文章编号:1000-7601(2020)01-0190-10

毛乌素沙漠地膜-地布覆盖下土壤温度变化特征

任 涛^{1,2},贾志峰^{1,2,3},王 智^{1,2,3,4,5},卢玉东^{1,2,3},刘秀花^{1,2,3},钟 哲^{1,2}

(1. 长安大学水利与环境学院,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工程与建筑工程学院,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)

摘 要:为了研究地膜+地布相结合的覆盖方式对毛乌素沙漠地区土壤温度的影响,在毛乌素沙漠东缘风沙滩 区选取试验点,设置地膜+防草地布覆盖(MB)、防草地布覆盖(DB)以及裸地(CK)3个处理方式,开展为期1a的浅 层土壤温度原位监测试验,对比不同覆盖对温度变化规律的影响。结果表明:MB覆盖区地表下5、15、30 cm 土层土 壤的年均温度比 DB覆盖区分别高出 0.5℃、0.6℃和 0.4℃,比 CK 分别高出 1.0℃、0.8℃和 1.0℃;冻融期在同一土层 深度处均表现为 CK最长、DB次之、MB最短;同一土层深度处 3个处理的土壤温度之间存在显著性差异(P<0.05), 以 MB覆盖条件下土壤保温效果最好,CK最差;MB覆盖区在5、15、30 cm 土层土壤深度处≥5℃地积温比 DB覆盖区 分别高4.0%、4.0%和 3.0%,比 CK 分别高 8.0%、7.0%和 9.0%;降雨前、中、后,同一土层深度处土壤温度日较差以 MB 覆盖区最大,DB覆盖区次之,CK最小;近地表大气温度与土壤温度呈正相关,同一土层深度处,覆盖条件下其相关 性较大,裸地较小。试验表明地膜+地布覆盖处理保温效果明显,适合植物生长。

关键词:地膜+地布覆盖;土壤温度;毛乌素沙漠 中图分类号:S152.8 文献标志码:A

Characteristics of soil temperature change under plastic membrane-geotextile cloth mulching in Mu Us Desert land

REN Tao^{1,2}, JIA Zhifeng^{1,2,3}, WANG Zhi^{1,2,3,4,5}, LU Yudong^{1,2,3}, LIU Xiuhua^{1,2,3}, ZHONG Zhe^{1,2}

(1. School of Water and Environment, 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, California 93740, USA)

Abstract: In order to study the effect of combined mulching mode using plastic membrane and geotextile cloth on soil temperature in the Mu Us Desert, this experiment selected a site in the east edge of Mu Us Desert sand belt, had three treatments including plastic membrane plus weed-blocking geotextile ground cover (MB), weed-blocking geotextile cover (DB), and bare ground control (CK) in three groups, and carried out a one-year in-situ monitoring of shallow soil temperature, so as to compare the influence of different cover types on soil temperature variation. Results showed that the MB cover resulted in higher average annual temperatures, 0.5° C, 0.6° C, and 0.5° C higher, at 5, 15, and 30 cm of soil depths, respectively, than that under the DB cover, which was 1.0, 0.8, and 1.0° C higher than the CK condition. At the same depth, the length of the freezing-thawing period was longest for CK, intermediate for DB, and shortest for the MB. There was a significant difference in soil temperature between the three treatments at the same depth (P<0.05), and the soil temperature conservation effect was the best under

项目资助:高等学校学科创新计划"111"项目(B08039)

作者简介:任涛(1992-),男,陕西宝鸡人,硕士研究生,研究方向为水文学。E-mail:rentao229015@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

MB; At 5, 15 cm and 30 cm soil depths, the accumulated, no less than 5° C, soil temperature under MB is respectively 4%, 4%, and 3% higher than that of DB, which was respectively 8%, 7%, and 9% higher than that under CK; Before, during, and after a rainfall event, the daily range of soil temperature at the same depth was the largest in MB, followed by DB, and the smallest with CK. The near-surface air temperature and soil temperature were positively correlated. At the same depth, the correlation was greater under mulching conditions than that of the bare surface condition. This experiment showed that there was an obvious heat conservation effect under the plastic membrane and geotextile ground cover conditions, which were suitable for plant growth and provided reference for developing vegetation restoration technologies in this area.

