

砂性层状土柱蒸发过程实验与数值模拟*

任利东^{1,2} 黄明斌^{2†}

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

(2 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要 为了了解不同类型层状土柱蒸发特性, 利用砂土和砂黄土 2 种土壤, 设置 3 种不同厚度分层土柱 (11.25、22.5、45 cm) 和 2 种均质对照土柱, 测定了土柱蒸发过程中累积蒸发量、相对蒸发速率和剖面含水量的变化; 同时利用 2 种均质土柱排水过程优化的土壤水力参数和 Hydrus-1D 模型对 2 种均质土柱和 3 种不同类型层状土柱蒸发过程进行模拟分析。结果表明, 均质砂黄土蒸发第一阶段持续长达 34 d, 累积蒸发量显著高于均质砂土和其他 3 种不同类型分层土柱, 土柱剖面含水量变化进一步证明表层覆盖砂土可显著抑制土壤蒸发。利用排水过程优化的水力参数, HYDRUS-1D 可以较好地模拟层状土柱蒸发过程。研究结果对于旱半干旱区土壤水分管理具有指导意义。

关键词 蒸发速率; 累积蒸发量; 剖面含水量; Hydrus-1D 模型

中图分类号 S152.7 **文献标识码** A

近年来土层覆盖技术在矿区恢复、垃圾填埋以及农田土壤改良中得到了快速而广泛的应用^[1-3]。土层覆盖技术主要通过表层构建不同类型层状土壤, 达到减少土壤水分蒸发或者降低水分下渗的目的。大量研究表明, 层状土壤水分运动明显不同于均质土壤^[4-7]。因此, 准确了解层状土壤水分运动过程对于干旱半干旱地区土地复垦、土壤改良和田间水分管理具有重要指导意义。

关于均质土壤蒸发的实验研究已有许多, 主要集中在地下水位和土壤质地对蒸发的影响。Gowing 等^[8]研究均质砂土蒸发过程, 发现当地下水位超出砂土毛管水分上升高度时土壤蒸发速率开始明显降低, 土壤毛管上升高度同土壤进气值相当。刘广明和杨劲松^[9]通过室内试验研究发现土壤蒸发量同地下水位变化呈抛物线分布。宋日权等^[10-11]研究发现土壤蒸发强度同土壤质地关系密切, 一般轻质土壤和团聚体作用强的土壤蒸发强度弱于其他类型土壤。Wilson 等^[12]发现砂土蒸发速率降低时土壤表层吸力约为 3 000 kPa, 该值同土壤表层空气水汽压的大小接近。对层状土壤蒸发的研究主要集中在不同分层类型下土壤蒸发的差异。Willis^[13]

研究层状土壤对于蒸发的影响, 发现上细下粗型土壤分层对于蒸发的抑制作用很小, 同均质细砂土差异不大。罗焕炎等^[14]研究表明该类分层土壤蒸发强弱取决于下层粗质土壤分层厚度与其毛管上升高度的相对大小。上粗下细型分层土壤蒸发能力受上层覆盖土壤质地和厚度的影响, 当上层粗质土壤粒径小于一定值时, 蒸发能力随着粒径的变粗和分层厚度的增加而降低^[15]; 当上层粗质土壤粒径大于一定值时, 蒸发能力随着上层土壤粒径的增大而增大^[16]。Huang 等^[4]研究了室内不同类型层状土壤的蒸发特性, 发现不同分层类型土壤蒸发过程不同。上砂下黏型层状土壤, 蒸发的水分主要来自上层的砂土; 上黏下砂型层状土壤累积蒸发量远大于上砂下黏型层状土壤, 且蒸发失水主要来自下层砂土; 多层复合层状土壤蒸发量最大。

可见, 目前对于土壤蒸发的研究多是对土壤蒸发速率与蒸发量的探讨, 而对于层状土壤蒸发过程中水分再分布的研究相对较少。唐克丽等^[17]利用 1977 年和 1958 年的航片对照发现, 过去 20 年间晋陕蒙地区土地沙化由西北向东南推进了 3 ~ 10 km, 形成大面积的上砂下壤型层状土壤。此外近年来

* 国家自然科学基金项目 (No. 91025018, 41171186) 资助

† 通讯作者, E-mail: hmbd@nwsuaf.edu.cn

作者简介: 任利东 (1987—), 男, 陕西靖边人, 硕士研究生, 主要从事土壤物理。E-mail: renld315@163.com

收稿日期: 2013-12-16; 收到修改稿日期: 2014-07-22

该区煤炭开采面积大、土地扰动剧烈,土地复垦与生态重建任务重。据报道^[18],该区 2000 年煤矿塌陷面积可达 33 km²,2010 年矿区开采面积达 187.5 km²,可能构成塌陷面积达 75 km²。加之该区降水资源有限,提高水分利用效率是该区复垦成败的关键。本研究利用该区两种主要土壤类型砂土和砂黄土,构建上粗下细型不同厚度分层类型土柱及 2 种均质对照土柱,测定各土柱蒸发过程蒸发速率,累积蒸发量和土柱剖面含水量。同时利用 Hydrus-1D 模型模拟各土柱蒸发过程,以期揭示不同类型层状土壤蒸发特征,为矿区土地复垦提供理论指导。

