

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.027

干缩开裂黄褐土非饱和水平吸渗特征研究

张展羽^{1,2} 范世敏^{1,2} 王 策^{1,2} 刘 阳^{1,2} 齐 伟^{1,2}

(1. 河海大学南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室, 南京 210098;
2. 河海大学水利水电学院, 南京 210098)

摘要: 通过室内水平吸渗试验,结合 Matlab 数字图像处理与形态学算法,在黄褐土土壤中添加秸秆模拟不同生长期作物根系密度,对干缩开裂黄褐土中的非饱和水平吸渗及湿润锋推移特征进行研究。结果表明:不同秸秆密度处理裂缝稳定形态面积密度和裂缝平均宽度差异显著($p < 0.05$),当秸秆密度由 0 cm/cm^3 增加到 1.5 cm/cm^3 时裂缝面积密度和裂缝平均宽度分别减小为 1.73% 、 0.071 cm ,随着秸秆密度增大土壤稳定形态裂缝面积密度与裂缝平均宽度显著减小。秸秆添加间接影响入渗过程历时,但土壤最终累积入渗量无显著差异。裂缝的存在导致入渗率发生波动现象,且在入渗前中期尤为明显;未开裂土和开裂土累积入渗量随时间的变化关系均符合 Kostikov 经验入渗模型,其经验参数与秸秆密度有关,拟合方程达到显著水平。引入湿润锋均匀系数对水平吸渗不均匀性进行评价,土壤裂缝面积密度及裂缝平均宽度越大入渗初期的水分不均匀性特征越明显,均匀系数随着时间推移逐渐减小;根据湿润锋推进速率随时间的变化特征,开裂黄褐土土壤的水平吸渗过程可以分为3个阶段,即初始裂隙流阶段、稳渗基质流阶段和吸渗末期阶段。

关键词: 干缩裂缝; 秸秆添加; 水平吸渗; 入渗率; 湿润锋

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)07-0214-08

Characteristics of Unsaturated Horizontal Infiltration in Desiccation Cracks Yellow Cinnamon Soil

ZHANG Zhanyu^{1,2} FAN Shimin^{1,2} WANG Ce^{1,2} LIU Yang^{1,2} QI Wei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Efficient Irrigation – Drainage and Agricultural Soil – Water Environment in Southern China, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China
2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: An indoor experiment was conducted to investigate the characteristics of the unsaturated horizontal infiltration and wetting front advance in cracked yellow cinnamon soil, by incorporating different densities of straws to simulate the different growth stages of crop root, combined with digital image processing and Matlab morphology algorithm. The results showed that the stable forms of soil crack were significantly different in treatments of different straw incorporations ($p < 0.05$). A downward trend in crack area ratio and crack width (respectively decreased to 1.73% and 0.071 cm) was observed with the increasing straw incorporation from 0 cm/cm^3 to 1.5 cm/cm^3 . Fracture area density and the average crack width of soil stable forms were significantly decreased with straw density increased. The discharge time of horizontal infiltration was affected by the degree of soil cracking. Cumulative infiltration into uncracked soil and cracking soil changed with time was in line with the empirical model proposed by Kostikov, the parameters of which were closely related to straw densities. The changes of fitting equation reached significant level. The uniformity coefficient of the wetting front was introduced to evaluate the non-uniformity of the horizontal absorption. The initial non-uniformity was more obvious with the increase of soil crack area density and average crack width. The uniformity coefficient was decreased with time. The greater the crack area and the average crack width of soil were, the more obvious the characteristics of non-uniformity in initial stage of infiltration became. According to the changing characteristics of the

收稿日期: 2017-04-16 修回日期: 2017-05-25
基金项目: 国家自然科学基金项目(51579069、51179050)、高等学校学科创新引智计划(111计划)项目(B12032)、江西省水利科技项目(KT201507)和江苏高校优势学科建设工程项目(YS11001)
作者简介: 张展羽(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事灌溉排水理论及技术研究,E-mail: zhanyu@hhu.edu.cn

wetting front forward speed changed with time, the horizontal infiltration process in cracked soils can be divided into three stages: the initial stage of crack flow, the stage of steady matrix flow and the late stage of horizontal infiltration.

Key words: soil cracks; straw incorporation; horizontal infiltration; infiltration rate; wetting front

引言

非饱和带土壤作为一种复杂的多孔介质,是水盐运移、污染物迁移必经途径以及土壤水分交换的重要枢纽。自然条件下,土壤干燥失水会导致干燥锋下降,基质吸力上升,微观颗粒组成结构发生变化,颗粒间的吸应力增加并超过其间的胶结力,土体由于干缩而产生裂缝,裂缝开裂于土壤弱势区。裂缝网络结构增加了土壤水盐运移的空间变异性,使得水流不再遵循传统的达西定律,而是绕过土壤基质,通过优先通道^[1-2]直接进入土壤深层或地下水中。这些灌溉水或降水未能与土壤基质充分混合或被作物充分吸收而损失。研究表明,植物根系能够对土体起到锚固和加筋作用^[3],土壤中添加秸秆还会对水分特征产生影响^[4]。因此,基于秸秆影响下的裂缝网络水分非饱和入渗运移规律的探究,越来越受到国内外学者的重视。