Keywords: plastic membrane + geotextile ground cover; soil temperature change; Mu Us desert

毛乌素沙漠是中国典型的土地荒漠化地区,随 着诸多生态措施的实施,毛乌素沙漠得到有效治 理,植被生长得到极大改善^[1-2]。然而,该地区年均 降雨量少,时空分布不均,蒸发强烈,生态环境脆 弱,且已经受气候变化和人类工程活动影响。毛乌 素沙漠仍然存在许多隐患,如地下水位下降、固沙 植被减少甚至死亡等,这使植物固沙等有效措施效 果减弱[3-5]。研究不同覆盖方式对毛乌素沙漠地区 土壤温度变化的影响,有助于研究如何减少该地区 土壤水分蒸发、有效利用雨水资源,为该地区植被 恢复提供参考[6-10]。黑色地膜覆盖能够起到增温保 墒、抑制杂草生长和减少土壤蒸发等作用,在农业 和植被恢复中被广泛使用[11]。随着垄沟集雨技术 的发展,垄上覆盖地膜作为主要集雨区,垄沟处不 覆盖作为种植区,增温保墒及雨露叠加效果显著, 使干旱半干旱区土壤温度和雨水利用效率显著提 高^[12-15]。已有研究表明,土壤温度是土壤水分蒸发 的一个重要指标^[16]。同时,采用地膜+防草地布覆 盖能够有效延长地膜的使用寿命,减少地膜破碎化 对土壤的污染[17],进一步起到增温保墒的作用;而 采用防草地布覆盖也具有增温保墒的作用。因此, 本文设置地膜+防草地布覆盖(MB)、防草地布覆盖 (DB)以及裸地 CK 3 组处理方式,在毛乌素沙漠东 缘风沙滩区选取典型试验点,开展地膜+地布覆盖 条件下土壤温度原位监测试验,研究地膜+地布覆 盖条件下的土壤温度变化规律、保温效果以及气象 因子对土壤温度的影响,为该地区植被恢复技术的 发展提供参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

试验在国家林业局榆林荒漠生态站开展。榆林站(109.701°E,38.363°N)位于黄土高原和鄂尔多 斯高原过渡区,陕西省榆林市西北部(图1)。该地 海拔1114 m 左右,多年平均气温约8.4℃,多年平 均降雨量397.1 mm,多年平均蒸发量为1611 mm, 地下水水位埋深约为9 m,气候属于暖温带干旱区, 是典型的毛乌素沙漠风沙滩区^[1-2,18]。

1.2 试验设计

在试验站选取地势平坦裸地试验区,占地面积 约400(20 m×20 m)m²,平地起垄并对其做不同覆 盖处理,如图 2 所示:a.双垄表面覆盖黑色地膜,再 在其上覆盖黑色防草地布,即地膜+地布处理 (MB);b.双垄表面仅覆盖防草地布(DB);c.裸地对



图1 风驰从地珪位直

Fig.1 Geographical location of the experimental site

照(CK)。主要监测的气象因子包括降雨、露水、大 气温湿度、风速风向等。试验基于地膜易破碎、经 济成本高、土壤污染严重的问题,引入防草地布材 料,以保护地膜,可进行长期布设^[17-18]。选择地膜+ 地布覆盖及地布覆盖两种覆盖方式,其优点还在于 能够节约每年因更换地膜而造成的人力和物力损 失,也能够减少土壤污染。

试验中垄宽和沟宽取决于作物生育期降雨量 和频率、蒸散发量和需水量等,依据水量平衡原理 确定如下:

$$P \times (M + F) = F \times E_{\iota} \tag{1}$$

式中,P 为降雨量(mm);M 为膜布覆盖面积(m²);F 为沟面积(m²); E_i 为土壤蒸发和植物蒸腾的总耗水量(mm)。

注 Note:a 雨量计 Rain gauge; b 露水仪(LWS) Dew sensor; c 大气温湿度仪 Atmospheric temperature and humidity sensor; d 风速风向仪 Wind sensor; e 数据采集器 Data logger (Em50).

