

农膜残留对砂壤土和砂土水分入渗和蒸发的影响

王志超 李仙岳 史海滨 张栋良 徐鹏程

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 通过室内试验设置5个不同残膜量(0、50、100、200、400 kg/hm²)处理,研究不同残膜量对砂壤土和砂土水分入渗湿润锋、入渗速率、累积入渗量、土壤累积蒸发量和蒸发速率的影响,并评价了主要土壤入渗、蒸发模型在农膜残留土壤的适用性。结果表明:随着土壤中残膜量增多,砂壤土和砂土入渗速率变慢,土壤湿润锋运移相同距离所需时间均显著增加,其中运移30 cm时,砂壤土残膜量400 kg/hm²处理(SL5)比无残膜处理(SL1)运移时间增加了27.56%;相同入渗时间内累积入渗量随残膜量增加均显著减小($P < 0.05$),入渗结束后SL5处理比SL1处理累积入渗量减小了52.01 mL(23.12%);残膜量增加导致蒸发速率、累积蒸发量都显著减小($P < 0.05$),蒸发结束后SL5处理比SL1处理累积蒸发量减小了30.63%,且不同残膜量对砂壤土的影响大于砂土。对4个土壤水分入渗及蒸发模型进行拟合,结果显示Kostiakov和Philip入渗模型均能较好模拟残膜条件下土壤水分入渗,其中Philip入渗模型拟合精度高于Kostiakov入渗模型,且对砂土中农膜残留下的土壤水分入渗模拟效果更好;Black蒸发模型随着残膜量增加拟合精度下降,而Rose蒸发模型受残膜量的影响较小,更适合于农膜残留土壤累积蒸发量估算。

关键词: 残膜; 土壤质地; 土壤水分入渗; 土壤蒸发; 模型

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)01-0198-08

Effects of Residual Plastic Film on Infiltration and Evaporation for Sandy Loam and Sandy Soil

WANG Zhichao LI Xianyue SHI Haibin ZHANG Dongliang XU Pengcheng

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China)

Abstract: The residual plastic film seriously affected the soil water infiltration and evaporation. Five residual plastic film treatments were conducted to study the effects of different residual plastic film amounts (0 kg/hm², 50 kg/hm², 100 kg/hm², 200 kg/hm² and 400 kg/hm²) on soil water infiltration and evaporation characteristics, and the infiltration front, infiltration rate, cumulative infiltration, cumulative evaporation and the evaporation rate were mainly studied based on the different residual plastic film quantities for sandy loam and sandy soil, and then the performance of main soil infiltration and evaporation model with residual plastic film was evaluated. The results showed that with the increase of residual plastic film quantity in the soil, the infiltration rates of sandy loam and sandy soil were decreased slowly, the time required for wetting front migration was increased significantly, and the sandy loam with 400 kg/hm² residual plastic film treatment (SL5) was increased by 27.56% compared with that of non-residual plastic film treatment (SL1) at 30 cm soil layer. In addition, the cumulative infiltration amount was significantly decreased ($P < 0.05$) in the same infiltration time, and the cumulative infiltration amount of SL5 treatment was reduced by 52.01 mL (23.12%) compared with SL1 at the end of infiltration. The evaporation rate and cumulative evaporation were significantly reduced ($P < 0.05$) with the increase of residual plastic film quantity, the cumulative evaporation rate of SL5 treatment was 30.63% less than that of SL1 after evaporation, and the influence of different residual plastic film amounts on sandy loam was greater than that of sandy soil. The four major soil water infiltration and evaporation model were evaluated, it was showed that both Kostiakov and Philip infiltration models can

收稿日期: 2016-05-20 修回日期: 2016-06-21

基金项目: 内蒙古自然科学基金项目(2016JQ06)、国家自然科学基金项目(51669020、51539005、51469022)、内蒙古科技计划项目和内蒙古水利科技计划项目

作者简介: 王志超(1988—),男,博士生,主要从事土壤物理及节水灌溉研究,E-mail: wzc5658@126.com

通信作者: 李仙岳(1980—),男,教授,博士,主要从事节水灌溉原理及应用研究,E-mail: lixianyue80@126.com

well simulate the soil water infiltration for the soil with residual plastic film, but the Philip model had better performance than Kostiakov model, and had better adaptability for sandy soil with plastic film residue. The fitting accuracy of Black evaporation model was decreased with the increase of residual plastic film quantity, but the Rose evaporation model was less influenced by the amount of residual plastic film. So it can be concluded that the Rose evaporation model was more suitable for the plastic film residual soil cumulative evaporation estimation.

Key words: residual plastic film; soil texture; soil water infiltration; soil evaporation; model

引言

由于农膜覆盖耕作具有明显的节水、保温、增产、控盐等特点^[1-3],近年来在我国使用量和覆膜面积不断增长^[4],目前我国农膜使用量达 136.2 万 t,覆膜面积达 17 657.0 万 hm^2 ^[5]。河套灌区地处西北干旱区,年均蒸发量是降水量的 10 倍以上^[6],覆膜比重远超全国平均水平^[7],故该技术已成为河套灌区甚至西北地区的主要农业耕作模式^[8]。但目前农膜残留回收机制不健全,每年农膜残留量占总使用量的 30% 以上^[4],而普通塑料地膜在土壤中可残留百年之久,极难在自然条件下降解^[9]。多年农膜覆盖耕作将导致土壤中农膜残留不断累积,会致使土壤过水孔隙堵塞,土壤总孔隙度减小,土壤团聚体结构破坏,土壤入渗阻力增加^[10-13],也会使土壤密度降低、田间蓄水量减少^[14],最终导致作物减产^[15]。研究表明,土壤中农膜残留量增加会明显阻碍土壤水分入渗,如在滴灌条件下农膜残留土壤中滴灌湿润锋运移距离、湿润体积都明显变小,并增大了水分入渗的不确定性^[3,16];当土壤中残膜量持续增加后,会产生明显的优势流,如李元桥等^[17]认为农膜残留后土壤中孔隙比例增加,易产生土壤水分的优势迁移。

