

灌溉优先流对裂隙分布密度、灌水强度及土壤湿度的响应机理

段凤仪¹, 朱成立¹, 王策^{1*}, 陈于², 马靓¹

(1.河海大学 农业科学与工程学院, 南京 211100; 2.江苏省农村水利科技发展中心, 南京 210029)

摘要:【目的】研究土壤初始含水率(土壤湿度)、裂隙分布密度及灌水强度对裂隙优先流强度的影响机理。【方法】构建基于水量平衡原理的优先流双域渗透模型, 并通过染色示踪试验进行物理模拟及模型验证, 基于模型数值模拟了裂隙分布密度、初始含水率和灌水强度三维因素旋转组合下的优先流特征。【结果】试验区的浅小型裂隙(裂隙平均宽度 $0.2\text{ cm} \leq w_c \leq 1.0\text{ cm}$, 平均深度 $0.5\text{ cm} \leq d \leq 10\text{ cm}$)与优先流的发育无直接联系, 宽深型裂隙(裂隙平均宽度 $w_c \geq 2\text{ cm}$, 平均深度 $d \geq 50\text{ cm}$)是产生裂隙优先流的主要原因; 宽深型裂隙分布密度增大, 基质流深度、染色面积率以及灌水均匀度增加; 模型对裂隙优先流的模拟效果较好 ($R^2=0.951$, $P<0.01$); 模拟结果显示, 裂隙深度很大程度上决定了优先流的最大入渗深度; 接近土壤饱和导水率的灌水强度无法触发优先流, 随着灌水强度增加, 优先流程度和最大入渗深度增加, 基质流深度和灌水均匀度降低; 随着土壤初始含水率和裂隙分布密度增大, 基质流深度和灌水均匀度增加, 优先流程度降低。【结论】对于缩胀性较强、有机质量丰富的农田土壤, 降低灌水强度、提高土壤初始含水率及裂隙分布密度能有效抑制裂隙优先流并提高灌水质量。

关键词: 裂隙优先流; 双域渗透模型; 裂隙分布密度; 土壤初始含水率; 灌水强度

中图分类号: S152.7

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022263

OSID:



段凤仪, 朱成立, 王策, 等. 灌溉优先流对裂隙分布密度、灌水强度及土壤湿度的响应机理[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(2): 32-41.

DUAN Fengyi, ZHU Chengli, WANG Ce, et al. Effects of Cracking Patterns and Antecedent Soil Water Content on Preferential Flow of Irrigated Water[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(2): 32-41.

0 引言

【研究意义】土壤的空间异质性导致水分绕过土壤基质并沿着土壤中相互连通甚至贯穿的优先通道集中流动^[1], 这种现象被称为优先流。农田土壤干缩过程中产生的裂隙是诱发优先流的常见因素^[2]。由于干缩裂隙具有孔隙尺寸大、连通性强等特点, 在高强度灌水或降水过程中, 水分会沿裂隙通道向深层快速迁移, 使灌溉初期优先流成倍增加^[3]。同时, 入渗水流挟带土壤中的养分或污染物沿着优先通道直接并快速地下渗, 造成土壤养分淋失和灌溉效率降低, 并增加了污染地下水的风险^[4-5]。因此, 研究裂隙优先流机理对降低水肥流失和地下水污染均具有实际意义。

【研究进展】近年来, 国内外有关土壤优先流的研究呈持续增长的趋势。Guo等^[6]分析了190份有关

优先流的研究, 发现大孔隙/裂隙通道特征、水分输入特征(即灌水/降水特征)和初始土壤湿润条件是优先流研究中较为关键的3个控制因素, 但部分影响因素对裂隙优先流的作用机制尚未存在定论。例如, Quisenberry等^[7]通过田间试验发现, 当土壤初始含水率更高时, 水分和溶质迁移的深度更大, 优先流现象更明显。而Hardie等^[8]在农场4个地点开展染色示踪试验发现, 与湿润土相比, 干燥土中染色剂入渗深度和入渗率均成倍增加。其原因在于现场试验中初始含水率同时影响了土壤前期的导水特性及初始裂隙形态, 复杂的土壤初始条件组合使得初始含水率对优先流的影响机制难以得到准确分析^[9]。此外, Wells等^[10]认为, 裂隙优先流的入渗深度和入渗量与裂隙深度正相关。Luo等^[11]研究发现, 裂隙/大孔隙网络连通性越好, 土壤导水率越大, 导水能力越强。而唐朝生等^[12]研究表明, 当单位面积内裂隙分布密度增大时, 裂隙总长度和网络连通性增加, 但裂隙的宽度和发育深度有所降低。裂隙特征的不同组合将影响优先流的发育模式与强度。此外, 降水/灌水强度对优先流的激活效应也受到了土壤初始状态的强烈影响^[13]。【切入点】国内外关于灌水强度与土壤初始状态对优先流的研