1 材料与方 法

1.1 实验设计

试验于 2012 年 9 月在西北农林科技大学黄土

高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工模拟干旱大厅进行。2 种供试土壤分别采自陕西神木(砂黄土)和陕西靖边(砂土)。土样经过碾压、风干过 2 mm 筛,2 种土壤主要物理性质如表 1 所示。通过吸管法测定土壤颗粒组成,土壤质地分类采用国际制分类系统。土壤饱和导水率采用定水头法测定,水分特征曲线利用日本 HITACHI 公司生产的 CR21G 离心机测定,田间持水量通过水分特征曲线计算得到。李玉山等^[19]研究了黄土高原不同土壤类型田间持水量(田间实测)与吸力(离心机法测得)的关系,发现砂黄土的田间持水量对应的土壤水吸力为 60 kPa,砂土为 10 kPa。

试验共设 5 种处理,每个处理 3 个重复。其中层状土柱 3 种处理,分层厚度分别为 11.25、22.5 和 45 cm;均质对照土柱 2 种,主要用来优化水力参数。各处理分别如图 1 所示。

表 1 供试土壤物理性质
Table 1 Physical properties of the experimental soils

土壤类型 Soil type	砂粒 Sand (%)	粉粒 Silt (%)	黏粒 Clay (%)	干容重 Bulk density (g cm ⁻³)	田间持水量 Field capacity (cm ³ cm ⁻³)	质地 Texture
砂黄土 Sandy loess	82.0	11.1	6.9	1.46	0.112	砂质壤土 Sandy loam
砂土 Sand	96	2.1	1.9	1.63	0.043	砂土 Sand

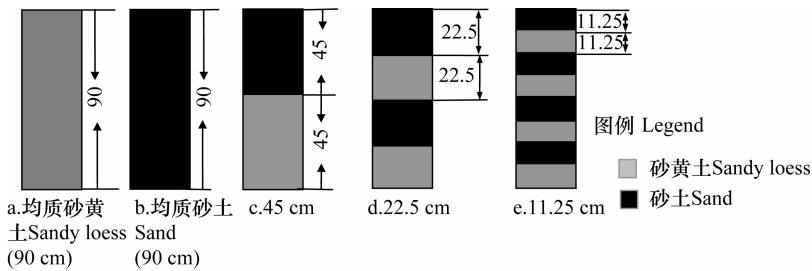


图 1 各处理土壤分层示意图

Fig. 1 Schematic diagram of layer structures of the soil columns in the experiment

试验采用高 90 cm、内径 23.5 cm 的有机玻璃土柱,各层土壤按设定的容重均匀装土,分层界面处用毛刷打毛。土柱由饱和状态开始排水^[20],排水(30 d)结束后,移除土柱上部覆盖物使其自由蒸发,同时将底部密封,开始蒸发试验,蒸发历时 56 d。土柱实际蒸发量通过称重法(最小读数为 10 g)分别在第 0、2、4、9、14、22、30、34、40、45、49、53 和 56 天测定。土柱剖面每隔 10 cm 安装一个长 12 cm 的 TDR(时域反射仪,time domain reflect meter)水分探

针,在第 0、8、14、22、30、40 和 56 天测定各土柱的剖面水分含量。在位于土柱上表面等高处架设一个直径 20 cm 的小型蒸发皿测量日水面蒸发量,由于室内实验潜在蒸发量的计算尚无较好的方法,因此本研究利用日水面蒸发量代替日潜在蒸发量^[12]。

1.2 模拟模型

垂直土柱蒸发试验可用描述一维饱和与非饱和土壤水分运动的 Richards 方程来模拟,其表达式为:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (1)$$

式中, t 为时间, h ; θ 为土壤体积含水量, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$; h 为基质势(饱和时为压力水头), cm ; z 为垂直距离, cm , 向下为负; $K(h)$ 为非饱和导水率, cm h^{-1} 。土壤基质势、导水率与含水率的关系分别采用 van Genuchten-Mualem (VG-M) 方程来拟合^[21]:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|]^m}, & h < 0 \\ \theta_s, & h \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$K(h) = \begin{cases} K_s S_e^{0.5} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2, & h < 0 \\ K_s, & h \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (4)$$

式中, S_e 为饱和度, 无量纲; θ 为体积含水量, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$; θ_r 和 θ_s 分别代表残留含水量和饱和含水量, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$; α , n 和 m 是 VG 方程参数, 其中 $m = 1 - 1/n$; K_s 为饱和导水率, cm h^{-1} 。