土壤蒸发主要受土壤输水能力和大气蒸发力的影响^[18],目前在不同覆盖物、不同盐分、不同 PAM 施用量等对土壤蒸发的影响等方面研究较多,如增加麦秆覆盖量将明显降低土壤蒸发量^[19];土壤含盐量增加会导致土壤蒸发速率显著降低^[20];土壤中 PAM 施用量增加会增大土壤孔隙度及毛管孔隙度,并减少土壤水分蒸发^[21]。而土壤中农膜残留会直接隔断部分毛管孔隙,是否会导致毛管导水率下降,影响土壤蒸发等方面的研究较少。尽管对于 Philip^[22]和 Kostiakov 等主要入渗模型^[23]在不同条件下的土壤水分入渗做了评价^[24-25],对参数较少的 Black^[26]和 Rose 蒸发模型^[27-28]在土壤蒸发评价等方面也已经做了大量研究,但是对于农膜残留条件下这些模型的评价以及是否具有较高精度等方面的研究较少。另外,虽然目前关于农膜残留对土壤水分入渗的影响也做了部分研究,但主要以单一土质

为研究对象,对于不同质地条件下农膜残留对土壤水分入渗、蒸发的影响研究较少,而对其模型的适应性评价方面的研究更少。

本文选取在内蒙古河套灌区分布较广的砂壤土及砂土,通过室内模拟试验研究砂壤土和砂土中农膜残留对土壤水分入渗和蒸发特性的影响,并对主要入渗和蒸发模型进行评价,为农膜残留条件下土壤水分运移研究提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 供试材料

选取河套灌区分布最广、有较大差异的 2 种土壤(砂壤土、砂土)进行试验,土样取自河套灌区上游巴彦淖尔市磴口县(砂土)和杭锦后旗(砂壤土)农田,均为耕地表层(0~20 cm)土壤,土质均匀。土样取回室内后经过风干、碾压、过 2 mm 筛后备用,利用纳米激光粒度仪(NANOPHOXTM, Symaptec 公司,德国)进行颗粒分析,并查美国农业部质地三角形图确定土壤质地,其中砂壤土粘粒(粒径小于 0.002 mm)、粉粒(粒径介于 0.002~0.05 mm 之间)、砂粒(粒径介于 0.05~2 mm 之间)质量分数分别为 12.25%、15.23%、72.52%,砂土粘粒、粉粒、砂粒的质量分数分别为 1.11%、10.68%、88.21%。供试农膜为河套灌区市场占有率较高的“双 08 膜”(厚度为 0.008 mm),由青州市佳和塑料厂生产,处理后用于室内试验。试验在内蒙古自治区水资源保护与利用重点实验室进行。

1.2 试验设计及方法

已有研究表明,残留农膜主要分布在土壤表层,其中 0~10 cm 土层残留量约占残膜总量的 70%,10~20 cm 土层残留量约占残膜总量的 20%^[4,29];且残留农膜在土壤中会逐渐呈现碎片化,随着覆膜耕作年限的增加,碎片面积集中在 3~5 cm^2 ^[4,29]。本文在以上研究的基础上,设置 5 个残膜量处理,残膜埋设在土壤表层 0~20 cm 范围内,其中 0~10 cm 残膜量占残膜总量的 70%,10~20 cm 残膜量占残膜总量的 30%,每个处理重复 3 次,具体见表 1。为保持试验的统一性及降低残膜尺寸对土壤水分入渗及蒸发的影响,将农膜制作成面积为 4 cm^2 (2 cm ×

2 cm)的正方形备用。

表1 试验处理设计

Tab.1 Experimental treatments design		kg/hm ²				
砂壤土	处理编号	SL1	SL2	SL3	SL4	SL5
	残膜量	0	50	100	200	400
砂土	处理编号	SS1	SS2	SS3	SS4	SS5
	残膜量	0	50	100	200	400

土壤入渗试验装置由马氏瓶、有机玻璃制作的土柱试管、支架等组成(图1a),其中马氏瓶高50 cm,直径6 cm;土柱试管高45 cm、内径9 cm,底部5 cm为反滤层,并设有排气孔,装土高度35 cm。按照不同的残膜量将农膜与土壤混合均匀,并按1.5 g/cm³的容重把混合均匀的土样装入土柱试管内,每5 cm分层装入,层间打毛,装土前在土柱试管内壁均匀涂抹凡士林以消除壁面优势流的影响。入渗时保持水头高度5 cm,入渗开始后根据入渗速率变化每隔一定时间读取并记录马氏瓶以及湿润锋读数;当湿润锋移移30 cm时停止供水,并用防水塑料膜封住土柱试管管口。土壤蒸发试验装置由红外线灯、土柱试管、蒸发皿和电子秤组成(图1b),红外线灯功率为275 W,蒸发皿直径9 cm,电子秤量程10 kg、精度0.1 g。入渗结束24 h后,待土壤气体排放稳定,打开红外线灯作为光源进行蒸发试验,灯底部与土柱表土距离均为20 cm,昼夜照射,采用称量法测定土柱蒸发质量,测定时间为蒸发开始后的第1、6、12、24、36、48、60、72、84、96、108 h,同步测量蒸发皿的水面蒸发,蒸发试验期间室温在18~23℃,日平均相对湿度约为35%,平均水面蒸发量为1.75 mm/h。