土壤开裂导致的空间变异性影响非饱和入渗,是农业工程、水文学、土壤学等学科的交叉课题。STIRK^[5]认为土壤的入渗能力与土壤含水率相关,含水率较高时裂缝发育不充分,裂缝几乎不影响土壤入渗性能,而当含水率小于凋萎系数时,裂缝能显著提升入渗率。KRISNANTO 等^[6]根据水量平衡原理对开裂土壤横向流进行模型建立与验证,建立的模型能够较好地预测通过水平裂缝网络的侧向流量。MOUSAVI 等^[7]基于 4 种不同质地土壤研究了秸秆添加对土壤性质的影响,结果表明添加秸秆可增加土壤含水率,降低土壤容重,并能够延缓土壤裂缝的形成。TABUCHI^[8]研究表明不同强度降雨条件下土壤裂缝能显著增大入渗量,并且提供优先通道。LIU 等^[9]研究了多变量对开裂水稻土入渗速率的影响,表明入渗速率随着裂缝吸水闭合而减小,甚至低于原状土。文献^[10]研究表明,稻秆还田能够有效减小稻田土壤裂缝的数量、宽度以及深度,从而间接阻断稻田水分流失通道,提高农田水分有效利用系数,达到节水灌溉的目的。MILLER 等^[11]和 NUR 等^[12]认为干湿循环能显著增大裂缝的强度因子,且裂缝的位置不会随着干湿循环的进行而改变。杨和平等^[13]表明干湿循环仅影响部分土壤裂缝的几何参数,第一次循环能显著增大裂缝宽度、深度及裂缝率。蔡光华等^[14]发现干湿循环能提高土壤开

裂程度,增加裂缝数量。BLAKE 等^[15]采用水流标记法研究了土壤干缩裂缝的水分补偿效应。ZHANG 等^[16]分析了不同条件下水稻土裂缝干湿循环能够增大水流入渗率,但仅限于犁底层之上。HUANG^[17]应用数学方程分析的方法表明多孔介质隔层将产生不稳定湿润锋。FAVRE 等^[18]研究了水稻土在不同给水条件下的膨胀规律,发现裂缝优先流在土壤吸水中并不是一个持续稳定的物理过程。张展羽等^[19-20]结合计算机数字图像处理技术探究了不同玉米根系含量和盐分梯度对土壤裂缝发育的影响以及多级干湿循环对农田土壤干缩裂缝演变特征的影响,明晰了干湿循环下农田土壤裂缝网络开闭规律。综上所述,目前对于土壤裂缝的发育规律以及垂直方向的优先流已经有较为系统的研究,但是对土壤裂缝非饱和水平吸渗特征还未进行深入的量化研究。

本文结合数字图像处理技术,通过对黄褐土土壤试样添加不同密度秸秆进行裂缝培养和水平自由吸渗试验,基于测定的不同入渗参数定量分析均质薄层土与裂缝网络存在时的入渗差异性,明晰裂缝吸水闭合动态过程湿润锋的推移传输机理,揭示裂缝网络下复杂的非饱和入渗特征,以期为揭示变固相骨架下的非饱和水分运移规律,指导农田精量灌溉,提高农田灌溉效率提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

供试土样取自河海大学南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室试验田(31.86°N、118.60°E,海拔高度 8 m)的旱地土壤表层(0~20 cm),该地区为亚热带季风气候,以丘陵地貌为主。供试土壤田间持水率为 31.5%,凋萎系数 15.0%,依据国际制土壤质地分类方法进行土壤分类,土壤理化性质如表 1 所示。

表 1 供试土壤物理特性
Tab.1 Physical properties of tested soil

供试土壤类型	土壤粒径组成(质量分数)/%			容重/(g·cm ⁻³)	土壤质地
	>0.02 mm	0.002 ~ 0.02 mm	0 ~ 0.002 mm		
黄褐土	24.83	32.45	42.72	1.38	壤质黏土

为了达到试验预期效果,去除土壤中植物残留

的根系及石块等杂物,将试验用土先过 8 mm 金属网筛后置通风处自然风干,再将风干土过 3 mm 金属网筛进行二次筛选得到均质土样以备待用。本文中的秸秆为水稻秆,稻秆取自河海大学南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室试验田,去除稻秆干叶,用卷尺测量稻秆长度并记录,用剪刀将稻秆进行剪切,每段长为 3 cm 待用。

1.2 试验方案设计

试验中稻秆密度取 0、0.5、1.0、1.5 cm/cm³,分别用以模拟无作物、拔节期、灌浆期及成熟期土壤中作物根系密度^[21],记为 CK、A、B、C,每组试验设置 3 个重复,每个重复称取待试土样 6 400 g 并按试验设计取稻秆密度添加至土样中,搅拌均匀,按原容重回填至有机玻璃装置中央区域边长为 40 cm 的正方形位置,回填厚度为 32 mm,每铺 10 mm 用橡胶锤均匀夯实,并且在回填下一层时将其下层土样表面进行打毛处理,以避免上下土层之间出现结构和水动力学特性突变等不必要的内边界^[22],减小对裂缝发育及入渗过程的影响。

