文章编号:1000-7601(2025)06-0173-11 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2025.06.17

沼液穴灌参数对土壤入渗特性的影响机制及模型构建

唐小娟[1],向 鹏[2],郑 健[2],王 英[1]

(1.甘肃省水利科学研究院,甘肃 兰州 730070; 2.兰州理工大学土木与水利工程学院,甘肃 兰州 730050)

摘 要:为探究沼液穴灌中沼液配比、穴孔直径和深度对土壤湿润锋运移和累积入渗量的影响,优化沼液穴灌穴孔参数及作物灌水量,设计经济高效的沼液灌溉系统,利用 HYDRUS-2D 模型和实测土壤特征参数构建并验证沼液穴灌土壤水分运动模型。结果表明:基于 HYDRUS-2D 模型模拟的累积入渗量和湿润锋运移距离与实测值拟合良好(NSE>0.966,$PBIAS$≤±0.3);土壤累积入渗量、土壤湿润锋运移距离随沼液配比的增大而逐渐减小,随穴孔直径和深度的增大而逐渐增大;湿润锋横向和垂向运移距离均与稳定入渗率和入渗时间呈良好的幂函数关系(R^2≥0.977);湿润锋曲线可以用椭圆曲线方程表示(R^2≥0.957),且沼液穴灌土壤累积入渗量与湿润体面积呈线性关系(R^2≥0.972);建立的沼液穴灌湿润锋运移距离模型(NSE>0.976, $PBIAS$≤±0.13)和累积入渗量模型(NSE>0.982, $PBIAS$≤±0.10)可靠性良好,能够较准确地描述沼液穴灌参数变化产生的影响,可为沼液穴灌适宜参数和灌溉量的确定提供理论依据。

关键词:沼液穴灌;穴孔参数;湿润锋运移;累积入渗量;HYDRUS-2D 模型

中图分类号:S275.6 **文献标志码**:A

Influence mechanism and model construction of biogas slurry hole irrigation parameters on soil infiltration characteristics

TANG Xiaojuan[1], XIANG Peng[2], ZHENG Jian[2], WANG Ying[1]

(1. *Gansu Provincial Research Institute of Water Resources*, *Lanzhou*, *Gansu* 730070, *China*;
2. *School of Civil and Hydraulic Engineering*, *Lanzhou University of Technology*, *Lanzhou*, *Gansu* 730050, *China*)

Abstract: To explore the effects of biogas slurry ratio, hole diameter, and depth on the soil wetting front migration distance and cumulative infiltration during biogas slurry hole irrigation, the hole parameters of biogas slurry hole irrigation and crop irrigation amount were optimized, and an economical and efficient biogas slurry irrigation system was designed. The HYDRUS-2D model and the measured soil characteristic parameters were used to construct and verify the soil movement model of biogas slurry hole irrigation. The results showed that the cumulative infiltration and wetting front migration distance simulated by the HYDRUS-2D model closely matched the laboratory test results (NSE > 0.966, $PBIAS$ ≤ ± 0.3). Soil cumulative infiltration and wetting front migration distance decreased with the increase of biogas slurry ratio and increased with the increase of hole diameter and depth. The lateral and vertical migration distances of the wetting front exhibited a strong power function relationship with the stable infiltration rate and infiltration time (R^2≥0.977). The wetting front curve could be accurately represented by an elliptic curve equation (R^2≥0.957), and soil cumulative infiltration under biogas slurry hole irrigation demonstrated a linear relationship with the wetted body area (R^2≥0.972). The established model for the wetting front migration distance model (NSE>0.976, $PBIAS$≤±0.13) and cumulative infiltration model (NSE>0.982, $PBIAS$≤±0.10) exhibited good reliability, accurately describing the impact of variations in biogas slurry hole irrigation parameters. This

收稿日期:2025-09-02 **修回日期**:2025-10-11

基金项目:甘肃省水利科学试验研究及技术推广计划项目(24GSLK012,25GSLK015);国家自然科学基金项目(52469011)

作者简介:唐小娟(1977-),女,陕西凤翔人,正高级工程师,主要从事水资源高效利用、节水灌溉、雨水集蓄利用研究。E-mail:tangxiaojuanrwh@163.com

通信作者:郑健(1981-),男,甘肃会宁人,教授,主要从事农业水土工程研究。E-mail:zhj16822@126.com

provides a theoretical basis for determining appropriate parameters and irrigation volumes for biogas slurry hole irrigation.

Keywords: biogas slurry hole irrigation; hole parameter; wetting front migration; cumulative infiltration; HYDRUS-2D model

人口快速增长、经济发展、降水分布不稳定且不均衡以及气候变化等因素将加剧水资源使用的竞争,导致一些干旱和半干旱地区的农业灌溉用水减少以及农业产量下降[1]。农业用水占总水资源的85%[2],但农业灌溉用水效率普遍较低,一些地区实际被农作物利用的水量不足总用水量的60%[3]。因此,提升农业水资源利用效率是确保农业可持续发展的重要举措。

沼液是良好的绿色有机肥料[4],具有高水低肥的特性,其资源化利用不仅是对水资源的保护,也可推进资源型和节约型社会建设[5]。研究表明,施用沼液可以改善潮土土壤结构,提高团聚体稳定性[6],增加土壤孔隙度和土壤团粒结构,减少土壤碎屑[7],增加土壤颗粒结合力[8],并通过增加土壤中、微观孔隙度、降低宏观孔隙度来降低沙土入渗率和导水率[9],进而提高土壤持水能力[10-11]。大田试验进一步表明,施用沼液可以增加作物产量,提高作物品质,有效减少灌溉水量[12-13]。然而,传统沼液灌溉方式易产生水分和养分淋洗流失,从而导致作物根区土壤可利用营养元素滞留量减少,造成资源浪费,甚至导致地下水污染[14]。穴灌是农民在设施农业生产中采用的一种节水节肥技术,该方法简单、廉价、易于操作,对促进西北干旱区节水灌溉具有现实意义[15]。Pan 等[16]发现 Philip 入渗模型能够准确描述沼液穴灌累积入渗量随时间的变化规律,并建立了广义的 Ross 入渗模型,较准确地模拟了清水在穴灌条件下的土壤水分运动过程。然而目前对沼液穴灌的研究仅限于累积入渗量和湿润锋运移距离与入渗时间的关系,缺乏对湿润锋运移距离和累积入渗量的定量模拟研究。

温室大棚番茄种植试验结果表明,与传统沼液灌溉方式相比,沼液穴灌技术可以向作物根区更精确地供给水和养分,提高作物产量、综合营养品质和灌溉水利用效率[17],但不同作物的根系分布范围存在差异[18],要针对不同作物根系分布特征确定合理的沼液穴灌参数(穴孔直径、深度和沼液配比),准确估计灌溉湿润面积[19],建立土壤湿润体和作物根系的合理匹配关系,提高水肥利用效率显得尤为关键。然而要获得不同作物适宜的沼液穴灌参数,需要开展大量长期的试验研究,对沼液穴灌技术的推广应用并不是很理想的模式。HYDRUS-2D 软件已被广泛用于不同灌溉系统和施肥研究中[20-21]以评价灌溉系统的用水效率,与室内试验和大田试验相比,其模拟沼液穴灌过程能够更加直观、快速地了解入渗过程,获得不同沼液穴灌参数对湿润锋形状、湿润体含水量分布、入渗速率变化规律以及累积入渗量随入渗时间的变化特征。

