

土壤干缩裂缝几何特征对入渗的影响*

张展羽^{1,2} 陈于^{1,2} 孔莉莉³ 王策^{1,2} 李文杰^{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; 3. 江苏省水利厅, 南京 210029)

摘要: 通过碘-淀粉染色示踪试验, 结合数字图像处理技术, 分析了裂缝宽度、深度及表面裂缝面积率 3 个裂缝表征参数对土壤水分入渗的影响。研究表明: 大裂缝即实际宽度大于 1.25 cm 的裂缝, 其入渗深度超过 45 cm, 能够促进土壤水分入渗, 为水分运移提供明显的优先通道, 随着大裂缝宽度的增加, 入渗深度在 45 ~ 65 cm 范围内变化, 没有明显的规律, 小裂缝对入渗的作用不明显。裂缝深度较小时, 土壤水分可看作一维半无限均匀运动, 而深度较大的裂缝对入渗的影响显著, 土壤水分运移表现出明显的优先流特征。表面裂缝面积率与湿润的土体体积具有良好的正相关关系 ($r=0.95$), 建立了一元回归模型, 并提出以表面裂缝面积率作为裂缝对入渗影响程度的表征指标, 面积率越大, 裂缝对入渗的作用越明显。

关键词: 土壤 入渗 裂缝 染色示踪试验 几何特征

中图分类号: S152.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)10-0192-06

Impacts of Desiccation Crack Geometric Characteristics on Infiltration in Soil

Zhang Zhanyu^{1,2} Chen Yu^{1,2} Kong Lili³ Wang Ce^{1,2} Li Wenjie^{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

3. Water Resources Department of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China)

Abstract: To investigate the influence of desiccation cracks on water infiltration patterns, iodine-starch staining experiments were carried out in cracked loamy clay soil. By application of the digital image processing technology and direct measurements, parameters including crack width, depth and area ratio of surface cracks were computed and employed to analyze the infiltration distribution influenced by crack geometric characteristics. The results showed that macro cracks whose width exceeded 1.25 cm could visibly accelerate water infiltration and provide obvious preferential pathways for water movement. Infiltration depths under macro cracks varied from 45 cm to 65 cm and there was no evident change in infiltration depth when the crack width increased, whereas micro cracks posed little effects on water infiltration. Water infiltration could be regarded as one dimensional semi-infinite homogeneous movement when cracks were narrow and shallow. On the contrary, deep cracks had significant impacts on infiltration, and obvious preferential features were observed around the macro cracks in soil. The results also revealed that area ratio of surface cracks was positively associated with the volume of wet soil ($r=0.95$), and a quantitative approach was proposed to assess the influence of soil cracks on water infiltration.

Key words: Soil Infiltration Crack Dye tracing experiment Geometric characteristics

收稿日期: 2015-02-03 修回日期: 2015-03-24

* 国家自然科学基金资助项目(51179050)、江苏省高校优势学科建设工程资助项目(Y511001)和高等学校学科创新引智计划(111计划)资助项目(B12032)

作者简介: 张展羽, 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

引言

优先流是一种普遍存在的土壤水分运动形式^[1-3]。研究表明,干缩裂缝等大孔隙是优先流的重要通道,对水分运移影响显著^[4]。裂缝会缩短灌溉水和营养物质在土壤中的滞留时间,降低灌水效率,污染地下水^[3-5],这些都制约农业的发展及水资源的可持续利用。

影响入渗的因素有很多^[6],入渗率的测定也有多种方法^[7]。关于裂缝对入渗影响的研究多基于试验开展,以定性分析为主。Liu 等^[8]基于开裂的稻田土壤研究水分入渗,发现裂缝只能短暂地提高入渗率,随着土壤增湿裂缝闭合,入渗率下降并逐渐返回到甚至低于未开裂土壤的状态。而 Sander 等^[9]则认为裂缝闭合后仍旧能为优先流提供通道。这种研究结果的不一致性使得对裂缝下水分运动的机理、过程等仍知之甚少。染色示踪法是试验中常用的手段之一,具有清晰直观、价格便宜等特点,碘-淀粉因碘离子有较高的溶解度、几乎不被土壤吸附、与水流有较好的一致性等优点而被许多学者用作染色示踪剂^[10-11]。土壤裂缝几何特征影响着水分在开裂土壤中的运移^[12],其形态的定量描述虽有多种指标体系^[5,13-15],但从裂缝几何形态角度研究入渗的报道并不多见。

