文章编号:1000-7601(2016)01-0001-06 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2016.01.01

覆膜开孔条件下植物混掺对土壤蒸发的影响

郑 健[1,2],王 燕[2],王笑宇[1,2],任倩慧[1,2],李志军[3]

(1.兰州理工大学西部能源与环境研究中心, 甘肃 兰州 730050; 2.兰州理工大学能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050; 3.西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 为探讨覆膜开孔条件下植物混掺对土壤蒸发规律的影响,测定了不同植物混掺物(玉米叶和玉米芯)、土壤容重(1.35 g·cm^{-3}和 1.40 g·cm^{-3})、膜孔直径(2、4 cm 和 6 cm)在植物混掺比例为 1%时的土壤水分扩散率、土壤水分特征曲线和土壤累计蒸发量。结果表明:相同土壤容重条件下的土壤水分扩散率呈现 1%玉米芯 > 纯土 > 1%玉米叶;纯土及同种植物混掺物相同混掺比例处理中,土壤水分扩散率均表现为土壤容重 1.35 g·cm^{-3}处理高于1.40 g·cm^{-3}处理;低吸力阶段,各处理土壤含水率下降较快,土壤水分特征曲线较陡,随土壤水吸力逐渐增大,曲线呈现变缓趋势;在相同土壤水吸力下,各添加植物混掺物处理的土壤含水率均高于纯土处理;不同土壤容重的土壤累计蒸发量呈现 1%玉米芯 > 1%玉米叶 > 纯土;各处理土壤累计蒸发量随膜孔直径变化呈现出 6 cm > 4 cm > 2 cm 的规律;相同膜孔直径条件下,各处理土壤累计蒸发量均表现为土壤容重为 1.40 g·cm^{-3}的处理高于 1.35 g·cm^{-3}处理。

关键词: 植物混掺物;膜孔直径;土壤水分扩散率;土壤水分特征曲线;累计蒸发量

中图分类号: S152.7^{+}3 **文献标志码:** A

Evaporation from soil with plant additive under perforated plastic mulch conditions

ZHENG Jian[1,2], WANG Yan[2], WANG Xiao-yu[1,2], REN Qian-hui[1,2], LI Zhi-jun[3]

(1. *China Western Research Center of Energy & Enwironment, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu* 730050, *China*; 2. *College of Energy & Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu* 730050, *China*; 3. *Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: To explore characteristics of evaporation from soil with plant additive under perforated plastic mulch conditions, this paper carried out research on soil water diffusivity, soil-water characteristic curve and soil accumulative evaporation of soil with 1% plant additive under different conditions. The treatments included different plant additives, soil bulk density and perforated diameters. Two plant additives including maize cobs and maize leaves with a soil bulk density of 1.35 g·cm^{-3} and 1.40 g·cm^{-3} were considered. Meanwhile, three hole diameters on the plastic mulches were also investigated in this study. The results showed that soil water diffusivity in soil followed the following law: 1% maize cob additive > pure soil > soil with 1% maize leaf additive. For both treatments by pure soil and soil with the same plant additive, the soil water diffusivity with 1.35 g·cm^{-3} soil bulk density were higher than that with 1.40 g·cm^{-3} density. During low suction stage, soil water content was decreased rapidly, and the soil-water characteristic curve showed a steep trend. With the increase of soil water suction, soil-water characteristic curve was slowing down gradually. Under the same soil water suction condition, soil water content with all treatments containing plant additive was higher than that with pure soil. The accumulative evaporation in different soil bulk densities displayed the following trend: soil with 1% maize cob additive > 1% maize leaf additive > pure soil, and it also presented the following trend in different hole diameters on the plastic mulches as 6 cm > 4 cm > 2 cm. In all treatments, soil accumulative evaporation in 1.40 g·cm^{-3} soil bulk density was higher than that in 1.35 g·cm^{-3}.