基于此,本文通过室内试验验证 HYDRUS-2D 数值模拟试验结果的可靠性,同时借助试验模拟结果分析不同影响因素下土壤累积入渗量、湿润锋运移距离的分布特征,建立湿润锋运移模型,并分析累积入渗量与湿润体面积之间的定量关系,最终通过室内试验结果对模型可靠性进行验证,以期为沼液穴灌的推广应用提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 室内试验

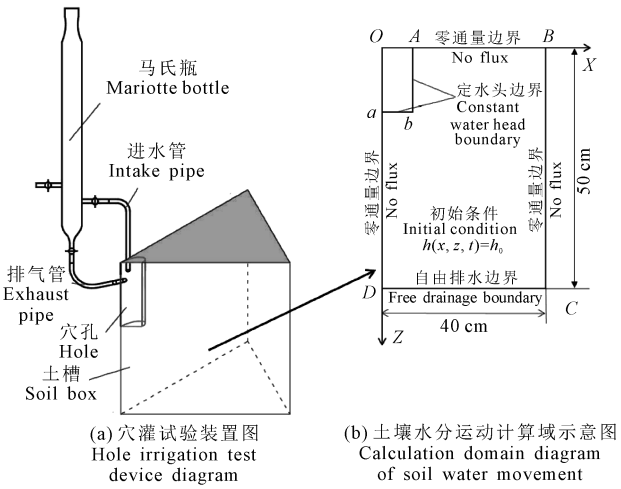
1.1.1 试验材料 供试土样取自甘肃省兰州市附近温室大棚0~40 cm土层,样品经自然风干处理后,采用粉碎机进行破碎,并通过2 mm孔径筛网进行筛选,黏粒、粉粒、砂粒含量分别为19.93%、55.77%、24.30%,属于粉质壤土。参照区域农田土壤容重特征,本试验将土壤容重参数设定为1.35 $g \cdot cm^{-3}$,测得土壤初始含水率为0.072 $cm^3 \cdot cm^{-3}$。

供试沼液样本采集于兰州市花庄镇甘肃荷斯坦良种奶牛繁育中心的沼气发酵系统,该沼气发酵系统以牛粪作为主要发酵底物,处于正常运行且持续产气状态,采集后的沼液样本经过曝气处理后在常温环境下贮存60 d,直至其各项物理化学指标趋于稳定后才投入使用。在开展试验操作时,先对长期静置的沼液进行充分搅拌至均匀,而后使用32目纱布进行过滤以去除其中粒径较大的悬浮物质,依据设计的浓度要求,按照沼液与水的体积比例进行稀释配制,用于后续试验。

1.1.2 试验及模拟方案 依据预试验结果,设置4个沼液配比(沼液∶水,体积比):0(B_0)、1∶8($B_{1:8}$)、1∶6($B_{1:6}$)、1∶4($B_{1:4}$),3个穴孔直径:3 cm(D_3)、5 cm(D_5)、7 cm(D_7),2个穴孔深度:5 cm(H_5)、10 cm(H_{10}),共计24个处理,每个处理3次重复,取均值作为试验结果。

为利用 HYDRUS-2D 模型进一步探求穴孔直径及深度对不同配比沼液穴灌土壤累积入渗量及湿润锋运移距离的影响,本文在不同沼液配比条件下设置 64 个模拟情景,包括为 4 个沼液配比(B_0、$B_{1:8}$、$B_{1:6}$、$B_{1:4}$)、4 个穴孔直径(D_3、D_5、D_7、D_9)和 4 个穴孔深度(H_8、H_{10}、H_{12}、H_{14})。

1.1.3　测定内容及方法　土壤水分特征曲线采用高速恒温冷冻离心机(CR21GⅡ型,日立,日本)测定[22],土壤饱和导水率采用变水头渗透试验法测定[23]。图 1a 展示了沼液穴灌试验装置的整体结构,该系统由供水单元与土槽模块两大部分构成。为简化研究模型,选取实际穴灌土壤湿润体的 1/12 作为分析对象[24],这一设计基于穴孔入渗断面的对称性特征。采用的扇形土箱由厚度 1 cm 的有机玻璃材料制成,其高度 50 cm、径向延伸 40 cm、扇形角度 30°。供水系统配置了容积 520 mL 的马氏瓶,通过恒定水头控制实现稳定供水。试验土样依照设计容重分层装填到有机玻璃柱体中,每层装填高度 5 cm,装填过程中借助压实控制保证各层容重的一致性。沼液入渗试验开始后,借助马氏瓶持续供应沼液,在沼液注入穴孔的瞬间启动计时器,采用由密集到稀疏的观测方式记录土壤湿润锋迁移轨迹。试验过程中,在土箱两侧建立二维坐标系统,实时记录各个渗透时间点的湿润锋位置及其对应的马氏瓶液位数据。试验终止条件设定为累积入渗量达到 520 mL 或入渗持续时间达 12 h,届时同步关闭马氏瓶的进水孔与排气孔阀门。待穴孔内沼液完全渗透后,试验流程即告完成。



(a) 穴灌试验装置图 Hole irrigation test device diagram　　(b) 土壤水分运动计算域示意图 Calculation domain diagram of soil water movement

图 1　穴灌试验装置图及土壤水分运动计算域示意图

Fig.1　Hole irrigation test device diagram and soil water movement calculation domain diagram

1.2　数值模拟

1.2.1　土壤水分运动基本方程　穴灌属于线源入渗,即轴对称三维入渗,在假定土壤均匀且各向同性的条件下,可将水分运动简化为轴对称条件下的二维土壤入渗问题进行处理,且试验时间较短,忽略地表蒸发、温度及作物对土壤水分的影响,则相应的 Richards 方程为[23]:

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

式中,θ 为土壤体积含水率($cm^3\cdot cm^{-3}$);$D(\theta)$ 为土壤水分扩散率($cm\cdot min^{-1}$);$K(\theta)$ 为非饱和土壤导水率($cm\cdot min^{-1}$);t 为时间(min);z 为垂向坐标,向下为正(cm);x 为横向坐标(cm)。

1.2.2　定解条件　充分考虑沼液穴灌的实际情况,设定不同建模情景的初始和边界条件,如图 1b 所示。假定土壤初始含水率在所研究区域内分布均匀,初始条件可表示为:

$$h(x,z,t)=h_0\quad(0\geqslant z\geqslant Z,0\leqslant x\leqslant X,t=0)\quad(2)$$

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

在本次试验的边界条件设置中(图 1b),模型的上边界 AB 被定义为零通量边界,即不受蒸发作用和降水过程的影响。下边界 CD 则采用自由排水边界条件,这种设置确保了边界不受灌水操作的影响,使水分能够自由排出。模型的左边界 OD 被设定为零通量边界,即外界不存在水量交换。右边界 BC 也采用零通量边界条件,这是因为灌溉水分未能到达该边界区域。此外,边界 ab 和 Ab 被设置为定水头边界,这一定义将其作为穴孔入渗面的模拟条件。

综上所述,边界条件表述为:

$$\begin{cases}-K(h)\left(\dfrac{\partial h}{\partial z}-1\right)=0 & (t>0,AB\text{ 边界})\\ \dfrac{\partial h}{\partial z}=0 & (t>0,CD\text{ 边界})\\ -K(h)\dfrac{\partial h}{\partial r}=0 & (t>0,BC\text{ 边界和 }OD\text{ 边界})\\ h(x,z,t)=H & (ab\text{ 边界})\\ h(D,z,t)=h_i & (Ab\text{ 边界})\end{cases}\quad(3)$$