本文基于染色示踪试验,采用数字图像处理技术提取裂缝几何特征参数,并结合染色特征加以分析,探究裂缝对入渗的影响及优先流的发育状况,旨在为开展农业节水灌溉及地下水污染风险评估提供理论基础。

1 材料与方 法

1.1 供试土壤及其处理

供试土壤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(31.86°N,118.60°E)稻麦轮作试验田,田间持水率为 31.40%。试验装置采用 1.0 m × 1.0 m × 1.0 m 立方体土箱(图 1a),侧面设有排水口,底部铺有 0.1 m 厚的砂石,确保其排水条件良好。2014 年 4 月,为研究仅在裂缝条件下的入渗,排除因植物根系延伸或腐烂、动物活动等因素形成的大孔隙的干扰,对试验土壤进行过筛并人为地去杂质。根据田间实测的土壤容重分层称量,将土壤填回至土箱,每 10 cm 一层并夯实。每次填土时将先前夯实过的土层表面打毛,避免出现分层现象。填土完成后,一次灌水 150 L,然后将土箱静置于试验大棚内,土壤在干燥失水的过程中会收缩产生裂缝。期间棚内温度及湿度相对棚外较高,

土体不接受自然条件下降水及人为灌水的补给。

2014 年 7 月,试验土体开裂基本稳定。为消除土箱边界对裂缝网络形成影响,确定实际试验区为 0.8 m × 0.8 m × 0.8 m。将 0.8 m × 0.8 m 有机玻璃框与土箱同心放置在土壤表面(XY 平面),用纸质尺固定玻璃框所在区域的四边,通过 CANON EOS 60D 型数码相机记录土壤表面裂缝形态。采用方格硫酸纸,读取裂缝端点、交点及裂缝中点的坐标(x,y),并通过弹性塑料杆法^[16]测量裂缝深度。利用非试验区域内的土壤测初始含水率,分析土壤基本物理属性见表 1。

表 1 供试土壤基本物理属性

Tab.1 Physical properties of tested soil

土层深度/cm	颗粒粒径质量分数/%			土壤质地	容重/(g·cm ⁻³)	孔隙度/%
	0.02 ~ 0.02 ~	0.02 ~	<0.002 mm			
	2 mm	0.002 mm				
0 ~ 25					1.13	57.36
25 ~ 50	24.83	32.45	42.72	壤质黏土	1.21	54.34
50 ~ 80					1.28	51.70

1.2 染色示踪试验

染色示踪试验设计见图 1b。土体开裂稳定后,在试验区上方采用模拟人工降水的方式,将配置好的 100 L 碘化钾溶液(20 g/L)喷洒到土体中。降水停止后用防水隔热材料覆盖试验区,防止表层土壤水分的蒸发。待水分入渗重分布(24 h)后,沿 X 方向用平铲开始逐层剖取土壤,形成垂直方向的剖面(YZ 平面)。剖面宽度及深度各 0.8 m,用纸质尺固定标记试验区域。剖面间距 4 cm,从 0 ~ 80 cm 共有 21 个剖面。

剖面形成后,采用气压喷壶将可溶性淀粉(50 g/L)和硝酸铁(20 g/L)的混合溶液均匀喷洒在剖面上。水流经过的区域含有碘离子,能被三价铁离子氧化成碘分子,碘分子遇淀粉后反应生成与土壤基色不同的蓝紫色物质。待 20 min 后显色稳定,拍照记录垂直剖面的染色模式。在染色区和未染色区分别取点,辅以方格硫酸纸读取其坐标(y,z),并用干燥法测其质量含水率。取土测含水率时需将表层土壤刮除,避免喷洒的溶液对测定结果的影响。试验于白天进行,用半透明树脂板对自然光进行散射^[17],以保证图像质量,避免采光不均匀等造成后期图像处理的困难。

1.3 图像处理

通过对数字图像处理分析可提取剖面染色模式的量化指标^[18],实现染色信息到流动信息的转化。将染色图像导入到 Photoshop CS6,沿着图像中对照标尺裁剪出所需区域,采用镜头透视校正功能对剪

