

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.11.012

覆膜开孔条件下斥水性层状土壤蒸发实验^{*}

李毅¹ 任鑫²

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100; 2. 南阳市审计局, 南阳 473000)

【摘要】 覆膜开孔影响田间非均质土壤的水分运动过程, 尤其当斥水程度不同时, 其运动过程更趋于复杂。在控制土表不同覆膜开孔率条件下, 进行了不同斥水程度的壤夹砂和砂夹壤的土柱蒸发实验, 测定和分析了不同条件下土壤水分蒸发量变化过程和含水率剖面。结果表明, 全覆膜的累积蒸发量-时间曲线明显较低, 相应的蒸发10d后土壤水分剖面也与初始水分剖面接近, 对于壤夹砂尤其明显。覆膜开孔率增加时, 同条件下两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。斥水程度增加时, 累积蒸发量有所减小, 说明斥水性的存在降低了水分运移速率。当土壤为严重斥水时, 斥水性对水分运动过程的影响比覆膜开孔率的影响更明显。对于不同斥水程度的壤夹砂, 采用对数函数表达累积蒸发量 and 时间的定量关系较好, 而对于不同斥水程度下的砂夹壤分别采用幂函数和对数函数表达。

关键词: 斥水性 覆膜开孔率 夹层土壤 蒸发 含水率

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)11-0058-07

Evaporation Experiments on Layered Water-repellent Soil under Perforated Plastic Mulch

Li Yi¹ Ren Xin²

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Accounts Bureau of Nanyang, Nanyang 473000, China)

Abstract

The perforated plastic mulch affects soil water movement in the heterogeneous field. Especially when soil water repellency degrees are different, the soil water movement process tends to be more complicated. Soil column evaporation experiments were conducted for Lou soil layered by sand and sand layered by Lou soil at various hydrophobic degrees under the controlled open-hole-ratio conditions. The soil water evaporation and soil moisture profiles at different conditions were measured and analyzed. The results showed that the curves of cumulative evaporation and time for full plastic mulch were obviously low, the corresponding soil moisture profile for ten days of evaporation was closed to the initial moisture profile, and this characteristic was more suitable to Lou soil layered by sand. When the open-hole-ratio increased, the cumulative evaporation of the two types of layered soil increased obviously compared with the full plastic mulch condition, showing the decreasing of mulching effects for conserving water even at small open-hole-ratios. When the water repellency degree increased, the cumulative evaporation decreased slightly, indicating the hydrophobicity of soils slowed down the water movement speed. When soil was seriously hydrophobic, hydrophobicity affected soil water movement more than open-hole-ratios. Logarithmic functions fit well for describing cumulative evaporation and time of various hydrophobic degrees of Lou soil layered by sand, while power functions and logarithmic functions were selected for sand layered by various hydrophobic degrees of Lou soils.

Key words Hydrophobicity, Open-hole-ratio, Layered soil, Evaporation, Soil moisture

收稿日期: 2012-06-08 修回日期: 2012-07-08

* 国家自然科学基金重点资助项目(91125010)

作者简介: 李毅, 副教授, 博士, 主要从事农业水土工程研究, E-mail: liyikitty@126.com

引言

土壤斥水性是指水分很难湿润土壤颗粒表面的物理现象。土壤斥水性不受土地利用类型和气候条件的限制,在世界上很多国家都普遍存在^[1-2]。土壤斥水会阻滞或延迟土壤水分入渗^[3],导致空间变异性的发生^[4],其中盐碱土斥水特征具有空间上的尺度效应^[5-6]。斥水性影响土壤水分蒸发,亲水土壤的累积蒸发量比斥水土壤的大^[7]。土壤含水率、温度和颗粒大小对土壤斥水性有不同程度的影响^[8]。不同水质如蒸馏水^[9]和微咸水灌溉^[10],或滴灌^[11]点源灌溉方式下,斥水与亲水土壤的入渗规律有明显区别。

田间土壤水分的运动过程受地表条件和土壤质地的影响,如裸地^[12]、透明塑料薄膜覆盖^[13]、草被覆盖^[14]等不同的地表控制条件及土壤剖面的层状非均匀质地结构^[15]均是影响水分迁移和能量平衡的主要因素。农田覆膜条件下,由于灌水孔、出苗孔和田间不能全覆膜,需采用一个概化的指标反映覆膜开孔情况^[16]。近年对于裸地及覆膜开孔条件下的土壤水、盐及热状况已有部分研究^[17-19],但覆膜开孔条件下斥水性层状土壤的水热运移规律目前并不明确,有必要对其进行研究。

