

沼液穴灌入渗特征及 Philip 入渗模型拟合

郑 健^{1,2,3}, 张彦宁^{1,2,3}, 王 燕^{2,3}, 张恩继^{1,2,3}

(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)

摘 要:为探求沼液穴灌条件下土壤入渗特征及适宜入渗模型, 通过室内试验研究了沼液配比(沼液:水, 体积比, 1:4、1:6、1:8 及纯水)、穴孔直径(3、5、7 cm)和土壤容重(1.35、1.45 g·cm⁻³)对土壤入渗特征的影响, 利用数理统计方法分析影响沼液穴灌入渗的因素和湿润体变化规律, 同时应用 Philip 入渗模型对沼液穴灌累积入渗量进行了拟合分析。结果表明:沼液穴灌累积入渗量均随沼液配比和土壤容重的增大而降低, 随着穴孔直径的增加而增大, 当入渗历时 180 min 时, 土壤容重 1.35 g·cm⁻³ 和 1.45 g·cm⁻³ 的 CK 处理累积入渗量分别是沼液配比为 1:4、1:6、1:8 处理的 3.62、3.12、2.77 倍和 3.47、2.64、2.16 倍;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的椭球体, 土壤容重 1.35 g·cm⁻³ 和 1.45 g·cm⁻³ 对应各穴孔直径(3、5、7 cm)的垂向最大湿润距离(V)与水平最大湿润距离(H)的比值(V/H)分别为 0.929、1.081、1.111 和 0.957、1.048、1.064;幂函数能够准确描述湿润锋最大湿润距离与时间的函数关系;建立的多元线性方程能够较好描述累积入渗量与土壤容重、穴孔直径和沼液配比的关系, 偏回归系数检验均达到显著或极显著水平;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, 决定系数(R^2)在 0.98 以上;Philip 入渗模型中的土壤吸渗率(S)随穴孔直径的增大而增加, 随沼液配比和土壤容重的增加而降低;土壤稳定入渗率(A)为负值与沼液的粘性及所含有的有机悬浮颗粒有关。基于以上分析, 在农业生产中建议实施方案为:土壤容重 1.35 g·cm⁻³、穴孔直径 5 cm、沼液配比 1:6 和土壤容重 1.45 g·cm⁻³、穴孔直径 7 cm、沼液配比 1:8。

关键词:沼液穴灌;累积入渗量;湿润体;Philip 入渗模型

中图分类号:S152.7⁺2;S141 **文献标志码:**A

Infiltration characteristics and Philip model fitting analysis of biogas slurry hole-irrigation

ZHENG Jian^{1,2,3}, ZHANG Yan-ning^{1,2,3}, WANG Yan^{2,3}, ZHANG En-ji^{1,2,3}

(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)

Abstract: Biogas slurry hole-irrigation technology is a kind of on going integration of water-biogas slurry irrigation method, to explore the soil infiltration characteristics and suitable infiltration model of the conditions of biogas slurry hole-irrigation, effects of biogas slurry ratio(the volume ratios of digestate to water were: 1:4, 1:6 and 1:8), hole diameter(3, 5 and 7 cm), and soil bulk density(1.35, 1.45 g·cm⁻³) on the soil infiltration characteristics were analyzed through laboratory experiments, and impact factors of infiltration and wetted body under the biogas slurry hole-irrigation were analyzed with the mathematical statistics method. At the same time, using Philip infiltration model analyzed the biogas slurry hole-irrigation cumulative infiltration. The results showed that the cumulative infiltration volume increased with decreasing biogas slurry:water ratio and soil bulk density but increased with increasing the hole diameter. After the infiltration lasted for 180 min, the cumulative infiltration volume in CK treat-

收稿日期:2017-11-08

修回日期:2018-03-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51509122, 51369014);甘肃省高等学校科技成果转化项目(2018D-04);甘肃省自然科学基金(18JR3RA154);2018 年杨凌示范区产学研用协同创新重大项目计划(2018CXY-14)

