文章编号:1000-7601(2020)02-0021-09 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2020.02.03

干旱半干旱地区双垄地布覆盖对土壤水分的影响

钟 哲[1,2],贾志峰[1,2,3],王 智[1,2,3,4,5],卢玉东[1,2,3],
任 涛[1,2],陈 瑾[6],王小平[6]

(1.长安大学环境科学与工程学院,陕西 西安 710054;2.长安大学旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室,陕西 西安 710054;
3.长安大学水与发展研究院,陕西 西安 710054;4.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100;
5.美国加利福尼亚州州立大学弗雷斯诺分校地球与环境科学系,美国 加州弗雷斯诺 93740;
6.甘肃省定西市水土保持科学研究所,甘肃 定西 743000)

摘 要:为探明一种可替代覆盖材料的可行性,在甘肃省定西市安定区开展了为期 1 a 的监测试验,试验设防草地布加地膜覆垄(MB)、防草地布覆垄(DB)和裸地起垄(CK)3 种处理,利用土壤水分、水势传感器分别对沟内地表下 5、15 cm 的土壤含水率、水势进行监测,结果表明:(1)表层 5 cm 土壤水分日变化呈复杂波形,受不同覆垄处理和季节性天气变化的影响显著;(2)0~20 cm 土层的水分年变化主要受降雨、露水和蒸发强度的影响,表现为春冬干、夏秋湿的特点,在 11 月至翌年 2 月期间 MB 和 DB 覆垄处理土壤水分净损失量要高于 CK 裸地垄,而在作物生育期内(5—9 月)覆垄处理土壤储水净增量为 DB 最大(36.35 mm)、MB 次之(30.73 mm)、CK 最小(16.30 mm);(3)MB 和 DB 覆垄能明显加快雨露叠加,增加土壤水储存,而 CK 处理下叠加效应弱,且深层土壤对降雨不敏感,具有滞后性,但随着连续降雨的发生,表层土壤储水量加大,这种滞后性明显减弱;(4) 0~20 cm 土层土壤储水量日变化幅度为夏季最大(平均 1.20 mm·d^{-1}),春季次之(1.03 mm·d^{-1}),秋季最小(0.79 mm·d^{-1}),全年水分净收获总量为 DB 最大(24.9 mm)、MB 略低(21.5 mm)、CK 最小(11.4 mm)。整体而言,只用地布覆垄具有最好的集水效果,这种防草地布可多年使用,无地膜碎片化污染问题,但在无降雨时期,垄沟内因土壤水分高,其蒸发强度略高于裸地处理。

关键词:地布覆垄;土壤水分;雨露叠加;干旱半干旱区

中图分类号:S278 **文献标志码**:A

Effects of double ridge geotextile mulching on soil moisture in arid and semi-arid regions

ZHONG Zhe[1,2], JIA Zhifeng[1,2,3], WANG Zhi[1,2,3,4,5], LU Yudong[1,2,3],
REN Tao[1,2], CHEN Jin[6], WANG Xiaoping[6]

(1. *College of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi* 710054, *China*;
2. *Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi* 710054, *China*;
3. *Institute of Water and Development, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi* 710054, *China*;
4. *College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*;
5. *Department of Earth and Environmental Sciences, California State University, Fresno, CA* 93740, *USA*;
6. *Dingxi Institute of Soil and Water Conservation, Dingxi, Gansu* 743000, *China*)

Abstract: In order to evaluate the feasibility of a substitute material-geotextile weed blocker, a one-year long monitoring experiment was carried out in Anding District, City of Dingxi, Gansu Province. The experimentation included three treatments: weed-blocking geo-textile fabric plus plastic film mulching on the ridge (MB), geo-textile fabric mulching on the ridge (DB), and bare soil ridge (CK). Soil moisture and water potential sensors were in-

收稿日期:2019-06-10 **修回日期**:2020-01-16

基金项目:中央高校基本科研业务专项(30102290105);高等学校学科创新计划"111"项目(B08039)

作者简介:钟哲(1994-),男,江西赣州人,硕士研究生,研究方向为气态水及水文学。E-mail:zhongzhe229007@163.com

通信作者:王智(1962-),男,美国加利福尼亚人,博士,教授,主要从事土壤物理和水文学研究。E-mail:zwang@csufresno.edu

stalled to monitor the changes in soil moisture content and water potential at 5 cm and 15 cm below the surface of the furrow. The results showed that: (1) Diurnal variation of moisture in top 5 cm surface soil was wave-like, which was significantly influenced by the ridge cover types and the seasonal climate changes. (2) The annual variation of water content in top 0~20 cm soil was mainly affected by rainfall, dew, and evaporation rates. It can be characterized as dry in spring and winter, and wet in summer and autumn. From November to February, the net loss of soil water in MB and DB was higher than CK, but during the crop growing season (May-September), the net gain of soil water storage was the highest in DB (36.35 mm), followed closely by MB (30.73 mm) and the lowest in CK (16.30 mm); (3) Ridge mulching under MB and DB obviously accelerated the superposition of rain and dew over the ridge so as to increase soil water storage in the furrow. This effect was weak under CK treatment, and the deep soil infiltration was less responsive to rainfall and dew, showing a lagging effect. But, with the occurrence of continuous rainfall, this lagging was obviously weakened due to higher water storage in the top layer; (4) The diurnal variation of 0~20 cm soil water storage was the largest in summer (average 1.20 mm · d^{-1}), medium in spring (1.03 mm · d^{-1}) and the smallest in autumn (0.79 mm · d^{-1}). The annual net harvest with different ridge covering measures was the highest with DB (24.9 mm), followed closely by MB (21.5 mm) and the smallest with CK (only 11.4 mm). Overall, ridge mulching using geotextile fabric alone had the best water harvesting effect. This weed-blocking fabric can be used for multiple years without fragmentation and soil pollution problems associated with plastic film mulching, but in the no-rain season, because of higher soil moisture in the furrow, its evaporation rate was slightly higher than the bare ridge treatment.

