排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2016 年 6 月 June 2016 | 第 34 卷 第 6 期 Vol. 34 No. 6

doi: 10.3969/j.issn.1674-8530.15.0086

不同覆盖模式对土壤水分蒸发的影响

赵文举，马宏，郁文，豆品鑫
(兰州理工大学能源与动力工程学院，甘肃 兰州 730050)

赵文举

摘要： 为了揭示不同覆盖模式抑制土壤水分蒸发的效果，通过模拟试验，对不同覆盖模式抑制土壤水分蒸发的效果进行了分析. 试验设置无覆盖(CK)、覆砂(S)、覆砂+覆膜(SM)、覆秸秆+覆膜(JM)和覆秸秆+覆砂(JS)5 种模式. 结果表明：土壤表层不同覆盖处理的土壤日蒸发量不同，在蒸发初期，土壤水分蒸发量从大到小依次为 CK，JS，JM，S，SM，之后基本保持 CK，JS，S，SM，JM 的变化趋势. 当有降雨发生时，土壤水分蒸发量从大到小由 CK，JM，SM，JS，S 变为 CK，JS，S，SM，JM 的趋势；土壤表层的不同覆盖处理可有效减少土壤水分的蒸发，CK，JS，JM，S，SM 处理的土壤水分累积蒸发量分别为 1823.6，712.2，473.3，450.6，375.1 g，与对照相比，CK，JS，JM，S，SM 处理的土壤水分累积蒸发量分别减少了 60.9%，74.0%，75.3%，79.4%；在整个蒸发过程中，不同覆盖模式下土壤水分累积蒸发量与时间的关系符合 $W=at^b$，综合分析可知，覆砂(S)处理是最符合试验区域的覆盖模式.

关键词： 土壤水分；累积蒸发量；覆秸秆；覆砂；覆膜
中图分类号： S152.7 **文献标志码：** A **文章编号：** 1674-8530(2016)06-0539-06

赵文举，马宏，郁文，等. 不同覆盖模式对土壤水分蒸发的影响[J]. 排灌机械工程学报，2016，34(6)：539-544.
ZHAO Wenju, MA Hong, YU Wen, et al. Effect of different mulching modes on soil moisture evaporation[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME), 2016, 34(6): 539-544. (in Chinese)

Effect of different mulching modes on soil moisture evaporation

ZHAO Wenju, MA Hong, YU Wen, DOU Pinxin
(School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: To reveal the effect of restraining soil water evaporation with different mulching models, through simulation test, the effect of restraining soil water evaporation was analyzed. Five modes were set up including bare land (CK), sand mulching (S), sand and plastic film mulching (SM), straw and plastic film mulching (JM) and straw and sand mulching (JS). The results show that the soil daily evaporation capacity is different with the different mulching modes of soil surface. In the early evaporation, the soil moisture evaporation capacity is CK > JS > JM > S > SM, then the change trend becomes CK > JS > S > SM > JM. When rainfall occurs, the change of soil moisture evaporation capacity is from CK > JM > SM > JS > S to CK > JS > S > SM > JM. The different mulching models can effectively reduce soil water evaporation. Soil water cumulative evaporation capacity of bare land, straw and sand mulching, straw and plastic film mulching, sand mulching, sand and plastic film mulching is respectively 1 823.6, 712.2, 473.3, 450.6 and 375.1 g, soil water cumulative evaporation capacity of straw and sand mulching, straw and plastic film mulching, sand mulching, sand and plastic film mulching decreases by 60.9%, 74.0%, 75.3% and 79.4% respectively, compared with CK. In the

收稿日期： 2015-04-20；**网络出版时间：** 2016-06-12
网络出版地址： http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20160612.1026.012.html
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(51269008)；兰州理工大学红柳青年教师培养计划资助项目(Q201310)
作者简介： 赵文举(1981—)，男，甘肃永昌人，副教授，博士(wenjuzhao@126.com)，主要从事农业水土工程研究.
马宏(1989—)，男，甘肃金塔人，硕士研究生(573660320@qq.com)，主要从事农业水土工程研究.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

whole evaporation process, the relationship between soil water cumulative evaporation capacity and time under different mulching models is $W = at^b$. By comprehensive analysis, sand mulching is a more reasonable mulching model in the test area.