作者简介:郑健(1981-),男,甘肃会宁人,博士,副教授,主要从事农业水土工程方面的研究。E-mail:zhj16822@126.com

ment were 3.62, 3.12, 2.77 times and 3.47, 2.64, 2.16 times compared to the digestate treatments of 1 : 4, 1 : 6 and 1 : 8 at the soil bulk density of $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ and $1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. The shape of the wetting body is an ellipsoid, which changes gradually with increasing the hole diameter, from greater horizontal axis to greater vertical axis. The ratios of horizontal to vertical axis (V/H) were 0.929, 1.081, 1.111 and 0.957, 1.048, 1.064 when the hole diameter were 3, 5 cm and 7 cm at the soil bulk density of $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ and $1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. The power function can be used to accurately describe the functional relationship between the maximum wetting distance and time. Meanwhile, the relationship between the cumulative infiltration volume and the soil bulk density, hole diameter, and the biogas slurry ratio can be modeled by the established multiple linear equation perfectly, and the partial regression coefficient test was at significant or very significant level. Philip infiltration model can accurately describe the relationship between the cumulative infiltration and time with a decision coefficient R above 0.98. For the Philip infiltration model, the soil infiltration rate S increased with increasing hole diameter, however, the S decreased with increasing biogas slurry ratio and soil bulk density, the soil stable infiltration rate A with the biogas slurry viscosity and the suspended particles contained in the biogas slurry related. It is suggested that the optimal ratio of biogas liquid, hole diameter, and soil bulk density in agricultural production are $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 5 cm, 1 : 6 and $1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 7 cm, 1 : 8, respectively.

Keywords: biogas slurry hole-irrigation; cumulative infiltration volume; wetted body; Philip infiltration model

我国在“十二五”规划期间,户用沼气和规模化沼气工程发展迅速,利用生物质能已经是我国村镇能源建设的主要方向之一。截止 2015 年底,我国已有 5000 多万口户用沼气池^[1]。但沼气的生产伴随着沼液的产生,大量沼液的随意排放,必然会对环境造成危害。中国农业部于 2015 年印发的《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》^[2]中提倡采用有机肥替代化肥,而沼液是一种含有水溶性及多种养分的速效有机肥,更易于植物吸收利用^[3]。国内外相关研究也多集中于沼液灌溉对作物产量^[4-6]及品质^[7-9]、地下水水质^[10]、土壤中重金属累积^[11-12]以及土壤肥力^[13-15]的提高等方面,而对于沼液土壤入渗机理的基础性研究鲜见报道。课题组在调研过程中发现农民灌溉施用的沼液粘性较纯水高且含有一定量的有机悬浮颗粒,而研究表明沼液中的有机悬浮颗粒有利于土壤环境改善^[16-17],但从土壤入渗角度分析液体的粘性^[18]和颗粒含量均会对土壤入渗特性产生不可忽略的影响^[19-21]。因此,为使沼液在农田中更科学、合理的应用,有必要针对沼液特点开展入渗特征研究。

沼液穴灌技术是农民在设施农业生产中总结的一种节水、节肥技术,具有简单、低成本、易操作的特点,现在已经成为农村沼液应用的最主要方式之一。但目前该技术的实施主要根据经验,对其相关的试验研究和理论分析还少见报道。基于此,本文以沼液穴灌技术为基础,通过室内试验研究分析沼液配比、穴孔直径和土壤容重对土壤入渗特征的影响,利用数理统计方法分析影响沼液穴灌入渗的

因素和湿润体变化规律,同时应用具有明确物理意义的 Philip 入渗模型对沼液穴灌累积入渗量进行拟合分析。以期获得合理的沼液穴灌技术参数提供理论支撑,解决水/沼液一体穴灌技术在实际应用中遇到的问题。

1 材料与方法

1.1 试验材料及装置

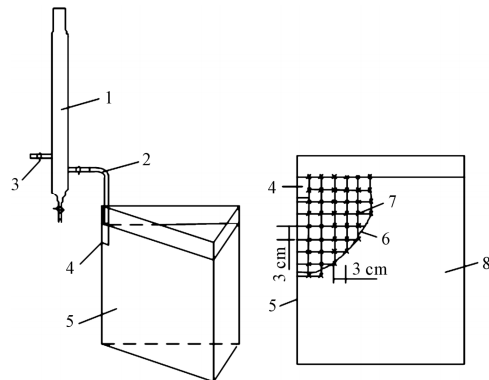
试验土壤取自甘肃省兰州市周边正常使用的温室大棚表层 0~40 cm 的土壤,经过自然风干、粉碎后,过 2 mm 孔径的土壤筛备用,土壤颗粒级配见表 1,按照中国土壤分类标准其土壤类型为粉质壤土,田间持水量为 22.23% (质量含水率)。沼液取自正常使用的户用沼气池,原料以牛粪和麦秸为主,发酵物总固体质量分数(TS)为 8%,经曝气静置 2 个月,待其理化性质稳定后,用纱布过滤掉沼液中较大的颗粒备用。试验装置主要由土箱和马氏瓶组成,如图 1 所示。土箱为 30°扇形有机玻璃装置,高和宽分别为 50 cm 和 40 cm,马氏瓶用来提供恒定水头,容量 520 mL。