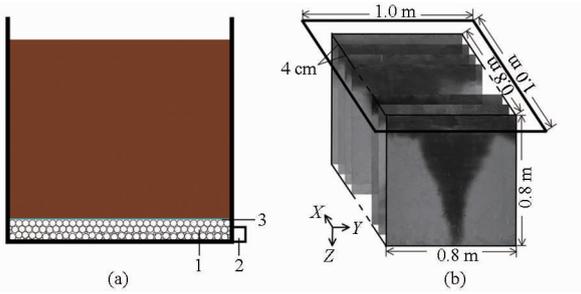


图 1 试验装置纵断面及染色示踪试验设计

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup and dye tracing experiment

1. 砂石 2. 排水口 3. 过滤袋

裁后的图像进行修正,消除拍照时镜头透视变形的影响。结合 Matlab 8.0,按灰度化、二值分割、杂点去除等流程^[19]对图像进行处理,表面裂缝图像的处理采用张展羽等^[20]提出的方法。图像解析度为 2 像素/mm。

1.4 测定指标及方法

试验直接测定的数据及从图像中提取的参数汇总如下:

(1) 土壤表面裂缝长度 L 、裂缝条数 n 及连通性指数 c 。通过张展羽等^[19]提出的方法进行提取计算。

(2) 裂缝宽度 W_a 、入渗深度 h_f 与裂缝位置即裂缝形心坐标 (x, y) 。采用 Matlab 自编程序统计。

(3) 裂缝深度 h_c 。裂缝在土体中的发育多呈弯曲性,这给裂缝深度测定带来了一定的困难。采用 Ringrose 等^[16]提出的方法,用一根直径 1 mm 的弹性塑料杆插入到每条裂缝中,直至感受到明显的阻力。试验土体小裂缝较多(裂缝较浅),裂缝宽度均能够允许塑料杆的插入。此方法操作简便,但有一定的误差。

(4) 表面裂缝面积率,其计算公式为

$$\rho = \frac{S_{cr}}{S} \times 100\% \quad (1)$$

式中 ρ ——表面裂缝面积率, %

S_{cr} ——表面裂缝面积, m^2

S ——土壤表面面积, m^2

表面裂缝面积 S_{cr} 的提取方法为:对表面裂缝的二值化图像,以土壤剖面位置 X 为中心,统计前后各 2 cm 区域内的染色元素个数,再乘以每个元素所占面积。

(5) 第 i 层染色面积比,其计算公式为

$$R = \frac{A_{sti}}{A_i} \times 100\% \quad (2)$$

式中 R ——染色面积比, %

A_{sti} ——剖面第 i 层染色面积, m^2

A_i ——剖面第 i 层土壤面积, m^2

染色面积 A_{sti} 的提取方法为:对染色图像,沿土壤剖面深度,每 4 cm 一层,统计染色元素个数,再乘以每个元素所占面积。

2 结果与分析

2.1 裂缝几何特征及染色信息定量描述

裂缝基本几何形态特征的统计对后期分析裂缝下入渗具有重要意义^[21]。染色示踪试验前,试验土体开裂稳定,土壤表面质量含水率为 17.82%。由于含水率降低,土壤表面轻微地向上卷曲。此时表面共有 105 条裂缝,裂缝总长度 926.6 cm,单裂缝平均长度 8.8 cm,最大宽度 3.6 cm,最小宽度 0.12 cm,裂缝连通性指数为 0.723。裂缝深度的三维分布见图 2,试验区主要有 3 条深 50 cm 左右的裂缝。

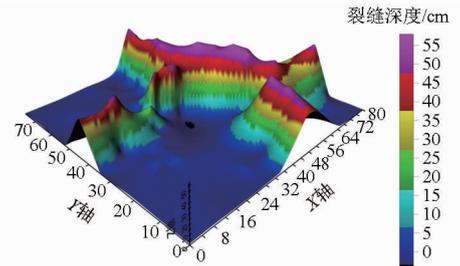


图 2 裂缝深度的三维分布

Fig. 2 Three-dimensional distribution of crack depth

模拟降水后,剖面含水率的变化范围为 22.13% ~ 25.28%,随着深度的增加而逐渐增大。染色面积即为土体的湿润面积,其分布如图 3 所示。随着剖面位置 X 的增大,湿润面积表现出先增后减的趋势。湿润面积最小的剖面位置为 $X = 20$ cm (简称剖面 20),只有 0.185 m^2 ;最大值出现在剖面 48 处,湿润面积占整个垂直剖面面积的 81%。穿过 2 条深度超过 50 cm 裂缝的有剖面 40 ~ 56,其湿润面积值均超过 0.4 m^2 。观察染色图像,除剖面 40 ~ 56 大面积染色外,其他所有剖面的染色形状都可以分为两部分,表层 0 ~ 15 cm 全部染色,向下大致呈三角形状,即染色形状上宽下窄。