Keywords: geo-textile fabric mulching on the ridge; soil moisture; rain and dew superposition; arid and semi-arid area

陇中半干旱地区为典型的雨养农业区,该地区降雨量少,日照和蒸发强度大,地下水位埋藏较深,导致农作物在生育期内缺少水分,成为旱作农业遭受旱灾的主要原因[1-3]。新型垄膜沟植技术能显著改善土壤水分分布条件,抑制土壤水分的无效蒸发,促进作物生长发育,缓解因降水时空分布不均而引起的干旱风险[4-7]。王亚宏等[8]基于陇中半干旱地区的大田试验发现沟垄和覆盖处理可有效规避作物生长发育期由于降雨少且分布不均引起的干旱风险,确保作物高产稳产。马忠明等[9]基于大田对比试验,发现起垄覆膜具有很好的集雨作用,可提高旱区作物生长前期土壤水分,加快作物生长。吴贤忠等[10]发现黑膜覆盖有利于提高土壤表层水分,保墒增温,延长作物生产时间。侯慧芝等[11]研究表明,全膜覆盖、垄沟种植能显著提高马铃薯生育期的土壤水分和温度。谢军红等[12]认为全膜双垄沟播具有明显的增产增收效果和提高水分利用效率的作用,是理想的玉米种植模式。但随着地膜使用量的增加和使用范围的扩大,农田残膜污染变得越来越严重[13],因此在地膜上再覆盖耐用性较强的防草地布形成地布-地膜双重覆盖,既缓解了地膜碎片化又保持了其抑蒸保墒作用[14]。以往关于起垄覆膜的研究虽然较多,但大多数是采用双垄沟全膜覆盖技术[15-16],即两边的垄与中间的沟皆用地膜覆盖,其缺点是地膜的年终碎片化严重,可能污染土壤,且不可重新使用,重复劳动量大。本研究在双垄沟全膜覆盖技术的基础上,设计有防草地布加地膜覆垄(MB)、防草地布覆垄(DB)和裸地起垄(CK)3种不同处理,并对各处理的土壤水分、水势进行监测,旨在探究干旱半干旱区地布替代地膜覆盖的有效性和可行性,为旱作农业技术的改进提供依据。

1 研究地区和试验方法

1.1 研究区概况

本试验在甘肃省定西市水土保持科学研究所安家沟试验站气象园外开展。安家沟试验站(35°33′N,104°38′E)位于定西市城区东侧,属于典型的黄土丘陵沟壑区第Ⅴ副区。该地海拔1 973 m,无霜期152 d,年平均气温6.8℃,年内温差较大(-24.4℃~36.2℃),年平均降雨量427 mm,降雨主要集中在7—9月,并多以暴雨形式出现,多年平均潜在蒸腾蒸发量高达1 510 mm,属于中温带半干旱气候区[17]。试验区土壤类型以黄绵土和沟道盐渍土为主,土壤质地为粉质壤土,机械组成为粘粒(<0.002 mm)占8.8%,粉粒(0.002~0.05 mm)占79.6%,砂粒(0.05~2 mm)占11.6%,无砾石(2~76 mm),0~2 m土壤容重为1.09~1.36 g · cm^{-3},平均

容重为 1.2 g·cm^{-3},有机质含量介于 0.37%~1.34%之间[18],土壤孔隙率平均约 55%,田间持水量(体积含水率)为 27.5%,地下水埋深超过 50 m。

1.2　试验设计和数据收集

试验布设于水平阶地上,无作物种植,试验小区面积为 14 m^2(长 4 m×宽 3.5 m),在试验地中起 2 组规格相同的微垄,长 300 cm,宽 60 cm,高 20 cm,垄沟宽 40 cm,采用双垄地布覆盖处理,即在两侧双垄上进行地布覆盖,而垄沟区不覆盖以利耕作。这种利用田间微地形和覆盖相结合的集水保水措施,可有效提高对自然降雨的利用率[19],微垄最前端 0~1 m 长度设有防草地布加地膜覆垄(MB)(地膜在下,防草地布在上),1~2 m 长度段设有防草地布覆垄(DB),2~3 m 长度段设有无覆盖的裸地垄(CK)作为对照,区段间无隔离层,以防扰动土壤,容许土壤水分自由运动,具体布置如图 1 所示。

在垄沟内纵横向中心位置埋设土壤水分、水势监测仪器,故各处理监测仪器间间隔最大,为 100 cm,可最大程度减少区段间的边际效应。监测仪器均由美国 Decagon 公司生产,主要仪器安装方式和参数如下:

(1)MB 组在地面以下 5 cm 和 15 cm 处埋设土壤水势传感器(MPS-2);DB 组在地下 5 cm 和 15 cm 处埋设土壤水分传感器(GS3),15 cm 处增设土壤水势传感器(MPS-2);CK 组在地下 5 cm 和 15 cm 处埋设土壤水分传感器(GS3)。其中 GS3 土壤水分传感器测量范围为 0~100% VWC,精度为±3%,MPS-2 土壤水势传感器测量范围为-10~-500 kPa,精度为±25%,土壤温度精度为±1℃。

(2)地面以上 200 cm 处架设有雨量计(ECRN-100),进行降雨监测,精度为±0.2 mm;地面以上 20 cm 处安装有大气温湿度仪(VP-3)和叶面露水仪(LWS),可进行大气温湿度和露水的监测,大气湿度测量精度为±2%,温度精度为±1℃,露水仪精度为±0.02 mm。

