

沼液穴灌入渗影响因素分析及数值模拟研究

郑 健^{1,2,3},周鹏杰^{2,3},张彦宁^{2,3},殷李高^{2,3},张恩继⁴

(1.兰州理工大学西部能源与环境研究中心,甘肃 兰州 730050;2.甘肃省生物质能与太阳能互补供能系统重点实验室,甘肃 兰州 730050;
3.兰州理工大学能源与动力工程学院,甘肃 兰州 730050;4.陕西省土地工程建设集团,陕西 西安 710075)

摘 要:通过试验研究了不同沼液配比、穴孔直径和土壤容重对沼液穴灌入渗的影响,并采用 COMSOL Multiphysics 软件对入渗过程进行了数值模拟。试验设置了 3 个沼液配比(沼液:水体积比为 1:4、1:6、1:8)和 1 个对照组 CK(纯水),3 个穴孔直径(3、5 cm 和 7 cm)和 2 个土壤容重(1.35 g·cm⁻³和 1.45 g·cm⁻³)。试验结果表明:在相同时间内入渗速率、累积入渗量和湿润体体积随穴孔直径的增大而增加,随土壤容重和沼液含量的增加而减小;水平入渗距离与垂直入渗距离的比值随穴孔孔径增大而减小,湿润体形状随穴孔直径的增加逐渐由水平轴大于垂直轴的椭球体趋向于水平轴小于垂直轴;当土壤容重较大时,可增加穴孔直径和降低沼液含量来提高单位时间土壤累积入渗量;所有处理均呈现湿润锋初始阶段运移速度较快,后期逐渐变慢,并且运移速度逐渐趋于稳定的趋势;采用 COMSOL Multiphysics 软件能够较准确实现沼液穴灌技术中湿润锋运移和湿润体内土壤含水率变化的模拟。

关键词:沼液穴灌;数值模拟;湿润锋;入渗速率;累积入渗量

中图分类号:S145.6 **文献标志码:**A

Analysis and numerical simulation of factors influencing
the hole application infiltration of biogas slurry

ZHENG Jian^{1,2,3},ZHOU Peng-jie^{2,3},ZHANG Yan-ning^{2,3},YIN Li-gao^{2,3},ZHANG En-ji⁴

(1.China Western Research Center of Energy & Environment, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China;
2.Gansu Key Laboratory of Complementary Energy System of Biomass and Solar Energy, Lanzhou, Gansu 730050, China;
3. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050,China;
4. Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group, Xi'an, Shaanxi 710075, China)

Abstract: Hole application of biogas slurry is an fertigation technology under research now. To explore the effect of water ratio, hole size, and soil bulk density on soil water infiltration around the irrigation hole after hole application of biogas slurry, a series of experiments were conducted to study the influencing factors. Meanwhile, the process of soil water infiltration was simulated using software, COMSOL Multiphysics. The treatments included 3 volume ratios of biogas slurry:water (1:4, 1:6, and 1:8), and a control (water only), three hole diameters (3 cm, 5 cm, and 7 cm) and two soil bulk densities (1.35 and 1.45 g·cm⁻³).Results showed that the infiltration rate, the cumulative infiltration, and the volume of the wetting body increased with increasing the hole diameter after the same infiltration time, but decreased with increasing soil bulk density and the slurry: water ratio. However, the ratio of the horizontal infiltration distance to vertical infiltration depth decreased with increasing hole diameter. The wetting body shape transformed from a spheroid with greater horizontal axis than the vertical axis to that with shorter horizontal axis than the vertical axis. In the case with higher soil bulk density, the cumulative infiltration in unit time was increased by increasing the hole diameter and reducing the biogas slurry:water ratio. The wetting front was advancing faster at the initial stage of hole irrigation but slowed down later and then approached steady state. Our results concluded that the process of the wetting front movement and soil moisture content variation in the wet-

ting body can be simulated with the software, COMSOL Multiphysics.

Keywords: hole irrigation of biogas slurry; numerical simulation; wetting front; infiltration rate; cumulative infiltration

沼液是禽畜粪便等有机物经过厌氧发酵后的残留液体,其总固体含量小于 1%^[1],含有水溶性及多种养分的速效肥料,保留了 90%以上的发酵原料中的氮、磷和钾,且氮素结构较原污水更优,施用可以显著改善土壤的理化性质,提高土壤的保水保肥能力,缓解土壤的板结酸化^[2]。与清水和常规施肥相比,施用沼液会降低土壤细菌值,增加微生物数量并提高土壤酶活性^[3],同时还能促进作物生长,提高农产品产量和品质^[4-6],降低病虫害发生率^[7],沼液浸种还可提高种子发芽率和生长水平^[8-10]。目前关于沼液施用的研究主要集中在作物产量、品质及土壤肥力等方面。