Key words: soil moisture; cumulative evaporation capacity; straw mulching; sand mulching; plastic film mulching

土壤水分蒸发是地表水分和水文循环中的一个重要过程,其导致的土壤水分散失在干旱半干旱地区占到相当大的比例[1]. 在干旱半干旱地区,土壤表面的水分蒸发对于农业生产是一个重要的水分损失[2]. 为了提高干旱半干旱地区作物对水分的利用率以及防止或减少由土壤表面蒸发引起的水分的无效散失,长期以来,农业生产中通常采用砂石覆盖[3-4]、秸秆覆盖[5-6]、塑料薄膜覆盖[7]等在土壤表面形成一个保护层,来减少或降低土壤水分的无效蒸发,提高作物对水分的有效利用[8-9]. 近年来,国内外众多学者通过覆盖砂石、作物秸秆、塑料薄膜等对土壤水分蒸发的影响进行了大量的研究. MODAIHSH 等[10]利用土柱研究了不同厚度、不同粒径的砂石覆盖对土壤水分蒸发的影响,指出砂石覆盖厚度和粒径大小对蒸发的抑制作用有较大的差异; FEKRI 等[11]研究了风沙和陶粒覆盖对减少土壤表面蒸发的影响,指出风沙和陶粒覆盖均可减少土壤表面蒸发,而陶粒覆盖能更有效减少土壤表面蒸发,其中最有效的覆盖厚度为 3 cm; LI 等[12]研究了秸秆覆盖和地膜覆盖对水分蒸发损失的影响,得出地膜覆盖的保水作用更好,但在炎热的夏天,覆盖很难抑制土壤水分损失; BEZBORODOV 等[13]认为土表进行地膜覆盖可保温增温,保水抑盐,改善耕层土壤水热状况,促进作物增产; 原翠萍等[14]研究了砂石覆盖粒径对土壤蒸发的影响,指出地面砂石覆盖对蒸发的抑制作用与砂石粒径密切相关,砂石覆盖的粒径越大,对蒸发的抑制能力越低,并得出砂石覆盖条件下土壤累积蒸发量与时间呈近似线性关系; 李玲玲等[15]研究了免耕秸秆覆盖对旱作农田土壤水分的影响,指出免耕秸秆覆盖对表层土壤水分含量影响较大,在作物播种期可以减少表层水分蒸发,显著增加表层土壤含水量,但随着生育进程的推进,秸秆覆盖的抑蒸效果逐渐减弱; 李毅等[16]通过覆膜开孔条件下斥水性层状土壤蒸发试验,得出全覆膜的累积蒸发量 - 时间曲线明显较低,相应的蒸发 10 d 后土壤水分剖面也与初始水分剖面接近,对于塿夹砂尤其明显. 覆膜开孔率增加时,同条件下 2 种层状土的累积蒸发量与全覆膜相比均有明显增加,表明一旦覆膜开孔,覆膜保墒效应便明显降低. 上述国内外学者在研究土壤水分蒸发方面已经积累了许多值得学习和借鉴的成果,但针对不同覆盖模式对土壤水分蒸发影响的对比研究还较少. 因此,文中通过模拟试验,研究不同覆盖模式对土壤水分蒸发的影响,得出更符合在西北干旱半干旱地区推广的抑制土壤水分蒸发的覆盖模式,并为降低或减少中国西北地区土壤水分的无效蒸发提供理论指导,同时对于实现水分的科学化管理和提高作物产量均具有重要的现实意义.

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验设在景泰县兰州理工大学试验研究基地,该基地位于甘肃省中部的景泰县,海拔高度平均为 1 596 m,地处黄土高原与腾格里沙漠的过渡地带,属温带干旱大陆性气候,主要特点是冬冷夏热,昼夜温差较大,干旱少雨,蒸发量大,风沙日数较多,日照时数长,热量资源丰富. 土壤类型主要为洪积灰棕荒漠土和灰钙土. 多年平均降雨量为 185.0 mm,多集中在 7—9 月,占全年降雨量的 61.4% 左右,多年平均蒸发量约为 3 038 mm,约为降雨量的 16 倍. 无霜期为 141 d 左右,年平均气温为 8.2 ℃,极端最高温为 36.6 ℃,极端最低温为 -27.3 ℃.