式中,h_i为作用于孔壁各点的水头(cm),其数值等于孔壁各点到液面的距离。

1.2.3　模型参数　由于沼液的密度与粘度对于沼液在土壤中的扩散过程影响较小[25],故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。浑水入渗模拟较清水入渗模拟的区别在于其饱和

导水率不同[26],而且沼液入渗会对土壤水分特征参数产生影响,故本模拟采用离心机法和变水头法测定不同沼液配比条件下的土壤水分特征曲线和土壤饱和导水率,并根据 HYDRUS-2D 模型模拟需要,对实测的土壤水分特征曲线参数通过 van Genuchten-Mualem 模型[27]进行拟合,获得不同沼液配比条件下的土壤参数(表 1)。

表 1 不同处理土壤特征参数

Table 1 Soil characteristic parameters of different treatments

沼液配比 Ratio of biogas slurry	θ_s /(cm^3 · cm^{-3})	θ_r /(cm^3 · cm^{-3})	α /(cm^{-1})	n	K_s /(cm · min^{-1})
B_0	0.3722	0.0510	0.0112	1.6688	0.00360
$B_{1:8}$	0.3886	0.0549	0.0097	1.7223	0.00143
$B_{1:6}$	0.3894	0.0554	0.0095	1.7469	0.00105
$B_{1:4}$	0.3909	0.0580	0.0093	1.7551	0.00080

1.2.4 统计分析 在评估数值模拟和模型的准确性时,采用 5 个关键指标进行综合分析:决定系数(R^2)、平均绝对误差(*MAE*)、均方根误差(*RMSE*)、偏差百分比(*PBIAS*)以及纳什效率系数(*NSE*)。其中,*MAE* 和 *RMSE* 作为误差指标,其数值越接近 0,表明模拟值与观测值之间的偏差越小;*PBIAS* 用于衡量模拟结果的系统性偏差,其理想范围应控制在±10%以内;*NSE* 和 R^2 作为拟合优度指标,其数值越接近 1,则说明模拟结果与观测数据之间的吻合度越高。通过上述指标的综合分析,可以有效判断数值模拟值、模型计算值与实测值之间的吻合程度。各项指标值越接近其理想范围,表明模型的准确性和可靠性越高,从而为后续的模型优化和应用提供科学依据。

2 结果与分析

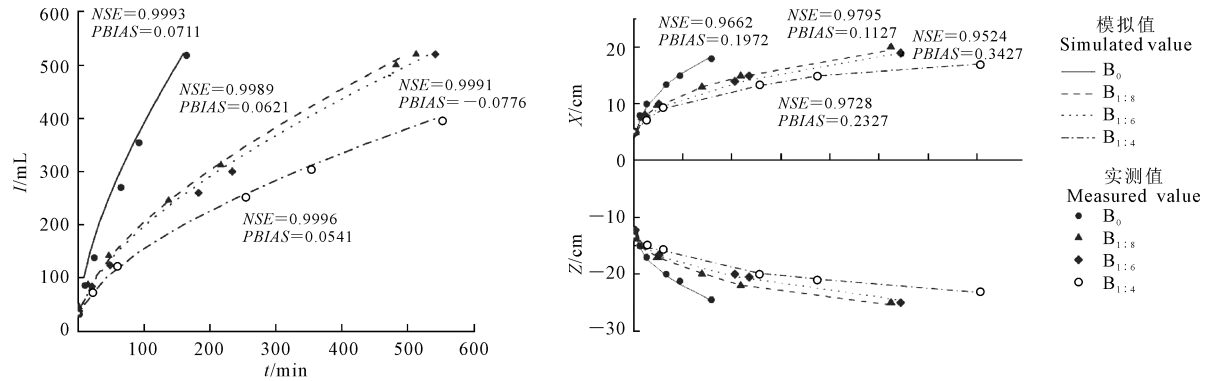
2.1 HYDRUS-2D 数值模拟验证

采用 HYDRUS-2D 软件模拟获得不同沼液配比处理在 D_3H_{10} 条件下,不同时刻土壤累积入渗量(I)和湿润锋运移距离,将模拟结果与室内试验数据进行对比。由图 2 可知,各处理在不同时刻土壤累积入渗量和湿润锋运移距离模拟值与实测值的纳什效率系数较高,均在 0.9524 以上,偏差百分比亦控制在±0.3427 以内,说明可基于土壤特征参数实测值,利用 HYDRUS-2D 软件模拟不同配比沼液穴灌土壤水分入渗过程,且本文所建立的边界条件可靠性良好。

2.2 穴灌参数对累积入渗量的影响

基于 HYDRUS-2D 模型的模拟结果,构建不同穴孔参数(D_5H_{10}、$B_{1:6}H_{10}$、$B_{1:6}D_5$)下土壤累积入渗量随时间变化关系曲线(图 3),可以看出不同参数组合下土壤累积入渗量均随入渗时间的延长而增大,且不同参数组合下累积入渗量在初始阶段增加较快,随着入渗历时的延长,累积入渗量增加幅度逐渐降低,这主要是因为在水分开始渗透的初期阶段,地表土层呈干燥状态,其含水量较低,使得土壤基质势有所提高,此时基质吸附力占据主导地位,表层土壤中存有大量相互连通的大孔隙以及导水孔隙[28],这使得气相阻力相对较小,毛细作用表现得较为明显,初始阶段的累积入渗量呈现出快速上升趋势。随着试验不断持续进行,土壤含水量逐渐增加,表层水分饱和层厚度随之增加,土壤基质吸力梯度逐渐变小,通气孔隙减少致使气相阻力持续增大,毛细作用相应减弱,渗透速率逐步下降,当渗透过程持续到一定时间后,土壤基质吸力梯度与毛细作用基本消失,在重力作用下,渗透速率会保持在相对稳定的状态[29-30]。

图 3a 为 D_5H_{10} 时不同沼液配比土壤累积入渗量随时间的变化曲线,当入渗时间为 140 min 时,$B_{1:8}$、$B_{1:6}$和 $B_{1:4}$的土壤累积入渗量较 B_0情景分别减小 48.08%、49.88%和 59.62%,即随着沼液配比的增大,同一时间土壤累积入渗量逐渐减小,这主要是因为随着沼液施用比例的提高,其内部所含的微细有机悬浮物浓度显著上升。在采用沼液穴灌技术时,这些有机悬浮物在土壤渗透界面易发生积聚,从而形成致密的阻滞层[31],这种现象导致穴孔渗透的上边界条件发生改变,进而对水分的渗透过程产生抑制作用。图 3b 为 $B_{1:6}H_{10}$时不同穴孔直径土壤累积入渗量随时间的变化曲线,当入渗时间为 386 min 时,D_9、D_7和 D_5的土壤累积入渗量较 D_3分别增大 23.81%、14.29%和 10.07%,即随着穴孔直径的增大,相同时间土壤累积入渗量逐渐增加。图 3c 为 $B_{1:6}D_5$时不同穴孔深度土壤累积入渗量随时间的变化曲线,当入渗时间为 296 min 时,H_{14}、H_{12}和 H_{10}的土壤累积入渗量较 H_8分别增大 52.94%、34.12%和 17.52%,即随着穴孔深度的增大,相同时间土壤累积入渗量也逐渐增加。对于沼液穴灌技术而言,穴孔是土壤水分入渗的关键界面,其几何参数对水分传输过程影响较大,当穴孔直径和深度变大时,入渗面积随之增加,能为水分入渗提供更多通道,使土壤累积入渗量有所提升,而且随着沼液填充高度增加,穴孔内液体体积增加,重力场强度改变,这种改变强化了水分入渗效应,使入渗过程更明显。