试验装置由马氏瓶、供水室、储土室、数码相机组成(图 1)。水平吸渗试验左端设定为第一类边界条件(无压饱和边界),右端为自由出流边界。试验中采用马氏瓶提供固定水头将水流输送至供水室,水头水位控制与土壤试样高度平齐,供水强度取决于试验土样的入渗性能。整个入渗过程采用数码相机定时拍照记录水分运移过程以及表面裂缝遇水闭合过程并且记录相机拍照时刻马氏瓶相应读数,当所有土样浸水湿润装置右端出流时,入渗过程结束。当入渗结束时,采用保鲜膜覆盖储土室,使土样充分吸水饱和,24 h 后揭开保鲜膜,用电子秤监测各处理土样的含水率。此时干燥试验开始,控制实验室温

度为(25±2)℃,相对湿度为 50%±10%,当土样表面出现稳定裂缝,每隔 8 h 进行含水率测定,连续 3 次监测土样质量相对变化在±0.3%时,认为土样干燥完成,裂缝发育已达到稳定状态。试验过程可近似看作水平二维平面入渗,忽略重力对本试验的影响。

试验所用电子秤型号为香海 XH-8301,量程 60 kg,精度为 1.0 g;所用相机为 Canon EOS 60D,分辨率 5 184 像素×3 456 像素。为确保所得图像拍摄距离、位置以及环境等外部因素的一致性,将相机调整为 AV 模式,用相机三脚架在固定位置安装固定相机,同时将相机闪光灯关闭且遮蔽实验室外界光源,仅使用日光灯进行均匀照射。

1.3 数字图像处理及数据提取

1.3.1 裂缝图片处理

为了消除试验装置边缘对土壤裂缝的影响,采用 Photoshop CC2014 软件的动作路径功能进行裂缝图像裁剪的批量高效预处理,以装置中央区域中心为裁剪参照点,得到储土室中央区域 38 cm×38 cm 作为研究区域,所对应的图像分辨率设置为 254 像素/in。结合 Matlab 2014a 图像处理及形态学算法模块,采用张展羽等^[19]提出的裂缝数字图像处理技术进行裂缝几何参数的批量提取。处理基本方法为图像预处理、灰度化、二值化、去除杂点、骨架提取、裂缝分割以及数据输出等。

1.3.2 湿润锋图片处理

将得到的水平入渗过程图像导入 Photoshop CC2014 进行上述批量预处理步骤,在数字图像中,因吸水湿润区域相较于干燥区域颜色更为灰暗,其反映在灰度图像上为湿润区域灰度更接近于零,因此可以利用灰度来自动化识别湿润区域与干燥区域。预处理所得图片为 RGB 图像,将其转换为灰度图像,为了进一步增强湿润区与干燥区的边界,适当调整图像对比度,采用自适应阈值分割的方法进行图像二值化处理,初步得到水平入渗过程图像。

1.3.3 裂缝及入渗参数提取

通过对上述处理所得二值图像进行 Matlab 编程计算,得到土壤裂缝稳定形态几何参数及入渗过程相关参数如下:

裂缝面积密度

$$R_c = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{A_0} \times 100\%$$

(1)

式中 R_c ——裂缝面积密度,%
 A_i ——单裂缝 i 的面积,cm²
 A_0 ——研究区域面积,cm²
 n ——研究区域裂缝总条数

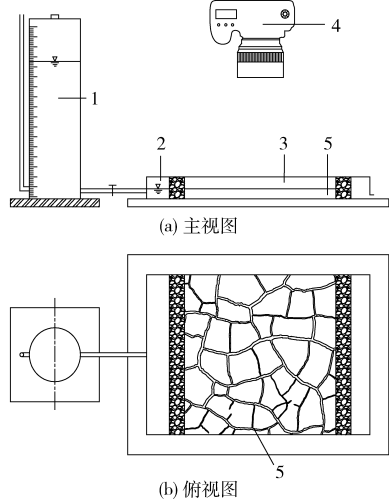


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of experimental setup
1. 马氏瓶 2. 供水室 3. 储土室 4. 数码相机 5. 开裂试样

裂缝长度密度

$$L_c = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{A_0} \times 100\% \tag{2}$$

式中 L_c ——裂缝长度密度, cm/cm^2
 L_i ——单裂缝 i 的骨架长度, cm
裂缝连通度 K 为裂缝交叉点数与裂缝节点数之比, 计算公式为

$$K = \frac{N_{bp}}{N_{bp} + N_{ep}} \tag{3}$$

式中 N_{bp} 、 N_{ep} ——裂缝交叉点数与端点数
裂缝平均宽度定义为研究区域土壤裂缝面积与裂缝长度之比, 计算公式为

$$\bar{w} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{\sum_{i=1}^n L_i} \tag{4}$$

式中 $\bar{w}$ ——裂缝平均宽度, cm
水平最大入渗距离 (cm) 计算式为

$$Z_{\max} = \max \left(38 - \frac{b_i}{100} \right) \tag{5}$$

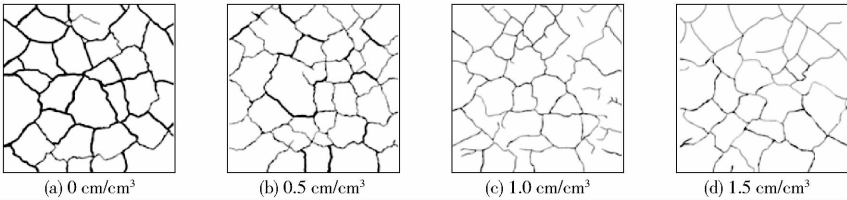


图 2 不同秸秆密度下稳定形态裂缝分布图

Fig. 2 Stable crack morphology graphs with different rice straw densities

对面积密度、长度密度、连通度、裂缝平均宽度以及稳定含水率进行统计, 各参数均取 3 个重复的平均值, 并对结果采用最小显著差异法 (LSD) 进行显著性分析 (表 2)。结果表明, 不同秸秆密度处理裂缝稳定形态面积密度和裂缝平均宽度差异显著 ($p < 0.05$), CK 处理的裂缝面积密度平均值约为 C