1.2 试验设计

试验设置土壤容重、沼液浓度和穴孔直径 3 个控制因素。土壤容重为 $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,依据前期预试验结果,设置 4 个沼液与水的配比(沼液:水,体积比),分别为 1 : 4、1 : 6、1 : 8 和纯水(CK),3 个穴孔直径,分别为 3、5 cm 和 7 cm,设定孔深为 5 cm。每组试验设置两组重复,共计 72 组试验,取平均值作为试验结果。

1.3 试验方法

1.3.1 沼液理化性质 试验开始前测定不同配比的理化性质,采用电导率仪(雷磁 DDS-11A)测定不同浓度沼液的电导率值;利用烘干称量法测量不同浓度沼液中的干物质质量;利用奥氏粘度计测定不同浓度沼液的相对粘度;全氮含量采用凯式定氮法测定;硝态氮含量采用紫外分光光度计测定^[22];铵态氮采用纳氏试剂比色法测定^[22]。测定结果见表 2。



1. 马氏瓶;2. 进水管;3. 排气管;4. 穴孔;
5. 土槽;6. 湿润峰;7. 取样点;8. 土体
1. martensitic bottle;2. inlet pipe;3. exhaust pipe;4. soil hole;
5. soil bin;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

1.3.2 穴灌试验 试验土体采用分层填装(每层 5 cm),依据土壤容重计算每层装土质量,用电子秤(感量为 0.01 g)称量;按设定沼液与水的配比装入马氏瓶,用乳胶软管将马氏瓶出水孔与试验土槽连接。为方便在试验中记录数据,根据实际穴灌湿润体的形状,在土槽边壁绘制间距 5 cm 的网格线。然后,同时打开马氏瓶出水孔和排气孔阀门,当沼液进入穴孔时开始计时,随着试验的进行,当湿润峰运移到与水平或者垂向的网格线相切时(网格密度 5 cm×5 cm),记录一次入渗时间和累积入渗量,并用记号笔在土槽边壁上绘制湿润锋运移曲线。当入渗量达到 520 ml(马氏瓶最大容量)或者入渗时间达到 10 h 以上时,关闭马氏瓶的进水孔和排气孔阀门,待穴孔内沼液入渗完,试验结束,立即取土样测定土壤质量含水率。

表 1 土壤颗粒级配

Table 1 Soil particles distribution

项目 Item	粒径 Particle size/mm					
	<2.000	<1.000	<0.500	<0.250	<0.100	<0.075 <0.005
质量分数 Mass fraction /%	100	99.995	99.93	99.885	99.789	99.764 3

表 2 不同配比沼液理化性质

Table 2 Physical-chemical properties of different ratios of biogas slurry

沼液配比 Ratio of biogas slurry	电导率值 Conductivity value /($\text{ms} \cdot \text{cm}^{-1}$)	干物质质量 Dry matter quantity/%	密度 Density /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	粘度 Viscosity /($\times 10^{-3} \text{P} \cdot \text{s}$)	全氮 Total nitrogen /($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	硝态氮 Nitrate nitrogen /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	铵态氮 Ammonium nitrogen /($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)
CK	/	/	0.9890	0.8937	/	/	/
1:0	17.71	1.39	1.0020	1.8690	2.43	173.82	50.39
1:1	10.39	0.71	0.9956	1.2793	1.35	77.92	31.35
1:2	7.24	0.46	0.9938	1.1350	1.08	54.65	24.99
1:4	4.57	0.28	0.9922	1.0343	0.38	25.73	16.94
1:6	3.44	0.21	0.9917	0.9942	0.26	18.96	13.02
1:8	2.74	0.16	0.9914	0.9741	0.18	13.26	8.68

