

应用 HYDRUS-1D 模拟砂质夹层土壤入渗特性^①范严伟^{1,2}, 黄 宁², 马孝义³, 毕贵权¹, 赵文举¹

(1 兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州 730050; 2 西部灾害与环境力学教育部重点实验室/兰州大学土木工程与力学学院, 兰州 730000; 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: 依据非饱和土壤水分运动理论, 采用 HYDRUS-1D 软件, 对砂质夹层土壤入渗特性进行数值模拟, 分析各因素对砂质夹层土壤入渗规律的影响。结果表明: 砂质夹层结构对土壤入渗特性有较大影响, 具有暂时的阻水和减渗作用; 湿润锋穿过砂层上界面后, 入渗过程变为稳渗阶段, 稳渗率主要受砂层质地、砂层埋深和压力水头影响, 与土壤初始含水率和砂层厚度无关; 砂质夹层土壤剖面水分分布不连续, 上层土壤基本饱和, 砂层土壤未饱和, 土壤剖面含水率主要受砂层质地、砂层埋深和砂层厚度的影响。研究结果可为农业水资源利用及工程防渗技术提供理论依据。

关键词: 砂质夹层; 影响因素; 入渗特性; 数值模拟; HYDRUS-1D

中图分类号: S152.7

由于风沙、水文和地质等外力作用, 田间土壤剖面普遍存在砂质夹层结构^[1-2]。夹层结构会改变土壤水分的入渗性能和分布状况, 对土壤入渗特性有重要影响^[326]。与均质土壤相比, 砂质夹层土壤的入渗特性主要受砂层质地、埋深、厚度以及土壤初始含水率和压力水头等因素影响。许多学者采用室内试验方法, 研究了砂层质地、埋深和厚度对土壤入渗特性的影响^[729]。随着计算机技术的发展, 数值模拟方法越来越多地应用于土壤水分运动的研究中, 成为定量分析土壤水分入渗特性的有效工具^[10212]。其中, 美国农业部盐渍土实验室开发的 HYDRUS-1D 软件, 可对一维饱和-非饱和土壤中水、热及溶质运移进行数值模拟^[13]。HYDRUS-1D 应用广泛, 具有良好的适用性, 可用来模拟层状土壤水分入渗特性^[14216]。本文依据非饱和土壤水分运动理论, 采用 HYDRUS-1D 软件, 对不同影响因素组合下的砂质夹层土壤入渗特性进行数值模拟, 分析各影响因素条件下砂质夹层土壤的入渗规律, 为农田水资源高效利用和工程防渗技术提供理论依据。

1 层状土一维垂直入渗数学模型

1.1 基本方程

HYDRUS-1D 中, 一维饱和-非饱和土壤水运动

采用 Richards 方程进行描述。其表达式为:

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

式中, z 为垂向坐标, 规定 z 向下为正(cm); $C(h)$ 为土壤比水容量(1/cm); h 在饱和区和非饱和区分别为压力水头和基质势(cm); t 为入渗时间(min); $K(h)$ 为土壤非饱和导水率(cm/min)。

式(1)中涉及的土壤水分特征曲线 $\theta(h)$ 和土壤非饱和导水率 $K(h)$ 采用 van Genuchten-Mualem 模型拟合^[17]。即

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

$$K(h) = K_s S_e^l \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad (3)$$

式中, θ_r 为土壤残余含水率(cm^3/cm^3); θ_s 为土壤饱和含水率(cm^3/cm^3); α 、 n 和 m 为土壤物理特性有关的拟合参数; $S_e = (\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r)$; $n > 1$, $m = 1 - 1/n$; K_s 为土壤饱和导水率(cm/min); $l = 0.5$ 。

1.2 定解条件

图 1 为砂质夹层土壤水分运动模拟计算简图。试验开始时, 土壤水分剖面为稳定剖面, 计算域内各点土水势相等。即

①基金项目: 国家自然科学基金项目(51409137、51269008)和甘肃省自然科学基金项目(145RJYA293)资助。

作者简介: 范严伟(1982—), 男, 山东聊城人, 博士研究生, 讲师, 主要从事农业水土工程研究。E-mail: fanyanwei24@163.com

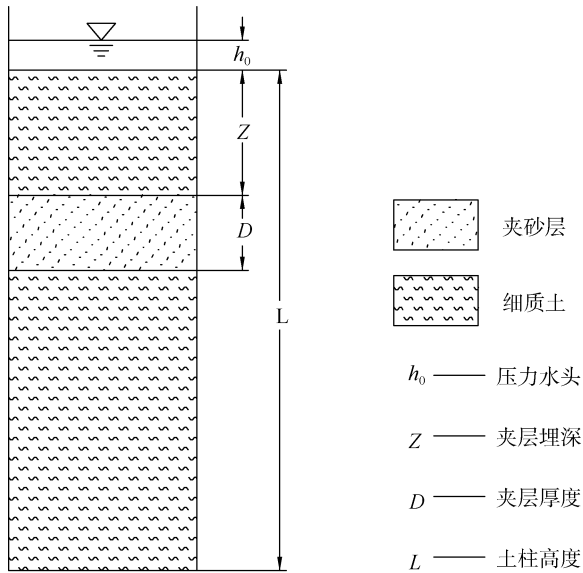


图 1 砂质夹层土壤计算简图

Fig. 1 Calculation diagram of the soil with sand interlayer

$$\psi_0 = h - z, 0 \leq z \leq L, t = 0 \quad (4)$$

式中, ψ_0 为土壤初始总水势(cm);