上述所有仪器均通过数据采集器(EM50)自动采集[20],采集间隔为 30 min,测量时间为 2017 年 8 月 7 日—2018 年 8 月 6 日。

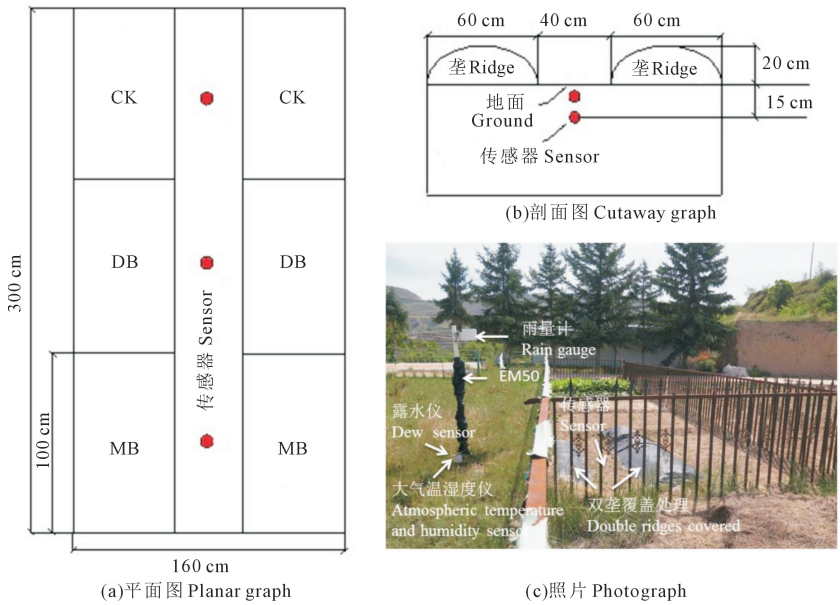


图 1　田间试验布置示意图

Fig.1　Field test layout

1.3　数据处理

1.3.1　土壤储水量　土壤储水量能很好地反映土壤水库的持水能力,对土壤含水量的变化情况也有较好的体现,其计算公式[10]如下:

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

式中,W 为土壤储水量(mm),H 为土壤深度(cm),θ 为土壤体积含水率(cm^3·cm^{-3})。

任何时段的土壤储水变化量为

$$\Delta W = W_{末} - W_{初} \quad (2)$$

式中,ΔW 为土壤储水变化量,$W_{末}$ 为时段末期储水量(mm),$W_{初}$ 为时段初期储水量(mm)。

1.3.2　露水量计算　露水量采用叶面露水仪(LWS)传感器采集的数据(电压)与露水量的转换公式进行计算[20],公式如下:

$$W_{di} = 4 \times 10^{-14} x_i^{4.4188} \quad (3)$$

式中，W_{di} 为 i 时段实测露水值(mm)；x_i 为露水传感器测量 i 时段内的原始电压值(最低临界值为 447 mV)。

1.3.3 雨水保存率 对于无作物灌溉和地下水补给的集雨农业，农田雨水保存率[21] 采用以下公式：

$$K = U/R \quad (4)$$

式中，K 为雨水保存率(%)，U 为渗入并保存在土壤中的水量(mm)，R 为农田接收的自然降水量(mm)，K 的取值范围为 0 ~ 100%，K 值越大，农田雨水保存率越高。

1.3.4 土壤水分特征曲线 为了便于分析土壤水分的变化特征，需将 MB 组地面以下 5、15 cm 处以及 DB 组 5 cm 处的土壤水势转化为土壤水分。本试验中 DB 组 15 cm 处安装有土壤水势和水分传感器，基于该组数据得到土壤水分特征曲线[22](图 2)，计算如下：

土壤水势传感器监测的数据单位换算：

$$h = 100 \times \frac{P}{\gamma} \quad (5)$$

式中，P 为水势传感器测量值(kPa)，γ = 9.8 kN · m^{-3}，h 为土壤基质式(cm)，得到土壤体积含水量与基质势的关系。

采用 Van Genuchten 模型[23] 拟合土壤水分特征曲线，公式如下：

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)\left[1 + (\alpha|h|)^n\right]^{-m} \quad (6)$$

式中，θ 为含水量；θ_r 为残余含水量；θ_s 为饱和含水量；α、n、m 为经验参数，$m = 1 - \frac{1}{n}(0 < m < 1)$。

对 θ_r、θ_s、α、n 参数采用最小二乘法进行数据拟合，如图 2 所示，得到 θ_r = 0.0329，θ_s = 0.4873，α = 0.1043，n = 1.77，m = 0.565，归一化均方根 $NRMSD$ = 0.06，吻合度较好。