1.3 入渗和蒸发模型

(1) Philip 入渗模型

Philip 入渗模型^[22]具有参数容易确定、物理意义强等特点,较适用于均质土壤一维垂直入渗的情况,其表达式为

$$i(t) = 0.5st^{-\frac{1}{2}} + A \quad (1)$$

式中 $i(t)$ ——土壤入渗速率, cm/min

t ——入渗历时, min

s ——吸渗率, cm/min^{1/2}

A ——稳定入渗率, cm/min

(2) Kostiakov 入渗模型

Kostiakov 入渗模型^[23]具有形式简单、计算方便等特点,且没有太多的条件要求,应用较广泛,其表达式为

$$i(t) = Kt^{-\alpha} \quad (2)$$

式中 K 、 α ——经验系数

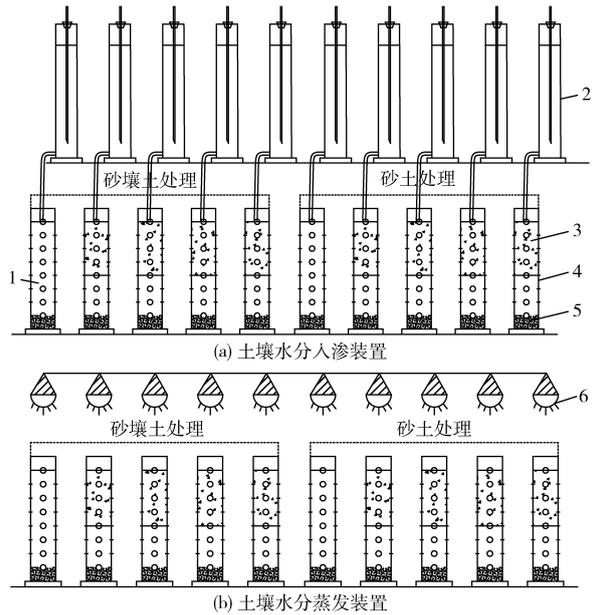


图1 试验装置示意图

Fig.1 Sketches of experiment equipments

1. 土壤 2. 马氏瓶 3. 残膜 4. 土柱试管 5. 反滤层 6. 红外线灯

(3) Black 蒸发模型

Black 蒸发模型^[26]广泛应用于蒸发下边界没有水分持续补给时土壤累积蒸发量随时间的变化情况,其表达式为

$$E = F + Bt_0^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中 E ——累积蒸发量, g

t_0 ——蒸发历时, h

F 、 B ——蒸发参数

(4) Rose 蒸发模型

Rose 蒸发模型^[27]也具有形式简单的特点,蒸发下边界没有水分持续补给时应用广泛,其表达式为

$$E = Ct_0 + Dt_0^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中 C ——稳定蒸发参数

D ——水分扩散参数

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2007 进行数据处理, SPSS 17.0 进行方差分析和模型参数拟合。利用均方根误差、几何平均数及决定系数 R^2 作为模型的评价指标。均方根误差和几何平均数计算式分别为

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_{pi} - y_{mi})^2} \quad (5)$$

$$G_{MER} = \exp\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln \varepsilon_i\right) \quad (6)$$

其中 $\varepsilon_i = \frac{y_{pi}}{y_{mi}}$ (7)

式中 y_{pi} ——实测值 y_{mi} ——模型预测值

ε_i ——误差比 N ——数据点个数

2 结果与分析

2.1 残膜量对土壤水分入渗湿润锋的影响

在相同时间内随着残膜量的增加砂壤土和砂土湿润锋运移距离变小,同时土壤水分入渗速率变慢(图 2)。在入渗初期(渗润期),土壤表面干燥,湿润锋锋面的水势梯度和非饱和度大,入渗速率快^[18,30],由于湿润距离较小,该时期无论是砂壤土还是砂土,不同残膜量处理对湿润锋的影响较小,并无显著差异($P > 0.05$)。随着入渗进程推进,当土壤含水率达到最大分子持水量时,入渗达到渗漏期^[31],其中砂壤土入渗约 100 min 后,残膜的阻水效应显现,不同残膜量处理差异显著($P = 0.041$),不同处理入渗速率差异也逐渐变大,当不同残膜量处理湿润锋运移至 30 cm 处时,SL1 ~ SL5 处理平均运移时间分别为 381、405、416、443、486 min,即土壤中残膜量越多,湿润锋运移相同距离所需时间越长,其中 SL5 处理(残膜量 400 kg/hm²)比 SL1 处理(无

残膜)运移时间增加了 27.56% ($P = 0.038$),入渗速率随残膜量的增加而变小,在入渗 10 ~ 360 min 期间,不同残膜量处理的入渗速率达到显著差异($P < 0.05$),而入渗 360 min 后,土壤趋于饱和(渗透期),不同处理入渗速率差异减小,最后逐渐趋于相近;而砂土由于大孔隙明显多于砂壤土,入渗速率快,是砂壤土的 10 倍以上,入渗约 3 min 后,不同残膜量处理出现显著差异($P = 0.047$),入渗速率差异性也非常大($P < 0.05$),当湿润锋运移至 30 cm 处时,运移时间约为砂壤土的 5%。SS1 ~ SS5 处理平均运移时间分别为 15.6、16.5、17.3、18.1、19.7 min,其中 SS5 处理(残膜量 400 kg/hm²)比 SS1 处理(无残膜)运移时间增加了 26.28% ($P = 0.040$),当入渗 15 min 后,不同处理入渗速率趋于相近。可见,土壤中残膜量的增加会显著减小湿润锋的运移速率,另外砂土由于大孔隙多于砂壤土,导致不同残膜量对其阻水的影响小于砂壤土。该结果与李仙岳等^[4]的研究结果一致,说明本文研究结果具有可靠性。