1.2 试验材料

供试土壤采自试验基地附近的休闲土壤,为砂壤土,取自表层 0 ~ 30 cm,土壤经自然风干(风干后土壤初始含水率为 0.75%)、碾碎、去除杂质后,过 2 mm 筛. 试验用的秸秆为当年收割晾干并粉碎为粒径 3 ~ 5 cm 的小麦秸秆; 试验用砂为试验基地附近的压砂地表层的覆盖砂石; 试验用膜为黑色塑料薄膜. 供试土壤和砂石的颗粒组成见表 1.

表 1 供试土壤、砂石的颗粒组成

Tab. 1 Granule constitution of tested soil and sand

d_t/mm	<2.000	<1.000	<0.050	<0.010	<0.001
ω_t/%	100	99.46	80.26	23.13	10.06
d_s/mm	<10.00	<5.00	<2.50	<1.25	<0.63
ω_s/%	100	94.51	79.58	59.70	34.62

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1 中 d_t 为土壤粒径大小，w_t 为其质量分数；d_s 为砂石粒径大小，w_s 为其质量分数.

1.3　试验方法及内容

试验蒸发桶采用高为 31 cm，上部直径为 22 cm，下部直径为 18 cm 的塑料桶，桶底部均匀钻 9 个 1 cm 大小的孔，用纱布垫在桶底以防止土壤从孔中漏出. 共准备 15 个蒸发桶，每个蒸发桶中分层装入风干土，控制装土容重为 1.30 g/cm^3，装土高度为 15 cm，共装土 5.767 kg. 每 3 个蒸发桶作为 1 组试验，试验共设计 5 种覆盖形式，分别为无覆盖(CK)、覆砂(S)、覆砂 + 覆膜(SM)、覆秸秆 + 覆膜(JM) 和覆秸秆 + 覆砂(JS) 等. 覆砂(S) 是在土壤表层覆盖 10 cm 厚的砂石；覆砂 + 覆膜(SM) 是先在土壤表层覆盖 10 cm 厚的砂石，再覆盖一层膜；覆秸秆 + 覆膜(JM) 是先在土壤表层覆盖 3 cm 厚的秸秆，再覆盖一层膜；覆秸秆 + 覆砂(JS) 是先在土壤表层覆盖 3 cm 厚的秸秆，再覆盖 10 cm 厚的砂石. 每个处理重复 3 次. 每个蒸发桶中注水至底部均有水渗出，放置 12 h 等水渗流基本完成之后，进行称重并做标记，记录初始质量，将桶放置在户外空旷处，在自然条件下进行蒸发试验，蒸发从 2014 年 8 月 9 日开始到 8 月 23 日结束，共进行 15 d，在 8 月 16 日早晨在进行称重前做一次模拟降雨，降雨强度为 18 mm/h，降雨量为 6 mm，历时 20 min. 每天早上 7:00 和 19:00 进行称重，称重采用量程为 30 kg、感度为 0.001 kg 的电子秤.

1.4　试验期间气象条件

在整个试验过程中，对试验基地气象条件包括温度、光照、风速和湿度进行连续的观测. 观测结果显示，8 月 10，11，14，22 日的气温较低，湿度较大，其他时段内的气温和湿度变化较平稳；风速在蒸发时段内较平稳；光照除 8 月 9，12，13，15 日较强外，其他时段内较平稳. 同时，为避免降雨对试验造成影响，降雨时在试验区进行遮雨棚处理，防止水分的进入.