本文采用覆膜开孔率来综合代表田间覆膜开孔因素,选取壤夹砂和砂夹壤两种典型层状土壤,在控制大气蒸发能力不变的条件下,用 6 种覆膜开孔率控制土表条件,以 4 种不同斥水度、具有一定初始湿度的层状土壤进行室内蒸发实验,对比不同斥水度层状土壤蒸发特性以及覆膜开孔率对层状土蒸发的影响,为农田层状斥水土壤的蒸发规律研究提供参考。

1 材料与方法

实验在西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室进行。供试土样为壤土和砂土,分别取自陕西杨凌北部西卜村和南部渭河周边农田的表层 30 cm 土壤。土样经风干、碾压、粉碎后过 2 mm 筛,用烘干法测定壤土和砂土的风干含水率分别为 2.54% 和 0.35%。用吸管法测定土样的颗粒分布,测得壤土和砂土的粘、粉、砂质量分数分别为 14.8%、78.7%、6.5% 和 0.1%、6.2%、93.7%。

按照 Dekker 等^[20]提出的斥水性分类标准,采用滴水穿透时间法可将土壤分为不斥水性(滴水穿透时间小于 5 s)、弱斥水性(5~60 s)、强斥水性(60~600 s)及严重斥水性(600~3 600 s)几个级别。将壤土中加入不同剂量的斥水材料(十八烷基伯胺)配置

成具有不同斥水度的土样。具体配置方法为:每 1 kg 壤土分别加入 0.67 g、1 g 及 1.5 g 十八烷基伯胺和适量蒸馏水充分搅拌均匀,然后放到 75℃ 恒温箱干燥 24 h,形成稳定的弱斥水、强斥水和严重斥水土壤。未加斥水剂的壤土和砂土为亲水土壤。

称取 4 种斥水等级的壤土土样,加蒸馏水配制成 30.5% 的初始质量含水率。砂土初始质量含水率配置为 17.5%。按照壤土 1.35 g/cm³、砂土 1.65 g/cm³ 的设计容重,将土样分层(每层 5 cm)均匀装入双层有机玻璃土柱中。土柱截面为圆形,内径为 8.5 cm,外径为 10 cm,高 50 cm。装土总高度为 50 cm,夹层均距土表 5 cm,夹层厚均为 5 cm,从而形成壤夹砂和砂夹壤两种典型层状土壤类型。

利用垂直一维蒸发实验系统进行均匀初始土壤含水率的覆膜开孔蒸发实验。实验装置见图 1。同时填装 6 个土柱之后,将土表贴上开孔率分别为 0(全覆膜)、0.69%、2.78%、7.71%、18.7% 和 100%(不覆膜)的透明塑料膜。其中覆膜开孔率为 0.69% 时开孔直径为 1 mm,2.78%、7.71% 和 18.7% 时孔径均为 2 mm,膜孔呈梅花状等间距分布。

距每个土柱表层 25 cm 处悬挂一个功率为 250 W 的远红外灯,作为加热设施。同时打开 6 个土柱上方的远红外灯,预热稳定后开始蒸发,用秒表

计时,用与土柱横截面积相同的蒸发皿进行相同供热条件下的水面蒸发,测定的水面蒸发强度为 0.089 cm/h。每天在固定时刻对土柱用 0.1 g 精度的电子秤称量。蒸发总历时 10 d,蒸发结束后,立即在土柱不同深度取土,用干燥法测定土壤含水率。