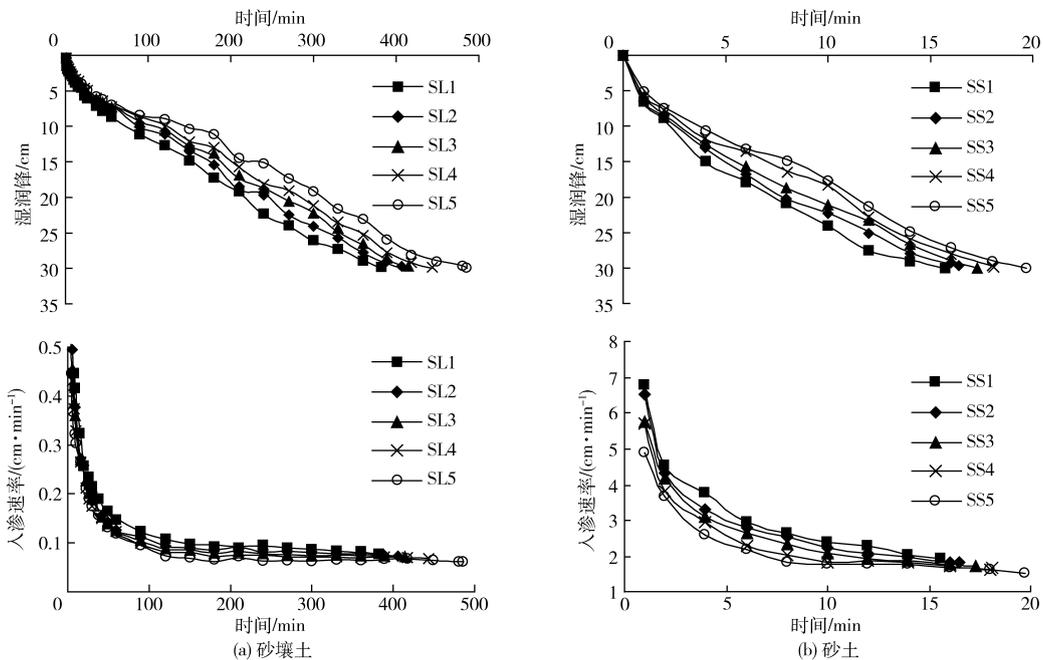


图 2 不同残膜量及不同质地土壤对湿润锋及入渗速率的影响

Fig. 2 Effect of different residual plastic film quantities and soil textures on wetting front and infiltration rate

2.2 残膜量对土壤累积入渗量的影响

累积入渗量的变化趋势与湿润锋相似,在入渗初期不同残膜量处理间的差异较小(图 3)。随着入渗时间的增加,进入渗漏期后,由于含残膜土壤总孔隙度减小以及非均匀堵塞现象^[3],使下层孔隙充水不充分,则土壤中残膜量越多,在相同入渗时间内累积入渗量越少。如砂壤土,在入渗 100、200、300、381 min(无膜处理入渗结束)时,SL5 处理(残膜量 400 kg/hm²)的入渗量比无 SL1 处理(无残膜)分别减少 67.26、88.46、97.52、128.05 mL,即入渗量分别

减少了 23.12%、17.99%、15.40%、8.25%,且在这 4 个时刻不同处理间累积入渗量的显著性分析显示 P 值依次为 0.035、0.027、0.022、0.018,均呈显著性差异,且差异越来越显著。在入渗结束后,砂壤土 SL2 ~ SL5 处理较对照 SL1 处理累积入渗量分别减少了 14.99、31.44、43.35、52.01 mL ($P < 0.05$)。

随着残膜量的增加,砂土累积入渗量同样呈减少趋势(图 3b),但是由于砂土中大孔隙明显多于砂壤土,所以当湿润锋同样到达 30 cm 时,5 个处理的平均入渗时间比砂壤土不同处理平均入渗时间减少

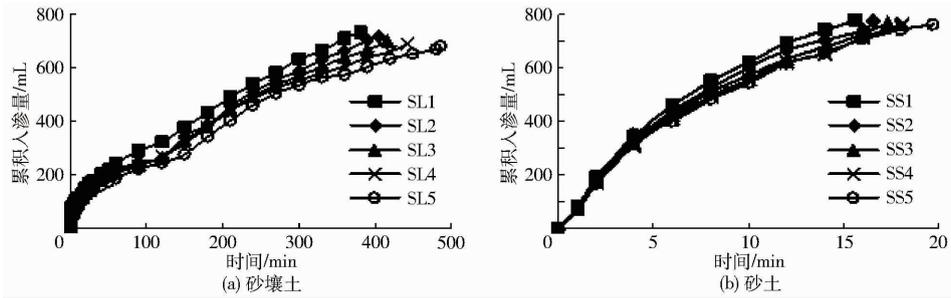


图3 不同残膜量及不同质地土壤对累积入渗量的影响

Fig. 3 Effect of different residual plastic film quantities and soil textures on accumulative infiltration

95.91%，但是不同处理平均累积入渗量却增大9.39%。在入渗5、10、15、15.6 min（无膜处理入渗结束）时，SS5处理（残膜量400 kg/hm²）比SS1处理（无残膜）累积入渗量分别减少50.00、77.10、78.56、95.10 mL，即累积入渗量减少了12.41%、12.38%、10.25%、2.65%，且在这4个时刻时5个处理间累积入渗量的显著性分析显示P值依次为0.045、0.039、0.031、0.026，均呈显著性差异。从对应数据可知，残膜量对砂壤土的影响略大于砂土，这可能是由于砂土大孔隙多，使得残膜的阻水效应没有砂壤土显著。