(a) 土壤累积入渗量　Soil cumulative infiltration　　(b) 土壤湿润锋运移距离　Soil wetting front migration distance

图 2　累积入渗量和湿润锋运移的实测值与模拟值对比

Fig.2　Comparison of measured and simulated cumulative infiltration and wetting front migration distance

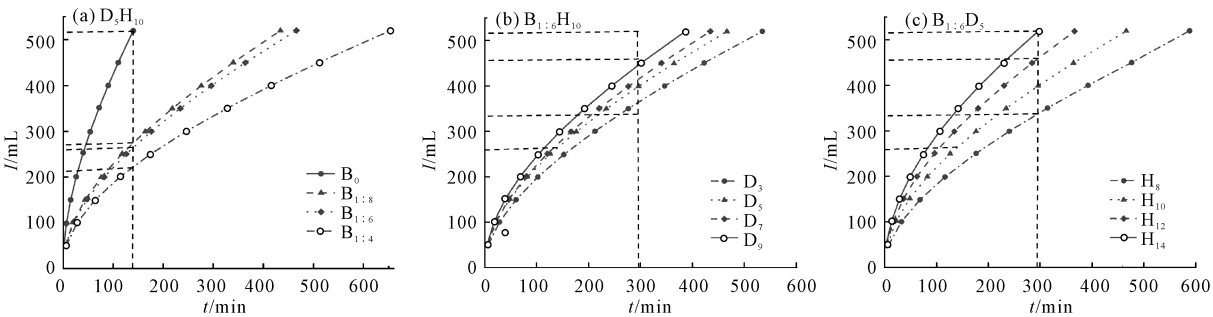


图 3　不同影响因素对土壤累积入渗量的影响

Fig.3　Effects of different influencing factors on soil cumulative infiltration

2.3　不同影响因素对湿润锋运移的影响

2.3.1　*沼液浓度*　基于 HYDRUS-2D 模型的模拟结果,分析不同参数对湿润锋运移距离的影响。由图 4 可知,在 D_5H_{10} 和 D_7H_{12} 条件下,土壤湿润锋垂向运移距离 Z 和横向运移距离 X 均随时间的延长而逐渐增大,沼液配比越大,湿润锋运移越缓慢。如图 5a 中入渗时间为 140 min 时,$B_{1:8}$、$B_{1:6}$和 $B_{1:4}$ 的 X 较 B_0分别减小28.26%、31.37%和 38.49%,Z 分别减小 14.76%、19.58%和 27.62%;图 5b 中入渗时间为 100 min 时,$B_{1:8}$、$B_{1:6}$和 $B_{1:4}$的 X 较 B_0分别减小 25.81%、31.10%和 41.71%,Z 分别减小 16.89%、19.94%和 24.51%。表明相同时间的土壤湿润锋运移距离随着沼液配比的增大而减小,这主要是因为在沼液穴灌过程中,沼液中有机悬浮颗粒在土壤表面沉积,形成致密层,改变了穴孔入渗的上边界,会起到阻渗作用,且沼液中有机悬浮颗粒数量随着沼液配比的增大而不断增加,阻渗作用也不断加强,使得相同时刻的土壤湿润锋运移距离不断减小;同时说明沼液配比对土壤湿润锋运移距离有显著影响,在设计灌溉系统时是必要的考虑因素。

2.3.2　*穴孔直径*　在 $B_{1:6}H_{10}$和 B_0H_8条件下,对不同穴孔直径的湿润锋运移距离进行数值模拟分析(图 6)。可以看出穴孔直径越大,湿润锋运移越快。如图 6a 中入渗时间为 386 min 时,D_9、D_7和 D_5的 X 较 D_3分别增大 17.06%、14.95%和11.59%,Z 分别增大 10.82%、6.22%和 4.73%;图 6b 中入渗时间为 144 min 时,D_9、D_7和 D_5的 X 较 D_3分别增大 25.18%、11.76%和 5.88%,Z 分别增大8.72%、5.91%和3.64%。表明相同时间的土壤湿润锋运移距离随着穴孔直径的增大而不断增大,且穴孔直径对横向湿润锋运移距离的影响较垂向湿润锋运移距离显著,这主要是因为穴孔底部面积随着穴孔直径的增大而增大,水分入渗的通道随之增多,土壤湿润锋运移距离也不断增加,且横向湿润锋运移距离在入渗开始的瞬时由零增至穴孔半径,穴孔直径越大,则横向湿润锋运移距离越大。

2.3.3　*穴孔深度*　在 $B_{1:6}D_5$和 B_0D_7条件下,对不同穴孔深度的湿润锋运移距离进行数值模拟分析(图 5),图 5a 中入渗时间为 296 min 时,H_{14}、H_{12}和 H_{10}的 X 较 H_8分别增大 10.11%、6.25%和2.52%,Z 分别

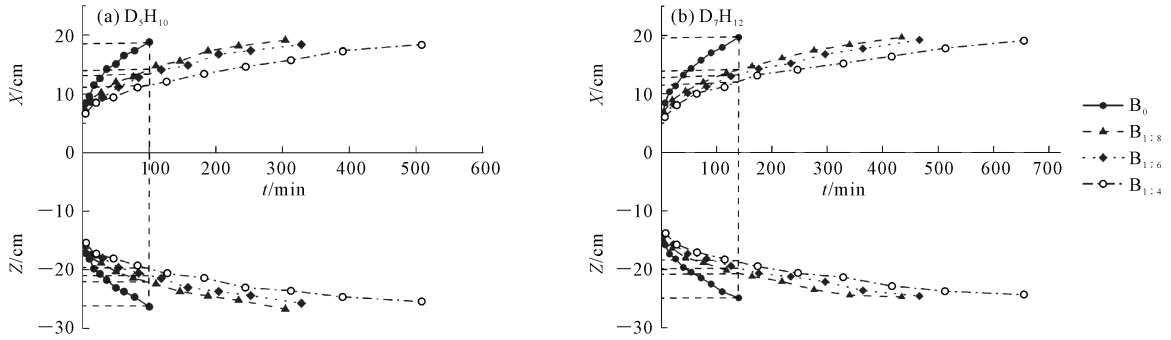


图 4 沼液配比对土壤湿润锋运移距离的影响

Fig.4 Effects of biogas slurry ratio on the soil wetting front migration distance