2　结果与分析

2.1　不同覆盖模式对土壤蒸发过程的影响

2.1.1　对土壤日蒸发量的影响

不同覆盖模式下土壤日蒸发量 m 连续 14 d 的动态变化过程如图 1 所示，第 8 天早晨模拟降雨一次. 由图 1 可看出，1—7 d 这 4 种覆盖处理和对照处理的土壤蒸发变化趋势基本一致，只是在变化幅度上存在差异，CK 处理的土壤蒸发量变化起伏最明显，进行不同覆盖模式的处理，蒸发量变化趋势趋于平缓，土壤蒸发量都处于 60 g/d 以下(第 1 天除外). 在蒸发开始的第 1 天，土壤蒸发量从大到小依次为 CK，JS，JM，S，SM，之后的土壤蒸发量基本保持为 CK，JS，S，SM，JM. 在模拟降雨后的第 1 天(第 8 天)，土壤蒸发量从大到小依次为 CK，JM，SM，JS，S，这是因为在有覆膜处理的模式下，降雨的大部分都聚集在薄膜表面上，没有入渗到土壤中，对降雨的利用率很低，从而有覆膜处理的土壤在降雨后的蒸发量都较大；之后土壤蒸发量又基本保持为 CK，JS，S，SM，JM.

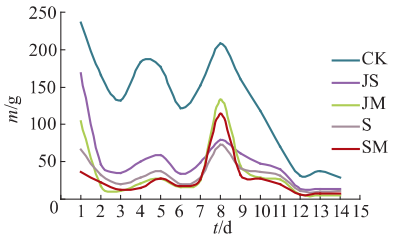

图 1　不同覆盖模式下土壤日蒸发量变化过程

Fig. 1　Changing process of daily soil evaporation capacity under different mulching modes

由图 1 进一步可以看出，在 1—11 d 内，4 种覆盖处理与对照处理的土壤蒸发量在变化幅度上存在较大的差异；在之后的 12—14 d 内，变化幅度的差异变得较小. 因此，土壤水分蒸发过程可分为较明显的两个阶段：第一阶段土壤水分蒸发速度由土壤表层覆盖物的特性决定，该阶段土壤蒸发量大于地表的蒸发量；第二阶段对土壤水分蒸发速度起主要影响的是土壤含水率. 这主要是在蒸发初期，由于受大气的影响，各处理水分蒸发迅速，土壤含水率迅速减小；之后，土壤的蒸发速度由土壤含水率或土壤水汽扩散能力控制，蒸发速度迅速降低. 分析各处理间日蒸发量的差异，不同覆盖处理的日蒸发量小于 CK，说明土壤表层进行覆盖处理有抑制土壤水分蒸发的作用. 在各覆盖处理间日蒸发量差异不具有统计学意义，尤其是 JM，S，SM 这 3 种覆盖处理间日蒸发量差异不明显，考虑到试验区气候特征以及该地区砂石资源容易获取的特点，在该地区覆盖砂石是抑制土壤水分蒸发更合理的覆盖模式.

2.1.2　对土壤累积蒸发量的影响

不同覆盖模式下土壤累积蒸发量 M 连续 14 d 的动态变化过程如图 2 所示. 由图 2 可以看出，在试验过程中，CK 的土壤累积蒸发量明显大于覆盖处

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

理的，而累积蒸发量的变化最终趋于稳定. 蒸发初期，累积蒸发量的上升趋势较明显，不同覆盖处理之间虽有差异，但土壤累积蒸发量的变化趋势基本一致. 经差异性检验分析可知，CK 与不同覆盖处理差异均具有统计学意义. 在整个蒸发过程的两个阶段，土壤的累积蒸发量表现为 CK 大于不同覆盖处理的，CK 的累积蒸发量为 1 823.6 g，JS，JM，S，SM 处理的累积蒸发量分别为 712.2，473.3，450.6，375.1 g. 与 CK 相比，JS，JM，S，SM 处理的累积蒸发量分别减小了 60.9%，74.0%，75.3%，79.4%，说明土壤表层进行覆盖对土壤蒸发均有一定的抑制作用，抑制作用从大到小为 SM，S，JM，JS. 通过显著性检验可知，不同覆盖处理对土壤累积蒸发量的抑制作用均为在 0.01 水平下具有统计学意义. 由数据可知，JM，S，SM 覆盖处理对土壤水分累积蒸发量影响的差异较小，而从土壤水分累积蒸发量以及试验区气候特征和该地区砂石资源容易获取的角度考虑，土壤表层进行单纯的覆砂处理是更符合试验区的覆盖模式.