式中 b_i ——湿润峰二值图像矩阵顺水流方向单列元素之和, 编程计算
水平最小入渗距离 (cm) 计算式为

$$Z_{\min} = \min \left(38 - \frac{b_i}{100} \right) \tag{6}$$

水平入渗湿润面积 (cm^2) 计算式为

$$S = 1\,444 - \frac{b_w}{10\,000} \tag{7}$$

式中 b_w ——湿润峰二值图像矩阵所有元素之和, 编程计算

平均入渗距离 $\bar{Z}$ (cm) 为水平入渗湿润面积与水平进水端宽度 D (取 38 cm) 之比, 即

$$\bar{Z} = \frac{S}{D} \tag{8}$$

2 结果与分析

2.1 裂缝稳定形态

4 种不同秸秆密度影响下稳定形态裂缝网络分布如图 2 所示。由图 2 可以看出, 不同秸秆密度处理的土壤裂缝面积密度、裂缝平均宽度等均有较大的差异。

处理的 5 倍, 说明随着秸秆密度的增加, 其锚固作用现象明显, 开裂薄弱区的开裂程度由于该秸秆-土壤颗粒之间应力的束缚而明显减弱, 致使整个裂缝网络出现支离破碎的形态, 秸秆密度越大裂缝稳定形态平均宽度和裂缝面积密度越小, 添加秸秆能明显降低裂缝的开裂程度。

表 2 裂缝稳定形态几何参数及含水率统计

Tab. 2 Statistics of geometry parameters and moisture content with stable crack morphology

处理	秸秆密度/($\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$)	面积密度 R_c /%	长度密度 L_c /($\text{cm} \cdot \text{cm}^{-2}$)	连通度	稳定含水率/%	平均宽度 $\bar{w}$ /cm
CK	0	8.61 ^a	29.17 ^a	0.97 ^a	9.55 ^a	0.296 ^a
A	0.5	6.12 ^b	31.61 ^a	0.93 ^a	9.33 ^a	0.194 ^b
B	1.0	3.56 ^c	29.44 ^a	0.79 ^a	9.38 ^a	0.121 ^c
C	1.5	1.73 ^d	30.91 ^a	0.84 ^a	9.46 ^a	0.071 ^d

注: 同列数据后不同小写字母表示差异达到显著水平 ($p < 0.05$)。

2.2 土壤水分非饱和入渗特性

2.2.1 累积入渗量

根据试验结果, 未开裂土和开裂土实测累积入渗量随时间的变化关系如图 3 所示。当试验区土壤

试样完全浸润时, 一个入渗过程结束。由图 3 可知, 同一处理开裂土的入渗过程较未开裂土延长, 对于不同处理的开裂土, 秸秆密度越小入渗过程历时越长。而对于不同处理的未开裂土, CK 处理的入渗历

时较其他 3 个处理明显缩短,处理 A 与处理 B 入渗历时相似,处理 C 次之。通过对比图 3 最终累积入渗量可知,各处理最终累积入渗量无明显差别(均为 2 500 mL 左右)。由于土壤秸秆密度相对于土壤

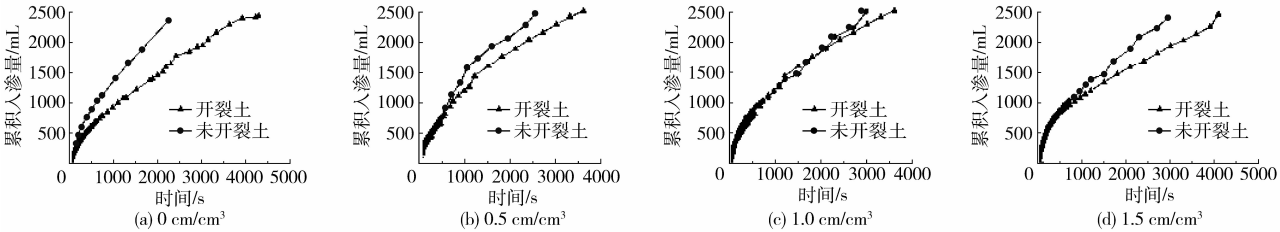


图 3 累积入渗量随时间的变化趋势

Fig. 3 Changing trends of cumulative infiltration volume with experiment time

分析图 3 趋势表明,未开裂土和开裂土实测累积入渗量随时间的变化均呈良好的函数关系,本研究采用 Kostiakov 经验入渗模型分别对其进行拟合

$$I = \alpha t^\beta \tag{9}$$

其中

$$\alpha = md + n \tag{10}$$

$$\beta = kd + s \tag{11}$$

式中 I ——累积入渗量, mL
 t ——入渗时间, s
 α, β ——经验常数,取决于土壤及入渗初始条件
 m, n, k, s ——回归系数,与添加秸秆密度有关
 d ——土壤中添加的秸秆密度, cm^3/cm^3