试验中, 土柱上边界保持恒定水头入渗, 下边界

入渗水量未到达。即

$$h = h_0, z = 0, t > 0 \quad (5)$$

$$K(h) \frac{\partial h}{\partial z} - K(h) = 0, z = L, t > 0 \quad (6)$$

式中, h_0 为压力水头(cm); L 为土柱高度(比湿润锋所湿润范围大)(cm)。

1.3 数值求解

利用 HYDRUS-1D 软件, 对层状土一维垂直入渗的数学模型进行求解。模拟不同砂层质地、初始含水率、砂层厚度、砂层埋深和压力水头条件下的砂质夹层土壤入渗特性。求解过程中, 采用 Galerkin 有限元法对土壤剖面进行空间离散, 采用隐式差分格式进行时间离散。模拟土层深度为 100 cm, 时间步长为 0.01 min, 空间步长为 1 cm, 模拟历时 200 min。土壤质地通过 van Genuchten-Mualem 模型中的参数来体现, 土壤初始含水率、砂层埋深和砂层厚度通过初始条件来设定, 而压力水头通过边界条件来实现。

为保证研究土壤的广泛性和成果的普适性。模拟中土壤的 van Genuchten-Mualem 模型水力特性参数分别取自参考文献[6]、[13]和[15], 如表 1 所示。

表 1 不同土质 van Genuchten-Mualem 模型水力特性参数
Table 1 Hydraulic parameters in van Genuchten-Mualem model of different soils

编号	土壤质地	土壤体积质量(g/cm ³)	θ_r (cm ³ /cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)	α (1/cm)	n	l	K_s (cm/min)
A1	壤土 ^[6]	1.40	0.050	0.372	0.012	1.680	0.5	0.034
S1	砂土 ^[6]	1.75	0.010	0.298	0.401	1.522	0.5	2.500
S2	砂土 ^[13]	—	0.045	0.430	0.145	2.680	0.5	0.495
S3	砂土 ^[15]	1.63	0.009	0.385	0.081	2.676	0.5	1.600

2 各因素对砂质夹层土壤入渗特性影响分析

2.1 砂层质地

为对比分析砂层质地对土壤水分入渗特性的影响, 在上层土壤初始含水率 $\theta_0 = 0.165 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 砂层埋深 $Z = 30 \text{ cm}$, 砂层厚度 $D = 15 \text{ cm}$, 压力水头 $h_0 = 6 \text{ cm}$ 条件下, 模拟得到不同砂层质地和均质壤土的入渗特性曲线及入渗结束时($t = 200 \text{ min}$)土壤剖面水分分布曲线(图 2)。

由图 2 可看出: 砂质夹层土壤入渗与均质土入渗存在较大差异。入渗初期, 砂质夹层土壤的入渗规律和趋势与均质壤土相同, 入渗速度快且迅速减小, 累积入渗量和湿润锋运移距离随时间成非线性增加; 湿润锋到达砂层上界面时(入渗约 52 min 左右), 湿润锋稍有停滞, 表现为阻水作用; 湿润锋穿过砂层上界面后(入渗约 64 min 左右), 入渗率变为常数, 入渗过程变为稳渗阶段, 稳渗率小于相同时刻均质壤土的瞬时

入渗率, 表现为减渗作用; 随着入渗时间的增加, 稳渗率逐渐大于均质壤土的瞬时入渗率, 表现为增渗作用。入渗结束时, 上层壤土基本饱和, 夹层砂土未饱和, 下层壤土剖面水分分布的变化趋势基本相同。

为定量分析各因素对砂质夹层土壤入渗特性的影响, 将稳渗阶段的累积入渗量采用线性关系表示^[18], 即:

$$I = i_f(t - t_1) + I_1 \quad (7)$$

式中: I 为累积入渗量(cm); t_1 为湿润锋穿过砂层上界面的时间(min); i_f 为稳渗率(cm/min); I_1 为湿润锋穿过砂层上界面时的累积入渗量(cm)。

将模拟得到的不同砂层质地下的入渗水量采用式(7)拟合, 结果列于表 2。

由表 2 可知: 上述相关系数 R^2 均大于 0.99, 说明稳渗阶段的累积入渗量与入渗时间之间的关系均可以用线性关系表达。在相同上层土壤初始含水率、砂层埋深、砂层厚度和压力水头条件下, 砂层质地主