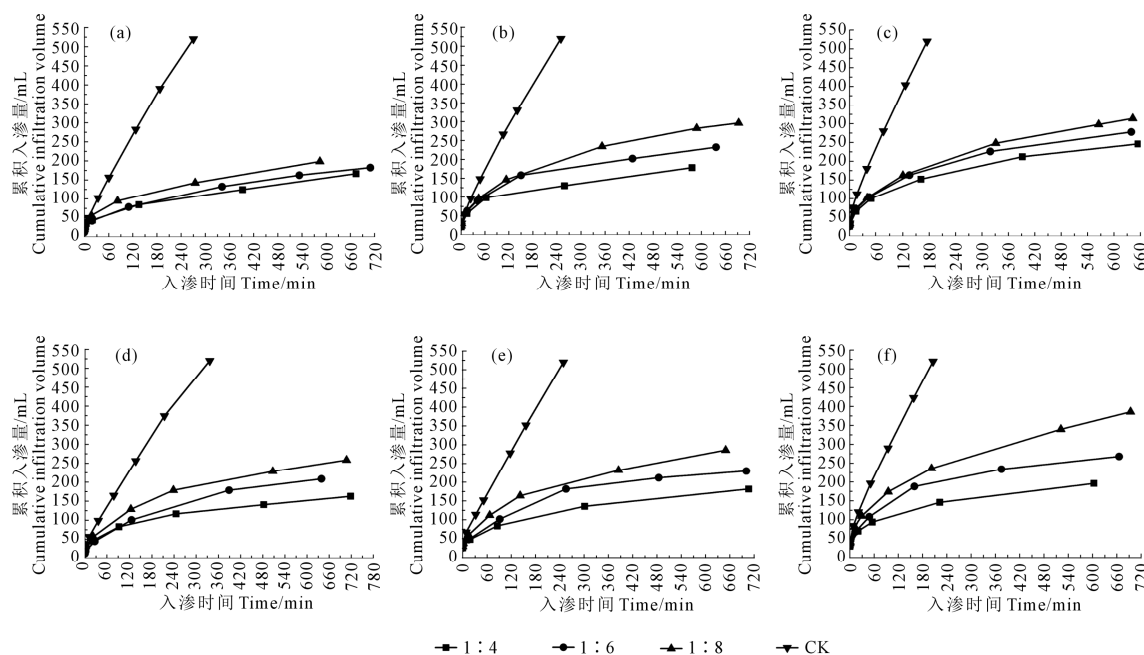
2 结果与分析

2.1 沼液穴灌土壤入渗规律

2.1.1 累积入渗量变化规律 由图 2 可以看出,不同试验处理的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,其中 CK 处理累积入渗量增加幅度明显大于沼液处理。相同土壤容重及沼液配比条件下累积入渗量随着穴孔直径的增加而增大。在相同土壤容重及穴孔直径条件下累积入渗量随着沼液配比的降低而增大。当入渗历时 180 min 时,容重为 $1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的 CK 处理累积入渗量分别是沼液配比为 1:4、1:6、1:8 处理的 3.47、2.64、2.16 倍;容重为

$1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的 CK 处理累积入渗量分别是浓度为 1:4、1:6、1:8 处理的 3.62、3.12、2.77 倍。

初步分析产生的原因为:(1)在入渗初始阶段,表层土壤干燥,含水率较低,土壤基质势较大,基质吸附力起主要作用,另一方面,由于表层土壤存在相互连通的大孔隙和传导孔隙^[23],水分入渗的气相阻力较低,其毛管作用也较为明显,故初始累积入渗量增加较快,随着入渗试验的进行,土壤的含水率逐渐增加,土壤表层水分饱和层也逐渐加厚,土壤基质的吸力梯度逐渐减弱,加上通气孔隙的减少,气相阻力逐渐增大,毛管作用随之降低,入渗速率也逐渐降低,当入渗进行到一定时间后,土壤基质的吸力梯度和毛管作用趋于零,在重力作用下,入



注: a. 土壤容重 $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 孔径 3 cm; b. 土壤容重 $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 孔径 5 cm; c. 土壤容重 $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 孔径 7 cm; d. 土壤容重 $1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 孔径 3 cm; e. 土壤容重 $1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 孔径 5 cm; f. 土壤容重 $1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 孔径 7 cm。

Note: a. soil bulk density $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, hole diameter 3 cm; b. soil bulk density $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, hole diameter 5 cm; c. soil bulk density $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, hole diameter 7 cm; d. soil bulk density $1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, hole diameter 3 cm; e. soil bulk density $1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, hole diameter 5 cm; f. soil bulk density $1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, hole diameter 7 cm.

图2 不同处理对沼液累积入渗量的影响

Fig.2 The influence of different treatment on the cumulative infiltration volume of biogas slurry

渗速率会维持在一个较为稳定的水平上^[24-25]。

(2)穴灌过程中,累积入渗量受到土壤基质势作用影响,同时重力势的影响也不可忽略。随着穴孔直径的增加,重力势的作用越显著,在入渗过程中,土壤基质势作用逐渐降低,重力势起主导作用,致使累积入渗量随着穴孔直径的增加呈递增趋势。