2.3 残膜量对土壤蒸发的影响

土壤蒸发主要受大气蒸发力和土壤输水能力的影响，当土壤中含有残膜后一方面阻碍了空气能量的向下传输，即阻碍了土壤“热通道”，另一方面阻断了土壤孔隙，导致蒸发水分向上传输的“水通道”阻断，所以土壤中残膜量越多土壤累积蒸发量则越少（图4）。砂壤土试验中，当蒸发开始后24 h，不同残膜量处理的累积蒸发量呈现显著差异（ $P = 0.045$ ），砂壤土SL1处理（无残膜）累积蒸发量比SL5处理（残膜量400 kg/hm²）大44.78%，且随时

间的推进，差异性越来越显著，在蒸发开始后108 h，SL2~SL5处理较SL1无残膜处理累积蒸发量分别减小了7.24%、13.15%、17.15%、30.63%（ $P = 0.019$ ）。尽管在砂土中，随残膜量的增加累积蒸发量也减少，但是残膜对其累积蒸发量的影响程度明显没有砂壤土显著，同样在蒸发开始后108 h，砂土SS2~SS5处理较对照SS1处理累积蒸发量分别减小了5.55%、13.17%、13.83%、15.08%（ $P = 0.033$ ），这可能是由于砂土中大孔隙多，通透性好，导致残膜对“热通道”和“水通道”的阻碍作用没有砂壤土明显。而蒸发速率（累积蒸发量与累积蒸发时间之比）则随着时间的推移无论是砂壤土还是砂土都逐渐降低，在蒸发开始1 h后，砂壤土SL5处理（残膜量400 kg/hm²）的蒸发速率比SL1处理（无残膜）低50.62%，砂土SS5处理（残膜量400 kg/hm²）的蒸发速率比SS1处理（无残膜）低31.05%，在蒸发开始100 h后蒸发速率都趋于稳定，但是仍然表现为含残膜处理蒸发速率较低，在蒸发后108 h，砂壤土SL5处理的蒸发速率比SL1处理低30.65%，砂土SS5处理的蒸发速率比SS1处理低15.08%，但是差异明显小于蒸发初始阶段。

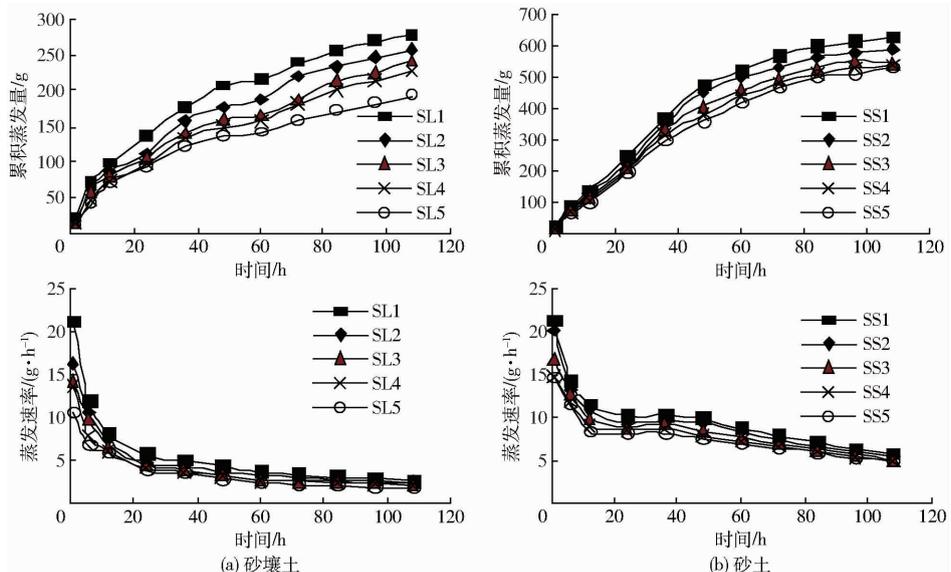


图4 不同残膜量及不同质地土壤对累积蒸发量及蒸发速率的影响

Fig. 4 Effect of different residual plastic film quantities and soil textures on accumulative evaporation and evaporation rate

2.4 农膜残留条件下土壤入渗和蒸发模型分析

由表 2 可知,随着土壤中残膜量增大,Kostiakov 入渗模型的 2 个经验系数 K 、 α 均呈显著减小趋势 ($P < 0.05$),表明残膜对水分入渗的阻碍作用明显; Philip 入渗模型中的吸渗率 s 也随残膜量增大显著减小 ($P < 0.05$),土壤吸渗率与水头、土壤质地和粗糙度等有关^[30],残膜的存在使入渗阻力增加,导致土壤吸湿率减小,稳定入渗率 A 变化趋势则不明显,砂壤土中 A 没有显著性变化,砂土中 A 虽有显著性变化但没有明显规律。Kostiakov 入渗模型和 Philip 入渗模型均能较好模拟不同残膜条件下土壤入渗规律(表 2),砂壤土各处理的均方根误差最大值为 0.041 cm,几何平均数最小值为 0.961,决定系数 R^2 最小值为 0.962,而砂土 3 个参数分别为 0.025 cm、0.968、0.970。另外随着残膜量的增加,2 个模型的拟合精度都呈降低趋势,当残膜量达到 200 kg/hm²后,均方根误差明显变大,特别是砂土的均方根误差增大了 2~3 倍。对同种质地土壤在残膜量相同的情况下,Philip 入渗模型拟合后的均方