Keywords: plant additive; filmed hole diameter; soil water diffusivity; soil-water characteristic curve; accumulative evaporation

收稿日期:2014-11-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51369014);甘肃省教育厅科研项目(2013A-038);兰州理工大学红柳青年教师培养计划(Q201413)

作者简介:郑 健(1981—),男,甘肃会宁人,博士,副教授,主要从事农业水土工程方面的研究。E-mail:zhj16822@126.com。

土面蒸发是造成土壤水分损失、导致干旱的一个重要因素。它是指土壤中的水分沿土壤孔隙以水汽的形式逸入大气的过程。中国西北地区干旱少雨、气候干燥、地表蒸发量大,农田土壤以砂壤土居多,该类土壤具有通气透水性较好,易于耕种的特点,但其保水能力较差,土温变化快,制约了人们对它的利用[1]。地膜覆盖技术不仅可提高地温,保持土壤水分,提高作物产量,而且可抑制土壤盐分表聚,成为干旱、半干旱及盐渍化地区农业增产的主要途径[2-6]。然而,田间不可能是完全覆膜情况,种植、灌溉等都需要在膜上开孔,破坏了地膜覆盖的密闭性,成为土壤水分蒸发的主要通道[7-8]。研究表明在土壤中混掺不同的介质会对土壤理化性质、保水特性产生影响。马鑫等研究表明在不同质地土壤中加入不同粒径的保水剂,会对土壤吸水、失水、累计蒸发量产生不同程度的影响[9]。宋日权等的研究表明在砂壤土浅层添加不同粘土量会对土壤蒸发速率、累计蒸发量、土壤剖面含水率产生影响[10]。秸秆还田技术作为大田的主要农艺措施之一,也已经成为改善农田生态环境、发展现代灌溉农业、旱作农业的重大措施[11]。它能有效改善土壤物理结构,提高土壤孔隙度,增加土壤的持水能力,有利于更新土壤有机质,保持和提高土壤有机质含量,增加土壤中营养元素的储量,提高土壤结构的稳定性[12-14]。王珍等的研究结果表明,小麦长秸秆处理加入土壤后显著降低土壤入渗能力;粉碎氨化后的小麦秸秆较对照处理及粉碎秸秆处理能显著增加土壤稳定入渗率、土壤累积入渗量[15]。郑健等针对不同植物混掺物、植物混掺物不同混掺比例、不同埋深条件下的入渗蒸发情况进行了试验研究。结果表明,添加一定比例植物混掺物的土体能有效延长水分对耕层土壤的湿润,延长水分在耕层的滞留时间;玉米芯的吸水保水能力强于玉米叶,而玉米叶的阻滞水分蒸发的能力优于玉米芯[16-18]。

在实际农田耕作中的农业措施均先将秸秆粉碎,翻入土壤中,然后进行覆膜种植,两种技术措施同时存在,使得研究植物混掺条件下的膜孔蒸发问题不可回避。本文通过设置不同的土壤容重、膜孔直径和植物混掺物类型,开展土壤水分蒸发试验,分析不同处理对土壤水分蒸发的影响。

1 材料与方法

1.1 供试样品

试验土壤采自甘肃景泰地区,土壤风干后采用土壤筛进行土壤粒径分析,结果见表 1。供试土壤属于砂壤土,俗称黄绵土。试验所用植物混掺物玉米芯和玉米叶,取自甘肃景泰地区,品种为正德 305,试验前将玉米芯风干后粉碎成 2 cm × 2 cm × 2 cm 大小,玉米叶风干后粉碎成 2 cm × 2 cm 大小。试验覆膜采用常规农田用薄膜。

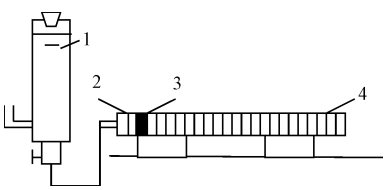
表 1 供试土壤粒径分析

Table 1 Particle size analysis of sandy loam

粒径/mm Particle size	< 2	< 1	< 0.05	< 0.01	< 0.001
质量百分含量/% Percentage mass content	100	99.46	80.26	23.13	10.06

1.2 试验装置

1.2.1 土壤水分扩散率测定装置 试验装置水平入渗段用总长 24 cm,内径 5 cm 的有机玻璃管制成,分为 3 个部分:水室段 2 cm、滤层段和试样段 22 cm。滤层段用滤纸代替,试样段由 20 个 1 cm 长的圆环组成,便于拆卸装取土样。测定时用马氏瓶供水,以控制进水端水位恒定(如图 1 所示)。



注:1.马氏瓶;2.水室;3.过滤层;4.土桩。

Note: 1.Mariotte bottle; 2.Water chamber; 3.Filter layer; 4.Soil column.

