曹寒, 吴淑芳, 冯浩, 等. 不同覆膜种植对土壤水热和冬小麦产量的影响[J]. 水土保持研究, 2015, 22(6): 110–115
CAO H, WU S F, FENG H, et al. Effects of different film mulches on soil water and heat as well as the yield of winter wheat[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(6): 110–115

[29] 乔海龙, 刘小京, 李伟强, 等. 秸秆深层覆盖对土壤水盐运移及小麦生长的影响[J]. 土壤通报, 2006, 37(5): 885–889
QIAO H L, LIU X J, LI W Q, et al. Effect of deep straw mulching on soil water and salt movement and wheat growth[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(5): 885–889

[30] 丁建丽, 姚远, 王飞. 基于三维光谱特征空间的干旱区土壤盐渍化遥感定量研究[J]. 土壤学报, 2013, 50(5): 853–861
DING J L, YAO Y, WANG F. Quantitative remote sensing of soil salinization in arid regions based on three dimensional spectrum Eigen spaces[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(5): 853–861