收稿日期: 2022-05-11

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(52109053); 江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20200523); 江西省水利科学院开放研究基金项目(2021SKTR03); 国家科技奖后备培育项目(20212AEI91011); 江西省重点研发计划项目(20203BBGL73226)

作者简介: 段凤仪(1997-), 女, 硕士研究生, 主要从事农田裂隙及裂隙优先流理论研究。E-mail: dfy@hhu.edu.cn

通信作者: 王策(1989-), 男, 教授, 主要从事农田裂隙及其优先流理论、高效灌排理论研究。E-mail: wangce@hhu.edu.cn

究中,主要以室外试验或模型研究为主,室外试验往往存在无关因素干扰,难以有效分析各因素对优先流的影响机制;室内试验或模型研究多为单因素分析,忽略了多因素组合的相互影响。【拟解决的关键问题】为此,本文基于裂隙优先流双域渗透模型,选取土壤初始含水率、裂隙分布密度及灌水强度 3 个关键因素开展多变量旋转组合下的优先流模拟。构建模型基于表面入渗、层流运移、裂隙边壁吸渗与灌水强度相平衡的水量平衡原理^[14],并通过染色示踪试验进行验证。通过多变量组合模拟,建立各因素与裂隙优先流的完整关系网络,综合分析各因素对裂隙优先流的影响机制,为探索有效抑制裂隙优先流的田间措施及灌水制度提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 裂隙优先流染色示踪试验

1.1.1 供试土壤及其处理

试验区位于江苏南京河海大学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)。气候为北亚热带季风气候,年均气温 15.7℃,年均日照时间 2 017.2 h,多年平均降水量 1 200 mm,年均蒸发量 900 mm。试验土壤取自试验区稻麦轮作旱田表层的黏壤土,将其过 10 mm 筛并人工去除根系杂草等杂质后按 1.25 g/cm³ 的体积质量逐层(每层 10 cm)回填至实验装置内,在每层回填后对土壤表面进行磨毛处理,避免分层。实验装置为用 1.0 m×1.0 m×1.0 m 的有机玻璃容器,其前侧可拆卸,以便纵剖土壤,后侧设置直径 1.0 cm、间隔 10 cm 的圆孔用于插入 TDR(用于测量土壤含水率)的探针。填土完成后,采用模拟喷灌的方式使土壤湿润,随后隔绝降水使其自然开裂。裂隙发育期间,定期观测裂隙发育宽度与深度,待裂隙发育宽度与深度到达稳定且土壤表层含水率降至凋萎系数后,裂隙培育结束。随后利用相机记录表面裂隙形态,采用弹性塑料杆测量裂缝深度。通过 TDR 测量土壤含水率,从而得到土壤初始含水率。

1.1.2 染色示踪试验

裂隙培育完成后,采用碘化钾-淀粉染色示踪技术观测该裂隙形态下的水流运移。通过模拟降水器将含有碘化钾示踪剂(20 g/L)的灌溉水以 60 mm/h^[15] 的灌水强度灌入开裂土壤中,灌水定额为 100 mm^[16]。待水分入渗重分布(12 h)后,每间隔 4 cm 对土壤进行逐层纵剖,对每个剖面进行平整,采用气压喷雾器对剖面均匀喷洒淀粉(50 g/L)和硝酸铁(20 g/L)的混合液。由于灌溉水中加有碘化钾示踪剂,其中的碘离子会被三价铁离子氧化为碘分子,碘分子与淀粉反应将显示出蓝紫色,从而显现出灌溉水的运移区域。