图 1 水平入渗试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of test equipment

1.2.2 蒸发试验装置 蒸发试验装置包括土柱和加热系统,见图 2。为减少土壤与外界环境的热交换,土柱用高(h)为 80 cm,内径 8.5 cm 的有机玻璃制成。用 250W 远红外灯加热,蒸发过程中灯距土面 25 cm。室温维持在 20℃ ± 0.5℃。

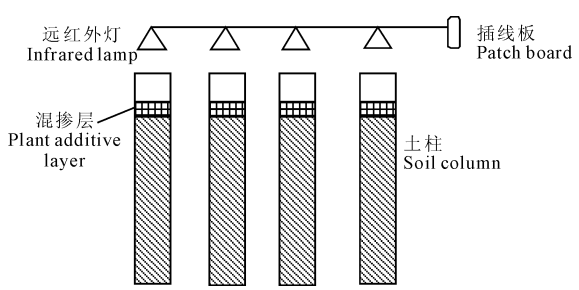


图 2 试验装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of test equipment

1.3　试验设计与测定

1.3.1　试验设计　试验包括:土壤水分扩散率、土壤水分特征曲线和土壤蒸发试验。各试验均设置 2 种混掺物(玉米芯与玉米叶),设置混掺比例为 1%(植物混掺物占土壤质量百分比),土壤容重 1.35 $g\cdot cm^{-3}$和 1.40 $g\cdot cm^{-3}$。其中,土壤水分扩散率、土壤水分特征曲线以纯土(CK)为对照;土壤蒸发试验时在土体表面覆膜,设置孔径尺寸为 2 cm、4 cm 和 6 cm,混掺层设置在 0~5 cm(土表面为起点),以无覆盖、无植物混掺物作为对照。每组试验设 3 个重复,取平均值。

1.3.2　测定方法　土壤水分扩散率和土壤水分特征曲线试验均为周期短、受环境因素影响较小的技术指标性试验,在西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点开放实验室进行。土壤水分扩散率试验,将土壤与混掺物搅拌均匀,分层(2 cm)装入试验装置;试验过程中,记录湿润锋到达各环的历时及相应马氏瓶中水的刻度;当湿润锋前进至土柱长度的 4/5 时停止供水,并记录结束供水时间及相应水位,并从湿润锋开始,按环取土,采用烘干法测定每环的土壤质量含水率,获得土柱的土壤质量含水率分布,并按相应方法计算非饱和土壤水分扩散率[19]。土壤水分特征曲线采用高速恒温冷冻离心机(日立 CR21G)测定,将准备好的试验材料按设定处理均匀装填于设备专用的 4 套装置中,并在试验开始前将其置于水中进行饱和处理。通过设置不同的转速和时间换算成土壤水吸力,土壤水吸力测定点为 1、10、30、50、80、100、300、500、700 kPa。在一个吸力完成后,将环刀中离心脱离的水去除后称重,计算土壤质量含水率,每个吸力对应一个土壤质量含水率。离心结束后将供试土壤放入恒温干燥箱内,在 105℃下烘 8 h,称重并计算土壤质量含水率,并将每个土壤水吸力对应的重量含水率换算成体积含水率,绘制土壤水分特征曲线。

土壤蒸发试验在兰州理工大学西部能源与环境研究中心实验室进行。为使水分在土柱内分布均匀,于试验开始的前一天晚上每个土柱注水 600 ml,次日 8:30 开始试验,18:30 试验结束。每组试验进行 3 d,第一天每 2 h 测定一次,后两天每 4 h 测定一次。试验采用称重法测定土壤蒸发量,试验过程中按测定时间将土柱放在电子天平(LP2102,灵敏度,0.01 g)上称重,测定土柱质量在蒸发过程中的变化。