以蒸发开始时测定的土壤剖面含水量作为初始条件, 土柱下边界条件设为零通量, 上边界条件为蒸发边界。土柱上界面实际蒸发计算为:

$$-K \left(\frac{\partial h(z, t)}{\partial z} + 1 \right) = E_a(t), \quad z = L \quad (5)$$

$$-h_A \leq h(L, t) \leq 0 \quad (6)$$

$$E_a(t) \leq E_p \quad (7)$$

式中, $E_a(t)$ 为土柱表面实际蒸发速率, cm d^{-1} ; E_p 为土柱潜在蒸发速率, cm d^{-1} , 该值用直径为 20 cm 的蒸发皿每日测定, 蒸发皿与土柱位于同一高度; L 为土柱高度, cm ; h_A 为土柱上层最小水势, cm , 该值等于空气水势, 可利用开尔文公式计算得到^[22]。

Hydrus-1D 模型运行时, 模拟土层深度为

90 cm, 土柱垂直方向上划分为 360 个单元, 每隔 10 cm 设置一个观测点。空间步长为 0.25 cm, 模拟历时 56 d, 初始时间步长 0.000 01 d, 最小允许时间步长为 0.000 01 d, 最大允许时间步长为 1 d。土壤水基质势迭代控制标准取绝对误差 1 cm, 最大迭代次数 1 000 次, 迭代次数 < 3 次时, 下次末拟采用时间步长为上次时间步长的 1.3 倍, 迭代次数 > 7 次时, 下次模拟采用时间步长为上次时间步长的 0.7 倍。

两种土壤水力学参数如表 2 和图 2 所示。首先, 利用实测土壤吸力-土壤体积含水量数据, 通过 VG 方程对相关水力学参数进行拟合 (θ_s 采用实测值, θ_r 采用拟合值), 然后应用拟合参数模拟不同类型分层土柱的排水过程^[20], 但是模拟结果并不理想(土柱持水量实测值与模拟值相对误差在 3% ~ 19% 之间)。可能的原因包括:(1)装土后土柱内的土壤实际容重与实验室环刀内的土壤容重不一致;(2)用离心机法测土壤水分特征曲线本身存在缺陷, 即环刀内的土壤容重随压力增大而增大, 在高吸力段存在较大误差。鉴于上述原因, 我们采用 Hydrus-1D 模型中 Inverse 模块^[23], 利用 2 个均质土柱不同时刻剖面含水量实测数据对 α , n 和 K_s 进行优化。优化后的水力参数如表 2 所示。应用优化后的水力学参数模拟不同类型分层土柱的排水过程, 效果明显提高, 相对误差降低到 1% ~ 9%。本研究利用排水过程中两个均质土柱不同时刻剖面含水量优化的水力学参数对土柱蒸发过程进行模拟。

1.3 统计分析

统计学指标: 蒸发 56 天后, 各处理土柱累积蒸发量差异用 LSD ($P < 0.05$) 检验; 利用均方根误差 (RMSE)、相对平均误差 (MARE) 和绝对系数 (R^2) 来评测不同时期实测累积蒸发量、土壤剖面含水量和相对蒸发速率与其模拟值的差异。

表 2 土壤水力学参数拟合与优化值

Table 2 Fitted and optimized soil hydraulic parameters of the two soils

土壤类型 Soil type	获取方法 Access method	饱和含水量 θ_s ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	残留含水量 θ_r ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	经验参数 α (cm^{-1})	经验参数 n	饱和导水率 K_s (cm d^{-1})
砂黄土 Sandy Loess	实测 Measured	0.430				96
	拟合 Fitted		0.075	0.020	1.932	
	优化 Optimized			0.016	1.988	89
砂土 Sand	实测 Measured	0.385				3 192
	拟合 Fitted		0.009	0.158	1.779	
	优化 Optimized			0.080	2.676	2 304

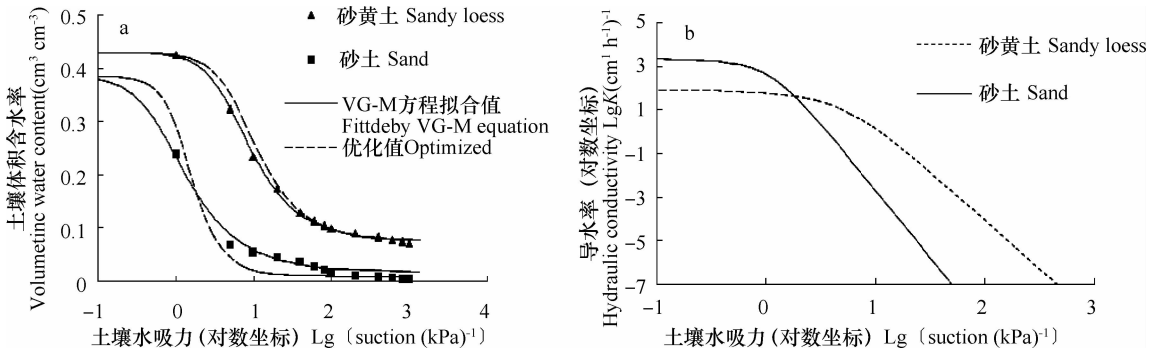


图 2 实测及其通过 VG-M 方程拟合的两种土壤水分特征曲线 (a) 和导水率 (b)