2 结果与分析

2.1 土壤蒸发的剖面水分分布

2.1.1 壤夹砂

在不同的覆膜开孔率条件下,由于覆膜全部或部分阻隔了土壤和大气间的联系,土表与大气之间的水汽交换过程与裸土不同。除覆膜开孔因素外,

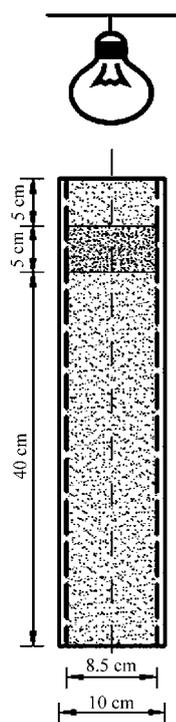


图 1 蒸发装置示意图
Fig. 1 Sketch map of evaporation equipment

夹层和土壤斥水性也不同程度地影响土壤水分运动和蒸发的水分分布。图2显示了4种斥水度、不同土表覆膜开孔率下, 塿夹砂土壤蒸发10 d的剖面水分分布特征。

图2a~2c中: 当斥水度稳定时, 蒸发10 d的塿夹砂土壤含水率剖面在不同覆膜开孔率下有明显差异。其中各斥水度下、全覆膜蒸发的土壤剖面水分比初始值有明显降低。说明全覆膜明显保持土壤墒情; 一旦覆膜开孔, 即使开孔率小至0.69%, 蒸发10 d后的土壤含水率剖面便陡然降低, 尤其在5 cm以上的深度范围, 该特征更为明显; 总体上, 相同斥水度条件下, 覆膜开孔率越大, 同深度的土壤剖面含

水率越小, 在5~10 cm的砂层内, 含水率随覆膜开孔率增加而减小的趋势更明显, 10 cm以下的土壤含水率剖面均接近初始值, 但不斥水条件下不同覆膜开孔率的含水率剖面比其他各斥水度的差异更大。

全覆膜时(图2d), 在不同斥水度下, 土壤水分剖面在塿土层中均接近于初始值, 但在5~10 cm的砂土夹层中, 基本上随斥水程度的增加含水率相应增加。说明斥水程度增加对于蒸发过程有抑制作用。开孔2.78%时(图2e), 5 cm以上含水率比初始值明显降低, 不斥水土壤的含水率剖面明显比斥水的低。不覆膜的含水率剖面(图2f)整体比开孔2.78%的低, 尤其在砂层5~10 cm范围差异更明显。

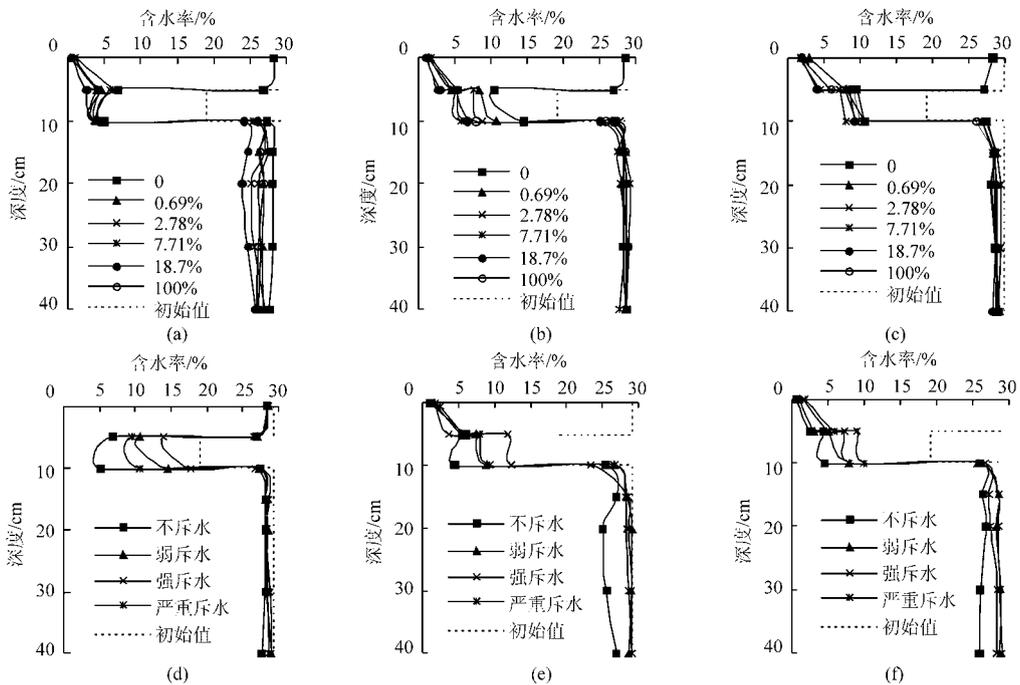


图2 不同斥水程度塿夹砂土壤覆膜开孔蒸发的剖面含水率

Fig. 2 Soil moisture distributions of Lou soil layered by sand at different water repellent degrees under perforated plastic mulches