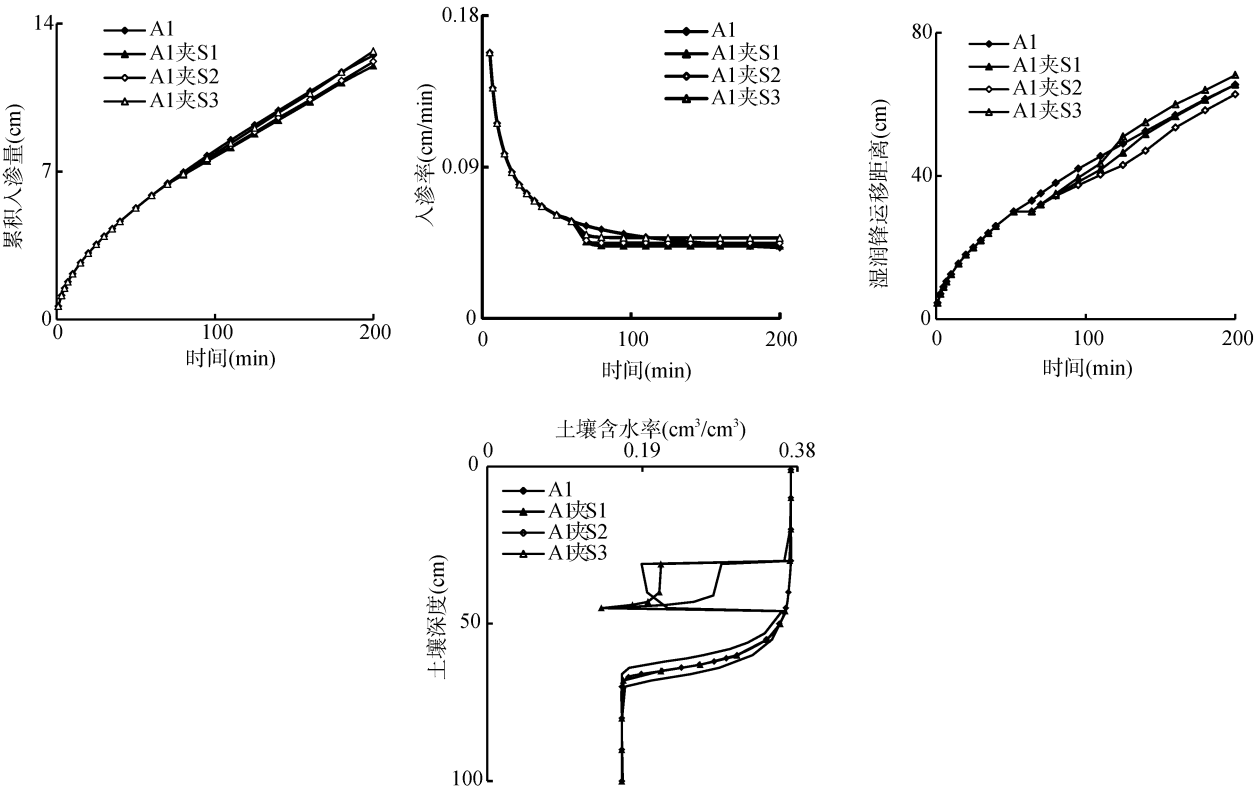


图 2 砂层质地对砂质夹层土壤入渗特性的影响
Fig. 2 Effect of sand layer texture on infiltration characteristics of the soil with sand interlayer

表 2 不同砂层质地地下累积入渗量拟合参数
Table 2 Fitting parameters of cumulative infiltration under different sand layer texture

土体构型	t_1 (min)	i_f (cm/min)	I_1	R^2
A1 夹 S1	64	0.043 2	6.147 5	0.999 9
A1 夹 S2	64	0.044 5	6.141 5	1.000 0
A1 夹 S3	64	0.048 1	6.122 6	0.999 9

要影响稳渗率 i_f 值。分析发现, 稳渗率 i_f 与砂土 van Genuchten-Mualem 模型参数 α 的倒数成线性关系。对表 2 中的 i_f 和表 1 中的 α 拟合, 得

$$i_f = 0.0005 \frac{1}{\alpha} + 0.0416, \quad R^2 = 0.9592 \quad (8)$$

2.2 土壤初始含水率

采用文献[6]中的壤土和砂土, 在 $D = 15\text{ cm}$ 、 $Z = 30\text{ cm}$ 、 $h_0 = 6\text{ cm}$ 时, 模拟得出不同上层土壤初始含水率条件下砂质夹层土壤的入渗特性曲线及入渗结束时($t = 200\text{ min}$)土壤剖面水分分布曲线, 如图 3 所示。

由图 3 可看出: 在其他条件相同时, 土壤初始含水率对砂质夹层土壤入渗特性影响较小。随土壤初始含水率的增大, 土壤累积入渗量略有减少, 湿润锋运移距离稍有增大, 主要是土壤初始含水率愈高, 土水势梯度小, 入渗能力略有减小, 而土壤易饱和, 湿润锋运移有所加快。入渗结束时, 随土壤初始含水率的