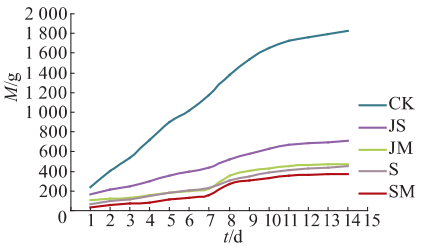

图 2 不同覆盖模式下土壤累积蒸发量变化过程

Fig. 2 Changing process of soil moisture cumulative evaporation capacity under different mulching modes

2.2 不同覆盖模式下土壤蒸发昼夜变化

在 2 种典型天气条件下不同覆盖处理的土壤水分累积蒸发量昼夜变化情况见表 2，表中 m_d，m_n，M 分别为白天蒸发量、夜间蒸发量和蒸发总量.

表 2 不同覆盖模式下土壤蒸发昼夜变化

Tab. 2 Daily changes of soil evaporation under different mulching modes

g

覆盖类型	2014 年 8 月 9 日(晴天)			2014 年 8 月 11 日(阴天)		
	m_d	m_n	M	m_d	m_n	M
CK	194.2	42.6	236.8	111.2	21.3	132.5
JS	145.0	22.8	167.8	26.8	8.2	35.0
JM	85.2	19.4	104.6	7.3	3.8	11.1
S	50.8	15.2	66.0	13.2	6.9	20.1
SM	23.6	12.5	36.1	4.9	2.7	7.6

由表 2 可以看出，对于不同覆盖模式下土壤水分蒸发的昼夜变化存在着差异. 在晴朗天气条件下，不同覆盖处理白天的土壤蒸发量之间的差异较明显，不同覆盖处理的昼夜蒸发比例分别为 21.9%，15.7%，22.8%，29.9%，53.0%；在阴天条件下，不同覆盖处理白天的土壤蒸发量之间的差异不明显(CK 除外)，不同覆盖处理的昼夜蒸发比例分别为 19.2%，30.6%，52.1%，52.3%，55.1%，阴天下的昼夜蒸发比例均比晴天下的大(CK 除外). 进一步分析表 2 可知，在阴天下，覆砂处理的白天和夜间蒸发量反而高于覆秸秆和膜.

3 不同模式下土壤水分蒸发变化规律

对不同覆盖模式处理下 1—7 d、8—14 d 和 1—14 d 的土壤水分累积蒸发量与时间的关系利用线性方程($W = a + bt$)、指数方程($W = at^b$)和对数方程($W = a + b\ln t$)进行拟合，所得拟合参数见表 3. 由表 3 可知，在 1—7 d 中，由这 3 种方程拟合所得的相关系数 R^2 值均达极显著水平，但是比较 3 个拟合方程式可知，$W = a + bt$ 的拟合效果最好，即在 1—7 d 中土壤水分累积蒸发量与时间符合线性关系. 当 $t = 1$ 时，$W = a + b$，而 $a + b$ 值为 $t = 1$ 即第 1 天时的土壤水分累积蒸发量，而 $a + b$ 值从大到小依次为 CK，JS，JM，S，SM，这与图 2 曲线中 1—7 d 所显示的结果相同；在 8—14 d 中，即在 1 次模拟降雨后，利用 3 种方程对土壤水分累积蒸发量与时间进行拟合比较可知，$W = a + b\ln t$ 的拟合效果最好，即有降雨时，土壤水分累积蒸发量与时间更符合对数关系；在 1—14 d 中，利用 3 种方程对土壤水分累积蒸发量与时间进行拟合比较可知，$W = at^b$ 的拟合效果最好，即整个试验过程中，用 $W = at^b$ 方程来描述土壤水分蒸发过程. 当 $t = 1$ 时，$W = a$，可知方程式中的参数 a 为 $t = 1$ 即第 1 天时的土壤水分累积蒸发量，而 a 值从大到小依次为 CK，JS，JM，S，SM，这与图 2 中所显示的结果相同.