图 2 田间地表试验布设及监测设备

Fig.2 Field surface test layout and monitoring equipment

由公式(1) 得垄 - 沟宽度比为:

$$\frac{M}{F} = \frac{E_t - P}{P} \tag{2}$$

式中, E_i 和 P均按全年计算。为了最大限度满足植物用水需求, E_i 应按最大值 E_{i0} 处理(短草的潜在蒸腾量), E_{i0} 为生长旺盛、高度整齐、不缺水而且地面完全被覆盖的低矮青草地(草高 8 ~ 15 cm)的腾发量,单位为 mm。

气象资料表明^[19],榆林地区 *E*_{a0}为1003 mm,该 地区的年均降雨量为397.1 mm。各作物中,冬小麦耗 水最多,在此定为 *E*_{a0}。则所有作物都按此计算,可保 证沟内土壤蓄水量超出预期,防止某一时段降雨量不 足引起的干旱。因此,计算出垄、沟宽度比为1.53,本 试验中即选择垄宽100 cm,沟宽60 cm。

针对地膜+地布、地布、裸地处理分别在垄沟中 心处的垂直剖面上布设相应传感器,地下设备安装 位置如图3,距离地表5、15 cm 处布设土壤水分温 度传感器;距地表5、15、30 cm 处布设土壤水势温度 传感器。另外,在裸地区距离地表2 cm 处布设土壤 水分温度传感器。以上地表、地下设备所记录数据 均由 EM50 数据采集器自动采集记录,采集间隔为



图 3 田间地下试验布设及监测设备

Fig.3 Field underground test layout and monitoring equipment.



30 min。数据采集时间为 2017 年 11 月 1 日—2018 年 10 月 31 日。监测仪器参数及安装位置高度见表 1。

1.3 数据处理

法国的德列奥米尔于 1735 年研究发现,地积温 对植物生长起着非常重要的作用,通常将日平均温 度在 5℃以上的时期称为植物生长期,春季≥5℃的 初日即是早春植物的种植开始日^[20-22]。选取 5℃作 为生物学下限温度。地积温(≥5℃)计算公式 如下^[23]:

$$A_{s} = \sum_{i=1}^{n} (T_{i} - 5)$$
 (3)

式中, A_s 为地积温($\geq 5^{\circ}$), T_i 为当日平均地温,n指计算时间(d)。

利用 Microsoft Excel 2016 进行数据统计与分析 处理,采用 Origin 8.0 软件绘图,采用 Suffer 11 软件 绘制等值线图,采用 SPSS 25 软件进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 气象要素分析

监测期内降雨量及近地表大气温度变化如图 4。监测时段内降雨量为 634.2 mm,日最大降雨量 为 56.8 mm(2018 年 8 月 10 日),7—8 月降雨量占 总降雨量的 62.9%,2017 年 11 月—2018 年 2 月降 雨量仅为 0.4 mm,占总降雨量的 0.06%,降雨量季 节分布不均;本水文年共发生 71 次降雨,5 mm 以下 的降雨达到 36 次,占总降雨次数的 50.7%,50 mm 以上暴雨发生 1 次。该周期内近地表大气日平均最 高温度为 27.8℃(2018 年 8 月 6 日),最低温度为 -17.4℃(2017 年 12 月 16 日),平均气温为 7.9℃。

试验站风速及风向分布见图 5,4 月平均风速最大,为 1.9 m · s⁻¹,12 月风速最小,为 0.9 m · s⁻¹。风

表1 设备型号及安装

abl	le 1	l Eq	uipment	model	and	installation	
-----	------	------	---------	-------	-----	--------------	--