2　结果与分析

2.1　植物混掺物对土壤水分扩散率的影响

图 3 为不同土壤容重混掺玉米叶和玉米芯后土壤水分扩散率的变化规律,可以看出土壤水分扩散率受到植物混掺物的影响较大,相同土壤容重条件下土壤水分扩散率呈现 1%玉米芯 > CK > 1%玉米叶,表明混掺玉米芯增大了水流扩散速率,而玉米叶的混掺对土壤水分扩散产生了一定的阻碍作用。纯土及同种植物混掺物相同混掺比例处理中,土壤水分扩散率均表现为土壤容重 1.35 $g\cdot cm^{-3}$处理高于 1.40 $g\cdot cm^{-3}$处理。其主要原因是由于 1%玉米芯混掺量较小,水分通过玉米芯边壁的运动效应大于玉米芯的吸水效应,使得土壤有效孔隙增大,导致土壤水分扩散率提高;1%玉米叶处理由于植物混掺物的加入使土壤在一定的设计容重条件下孔隙率降低,同时玉米叶的片状结构增加了土壤的渗径,且一定的吸水能力对土壤水分扩散运动也产生了阻碍,使土壤水分扩散率大幅度下降;土壤容重对同一质地土壤入渗能力的影响是通过对孔隙状况的影响实现的,在相同类型的土壤中,土壤容重越小,孔隙度越大,非饱和土壤水分扩散率则越大,土壤容重变小,相对来说土壤水分在土粒表面和土粒之间的空隙增加,缩短了实际土壤水分扩散的途径,因而非饱和土壤水分扩散率也随之增加。

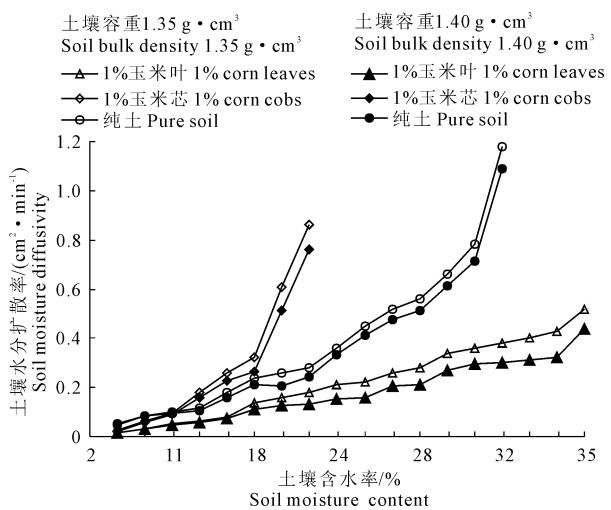


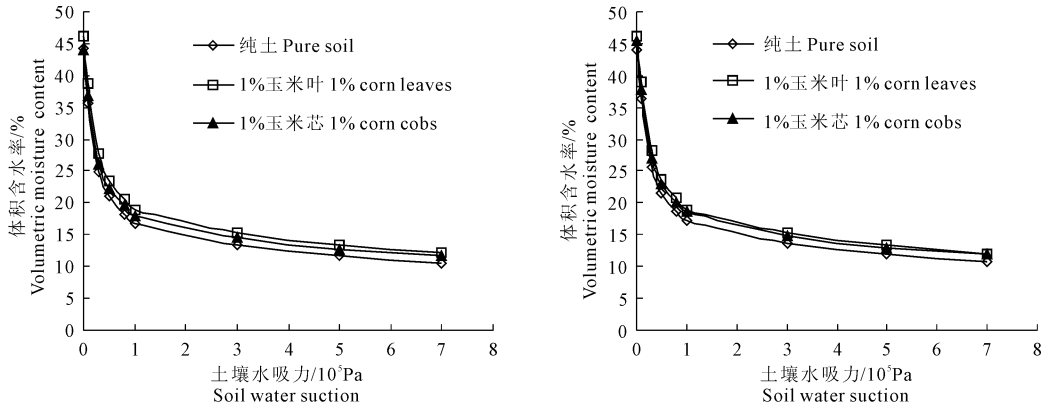
图 3　混掺物对土壤水分扩散率的影响

Fig.3　Impacts of additive on soil moisture diffusivity

2.2　植物混掺物对土壤水分特征曲线的影响

试验测得不同处理土壤水分特征曲线如图 4 所示,由图可知:(1) 不同处理在低吸力阶段土壤含水率下降较快,土壤水分特征曲线较陡,随土壤水吸力逐渐增大,曲线呈现变缓趋势,但各处理之间存在一