(3)沼液入渗过程中,沼液中的有机悬浮颗粒在土壤的表层沉积,形成沉积层,与CK处理相比,该沉积层改变了穴灌入渗的边界条件,起到了阻渗作用,并且随着沼液中有机悬浮颗粒含量的增加阻渗作用越明显。同时,由于液体在土体中的流动速度慢,土壤孔隙小(当土壤容重为 $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时,当量孔径 0.03 mm 以上占 10.26%、0.03~0.0038 mm 占 16.50%、0.0038~0.0004 mm 占 7.7%,而 0.0004 mm 以下占 64.54%^[26]),液体在土壤中的流态为层流,而层流状态下液体的粘性会增加液体运动的阻力^[18]。

2.1.2 累积入渗量影响因素分析 为进一步阐明不同土壤容重、穴孔直径和沼液配比与累积入渗量之间的关系,应用数理统计方法建立了累积入渗量(I_t)与土壤容重(x_1)、穴孔直径(x_2)和沼液配比(x_3)间的经验模型,并对其偏回归系数值进行了检验。回归分析及方程检验结果如式(1)所示。

$$I_t = -71.67x_1^* + 16.06x_2^{**} - 1368.78x_3^{**} - 312.92$$

$$R^2 = 0.91 \quad (P < 0.05) \quad (1)$$

式中, I_t 为累积入渗量, x_1 为土壤容重, x_2 为穴孔直径, x_3 为沼液配比,*为 $P = 0.05$ 水平上差异显著,**为 $P = 0.01$ 水平上差异显著。

由式1可以看出,累积入渗量与土壤容重、穴孔直径和沼液配比回归方程的决定系数(R^2)值达到了0.91,各影响因子 t 检验分别为 0.40、2.94、-13.86,均到达了显著和极显著水平, P 检验均小于0.05。表明该回归方程拟合度较高,适应性较好。回归方程中累积入渗量与土壤容重、穴孔直径和沼液配比的偏回归系数检验均达到显著或极显著水平,即土壤容重、穴孔直径和沼液配比的变化均会对累积入渗量产生影响。

从回归方程各因素的拟合系数分析,穴孔直径与累积入渗量呈正相关,土壤容重、沼液配比与累积入渗量呈负相关,即随穴孔直径增加累积入渗量呈逐渐增大趋势,而随土壤容重、沼液配比的增加累积入渗量呈逐渐减小趋势。从系数值的大小来看,试验中沼液穴灌受沼液配比的影响最大,土壤容重次之,穴孔直径最小。因此,沼液穴灌过程中,要充分考虑土壤容重、穴孔直径和沼液配比耦合作用对累积入渗量的影响。

2.2 沼液穴灌湿润体形状变化规律

以穴孔底部的水平直线为水平轴,穴孔侧壁与土壤接触面为垂直轴建立坐标系,量取实测不同处

理的水平最大湿润距离 (H) 和垂向最大湿润距离 (V), 并建立函数关系, 分析湿润体变化规律, 结果如表 3 所示。由表可知: 穴孔直径为 3 cm 时水平最大湿润距离大于垂向最大湿润距离, 穴孔直径为 5 cm 和 7 cm 时水平最大湿润距离小于垂向最大湿润距离, 且差异随穴孔直径的增加而增大, 表明随穴孔直径的增加, 湿润体形状会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的椭球体; 土壤容重为 $1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 各处理的湿润体水平最大湿润距离与垂向最大湿润距离差异明显小于土壤容重为 $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的各处理, 结果表明相同处理条件下土壤容重的增加会使湿润体趋向于球体。

形成上述规律的主要因为: (1) 入渗初期基质势作用是湿润锋运移的主要驱动力, 穴孔直径为 3 cm 时, 沼液与穴孔边壁的接触面积大于其底面积, 因而受到基质势的影响作用比穴孔直径为 5 cm 和 7 cm 时更大, 使得水平湿润距离大于垂向湿润距离。随穴孔直径的增加, 重力势作用逐渐大于基质势, 使湿润锋在水平方向上的运移速率逐渐小于垂直方向上的运移速率; (2) 同一质地土壤大孔隙比例均随土壤容重增大而递减^[27], 而土壤中大孔隙比例的降低减弱了压力势对土壤垂向入渗的影响。

2.3 沼液穴灌湿润锋运移拟合分析

穴灌入渗中水平最大湿润距离 (H) 与垂向最大湿润距离 (V) 呈线性关系 (见表 3), 为进一步分析穴灌条件下湿润锋运移与时间的关系, 将水平最大湿润距离 (H) 随时间的变化曲线采用 $y = mx^n$ 进行拟合, 结果如表 4 所示。拟合结果中各处理拟合指数 (n) 均小于 1, 说明当入渗时间趋于无穷大时, 单位时间湿润距离的增加速率逐渐减小并最终趋于稳定。拟合方程决定系数 (R^2) 均在 0.97 以上, 说明穴灌入渗时湿润锋的最大湿润距离与时间的函数关系可以用幂函数进行描述。