设备名称	型号	安装位置	精度	
Device name	Model	Installation position	Precision	
雨量计	ECBN-100	地面以上 200 cm	±0.2 mm	
Rain gauge	Leitti 100	200 cm above ground		
露水仪	LWS	地面以上 20 cm	+0.02 mm	
Dew sensor	1.40	20 cm above ground	±0.02 mm	
大气温湿度仪		地面以上 20 cm	温度 Temperature +0.1℃ · 最小相对湿度 Mini-	
Atmospheric temperature	VP-3	20 cm above ground	mum relative humidity: ±2%	
and humidity sensor		0	<u>,</u> .	
风速风向仪	Davis Cup	地面以上 240 cm	风速 Wind speed:±0.45 m·s ⁻¹ ;风向 Wind di-	
Wind sensor		240 cm above ground	rection: ±1°	
十壤水分温度传感器		距地表 2(CK) 5 15 cm 土壤深度处	+壤体积含水率 Soil moisture content・+ 3%・+	
Soil moisture and temperature senso	r GS3	2(CK), 5, 15 cm depth from the surface	 壤温度 Soil temperature · ±1℃	
r				
土壤水势温度传感器		距地表 5、15、30 cm 土壤深度处	土壤水势 Soil water potential •0.1 kPa:土壤温度	
Soil water potential and	MPS-6	5, 15, 30 cm depth from the surface of the soil	Soil temperature: ±1°C	
temperature sensor			1	
数据米集器	EM50	地面以上 100 cm	_	
Data logger		100 cm above ground		



图 4 试验期内降雨量及大气温度变化







图 5 试验期内风速及风向频率



速季节变化呈现春夏大、秋冬小的分布特点。试验 站全周期内资料统计中,静风频率占 21.2%,偏北风 占 18.9%,偏东风占 24.0%,偏南风占 14.0%,偏西 风占 21.9%。

2.2 土壤温度变化特征

土壤温度日变化特征 为了消除随机天气 2.2.1 过程的影响,对试验中同一深度同一时刻不同日期 的值进行累加,求平均值,得到3个处理下各个深度 土壤温度的日平均变化过程(图 6)。可以看出,3 个处理下各个深度处的土壤温度日变化均呈现正 弦曲线变化;同一深度处,MB的峰值、谷值出现时 间与 DB 的峰值、谷值出现时间基本一致;在不同土 壤深度处的变化呈现以下特点:距地表 5 cm 处, MB (DB)的峰值、谷值出现时间分别在 16:00 和 8: 00 左右,与 CK 相比,峰值提前 1 h,谷值滞后 1 h; MB 和 DB 的土壤温度日较差分别比 CK 高 2.9℃ 和 2.3℃。距地表 15 cm 处, MB(DB)峰值、谷值分别 出现在18:00和9:00 左右,与CK相比,峰值提前2 h,谷值滞后 2 h; MB 和 DB 的土壤温度日较差分别 比 CK 高 1.7℃ 和 1.9℃。距地表 30 cm 处, MB(DB) 峰值、谷值分别出现在 21:00、12:00 左右,与 CK 相 比,峰值提前3h,谷值滞后2h;MB与DB的土壤温 度日较差一致,均比 CK 高 0.9℃。

对不同深度处土壤温度数据进行方差分析 (SSR法),年平均土壤温度及显著性见表 2。结果 表明,在5、15、30 cm 处,MB 区年平均土壤温度分别 比 DB 区高 0.55℃、0.55℃、0.41℃,比 CK 区高 1.05℃、0.80℃、1.01℃,均表现为极显著差异;在 5 cm 和 30 cm 处,DB 区年平均土壤温度分别比 CK 区高出 0.50℃和 0.60℃,而在 15 cm 处 DB 区年平 均土壤温度高于 CK 区 0.24℃。说明同一深度处不 同处理的年平均土壤温度之间存在显著性差异,即 MB 比 DB 保温效果显著,DB 比 CK 保温效果显著。



Fig.6 Diurnal variation of soil temperature under different treatment conditions

表 2 年平均土壤温度方差分析

Table 2 Analysis of mean annual soil temperature variance

资度 D	处理 Treatment			
休度 Deptn/ cm	MB	DB	СК	
5	12.20aA	11.65bB	11.16cC	
15	12.39aA	11.83bB	11.59cB	
30	12.66aA	12.26bB	11.66cC	

注:不同小写字母表示同一深度处不同处理差异显著(P<0.05), 不同大写字母表示同一深度处不同处理差异极显著(P<0.01)。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference among different treatments at the same depth (P < 0.05), and different capital letters indicate extremely significant difference among different treatments at the same depth (P < 0.01).