Fig. 2 Measured and VG-equation-fitted soil water retention curves (a) and hydraulic conductivity (b) of the two soils

2 结果与讨论

2.1 不同类型土柱相对蒸发速率的变化

各处理土柱相对蒸发速率与时间关系如图 3 所示,均质砂黄土相对蒸发速率在前 34 天中一直保持在 0.9 以上,之后开始迅速降低。这主要因为实验室风速小,蒸发初始阶段温度低,造成前期蒸发速率低下,进而延长了蒸发第一阶段历时;后期随着土柱表层含水量的降低,导水率低于潜在蒸发速率,相对蒸发速率开始降低。均质砂土和其他三种不同类型的层状土柱相对蒸发速率一直很低,但也有变化,从最初的 0.2 左右迅速降低至 0.04 左右。这是因为砂土毛管上升高度小,初始含水量低,抑

制了次表层土壤水分向上运动,使得表层很快出现干燥层,导致土壤失水以水汽扩散为主。可见,表层覆盖砂土可明显降低土壤蒸发速率。Lehmann 等^[24]提出用土壤特征长度的概念来定义均质土壤蒸发第一阶段结束时非饱和区的范围,土壤特征长度是指土壤蒸发第一阶段结束时土壤蒸发表面到土壤干燥峰之间的距离。特征长度的大小决定于土壤大孔隙的直径而非土壤平均空隙,土壤特征长度可以预测均质土壤蒸发第一阶段持续时间。Shokri 等^[25]将特征长度的概念推广到层状土壤,发现均质壤土特征长度明显大于上层为砂土的层状土壤。本研究同样发现砂黄土第一阶段持续时间远大于上层为砂土的分层土壤类型。

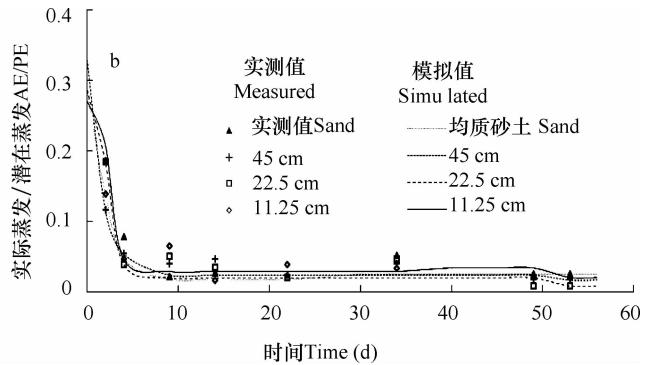
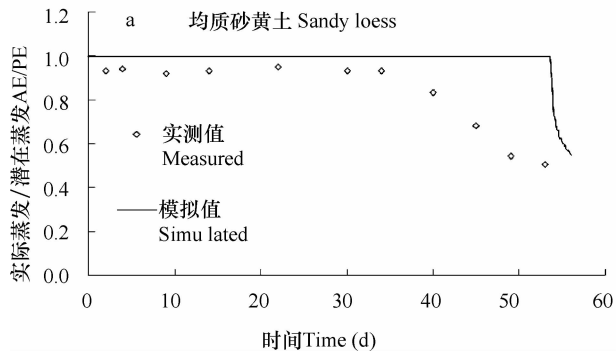


图 3 各处理相对蒸发速率实测值与模拟值

Fig. 3 Measured and simulated relatively evaporation rates of the soil columns

2.2 不同类型土柱累积蒸发量差异

表 3 为蒸发结束时各土柱累积蒸发量。由表可知,整个蒸发阶段均质砂黄土土柱累积蒸发量显著大于均质砂土土柱和其他三种分层类型土柱,三种不同分层类型土柱累积蒸发量之间无明显差异。Modaihsh 等^[15]研究上层砂土覆盖对土壤蒸发能力

影响时发现,上层覆盖 6 cm 砂土土柱与未覆砂土土柱相比可显著降低土壤蒸发能力,而粗砂和细砂抑制土柱蒸发能力差异不大。本实验所用 3 种不同厚度分层土柱都可明显抑制土壤累积蒸发量,且差异不显著。

表 3 蒸发 56 天时各重复土柱累积蒸发量与模拟值

Table 3 Measured and simulated cumulative evaporation on D 56 of each soil column (mean of replicates)

土柱类型 Soil columns	实测值 Measured (mm)				模拟值 Simulated (mm)
	重复 1 Trial 1	重复 2 Trial 2	重复 3 Trial 3	平均值 Average	
均质砂黄土 Sandy Loess	109.5	110.4	112.5	110.8 _a	139.5
均质砂土 Sand	3.9	8.4	4.6	5.6 _b	5.5
45 cm	4.6	6.8	6.6	6.0 _b	4.9
22.5 cm	6.8	5.9	5.4	6.1 _b	5.0
11.25 cm	7.8	5.5	5.8	6.2 _b	6.1