待 20 min 显色稳定后,对垂直剖面进行拍照记录。

1.1.3 染色图像处理

将拍摄的剖面图像通过Photoshop进行扭曲矫正和剪裁,裁去底部和侧边受边界效应影响的区域。随后利用Photoshop对染色区和未染色区进行分割,并将染色区和未染色区域分别设置黑色和白色。最后通过MATLAB对图像进行二值化,将黑色和白色分别赋值为1和0,并将处理结果导出为数值化矩阵,用于后期计算。

1.1.4 裂隙优先流评价参数

1) 基质流深度 D (cm),定义为土壤剖面表面至 z 层间,每层染色率均不小于 $0.95 \text{ cm}^2/\text{cm}^2$ 时对应的深度。 z 层的染色率表达式为:

$$\begin{cases} R_{\text{dye}}(z) = \frac{\sum_{z-\Delta z}^{z+\Delta z} \sum_1^N \beta(x, z)}{2\Delta z N}, \\ D = z/\lambda \end{cases} \quad (1)$$

式中: z 为剖面像素图中 z 方向上的行数; $R_{\text{dye}}(z)$ 为剖面 $z - \Delta z$ 至 $z + \Delta z$ 层间的染色覆盖率(cm^2/cm^2); $\beta(x, z)$ 为剖面图上任意位置(x, z)处的赋值,未染色时 $\beta(x, z) = 0$,染色时 $\beta(x, z) = 1$; N 为剖面像素图列数; λ 为像素转换为尺寸的转换系数,这里取为 $1/20 \text{ cm/pxl}$ 。

2) 优先流指数 R_{pf} (cm^2/cm^2),定义为优先流区占总染色区 A_{dye} 面积比,计算式为:

$$R_{\text{pf}} = \frac{A_{\text{dye}} - L_N D}{A_{\text{dye}}} \quad (2)$$

式中: A_{dye} 为总染色面积 (cm^2),其值等于像素图中染色像素总和乘以 λ^2 ; L_N 为剖面像素图对应的列宽 (cm),其值等于剖面像素图列数乘以 λ ; 其他指标意义同上。

3) 最大入渗深度 H_M (cm),指染色溶液下渗的最大深度。剖面上任意点(x, z)的入渗深度 $H_1(x)$ 可表示为:

$$\begin{cases} H_1(x) = \lambda \sum_{z=1}^M \beta(x, z), \\ H_M = \max(H_1) \end{cases} \quad (3)$$

式中: M 为剖面像素图的行数; 其他指标意义同上。

4) 灌水均匀度 E_u (cm/cm),反映了染色区域分布的均匀度,是衡量灌水质量的重要指标,估算式为:

$$\begin{cases} E_u = \left(1 - \frac{|\Delta H|}{\bar{H}}\right) \\ |\Delta H| = \frac{\sum_i^N |H_1(x) - \bar{H}|}{N} \\ \bar{H} = \frac{1}{N} \sum_i^N H_1(x) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\bar{H}$ 为剖面平均入渗深度 (cm); ΔH 为剖面任意点入渗深度离均差之和除以剖面像素图总列数 (cm); 其他指标意义同上。

1.2 裂隙优先流分析模型

1.2.1 模型原理

1) 双域渗透模型

灌溉水在重力作用下会沿优先通道快速下渗产生优先流,其流速远大于基质流流速^[17]。因此,可采用基质流模式及快速迁移的优先流模式分别对基质域和裂隙域的水分运移进行模拟。本文采用基于水量平衡原理的裂隙优先流双域渗透模型^[14],基质域的水分运移仍视为毛细管驱动流动,采用 Darcy-Richards 方程进行描述;裂隙域中将优先流简化为重力驱使的重力流,并假定为沿边壁的层流运动,采用基于哈根-泊肃叶形式的层流方程模拟,同时考虑基质域-裂隙域间水平吸渗,水平吸渗过程采用 Green-Ampt 模型进行描述。由于层流参数复杂,本文对裂隙边壁层流运移过程进行简化,通过水量平衡原理,即表面入渗、层流运移、裂隙边壁吸渗与灌水强度相平衡,迭代推求出层流运移规律,以减少层流参数,提高模拟结果的准确性。