根误差均小于 Kostiakov 入渗模型,几何平均数和决定系数 R^2 均大于或等于 Kostiakov 入渗模型,表明在同种质地条件下,Philip 入渗模型的拟合精度要优于 Kostiakov 入渗模型。而相同残膜量情况下 2 种入渗模型对于砂土各处理拟合后的 R^2 均大于砂壤土,表明 2 种入渗模型对砂土的拟合效果要好于砂壤土,这可能是由于砂土大孔隙较多的特性导致残膜对水分入渗的影响较小造成的。而李元桥等^[17]通过研究认为 Kostiakov 入渗模型拟合效果要优于 Philip 入渗模型,这可能是由于其装土容重较小,优势流作用明显,从而对不同模型的适用性造成影响。

对于 Black 蒸发模型,2 种质地土壤的均方根误差随残膜量增大而增大,几何平均数和决定系数 R^2 均随残膜量增加而减小,说明 Black 蒸发模型的拟合效果随着残膜量的增大精度呈明显的下降趋势(表 3),砂壤土 400 kg/hm²处理(SL5)的均方根误差比无残膜处理(SL1)增大了 3.4 倍,而砂土则增大了 8 倍。而 Rose 蒸发模型的几何平均数和 R^2 随着残膜量的增加没有明显的降低趋势,尽管高残膜

表 2 不同残膜量条件下 Kostiakov 和 Philip 入渗模型拟合效果分析

Tab. 2 Fitting effect analysis of Kostiakov and Philip infiltration models under different residual plastic film amounts

处理	Kostiakov 入渗模型					Philip 入渗模型					
	K	α	均方根 误差/cm	几何 平均数	R^2	s	A	均方 根误差/cm	几何 平均数	R^2	
砂壤土	SL1	1.263 ^a	0.489 ^a	0.014	0.988	0.986	2.812 ^a	0.001 ^a	0.010	0.990	0.988
	SL2	1.135 ^{ab}	0.486 ^a	0.017	0.971	0.976	2.629 ^{ab}	0.002 ^a	0.016	0.980	0.982
	SL3	1.078 ^b	0.485 ^a	0.032	0.980	0.974	2.528 ^b	0.001 ^a	0.015	0.982	0.976
	SL4	1.003 ^b	0.479 ^b	0.029	0.965	0.969	2.427 ^{bc}	0.001 ^a	0.022	0.965	0.970
	SL5	0.935 ^c	0.475 ^b	0.041	0.961	0.962	2.352 ^c	0.002 ^a	0.035	0.964	0.962
砂土	SS1	6.610 ^a	0.440 ^a	0.009	0.991	0.993	12.568 ^a	0.409 ^b	0.008	0.991	0.994
	SS2	6.183 ^b	0.438 ^a	0.012	0.995	0.995	12.026 ^a	0.332 ^c	0.008	0.996	0.995
	SS3	5.625 ^c	0.418 ^b	0.006	0.989	0.998	10.559 ^b	0.465 ^{ab}	0.005	0.999	0.998
	SS4	5.221 ^c	0.413 ^b	0.021	0.977	0.974	10.357 ^b	0.345 ^c	0.019	0.985	0.988
	SS5	4.609 ^d	0.383 ^c	0.025	0.968	0.970	8.737 ^c	0.493 ^a	0.022	0.989	0.991

注:同列数值后不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),下同。

表 3 不同残膜量条件下 Black 和 Rose 蒸发模型拟合效果分析

Tab. 3 Fitting effect analysis of Black and Rose evaporation models under different residual plastic film amounts

处理	Black 蒸发模型					Rose 蒸发模型					
	F	B	均方根 误差/cm	几何 平均数	R^2	C	D	均方根 误差/cm	几何 平均数	R^2	
砂壤土	SL1	5.738 ^{ab}	27.045 ^a	0.010	0.992	0.992	0 ^b	27.783 ^a	0.008	0.989	0.991
	SL2	0 ^c	24.997 ^b	0.009	0.991	0.992	0.009 ^b	24.921 ^b	0.009	0.990	0.992
	SL3	2.158 ^b	22.486 ^c	0.021	0.984	0.988	0 ^b	22.763 ^c	0.017	0.987	0.988
	SL4	0 ^c	21.385 ^c	0.014	0.981	0.990	0.338 ^a	18.524 ^d	0.010	0.991	0.994
	SL5	9.172 ^a	17.663 ^d	0.034	0.980	0.985	0.000 ^b	18.842 ^d	0.021	0.982	0.980
砂土	SS1	0 ^a	64.353 ^a	0.048	0.945	0.950	0.561 ^c	59.604 ^a	0.044	0.950	0.951
	SS2	0 ^a	60.174 ^b	0.079	0.943	0.948	0.833 ^c	53.122 ^b	0.038	0.952	0.950
	SS3	0 ^a	55.529 ^c	0.092	0.928	0.939	1.429 ^b	43.425 ^c	0.075	0.944	0.948
	SS4	0 ^a	52.180 ^d	0.114	0.920	0.920	2.937 ^b	27.314 ^d	0.061	0.946	0.956
	SS5	0 ^a	48.598 ^d	0.390	0.878	0.881	4.484 ^a	10.626 ^c	0.036	0.961	0.965

量处理均方根误差大于低残膜量或无残膜处理,但不同处理间无显著差异($P > 0.05$),特别是砂土 400 kg/hm^2 处理(SS5)的均方根误差反而在砂土处理中最小,另外 Rose 蒸发模型的决定系数 R^2 总体上也高于 Black 蒸发模型。可见 Rose 蒸发模型对于残膜存在下土壤蒸发模拟的适用性优于 Black 模型。Rose 蒸发模型能较真实地反映农膜残留情况下土壤累积蒸发量随时间的变化情况。