注:同列不同字母表示差异显著,相同字母表示差异不显著($p < 0.05$) Note: Values affixed with the same letter are not significantly different at the 5% probability level, and those with different letters are significantly different

2.3 不同类型土柱剖面含水量动态变化

图 4 为各处理剖面含水量随时间变化过程图。可知,均质砂黄土剖面体积含水量随着蒸发历时的增加明显降低;11.25 cm 分层类型土柱中第一层砂黄土体积含水量有少许降低,其他 3 个处理剖面水分含量基本无变化。均质砂黄土剖面含水量可以持续降低主要因为砂黄土体积含水量降低时,导水率一直保持相对较高的值,对蒸发无明显抑制作

用;均质砂土剖面含水量基本无变化,这是因为当砂土含水量降低后导水率迅速降低,明显抑制蒸发(如图 2 所示)。各分层类型土柱上层砂土吸力随着蒸发有所增加,但始终小于下层砂黄土进气吸力,造成下层水分不能向上运移,下层砂黄土水分一直维持在较高的现象。Huang 等^[4]研究得到同样的结果。

土壤含水量 Soil water content (cm³ cm⁻³)

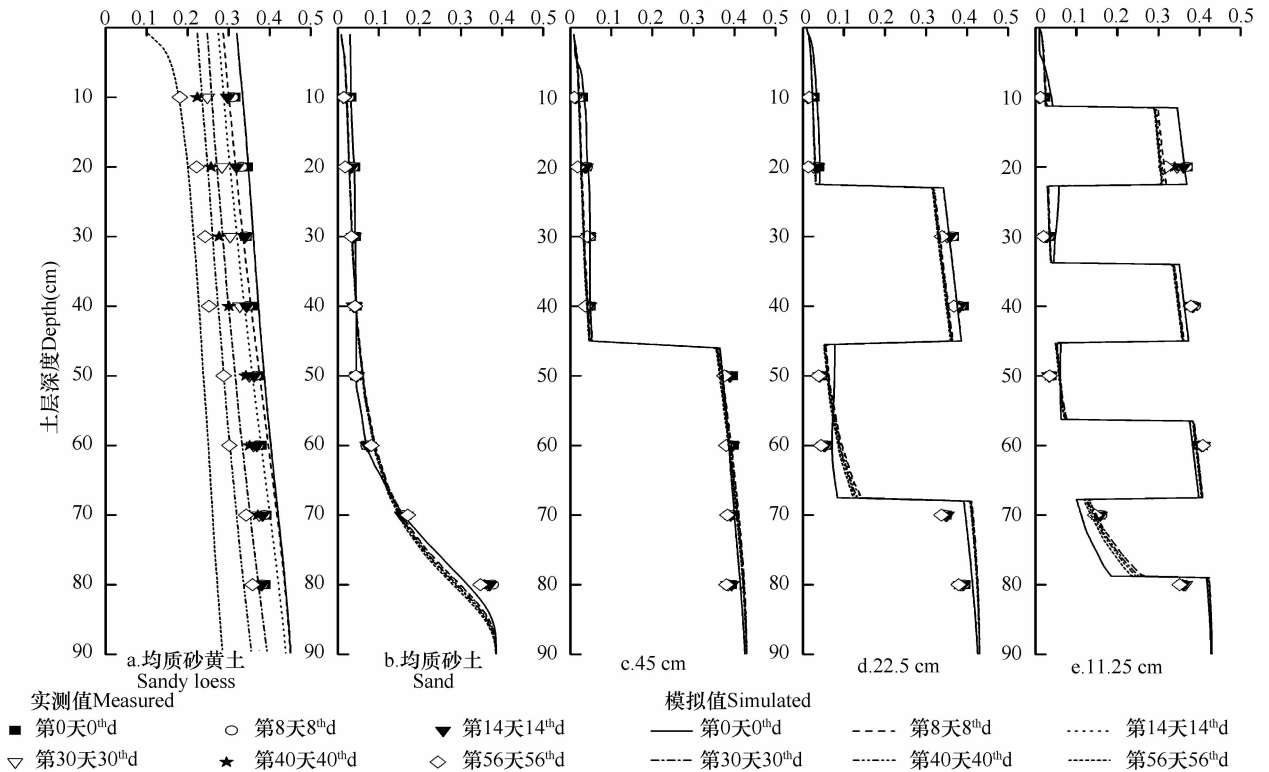


图 4 各处理剖面水分随时间变化的实测值与模拟值

Fig. 4 Measured and simulated temporal variation of profile water content in each treatment