根据试验资料采用最小二乘法进行参数拟合,结果如表 3 所示。拟合方程决定系数均达显著水平。

表 3 回归系数拟合统计
Tab. 3 Statistics of coefficient regression fitting

参数	数值	
	未开裂土	开裂土
m	22. 096	4. 541
n	8. 003	8. 901
k	-0. 207	-0. 091
s	0. 540	0. 777
R^2	0. 987	0. 952

由上述结果可知,未开裂土和开裂土累积入渗量与不同秸秆密度存在较好的函数拟合关系,土壤添加秸秆条件下 Kostiakov 经验入渗修正模型为

$$I = (md + n)t^{kd + s} \tag{12}$$

该模型揭示了添加不同秸秆密度土壤累积入渗量随时间的变化规律,表明秸秆与土壤入渗间的密切关系,土壤累积入渗量变化受秸秆密度的影响。

2. 2. 2 入渗率随时间的变化

根据不同秸秆密度未开裂土和开裂土入渗率与时间的关系,得到如图 4 所示的入渗率随时间的变

化趋势。为了研究土壤吸渗过程入渗率变化规律,将各处理未开裂土入渗率随时间的变化进行趋势线拟合以便对比观察开裂土入渗规律,对于各处理开裂土壤,入渗率随时间变化较为复杂,入渗初期入渗率大于未开裂土,水分传输以优先流的形式进行,入渗中期入渗率在未开裂土入渗率趋势线上下波动,表明此时裂缝闭合入渗过程优先流与基质流并存相互影响,最后入渗率逐渐减小并趋于稳定。形成波动的主要原因是由于垂直于入渗方向的纵向裂缝阻断了水分在土壤中的连续传导。入渗初期由于干燥土壤基质吸力较大,水分入渗速率较快,因此纵向裂缝阻隔了水分传递,入渗出现了明显的波动现象;而入渗中后期,由于入渗路径变长而水力梯度变小,土壤水分入渗速率变小,块区膨胀速率优先于入渗速率,裂缝在水分传导到达之前充分闭合,水分传导可看作连续的基质流,入渗率波动现象消失。观察图 4 可知,随着土壤中秸秆密度的增加,水平吸渗入渗率数据点离散程度逐渐减小,开裂土的入渗率随时间变化越来越接近未开裂土入渗率变化趋势,这是由于秸秆密度增大导致土壤开裂程度减小。

2. 3 湿润锋变异特征评价

2. 3. 1 湿润锋不均匀性

为了定量评价并比较水分在开裂土壤入渗的不均匀性,4 组开裂土壤水平吸渗过程中湿润锋的最大入渗距离 $Z_{\max}$ 和最小入渗距离 $Z_{\min}$ 随时间的变化关系如图 5 所示,并且引入湿润锋均匀系数,定义为

$$C_{uz} = \frac{Z_{\max} - Z_{\min}}{Z} \tag{13}$$

由图 5 可以看出,水平入渗初期 4 组土壤的最大入渗距离均极速增大,均匀系数随时间的变化关系如图 6 所示,初始均匀系数由大到小表现为:CK、A、B、C,表明土壤的裂缝面积密度及平均宽度越大,入渗初期的水分运移不均匀性特征越明显,此时水

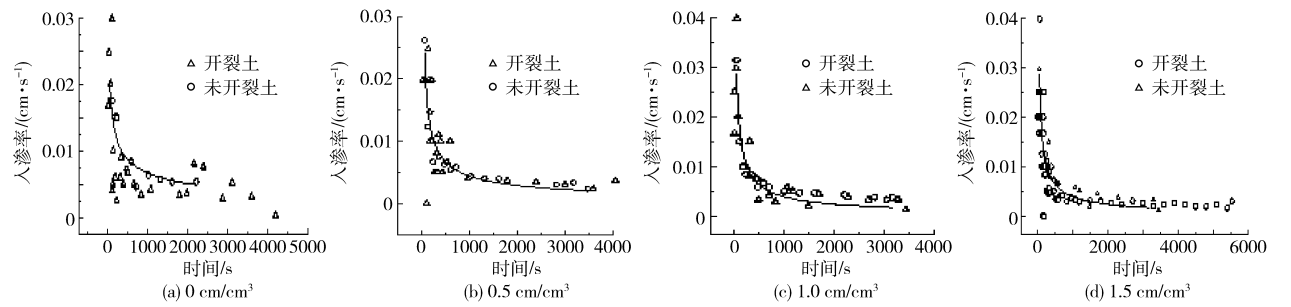


图 4 入渗率随时间的变化趋势
Fig. 4 Changing trends of infiltration rate with experiment time

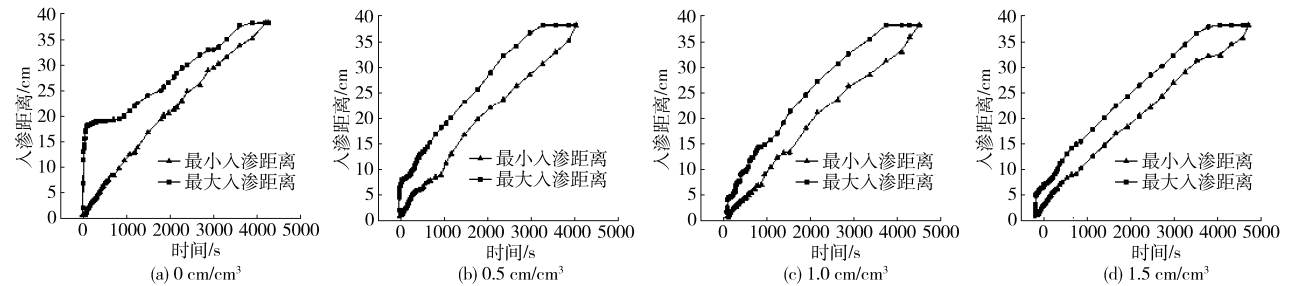


图 5 入渗距离随时间的变化趋势
Fig. 5 Changing trends of infiltration distance with experiment time