沼液穴灌技术是从设施农业生产中总结出的一种节肥技术,目前该技术的实施主要根据经验,与其相关的试验研究和理论分析尚少。土壤水分运动的分析是研究农田灌溉技术的基础,准确掌握穴灌的土壤水分运动变化规律对于促进穴灌技术的发展具有极其重要的意义。国内外众多学者对多种灌溉方式下的土壤水分分布问题做了研究,但从文献内容来看,多集中在滴灌^[11-12]、沟灌^[13]、膜孔灌^[14-15]等方面。而将沼液与穴灌技术结合,关于沼液灌溉入渗规律和灌溉技术参数等方面的研究鲜有报道。

基于此,本文通过设置不同沼液配比、穴孔直径和土壤容重,研究这些因素对沼液穴灌入渗的影响,并运用 COMSOL Multiphysics 软件模拟分析沼液穴灌入渗湿润锋运移及土壤含水率分布规律,以期在水—沼液一体化灌溉技术提供依据,使沼液穴灌技术建立在更为科学合理的基础上。

1 材料与方法

1.1 试验材料及装置

试验土壤选取甘肃省兰州市周边正常使用的温室大棚内表层 0~40 cm 的土壤,土壤经过自然风干、粉碎后,过 2 mm 孔径土壤筛备用,土壤颗粒级配见表 1。按照中国土壤分类标准,其土壤类型为粉质壤土,田间持水量为 22.23% (质量含水率)。沼液取自发酵物总固体质量分数 (TS) 为 8%,以牛粪和麦秸为主要原料,正常使用的户用沼气池,静置 2 个月,待其理化性质稳定后,用纱布过滤掉沼液中较大的颗粒备用。

试验装置主要由土箱和马氏瓶组成,考虑到穴孔入渗断面的对称性,采用实际穴灌土壤湿润体的 1/12 作为研究对象^[16],土箱为 30°扇形有机玻璃装置,高和宽分别为 50 cm 和 40 cm,马氏瓶用来提供恒定水头,容量 520 mL。试验装置如图 1 所示。

1.2 试验设计及方法

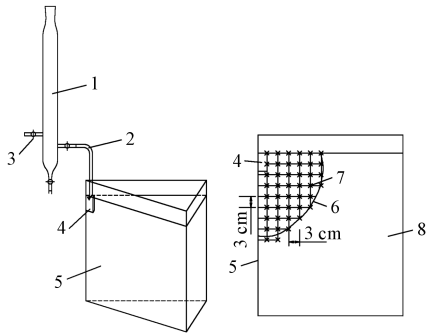
试验设置土壤容重为 1.35 g·cm⁻³和 1.45 g·cm⁻³;依据前期预试验结果设置 3 个沼液与水的配比 (体积比),即 1:4、1:6、1:8 和 1 个纯水处理 (对照),3 个穴孔直径 (3 cm、5 cm 和 7 cm);设定孔深为 5 cm。每组试验做 3 次,共计 72 组试验,取平均值作为试验结果,试验方案见表 2。

采用室内土箱试验,土体采用分层填装 (每层 5 cm),以设定土壤容重计算每层装土质量,采用精度 0.01 g 电子秤称量;最后 5 cm 填土时,在土箱 30°角处预留试验设计尺寸的穴孔;将按比例配比好的沼液装入马氏瓶,用乳胶软管分别将马氏瓶出水孔和排气管与装完土的试验土箱连接,为保证恒定水头,将排气管固定在入渗孔与土体表面平齐的位置。为方便记录试验数据,在土箱外壁绘制间距 5 cm 的网格线。然后同时打开马氏瓶的出水孔和排气

表 1 土壤颗粒级配

Table 1 Soil particle size distribution

粒径/mm Particle size	<2.000	<1.000	<0.500	<0.250	<0.100	<0.075	<0.005
质量分数/% Mass fraction	100.000	99.995	99.930	99.885	99.789	99.764	3.000



1. 马氏瓶; 2. 进水管; 3. 排气管; 4. 穴孔;
5. 土槽; 6. 湿润锋; 7. 取样点; 8. 土体
1. Markov bottle; 2. Inlet pipe; 3. Venting pipe; 4. The hole;
5. Trough; 6. Wetting front; 7. Sampling point; 8. Soil.

图 1 试验装置及取样示意图

Fig.1 Schematic diagram of the test equipment and sampling

表 2 试验方案

Table 2 Experimental design

处理 Treatment	土壤容重/(g · cm ⁻³) Soil bulk density	沼液配比 Biogas slurry: water ratio	穴孔直径/cm Hole diameter	处理 Treatment	土壤容重/(g · cm ⁻³) Soil bulk density	沼液配比 Biogas slurry: water ratio	穴孔直径/cm Hole diameter
T1	1.35	1 : 4	3	T13	1.45	1 : 4	3
T2	1.35	1 : 4	5	T14	1.45	1 : 4	5
T3	1.35	1 : 4	7	T15	1.45	1 : 4	7
T4	1.35	1 : 6	3	T16	1.45	1 : 6	3
T5	1.35	1 : 6	5	T17	1.45	1 : 6	5
T6	1.35	1 : 6	7	T18	1.45	1 : 6	7
T7	1.35	1 : 8	3	T19	1.45	1 : 8	3
T8	1.35	1 : 8	5	T20	1.45	1 : 8	5
T9	1.35	1 : 8	7	T21	1.45	1 : 8	7
T10	1.35	纯水 Water only	3	T22	1.45	纯水 Water only	3
T11	1.35	纯水 Water only	5	T23	1.45	纯水 Water only	5
T12	1.35	纯水 Water only	7	T24	1.45	纯水 Water only	7