定差异;(2) 在相同土壤水吸力下,各添加植物混掺物处理的土壤含水率均高于纯土处理。上述结果表明在土壤中添加一定比例的植物混掺物可以提高土壤的保水能力。初步分析其形成原因,在低吸力阶段,土壤含水率减小较快,排水主要在大孔隙中进行;随着吸力增大,水分特征曲线逐渐变缓,土体排水也由大孔隙排水转为中小孔隙排水;在吸力较高阶段,只有小孔隙中能保留部分水分,土体对水分吸持能力较强,土壤含水率变化较小,曲线形态趋于平缓。各植物混掺物处理之间呈现差异,说明植物混掺物的加入对土壤孔隙大小分布有一定影响,提高了土壤的保水能力。



(a) 土壤容重1.35g·cm³
Soil bulk density 1.35g·cm³

(b) 土壤容重1.40g·cm³
Soil bulk density 1.40g·cm³

图 4 不同处理下土壤水分特征曲线

Fig.4 Soil water characteristic curve under different treatments

2.3 植物混掺物对不同孔径土壤累计蒸发量的影响

图 5 为不同处理在不同膜孔直径条件下的累计蒸发量特征,从图中可以看出:(1) 土壤容重为1.35 g·cm^{-3}和 1.40 g·cm^{-3}的各处理在试验结束时的土壤累计蒸发量均呈现 1% 玉米芯 > 1% 玉米叶 > 纯土;(2) 在不同孔径条件下,1% 玉米芯混掺处理试验前段(0 ~ 10 h)其土壤累计蒸发量均小于 1% 玉米叶处理,中后段(10 ~ 56 h)土壤累计蒸发量增加较快,逐渐超过 1% 玉米叶处理,最终形成最高的土壤累计蒸发量。初步分析形成该规律的主要原因为:(1) 设置的植物混掺层位于土壤的表层,试验过程中最先受到稳定热源的影响,同时植物混掺物本身含有较高的水量,随试验的进程,处于表层的混掺层失水速度逐渐加快,使得在不同孔径条件下,植物混掺物处理最终的土壤累计蒸发量均大于纯土处理;(2) 玉米叶的片状结构其自身的吸水性低于玉米芯的颗粒结构,试验过程中失水较快,使得在初始阶段 1% 玉米叶处理的土壤累计蒸发量高于 1% 玉米芯处理,但随着试验的进程,玉米叶的片状结构增加了水分蒸发的路径,阻碍了土壤水分扩散运动,降低了土壤蒸发量,而玉米芯的颗粒结构使得水分通过玉米芯边壁的运动效应大于玉米芯的吸水效应,使得土壤有效孔隙增大,同时玉米芯自身吸水能力较强,在稳定蒸发条件下处于表层的玉米芯快速失水,导致中后期土壤水蒸发量增大。

2.4 膜孔直径对土壤累计蒸发量的影响

试验测定不同膜孔直径对土壤累积蒸发量变化规律如图 6 所示,由图可知:(1) 纯土处理、1% 玉米叶和 1% 玉米芯混掺处理,在不同土壤容重条件下,其土壤累计蒸发量随膜孔直径的变化均呈现 6 cm > 4 cm > 2 cm,这与李毅等得出的土壤蒸发量随覆膜开孔率的增加而增大的规律有较好一致性[7];(2) 相同膜孔直径条件下,各处理土壤累计蒸发量均表现为土壤容重 1.40 g·cm^{-3}处理高于 1.35 g·cm^{-3}处理。形成上述规律的主要原因初步分析为:(1) 膜孔直径的增加,使土壤受稳定热源影响的面积增大,土壤蒸发面积也随之增加,使得相同条件下土壤累计蒸发量随膜孔直径的增加而增大;(2) 相同类型土壤,土壤容重越大,孔隙度越小,入渗过程越慢,水分容易集中在土层上部。而现有的研究结果也表明在土壤中添加一定比例的植物混掺物可以有效增加水分的水平湿润距离,降低垂直入渗深度,植物混掺层的设置对阻滞土壤水分下渗,提高局部土壤含水率具有较好的效果[15]。因此,当蒸发试验开始时,上部土壤易受到稳定热源的影响,形成试验中容重大的土壤其累计蒸发量高于土壤容重较小的土壤。