流模式呈现出明显的优先流现象。初始时刻土壤均处于干燥开裂状态,裂缝宽度越大,水分在裂隙中运移速率越快,水分以优先流的形式在土壤中快速传输。随着入渗的进行,土壤开始闭合,最大和最小入渗距离的变化曲线最终闭合,二者形成闭合圈的不规则程度能定性反映吸渗过程的不均匀性。观察均匀系数曲线可知,裂缝面积密度越大,吸渗过程的湿润锋不均匀性特征越明显,均匀系数随着时间推移逐渐减小,裂缝发育程度越高,入渗中期均匀系数越大。

该块区边界时,水分传导介质被裂缝阻断,直到周围块区吸水膨胀与下个块区完全接触时,水分传导才能继续进行。根据湿润锋推进速率随时间的变化特征结合吸渗过程的视觉描述,定性地将土壤吸渗过程分为 3 个阶段(不同阶段典型流动模式如图 8 所示):

阶段 I :初始裂隙流阶段。该阶段湿润锋推进速率上下波动剧烈变化,进水口为饱和和边界,水流通通过裂缝迅速向前推进形成指流(图 8a),湿润锋推进不均匀程度极大,裂缝块区内部为局部基质流,入渗率主要由裂隙决定,在裂隙流推进的过程中,裂缝逐渐闭合导致推进速率放缓,当裂隙流到达该块区边界时,水流传输通道被裂缝阻断,暂时停滞,在垂直于水流方向同一裂缝断面的各块区均吸水膨胀裂缝闭合后,水流才能继续向前推进。该阶段称为初始裂隙流阶段,持续时间较短,约占整个吸渗过程的 1/5。

阶段 II :稳渗基质流阶段。该阶段同一水平各块区吸水膨胀,湿润锋推进速率大致相同,整体水流以基质流形式向前推进(图 8b),湿润锋不均性减小,此时土壤裂隙闭合,湿润峰推进速率放缓。该阶段持续时间最长,约占整个吸渗过程的 3/5。

阶段 III :吸渗末期阶段。该阶段整块开裂土壤几乎吸水闭合,湿润锋推进速率较阶段 II 开始逐渐减小,湿润锋在同一剖面上基本形成类似未开裂土的水平推进(图 8c)。该阶段持续时间约占整个吸渗过程的 1/5。

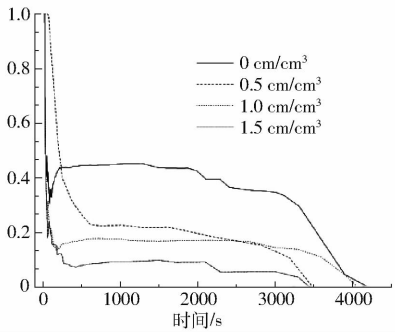


图 6 均匀系数随时间的变化趋势

Fig. 6 Changing trends of uniformity coefficient with experiment time

2.3.2 湿润锋推进速率

将不同时段内湿润锋平均入渗距离与时间的比值作为该时段的湿润锋推进速率,得到如图 7 所示的湿润锋推进速率与时间的关系曲线。由于土体开裂后被分割为多个独立的块区,在湿润锋水平推进过程中,开裂土体中单块区吸水膨胀,当湿润锋到达

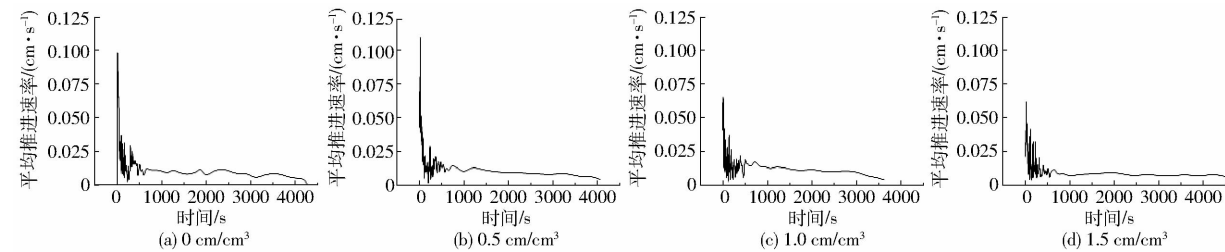


图7 湿润锋推进速率随时间的变化趋势

Fig.7 Changing trends of average wetting front advance rate with experiment time

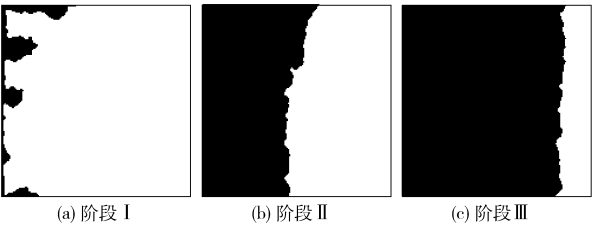


图8 水平吸渗典型流动模式图

Fig.8 Typical flow patterns of horizontal water flow

3 结论

(1)添加秸秆影响土壤裂缝稳定形态裂缝发育程度。当秸秆密度由0 cm/cm³增加到1.5 cm/cm³时,土壤裂缝面积密度和裂缝平均宽度分别减小为1.73%、0.071 cm,且二者组内差异均达到显著水平,表明添加秸秆能明显降低裂缝的开裂程度。