孔阀门,当沼液进入穴孔时开始计时,随着试验的进行,当湿润锋运移到与外壁水平向(H)和垂向(V)的网格线相切时,记录一次入渗时间和马氏瓶的读数,并用记号笔在土箱外壁绘制湿润锋运移曲线。当入渗量达到 520 ml 时或入渗时间约 12 h 时同时关闭马氏瓶的进水孔和排气孔阀门,待穴孔内沼液渗完,试验结束。为避免土壤水分再分布造成土壤含水率的变化,在试验结束后立即沿着土槽中轴线水平方向和垂直方向每 3 cm 的交叉位置用土钻取土一次,土样编号并放入烘箱内烘干(105℃,8 h)后测定土壤质量含水率。

1.3 基于 COMSOL 软件模型建立

本文采用多物理场耦合软件 COMSOL Multiphysics 进行水、沼液渗流模拟分析。COMSOL 以有限元为基础,通过求解偏微分方程(单场)或者偏微分方程组(多场)来实现真实物理现象的仿真^[17],具有大规模的计算能力。求解器是基于 C++ 程序采用最新的计算技术编写,它的求解器类型有直接、迭代、分离、多重格点;求解类型有稳态、瞬态、参数等;处理器支持多核与集群。根据需要,用户可以通过 MATLAB GUI 界面选择单场求解或者多物理场求解。内嵌丰富的 CAD 建模工具的有限元软件 COMSOL,可以直接进行二维以及三维建模。COMSOL 在网格剖分方面具有强大的功能,它的网格生成器可以将腔体划分为三角形或者四面体的网格单元,通过仿真系统的交互界面用户可以根据自己的需要选择剖分的精细程度。

穴孔灌的土壤水分运动属于三维点源入渗条件下的土壤水分运动,具有轴对称性。在此次模拟分析中,假定土壤均匀且各向同性,同时将穴孔灌的水分运动简化为轴对称条件下的二维土壤入渗

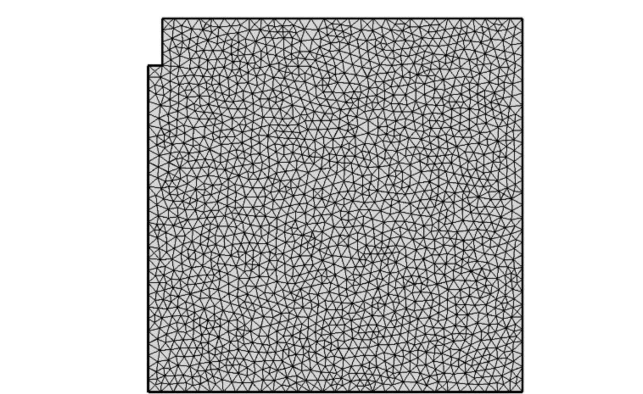


图 2 直径 3 cm 穴孔模型及网格划分图

Fig.2 Cavity model and mesh map of 3 cm hole

问题进行处理,本次模拟将沼液与水配比后的液体视为混杂了颗粒物的浑水,模拟对象统一定为边长 40 cm 的正方形轴对称模型,在对称轴顶点处留有不同尺寸的穴孔,见图 2。

土壤水分运动控制方程可表达为^[18]:

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

式中, θ 为土壤体积含水率; h 为土壤负压水头,cm; $K(h)$ 为土壤非饱和导水率,cm · min⁻¹; t 为时间,min; x 为径向坐标,cm, x 向右为正; z 为纵向坐标,cm。

1.4 模型参数

根据 COMSOL 模型模拟需要,对土壤水分特征曲线参数进行拟合,土壤水分特性曲线 $\theta(h)$ 可用 van Genuchten 模型来表示,即

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \quad (2)$$

式中, θ_r 为残余土壤体积含水率; θ_s 为饱和土壤体积含水率; α 、 n 、 m 为土壤水分特征曲线的形状参数, m

$= 1 - 1/n, n > 1$ 。

根据表 1 土壤级配表,采用 ROSETTA 软件拟合了两种容重土壤的水力参数,结果见表 3,其中 K_s 为土壤饱和导水率。

沼液中含有有机悬浮颗粒,且粘性较水高,在入渗过程中会影响沼液入渗^[18]。因此,本文在模拟中沼液入渗的饱和导水率采用变量设置。为保证变量设置的合理性,本文采用课题组实测数据拟合后获得的函数^[19]。函数为幂函数的形式:

$$K_{st} = K_{s1} \cdot t^{-\alpha} \tag{3}$$

式中, K_{st} 为 t 时刻的入渗速率 ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$); t 为入渗历时 (min); K_{s1} 为第一时间单位末的入渗速率,根据试验测得; α 为经验入渗指数,通过 Origin 软件对试验数据进行拟合获得。