(a) 不斥水塿土夹不斥水砂土 (b) 微弱斥水塿土夹不斥水砂土 (c) 严重斥水塿土夹不斥水砂土

(d) 全覆膜 (e) 覆膜开孔率为2.78% (f) 不覆膜

2.1.2 砂夹塿

不同斥水程度的塿夹层也对蒸发有影响。图3为砂夹塿蒸发10 d时、不同覆膜开孔率条件下, 4种斥水度的土壤剖面水分分布。

由图3a和3b可知, 对于饱和砂土夹不同斥水程度的塿土, 蒸发10 d后, 夹层塿土的斥水度稳定时, 夹层以上(0~5 cm深度范围)砂土的含水率在不同覆膜开孔率下均小于5%, 5~10 cm深度范围内, 含水率大致随覆膜开孔率的增加而递减, 10 cm及更深处的含水率也基本随覆膜开孔率的增加呈递减趋势。

由图3c和3d可知, 当土壤和覆膜开孔率确定, 0~5 cm深度的砂层含水率均较低。不同斥水程度

下全覆膜5~10 cm塿土夹层的含水率稍高, 而不覆膜5~10 cm塿土夹层的含水率则低得多, 但含水率变化与斥水度无单调关系。全覆膜条件下, 10~40 cm的含水率大致随深度的增大而增大, 且斥水度增强, 含水率相应增加; 部分含水率在30~40 cm深度时甚至超过了砂土的初始值, 这是由于蒸发和再分布同时作用导致的。不覆膜条件下, 10~40 cm的含水率也大致随深度的增大而增大, 且斥水度增强, 含水率也变大。总体上, 不斥水的剖面含水率低于各级斥水度的剖面含水率。

由于斥水性、夹层及覆膜开孔率的综合影响, 砂夹塿水分运动比塿夹砂复杂, 土壤含水率剖面有不同程度的交叉。

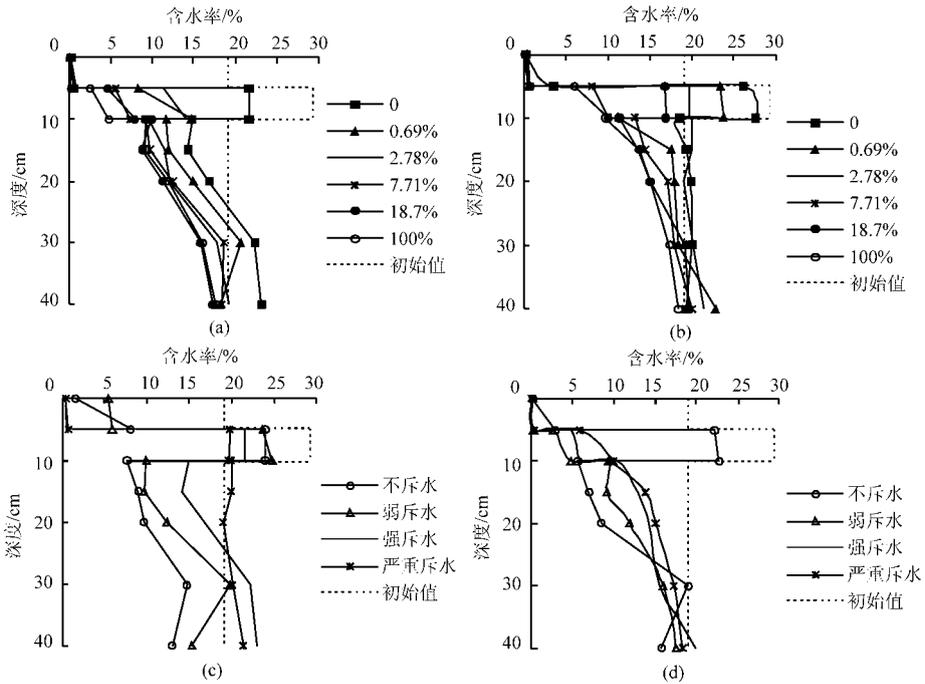


图 3 不同覆膜开孔率条件下砂夹壤蒸发后剖面含水率

Fig. 3 Soil moisture distributions of sand with Lou soil interlayer under different open hole ratios