3 结论

(1)随着土壤中残膜量增多,湿润锋运移相同距离所需时间也随之增加,入渗速率则随着残膜量的增加而变慢,其中砂土比砂壤土的入渗速率大超过10倍,但是不同残膜处理间的差异略小于砂壤土。湿润锋运移至30 cm处时,砂壤土SL5处理(残膜量 400 kg/hm^2)比SL1处理(无残膜)运移时间增加了27.56%($P = 0.038$),砂土SS5处理(残膜量 400 kg/hm^2)比SS1处理(无残膜)运移时间同样增加了26.28%($P = 0.040$),即土壤中残膜量的增加会显著减慢湿润锋运移速率。

(2)随着土壤中残膜量增多,在相同入渗时间内,累积入渗量逐渐减小,且不同处理间差异显著

($P < 0.05$)。在入渗100、200、300、381 min(无膜处理入渗结束)时,砂壤土SL5处理比SL1处理入渗量分别减小了23.12%、17.99%、15.40%、8.25%,且阻水效应略大于砂土。

(3)随着土壤中残膜量增多,土壤累积蒸发量及蒸发速率都呈减小趋势,不同残膜量处理间差异显著($P < 0.05$),且砂壤土差异性大于砂土。在蒸发开始后108 h,砂壤土SL2~SL5处理较SL1无残膜处理累积蒸发量分别减小了7.24%、13.15%、17.15%、30.63%($P = 0.019$),砂土SS2~SS5处理较对照SS1处理累积蒸发量分别减小了5.55%、13.17%、13.83%、15.08%($P = 0.033$),且砂壤土和砂土 400 kg/hm^2 残膜量处理的蒸发速率分别比各自的无残膜处理低30.65%和15.08%。

(4)Kostiakov入渗模型和Philip入渗模型均能较好模拟不同残膜条件下土壤入渗规律,同种质地土壤在残膜量相同的情况下,Philip入渗模型的拟合精度要优于Kostiakov入渗模型,相同残膜量情况下2种入渗模型对砂土的拟合效果要好于砂壤土。Rose蒸发模型对于残膜存在下土壤蒸发模拟的适用性优于Black模型,能较真实地反映农膜残留情况下土壤累积蒸发量随时间的变化情况。

参 考 文 献

- HOU Xiaoyan, WANG Fengxin, HAN Jiangjiang, 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.
- 赵永敢,王婧,李玉义,等. 秸秆隔层与地膜覆盖有效抑制潜水蒸发和土壤返盐[J]. *农业工程学报*, 2013, 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*, 2013, 29(23): 109 - 117. (in Chinese)
- 李仙岳,史海滨,吕焯,等. 土壤中不同残膜量对滴灌入渗的影响及不确定性分析[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(8): 84 - 90. LI Xianyue, SHI Haibin, LÜ Ye, et al. Effects of different residual plastic film quantities in soil on drip infiltration and its uncertainty analysis [J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(8): 84 - 90. (in Chinese)
- 严昌荣,梅旭荣,何文清,等. 农用地膜残留污染的现状与防治[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(11): 269 - 272. YAN Changrong, MEI Xurong, HE Wenqing, et al. Present situation of residue pollution of mulching plastic film and controlling measures [J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(11): 269 - 272. (in Chinese)
- 张丹,胡万里,刘宏斌,等. 华北地区地膜残留及典型覆膜作物残膜系数[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(3): 1 - 5. ZHANG Dan, HU Wanli, LIU Hongbin, et al. Characteristics of residual mulching film and residual coefficient of typical crops in North China [J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(3): 1 - 5. (in Chinese)
- 童文杰,陈中督,陈阜,等. 河套灌区玉米耐盐性分析及生态适宜区划分[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(10): 131 - 137. TONG Wenjie, CHEN Zhongdu, CHEN Fu, et al. Analysis of maize salt tolerance in Hetao irrigation district and its ecological adaptable region [J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(10): 131 - 137. (in Chinese)
- 杨彦明,傅建伟,庞彰,等. 内蒙古农田地膜残留现状分析[J]. *内蒙古农业科技*, 2010(1): 10 - 12. YANG Yanming, FU Jianwei, PANG Zhang, et al. Analysis on the current situation of farmland film residue in Inner Mongolia [J]. *Inner Mongolia Agricultural Science and Technology*, 2010(1): 10 - 12. (in Chinese)
- 王婧,逢焕成,任天志,等. 地膜覆盖与秸秆深埋对河套灌区盐渍土水盐运动的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(15): 52 - 59. WANG Jing, PANG Huancheng, REN Tianzhi, et al. Effect of plastic film mulching and straw buried on soil water-salt dynamic in Hetao plain [J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(15): 52 - 59. (in Chinese)
- 何文清,严昌荣,赵彩霞,等. 我国地膜应用污染现状及其防治途径研究[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(3): 533 - 538. HE Wenqing, YAN Changrong, ZHAO Caixia, et al. Study on the pollution by plastic mulch film and its countermeasures in China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(3): 533 - 538. (in Chinese)
- 刘建国,李彦斌,张伟,等. 绿洲棉田长期连作下残膜分布及对棉花生长的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(2): 246 - 250. LIU Jianguo, LI Yanbin, ZHANG Wei, et al. The distributing of the residue film and influence on cotton growth under continuous