由方程 $W = at^b$ 可得，土壤水分蒸发速率为 $V = \mathrm{d}W/\mathrm{d}t = abt^{(b-1)}$，当 $t = 1$ 时，$\mathrm{d}W/\mathrm{d}t = ab$，说明 ab 值为 $t = 1$ 即第 1 天时的土壤水分蒸发速率，由表 3 所处理的数据可知，ab 值从大到小依次为 CK，JS，JM，S，SM，这与图 2 中显示的结果相同.

由 $V = \mathrm{d}W/\mathrm{d}t = abt^{(b-1)}$ 可知，土壤水分蒸发速率与 ab 和 $t^{(b-1)}$ 有关，当 ab 和 $t^{(b-1)}$ 增大时，土壤水分蒸发速率 $V = \mathrm{d}W/\mathrm{d}t$ 也增大，而知当 $t \geqslant 1$ 时，$t^{(b-1)}$ 与 $b - 1$ 是呈正相关关系. 因此，在 $t \geqslant 1$ 时，土壤水分蒸发速率与 ab 和 $b - 1$ 的大小有关，即 ab 和 $b - 1$ 值增大，土壤水分蒸发速率也增大. 由表 3 可知，不

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

同覆盖处理的 ab 和 b－1 为常数，各处理 ab 和 $b-1$ 值见表 4. 由表 4 可知，不同覆盖处理的 ab 值均远小于 CK 的，则说明土壤表层进行覆盖处理可明显降低土壤水分初期的蒸发速率.

表 3　不同覆盖模式下土壤累积蒸发量与时间的拟合参数

Tab. 3　Fitting parameters of soil water cumulative evaporation capacity and time under different mulching models

时段	覆盖类型	$W=a+bt$			$W=at^b$			$W=a+b\ln t$		
		a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2
1—7d	CK	83.771	156.857	0.997 4	219.136	0.861	0.997 1	129.159	477.913	0.917 1
	JS	119.257	46.082	0.996 0	145.288	0.557	0.975 0	133.910	139.321	0.898 7
	JM	79.643	20.057	0.986 4	89.399	0.445	0.930 4	87.436	59.477	0.848 4
	S	38.300	28.179	0.995 6	57.998	0.710	0.987 9	46.873	85.510	0.906 4
	SM	13.771	19.921	0.986 0	29.056	0.851	0.976 3	21.151	59.370	0.858 5
8—14d	CK	901.075	69.732	0.867 2	562.762	0.455	0.897 4	－160.257	767.950	0.920 4
	JS	304.564	30.707	0.892 1	185.697	0.519	0.916 5	－160.508	337.210	0.940 0
	JM	233.757	18.357	0.828 0	145.683	0.459	0.862 1	－47.812	203.076	0.889 0
	S	141.646	23.218	0.907 3	87.217	0.634	0.924 7	－208.764	254.448	0.951 2
	SM	158.532	16.346	0.881 9	96.553	0.525	0.907 1	－89.552	179.722	0.932 1
1—14d	CK	207.601	130.942	0.960 4	268.475	0.757	0.977 0	－63.653	696.530	0.928 0
	JS	128.470	45.933	0.977 2	126.678	0.672	0.980 0	45.035	237.821	0.890 2
	JM	39.546	34.431	0.928 8	53.828	0.857	0.924 3	－11.568	171.919	0.780 8
	S	27.870	32.821	0.976 4	47.984	0.873	0.976 8	－27.110	167.358	0.860 2
	SM	－15.370	30.836	0.938 1	24.417	1.077	0.937 3	－62.991	154.993	0.800 3

表 4　不同覆盖处理 ab 和 $b-1$ 值

Tab. 4　ab and $b-1$ values under different mulching treatments

覆盖类型	CK	JS	JM	S	SM
ab	203.236	85.128	46.131	41.890	26.297
$b-1$	－0.243	－0.328	－0.143	－0.127	0.077