增大, 砂土层含水率不饱和程度减小, 下层壤土相同断面处含水率稍有增大。

将模拟得到的不同初始含水率下的入渗水量采用式(7)拟合, 结果列于表 3。

由表 3 可知: 土壤初始含水率主要影响 t_1 和 I_1 值, 而对稳渗率 i_f 无影响。初始含水率越大, 湿润锋穿过砂层上界面的时间 t_1 越短, 湿润锋穿过砂层上界面时的累积入渗量 I_1 越小。分析发现, 湿润锋穿过砂层上界面时的累积入渗量 I_1 与土壤饱和差 $(\theta_s - \theta_0)$ 符合线性关系, 对表 3 中的 I_1 和 θ_0 及表 1 中的 θ_s 拟合, 得

$$I_1 = 29.64(\theta_s - \theta_0), \quad R^2 = 0.9936 \quad (9)$$

分析式(9)发现, I_1 与 $(\theta_s - \theta_0)$ 的斜率约等于砂层埋深 Z 。

2.3 砂层厚度

采用文献[6]中的壤土和砂土, 在 $\theta_0 = 0.165\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 、 $Z = 30\text{ cm}$ 、 $h_0 = 6\text{ cm}$ 时, 模拟得出均质壤土和不同砂

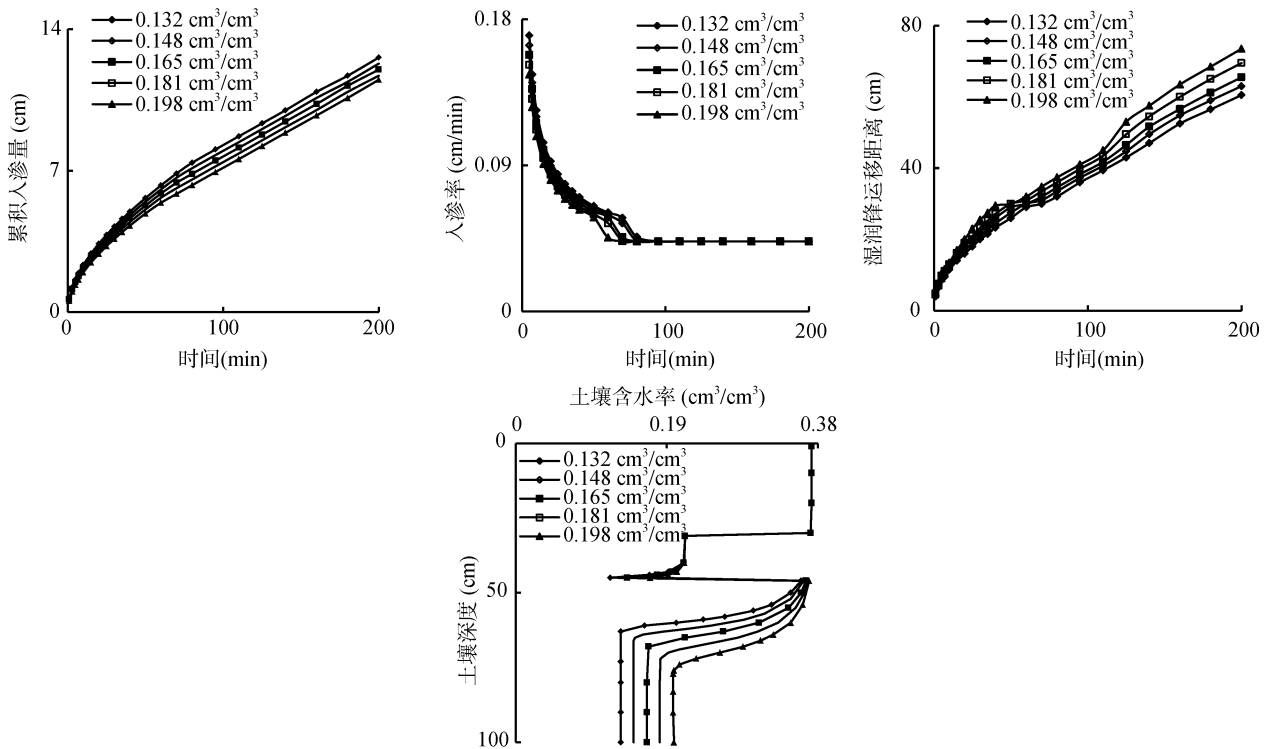


图 3 土壤初始含水率对砂质夹层土壤入渗特性的影响

Fig. 3 Effect of initial water content on infiltration characteristics of the soil with sand interlayer

表 3 不同初始含水率下累积入渗量拟合参数

Table 3 Fitting parameters of cumulative infiltration under different initial water content