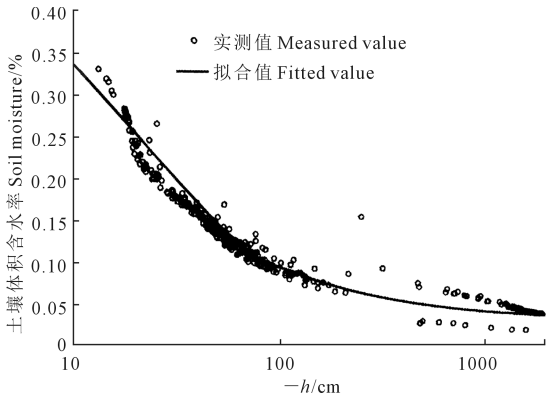


图 2 土壤水分特征曲线

Fig.2 Soil moisture characteristics curve

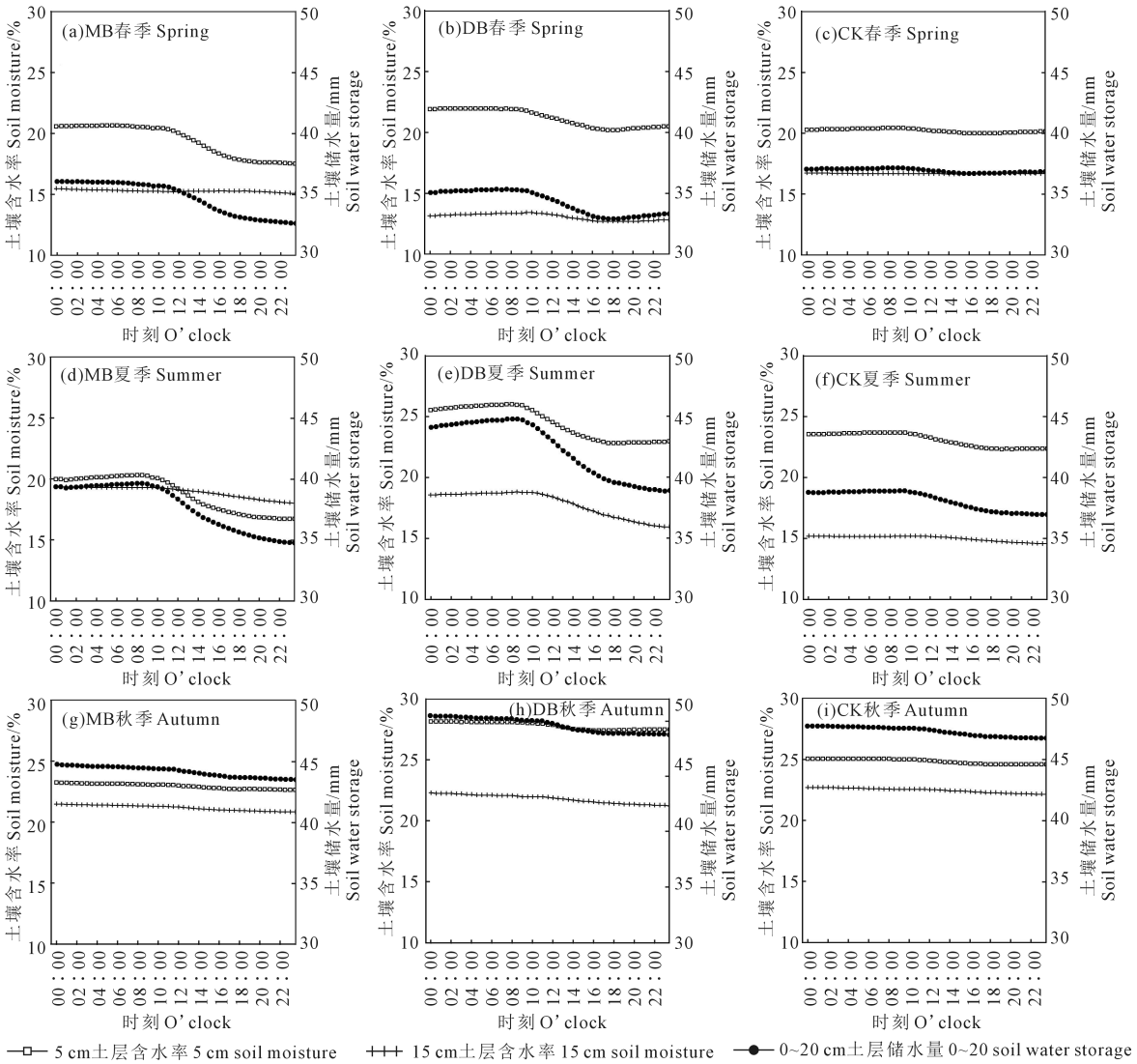
1.3.5 资料统计与分析 利用 Microsoft Excel 2010 与 SPSS 22.0 软件进行数据统计和分析，采用 Duncan 新复极差法进行显著性检验(P<0.05)，采用 Origin 8.5 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 表层土壤水分日变化特征

由于冬季温度较低，表层土壤水分冻结，土壤水分传感器仅能够测量土壤非冻结含水量，故本文仅选取春(3—5 月)、夏(6—8 月)、秋(9—11 月)3 个季节的平均值，分析地表以下 5、15 cm 处土壤水分日变化过程(图 3)。由图 3 可知，各季节日平均土壤水分变化受不同覆垄处理和季节影响显著，在 5 cm 土层变化剧烈，15 cm 土层变化平缓；各处理 0 ~20 cm 土层土壤储水量变化趋势与地表以下 5 cm 处土壤水分变化基本一致，呈轻微波形变化。MB 处理的土壤含水率变化为 00 ∶ 00 ~ 10 ∶ 00 下降，10 ∶ 00~16 ∶ 00 上升，16 ∶ 00~24 ∶ 00 下降，日变化呈“余弦”波形；而 DB 处理和 CK 处理的土壤含水率变化为 00 ∶ 00~07 ∶ 00 上升，07 ∶ 00~15 ∶ 30 下降，15 ∶ 30~24 ∶ 00 上升，呈“正弦”波形；此外 0~20 cm 土层土壤储水量日变化亦受季节影响显著，日变化幅度为夏季最大(1.20 mm · d^{-1})、春季次之(1.03 mm · d^{-1})、秋季最小(0.79 mm · d^{-1})，不同季节的日储水量均值为秋季最大(39.11 mm · d^{-1})、夏季次之(35.03 mm · d^{-1})、春季最小(31.27 mm · d^{-1})。

上述表层土壤水分的日变化是复杂多变的水分运移耦合结果，土壤水分来源主要是降雨入渗、地下水输送和对气态水的凝结及吸附作用[25]。考虑到试验区地下水位埋藏较深，故此地土壤水分主要源自降雨入渗和气态水的凝结，而水分输出主要是随时空变化的土壤蒸发。针对 3 种不同处理条件，MB 覆垄的土壤水分日变化表现为白天增加夜间减少，白天水分增加的原因是地表接收太阳辐射并吸收热量，造成地表温度高于气温与较深层的地温，在地表下 0~5 cm 处形成发散型热量零通量面，水汽在温度梯度作用下向温度低的界面运移，造成 5 cm 土层水分增加，而 DB 覆垄和 CK 土垄则因为无地膜覆盖，温度梯度作用要小于 MB 覆垄，并且此时两者水分大，故蒸发强度也大，因此造成 5 cm 土层水分减少；到了晚间地表放出长波辐射而迅速降温，在温度梯度作用下，深层土壤水汽流向地表，空气中的水汽也在地表凝结，形成露水[24](图 4)。因此 DB 覆垄和 CK 土垄 5 cm 土层水分增加，但 MB 覆垄由于地膜的覆盖，隔绝了土垄与大气的接触，两



注:MB 为防草地布加地膜覆垄;DB 为地布覆垄;CK 为裸地对照。下同。

Note: MB: Weed-blocking geo-textile fabric and plastic film mulching on the ridge; DB: Geo-textile fabric mulching on the ridge; CK: Bare soil ridge. The same below.