虽然不同覆盖处理的 ab 值均远小于 CK 的，但影响土壤水分蒸发速率的另一个因子 $t^{(b-1)}$ 却是覆盖处理的大于 CK 的（除 JS 处理外，因为在水分蒸发过程中，秸秆层与土壤导水率差异较大，水分运动不能进入秸秆层. 随着秸秆层下层土壤水分含量不断增大，直至某一临界含水量，土壤吸力值开始小于与之相邻的秸秆层的吸力值时，秸秆层可吸取部分水分. 然而，秸秆层内部毛管作用极其微弱，毛管水浸润部分秸秆后，由于吸力不足而断裂，从而阻断了毛管水上升，致使 JS 处理的土壤水分蒸发速率减小幅度较大，这与赵永敢等[17]研究的秸秆隔层具有阻截水分上升的结果相一致，而随着时间的增加，与对照处理相比，其相对增加量更大，所以随着时间的增加，覆盖处理的土壤水分蒸发速率与 CK 间的差距会逐渐缩小，而缩小差距所用时间越长的覆盖模式，则说明该模式控制水分蒸发的效果越明显.

由表 4 中 ab 和 $b-1$ 值进一步分析可知，缩小覆盖处理与 CK 之间土壤水分蒸发速率的差距所用时间从大到小依次为 SM，S，JM，JS，而 SM 与 S 处理与 CK 之间土壤水分蒸发速率的差距所用时间较接近，从而这 2 种覆盖处理控制土壤水分蒸发的效果都较好，这与图 2 中显示的结果相同. 从土壤水分蒸发速率及试验区气候等因素综合考虑，土壤表层进行砂石覆盖处理是更符合该地区气候与经济条件的覆盖模式.

4　结　论

1）土壤表层进行覆盖处理可明显减少土壤水分蒸发量，不同覆盖处理的土壤日蒸发量不同. 在蒸发初期，土壤蒸发量从大到小依次为 CK，JS，JM，S，SM，之后基本保持 CK，JS，S，SM，JM 的变化趋势；当有降雨发生时，由于覆膜处理对降雨的利用率低和较好的保水性能，土壤水分蒸发量由 CK，JM，SM，JS，S 变为 CK，JS，S，SM，JM 的趋势.

2）覆盖处理可较好地抑制土壤水分蒸发，在整个蒸发过程中，CK，JS，JM，S，SM 处理的土壤水分累积蒸发量分别为 1 823.6，712.2，473.3，450.6，375.1 g，与对照相比，JS，JM，S，SM 处理的土壤水分累积蒸发量分别减少了 60.9%，74.0%，75.3%，79.4%. 相比可知，JM，S，SM 处理对土壤水分蒸发的抑制效果相接近，再考虑到试验区气候特征以及该地区砂石资源易获取的特点，在试验所在区域采用单纯的砂石覆盖是抑制土壤水分蒸发最经济有效的覆盖模式.

3）不同覆盖处理下，土壤水分方程 $W=at^b$ 的拟合最好，更符合土壤水分累积蒸发量与时间的变化关系. 式中，参数 a 为 $t=1$ 即第 1 天时的土壤水分累积蒸发量，由式 $\mathrm{d}W/\mathrm{d}t=abt^{(b-1)}$ 知，式中 ab 表示 $t=1$ 即第 1 天时的土壤水分蒸发速率.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

参考文献(References)

[1] 朱元骏,邵明安. 钙结石含量对土壤水分蒸发影响的模拟试验[J]. 农业工程学报,2010,26(2):77-81.
ZHU Yuanjun, SHAO Ming´an. Simulation experiments on soil moisture evaporation affected by calcic nodule contents[J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(2):77-81. (in Chinese)

[2] 张军红,吴波. 干旱、半干旱地区土壤水分研究进展[J]. 中国水土保持,2012(2):40-43.
ZHANG Junhong, WU Bo. Progress in research on soil moisture in arid, semi arid area[J]. Soil and water conservation in China, 2012(2):40-43. (in Chinese)

[3] WANG Y, XIE Z, MALHI S S, et al. Effects of gravel-sand mulch, plastic mulch and ridge and furrow rainfall harvesting system combinations on water use efficiency, soil temperature and watermelon yield in a semi-arid Loess Plateau of northwestern China[J]. Agricultural water management, 2011,101(1):88-92.