3 个处理 5、15 cm 和 30 cm 土壤深度的温度时 空变化见图 7。可以看出,3 个处理各层土壤温度的 峰值和谷值都存在随深度滞后的现象,即出现"右 倾"。同一处理下,各层土壤温度日变化的位相呈 现以下特点:CK 处理下与 5 cm 相比,15 cm 处位相 滞后约 3 h,30 cm 处位相滞后约 7 h;MB 与 DB 处 理下,与 5 cm 相比,15 cm 处位相滞后约 2 h,30 cm 处位相滞后约 6 h。因此,同一处理下,各层土壤温 度日变化的位相随着深度逐层滞后,且深度越深, 滞后时间越长。

选取4个典型日代表春、夏、秋、冬四季的土壤温 度变化趋势,本文选择四季的典型日为:春季(2018 年4月17日)、夏季(2018年7月30日)、秋季(2018 年10月23日)、冬季(2018年1月15日)。四季典型 日的土壤温度随深度变化见图 8。由图可知,春季为 土壤冻融转换期,MB 区 5、15 cm 和 30 cm 的日均土 壤温度比 DB 区分别高出 0.6、0.5℃和 0.3℃,比 CK 分 别高出 2.0、1.9℃和 2.0℃;夏季与春季变化趋势基本 一致,其 MB 区 5、15 cm 和 30 cm 的土壤温度比 DB 区分别高出 0.9、0.8℃和 0.5℃,比 CK 分别高出 1.5、 1.5℃和 1.8℃;秋季是土壤由消融阶段开始进入冻结 阶段,5 cm 土壤深度处 MB 区的土壤温度比 DB 和 CK 分别高 0.7℃和 1.2℃,15 和 30 cm 土壤深度处 DB 区土壤温度较 CK 区略高,但随着深度的增加,二者 基本一致;冬季土壤全部冻结,各层温度均在 0℃以 下,其中 5 cm 土壤深度处 MB 区的土壤温度比 DB 和 CK 分别高 0.3℃和0.9℃,15 cm 和 30 cm 土壤深度处 DB 区土壤温度与 CK 区相同。





Fig.7 Spatial and temporal variation of soil temperature



图 8 典型日土壤温度与土壤深度的关系

Fig.8 Relationship between soil temperature and soil depth on a typical day

由此可知,春夏季土壤温度随着深度的增加而减 小;秋冬季土壤温度随着深度的增加而增大;由浅 层(5 cm)至深层(30 cm)夏季温度最高(28°C~ 32°)、春季次之(11°C~17°C)、秋季较低(7°C~ 11°C)、冬季最低(-6°C~3°C)。

2.2.2 土壤温度年內变化特征 3个处理 5、15 cm 和 30 cm 处的土壤温度年內变化见图 9。年內变化 整体趋势均呈现正弦曲线变化,且与近地表大气温 度变化趋势一致,峰值均在 8 月份,谷值均在 2 月 份,但由于大气温湿度、降雨等影响,土壤温度年内 变化具有波动性,3 个处理不同深度处的日变幅较 大,随着深度的增加,日变幅减小。同一处理下,随 着土壤深度的增加,振幅依次减小。而同一处理 下,随着深度的增加,痰化幅度依次减小。MB 区 5、 15 cm 和 30 cm 土层的年均温度比 DB 区分别高出 0.5℃、0.6℃和 0.4℃,比 CK 分别高出 1.0℃、0.8℃ 和1.0℃。由此可知,MB区土壤增温效果最明显。