2.4 沼液穴灌 Philip 入渗模型拟合分析

Philip 入渗模型具有结构简单、参数少、物理意义明确的特点, 便于建立其特征参数与土壤物理特征间关系, 并在田间入渗试验资料中得到了很好的验证^[28]。因此, 本文采用 Philip 入渗模型对沼液穴

灌累积入渗量进行拟合分析。

Philip 入渗模型是根据垂直入渗的级数解获得的, 其累积入渗量可表示为^[29]:

$$I(t) = St^{0.5} + At$$

式中, $I(t)$ 为累积入渗量 (mL), t 为入渗时间 (min), S 为土壤吸渗率 ($\text{mL} \cdot \text{min}^{-0.5}$), A 为土壤稳定入渗率 ($\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$)。

分析 Philip 入渗模型拟合结果发现 (见表 5): (1) Philip 入渗模型中土壤稳定入渗率 (A) 在沼液处理中的值均为负值, CK 处理中均为正值, 且随着穴孔直径的增加而增大。(2) 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, 决定系数 R^2 均在 0.98 以上。(3) 土壤容重及沼液配比一定时, 土壤吸渗率 (S) 随穴孔直径的增大而增加; 土壤容重及穴孔直径一定时, 土壤吸渗率 (S) 随沼液配比的降低而增加, 即 $1:4 < 1:6 < 1:8 < \text{CK}$; 不同土壤容重处理, 土壤吸渗率 (S) 呈现出 $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} > 1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

Philip 入渗模型表明, 在入渗初期, 土壤吸渗率 (S) 起主要作用, 随着入渗时间的增长, 土壤稳定入渗率 (A) 则成为影响入渗的主要因素^[29], 且通常为正值。管瑶等^[30]在土壤点源入渗自动测量系统监测滴头下土壤湿润过程研究中采用 Philip 入渗模型进行拟合分析时出现土壤稳定入渗率 (A) 为负值的结果, 作者分析这可能与 Philip 模型的衰减系数固定为 -0.5 相关, -0.5 的衰减系数限制了 Philip 入渗模型只能适用于某些特定土壤。但范严伟等^[28]采用 Philip 入渗模型对中壤土、沙壤土、壤土和沙土进行拟合分析的结果表明土壤累积入渗量变化过程符合 Philip 模型, 且土壤稳定入渗率 (A) 为正值。国内外学者王全九^[31]、史晓楠^[32]和 Alagna V.^[33]等对 Philip 入渗模型的研究也表明 Philip 入渗模型对不同土壤均具有较好的适应性。同时, 本文采用 Philip 入渗模型进行拟合分析时, 沼液处理土壤稳定入渗率 (A) 为负值, 而 CK (纯水) 处理为正值。因此, 本文认为沼液穴灌中土壤稳定入渗率 (A) 为负值, 与沼液的粘性及其所含有的有机悬浮颗粒有关。土壤吸渗率 (S) 随穴孔直径、沼液配比和土壤容重变化规律产生的原因, 与累积入渗量变化规律形成原因相同。

表 3 水平最大湿润距离 (H) 和垂向最大湿润距离 (V) 的拟合方程

Table 3 The fitting equation of the maximum horizontal wetting distance (H) and the maximum vertical wetting distance (V)

项目 Item	1.35 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$			1.45 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$		
	3 cm	5 cm	7 cm	3 cm	5 cm	7 cm
拟合方程 Fitting equation	$V = 0.929H$	$V = 1.081H$	$V = 1.111H$	$V = 0.957H$	$V = 1.048H$	$V = 1.064H$
R^2	0.992	0.990	0.993	0.982	0.992	0.993

表 4 水平最大湿润距离与时间拟合参数
Table 4 Fitting parameters of the maximum horizontal wetting distance and time