2) 水量平衡原理

将土壤收缩块区简化为方形,裂隙网络简化为纵横交错且裂隙宽度与深度均匀的对称网格。由于入渗曲线对称分布,可将研究区对称化(图1)。

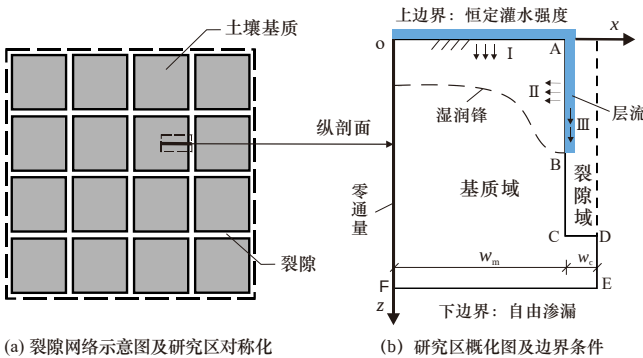


图1 研究区概化模型与边界条件

Fig.1 Generalized model and boundary conditions of study area

根据水量平衡原理,即灌水强度可转换为土壤表面入渗率(I)、裂隙边壁水平吸渗率(II)和裂隙边壁层流通量(III)3部分。因此,在任意时间段($t, t + \Delta t$)在水量平衡计算式为:

$$w_m R_0 \Delta t = w_m I_{sur} + l_{wf} I_h + \Delta V_{lar}, \quad (5)$$

式中: I_{sur} 为表层土壤入渗量 (cm); I_h 为裂隙边壁入渗量 (cm); ΔV_{lar} 为增加的层流量 (cm²); l_{wf} 裂隙边壁湿润段长度 (cm); w_m 为基质域宽度 (cm); R_0 为灌水强度 (cm/min)。

①表层土壤入渗量

$$I_{sur} = \int_t^{t+\Delta t} i(t) dt. \quad (6)$$

土壤表层入渗量根据表层土壤入渗能力和灌水强度决定,假设灌水强度恒定且高于土壤表层饱和导

水率 K_s , 即 $R(t) = R_0$, 且 $R_0 > K_s$ 。若土壤表面初始状态为完全干燥,则上表层入渗能力随土壤含水率增高而逐渐减小。因此,不同阶段的入渗率可采用 Smith 公式^[18]描述为:

$$i(t) = \begin{cases} R_0 & (t < t_p) \\ K_s + A(t - t_0)^{-a} & (t \geq t_p) \end{cases}, \quad (7)$$

式中: t_0 为经验系数 (min), 其值等于渐近线横坐标; t_p 为径流发生时刻 (min), 即积水时刻或径流发生时刻; A 和 a 为入渗参数。

②裂隙边壁入渗量

$$l_{wf} I_h = \int_t^{t+\Delta t} \int_0^{l_{wf}} i_h(t) dz dt, \quad (8)$$

式中: $i_h(t)$ 为裂隙边壁水平单宽入渗率 (cm/min)。

当 $0 \leq t < t_p$ 时,模拟喷灌 R_0 全部通过土壤表面入渗,此时进入裂隙的水流量为 0,故裂隙边壁入渗量也为 0;当 $t \geq t_p$ 时,超出表层入渗能力的水分进入裂隙内,一部分沿裂隙边壁层流下移,一部分沿裂隙边壁水平入渗,裂隙边壁入渗量由边壁湿润段长度 l_{wf} 和裂隙边壁导水率决定,其裂隙边壁湿润段长度随时间动态变化,裂隙边壁水平入渗率 $i_h(t)$ 可根据 Green-Ampt 模型及土壤导水率函数获得。

③裂隙内增加的层流体积 ΔV_{lar}

ΔV_{lar} 指进入裂隙的水流量,其层流厚度随灌溉强度变化而变化,难以获取,于是通过水量平衡原理将其简化,即先通过 Hydrus 2D 软件分段模拟,求得在时间步长 Δt (min) 内表层土壤入渗量 I_{sur} 以及裂隙边壁入渗量 I_h , 后根据水量平衡原理建立等式,反复迭代推求出裂隙边壁湿润段长度 l_{wf} 的推移规律以及裂隙内层流参数。其中裂隙湿润段长度最大值不超过裂隙边壁最大深度。