2.4 模拟与分析

为了从理论验证土壤蒸发过程的变化特征,利用排水过程优化的水力参数(表 2)对各处理蒸发阶段相对蒸发速率、累积蒸发量和剖面体积含水量进行模拟,并与实测值进行对比分析。表 4 为各处理蒸发阶段相对蒸发速率、累积蒸发量和剖面体积含水量实测值与模拟值的比较。由表 4 可知,各处理蒸发速率、累积蒸发量和剖面体积含水量实测值与模拟值整体上一致,说明 Hydrus 模型模拟土壤蒸发过程效果较好^[26],但也存在一些偏差。均质砂黄土土柱相对蒸发速率在前 34 d 实测值与模拟值吻合程度较好,之后模拟值出现偏高于实测值的现象(图 3),这同样从土柱剖面含水量动态变化(图 4)可以看到。Schelle 等^[27]利用不同模型对排水过程反求出的土壤水力参数与蒸发过程拟合得到的土壤水力参数进行对比,发现当排水过程反求得到的土壤水力参数与蒸发过程拟合得到的土壤水力参数均可以较好地模拟各阶段土壤水分动态,两种参数具有较好的一致性;利用 Iden 和 Durner^[28]提出的自由算法结合 van Genuchten-Mualem (VG-M) 方

程能提高土壤水力参数的拟合精度,从而减少模拟偏差。均质砂土与其他 3 个分层土柱蒸发速率(图 3)与剖面含水量(图 4)变化幅度均很小,模拟值与实测值整体保持一致的趋势。但从表 3 可以看出模拟值略小于实测值,这除了以上因素外还可能来自以下几个方面:(1)砂土从饱和含水量到剩余含水量吸力范围窄,增加了 Hydrus-1D 模拟的不确定性。(2)本研究土壤基质势、导水率与含水率的关系分别采用 van Genuchten-Mualem (VG-M) 方程来拟合,据 Sakai 等^[29]研究发现 VG-M 方程在砂土剩余含水量附近模拟值偏低,这同样造成对砂土非饱和导水率的低估。(3)未考虑水-汽-热耦合作用。大量的研究证实蒸发过程第三阶段水汽扩散是不可忽视的部分,同时土壤水分动态变化与土壤温度变化关系密切^[29-31]。本研究利用排水过程测得的土柱剖面含水量数据反求得到的参数模拟土柱蒸发过程,模拟值与实测值整体具有较好的一致性。如果考虑土壤脱水和吸水过程,即土壤水分运动的滞后效应可否进一步模型模拟精度,是下一步需要研究的问题。

表 4 实测值与模拟值比较

Table 4 Comparison between measured and simulated values

处理 Treatments	样本数 <i>n</i>	实际蒸发/潜在蒸发 AE/PE			样本数 <i>n</i>	剖面体积含水量 θ (cm ³ cm ⁻³)			样本数 <i>n</i>	累积蒸发量 Cumulative evaporation (mm)		
		RMSE	MARE (%)	R ²		RMSE	MARE (%)	R ²		RMSE	MARE (%)	R ²
均质砂黄土 Sandy loess	12	0.18	19.0	0.65	48	0.05	11.9	0.79	12	16.8	27.1	0.99
均质砂土 Sand	12	0.04	15.7	0.80	48	0.03	16.5	0.99	12	0.94	22.3	0.99
45 cm	9	0.02	17.1	0.78	48	0.02	18.7	0.98	9	1.04	28.6	0.98
22.5 cm	9	0.04	19.5	0.85	48	0.03	28.4	0.97	9	1.31	37.6	0.95
11.25 cm	9	0.02	13.2	0.85	48	0.03	28.4	0.96	9	0.66	26.6	0.98

3 结 论

利用砂土和砂黄土 2 种土壤,设置 3 种不同厚度分层土柱和 2 种均质对照土柱,测定了土柱蒸发过程中累积蒸发量、相对蒸发速率和剖面水分变化;同时利用 2 种均质土柱排水过程优化的土壤水力参数,通过 Hydrus-1D 模型对不同类型层状土柱蒸发过程进行模拟分析。得到结论:

均质砂黄土蒸发第一阶段长达 34 d,累积蒸发

量远大于均质砂土和其他 3 个不同类型分层土柱。3 个不同分层厚度土柱累积蒸发量无明显差异,说明本实验所用砂土在 11.25 cm 厚度时已可显著降低土柱蒸发。土柱剖面水分数据进一步证明表层覆盖砂土可显著抑制土柱蒸发。利用排水过程优化的水力参数,HYDRUS-1D 模型可以较好地模拟层状土柱蒸发过程。通过提高对土壤水分特征曲线、土壤导水率的模拟精度以及考虑水-汽-热耦合效应是降低模拟偏差的主要途径。