1.5 定解条件的确定

1.5.1 初始条件 假定土壤初始含水量在所研究的区域内分布均匀,初始条件可表示为:

$$h(x, z, t) = h_0 \quad (0 \geq z \geq Z, 0 \leq x \leq X, t = 0) \tag{4}$$

式中, h_0 为土壤初始负压水头 (cm); Z 、 X 分别指研究区域垂直方向、水平方向最大距离 (cm)。

1.5.2 边界条件 参照图 3 可以看出:上边界 AB , 试验过程中不考虑蒸发,水流量为零,则

$$-K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) = 0 \quad (0 \leq x \leq X, t > 0) \tag{5}$$

表 3 土壤水力参数

Table 3 Soil hydraulic parameters

土壤容重 Soil bulk density /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	θ_r /($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	θ_s /($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	K_s /($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	α / cm^{-1}	n	l
1.35	0.0575	0.4672	38.30	0.0072	1.6482	0.5
1.45	0.0539	0.4436	27.22	0.0079	1.6248	0.5

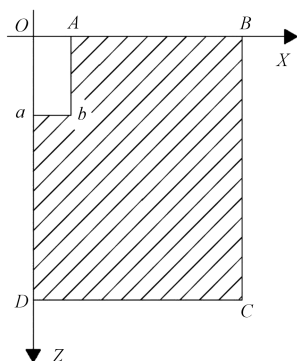


图 3 穴孔入渗模型

Fig.3 Hole infiltration model

右边界 BC 和下边界 DC , 由于所选研究区域较大, 可认为水分无法到达该边界, 边界条件描述为:

右边界 BC ,

$$h(X, z, t) = h_0 \quad (t > 0) \tag{6}$$

下边界 DC ,

$$h(x, Z, t) = h_0 \quad (t > 0) \tag{7}$$

边界 OD 为对称轴, 水流量为零,

$$-K(h) \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad (0 \geq z \geq Z, t > 0) \tag{8}$$

边界 ab 、 Ab 为穴孔中入渗面, 与入渗液体接触, 边界 ab ,

$$h(x, z, t) = 5 \text{ cm} \quad (z = -5 \text{ cm}) \tag{9}$$

$$\text{边界 } Ab, \quad h(x_0, z, t) = h_i \tag{10}$$

式中, x_0 为穴孔半径, h_i 为作用于孔壁各点的水头, cm , 其数值等于孔壁各点到水面的距离。

2 结果及分析

2.1 孔径对入渗的影响

图 4 中黑色实线表示湿润锋的实际运移情况, 不同颜色色块代表湿润锋不同时段运移的模拟结果。从 T7、T8、T9 处理的湿润锋运移情况可以看出, 在垂向入渗距离达到 15 cm 时, 所需入渗时间分别为 214.8、130.4、83.2 min , T8 相对于 T7、T9 相对于 T8 的入渗耗时衰减率分别为 39.3% 和 36.2%, 即孔径越大, 水分入渗速率越快, 且在相同时间内, 孔径越大, 湿润体的体积也就越大。这主要是由于水分在土壤入渗过程中初始阶段主要受到土壤基质势作用, 在入渗的后期, 土壤基质势作用逐渐减弱, 而重力势作用逐渐加强, 随穴孔直径的增大, 穴孔内的沼液体积增加, 导致重力场的变化, 因而对入渗过程的作用愈加显著, 使入渗速率随着穴孔直径的增大而增大。为进一步分析孔径对入渗的影响, 本文以实际垂向入渗距离达到 15 cm 时的湿润锋为研究对象, 分析实际水平入渗距离与垂向入渗距离的比值变化规律, 结果表明 T7、T8 和 T9 处理的比值分别为 1.007、0.952 和 0.945, T10、T11 和 T12 处理的比值分别为 1.050、0.950 和 0.902, T19、T20 和 T21 处理的比值分别为 1.061、0.938 和 0.948, T22、T23 和 T24 处理的比值分别为 1.127、0.959 和 0.886, 由比值变化可以看出孔径越大, 比值越小, 即湿润体纵向长度随孔径增大而逐渐大于横向长度 (穴孔尺寸不计)。初步分析产生的原因是: 随着孔径的增大, 穴孔中入渗面面积也随之变大, 在孔深不变的情况下, 即孔壁入渗面面积不变, 孔底入渗面面积变大, 相应的过水通道变多, 使垂向入渗距离