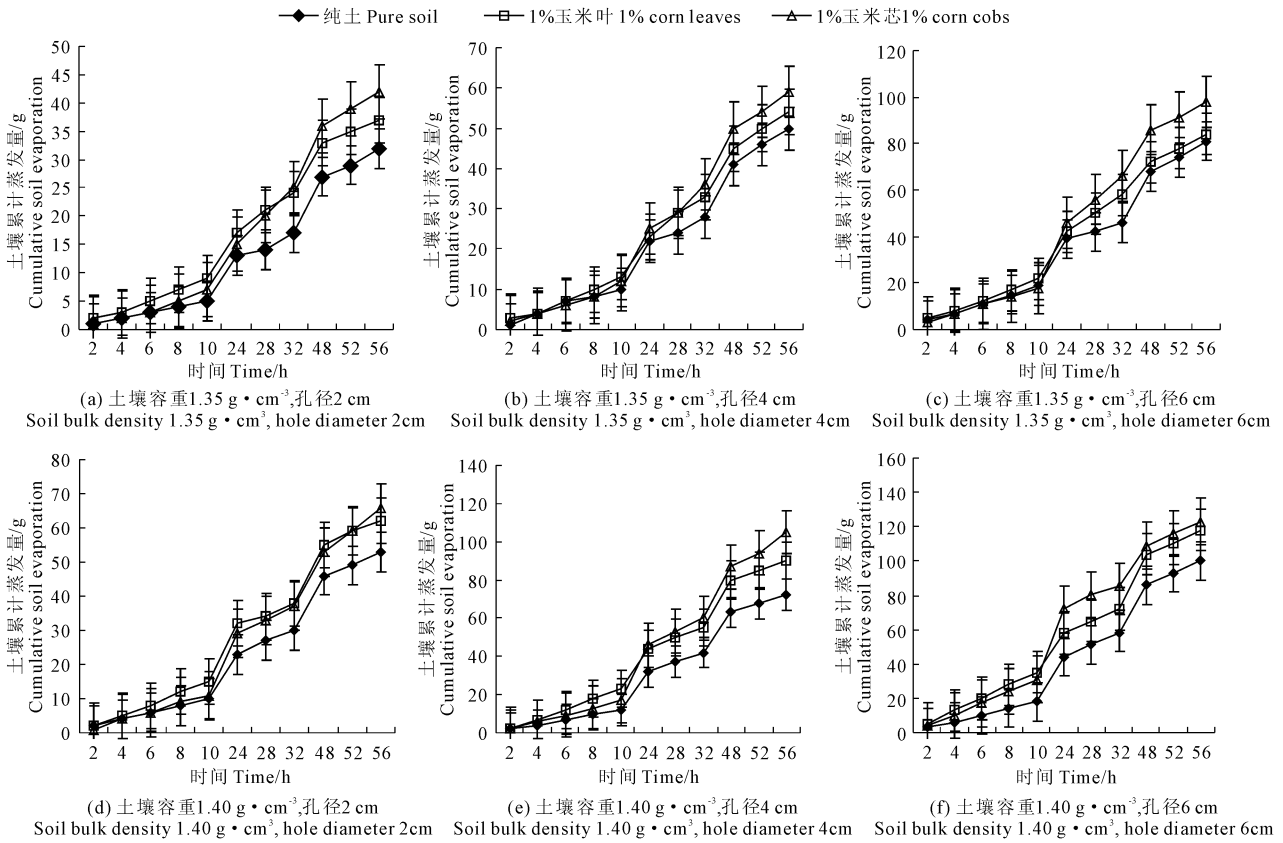


图 5　植物混掺物对土壤累计蒸发量的影响

Fig.5　Impacts of additive on the accumulative soil evaporation

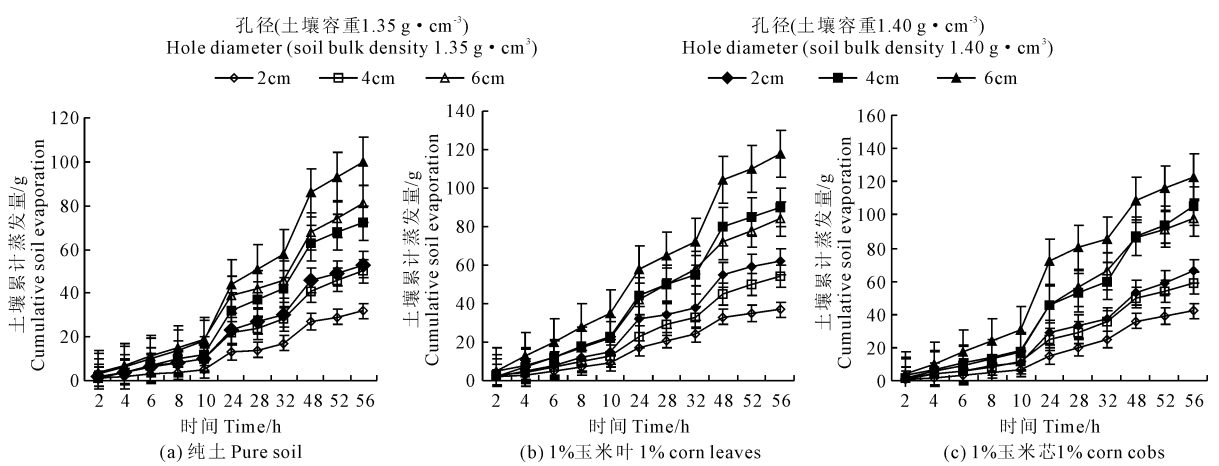


图 6　膜孔直径对土壤累计蒸发量的影响

Fig.6　Impacts of film hole diameter on the accumulative soil evaporation

3　讨论与结论

土壤水分扩散率受质地、粘粒含量、土壤密度、孔隙度和有机质等诸多因素的影响[20]。在不同生境及同一生境不同土层的土壤水分扩散率会产生较大差异,且具有较高的空间异质性[21]。本研究结果表明在不同土壤容重条件下土壤水分扩散率均表现为容重 1.35 g·cm^{-3}处理高于 1.40 g·cm^{-3}处理,说明土壤容重大,土体结构紧实,减小了土壤的水分扩散;土壤中混掺玉米芯增大了土壤水扩散速率,而玉米叶的混掺对土壤水分扩散产生了一定的阻碍作用,在相同土壤容重条件下土壤水分扩散率呈现 1%玉米芯 > 纯土 > 1%玉米叶,说明植物混掺物的结构特征(玉米叶为片状结构,而玉米芯为颗粒状结构)对土壤生境的改变有所影响,是影响土壤水分扩散率又一重要因子。