土壤容重/(g·cm ⁻³) Soil bulk density	孔径/cm Aperture	沼液配比 Ratio of biogas slurry	<i>m</i>	<i>n</i>	<i>R</i> ²
1.35	3	CK	2.622	0.332	0.998
		1 : 8	2.602	0.248	0.995
		1 : 6	2.728	0.233	0.998
		1 : 4	2.516	0.236	0.999
	5	CK	2.287	0.360	0.999
		1 : 8	2.625	0.260	0.998
		1 : 6	2.503	0.259	0.996
		1 : 4	2.790	0.207	0.996
	7	CK	1.984	0.404	0.998
		1 : 8	1.885	0.317	0.985
		1 : 6	1.726	0.324	0.993
		1 : 4	1.862	0.300	0.998
1.45	3	CK	2.445	0.341	0.999
		1 : 8	2.216	0.288	0.996
		1 : 6	2.843	0.226	0.975
		1 : 4	2.219	0.254	0.995
	5	CK	2.115	0.258	0.990
		1 : 8	1.940	0.305	0.996
		1 : 6	2.006	0.281	0.998
		1 : 4	1.795	0.278	0.997
	7	CK	2.799	0.319	0.996
		1 : 8	1.991	0.321	0.995
		1 : 6	1.861	0.303	0.996
		1 : 4	1.429	0.332	0.982

表 5 Philip 入渗模型拟合参数
Table 5 Fitting parameters of Philip infiltration model

土壤容重/(g·cm ⁻³) Soil bulk density	沼液配比 Ratio of biogas slurry	孔径/cm Aperture	<i>S</i>	<i>A</i>	<i>R</i> ²
1.35	1 : 4	3	6.1186	-0.1140	0.9875
		5	12.3800	-0.2225	0.9819
		7	15.1884	-0.2213	0.9954
	1 : 6	3	8.1776	-0.0522	0.9954
		5	15.1897	-0.2485	0.9942
		7	16.9528	-0.2376	0.9964
	1 : 8	3	13.0832	-0.1538	0.9986
		5	17.2512	-0.1975	0.9963
		7	22.8406	-0.4946	0.9881
	CK	3	16.5150	1.1881	0.9994
		5	24.0635	1.2966	0.9990
		7	26.7904	1.3556	0.9980
1.45	1 : 4	3	9.7628	-0.1451	0.9927
		5	10.4763	-0.1391	0.9891
		7	14.3129	-0.2698	0.9852
	1 : 6	3	9.5383	-0.0426	0.9950
		5	13.1333	-0.1595	0.9882
		7	16.3985	-0.3153	0.9935
	1 : 8	3	11.6212	-0.1257	0.9937
		5	15.6369	-0.1769	0.9942
		7	19.6169	-0.1969	0.9924
	CK	3	15.3706	0.9332	0.9977
		5	18.6720	1.1891	0.9952
		7	20.4450	1.2746	0.9966

3 结 论

1)沼液穴灌累积入渗量随着沼液配比和土壤容重的增大而降低,随着穴孔直径的增加而增大;CK 处理累积入渗量增加幅度明显大于各沼液配比

处理;应用数理统计方法建立的累积入渗量与土壤容重、穴孔直径和沼液配比的回归方程,决定系数 *R*² 值达到 0.91,拟合良好。表明在沼液穴灌实施中要充分考虑土壤容重、穴孔直径和沼液配比耦合作用对累积入渗量的影响。

2) 随穴孔直径的增加, 沼液穴灌形成的湿润体形状会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的椭球体; 相同沼液配比和穴孔直径条件下土壤容重的增加会使湿润体趋向于球体; 沼液穴灌湿润锋最大湿润距离与时间的函数关系可以用幂函数进行描述。

3) 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, 决定系数 R^2 均在 0.98 以上; 土壤吸渗率(S)随穴孔直径的增大而增加, 随沼液配比和土壤容重的增加而降低; 土壤稳定入渗率(A)为负值, 与沼液的粘性及所含有的有机悬浮颗粒有关。

4) 综合考虑土壤容重、穴孔直径和沼液配比对累积入渗量和湿润体变化的影响, 建议的实施方案为: $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、5 cm、1:6 和 $1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、7 cm、1:8。

参 考 文 献:

- [1] 李金平, 甄箫斐, 杨霁蓉, 等. 户用太阳能恒温沼气生产系统全年产气性能试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(10): 220-225.
- [2] 农业部种植业管理司. 农业部关于印发《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》和《到 2020 年农药使用量零增长行动方案》的通知[EB/OL]. http://www.moa.gov.cn/zwllm/tzgg/tz/201503/t20150318_4444765.htm, 2015-03-18.
- [3] Odlaire M, Pell M, Svensson K. Changes in soil chemical and microbiological properties during 4 years of application of various organic residues.[J]. Waste Management, 2008, 28(7):1246.
- [4] Kumar A, Singhal S K, Singh V, et al. Impact of rock-phosphate enriched pressmud and biogas slurry on yield, phosphorus nutrition and utilization by soybean (*Glycine max*) in a typical haplustept. [J]. Legume Research, 2013, 1(36):79-83.
- [5] Duan N, Lin C, Gao R Y, et al. Ecological and economic analysis of planting greenhouse cucumbers with anaerobic fermentation residues [J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 5(1):71-76.
- [6] Li J S, Duan N, Guo S, et al. Renewable resource for agricultural ecosystem in China: Ecological benefit for biogas by-product for planting [J]. Ecological Informatics, 2012, 12(11):101-110.
- [7] 吴树彪, 崔畅, 张笑千, 等. 农田施用沼液增产提质效应及水土环境影响[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8):118-125.
- [8] 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.
- [9] Abubaker J, Risberg K, Pell M. Biogas residues as fertilisers - Effects on wheat growth and soil microbial activities [J]. Applied Energy, 2012, 99(2):126-134.
- [10] Lu J, Jiang L, Chen D, et al. Decontamination of anaerobically digested slurry in a paddy field ecosystem in Jiaying region of China [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2012, 146(1):13-22.
- [11] Grigatti M, Girolamo G D, Chincari R, et al. Potential nitrogen mineralization, plant utilization efficiency and soil CO_2 , emissions following the addition of anaerobic digested slurries[J]. Biomass & Bioenergy, 2011, 35(11):4619-4629.
- [12] 高红莉. 施用沼肥对青菜产量品质及土壤质量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(s1):43-47.
- [13] Thomas T U, Edwin S, Markus R, et al. CO_2 evolution and N mineralization after biogas slurry application in the field and its yield effects on spring barley [J]. Applied Soil Ecology, 2009, 42(3):297-302.
- [14] 曹云, 常志州, 马艳, 等. 沼液施用对辣椒疫病的防治效果及对土壤生物学特性的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(3): 507-516.
- [15] 赵麒麟, 伍钧, 陈璧瑕, 等. 施用沼液对土壤和玉米重金属累积的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2):251-255.
- [16] Cms G, Ad V, Pinto R, et al. Changes in mineral nitrogen, soil organic matter fractions and microbial community level physiological profiles after application of digested pig slurry and compost from municipal organic wastes to burned soils [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2011, 43(4):845-852.
- [17] Grigatti M, Girolamo G D, Chincari R, et al. Potential nitrogen mineralization, plant utilization efficiency and soil CO_2 , emissions following the addition of anaerobic digested slurries[J]. Biomass & Bioenergy, 2011, 35(11):4619-4629.
- [18] 张凤羽. 流体力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [19] 王全九, 王文焰, 邵明安, 等. 浑水入渗机制及模拟模型研究[J]. 农业工程学报, 1999, 15(1):135-138.
- [20] 李康勇, 牛文全, 张若婵, 等. 施肥对浑水灌溉滴头堵塞的加速作用[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17):81-90.
- [21] 费良军, 王锦辉. 泥沙粒度组成对浑水膜孔灌单向交汇入渗特性的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(4):105-112.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [23] Igboekwe M U, Adindu R U. Use of Kostiakov's Infiltration Model on Michael Okpara University of Agriculture, Umudike Soils, Southeastern, Nigeria[J]. Journal of Water Resource & Protection, 2014, 06(10):888-894.
- [24] Reynolds B, Reddy K J. Infiltration Rates in Reclaimed Surface Coal Mines[J]. Water Air & Soil Pollution, 2012, 223(9):5941-5958.
- [25] Mousavi S F, Kamyab-Talesh F, Yazdani M R, et al. Spatial variation of infiltration rate and compactness in paddy fields [J]. Paddy & Water Environment, 2011, 9(4):385-392.
- [26] 郑健, 王燕, 蔡焕杰, 等. 植物混掺土壤水分特征曲线及拟合模型分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5):107-112.
- [27] 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.
- [28] 范严伟, 赵文举, 王昱. 入渗水头对垂直一维入渗 Philip 模型参数的影响[J]. 兰州理工大学学报, 2015, 41(1):65-70.
- [29] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- [30] 管瑶, 雷廷武, 刘芳芳, 等. 土壤点源入渗自动测量系统监测滴头下土壤湿润过程[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14):1-7.
- [31] 王全九, 来剑斌, 李毅. Green-Ampt 模型与 Philip 入渗模型的对比分析[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2):13-16.
- [32] 史晓楠, 王全九, 巨龙. 微咸水入渗条件下 Philip 模型与 Green-Ampt 模型参数的对比分析[J]. 土壤学报, 2007, 44(2):360-363.
- [33] Alagna V, Bagarello V, Prima S D, et al. Testing infiltration run effects on the estimated water transmission properties of a sandy-loam soil[J]. Geoderma, 2016, 267:24-33.