θ_0 (cm ³ /cm ³)	t_1 (min)	i_f (cm/min)	I_1 (cm)	R^2
0.132	72	0.043 3	7.049 7	0.999 9
0.148	68	0.043 1	6.605 2	1.000 0
0.165	64	0.043 2	6.147 5	0.999 9
0.181	60	0.043 0	5.703 4	0.999 2
0.198	56	0.043 4	5.230 8	1.000 0

层厚度条件下砂质夹层土壤的入渗特性曲线及入渗结束时($t = 200$ min)土壤剖面水分分布曲线,如图 4 所示。

由图 4 可看出:在其他条件相同时,砂层厚度对砂质夹层土柱入渗特性影响微弱,达到稳渗状态时,稳渗率相同,砂层厚度对累积入渗量无影响,减渗效果相同。随砂层厚度的增大,湿润锋穿过砂层所需时间增加,穿过砂层后,运移距离基本相等。入渗结束时,砂层土壤剖面水分分布的变化趋势相同,随砂层厚度的增大,砂层土壤不饱和程度有所增大。

2.4 砂层埋深

采用文献[6]中的壤土和砂土,在 $\theta_0 = 0.165$ cm³/cm³、 $D = 15$ cm、 $h_0 = 6$ cm 时,模拟得出均质壤土和不同砂层埋深条件下砂质夹层土壤的入渗特性曲线及入渗结束时($t = 200$ min)土壤剖面水分分布曲线,如图

5 所示。

将模拟得到的不同砂层埋深下的入渗水量采用式(7)拟合,结果列于表 4。

由图 5 及表 4 可知:在其他条件相同时,砂层埋深对砂质夹层土壤入渗特性影响较大,砂层埋深越小,到达稳渗阶段的时间越短,减渗作用越早发生,但稳渗率越大,导致先减渗后增渗现象发生。随砂层埋深增大,湿润锋运移距离同样存在先减小后增大的趋势。砂层埋深对砂层土壤含水率分布有一定影响,砂层埋深较小时,砂层含水率随深度逐渐增加,砂层埋深较大时,砂层含水率随深度逐渐减少,且含水率不饱和程度增大。

分析发现,稳渗率 i_f 与砂层埋深 Z 的倒数成线性关系。对表 4 中的 i_f 和 Z 拟合,得:

$$i_f = 0.2793 \frac{1}{Z} + 0.0338, \quad R^2 = 0.9990 \quad (10)$$

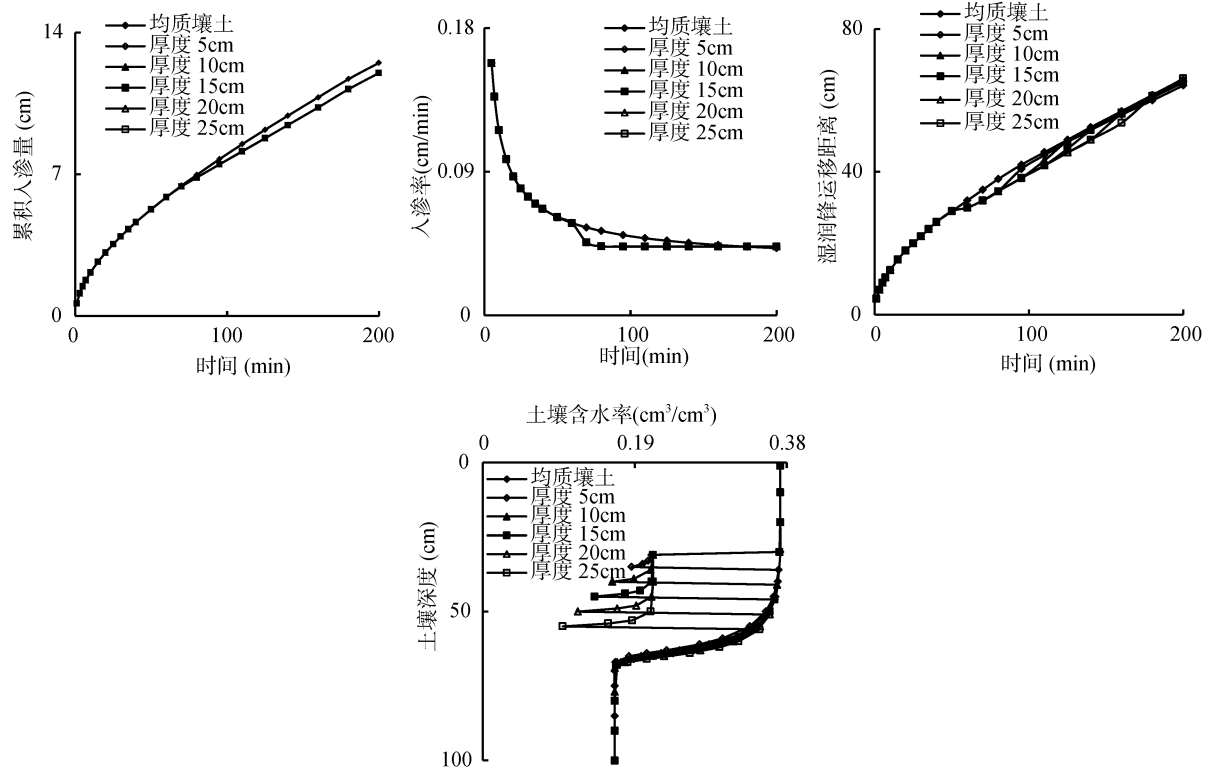


图 4 砂层厚度对砂质夹层土壤入渗特性的影响

Fig. 4 Effect of sand layer thickness on infiltration characteristics of the soil with sand interlayer