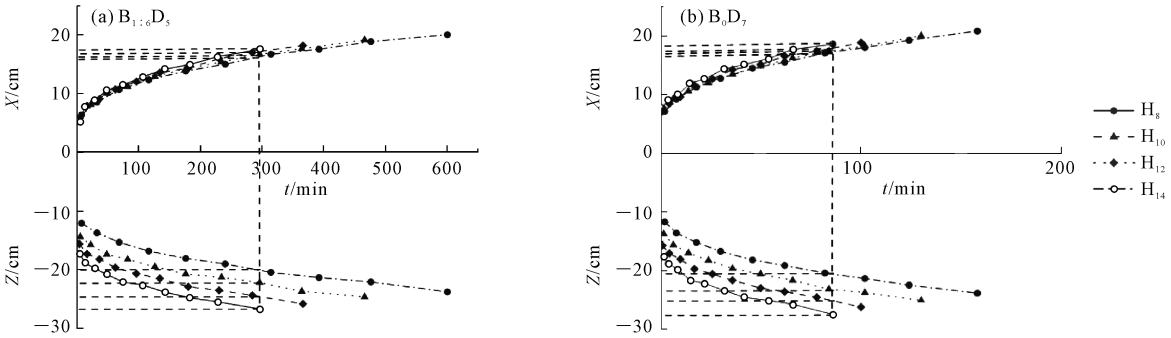


图 5 穴孔深度对土壤湿润锋运移距离的影响

Fig.5 Effects of hole depth on soil wetting front migration distance

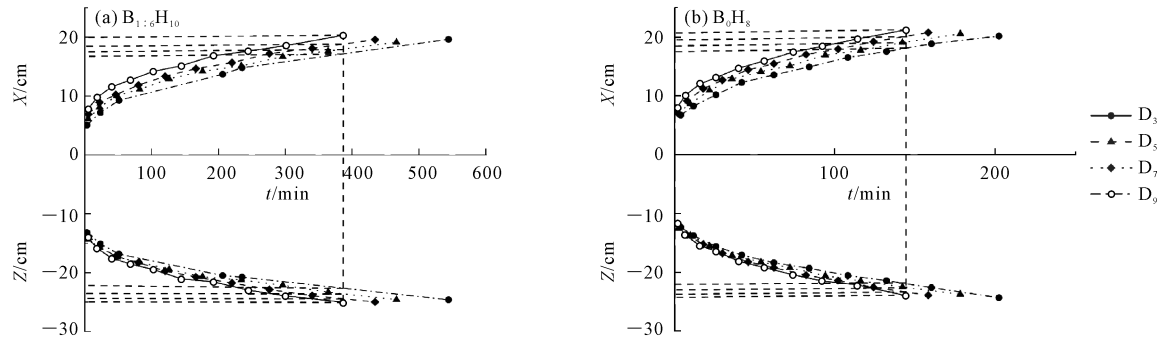


图 6 穴孔直径对土壤湿润锋运移距离的影响

Fig.6 Effects of hole diameter on soil wetting front migration distance

增大 35.03%、25.38%和 12.23%;图 5b 中入渗时间为 86 min 时,H_{14}、H_{12}和 H_{10}的 X 较 H_8分别增大 8.37%、4.65%和 3.48%,Z 分别增大34.14%、21.95%和 12.19%。表明相同时间的土壤湿润锋运移距离随着穴孔深度的增大而不断增大,且穴孔深度对垂向湿润锋运移距离的影响较横向湿润锋运移距离显著,这是因为随着穴孔深度的增大,穴孔内水头不断增大,侧向压力势和重力势也随之增大,且穴孔侧壁面积不断增加,水分入渗的通道随之增多,因而土壤湿润锋运移距离也不断增加,且垂向湿润锋运移距离在入渗开始的瞬时由零增至穴孔深度,穴孔深度越大,则垂向湿润锋运移距离越大。因此,穴孔直径和深度对土壤湿润锋运移距离均有较大影响,也是穴灌系统中非常重要的技术参数。

2.4 沼液穴灌湿润锋运移模型建立与评价

2.4.1 *沼液穴灌湿润锋运移模型建立* 通过数值模拟分析沼液穴灌土壤湿润锋运移距离的影响因素可知,沼液配比、穴孔直径、穴孔深度和灌水时间均会对土壤湿润锋垂向运移距离和横向运移距离产生影响,是灌溉系统设计中不容忽视的主导因素。为进一步揭示不同情景湿润锋运移距离与灌水时间的关系,建立二者之间的幂函数关系:

$$\begin{cases} X = at^b \\ Z = ct^d \end{cases} \tag{4}$$

对于 64 组沼液穴灌土壤湿润锋运移距离的拟合,其决定系数 R^2>0.977,达到极显著水平,说明幂函数能够准确描述不同穴孔直径和深度条件下不同配比沼液穴灌土壤湿润锋运移距离与时间的关系。分析发现,不同情景的拟合参数 b 和 d 的数值变化较小且无明显规律,b = 0.2082 ~ 0.2967,d = 0.0972~0.1688,为简化计算,分别取 64 组 b 和 d 的平均值,即 b=0.24 和 d=0.124。将确定的 b 和 d 代入式(4)可得:

$$\begin{cases} X = at^{0.24} \\ Z = ct^{0.124} \end{cases} \tag{5}$$

利用式(5)再次对 HYDRUS-2D 模拟结果进行拟合,获得参数 a 和 c,$R^2 \geq 0.947$, 说明将拟合参数 b 和 d 取平均值来简化模型可行。分析发现,不同情景下 a 和 c 的数值差异很大,但与稳渗率 f_0 存在良好的幂函数关系($R^2 \geq 0.971$),如图 7 所示。

由图 7 可知,a 和 c 均随着 f_0 的增大而增大,其幂函数关系可表示为:

$$a = 4.442 f_0^{0.375} \tag{6}$$

$$c = 11.998 f_0^{0.287} \tag{7}$$

将 a、c 分别带入式(5)可得:

$$\begin{cases} X = 4.442 f_0^{0.375} t^{0.24} \\ Z = 11.988 f_0^{0.287} t^{0.124} \end{cases} \tag{8}$$

式(8)仅包含了 f_0 这一待定参数,因此,如何确定 f_0 是准确估算湿润锋运移距离的关键。分析发现 f_0 与 D 和 H 符合关系:

$$f_0 = eD^f \tag{9}$$

$$f_0 = gH^h \tag{10}$$

根据表 2、3 呈现的拟合数据分析,各情景下构建的回归模型均展现出优异的拟合效果,其决定系

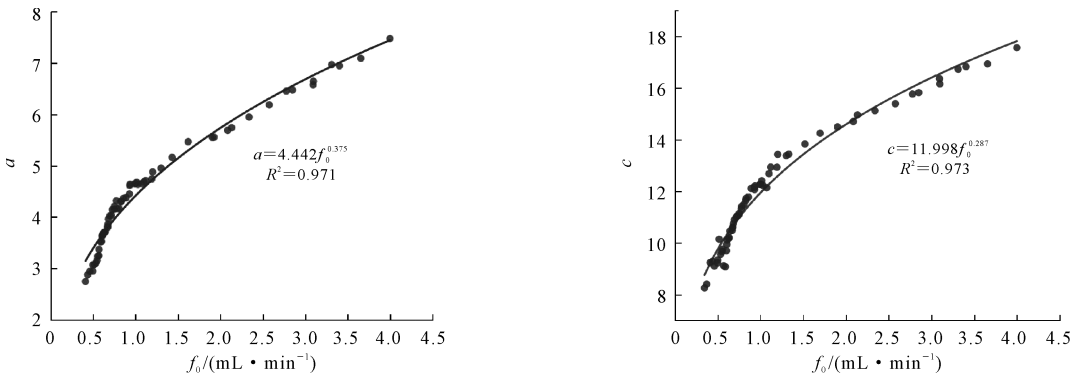


图 7　入渗参数 a 和 c 与稳渗率 f_0 关系曲线

Fig.7　Relationship curves between infiltration parameters a and c and steady infiltration rate f_0

表 2　稳定入渗率与穴孔直径的拟合参数

Table 2　Fitting parameters of stable infiltration rate and hole diameter

沼液配比 Ratio of biogas slurry	H/cm	e	f	R^2
0	8	1.2913	0.2547	0.9900
	10	1.5836	0.2474	0.9838
	12	1.9880	0.2283	0.9950
	14	2.3843	0.2266	0.9889
1∶8	8	0.4024	0.2595	0.9873
	10	0.5051	0.2447	0.9870
	12	0.6363	0.2321	0.9971
	14	0.7847	0.2205	0.9815
1∶6	8	0.3791	0.2576	0.9857
	10	0.4708	0.2440	0.9877
	12	0.5917	0.2309	0.9969
	14	0.7135	0.2270	0.9811
1∶4	8	0.3152	0.2092	0.9882
	10	0.3502	0.2196	0.9899
	12	0.3783	0.2334	0.9971
	14	0.4707	0.2183	0.9887