图 3　表层 0~20 cm 土层土壤水分季节日平均值变化

Fig.3　Season-average diurnal variation of surface 0~20 cm layer soil moisture

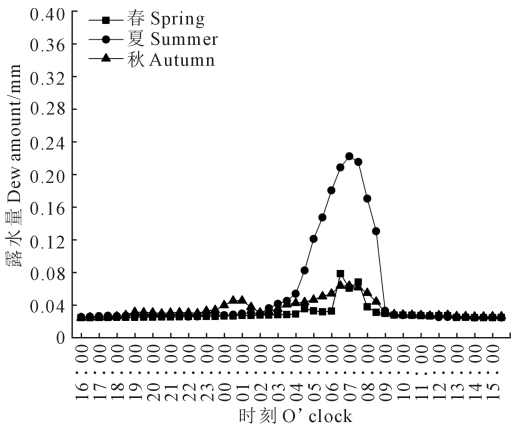


图 4　不同季节平均每日每时露水量的变化

Fig.4　Changes of average daily and hourly dew amount in different seasons

侧微垄的水势要远远低于垄沟处,垄沟处的水汽横向补给两侧微垄,导致 MB 覆垄 5 cm 土层水分减小。覆垄处理下 0~20 cm 土壤储水量日变化幅度均高于 CK 处理,这是因为垄上覆盖黑色薄膜和黑色防草地布均能够吸收热量致使覆盖处理下表层土壤温度高于 CK 处理,加大蒸发强度,导致覆垄处理在无降雨情况下垄沟处水分损失大于 CK 处理。

2.2　土壤水分的年变化特征

陇中半干旱区降雨分布不均,蒸发强度大,地下水位埋深大,土壤干湿季节分明,年变化特征表现为干—湿—干的特点[25]。以 CK 处理为例,地表下 5、15 cm 土层土壤水分年变化特征见图 5(a)。由图 5(a)可知,5 cm 处土壤含水率变化范围为

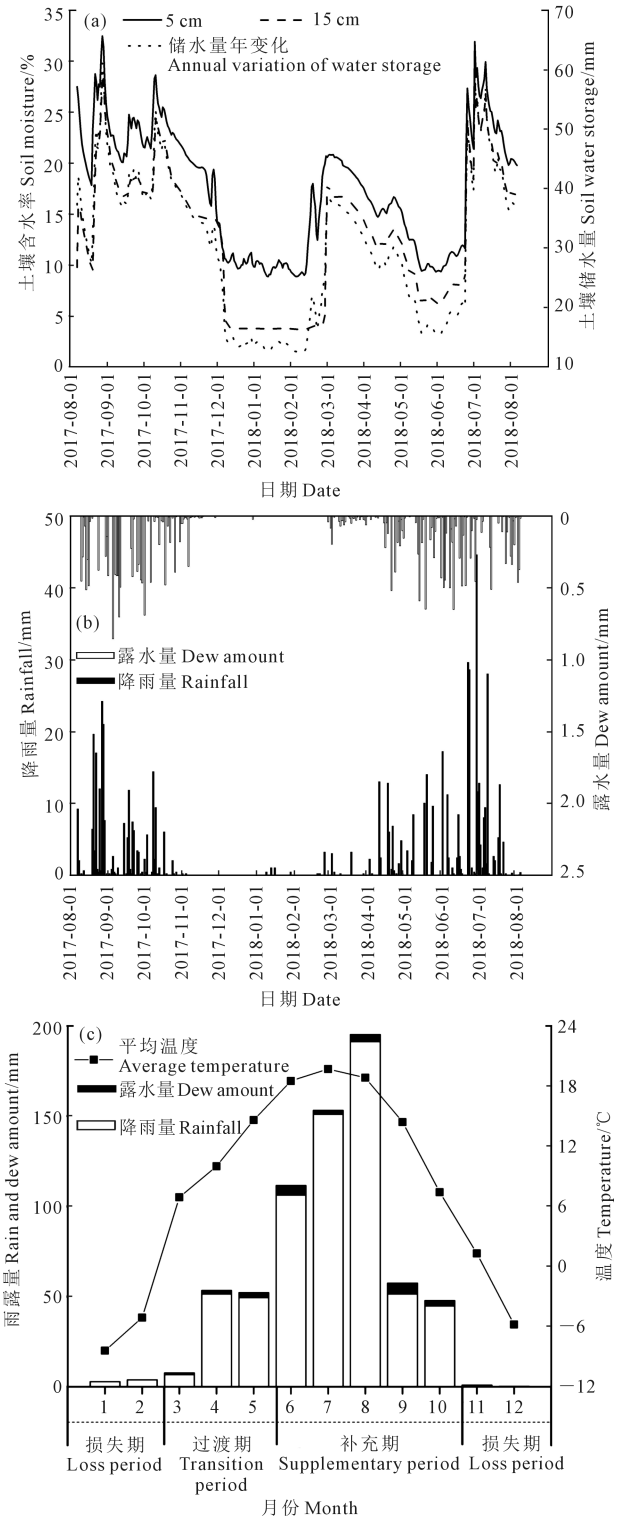


图 5 裸地(CK)水文变化过程

Fig.5 Hydrological processes in the bare soil (CK)

8.9%~32.5%,年变幅为 23.6%,年平均土壤含水率为17.4%,15 cm 处土壤含水率变化范围为 3.7%~23.8%,年变幅为 20.1%,年平均土壤含水率为 12.8%,5 cm 处土壤含水率年变幅均高于 15 cm 处,峰值出现在 7 月初和 8 月底,低谷出现在 12 月—翌年 2 月份,与年降雨分布相符。由图 5(b)可知,在时空分布上,露水与降雨高度互补,露水只发生在晴朗无云的夜晚,就年周期而言,露水与降雨一样主要发生在 6—10 月,露水量虽然远小于降雨量,但露水凝结具有发生频率高、稳定性强等特点[26],对于缺水的半干旱地区同样有着重要作用。根据年降雨和露水凝结的分布特点将一年划分为损失期(11 月至次年 2 月)、过渡期(3—5 月)、补充期(6—10 月)3 个时期图 5(c)。损失期在冬季,温度低、降雨少,露水量小,表层土壤含水率较低,含水率变化幅度低,但蒸发损失大[27],地下 5 cm 和 15 cm 处的平均含水率分别为 11.1%和4.5%,15 cm 处土壤干化程度大于 5 cm 处;过渡期降雨有所增加,露水量略有上升,但温度也开始回升,蒸发强度增大,地下 5 cm 和 15 cm 处均出现土壤水分损失的情况,土壤含水率分别下降了 11.5%和 11.7%,这一时期的降雨量较小,无法完全补充蒸发造成的水分损失,导致了降雨量虽然增加但土壤含水率却降低的情况;补充期虽然温度高、蒸发强烈,但降雨量大,露水量也大,因此地下 5 cm 和 15 cm 处土壤含水率都有显著增加,平均土壤含水率分别为23.7%和 16.6%,变化幅度分别为 23.2%和 22.6%,5 cm 处土壤含水率要高于 15 cm 处,变化幅度相差不大。