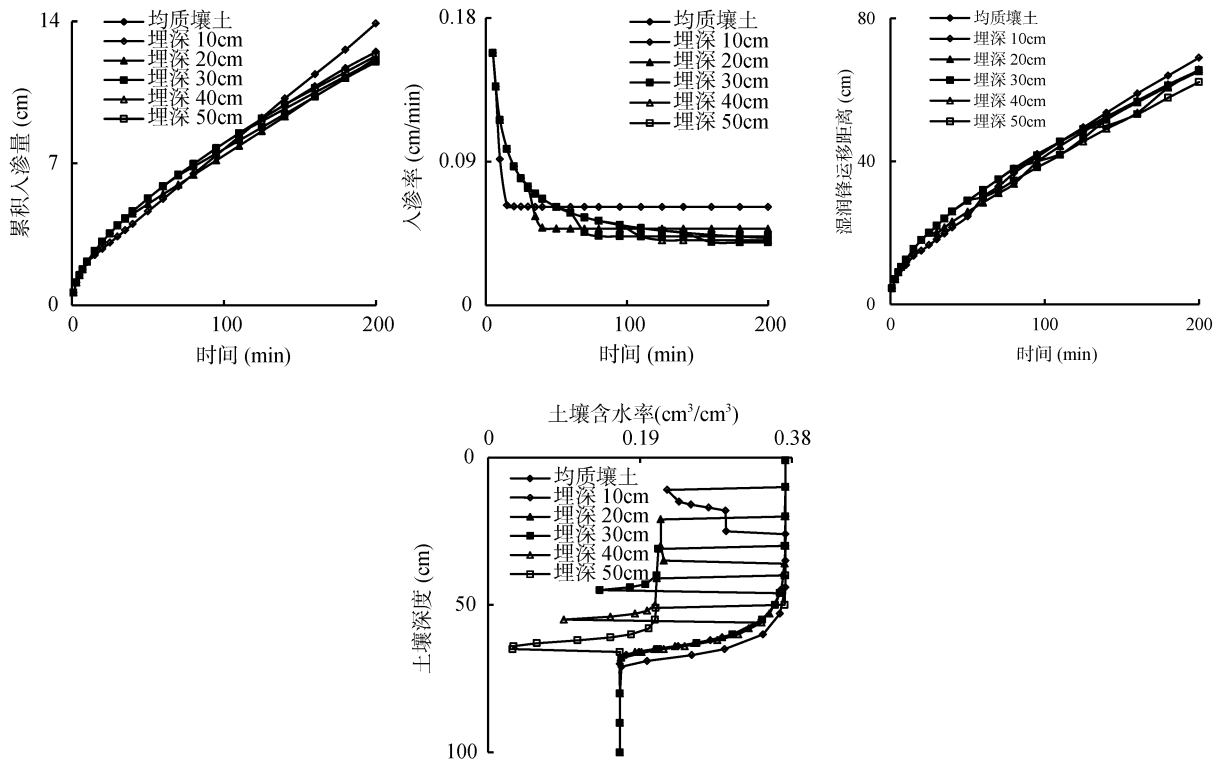


图 5 砂层埋深对砂质夹层土壤入渗特性的影响

Fig. 5 Effect of sand layer burial depth on infiltration characteristics of the soil with sand interlayer

湿润锋穿过砂层上界面时的累积入渗量 I_1 与砂层埋深 Z 符合线性关系, 对表 4 中的 I_1 和 Z 拟合, 得:

$$I_1 = 0.208Z, \quad R^2 = 0.9989 \quad (11)$$

分析式(11)发现, I_1 与 Z 的斜率约等于土壤饱和

表 4 不同砂层埋深下累积入渗量拟合参数
Table 4 Fitting parameters of cumulative infiltration under different sand layer burial depth

h_0 (cm)	t_1 (min)	i_f (cm/min)	I_1 (cm)	R^2
10	10	0.061 6	2.161 6	1.000 0
20	30	0.048 0	4.034 5	1.000 0
30	64	0.043 2	6.147 5	0.999 9
40	105	0.040 3	8.274 9	1.000 0
50	155	0.039 5	10.523 0	0.999 9