(a) 砂土夹弱斥水壤土 (b) 砂土夹严重斥水壤土 (c) 砂夹壤,全覆膜 (d) 砂夹壤,不覆膜

2.2 土壤累积蒸发量随时间变化规律

2.2.1 累积蒸发量的时间变化特征

由于覆膜及开孔改变了地表土壤与大气之间的水分和能量交换,使得不同覆膜开孔率条件下的土壤蒸发存在差异。为对比覆膜开孔对不同斥水度层状土累积蒸发量的影响,点绘不同条件下累积蒸发量 E 随蒸发时间 t 的变化关系,见图 4。

由图 4a 和图 4b 可知:①不斥水和严重斥水壤夹砂条件下,全覆膜时累积蒸发量远小于覆膜开孔

情况。说明覆膜一旦开孔,保墒效果就大大降低。

②不斥水条件下, $E-t$ 曲线随覆膜开孔率的增加明显单调递增,其曲线整体呈非线性增加趋势。覆膜开孔率 0.69%、2.78%、7.71%、18.7% 及 100% 的总蒸发量分别为 3.74、3.76、3.83、3.83 及 3.84 cm,非常接近。③极严重斥水性壤土夹砂土的 $E-t$ 曲线也具有随覆膜开孔率增加而整体增加的规律,但当覆膜开孔率大于 0.69% 时,其余 4 种开孔率的 $E-t$ 曲线间差异明显比不斥水的小。说明对于严重