土壤冻融是土壤水分对温度的响应,本文采用 冻结开始日为土壤温度日均值开始持续小于 0℃ 日,同理,解冻开始日为土壤温度日均值持续大于 0℃日^[24-25]。3个处理不同深度处,最早开始冻结 的是浅层 5 cm 处,最晚开始冻结的是深层 30 cm 处,二者之间相差 18 d。冻融期持续时间最长的是 CK5,为101 d,最短的是 MB30,为82 d。3 个处理 5、 15 cm 和 30 cm 处土壤层的冻结时间、解冻时间、冻融 期长度见表3。由此可知,同一处理下,随着深度的增 加,冻结开始时间推迟,冻融期长度缩短;5、30 cm 土层 处,冻融期长度表现为CK最长、DB次之、MB最短。 地积温(≥5℃)变化特征 图 10 为 3 个处 2.2.3 理不同深度处地积温(≥ 5 ℃)的对比。MB区在5、 15 cm 和 30 cm 土壤深度处地积温(≥5℃)比 DB 区 分别高 4.0%、4.0%和 3.0%,比 CK 分别高8.0%、7.0%



Fig.9 Intra-year variation of soil temperature

和 9.0%;同一处理下,随着深度的增加,地积温(≥ 5℃)逐渐减小。由此可知,MB条件下的地积温对当地植物的生长期更加有利,对植被恢复有很大帮助。

2.3 气象因子对土壤温度的影响

2.3.1 降雨对土壤温度的影响 为研究降雨对 3 个处理 5、15 cm 和 30 cm 深度处土壤温度的影响, 选取 2018 年 4 月 14 日—4 月 30 日时间段为例,4 月 22 日 18:00—23 日 3:30 累积降雨量达 35.4 mm,其余时间均无降雨发生。降雨对 3 个处理 5、 15 cm 和 30 cm 深度处土壤温度的影响见图 11。由 图可知,降雨开始前(即 4 月 20—21 日)土壤温度 出现降低现象,这取决于降雨前的天气状况等;降雨

表 3 不同处理不同深度土层的冻结、解冻、冻融期

 Table 3
 Freezing, defrost and freezing-thawing periods of different treatments and different depths layer

处理 Treatment	土壤深度 Soil depth/cm	冻结时间 Freezing time (Y-m-d)	解冻时间 Defrost time Fi (Y-m-d)	冻融期 reezing-thawing period/d
СК	5	2017-11-18	2018-02-26	101
DB	5	2017-11-18	2018-02-25	100
MB	5	2017-11-20	2018-02-25	98
СК	15	2017-11-30	2018-02-26	89
DB	15	2017-11-24	2018-02-26	95
MB	15	2017-12-01	2018-02-25	87
СК	30	2017-12-06	2018-03-03	88
DB	30	2017-12-05	2018-02-26	84
MB	30	2017-12-06	2018-02-25	82

期间土壤温度由于峰值、谷值均降低,变幅变小;降雨结束后,土壤温度逐渐升高,且变幅开始变大,说明降雨对土壤温度有一定的影响。由图还可以得出,降雨前、降雨期间和降雨后,同一深度处土壤温度日较差均以 MB 最大,DB 次之,CK 最小;同一处理下,随着土壤深度的增加,降雨的影响明显减弱。

2.3.2 近地表大气温度对土壤温度的影响 近地 表大气温度与3个处理5、15 cm和30 cm深度处土 壤温度见图12,由图可得,近地表大气温度与3个 处理不同深度处的土壤温度均呈正相关(R²=0.901 ~0.971),同一深度处,覆盖条件下大气温度与土壤



图 10 不同处理地积温(≥5℃)对比

Fig.10 Different processing accumulated greater than 5℃ temperature contrast analysis diagram



Fig.11 Influence of rainfall on soil temperature



图 12 近地表大气温度与土壤温度的相关性

Fig.12 Correlation between near-surface atmospheric temperature and soil temperature

温度的相关性最大,CK 最小,说明近地表大气温度 显著影响土壤温度,对覆盖条件下土壤温度的影响 较大,CK 较小。同一处理下,随着深度的增加,近 地表大气温度与土壤温度相关性减小,即表明近地 表大气温度对土壤温度的影响随着深度的增加逐 渐减弱。