参 考 文 献

- [1] Bussiere B, Aubertin M, Chapuis R P. The behavior of inclined covers used as oxygen barriers. *Canadian Geotechnical*, 2003, 40: 512—535
- [2] Aubertin M, Bussiere B, Chapuis R P, et al. Construction of experimental cells with covers on acid producing tailings. *Proceedings of the 49th Annual Canadian Geotechnical Conference*. Newfoundland: St John's, 1996: 655—662
- [3] Albright W H, Benson C H, Gee G W, et al. Field water balance of landfill final covers. *Journal of Environment Quality*, 2004, 33: 2317—2332
- [4] Huang M B, Bruch P G, Barbour S L. Evaporation and water redistribution in layered unsaturated soil profiles. *Vadose Zone Journal*, 2013, 12(1): 1—14
- [5] Si B C, Dyck M, Parkin G. Flow and transport in layered soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 2011, 91(2): 127—132
- [6] Zayani K, Bousnina H, Mhirib A, et al. Evaporation in layered soils under different rates of clay amendment. *Agricultural Water Management*, 1996, 30: 143—154
- [7] Shokri N, Lehmann P, Or D. Evaporation from layered porous media. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115: 1—12
- [8] Gowing J W, Konukcu F, Rose D A. Evaporative flux from a shallow water table: The influence of a vapour-liquid phase transition. *Journal of Hydrology*, 2006, (1/4): 77—89
- [9] 刘广明, 杨劲松. 土壤蒸发量与地下水作用条件的关系. *土壤*, 2002, 34(3): 141—144. Liu G M, Yang J S. Relationship between soil evaporation and ground water conditions (In Chinese). *Soils*, 2002, 34(3): 141—144
- [10] 宋日权, 褚贵新, 张瑞喜, 等. 覆砂对土壤入渗、蒸发和盐分迁移的影响. *土壤学报*, 2012, 49(2): 282—288. Song R Q, Chu G X, Zhang R X, et al. Effects of sand mulching on soil infiltration, evaporation and salt distribution (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(2): 282—288
- [11] 宋日权, 褚贵新, 冷军, 等. 掺砂对土壤水分入渗和蒸发影响的室内试验. *农业工程学报*, 2010, 26(增1): 109—114. Song R Q, Chu G X, Ye J, et al. Effects of surface soil mixed with sand on water infiltration and evaporation in laboratory (In Chinese). *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(Suppl. 1): 109—114
- [12] Wilson G W, Fredlund D G, Barbour S L. The effect of soil suction on evaporative fluxes from soil surfaces. *Canadian Geotechnical*, 1997, 34: 145—155
- [13] Willis W O. Evaporation from layered soil in the presence of a water table. *Soil Science Society of America Journal*, 1960, 24(4): 239—242
- [14] 罗焕炎, 严蔼芬, 谢驹华. 层状土中毛管水上升的实验研究. *土壤学报*, 1965, 13(3): 312—324. Luo H Y, Yan A F, Xie J H. Experimental investigation of upward movement of soil water in layered systems (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1965, 13(3): 312—324
- [15] Modaihsh A S, Horton R, Kirkham D. Soil water evaporation suppression by sand mulches. *Soil Science*, 1985, 139(4): 357—361
- [16] 原翠萍, 张心平, 雷廷武, 等. 砂石覆盖粒径对土壤蒸发的影响. *农业工程学报*, 2008, 24(7): 25—28. Yuan C P, Zhang X P, Lei T W, et al. Effects of mulching sand and gravel size on soil moisture evaporation (In Chinese). *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(7): 25—28
- [17] 唐克丽, 侯庆春, 王斌科, 等. 黄土高原水蚀风蚀交错带和神木武区的环境背景及整治方向. *中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊*, 1993, 18(12): 1—15. Tang K L, Hou Q C, Wang B K, et al. The environment and administration way of wind-water erosion crisscross region and Shennu experimental area on the Loess Plateau (In Chinese). *Memoir of Northwestern Institute of Soil and Water Conservation, Academia Sinica and Ministry of Water Conservancy*, 1993, 18(12): 1—15
- [18] 穆从如, 王景华. 晋陕蒙接壤地区环境污染和环境保护目标. *地理学报*, 1995, 50(6): 534—541. Mu C R, Wang J H. Environmental pollution and protection in Jin-Shan-Mon borderland area (In Chinese). *Acta Geographica Sinica*, 1995, 50(6): 534—541
- [19] 李玉山, 韩仕峰, 汪正华. 黄土高原土壤水分性质及其分区. *水土保持研究*, 1985(2): 1—17. Li Y S, Han S F, Wang Z H. Soil water properties and its zoning in the Loess Plateau (In Chinese). *Research of Soil and Water Conservation*, 1985(2): 1—17
- [20] 任利东, 黄明斌, 樊军. 不同类型层状土壤持水能力的研究. *农业工程学报*, 2013, 29(19): 105—111. Ren L D, Huang M B, Fan J. Differences of water retention capacity for drained soils with textural layering (In Chinese). *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(19): 105—111
- [21] van Genuchten M Th. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(5): 892—898
- [22] Adamson A W, Gast A P. *Physical chemistry of surfaces*. America: Wiley-Interscience, 1997: 54
- [23] Simunek J, Sejna M, Saito H, et al. The HYDRUS software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variable-saturated media; Version 4.15. Riverside, CA: University of California, 2012
- [24] Lehmann P, Assouline S, Or D. Characteristic lengths affecting evaporative drying of porous media. *Physical Review E*, 2008, 77(5): 056309
- [25] Shokri N, Lehmann P, Or D. Evaporation from layered porous media. *Geophysical Research*, 2010, 115(B6): B06204
- [26] Liu M X, Yang J S, Li X M, et al. Numerical simulation of soil water dynamics in a drip irrigated cotton field under plastic mulch. *Pedosphere*, 2013, 23(5): 620—635
- [27] Schelle H, Iden S C, Peters A, et al. Analysis of the agreement of soil hydraulic properties obtained from multistep-outflow and evaporation methods. *Vadose Zone Journal*, 2010, 9(4): 1080—1091
- [28] Iden S C, Durner W. Free-form estimation of the unsaturated soil hydraulic properties by inverse modeling using global optimization. *Water Resources Research*, 2007, 43(7): W07451
- [29] Sakai M, Toride N, Šimunek J. Water and vapor movement with condensation and evaporation in a sandy column. *Soil Science So-*