通过对比不同覆盖处理条件下各时期 0~20 cm 土层的土壤储水量变化(图 6)发现,双垄不同地布覆盖处理对表层土壤水分的储存具有显著影响,损失期各处理的土壤水分均出现了一定程度的损失,分别为 DB 10.2 mm、MB 16.1 mm 和 CK 4.9 mm,覆垄处理损失的水分要高于 CK 处理;过渡期 DB 和 MB 两种覆垄处理的土壤储水量分别增加了 4.4 mm 和 8.8 mm,CK 处理反而减少了 7.3 mm;补充期时各处理的土壤储水量都有大幅度提升,其中 DB 处理的储水量增量最大,为 30.7 mm,MB 处理次之,增加了 28.8 mm,CK 处理增加量最少,为 23.6 mm。全年水分净收获总量为 DB 最大(24.9 mm)、MB 略低(21.5 mm)、CK 最小(11.4 mm)。以上分析表明,损失期不同处理土壤水分损失的主要原因是该时段降雨量小,而地膜和地布覆垄处理能吸收更多的热量,与 CK 处理相比,表层土壤水分蒸发强度更大;过渡期覆垄处理的土壤储水量都有所增加,而 CK 处理却减少,这是因为地膜地布覆垄能很好收集微量降雨和露水,集中汇至垄沟处,入渗到土壤中,减少土垄对水分的吸收以及无效蒸发,同时,虽然降雨量有所增加,但温度回升,蒸发强度也逐渐增大,对于 CK 处理,这一时期的降雨补给不能满足其蒸发所消耗的水分,土壤储水量减小;补充期大量的

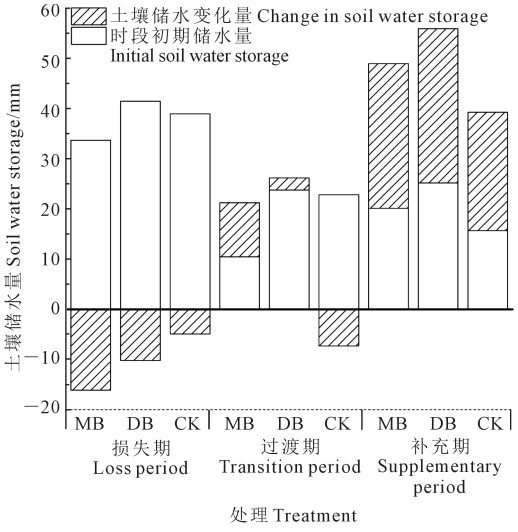


图 6　各时期土壤表层储水量变化

Fig.6　Changes of surface soil water storage in each period

降雨使得 3 组处理的土壤储水量都出现大幅度上升,不过该时期的温度也是全年最高的,蒸发强度也远远大于其他时期,而地布和地膜的覆盖能起到抑蒸保湿作用,将垄上收集的水分补给到垄沟处,同时覆垄相较于土垄具有更加高效的集水能力,水分集中汇集到垄沟处,渗入土壤中,减少土垄对水分的吸收以及无效蒸发,导致覆垄处理土壤储水增量明显高于 CK 处理。综上所述,表层土壤含水率变化与降雨量、露水量密切相关,5 cm 处的土壤水分对降雨的响应要高于 15 cm 处;不同覆垄处理对土壤水分的年变化特征有着显著影响,损失期覆垄处理相较于 CK 处理,垄沟处表层土壤水分干化更加严重;过渡期覆垄处理具有抑蒸保湿作用,有助于土壤储水,减少无效蒸发;补充期地布覆盖具有很好的集水效果,可以有效地促进降水汇集到垄沟处,入渗到土壤中,增加土壤储水量。

2.3　不同处理对降雨叠加效应的影响

降雨作为半干旱区土壤主要的水分补给来源,对旱区农作有着重要意义,因此如何能更加高效集中降雨,减少其无效蒸发,对半干旱区旱情的缓解具有重要意义。选取三天典型降雨过程(8 月 27 日—8 月 29 日),分析降雨前后垄沟中心 0~20 cm 土层的土壤储水量动态变化情况(图 7),定量分析起垄覆盖对土壤雨水保存率的影响。

如图 7 所示,该典型降雨过程中共发生了两次大型的连续性降雨,降雨量分别为 20 mm 和 31.4 mm,第一次降雨后, 0~20 cm 土层土壤储水增量大小表现为 MB(17.9 mm)>DB(15.9 mm)>CK(12.3 mm),雨水保存率为 MB 最高(89.5%)、DB 略低(79.5%)、CK 最小(61.5%);第二次降雨后,0~20 cm 土层土壤储水增量大小表现为 MB(10 mm)>DB(6.3 mm)>CK(5.5 mm),雨水保存率为 MB 最高(31.8%)、DB 略低(20.1%)、CK 最小(17.5%)。以上数据表明,两次降雨后覆垄处理的土壤储水增量均高于 CK 处理,差异显著(P<0.05),地布地膜覆盖隔离了土垄和降雨的接触,使降雨更多地汇集至垄沟处,减少水分损失。另外对比两次降雨前后发现,虽然第二次的降雨量要大于第一次,但第一次降雨各组储水增量却高于第二次降雨,主要原因为第一次降雨致使表层土壤水分接近饱和,第二次降雨则主要以下渗为主,导致土壤储水量增加幅度小。覆垄处理在第一次降雨后的储水量较 CK 处理更早到达峰值,第二次降雨后则无明显提前,说明土壤储水量对降雨的响应存在一定的滞后性,而覆垄处理能减弱这种滞后性,因为地布覆盖隔离了土垄与降雨的接触而减小了土垄对降雨的吸收,更快形成径流,雨水能更加高效地汇集垄沟,入渗至土壤中,第二次降雨发生时由于第一次降雨雨滴的冲溅作用,土垄上的土壤结皮逐渐形成,因此第二次降雨后覆垄处理和 CK 处理土壤储水量达到峰值的时间基本一致。综上所述,双垄覆盖处理具有很好的集雨效果,雨水保存率表现为 MB 最高、DB 略低、CK 最小,在连续的降雨过程中,降雨后期土壤储水增量小于前期,地布覆盖能减弱土垄对降雨响应的滞后性,在连续降雨的后期土垄会形成土壤结皮[28],在集雨与聚水方面具有和地布覆垄类似的功能。