差 $(\theta_s - \theta_0)$ 。

综合式(9)和式(11)，湿润锋穿过砂层上界面时的累积入渗量 I_1 可表示为：

$$I_1 = Z(\theta_s - \theta_0) \tag{12}$$

2.5 压力水头

采用文献[6]中的壤土和砂土，在 $\theta_0 = 0.165 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 、 $D = 15 \text{ cm}$ 、 $Z = 30 \text{ cm}$ 时，模拟得出均质壤土和不同压力水头条件下砂质夹层土壤的入渗特性曲线及入渗结束时($t = 200 \text{ min}$)土壤剖面水分分布曲线，如图 6 所示。

由图 6 可看出：在其他条件相同时，压力水头对砂质夹层土壤入渗特性影响较小，随压力水头增大，土壤累积入渗量、稳渗率、湿润锋运移距离和下层壤土相同断面处含水率稍有增大，主要是由于土壤水分入渗主要由基质势、重力势和压力势作用，压力水头大时，导致入渗下界面处压力势大，入渗稍有增大。压力水头越大，砂土层含水率不饱和程度越小。

将模拟得到的不同压力水头下的入渗水量采用式(7)拟合，结果列于表 5。

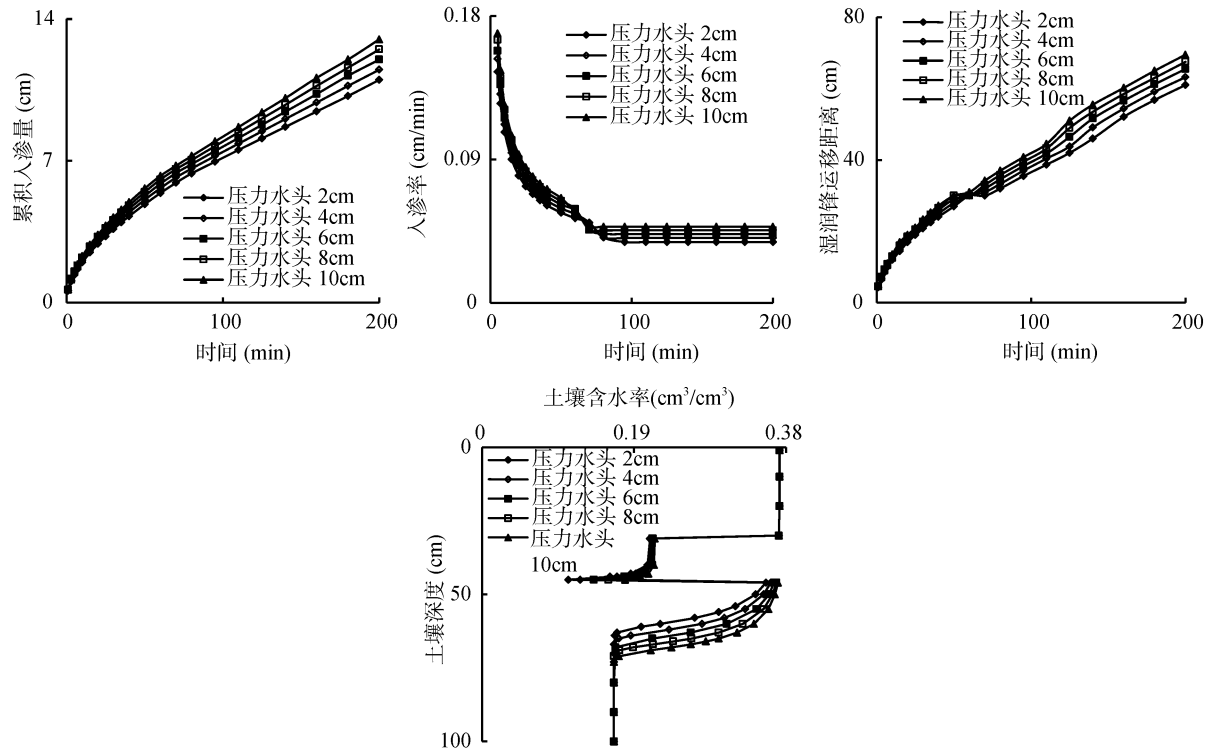


图 6 压力水头对砂质夹层土壤入渗特性的影响
Fig. 6 Effect of pressure head on infiltration characteristics of the soil column with sand interlayer

表 5 不同压力水头下累积入渗量拟合参数
Table 5 Fitting parameters of cumulative infiltration under different pressure head

h_0 (cm)	t_1 (min)	i_f (cm/min)	I_1 (cm)	R^2
2	74	0.038 3	6.152 5	1.000 0
4	68	0.040 7	6.139 5	0.999 9
6	64	0.043 2	6.147 5	0.999 9
8	60	0.045 5	6.132 9	1.000 0
10	57	0.047 9	6.134 8	0.999 9