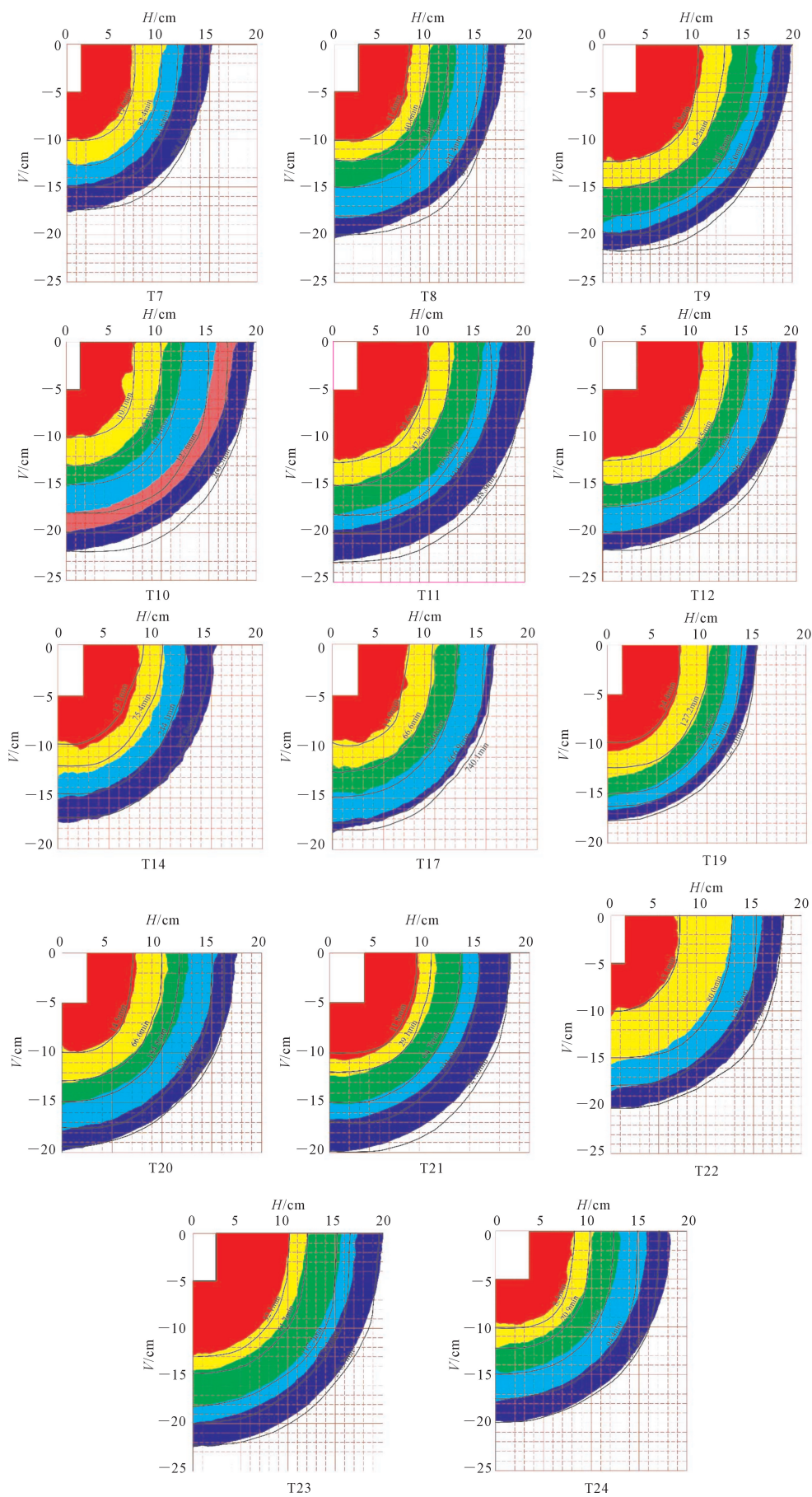


图 4 不同处理湿润锋模拟值与实测值对比图

Fig.4 Comparison of simulated and measured values of wetting front under different treatments

逐渐大于水平入渗距离。

2.2 土壤容重对土壤水分入渗的影响分析

为说明土壤容重对入渗的影响,选取 T7 与 T19 处理、T8 与 T20 处理、T9 与 T21 处理进行分析,从图 4 中可以看出,T7 与 T19 处理、T8 与 T20 处理、T9 与 T21 处理实际垂向入渗距离达到 15 cm 处所用时间分别为 214.8 min 与 335.3 min、130.4 min 与 154.8 min、83.2 min 与 94.7 min,可以看出土壤容重 $1.45\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的入渗速率明显低于 $1.35\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,即土壤容重大的入渗速率慢,这一试验现象与很多学者的研究成果相符合^[20-23]。张振华等^[24]的研究指出,在入渗过程中,土壤容重对入渗率的影响具有稳定性和一致性,表现为对应于同一时刻,容重越大入渗率越低。分析形成的主要原因是随着土壤容重的增大,土壤的团粒结构丧失,土壤变得紧密,从而土体内的大孔隙比例降低,导致土壤的基质吸附作用和毛管作用降低,使得入渗速率也随之而降低。图 5 中(a)、(b)、(c)和(d)分别表示 1:4(沼液:水)、1:6、1:8 和纯水 CK 对照条件下相同孔径在不同土壤容重条件下的累积入渗量对比,从图 5 中可以看出,累积入渗量在相同时间内土壤容重呈 $1.45\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}<1.35\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。例如图 5(c)中累积入渗量呈 T7>T19 处理,T8>T20 处理,T9>T21 处理。