3 讨 论

地膜覆盖有增温保墒的作用,对旱区植物生长 有益^[26-27]。本研究表明,同一深度处,无论覆盖还 是裸地,土壤温度日较差以 MB 最大,DB 次之,CK 最小;同一处理,比较5、15 cm 和 30 cm 土壤深度处 土壤温度的日变化,随着深度的增加,峰值、谷值均 有所滞后,这与国内许多学者的研究结果基本一 致。韩璐等^[28]、权晨等^[29]、赵逸舟等^[30]、赵维俊 等^[31]分别对柴达木盆地、祁连山林草复合流域、藏 北高原、青藏高原高寒湿地的土壤温度变化特征进 行研究得出,随着土层深度的增加,振幅减小,位相 逐层滞后,具有明显的时滞效应。各层土壤温度日 变化的位相随着深度逐层滞后,且深度越深,滞后 时间越长;涂钢等^[32]研究发现东北半干旱区退化草 地的浅层土壤,20 cm 土壤层比 10 cm 土壤层温度 后 0.5~1.5 h,5 cm 土壤层比 2 cm 土壤层滞后 0.5~ 1.0 h,比较可见,虽然不同下垫面上土壤温度变化 趋势一致,但变化的振幅、位相及其滞后时间均有 所不同。对不同深度处 3 个处理的土壤温度进行方 差分析(SSR 法, P<0.05),结果表明 3 个处理 5、15、 30 cm 处,均表现为 MB 比 DB 处理保温效果显著, DB 比 CK 处理保温效果显著;吴贤忠等^[33]研究发 现地膜覆盖可以起到很好的保温效果。典型日变 化表明,春夏季土壤温度随着深度的增加而减小, 秋冬季土壤温度随着深度的增加而增大。杜宏娟 等^[34]在红寺堡地区研究发现冬季酿酒葡萄根系层 土壤温度随着深度的增加而升高,与本研究的冬季 变化趋势一致。

土壤温度年内变化在不同处理不同深度处均 表现为正弦曲线的形式,MB处理 5、15 cm 和 30 cm 的年均土壤温度比 DB 区分别高出 0.5° 、 0.6° 和 0.4° ,比 CK 分别高出 1.0° 、 0.8° 和 1.0° ; Gu 等^[35]发现在生物膜未分解前,生物膜覆盖在 5、15 cm 和 25 cm 土壤深度处的平均土壤温度比裸地对 照高 1.3° 、 1.0° 和 0.9° ,比 PE 材料地膜覆盖低 0.2° 、 0.3° 和 0.2° 。由此可得,以裸地为对照,无 论是 PE 材料地膜、未分解的生物膜、地膜+防草地 布还是仅防草地布覆盖,土壤温度均显著升高。 Cuello 等^[36]研究发现,覆盖地膜可以显著提高土壤 温度约 2℃。本研究 3 个处理均在垄沟中心处垂直 剖面上布设传感器,因此,由于垄沟处无覆盖,土壤 保温效果与 Cuello 等研究结果相比,增温较小。涂 钢等^[32]研究发现土壤冻融期与下垫面、气候等因素 有关,本研究发现同一深度处,3 个处理冻融期以 CK 最长、DB 次之、MB 最短,而同一处理下,随着深 度的增加冻融期长度减小。吴贤忠等^[33]在陕西省 米脂县研究发现年覆盖地膜可以缩短土壤冻融期 长度,促进作物提前发芽,延长其生长期。因此,土 壤冻融不仅与下垫面有关,也与土壤深度有关。

MB处理在 5、15、30 cm 土壤深度处地积温(≥ 5℃)比 DB 处理分别高 4.0%、4.0%和 3.0%,比 CK 分别高 8.0%、7.0%和 9.0%,这表明 MB 处理下土壤 的地积温效果最明显,对该地区的植被生长有一定 的促进作用;而同一处理下,随着深度的增加,地积温 (≥5℃)逐渐减小。侯慧芝等^[37]研究发现马铃薯在 全膜覆盖垄沟种植下,地积温随着深度的增加逐渐减 小,但全膜覆盖条件下有效积温比露地平作显著增 加,与本文对地积温的研究表现出一致的结果。