由表 5 可知：压力水头主要影响 t_1 和 i_f 值，对湿润锋穿过砂层上界面时的累积入渗量 I_1 无影响。压力水头越大，湿润锋穿过砂层上界面的时间 t_1 越短，稳渗率 i_f 越大。分析发现，稳渗率 i_f 与压力水头 h_0 成线性关系。对表 5 中的 i_f 和 h_0 拟合，得：

$$i_f = 0.0012h_0 + 0.0359, \quad R^2 = 0.9999 \quad (13)$$

3 结论

1) 砂质夹层结构对土壤入渗特性有较大影响，具有暂时的阻水和减渗作用。

2) 湿润锋穿过砂层上界面时，上层土壤基本饱和，该时刻的累积入渗量等于砂层埋深与土壤饱和差的乘积。

3) 湿润锋穿过砂层上界面后，入渗过程变为稳渗阶段，该阶段的累积入渗量随时间成线性变化，稳渗率受砂层质地、砂层埋深和压力水头影响，与土壤初始含水率和砂层厚度无关。

4) 砂质夹层土壤剖面水分分布不连续，砂层土壤未饱和，土壤剖面含水率主要受砂层质地、砂层埋深和砂层厚度的影响。

5) 在农业水资源利用和工程防渗技术中，应重点考虑不同砂层质地下的合理埋深，以提高其阻水减渗效果。

参考文献：

[1] 王文焰, 王全九, 沈冰, 张建丰. 甘肃秦王川地区双层土壤结构的入渗特性[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(2): 36–40

[2] 王雄师. 疏勒河项目区土体构型分类及对盐碱地改良的影响[J]. 甘肃水利水电技术, 1998, 34(3): 66–69

[3] Hill DE, Parlange JY. Wetting front instability in layered soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1972, 36(5): 697–702

[4] 王文焰, 张建丰, 汪志荣, 高岩. 砂层在黄土中的阻水

性及减渗性的研究[J]. 农业工程学报, 1995, 11(1): 104–110

[5] Yang H, Rahardjo H, Leong EC, Fredlund DG. A study of infiltration on three sand capillary barriers[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(4): 629–643

[6] 王春颖, 毛晓敏, 赵兵. 层状夹砂土柱室内积水入渗试验及模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 61–67

[7] 王文焰, 张建丰, 汪志荣, 杨志威. 黄土中砂层对入渗特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(5): 33–41

[8] 曲晨晓, 王伟. 土壤剖面中砂质夹层的储水作用及机理研究[J]. 华中农业大学学报, 1997, 16(5): 349–356

[9] 邱玥, 魏新平, 廖华胜, 李连侠. 夹砂层土壤水分入渗试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2009, 20(1): 120–123

[10] Kandelous MM, Šimůnek J. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(7): 1070–1076

[11] 虎胆·吐马尔白, 吴争光, 苏里坦, 牟洪臣. 棉花膜下滴灌土壤水盐运移规律数值模拟[J]. 土壤, 2012, 44(4): 665–670

[12] 余根坚, 黄介生, 高占义. 基于 HYDRUS 模型不同灌水模式下土壤水盐运移模拟[J]. 水利学报, 2013, 44(7): 826–834

[13] Šimůnek J, van Genuchten MT, Šejna M. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes[J]. Vadose Zone Journal, 2008, 7(2): 587–600

[14] 毛晓敏, 尚松浩. 计算层状土稳定入渗率的饱和层最小通量法[J]. 水利学报, 2010, 41(7): 810–817

[15] 任利东, 黄明斌, 樊军. 不同类型层状土持水能力的研究[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 105–111

[16] 肖庆礼, 黄明斌, 邵明安, 任利东. 黑河中游绿洲不同质地土壤水分的入渗与再分布[J]. 农业工程学报, 2014, 30(2): 124–131

[17] Van Genuchten MT. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892–898

[18] 李毅, 任鑫, Horton R. 不同质地和夹层位置对层状土入渗规律的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(4): 485–490

Simulation of Infiltration Characteristics in Soil with Sand Interlayer Using HYDRUS-1D

FAN Yan-wei^{1,2}, HUANG Ning², MA Xiao-yi³, BI Gui-quan¹, ZHAO Wen-ju¹

(1 College of Energy & Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2 Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China, The Ministry of Education of China/ School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 3 Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Based on the theory for water movement in non-saturated soil, the HYDRUS-1D was applied to simulate the infiltration characteristics of the soil with sand interlayer. The impacts of various factors on the infiltration of soil with sand interlayer was analyzed. The results showed that: sand interlayer structure has great effect on soil infiltration characteristics, with a temporary water-blocking and infiltration-reducing. The process of infiltration reached the steady infiltration stage when the wetting front passed through the upper interface of sand layer. The steady infiltration rate was affected by the sand layer texture, sand layer burial depth and pressure head, and not affected by the initial soil water content and sand layer thickness. Soil water distribution in profile of the soil with sand interlayer was not continuous, the soil of upper layer was basically saturated, and soil of sand layer was unsaturated. Soil profile moisture was mainly affected by sand layer texture, sand layer burial depth and sand layer thickness. The results obtained in present study will provide theoretical basis for agricultural water resource utilization and engineering seepage control technique.

Key words: Sand interlayer; Influencing factors; Infiltration characteristics; Numerical simulation; HYDRUS-1D