- cropping in oasis of Xinjiang [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(2):246 – 250. (in Chinese)
- 11 王志超,李仙岳,史海滨,等. 农膜残留对土壤水力参数及土壤结构的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(5):101 – 106. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150515&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.015.
WANG Zhichao, LI Xianyue, SHI Haibin, et al. Effects of residual plastic film on soil hydrodynamic parameters and soil structure[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(5):101 – 106. (in Chinese)
- 12 YAN Changrong, HE Wenqing, NEIL C, et al. Plastic-film mulch in Chinese agriculture: importance and problems [J]. *World Agriculture*, 2014, 4(2): 32 – 36.
- 13 王志超,李仙岳,史海滨,等. 残膜埋深对滴灌条件下粉砂壤土水分入渗影响的试验研究[J]. *土壤*, 2014, 46(4): 710 – 715.
WANG Zhichao, LI Xianyue, SHI Haibin, et al. Study on effect of plastic film residue at different buried depths on silt loam drip irrigation [J]. *Soils*, 2014, 46(4): 710 – 715. (in Chinese)
- 14 张建军,郭天文,樊廷录,等. 农用地膜残留对玉米生长发育及土壤水分运移的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2014, 33(1):100 – 102.
ZHANG Jianjun, GUO Tianwen, FAN Tinglu, et al. The effect of the agricultural residual plastic film on maize growth and development and soil moisture movement[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2014, 33(1):100 – 102. (in Chinese)
- 15 毕继业,王秀芬,朱道林. 地膜覆盖对农作物产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(11):172 – 175.
BI Jiye, WANG Xiufen, ZHU Daolin. Effect of plastic-film mulch on crop yield[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(11): 172 – 175. (in Chinese)
- 16 董合干,刘彤,李勇冠,等. 新疆棉田地膜残留对棉花产量及土壤理化性质的影响[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(8):91 – 99.
DONG Hegan, LIU Tong, LI Yongguan, et al. Effects of plastic film residue on cotton yield and soil physical and chemical properties in Xinjiang [J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(8): 91 – 99. (in Chinese)
- 17 李元桥,何文清,严昌荣,等. 点源供水条件下残膜对土壤水分运移的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(6):145 – 149.
LI Yuanqiao, HE Wenqing, YAN Changrong, et al. Effect of residual film on soil infiltration under drip irrigation [J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(6): 145 – 149. (in Chinese)
- 18 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.
- 19 李艳,刘海军,黄冠华. 麦秸覆盖条件下土壤蒸发阻力及蒸发模拟[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(1):98 – 106.
LI Yan, LIU Haijun, HUANG Guanhua. Modeling resistance of soil evaporation and soil evaporation under straw mulching[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(1): 98 – 106. (in Chinese)
- 20 张少文,张玻华,刘洁颖,等. 盐分对土壤蒸发影响的试验及其数值模拟[J]. *灌溉排水学报*, 2015, 34(5):1 – 5.
ZHANG Shaowen, ZHANG Bohua, LIU Jieying, et al. Effect of salinity on soil evaporation and its simulation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34(5):1 – 5. (in Chinese)
- 21 张婉璐,魏占民,徐睿智,等. PAM 对河套灌区盐渍土物理性状及水分蒸发影响的初步研究[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(3):227 – 231.
ZHANG Wanlu, WEI Zhanmin, XU Ruizhi, et al. Preliminary study on effect of PAM on physical properties and water evaporation of saline-alkali soil of Hetao irrigation [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(3): 227 – 231. (in Chinese)
- 22 原林虎. Philip 入渗模型参数预报模型研究与应用[D]. 太原:太原理工大学, 2013.
YUAN Linhu. Research and application of Philip infiltration model parameters prediction[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2013. (in Chinese)
- 23 范严伟,赵文举,冀宏. 膜孔灌溉单孔入渗 Kostiaikov 模型建立与验证[J]. *兰州理工大学学报*, 2012, 38(3):61 – 66.
FAN Yanwei, ZHAO Wenju, JI Hong. Establishment and verification of Kostiaikov model for film-hole irrigation with single-hole infiltration[J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2012, 38(3): 61 – 66. (in Chinese)
- 24 刘春成,李毅,任鑫,等. 四种入渗模型对斥水土壤入渗规律的适用性[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(5):62 – 67.
LIU Chuncheng, LI Yi, REN Xin, et al. Applicability of four infiltration models to infiltration characteristics of water repellent soils[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(5): 62 – 67. (in Chinese)
- 25 李卓,吴普特,冯浩,等. 不同粘粒含量土壤水分入渗能力模拟试验研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(3):71 – 77.
LI Zhuo, WU Pute, FENG Hao, et al. Effects of soil clay particle content on soil infiltration capacity by simulated experiments [J]. *Journal of Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(3): 71 – 77. (in Chinese)
- 26 刘旭. 科尔沁沙地坨甸相间地区土壤蒸发的野外试验与动态模拟[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2010.
LIU Xu. Test and simulation analysis for soil evaporation dynamics in dune-meadow-dune area in horqin sand[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2010. (in Chinese)
- 27 ROSE E J. *Agricultural physics*[M]. Oxford:Pergamon,1996.
- 28 宋日权,褚贵新,冶军,等. 掺砂对土壤水分入渗和蒸发影响的室内试验[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(增刊1):109 – 114.
SONG Riquan, CHU Guixin, YE Jun, et al. Effects of surface soil mixed with sand on water infiltration and evaporation in laboratory[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(Supp. 1): 109 – 114. (in Chinese)
- 29 马辉,梅旭荣,严昌荣,等. 华北典型农区棉田地膜残留特点研究[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(2):570 – 573.
MA Hui, MEI Xurong, YAN Changrong, et al. The residue of mulching film of cotton field in North China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2):570 – 573. (in Chinese)
- 30 邵明安,王全九,黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京:高等教育出版社, 2006.
- 31 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2004.