2.3 沼液比对入渗的影响

入渗液体浓度的差异会对土壤水分入渗产生

影响^[25]。图 4 中 T14、T17 和 T20 处理表示孔径 5 cm,土壤容重 $1.45\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,沼液水配比分别是 1:4、1:6 和 1:8 的处理,从图 4 湿润锋位移规律可以看出,当垂向入渗距离达到 15 cm 时,分别耗时 244.1、210.0、154.8 min,即入渗速率随着沼液配比度的升高而减慢。从图 6 累积入渗量的变化规律可以看出,随着水沼液混合液中水体积的升高,累积入渗量逐渐增大,并且混合液的入渗量衰减速度明显快于纯水,初步分析产生上述规律的主要原因为沼液溶液中微小的悬浮颗粒含量随着沼液配比的增加而增多,在入渗过程中,悬浮颗粒堵塞了土壤中的孔隙^[26],降低了土壤的基质吸附作用和毛管作用,从而降低了沼液的入渗速率。

2.4 入渗模拟模型有效性验证

2.4.1 土壤含水率模拟结果验证 对 24 个处理进行模拟后共得到 466 个观测点质量含水率数据,与实测值对比分析后,相对误差在 0~5%之间的点有 290 个,占 62.2%,5%~10%之间的点有 162 个,占 34.8%,10%~15%之间的有 9 个,占 1.9%,大于 15%的有 5 个,占 1.1%。图 7 和图 8 分别显示了相同土壤容重在距离 OD 轴 6 cm 和 9 cm 处取样点含水率实测值与模拟值对比,从图中可以看出模拟与实测值吻合程度较好,纯水处理的模拟结果精确性要高于沼液;整个模拟结果中,误差较大处大多出现在第一个和最后一个取样点。实测值与模拟值的

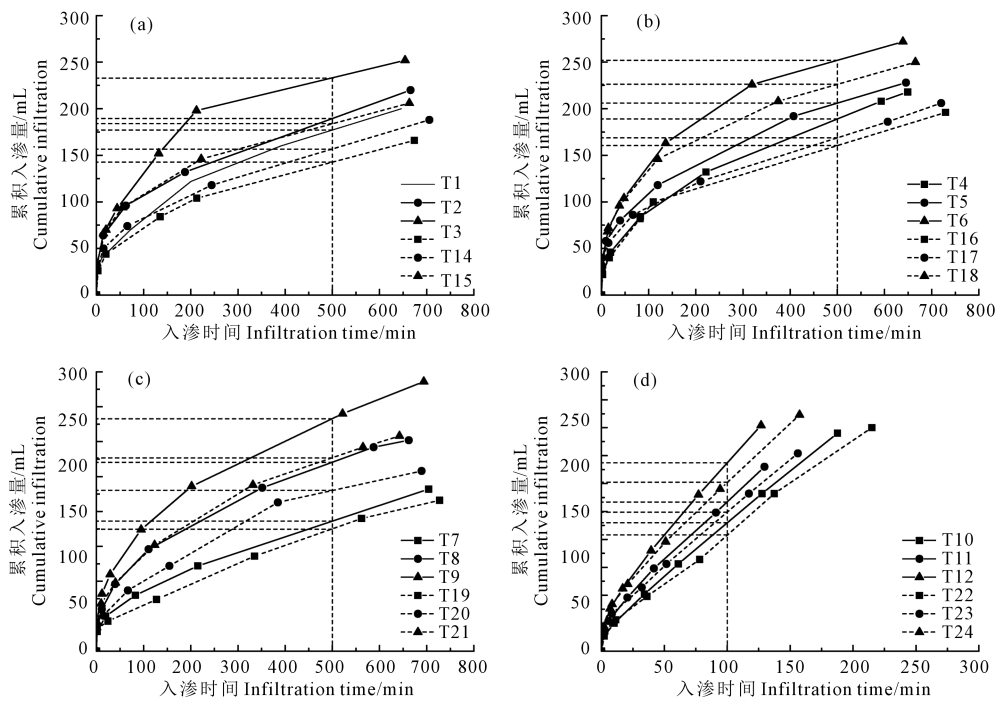


图 5 不同处理累积入渗量曲线

Fig.5 Cumulative infiltration curve of different treatments

对比分析结果表明所建立的模型能较好反映穴孔自由入渗的土壤含水率分布情况。

2.4.2 湿润锋模拟结果验证 图4中,实线表示不同时刻实际湿润锋位置,不同颜色区域表示不同时刻模拟湿润锋位置,从图中可以看出:(1)各时刻湿润体形状的模拟结果与实测结果一致性较好,湿润锋的模拟值与实测值可以较好的吻合;(2)由于沼液中颗粒物的存在,入渗速度衰减较快,模拟精度比纯水要低;(3)在入渗后期实际湿润锋运移速度快于模拟湿润锋运移速度。

2.4.3 影响模拟的因素分析 模拟结果表明,土壤含水率和湿润锋的模拟与实测结果存在一定误差,初步分析是受到土壤条件、沼液配比、试验装置和边界条件设置的影响。主要体现在:(1)实际试验中土壤采用分层装填,可能存在局部的不均匀性;(2)模拟中对上边界条件的简化以及采用的土壤水分运动控制方程时忽略了温度与土壤气体对水分运动的影响,同时试验土箱的侧壁为光滑的有机玻璃,与土体接触性较差,试验过程中可能存在一定程度的优先流也造成了实测数值与模拟值之间的差