表 3　稳定入渗率与穴孔深度的拟合参数

Table 3　Fitting parameters of stable infiltration rate and hole depth

沼液配比 Ratio of biogas slurry	D/cm	g	h	R^2
0	3	0.1947	1.0418	0.9951
	5	0.2223	1.0283	0.9957
	7	0.2738	0.9766	0.9940
	9	0.2855	0.9926	0.9944
1∶8	3	0.0531	1.1088	0.9947
	5	0.0591	1.1073	0.9961
	7	0.0751	1.0403	0.9917
	9	0.0808	1.0444	0.9951
1∶6	3	0.0546	1.0661	0.9951
	5	0.0601	1.0687	0.9961
	7	0.0756	1.0075	0.9906
	9	0.0804	1.0154	0.9942
1∶4	3	0.0544	1.0045	0.9908
	5	0.0572	1.0173	0.9867
	7	0.0639	0.9942	0.9881
	9	0.0644	1.0045	0.9908

数 R^2 均在 0.98 以上,这一统计结果在统计学意义上具有高度显著性,且不同情景的拟合参数 f 和 h 的数值变化较小且无明显规律,$f=0.2092\sim0.2594$,$h=0.9926\sim1.1088$,为简化计算,分别取 f 和 h 的平均数,即 $f=0.236$ 和 $h=1.042$。据此,提出 f_0 与 D 和 H 的函数关系为:

$$f_0 = kD^{0.236}H^{1.042} \tag{11}$$

用式(11)再次对 HYDRUS-2D 模拟结果进行拟合,如图 8 所示,发现对于任一配比沼液,f 和 h 统一取 0.236 和 1.042 是可靠的($R^2\geqslant0.99$),而 k 与不同沼液配比处理的饱和导水率 K_s 呈幂函数关系,如图 9 所示,拟合方程的决定系数 $R^2\geqslant0.99$,说明该函数能准确描述 K_s 与拟合参数 k 的关系。

基于此,最终可构建出沼液穴灌土壤湿润锋运移模型:

$$\begin{cases} X = 4.442f_0^{0.375}t^{0.24} \\ Z = 11.988f_0^{0.287}t^{0.124} \\ f_0 = 96.947K_s^{1.151}D^{0.236}H^{1.042} \end{cases} \tag{12}$$

式(12)仅含一个待定参数 K_s,其值与沼液配比和土壤质地有关,需用定水头法或变水头法测得。

2.4.2 *沼液穴灌土壤湿润锋运移模型评价* 对 H_5D_3、H_5D_5、H_5D_7 处理中不同沼液配比湿润锋运移距离模型进行评价验证(图 10)。不同参数组下模型计算结果的统计指标如表 4 所示,发现 *NSE* = 0.9763 ~ 0.9996、*RMSE* = 0.0010 ~ 0.1264、*PBIAS* = −0.2235 ~ 0.0087、*MAE* = 0.3196 ~ 0.6611,表明模型可靠性良好,可以用于预测不同配比沼液穴灌土壤湿润锋运移距离。

2.5 沼液穴灌土壤累积入渗量模型建立与评价

2.5.1 *沼液穴灌土壤累积入渗量模型建立* 图 11 为 $B_0D_5H_{10}$ 和 $B_{1:6}D_3H_{12}$ 中湿润锋随时间的变化过程。可以看出,随着时间的延长,湿润锋持续推进,不同时间下,湿润锋的曲线形状都接近于椭圆曲线。

为进一步确定湿润锋与椭圆曲线的拟合程度,对两组试验结果进行相关性分析,结果如表 5 所示。分析发现,两组试验在不同时间的决定系数 R^2 = 0.9566 ~ 0.9961,说明拟合较好,可以用椭圆方程表示土壤湿润锋形状。与此同时,为验证湿润锋曲线可用椭圆方程表示的普适性,对所有模拟情景的结果进行分析,发现其在各入渗时刻均与椭圆曲线高度吻合($R^2\geqslant0.90$)。则湿润体面积可由椭圆面积减去穴孔面积得出,即表示为:

$$S = \pi XZ - \frac{1}{2}DH \tag{13}$$

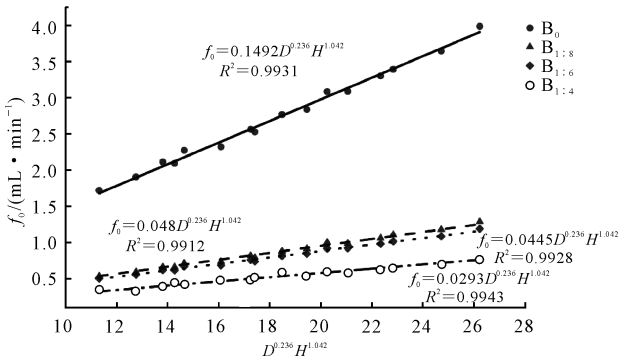


图 8 f_0 与 $D^{0.236}H^{1.042}$ 关系曲线

Fig.8 Relationship between f_0 and $D^{0.236}H^{1.042}$

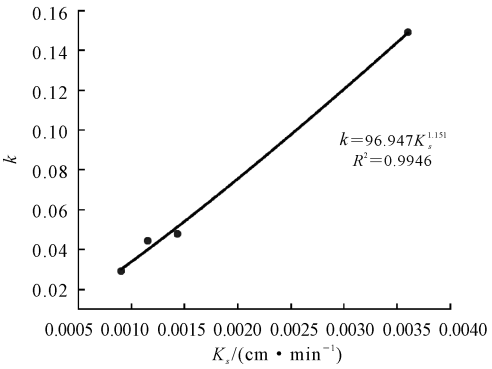


图 9 k 与 K_s 关系曲线

Fig.9 Relationship between k and K_s

表 4 湿润锋运移距离计算值与实测值的对比评价指标

Table 4 Comparative evaluation index of calculated and measured values of wetting front migration distance

D/cm	*NSE*	*RMSE*	*PBIAS*	*MAE*
3	0.9992	0.0281	−0.2376	0.3196
5	0.9996	0.0010	0.0087	0.4667
7	0.9763	0.1264	−0.2235	0.6611

表 5 湿润锋与椭圆曲线的决定系数

Table 5 Determination coefficient of wetting front and elliptic curve

时间 Time/min	$B_0D_5H_{10}$	时间 Time/min	$B_{1:6}D_3H_{12}$
7	0.9566	20	0.9926
26	0.9891	74	0.9890
54	0.9950	158	0.9961
90	0.9919	264	0.9880
140	0.9961	416	0.9900