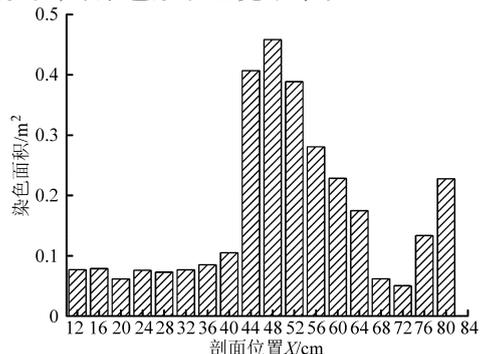


图 3 垂直剖面染色面积的分布

Fig. 3 Distribution of stained areas of vertical profiles

2.2 裂缝宽度与土壤水分入渗

裂缝宽度对提高入渗有显著作用^[8]。采用 Origin 9.0, 以 0.125 cm 为组距, 绘制裂缝实际宽度 W_a 频数分布见图 4。由图 4 可知, W_a 的分布主要集中在 0 ~ 1.25 cm, 之后的频数较少, 分布零散, 据此以 1.25 cm 为界限将裂缝划分为大裂缝和小裂缝, $W_a > 1.25$ cm 为大裂缝, $0 < W_a < 1.25$ cm 为小裂缝。裂缝宽度及其对应入渗深度 h_f 的分布见图 5。可以看出, 大裂缝下 $h_f > 45$ cm, 说明该试验条件下大裂缝能够促进入渗, 为土壤水分运移提供明显的优先通道, 原因为: 裂缝宽度的增加导致土壤内部与空气接触面积增大进而加速土壤内部水分的蒸发^[22], 土壤含水率降低, 促进了土壤内部裂缝的发育, 给水分运移提供了更多的通道, 使其能够向土壤更深处运移。随着大裂缝实际宽度增加, 其入渗深度在 45 ~ 65 cm 范围内变化, 规律性不明显, 分析原因可能是: 当供水强度超过裂缝底部土壤下渗能力, 裂缝内部会形成积水, 裂缝的连通性导致积水沿着优先通道向周围的土壤基质运移。

小裂缝下入渗深度变化范围为 5 ~ 40 cm。对比大、小裂缝位置 (x, y) , 发现 $15 \text{ cm} < h_f < 40 \text{ cm}$ 时, 小裂缝染色数据受到大裂缝的影响。原因可能为: 在垂直剖面上, 裂缝横截面可近似看作为倒立的等腰三角形^[23], 裂缝宽度随深度增加而减小, 裂缝中的水分会短时间内积累到一定高度而产生侧向入渗, 使得小裂缝下染色面积增大, 提取的入渗深度值也随之增大。小裂缝下实际入渗深度为 0 ~ 15 cm, 在 10 cm

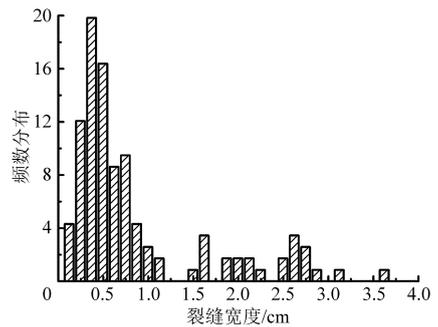


图 4 裂缝宽度频数分布图

Fig. 4 Frequency distribution of crack width

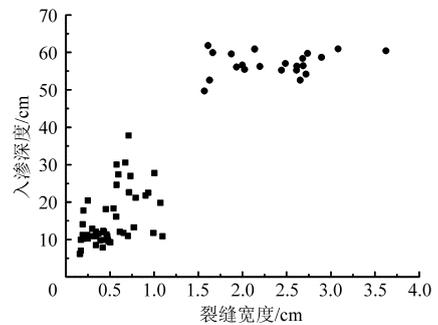


图 5 裂缝宽度与入渗深度的关系

Fig. 5 Relationship between crack width and infiltration depth

左右分布密集, 说明小裂缝对入渗的作用不明显。

2.3 裂缝深度与土壤水分入渗

优先流的发育与深度密切相关, 裂缝深度分布见图 2。染色面积比能够较为准确地反映优先流的发育程度, 其随深度变化曲线如图 6 所示。所有剖面在土壤表层几厘米范围内全部染色, 全部染色深度以下, 染色面积总体上随着深度的增加呈现出非