[4] LU Haishen, YU Zhongbo, HORTON R, et al. Effect of gravel-sand mulch on soil water and temperature in the semiarid loess region of Northwest China[J]. Journal of hydrologic engineering, 2013,18(11):1484-1494.

[5] 孙博,解建仓,汪妮,等. 不同秸秆覆盖量对盐渍土蒸发、水盐变化的影响[J]. 水土保持学报,2012,26(1):246-250.
SUN Bo, XIE Jiancang, WANG Ni, et al. Effect of straw mulching on change of evaporation and water-salt in the saline soil[J]. Journal of soil and water conservation, 2012,26(1):246-250. (in Chinese)

[6] WANG X, JIA Z, LIANG L. Effect of straw incorporation on soil moisture, evapotranspiration, and rainfall-use efficiency of maize under dryland farming[J]. Journal of soil and water conservation, 2014,69(5):449-455.

[7] CHEN Yanlong, LIU Ting, TIAN Xiaohong, et al. Effects of plastic film combined with straw mulch on grain yield and water use efficiency of winter wheat in Loess Plateau[J]. Field crops research, 2015,172:53-58.

[8] 崔向新,蒙仲举,高永,等. 不同材料覆盖的土壤蒸发效果分析[J]. 水土保持通报,2009,29(4):81-83.
CUI Xiangxin, MENG Zhongju, GAO Yong, et al. Effects of different material covers on soil evaporation[J]. Bulletin of soil and water conservation, 2009,29(4):81-83. (in Chinese)

[9] ZHAI Sheng, LIANG Yinli, ZHANG Xiusheng, et al. Effects of soil mulching on cucumber quality, water use efficiency and soil environment in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(3):65-71.

[10] MODAIHSH A S, HORTON R, KIRKHAM D. Soil water evaporation suppression by sand mulches[J]. Soil science, 1985,139(4):357-361.

[11] FEKRI M, KASMAEI L S. Effects of windy sand and LECA mulches on decreasing evaporation from soil surface[J]. Arabian journal of geosciences, 2013,6(1):63-168.

[12] LI S X, WANG Z H, LI S Q, et al. Effect of plastic sheet mulch, wheat straw mulch, and maize growth on water loss by evaporation in dryland areas of China[J]. Agricultural water management, 2012,116:39-49.

[13] BEZBORODOV G A, SHADMANOV D K, MIRHASHIMOV R T, et al. Mulching and water quality effects on soil salinity and sodicity dynamics and cotton productivity in Central Asia[J]. Agriculture ecosystems & environment, 2010,138(1):95-102.

[14] 原翠萍,张兴平,雷廷武,等. 砂石覆盖粒径对土壤蒸发的影响[J]. 农业工程学报,2008,24(7):25-27.
YUAN Cuiping, ZHANG Xingping, LEI Tingwu, et al. Effects of mulching sand and gravel size on soil moisture evaporation[J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(7):25-27. (in Chinese)

[15] 李玲玲,黄高宝,张仁陟,等. 免耕秸秆覆盖对旱作农田土壤水分的影响[J]. 水土保持学报,2005,19(5):94-96.
LI Lingling, HUANG Gaobao, ZHANG Renzhi, et al. Effects of no-till with stubble retention on soil water regimes in rainfed areas[J]. Journal of soil and water conservation, 2005,19(5):94-96. (in Chinese)

[16] 李毅,任鑫. 覆膜开孔条件下斥水性层状土壤蒸发实验[J]. 农业机械学报,2012,43(11):58-64.
LI Yi, REN Xin. Evaporation experiments on layered water-repellent soil under perforated plastic mulch[J]. Transactions of the CSAM, 2012,43(11):58-64. (in Chinese)

[17] 赵永敢,王婧,李玉义,等. 秸秆隔层与地覆膜盖有效抑制潜水蒸发和土壤返盐[J]. 农业工程学报,2014,29(23):109-117.
ZHAO Yonggan, WANG Jing, LI Yuyi, et al. Reducing evaporation from phreatic water and soil resalinization by using straw interlayer and plastic mulch[J]. Transactions of the CSAE, 2014,29(23):109-117. (in Chinese)

(责任编辑 徐云峰)

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net