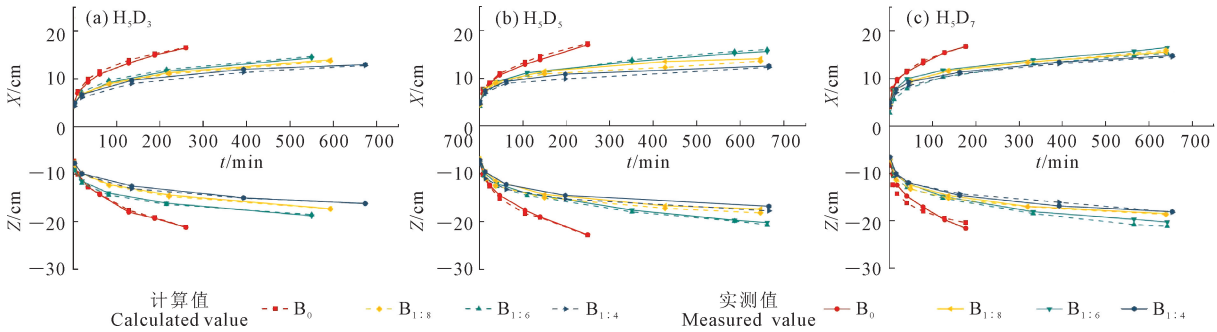


图 10　湿润锋运移距离模型验证

Fig.10　Verification of soil wetting front migration distance model

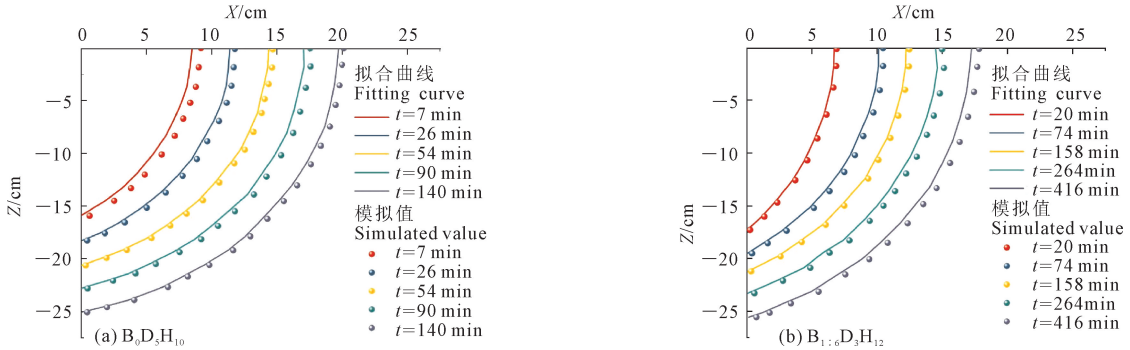


图 11　湿润锋与椭圆曲线拟合图

Fig.11　Wetting front and elliptic curve fitting diagram

将 $K_s=0.0036$ cm · min^{-1}、$D=5$ cm、$H=10$ cm 和 $K_s=0.00105$ cm · min^{-1}、$D=3$ cm、$H=12$ cm 分别带入到式(12)和式(13),可得到土壤湿润体面积随时间的变化关系,并对湿润体面积和土壤累积入渗量在 $B_0D_5H_{10}$ 和 $B_{1:6}D_3H_{12}$ 条件下的相关性进行分析(图 12),得出二者关系式:

$$I=\alpha S \tag{14}$$

利用式(14)对不同情景沼液穴灌土壤累积入渗量和湿润体面积进行拟合,发现其决定系数 R^2 均大于 0.972,达极显著水平,说明式(14)能够准确描述不同穴孔直径和深度条件下不同配比沼液穴灌土壤累积入渗量和湿润体面积的关系。进一步分析发现,不同情景的拟合参数 $\alpha=0.3291\sim0.3578$,数值变化较小,为简化计算,取其平均数,$\alpha=0.3365$,并代入式(14)可得:

$$I=0.3365S \tag{15}$$

2.5.2　沼液穴灌土壤累积入渗量模型评价　式(15)为穴孔灌溉土壤累积入渗量与湿润体面积的关系。在已知湿润锋水平和垂直迁移距离的情况下,可根据式(13)、(15)计算土壤累积入渗量。为了验证式(15)的准确性,对 $H=5$ cm、$H=8$ cm 条件下不同沼液配比的土壤累积入渗量进行评价,如表 6 所示,发现 $NSE=0.9817\sim0.9997$、$RMSE=0.2293\sim$

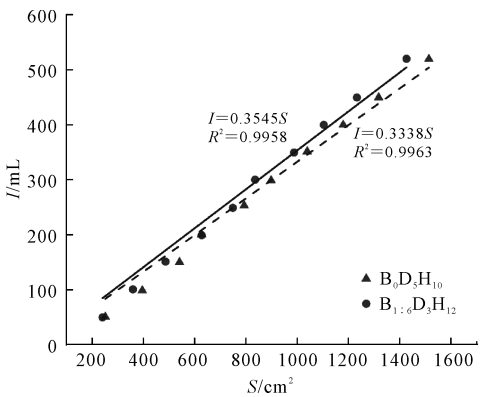


图 12　累积入渗量与湿润体面积关系曲线

Fig.12　Relationship curve between cumulative infiltration and wetted body area

表 6　累积入渗量计算值与实测值的对比评价指标

Table 6　Comparative evaluation index of cumulative infiltration calculated value and measured value

沼液配比 Ratio of biogas slurry	*NSE*	*RMSE*	*PBIAS*	*MAE*
B_0	0.9990	0.5913	0.0673	1.3087
$B_{1:8}$	0.9817	0.2293	−0.0262	1.3894
$B_{1:6}$	0.9993	0.8626	0.0982	1.3816
$B_{1:4}$	0.9997	0.8825	−0.1482	2.6522

0.8825、*PBIAS* = -0.0262 ~ 0.0982、*MAE* = 1.3087 ~ 2.6522,说明模型可靠性良好,适用于不同配比沼液穴灌土壤累积入渗量的预测。

Philip 模型[32]是目前应用最为广泛的线源入渗模型,然而该模型依赖于土壤入渗测试数据,在应用前需要进行大量的试验来确定相关参数。相比之下,公式(15)作为一种物理模型,仅需测量土壤的饱和导水率,即可直接计算出累积入渗量,这比传统的经验模型具有显著优势。此外,作物在生长期间根系的动态分布特征使得土壤湿体内的水分分布成为影响生长的关键因素。本研究提出的模型根据根系分布范围确定了适当的土壤湿润锋运移距离,从而能够准确计算出灌溉用水量,并确定沼液穴灌的孔径和深度。这种方法为精确沼液穴灌实践提供了理论基础。

2.6 局限性及未来展望

尽管本研究的焦点集中于沼液穴灌的精确灌溉技术,并得出了一些有价值的结论,但其局限性仍然值得关注。在模型验证方面,目前只是借助实验室入渗试验对模型的可行性做了初步评估,农田环境的复杂性和多变性使得模型在田间尺度的实际表现以及精确度有待验证,从试验条件而言,本研究是在干土条件下开展的,而实际土壤的初始含水量存在差异,这会对土壤湿润锋的移动距离和累积入渗量等关键参数产生影响。有必要研究不同初始土壤含水量下这些参数的变化规律,以此提升模型的实用性和可靠性,未来的研究方向可以从以下几个方面着手:(1)强化田间尺度的验证工作,全面评估模型在土壤异质性等复杂环境中的适应性;(2)进行田间试验,设计出能依据作物生长需求动态调整穴孔直径和深度的穴灌装置,让湿润体范围更符合作物根系的分布特征;(3)建立动态灌溉决策模型,综合考虑土壤水分状况和作物生长阶段等多种因素,实现湿润体与作物根系的精准匹配,为沼液穴灌技术的广泛应用提供支持。

3 结 论

1)构建的 HYDRUS 模型可准确地描述沼液穴灌的输水特性($NSE \geqslant 0.966$,$PBIAS \leqslant \pm 0.3$),拓展了 HYDRUS 模型的应用场景。

2)土壤累积入渗量和土壤湿润锋运移距离随着沼液配比的增大而逐渐减小,随着穴孔直径和深度的增大而逐渐增大。相同沼液配比条件下,稳渗率与穴孔直径和深度呈幂函数关系($R^2 \geqslant 0.98$),幂函数系数与土壤饱和导水率呈幂函数关系($R^2 \geqslant 0.99$);湿润锋横向和垂向运移距离均与稳定入渗率和入渗时间呈幂函数关系($R^2 \geqslant 0.947$)。

3)沼液穴灌形成的湿润锋曲线可以用椭圆曲线方程表示,其土壤累积入渗量与湿润体面积呈线性关系。

4)建立的沼液穴灌湿润锋运移模型和累积入渗量模型可靠性良好,能够较准确地描述沼液穴灌参数变化产生的影响。

参 考 文 献:

[1] INGRAO C, STRIPPOLI R, LAGIOIA G, et al. Water scarcity in agriculture: an overview of causes, impacts and approaches for reducing the risks[J]. Heliyon, 2023, 9(8): e18507.