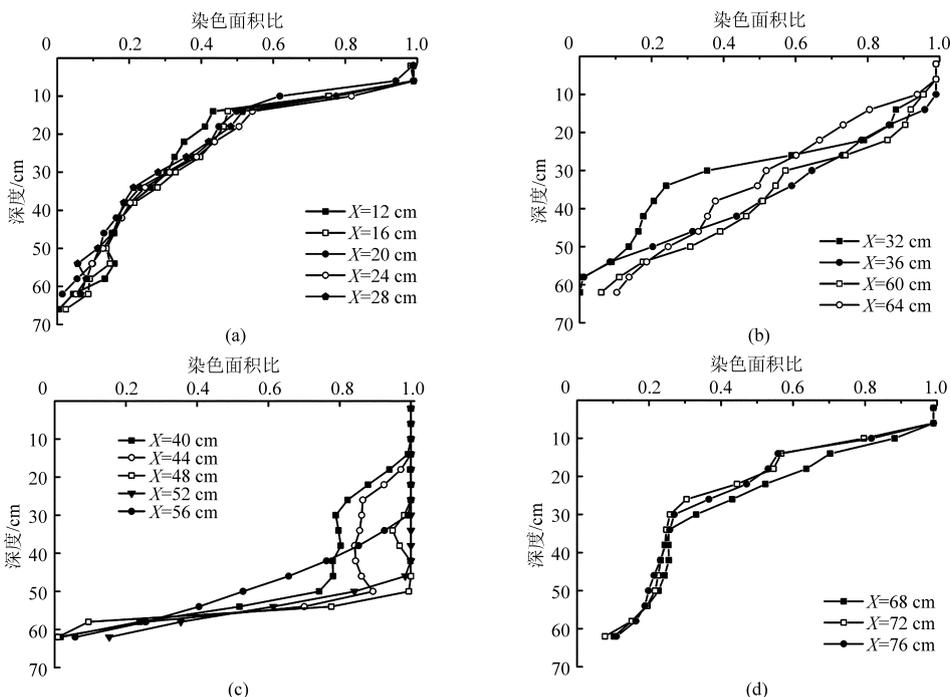


图 6 剖面染色面积比随深度的分布

Fig. 6 Stained area ratio distributions with depth for vertical profiles

线性递减的趋势。这表明降水在初始时段内均匀下渗,随后水分运移表现出明显的非均匀性,入渗水量随着深度增加而逐渐减小。

剖面 12~28 所在区域主要有一条走向平行 Y 轴的深度约 50 cm 的裂缝,同时伴有深度不超过 5 cm 的裂缝,剖面内平均深度小,染色面积比分布有着较高的一致性,染色面积超过 95% 的深度为 6 cm,在 6~15 cm 区域平稳的下降,15~70 cm 区域呈线性下降趋势且下降速度变大,湿润锋平均运移距离较小,剖面最大入渗深度接近,深度的变化不会影响裂缝对土壤水分入渗的作用(图 6a)。剖面 32 与 36 所在区域与剖面 12~28 穿过同一条裂缝,同时剖面 36 临近 X 走向的深度超过 50 cm 的裂缝,剖面内平均深度有所增加。剖面 32 染色面积比分布大致也分为 3 段,染色面积达 95% 的深度为 10 cm,较之前剖面,同一深度对应的染色面积有所增加,而剖面 36 在非均匀流区平稳的下降,全部染色的深度增加到 15 cm,较剖面 32,同一染色面积对应的深度值有所增加(图 6b)。剖面 40~56 穿过两条深度超过 50 cm 的裂缝,其全部染色的最大深度达 55 cm,湿润锋平均运移距离增大,其形状趋于直线,降水主要受重力作用下落到裂缝底部(图 6c)。剖面 68~76 染色面积比变化趋势同剖面 12~28(图 6d)。