- ciety of America Journal, 2009, 73(3): 707—717
- [30] Saito H, Šimůnek J, Mohanty B P. Numerical analysis of coupled water, vapor, and heat transport in the vadose zone. *Vadose Zone Journal*, 2006, 5(2): 784—800
- [31] Xiang L, Yu Z, Chen L, et al. Evaluating coupled water, vapor, and heat flows and their influence on moisture dynamics in arid regions. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2012, 17(4): 565—577

EXPERIMENT AND NUMERICAL SIMULATION OF SOIL EVAPORATION FROM LAYERED SANDY SOIL COLUMNS

Ren Lidong^{1,2} Huang Mingbin^{2†}

(1 College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract To understand how soil water evaporates from soil columns different in layered structure and soil columns homogeneous in soil texture, five soil columns were prepared by filling soil into Plexiglas cylinders, 90 cm in height, 23.5 cm in inner diameter and 0.9 cm in thickness of the wall. Three of them were packed with sandy soil and sandy loess, layer by layer alternatively but different in thickness of the layers (11.25, 22.5 and 45 cm) and two with sandy soil and sandy loess separately and homogeneously. The soil columns were irrigated till they were saturated and then let drain with a 2 cm water layer at their bottoms for 30 days and then they were ready for the evaporation experiment. The columns were sealed at the bottom to ensure zero flux from the lower end. During the experiment, cumulative evaporation, relative evaporation rate and profile water content were monitored and AE/PE ratios (actual evaporation rate / potential evaporation rate) were calculated and meanwhile, evaporation processes from the five soil columns were simulated and analyzed using the HYDRUS-1D model and optimized soil hydraulic parameters based the drainage processes of the two homogeneous soil columns. The soil hydraulic parameters were obtained through optimization of the calculation of profile water contents during the drainage processes in the two homogeneous soil columns. Then the optimized hydraulic parameters were used to simulate drainage processes in the three layered soil columns with much better effect that lowered the relative error by 1% to 9%. Besides, the optimized hydraulic parameters based on variation of profile water content in the two homogeneous soil columns during the drainage processes were used to simulate evaporation processes of the soil columns. Actual evaporation from the columns was determined by weighing the columns on D 0, 2, 4, 9, 14, 22, 30, 34, 40, 45, 49, 53 and 56. Moreover, 12 cm long TDR probes were placed in the columns, one every 10 cm to measure profile water content on D 0, 8, 14, 22, 30, 40 and 56. Analysis of the measurements and simulations show that in the homogeneous column of sandy loess the first phase of evaporation lasted 34 days, and as a result, its cumulative evaporation was the highest, reaching 110.8 mm, while in the homogeneous column of sandy soil and the other three layered columns, the first phase evaporation lasted only one day, so their cumulative evaporation was as low as around 6 mm. The layered soil column with sand on the surface was relatively stable in profile water content, indicating that sand mulch could dramatically reduce soil evaporation. In addition, the three layered soil columns did not differ much in soil evaporation, demonstrating that an 11.25 cm-thick overlay of sandy soil is enough to reduce soil evaporation significantly. Although the simulations agreed well with the observations, the simulation of soil evaporation could be further improved in precision by using drainage-process-based optimized hydraulic parameters and the HYDRUS-ID model. Improving the accuracy of the simulation of soil water characteristic curve and soil hydraulic conductivity and taking into account the coupling effect of water, vapor and heat in soil columns is the major approach to reducing simulation deviation. The findings in the experiment may have some important significances in guiding soil water management in arid and semiarid regions.

Key words Soil evaporation rate; Cumulative evaporation; Profile soil water content; Hydrus-1D

(责任编辑:汪叔生)