[2] D'ODORICO P, CHIARELLI D D, ROSA L, et al. The global value of water in agriculture[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2020, 117(36): 21985-21993.

[3] WU Y, YAN S C, FAN J L, et al. Responses of growth, fruit yield, quality and water productivity of greenhouse tomato to deficit drip irrigation[J]. Scientia Horticulturae, 2021, 275: 109710.

[4] ZHENG J, QI X Y, SHI C, et al. Tomato comprehensive quality evaluation and irrigation mode optimization with biogas slurry based on the combined evaluation model[J]. Agronomy, 2022, 12(6): 1391.

[5] 宋英今, 王冠超, 李然, 等. 沼液处理方式及资源化研究进展[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 237-250.
SONG Y J, WANG G C, LI R, et al. Research progress of biogas slurry treatment and resource utilization[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(12): 237-250.

[6] TANG J, WANG W, PAN F F, et al. The effects of biogas slurry irrigation on aggregation and stability of fluvoaquic soil in Huang-Huai-Hai plain[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(2): 10-17.

[7] ZHENG J, MA J, FENG Z, et al. Effects of biogas slurry irrigation on tomato (*Solanum lycopersicum* L.) physiological and ecological indexes, yield and quality as well as soil environment[J]. Applied Ecology & Environmental Research, 2020, 18(1): 1013-1029.

[8] XIN X L, ZHANG J B, ZHU A N, et al. Effects of long-term (23 years) mineral fertilizer and compost application on physical properties of fluvoaquic soil in the north China plain[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 156: 166-172.

[9] NDUKA B A, OGUNLADE M O, ADENIYI D O, et al. The influence of organic manure and biochar on cashew seedling performance, soil properties and status[J]. Agricultural Sciences, 2019, 10(1): 110-120.

[10] YAGÜE M R, DOMINGO-OLIVÉ F, BOSCH - SERRA À D, et al. Dairy cattle manure effects on soil quality: porosity, earthworms, aggregates and soil organic carbon fractions[J]. Land Degradation & Development, 2016, 27(7): 1753-1762.

[11] IBRAHIM A, USMAN A R A, AL-WABEL M I, et al. Effects of conocarpus biochar on hydraulic properties of calcareous sandy soil:

influence of particle size and application depth[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2017, 63(2): 185-197.

[12] ZHAO Z C, ZHAO S F, WANG Y Q, et al. Effect of biogas slurry on water footprint in cauliflower production [C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Chongqing, China: IOP, 2021: 012111.

[13] ZHANG X, ZHAO J, YUAN G, et al. Effects of repeated biogas slurry application on soil quality and bacterial community composition under wheat-rice rotation on a coastal reclaimed farmland[J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2021, 6: 13.

[14] ZENG W S, QIU J R, WANG D H, et al. Ultrafiltration concentrated biogas slurry can reduce the organic pollution of groundwater in fertigation[J]. Science of the Total Environment, 2022, 810: 151294.

[15] ZHENG J, LI X Y, ZHANG Y, et al. Effects of digestate application on tomato growth, yield, quality, and soil nitrogen content via integrated hole irrigation [J]. Journal of Biobased Materials and Bioenergy, 2019, 13(5): 620-634.

[16] PAN Z P, HOU J M, LI X Y, et al. A generalized Ross infiltration model and the application on hole irrigation based on the biconjugate gradient stabilized algorithm [J]. Advances in Water Resources, 2022, 163: 104181.

[17] ZHENG J, QI X Y, YANG S H, et al. Effects and evaluation of biogas slurry/water integrated irrigation technology on the growth, yield and quality of tomatoes[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2022, 15(5): 123-131.

[18] TAJIMA R. Importance of individual root traits to understand crop root system in agronomic and environmental contexts[J]. Breeding Science, 2021, 71(1): 13-19.

[19] 郑健, 周鹏杰, 张彦宁, 等. 沼液穴灌入渗影响因素分析及数值模拟研究[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(6): 13-20.
ZHENG J, ZHOU P J, ZHANG Y N, et al. Analysis and numerical simulation of factors influencing the hole application infiltration of biogas slurry[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(6): 13-20.

[20] NIE W B, NIE K K, LI Y B, et al. HYDRUS-2D simulations of nitrate nitrogen and potassium transport characteristics under fertilizer solution infiltration of furrow irrigation[J]. Water Supply, 2021, 21(6): 2665-2680.

[21] SUN X Y, TONG J X, LIU C, et al. Using HYDRUS-2D model to simulate the water flow and nitrogen transport in a paddy field with traditional flooded irrigation[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2022, 29(22): 32894-32912.

[22] SHANG L, LI D F. Comparison of different approaches for estimating soil water characteristic curves from saturation to oven dryness[J]. Journal of Hydrology, 2019, 577: 123971.

[23] JURY W A, HORTON R. Soil physics[M]. 6th ed, Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2004.

[24] 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.
ZHAO W X. Research on the water transport law and water saving and yield increasing mechanism of non pressure underground irrigation and indirect drip irrigation[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2009.

[25] 孙佳星. 沼液在土壤中扩散规律模拟研究[D]. 黑龙江: 东北石油大学, 2022.
SUN J X. Simulation study on diffusion law of biogas slurry in soil [D]. Heilongjiang: Northeast Petroleum University, 2022.

[26] 钟韵, 费良军, 朱士江, 等. 浑水特性对膜孔灌土壤颗粒组成及分形特征的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023, (1): 184-190.
ZHONG Y, FEI L J, ZHU S J, et al. Effects of muddy water characteristics on soil particle composition and fractal characteristics under film hole irrigation[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2023, (1): 184-190.

[27] CHEN W W, JIA Q Q, LIU P, et al. Determining the unsaturated hydraulic conductivity of remoulded loess with filter paper method and soil column seepage test[J]. Environmental Earth Sciences, 2021, 80(24): 808.

[28] DREWRY J J, CARRICK S, PENNY V, et al. Effect of irrigation on soil physical properties on temperate pastoral farms: a regional New Zealand study[J]. Soil Research, 2022, 60(8): 760-771.

[29] ASSOULINE S. A simple method to design irrigation rate and duration and improve water use efficiency[J]. Water Resources Research, 2019, 55(7): 6295-6301.

[30] LU Y Z, LIU P F, MONTAZAR A, et al. Soil water infiltration model for sprinkler irrigation control strategy: a case for tea plantation in Yangtze river region[J]. Agriculture, 2019, 9(10): 206.

[31] 郑健, 殷李高, 朱传远, 等. 施用沼液对设施番茄生长与土壤生态环境的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 278-288.
ZHENG J, YIN L G, ZHU C Y, et al. Effects of digestate on tomato growth and soil ecological environment in greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 278-288.

[32] FAN Y W, GONG J G, WANG Y, et al. Application of philip infiltration model to film hole irrigation[J]. Water Supply, 2019, 19(3): 978-985.