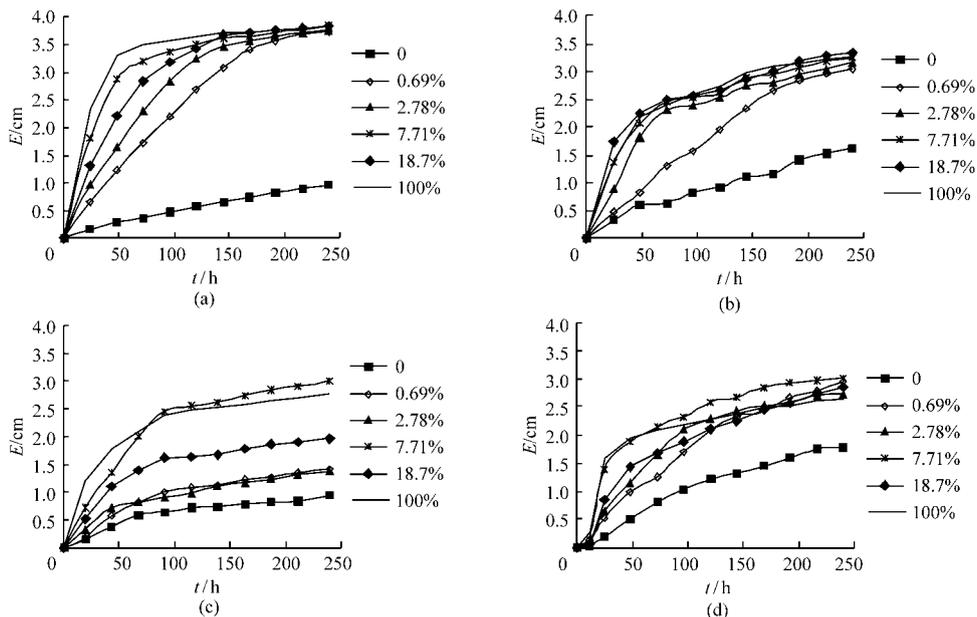


图 4 累积蒸发量随时间变化曲线

Fig. 4 Cumulative evaporation curves varying with times

(a) 不斥水壤夹砂 (b) 严重斥水壤夹砂 (c) 砂夹不斥水壤土 (d) 砂夹严重斥水壤土

斥水土壤,开孔率大于0.69%时覆膜保墒作用不明显,且斥水性对水分蒸发的影响比覆膜开孔率的大。

④在同一覆膜开孔率条件下,不斥水壤夹砂的 $E-t$ 曲线整体比严重斥水的高,这说明斥水性降低了水分运动速率,相应减少了土壤水分蒸发量,从而保持了土层蓄水量。

由图4c和图4d可知:①砂夹不斥水壤土的 $E-t$ 曲线在全覆膜时最低,随覆膜开孔率的增加而增加,但开孔率为0.69%和2.78%的差异不大,开孔率为7.71%的 $E-t$ 曲线接近于100%。说明覆膜一旦开孔,其蒸发过程趋于复杂。②砂夹严重斥水壤土的 $E-t$ 曲线同样在全覆膜时最低,当覆膜开孔率小于7.71%时, $E-t$ 曲线随覆膜开孔率的增加而递增,但覆膜开孔率为18.7%和100%时, $E-t$ 曲线反而降低。总体上,覆膜开孔率在0.69%~100%范围变化时, $E-t$ 曲线的差异均不大,同样说明土壤严重斥水时,覆膜开孔率对水分运动的影响比斥水性的影响弱。③不斥水砂夹壤 $E-t$ 曲线在不同覆膜开孔率下比严重斥水砂夹壤的 $E-t$ 曲线更分散,差异更明显。

综合对比图4可知,在相同条件下,壤夹砂的总

蒸发量整体上大于砂夹壤的。

2.2.2 累积蒸发量与时间的定量关系

Gardner的研究表明均质土的累积蒸发量与时间平方根呈正比^[17-19],但本实验所得数据的分析表明,具有夹砂层的斥水壤土蒸发已不符合上述关系,因此需要寻求新的关系。为定量分析夹层层位及覆膜开孔率对土壤蒸发影响,对实测6个覆膜开孔率和4个斥水度下壤夹砂和砂夹壤的累积蒸发量 E 和时间 t 的关系采用不同的函数进行对比,包括线性关系、幂函数、对数函数及S型函数4种定量关系。直观地对比拟合决定系数 R^2 值表明,对于覆膜开孔蒸发条件下层状斥水土壤,线性关系和S型函数相对于对数函数和幂函数而言,描述不同条件下的 $E-t$ 关系精度稍差。因此,用对数函数 $E = A + B \ln t$ 及幂函数 $E = Ct^D$ 表示 $E-t$ 的定量关系更优,其中 A 、 B 、 C 和 D 均为经验参数。具体到不同土壤的 $E-t$ 关系又有所不同。对壤夹砂,用对数函数描述不同条件下的 $E-t$ 关系时,其决定系数 R^2 高于幂函数的 R^2 ,因此统一选取对数函数用于描述壤夹砂的 $E-t$ 定量关系。将优选得出的 $E-t$ 关系式及其参数列于表1。

表1 壤夹砂 $E-t$ 关系的对数函数参数

Tab.1 Parameters for logarithmic functions of $E-t$ for Lou soil layered by sand

壤土斥水程度	参数	覆膜开孔率/%					
		0	0.69	2.78	7.71	18.7	100
不斥水	A	-1.090	-4.348	-3.241	-2.051	-0.435	0.911
	B	0.360	1.482	1.312	1.114	0.804	0.557
	R^2	0.940	0.974	0.978	0.969	0.925	0.848
弱斥水	A	-0.701	-2.462	-2.654	-1.185	-1.957	-0.450
	B	0.245	0.966	0.994	0.778	0.940	0.630
	R^2	0.855	0.923	0.929	0.995	0.997	0.991
强斥水	A	-1.388	-3.069	-2.753	-0.954	-1.511	-0.756
	B	0.477	1.072	1.066	0.748	0.855	0.723
	R^2	0.953	0.984	0.994	0.993	0.979	0.987
严重斥水	A	-1.629	-3.782	-1.851	-0.457	-1.018	-0.998
	B	0.563	1.232	0.920	0.680	0.779	0.789
	R^2	0.914	0.956	0.974	0.978	0.986	0.987

表1中,用对数模型拟合壤夹砂 $E-t$ 的定量关系时,不斥水且覆膜开孔时,系数 A 随着覆膜开孔率的增大而增大,系数 B 随覆膜开孔率的增大而减小;对于斥水壤夹砂土壤,系数 A 和 B 随覆膜开孔率的变化均无明显规律。不同条件下的参数 A 大多为负值,参数 B 均为正值且大多小于1, R^2 均较高,其变化范围为0.848~0.995。

对于砂夹壤,壤土夹层不斥水和严重斥水时,用对数函数表达 $E-t$ 关系优于幂函数;壤土夹层弱斥水和强斥水时,幂函数优于对数函数。因此,在不斥水和严重斥水情况下选用对数函数表达 $E-t$ 定量关系,而在弱斥水和强斥水情况下则采用幂函数。对比后优选得出的 $E-t$ 关系式参数列于表2。