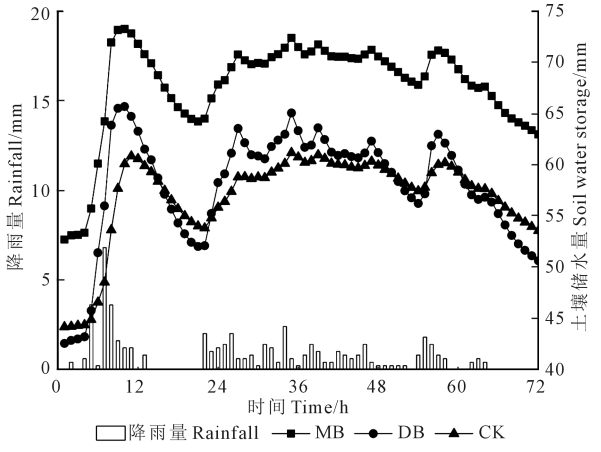


图 7　降雨前后表层土壤储水量变化

Fig.7　Changes of surface soil water storage before and after a group of rainfall events

3　讨　论

本研究结果表明,表层土壤水分日变化受不同覆垄处理影响显著,其中 MB 覆垄 5 cm 土层土壤水

分变化呈轻微“余弦”波形变化,与李德帅等[25]在陇中黄土高原观测结果一致,而 DB 覆垄和 CK 土垄呈轻微“正弦”波形变化,这一变化规律与张静等[29]在沙垄丘间低地(无结皮覆盖)观测结果一致,这是不同季节降雨、结露、土壤温度梯度和土壤水分蒸发速率等时空耦合的结果。此外土壤储水量日变化幅度受季节影响显著,具体表现为夏季最大(1.20 mm · d^{-1})、春季次之(1.03 mm · d^{-1})、秋季最小(0.79 mm · d^{-1}),全年净水分收获总量为 DB 最大(24.9 mm)、MB 略低(21.5 mm)、CK 最小(11.4 mm),夏季由于太阳辐射强烈,温度高,蒸发强度大,导致土壤储水量日变化幅度要显著大于其他季节,而覆盖处理会促进土壤对热量的吸收,使土壤蒸发强度高于 CK 处理,导致水分损失要大于 CK 处理。

表层土壤水分年变化主要受降雨和露水影响,各季节表层土壤含水率大小表现为夏季>秋季>春季>冬季;冬季时,覆垄处理导致 5 cm 土层处的土壤干化程度略高于裸地处理,但在作物种植的春、夏季节,覆垄处理土壤储水增量则显著高于 CK 处理,这与王亚宏[8]等的研究存在差异,主要是因为在以往的研究中土壤水分监测的传感器埋设于垄对应土层中,而本文是将传感器埋设于垄沟处。

本试验进一步证实,膜布的覆盖可以更加高效地实现降雨叠加,增加土壤储水量,减少水分的散失[30-33]。不同覆盖处理下土壤的雨水保存率表现为 MB 最高、DB 次之、CK 最低,在连续降雨过程中,降雨后期表层土壤水分接近饱和,土壤水分向深层入渗,浅层土壤储水增量减少,这与吴贤忠等[10]结果一致。此外,本研究还发现地布覆垄能减弱土壤储水量对降雨响应的滞后性,降雨过程中覆盖处理下土壤储水量的增长基本与降雨时段一致,而 CK 处理在第一次降雨时对降雨的响应具有明显的滞后性;但在连续降雨后,CK 处理土壤储水量变化也与覆垄处理同步,滞后性有所减弱,这是由于在降雨后期土垄会形成土壤结皮,在集雨与聚水方面具有覆垄类似的功能[28]。

使用防草地布覆垄代替地膜覆垄,其优缺点比较如下:防草地布又称为园艺地布、地面防护膜等,是由聚丙烯或聚乙烯材料编织而成的一种布状材料,具有拉力强、耐摩擦、抗老化、抗紫外线、耐腐蚀、无毒无味等特点,可有效抑制杂草生长[34]。无降水条件下,地面以下 5、20 cm 和 40 cm 土层在地膜、防草地布覆盖下土壤含水量与裸地相比,均能提高 13%~15%,两者保墒效果相当[35],但防草地布覆盖可以有效控制杂草而且可以多年使用。防草地布的厚度是普通地膜的 5 倍,牢固耐用,露地使用可达 5~10 a,且其韧性好,不变形不褪色,收放方便,环境污染风险小,渗水性好,水分可渗入土壤,可长期控制杂草[36]。通过市场调研,每年每亩农田铺设地膜的成本为 636 元,假设防草地布的使用年限为 5 a,则地膜年均使用成本是防草地布的 4.5 倍。防草地布初始材料成本投资较大,但其使用年限长,一次铺设、多年受益,用途广泛,价格逐年下降,相比地膜可节省大量的人力消耗,具有省工节本、生产高效等优势。