剖面 40~56 较其他剖面,同一深度染色面积比有所增加,说明裂缝深度较小时,其对入渗的影响不显著,裂缝在土壤增湿的过程中迅速闭合,闭合后的裂缝可看作均匀的土壤基质,此时土壤水分运移没有表现出明显的优先流特征。随着裂缝深度的增大,染色面积也会随之增加。裂缝深度较大时,能够促进土壤水分入渗,其完全闭合相对缓慢,非完全闭合的裂缝依旧能够在灌溉过程中为水分运移提供优先通道,土壤中优先流运动显著。

2.4 表面裂缝面积率与土壤水分入渗

表面裂缝面积率常用来表征地表的开裂程度^[5]。试验区按原状土容重进行过筛等处理后回填,可视为均质土壤。采用拉格朗日插值法对垂直剖面染色面积进行插值,并以土壤剖面为中心,计算出剖面前后各 2 cm 区域内的土体染色部分体积,即湿润土体的体积。对表面裂缝面积率与湿润体积进行相关性分析,相关系数为 0.95,并进一步对数据进行回归分析(图 7),则湿润土体体积的一元回归

方程为

$$V = 3.91 \times 10^{-3} + 6.246 \times 10^{-4} \rho \quad (3)$$

式中 V ——湿润土体的体积, m^3

拟合式 $R^2 = 0.90, P = 5 \times 10^{-9} < 0.05$, 方程拟合度比较理想,回归关系具有统计学意义。说明了表面裂缝面积影响着灌溉水或降水在土壤中的入渗量。可采用面积率作为土壤入渗程度的表征指标,其值越大,表明湿润土体的体积越大,裂缝对入渗的作用越明显。该指标有助于非破坏性试验条件下定性分析裂缝对土壤水分运移的影响。

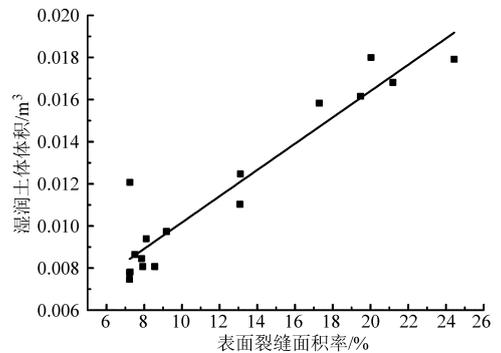


图 7 湿润土体体积与表面裂缝面积率关系

Fig. 7 Relationship between area ratios of surface crack

3 结论

(1) 大裂缝对入渗有显著作用,能够为水分运动提供明显的优先通道。随着大裂缝宽度的增加,其对应的入渗深度在 45~65 cm 范围内变化,没有明显的规律性。小裂缝对土壤水分入渗的作用不明显。

(2) 土壤表层 0~15 cm 为土壤基质流区,15~80 cm 是非均匀流区,入渗量随着深度的增加而减小。裂缝深度较小时,随着土壤增湿裂缝快速闭合,在闭合的裂缝中入渗可看作一维半无限均匀运动,其对入渗影响不明显;裂缝深度较深时,裂缝闭合相对缓慢,非完全闭合的裂缝依旧能为水分运移提供优先通道,土壤水分运移表现出明显的优先流特征,裂缝能够促进入渗。

(3) 表面裂缝面积率与湿润土体体积具有良好的正相关关系,相关系数为 0.95。建立了湿润土体体积的一元回归方程,决定系数为 0.90,提出以表面裂缝面积率作为裂缝对入渗影响程度的表征指标,表面裂缝面积率越大,裂缝对入渗的作用越显著。

参 考 文 献

- Allaire S E, Roulier S, Cessna A J. Quantifying preferential flow in soils: a review of different techniques [J]. Journal of Hydrology, 2009, 378(1): 179-204.
- Wallender W W, Tanji K K, Gilley J R, et al. Water flow and salt transport in cracking clay soils of the Imperial Valley, California [J]. Irrigation and Drainage Systems, 2006, 20(4): 361-387.