1.2.2 初始条件与边界条件

根据模型原理可知,优先流的发育可分为 2 个阶段,各阶段初始及边界条件有所不同:

1) 基质流阶段

当 $0 \leq t \leq t_p$ 时,水分沿土壤表面均匀入渗,水分上边界(OA)为定通量边界;左右边界(OF、AC、DE)正负通量近似相等,下边界(EF)通量可忽略不计,均设为零通量边界,即:

$$\begin{cases} -K(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) = R_0 & (OA) \\ -K(\theta) \frac{\partial h}{\partial x} = 0 & (OF, AC, DE) \\ -K(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) = 0 & (EF) \end{cases}. \quad (9)$$

2) 裂隙优先流阶段

当 $t > t_p$ 时,土壤表面产生的径流进入裂隙内,一部分沿裂隙边壁层流下移,一部分水平吸渗至基质域内,形成优先流。AB 边界在此阶段为动态边界,于是有:

$$\begin{cases} -K(\theta)\left(\frac{\partial h}{\partial z}-1\right)=i(t) & \text{(OA)} \\ -K(\theta)\frac{\partial h}{\partial x}=0 & \text{(OF、DE)} \\ -K(\theta)\frac{\partial h}{\partial x}=\left[R_0-i(t)\right]\frac{w_m}{l_{wf}} & \text{(AB)} \end{cases}, \quad (10)$$

式中： $K(\theta)$ 为土壤饱和导水率； h 为负压水头（cm）。

1.2.3 计算参数

土壤持水特征曲线和非饱和导水率分别基于 VG 模型和 Mualem 模型：

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + |\alpha h|^n} \right]^m, \quad (11)$$

表 1 试验土壤的物理-水力参数

Table 1 Physical-hydraulic properties of the soils in experiments

土层 深度/cm	机械组成/%			体积质量/ (g cm ⁻³)	初始 含水率/%	饱和 含水率/%	残余 含水率/%	参数 n	参数 α	饱和导水率/ (cm min ⁻¹)
	砂粒	粉粒	黏粒							
0~25	32.9	38.7	28.4	1.216	10.8	49.1	8.8	1.476	1.06×10^{-2}	1.863×10^{-2}
25~50	33.4	37.3	29.3	1.235	15.6	51.7	9.7	1.379	1.50×10^{-2}	1.676×10^{-2}
50~70	32.7	39.8	27.5	1.320	22.0	48.2	9.5	1.374	1.45×10^{-2}	1.291×10^{-2}

1.2.4 模型验证方法

模型评价采用决定系数 R^2 和均方根误差（root mean square of error, $RMSE$ ）验证模型有效性。一般认为 R^2 越大， $RMSE$ 越小，模型拟合的效果越好。

2 结果与分析

2.1 试验结果与分析

从染色纵剖面中选取 9 个典型剖面进行分析，由于裂隙随机分布的特点，每个剖面可视为 1 组重复，土体表面裂隙网络图及典型剖面的染色分布如图 2 所示，图 2（a）中 S_i ($i=1, 2, \dots, 9$) 表示裂隙节点/端点。根据试验测定的裂隙形态数据，可将试验区裂隙分为 3 类：浅小型裂隙（裂隙平均宽度 $0.2 \text{ cm} \leq w_c \leq 1.0 \text{ cm}$ ，裂隙平均深度 $0.5 \text{ cm} \leq d \leq 10 \text{ cm}$ ）、宽深型主裂隙（裂隙平均宽度 $w_c \geq 2 \text{ cm}$ ，裂隙平均深度 $d \geq 50 \text{ cm}$ ）及

式中的： S_e 为土壤相对饱和度； θ_s 、 θ_r 分别为饱和含水率和残留含水率； L 、 m 、 n 、 α 为土壤导水曲线/持水特征曲线参数， L 取 0.5， $m=1-1/n$ ， $n>1$ 。以上参数通过 Hydrus2D 软件中的 Neural Network Predictions 模块预测，输入土壤的物理参数（黏粒、粉粒及砂粒质量分数与土壤体积质量），得到试验土壤各层的物理-水力参数如表 1 所示。