综合而言,无降雨条件下地布覆垄对应的垄沟土壤水分的蒸发强度要略高于 CK 处理,但在垄沟集雨储水方面,地布覆垄具有很好的效果,覆垄处理相较于 CK 处理更能促进土壤对水分的吸收和保存。在作物生育期内(5—9 月)覆垄土壤储水净增量 MB(30.73 mm)、DB(36.35 mm),分别较裸地垄(16.3 mm)增多 14.43 mm 和 20.05 mm。因此地膜或地布覆垄对缓解半干旱区因降雨分布不均而导致的干旱险情具有很好的效果,并且通过对比防草地布与地膜的优缺点,考虑环境污染以及经济效益等方面,初步认为陇中半干旱区可直接使用防草地布覆垄(也可覆沟),无需地膜下垫。

另外,本试验是在沟内无作物条件下进行的,有作物时由于叶面遮阳且拦截飞溅水滴,土面和大气无效蒸发会减小,更有利于雨露叠加和植物有效利用。

4 结 论

通过为期一年的监测试验,对防草地布加地膜覆垄(MB)、防草地布覆垄(DB)和裸地起垄(CK)3 种处理的储水利用效果进行了对比,结果表明:

1)表层土壤水分日变化受不同覆垄处理影响显著,其中 MB 覆垄 5 cm 土层水分变化呈轻微“余弦”波形变化,而 DB 覆垄和 CK 土垄呈轻微“正弦”波形变化,这是不同季节降雨、结露、土壤温度梯度和土壤水分蒸发速率等时空耦合的结果。

2)表层土壤水分的年内变化主要受降雨和露水的影响,特征表现为春冬干、夏秋湿的特点,在 11 月至翌年 2 月覆垄处理土壤损失的水分要高于裸地处理,而在作物生育期内(5—9 月)地布覆垄处理的土壤储水净增量(36.35 mm)较裸地处理(16.3 mm)多 20.05 mm。

3)覆垄处理能增加雨水的入渗量和储存量,而土垄对降雨的入渗具有滞后性,但随着连续降雨的发生,滞后性逐渐减弱。

4)0~20 cm 土层的土壤储水量日变化幅度受季节和地布覆盖措施影响显著,具体表现为夏季最大(1.20 mm·d^{-1})、春季略低(1.03 mm·d^{-1})、秋季最小(0.79 mm·d^{-1}),全年净水分收获总量为 DB 最大(24.9 mm),MB 略低(21.5 mm),CK 最小(11.4 mm)。据此,陇中半干旱区可直接使用防草地布覆垄(也可覆沟),无需地膜下垫。防草地布耐久性好,可多年使用。

致谢:感谢长安大学研究生院、长安大学水与发展研究院、西北农林科技大学和定西市水土保持科学研究所对本试验项目的支持。

参 考 文 献:

[1] 陈少勇,郭玉珍,郑延祥,等.甘肃旱作农业区降水对土壤水分的影响[J].中国沙漠,2012,32(1):155-162.

[2] 肖国举,王静.黄土高原集水农业研究进展[J].生态学报,2003,23(5):1003-1011.

[3] Gao Y H, Xie Y P, Jiang H Y, et al. Soil water status and root distribution across the rooting zone in maize with plastic film mulching [J]. Field Crops Research, 2014,156:40-47.

[4] 贠学锋,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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 王亚宏,高世铭,张伟, 等. 陇中旱地马铃薯不同种植模式对土壤温度和水分利用效率的影响[J].甘肃农业大学学报,2009,44(6):4319-4323.

[9] 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.

[10] 吴贤忠,李毅,高志永, 等. 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.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 陈东城. 我国农用地膜应用现状及展望[J].甘蔗糖业,2014,(4):50-54.

[14] 苏凤梅,贾志峰,王智. 地布-地膜覆盖对渭北旱塬区土壤水分的影响[J].水土保持通报,2018,38(5):97-102.

[15] 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.

[16] 赵鸿,王润元,王鹤龄,等.半干旱雨养区苗期土壤温湿度增加对马铃薯生物量积累的影响[J].干旱气象,2013,31(2):290-297.

[17] 陈瑾,张佰林,王琨.安家沟流域地面监测数据质量及合理性评价[J].中国水土保持,2018,(9):61-62.

[18] 吕贻忠,李保国. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社,2006:53.

[19] 汤瑛芳,高世铭,王亚红,等.旱地马铃薯不同覆盖种植方式的土壤水热效应及其对产量的影响[J].干旱地区农业研究,2013,31(1):131-137.

[20] 王浩,贾志峰,王智. 陕北黄土丘陵区露水量及影响因子[J].应用生态学报,2017,28(11):3703-3710.

[21] 张建新,郑大玮,李芬,等. 集雨农业雨水利用转化效率及其提高途径分析[J].干旱地区农业研究,2008,26(3):198-204.

[22] 贾志峰.土壤水的监测技术方法与运移规律研究[D].西安:长安大学,2014.

[23] Van Genuchten, M T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44:892-898.

[24] Jia Z F, Wang Z, Wang H. Characteristics of dew formation in the semi-arid Loess Plateau of central Shaanxi Province, China [J]. Water, 2019,11(1):126.

[25] 李德帅,王金艳,王式功,等. 陇中黄土高原土壤水分变化特征及其机理分析[J].中国沙漠,2014,34(1):140-147.

[26] 王浩,贾志峰,卢玉东,等. 陕北安塞县黄土丘陵区露水凝结时间与频率[J].应用生态学报,2017,28(8):2563-2568.

[27] 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.

[28] 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.

[29] 张静,张元明,周智彬,等.古尔班通古特沙漠生物结皮影响下土壤水分的日变化[J].干旱区研究,2007,24(5):661-668.

[30] 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].咸阳:西北农林科技大学,2016.

[31] 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.

[32] Li C J, Wang C J, Wen X X, et al. Ridge-furrow with plastic film mulching practice improves maize productivity and resource use efficiency under the wheat-maize double-cropping system in dry semi-humid areas [J]. Field Crops Research, 2017,203:201-211.

[33] 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.

[34] 齐飞,房献忠.园艺地布的生产应用[J].农村实用工程技术,2004,(3):25-27.

[35] 蓝必忠,汤庆坤,黄景滩,等.园艺地布在桑园中的应用试验[J].广西蚕业,2017,54(2):34-38.

[36] 韩小双,唐纪华,俞雪美,等.上海蔬菜[J].植物保护,2018,(2):46-47.