- 3 Novak V, Šimáunek J, Genuchten M T V. Infiltration of water into soil with cracks [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2000, 126(1): 41 – 47.
- 4 Greve A, Andersen M S, Acworth R I. Investigations of soil cracking and preferential flow in a weighing lysimeter filled with cracking clay soil [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 393(1): 105 – 113.
- 5 Novak V. Soil-crack characteristics-estimation methods applied to heavy soils in the NOPEX area [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 98(1): 501 – 507.
- 6 张婧, 雷廷武, 张光辉, 等. 环式入渗仪测量土壤初始入渗率效果试验 [J]. *农业机械学报*, 2014, 45(10): 140 – 146.
Zhang Jing, Lei Tingwu, Zhang Guanghui, et al. A new experimental method for observing initial soil infiltration under ring infiltrometer [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(10): 140 – 146. (in Chinese)
- 7 张婧, 雷廷武, 胡雅琪, 等. 优先流影响下环式入渗仪内入渗过程可视化试验 [J]. *农业机械学报*, 2015, 46(4): 155 – 160.
Zhang Jing, Lei Tingwu, Hu Yaqi, et al. Visualized experiment for observing infiltration process affected by preferential flow inside ring infiltrometer [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(4): 155 – 160. (in Chinese)
- 8 Liu C, Cheng S, Yu W, et al. Water infiltration rate in cracked paddy soil [J]. *Geoderma*, 2003, 117(1): 169 – 181.
- 9 Sander T, Gerke H H. Preferential flow patterns in paddy fields using a dye tracer [J]. *Vadose Zone Journal*, 2007, 6(1): 105 – 115.
- 10 Wang K, Zhang R. Heterogeneous soil water flow and macropores described with combined tracers of dye and iodine [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 397(1): 105 – 117.
- 11 Sheng F, Wang K, Zhang R, et al. Characterizing soil preferential flow using iodine-starch staining experiments and the active region model [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 367(1): 115 – 124.
- 12 Tang C, Shi B, Liu C, et al. Influencing factors of geometrical structure of surface shrinkage cracks in clayey soils [J]. *Engineering Geology*, 2008, 101(3): 204 – 217.
- 13 Baer J U, Kent T F, Anderson S H. Image analysis and fractal geometry to characterize soil desiccation cracks [J]. *Geoderma*, 2009, 154(1): 153 – 163.
- 14 唐朝生, 施斌, 刘春, 等. 影响黏性土表面干缩裂缝结构形态的因素及定量分析 [J]. *水利学报*, 2007, 38(10): 1186 – 1193.
Tang Chaosheng, Shi Bin, Liu Chun, et al. Factors affecting the surface cracking in clay due to drying shrinkage [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(10): 1186 – 1193. (in Chinese)
- 15 Vogel H, Hoffmann H, Roth K. Studies of crack dynamics in clay soil: I. experimental methods, results, and morphological quantification [J]. *Geoderma*, 2005, 125(3): 203 – 211.
- 16 Ringrose-Voase A J, Sanidad W B. A method for measuring the development of surface cracks in soils: application to crack development after lowland rice [J]. *Geoderma*, 1996, 71(3): 245 – 261.
- 17 Forrer I, Papritz A, Kasteel R, et al. Quantifying dye tracers in soil profiles by image processing [J]. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51(2): 313 – 322.
- 18 Weiler M, Flühler H. Inferring flow types from dye patterns in macroporous soils [J]. *Geoderma*, 2004, 120(1): 137 – 153.
- 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]. *农业工程学报*, 2014, 20(10): 83 – 89.
Zhang Zhanyu, Zhu Wenyan, Zhu Lei, et al. Effects of roots and salinity on law of development for farmland soil desiccation crack [J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 20(10): 83 – 89. (in Chinese)
- 20 张展羽, 王策, 朱成立, 等. 土壤干缩裂缝网络几何特征 [J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2014, 39(10): 1465 – 1472.
Zhang Zhanyu, Wang Ce, Zhu Chengli, et al. Geometric characteristics of shrinkage crack network in soil [J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2014, 39(10): 1465 – 1472. (in Chinese)
- 21 Wang Y, Feng D, Ng C W. Modeling the 3D crack network and anisotropic permeability of saturated cracked soil [J]. *Computers and Geotechnics*, 2013, 52(1): 63 – 70.
- 22 Adams J E, Hanks R J. Evaporation from soil shrinkage cracks [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1964, 28(2): 281 – 284.
- 23 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.