(2)土壤裂缝面积密度与裂缝平均宽度越大,其水平吸渗过程历时越长,对开裂土最终累积入渗量无明显影响;秸秆密度越大,土壤开裂程度越小,开裂土入渗过程优先流现象削弱,开裂土壤入渗率随时间的变化产生波动现象,且越来越小最终趋向于稳定;未开裂土和开裂土累积入渗量随时间的变化关系符合Kostiakov经验入渗模型,拟合方程决定系数达到显著水平。

(3)引入湿润锋均匀系数对水平吸渗不均匀性进行评价,土壤裂缝的面积密度及裂缝平均宽度越大,入渗初期的水分不均匀性特征越明显,均匀系数随着时间推移逐渐减小;根据湿润锋推进速率随时间的变化特征,可以将水平吸渗过程分为3个阶段:初始裂隙流阶段、稳渗基质流阶段和吸渗末期阶段。

参 考 文 献

1 HENDRICKX J M H, FLURY M. Uniform and preferential flow mechanisms in the vadose zone[M]. Conceptual models of flow and transport in the fractured vadose zone. Washington DC: National Academies Press,2001: 149 – 187.

2 KEITH B, PETER G. Macropores and water flow in soils revisited [J]. Water Resources Research, 2013, 49(6): 71 – 92.

3 徐玲, 杨立魁, 高昌珍. 翻埋秸秆抑制土壤开裂机理研究[J]. 山西农业大学学报:自然科学版, 2015, 35(6): 660 – 663. XU Ling, YANG Likui, GAO Changzhen. Mechanism research of straw burying inhibiting soil cracking [J]. Journal of Shanxi Agricultural University: Natural Science Edition, 2015, 35(6): 660 – 663. (in Chinese)

4 嵇晓雷, 夏光辉, 张海亚. 紫穗槐根系形态与固土护坡效应研究[J]. 湖北林业科技, 2016, 45(1): 16 – 19. JI Xiaolei, XIA Guanghui, ZHANG Haiya. Effects of *Amorpha fruticosa* root system on slope and water conservation[J]. Hubei Forestry Science and Technology, 2016, 45(1): 16 – 19. (in Chinese)

5 STIRK G. Some aspects of soil shrinkage and the effect of cracking upon water entry into the soil [J]. Crop and Pasture Science, 1954, 5(2): 279 – 296.

6 KRISNANTO S, RAHARDJO H, FREDLUND D, et al. Mapping of cracked soils and lateral water flow characteristics through a network of cracks [J]. Engineering Geology, 2014, 172(5): 12 – 25.

7 MOUSAVI S F, MOAZZENI M, MOSTAFAZADEH-FARD B, et al. Effects of rice straw incorporation on some physical characteristics of paddy soils [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2012, 14(5): 1173 – 1183.

8 TABUCHI T. Studies on drainage in clayey paddy fields: a method of calculation of drainage and its fluctuations due to the precipitation [J]. Transactions of the Japanese Society of Irrigation Drainage and Reclamation Engineering, 1968, 25(2): 50 – 66.

9 LIU C W, CHENG S W, YU W S, et al. Water infiltration rate in cracked paddy soil [J]. Geoderma, 2003, 117(12): 169 – 181.

10 CABANGON R J, TUONG T. Management of cracked soils for water saving during land preparation for rice cultivation [J]. Soil and Tillage Research, 2000, 56(1): 105 – 116.

11 MILLER C J, MI H, YESILLER N. Experimental analysis of desiccation crack propagation in clay liners [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34(3): 677 – 686.

12 NUR S H, HARIANTO T. Characteristics of wet – dry cycles of compacted clay soil – fiber mixture [J]. Institute of Lowland Technology, 2014, 112(5): 12 – 25.

13 杨和平, 刘艳强, 李晗峰. 干湿循环条件下碾压膨胀土的裂隙发展规律[J]. 交通科学与工程, 2012, 28(1): 1 – 5. YANG Heping, LIU Yanqiang, LI Hanfeng. The development of cracks of compacted expansive soil under dry – wet cycling [J].

Journal of Transport Science and Engineering, 2012,28(1): 1 – 5. (in Chinese)

14 蔡光华, 薛强, 刘松玉. 湿干循环作用对压实黏土干裂特性的影响 [J]. 工程地质学报, 2014,22(6): 1046 – 1051. CAI Guanghua, XUE Qiang, LIU Songyu. Influence of wetting – drying cycles on desiccation cracking of compacted clay [J]. Journal of Engineering Geology, 2014,22(6): 1046 – 1051. (in Chinese)

15 BLAKE G, SCHLICHTING E, ZIMMERMANN U. Water recharge in a soil with shrinkage cracks [J]. Soil Science Society of America Journal, 1973, 37(5): 669 – 672.