土壤温度的影响因素很多,比如地表覆盖、土 壤湿度、大气相对湿度、大气温度、降雨等^[38-39]。本 研究发现降雨前、降雨期间和降雨后,同一深度处 土壤温度日较差以 MB 处理最大,DB 次之,CK 最 小;同一处理下,随着深度的增加,降雨的影响明显 减弱。降雨期间各个处理的土壤温度与降雨前相 比均有下降趋势,说明降雨对土壤温度有一定的影 响,但对不同处理下土壤温度的影响差异性未达显 著水平。

近地表大气温度与土壤温度的相关性较为显著(R²=0.901~0.971),同一深度处,覆盖条件下近地表大气温度与土壤温度相关性最大,裸地最小,即覆盖条件下近地表大气温度对土壤温度的影响较大;同一处理下,随着深度的增加,其相关性减弱。这与安可栋等^[40]研究结果一致。

4 结 论

1)无论覆盖还是裸地,土壤温度日变化、年内 变化均呈正弦曲线状,以地膜+地布覆盖区振幅最 大,地布覆盖区次之,裸地最小;同一深度处3个处 理的日均土壤温度之间存在显著性差异(P<0.05), 以地膜+地布覆盖条件下土壤保温效果最好。

2) 地膜+地布覆盖区 5、15 cm 和 30 cm 土层的 年内平均温度比地布覆盖区分别高出 0.5℃、0.6℃ 和 0.4℃, 比裸地分别高出 1.0℃、0.8℃和 1.0℃。地 膜+地布覆盖可以有效缩短土壤冻融期;同一处理下,随着深度的增加,土壤冻结时间推迟,冻融期缩短;同一深度处(分别在5、15、30 cm 深度),冻融期 裸地最长、地布覆盖次之(较裸地缩短1、-6、4 d)、 地膜+地布覆盖最短(较裸地缩短3、2、6 d)。

3)地膜+地布覆盖区在 5、15 cm 和 30 cm 土壤深 度处地积温(≥5℃)比地布覆盖区分别高4.0%、4.0% 和 3.0%,比裸地分别高 8.0%、7.0%和9.0%,这表明地 膜+地布覆盖下土壤的地积温效果最明显。同一处理 下,随着深度的增加,地积温(≥5℃)逐渐减小。

4)降雨前、中、后,同一深度处土壤温度日较差 以地膜+地布覆盖区最大,地布覆盖区次之,裸地最 小;同一处理下,随着深度的增加,降雨的影响明显 减弱。近地表大气温度与土壤温度的相关性较为 显著(*R*²=0.901~0.971),同一深度处,覆盖条件下 其相关性最大,裸地最小。

致谢:感谢长安大学研究生院、长安大学水与发展研究 院、国家林业局榆林荒漠生态站对本试验项目的支持; 感谢王浩、苏凤梅对试验的关注与现场帮助。

参考文献:

- [1] 孙建国,王涛,颜长珍.气候变化和人类活动在榆林市荒漠化过程中的相对作用[J].中国沙漠,2012,32(3):625-630.
- [2] 高广磊.盐池沙地不同固沙措施下土壤质量特征及其评价[D].北 京:北京林业大学,2014.
- [3] 崔利强,吴波,杨文斌,等.毛乌素沙漠东南缘不同植被盖度下土壤 水分特征分析[J].干旱区资源与环境,2010,24(2):177-182.
- [4] Unep. Link desertification solutions to biodiversity [M]. Nairobi: Climate Change and Water Issues, 1998.
- [5] Henry N, Le H. Restoration and rehabilitation of arid and semiarid mediterranean ecosystems in North Africa and West Asia: a review[J]. Arid Land Research and Management, 2000, 14(1):3-14.
- [6] 冯伟.毛乌素沙漠东北缘土壤水分动态及深层渗漏特征[D].北京: 中国林业科学研究院,2015.
- [7] Wang X P, Ronny B, Li X R, et al. Water balance change for a revegetated xerophyte shrub area [J]. Hydrological Sciences Journal, 2004, 49(2):283-295.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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):1820-1823.
- [12] Boers T M, Zondervan K, Ben-Asher J. Micro-catchment-water-harvesting (MCWH) for arid zone development [J]. Agric. Water Manage, 1986, 12(1-2): 21-39.