异;(3)湿润锋边界附近含水率变化较大,用土钻取样较容易产生误差,并且湿润锋附近土体含水率值较小,测量容易产生偏差;(4)水和沼液的混合液在实际入渗过程中,土壤水分运动参数是动态变化的,本文采用实测数据的拟合方程代入,对模拟精度也造成了一定的影响。

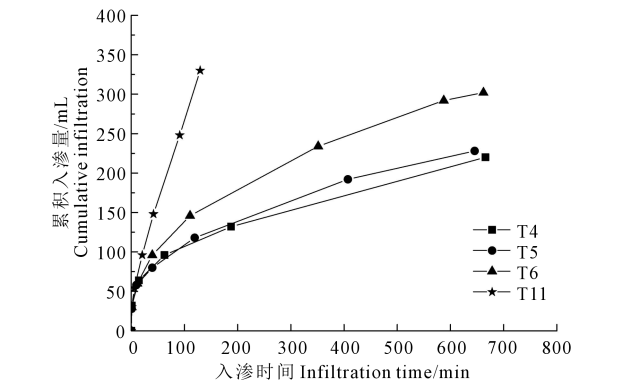
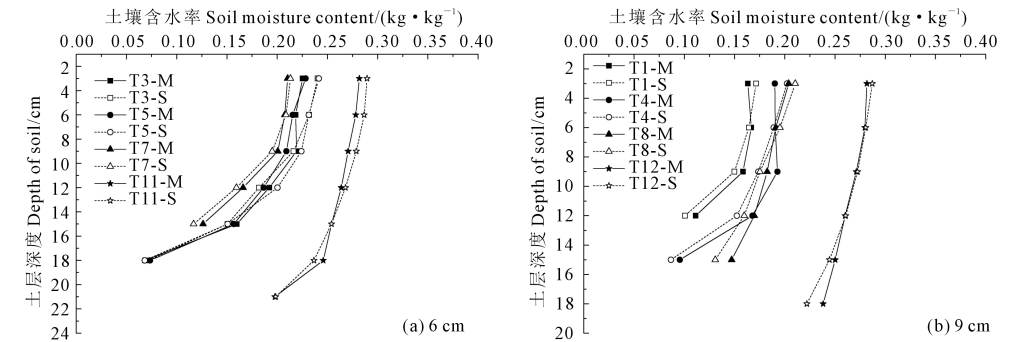


图6 不同沼液配比累积入渗量
Fig.6 Relationship of accumulated infiltration volume with infiltration time under different biogas slurry ratios



注:M表示实测值,S表示模拟值,下同。
Note: M represents the measured value, S represents the simulated value, the same below.

图7 $1.35\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 含水率模拟值与实测值对比图
Fig.7 Comparison of the simulated values of soil water content with the measured values under soil bulk density of $1.35\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$

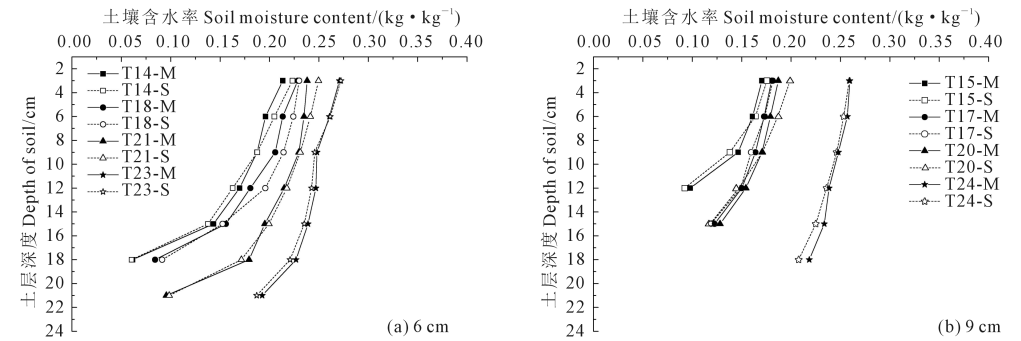


图8 $1.45\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 含水率模拟值与实测值对比图
Fig.8 Comparison of the simulated values of soil water content with the measured values under soil bulk density of $1.45\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$

3 结 论

1)水-沼液一体穴孔自由入渗能力受穴孔孔径、土壤容重和沼液配比的影响较为显著。累积入渗量和土壤湿润体随穴孔直径的增加而增大,随沼液配比的增加而减小;水平入渗距离与垂向入渗距离的比值随穴孔孔径增大而减小,湿润体形状随穴孔直径的增加逐渐由水平轴大于垂直轴的椭球体趋向于水平轴小于垂直轴; $1.45\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 土壤容重条件下的入渗速率和累积入渗量明显低于 $1.35\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 土壤容重,表明随土壤容重增大,相同时间内入渗速率、累积入渗量和湿润体面积呈减小趋势;随沼液配比的增大,入渗速率和累积入渗量均随之减小。在实际操作过程中,当土壤容重较大时可通过增加穴孔直径和降低沼液水配比来增加土壤入渗量。