与表1的参数类似,砂夹壤 $E-t$ 函数关系的参

表 2 砂夹壤 $E-t$ 函数参数Tab. 2 Parameters of $E-t$ functions for sand layered by Lou soil

斥水程度	覆膜开孔率/%	对数函数 $E = A + B \ln t$ 的参数			斥水程度	覆膜开孔率/%	幂函数 $E = Ct^D$ 的参数		
		A	B	R^2			C	D	R^2
不斥水	0	-0.717	0.296	0.986	弱斥水	0	0.010	0.670	0.934
	0.69	-1.252	0.486	0.995		0.69	0.080	0.525	0.951
	2.78	-0.821	0.391	0.989		2.78	0.078	0.584	0.962
	7.71	-1.005	0.550	0.976		7.71	0.770	0.301	0.989
	18.7	-1.938	0.920	0.973		18.7	0.217	0.461	0.974
	100	-0.497	0.607	0.975		100	0.669	0.242	0.991
严重斥水	0	-1.662	0.609	0.956	强斥水	0	0.004	1.130	0.990
	0.69	-2.467	0.953	0.957		0.69	0.030	0.837	0.994
	2.78	-2.197	0.914	0.988		2.78	0.115	0.598	0.993
	7.71	-1.985	0.866	0.994		7.71	0.033	0.828	0.864
	18.7	-1.657	0.875	0.972		18.7	0.277	0.464	0.975
	100	-0.876	0.662	0.912		100	0.122	0.617	0.939

数与覆膜开孔率的关系也非单调对应。总体上,斥水性夹层土壤的蒸发情况较为复杂,需根据实际情况合理选择最优模型函数。

3 结论

(1) 壤夹砂的剖面水分分布随覆膜开孔率增加而降低,在不同斥水度下有明显差异。砂夹壤的表层含水率均较低,在 5 ~ 10 cm 夹层位置上,含水率随覆膜开孔率的增加而减小,随斥水度的增大而增大。10 cm 以下的剖面含水率随斥水度增加而整体

增高。

(2) 无论是壤夹砂,还是砂夹壤,累积蒸发量-时间曲线基本随覆膜开孔率的增大而增大。在相同的覆膜开孔率下,土壤斥水性越强,土壤导水性能越弱,累积蒸发量越小。

(3) 对数模型可作为不同斥水程度斥水壤土夹砂的累积蒸发量与蒸发时间的最佳函数关系。对于砂土夹不同斥水程度壤土,累积蒸发量与时间的关系可分别采用对数函数和幂函数表达。

参 考 文 献

- 李毅,商艳玲,李振华,等. 国内外土壤斥水性研究进展[J]. 农业机械学报,2012,43(1):68~75.
Li Yi, Shang Yanling, Li Zhenhua, et al. Advance of study on soil water repellency [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(1):68~75. (in Chinese)
- van Dam J C, Hendrickx J M H, van Ommen H C, et al. Water and solute movement in a coarse-textured water-repellent fieldsoil [J]. Journal of Hydrology, 1990, 120(1~4):359~379.
- Bauters T W J, Steenhuis T S, DiCarlo D A, et al. Physics of water repellent soils[J]. Journal of Hydrology, 2000, 231-232:233~243.
- Hallett P D, Numan N, Douglas J T, et al. Millimeter-scale spatial variability in soil water sorptivity: scale, surface elevation, and sub critical repellency effects [J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(2):352~358.
- 任鑫,李毅,李敏,等. 次生盐渍土垂向剖面斥水性及其与理化性质关系[J]. 农业机械学报,2011, 42(3):58~64,79.
Ren Xin, Li Yi, Li Min, et al. Relationship between soil water repellency and soil physical-chemical properties for vertical profiles in secondary saline field [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3):58~64, 79. (in Chinese)
- 郭丽俊,李毅,李敏,等. 农田土壤斥水性与理化性质的空间变异性[J]. 土壤学报,2011,48(1):37~45.
Guo Lijun, Li Yi, Li Min, et al. Spatial variability of soil water repellency and soil physical-chemical properties in a salinized-alkaline field [J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(1):37~45. (in Chinese)
- Bachmann J, Horton R, van der Ploeg R R. Isothermal and nonisothermal evaporation from four sandy soils of different water repellency [J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(6):1599~1607.
- de Jonge L W, Jacobsen O H, Moldrup P. Soil water repellency effects of water content, temperature and particle size [J].