土壤水分特征曲线表述了土壤含水率与吸力之间的关系,对研究土壤水分的有效性、土壤水分运动溶质运移等有重要的作用,且土壤水分特征曲线的影响因素较多、关系复杂。不同施肥措施和不同土壤盐分均会对土壤水分特征曲线产生影响[22-23]。本试验结果表明,在相同土壤水吸力下,各添加植物混掺物处理的土壤含水率均高于纯土处理,说明玉米芯和玉米叶的加入能有效提高土壤水分有效性,改善土壤保水能力。

土壤蒸发量的大小主要受气象因素(包括太阳辐射、气温、空气湿度和风速等)和土壤理化性质、土壤含水率及其空间分布的影响[24]。不同粒径植物混掺物的加入对土壤吸、失水特性会产生不同程度的影响[9]。在本试验中,不同土壤容重的土壤累计蒸发量均呈现 1%玉米芯 > 1%玉米叶 > 纯土,且随膜孔直径的变化土壤累计蒸发量呈现 6 cm > 4 cm > 2 cm;相同膜孔直径条件下,各处理土壤累计蒸发量均表现为土壤容重 1.40 $g \cdot cm^{-3}$ 处理高于 1.35 $g \cdot cm^{-3}$ 处理。土壤蒸发试验在相同环境条件下进行,说明玉米芯和玉米叶的混掺改变了土壤的理化性质,而覆膜条件也影响了土壤与大气接触的界面条件,同时土壤容重对土壤累计蒸发量的影响也表明,土壤容重的增大减小了土壤中大孔隙的比例,降低了土壤蒸发。

参 考 文 献:

[1] 万吉祥.秸秆混掺对甘肃景泰砂壤土水盐运移规律的影响[D].兰州:兰州理工大学,2013.