2)采用 COMSOL Multiphysics 建立穴孔入渗模型,并对室内试验条件下的穴孔入渗试验进行了数值模拟研究。各处理条件下湿润锋运移距离的实测值与模拟值吻合较好,均表现出初期运移速度较快,随试验时间的延长渐渐减缓,并趋于稳定。土壤含水率的实测值与模拟值对比来看,相对误差<10%的占 97%,说明所建立的模型合理,利用 COMSOL Multiphysics 可以准确描述水-沼液一体穴孔自由入渗过程中的水分运动。

参 考 文 献:

[1] 邓良伟. 沼气工程[M].北京:科学出版社, 2015.

[2] 刘文科,杨其长,王顺清.沼液在蔬菜上的应用及其土壤质量效应[J].中国沼气,2009,27(1):43-46.

[3] 冯丹妮,伍钧,杨刚,等.连续定位施用沼液对水旱轮作耕层土壤微生物区系及酶活性的影响[J].农业环境科学学报,2014,33(8):1644-1651.

[4] 唐微,伍钧,孙百晔,等.沼液不同施用量对水稻产量及稻米品质的影响[J].农业环境科学学报,2010,29(12):2268-2273.

[5] 王卫平,陆新苗,魏章焕,等.施用沼液对柑桔产量和品质以及土壤环境的影响[J].农业环境科学学报,2011,30(11):2300-2305.

[6] 孙广辉.沼液灌溉对蔬菜产量和品质以及土壤质量影响的研究[D].杭州:浙江大学,2006

[7] Ledda C, Schievano A, Salati S, et al. Nitrogen and water

recovery from animal slurries by a new integrated ultrafiltration, reverse osmosis and cold stripping process; A case study[J]. Water Research, 2013,47(16):6157-6166

[8] 魏芳勤,吴玉红,陈永刚,等.不同浓度沼液浸种对花魔芋实生种子萌发的影响[J].中国沼气,2018,36(2):92-95.

[9] 魏素珍,达仓,边巴吉巴,等.沼液浸种对油菜种子萌发的影响[J].现代农业科技,2012,(16):13-14.

[10] 袁大刚,刘成,蒲光兰,等.沼液浸种对万寿菊种子发芽及幼苗生长的影响[J].中国中药杂志,2011,36(7):817-822.

[11] 张越,杨劲松,姚荣江.咸水冻融灌溉对重度盐渍土壤盐分分布的影响[J].土壤学报,2016,53(2):388-400.

[12] Hou L Z, Shang J, Liu J T, et al. Soil water movement under a drip irrigation double-point source[J]. Water Science & Technology Water Supply, 2015, 15(5):924.

[13] 章少辉,白美健,魏志斌,等.沟灌地表水流与溶质动力学耦合模拟及验证[J].农业工程学报,2016,32(23):93-100.

[14] Saeed M, Mahmood S. Application of film hole irrigation on borders for water saving and sunflower production[J]. Arabian Journal for Science & Engineering, 2013, 38(6):1347-1358.

[15] 范严伟,赵彤,赵文举,等.膜孔灌溉入渗量的简化计算方法及验证[J].农业工程学报,2016, 32(13):67-74.

[16] 赵伟霞.无压地下灌溉和间接滴灌水分运移规律与节水增产机制研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2009.

[17] Zimmerman W B J. COMSOL Multiphysics 有限元法多物理场建模与分析[M].北京:人民交通出版社,2007.

[18] 郑健,张恩继,王燕,等.水-沼液一体入渗特征分析[J].兰州理工大学学报,2018,44(1):58-64.

[19] 张恩继.水-沼液一体穴灌土壤水分及铵态氮迁移特征试验研究[D].兰州:兰州理工大学,2016.

[20] 刘营营,余冬立,刘冬冬,等.土地利用与土壤容重双因子对土壤水分入渗过程的影响[J].水土保持学报,2013,27(5):84-88,94.

[21] 吴军虎,张铁钢,赵伟,等.容重对不同有机质含量土壤水分入渗特性的影响[J].水土保持学报,2013,27(3):63-67,268.

[22] 潘云,吕殿青.土壤容重对土壤水分入渗特性影响研究[J].灌溉排水学报,2009,28(2):59-61,77.

[23] 李卓,吴普特,冯浩,等.容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验[J].农业工程学报,2009,25(6):40-45.

[24] 张振华,谢恒星,刘继龙,等.气相阻力与土壤容重对一维垂直入渗影响的定量分析[J].水土保持学报,2005,19(4):36-39.

[25] 孙存喜,吴发启,王健,等.不同浓度浑水入渗试验研究[J].水土保持通报,2009,(4):57-60.

[26] 何利昌,樊贵盛,吉晋兰.细颗粒物潜入土壤对入渗的影响研究[J].灌溉排水学报,2015,34(2):102-104.