- Soil Science Society of America Journal, 1999, 63(3):437~442.
- 9 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)
 - 10 刘春成,李毅,郭丽俊,等. 微咸水灌溉对斥水土壤水盐运移的影响[J]. 农业工程学报,2011,27(8):39~45.
Liu Chuncheng, Li Yi, Guo Lijun, et al. Effect of brackish water irrigation on water and salt movement in repellent soils [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(8): 39~45. (in Chinese)
 - 11 关冰艺,李毅,任改萍,等. 滴灌条件下斥水土壤水盐运移实验研究[J]. 灌溉排水学报,2012,31(2):19~24.
Guan Bingyi, Li Yi, Ren Gaiping, et al. Experiment study on water and salt transport characteristics of water-repellent soil under the condition of trickle irrigation [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(2): 19~24. (in Chinese)
 - 12 Lascano R J, van Bavel C H M. Simulation and measurement of evaporation from a bare soil [J]. Soil. Sci. Soc. Am. J., 1986, 50(5): 1127~1133.
 - 13 Mahrer Y, Naot O, Rawitz E, et al. Temperature and moisture regimes in soils mulched with transparent polyethylene [J]. Soil Science Society of America Journal, 1984, 48(2): 362~367.
 - 14 Munley W G, Hipps Jr L E. Estimation of regional evaporation for a tallgrass prairie from measurements of properties of the atmospheric boundary layer [J]. Water Resources Research, 1991, 27(2): 225~230.
 - 15 李毅,任鑫,Robert Horton. 不同质地和夹层位置对层状土入渗规律的影响[J]. 排灌机械工程学,2012,30(4):485~490.
Li Yi, Ren Xin, Robert Horton. Influence of various layer positions on infiltration characteristics of layered soils [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(4): 485~490. (in Chinese)
 - 16 Li Y, Shao M A, Wang W Y, et al. Open hole effects of perforated plastic mulches on soil water evaporation [J]. Soil Science, 2003, 168(11): 751~758.
 - 17 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.
Li Yi, Shao Ming'an, Wang Wenyan, et al. Dynamic variations of soil water and heat under evaporation conditions varying with aperture ratio of plastic mulch [J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(3): 387~393. (in Chinese)
 - 18 陈世平,李毅,高金芳. 覆膜开孔蒸发条件下不同斥水度土壤水盐变化规律[J]. 农业机械学报,2011,42(5):86~91.
Chen Shiping, Li Yi, Gao Jinfang. Evaporation experiment on different water repellent soils under perforated plastic mulch [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5): 86~91. (in Chinese)
 - 19 高金芳,李毅,陈世平,等. 覆膜开孔蒸发条件下土体高度对水盐运移的影响[J]. 农业机械学报,2010,41(9):50~55.
Gao Jinfang, Li Yi, Chen Shiping, et al. Effects of soil column heights on movement of soil water and soil salt during evaporation under perforated plastic mulch [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 50~55. (in Chinese)
 - 20 Dekker L W, Jungerius P D. Water repellency in the dunes with special reference to the Netherlands [J]. CATENA, 1990, 18(Supp.): 173~183.

(上接第 118 页)

- 7 Fluent Inc. FLUENT6.3 user's guide[M]. Lebanon: Fluent Inc., 2006.
- 8 Morsi S A, Alexander A J. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1972, 55(2): 193~208.
- 9 Loret J A, Gopalakrishnan S. Interaction between impeller and volute of pumps at off-design conditions [J]. ASHE Journal of Fluids Engineering, 1986, 108(12): 12~18.
- 10 黄社华,魏庆鼎. 激光测速粒子对复杂流动响应研究——II 典型流场中粒子跟随性的数值分析[J]. 水科学进展, 2003, 14(1): 28~35.
Huang Shehua, Wei Qingding. On velocity response of tracing particles in laser-based velocimetry to complex flow, 2, numerical analysis of sliding velocity of tracing particles in various flows [J]. Advances in Water Science, 2003, 14(1): 28~35. (in Chinese)
- 11 李恩邦,李志平,李淳,等. 湍流场示踪粒子跟随性的数值分析[J]. 仪器仪表学报,2009,30(2):225~231.
Li Enbang, Li Zhiping, Li Chun, et al. Numerical analysis of following behaviors of particle tracers in turbulent [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(2): 225~231. (in Chinese)