[2] 杜社妮,白岗栓,于 健,等.沙封覆膜种植孔促进盐碱地油葵生长[J].农业工程学报,2014,30(5):82-90.

[3] Yang Q D, Zuo H C, Xiao X, et al. Modelling the effects of plastic mulch on water, heat and CO_2 fluxes over cropland in an arid region [J]. Journal of Hydrology, 2012,452-453:102-118.

[4] Liu C A, Jin S L, Zhou L M, et al. Effects of plastic film mulch and tillage on maize productivity and soil parameters[J]. European Journal of Agronomy , 2009,31(4):241-249.

[5] Zhang S L, Li P R, Yang X Y, et al. Effects of tillage and plastic mulch on soil water, growth and yield of spring-sown maize[J]. Soil and Tillage Research, 2011,112(1):92-97.

[6] Hou X Y, Wang F X, Han J J, et al. Duration of plastic mulch for potato growth under drip irrigation in an arid region of Northwest China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010,150(1):115-121.

[7] 李 毅,邵明安,王文焰,等.覆膜不同开孔程度蒸发条件下土壤水热变化动态研究[J].土壤学报,2004,41(3):387-393.

[8] 李 毅,任 鑫,司炳成.覆膜开孔条件下层状土壤蒸发的水热运移[J].排灌机械工程学报,2012,30(6):738-744.

[9] 马 鑫,魏占民,于 健,等.保水剂粒径与不同质地土壤吸、失水特性的相关关系[J].水土保持学报,2014,28(1):270-275.

[10] 宋日权,于 健,史吉刚,等.内蒙古砂壤土浅层掺粘对土壤蒸发影响的研究[J].灌溉排水学报,2014,33(4/5):278-282.

[11] 解文艳,樊贵盛,周怀平,等.秸秆还田方式对旱地玉米产量和水分利用效率的影响[J].农业机械学报,2011,42(11):60-67.

[12] Kasteel R, Garnier P, Vachier P, et al. Dye tracer infiltration in the plough layer after straw incorporation[J]. Geoderma, 2007,137(3/4):360-369.

[13] Sonnleitner R, Lorbeer E, Schinne F. Effects of straw, vegetable oil and whey on physical and microbiological properties of a chernozem [J]. Applied Soil Ecology, 2003,22(3):195-204.

[14] Cabile, S D M S, Angeles O R, Johnson-Beebout S E, et al. Faster residue decomposition of brittle stem rice mutant due to finer breakage during threshing[J]. Soil & Tillage Research, 2008,98(2):211-216.

[15] 王 珍,冯 浩.秸秆不同还田方式对土壤入渗特性及持水能力的影响[J].农业工程学报,2010,26(4):75-80.

[16] 王 燕,郑 健,冀 宏,等.植物混掺物对甘肃景泰砂壤土入渗过程的影响[J].农业机械学报,2010,41(1):63-67.

[17] 郑 健,王 燕,蔡焕杰,等.植物混掺土壤水分特征曲线及拟合模型分析[J].农业机械学报,2014,45(5):107-112.

[18] 郑 健,万吉祥,赵廷红,等.植物混掺物对甘肃景泰砂壤土蒸发的影响[J].兰州理工大学学报,2014,40(1):54-58.

[19] 雷志栋,杨诗秀,谢森传.土壤水动力学[M].北京:清华大学出版社,1988:232-235.

[20] 田 丹,屈忠义,勾芒芒,等.生物炭对不同质地土壤水分扩散率的影响及机理分析[J].土壤通报,2013,44(6):1374-1378.

[21] 姚淑霞,赵传成,张铜会,等.科尔沁沙地不同生境土壤水分扩散率[J].生态学杂志,2014,33(4):867-873.

[22] 高会议,郭胜利,刘文兆,等.不同施肥土壤水分特征曲线空间变异[J].农业机械学报,2014,45(6):161-165.

[23] 谭 霄,伍靖伟,李大成,等.盐分对土壤水分特征曲线的影响[J].灌溉排水学报,2014,33(4/5):228-232.

[24] 张建国,赵 英,徐新文,等.极端干旱区咸水灌溉下流沙压埋的减蒸抑盐效应[J].应用生态学报,2014,25(5):1415-1421.