16 ZHANG Z B, ZHOU H, ZHAO Q G, et al. Characteristics of cracks in two paddy soils and their impacts on preferential flow [J]. Geoderma, 2014, 228(1):114 – 121.

17 HUANG Z. Wetting front instability analysis of infiltration in layered porous media [J]. Journal of Mathematical Study, 1998(2): 122 – 133.

18 FAVRE F, BOIVIN P, WOPEREIS M C S. Water movement and soil swelling in a dry cracked Vertisol [J]. Geoderma, 1997, 78(1): 113 – 123.

19 张展羽, 朱文渊, 朱磊, 等. 根系及盐分含量对农田土壤干缩裂缝发育规律的影响 [J/OL]. 农业工程学报, 2014, 30(20):83 – 89. http://www.tcsae.org/nygxb/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20142011&journal_id=nygxb. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.20.011. ZHANG Zhanyu, ZHU Wenyuan, ZHU Lei, et al. Effects of roots and salinity on law of development for farmland soil desiccation crack[J/OL]. Transactions of the CSAE, 2014,30(20):83 – 89. (in Chinese)

20 张展羽, 李文杰, 王策, 等. 多级干湿循环对农田土壤干缩裂缝演变特征的影响 [J/OL]. 农业机械学报, 2016,47(12): 172 – 177. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161221&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.021. ZHANG Zhanyu, LI Wenjie, WANG Ce, et al. Effects of dry – wet cycles on evolution characteristics of farmland soil desiccation cracks [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12):172 – 177. (in Chinese)

21 汪明霞, 陶永霞. 控制性交替灌溉条件下玉米根系的时空分布规律[J]. 节水灌溉, 2011(10): 13 – 16. WANG Mingxia, TAO Yongxia. Spatiotemporal distribution law of spring maize root systems under controlled alternative irrigation [J]. Water Saving Irrigation, 2011(10): 13 – 16. (in Chinese)

22 毛丽丽, 雷廷武. 用水平土柱估算土壤入渗性能和水分分布简化模型方法[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 49 – 53. MAO Lili, LEI Tingwu. Simplified method for soil water distribution and infiltrability estimations [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 49 – 53. (in Chinese)

(上接第 227 页)

17 陈南祥, 李跃鹏, 徐晨光. 基于多目标遗传算法的水资源优化配置[J]. 水利学报, 2006,37(3):308 – 313. CHEN Nanxiang, LI Yuepeng, XU Chenguang. Optimal deployment of water resources based on multi-objective genetic algorithm [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2006,37(3):308 – 313. (in Chinese)

18 王鹏. 基于 Pareto Front 的多目标遗传算法在灌区水资源配置中的应用[J]. 节水灌溉,2005(6):29 – 32.

19 高玉芳, 张展羽. 混沌人工鱼群算法及其在灌区优化配水中的应用[J]. 农业工程学报,2007, 23(6):7 – 11. GAO Yufang, ZHANG Zhanyu. Chaotic artificial fish-swarm algorithm and its application in water use optimization irrigated areas [J]. Transactions of the CSAE,2007,23(6):7 – 11. (in Chinese)

20 张文明, 董增川, 朱成涛, 等. 基于粒子群算法的水文模型参数多目标优化研究[J]. 水利学报,2008,39(5):528 – 534. ZHANG Wenming, DONG Zengchuan, ZHU Chengtao, et al. Automatic calibration of hydrologic model based on multi-objective particle swarm optimization method[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2008, 39(5):528 – 534. (in Chinese)

21 周建中, 李英海, 肖舸, 等. 基于混合粒子群算法的梯级水电站多目标优化调度[J]. 水利学报,2010,41(10):1212 – 1219. ZHOU Jianzhong, LI Yinghai, XIAO Ge, et al. Multi-objective optimal dispatch of cascade hydropower stations based on shuffled particle swarm operation algorithm[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2010,41(10):1212 – 1219. (in Chinese)

22 MORANKAR D V, RAJU K S, KUMAR D N. Integrated sustainable irrigation planning with multiobjective fuzzy optimization approach[J]. Water Resource Management,2013,27(11):3981 – 4004.

23 TEEGAVARAPU R S V, FERREIRA A R, SIMONOVIC S P. Fuzzy multiobjective models for optimal operation of a hydropower system[J]. Water Resource Research,2013,49(6):3180 – 3193.

24 SASIKUMAR K, MUJUMDAR P P. Fuzzy optimization model for water quality management of a river system[J]. Journal of Water Resources Planning and Management,1998,124(2):79 – 88.

25 李丹, 李德丽, 颜华. 用水农户参与水利灌溉管理的冲量过程分析[J]. 东北农业大学学报,2013,44(8):116 – 121. LI Dan, LI Deli, YAN Hua. Impulse process analysis of water users participate in irrigation management [J]. Journal of Northeast Agricultural University,2013,44(8):116 – 121. (in Chinese)

26 付强, 刘银凤, 刘东, 等. 基于区间多阶段随机规划模型的灌区多水源优化配置[J]. 农业工程学报,2016,32(1):132 – 139. FU Qiang, LIU Yinfeng, LIU Dong, et al. Optimal allocation of multi-water resources in irrigation area based on interval-parameter multi-stage stochastic programming model [J]. Transactions of the CSAE,2016,32(1):132 – 139. (in Chinese)