介于二者之间的中等裂隙。图中除 3 条呈“Y”字形连通分布的主裂隙（ S_1S_4 、 S_2S_9 、 S_3S_6 ）以及 1 条最大深度达 13 cm 的中等裂隙（ S_7S_8 ）外，其他裂隙均为表面浅小裂隙。由于浅小裂隙在灌水过程中会快速闭合，对水分入渗影响不明显^[19]，所以优先流主要取决于宽深型裂隙。将图 2（a）和图 2（b）对应分析可知，本试验的染色结果与该结论吻合，优先流的产生位置均与主裂隙一一对应：剖面 1—剖面 3 的优先流主要由主裂隙 S_5S_6 作用产生；剖面 4—剖面 6 上呈一大一小的 2 部分优先流分别由 S_1S_2 和 S_7S_8 共 2 条裂隙作用产生，而剖面 7—剖面 9 经过主裂隙 S_3S_5 ，并且邻近裂隙 S_3S_4 、 S_2S_9 ，其染色覆盖率受到了 S_3S_4 、 S_2S_9 裂隙在纵轴方向上的水分水平运移的影响，因此该优先流分布模式受到以上 3 条主裂隙控制。

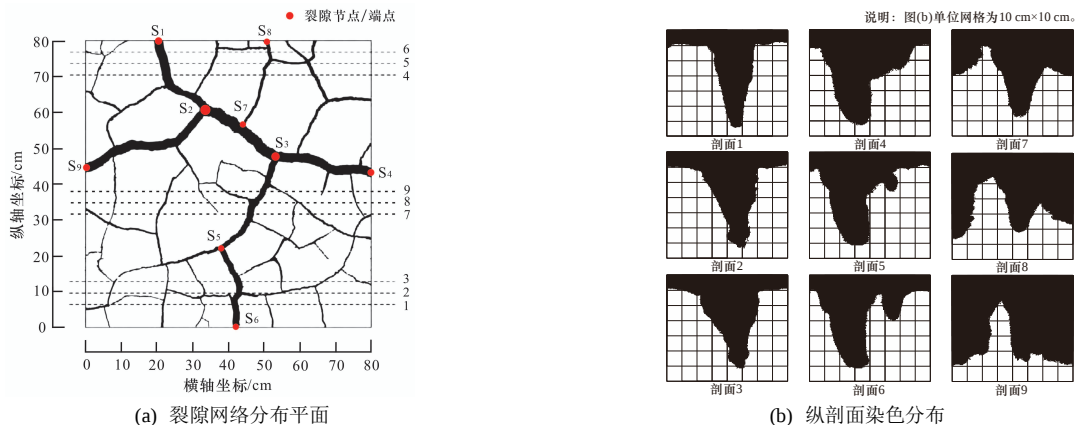


图 2 裂隙网络及典型剖面染色分布

Fig.2 Fracture network and typical profile dye distribution

分析各剖面染色覆盖率随深度的变化曲线（图 3）可知，开裂土体的前（剖面 1—剖面 3）、中（剖面 7—剖面 9）、后（剖面 4—剖面 6）部的覆盖率减小趋势呈明显区别。剖面 1—剖面 3 的染色覆盖率在土层深

度 9 cm 左右迅速减小，而剖面 7—剖面 9 的染色覆盖率从土层深度 20 cm 左右才逐渐减小。计算各剖面优先流评价参数（表 2）可知，随着主裂隙的增多，基质流深度、染色面积率以及灌水均匀度显著增加。由

此可知,各剖面主裂隙数量的不同是造成染色分布模式出现差异的主要原因。主裂隙数的增加会增大表面裂隙率及裂隙边壁面积,导致入渗总表面积增加,土壤表面的入渗能力增强,基质流阶段延长,基质流深度因此增大;此外,主裂隙数的增加导致水分沿多个优先通道下渗,使得渗漏量成倍增加,因此染色面积率增加;最后,主裂隙数的增加及裂隙间连通性的增加,有助于水分同时沿多个优先通道下渗,避免了局

部集中下渗,因此均匀度提高。此外,图3显示各剖面最大入渗深度没有显著差异,均处于60~70 cm之间,说明最大入渗深度与裂隙数量分布差异没有直接联系,主要取决于裂隙最大深度。综上所述,裂隙优先流的形成不仅受到了裂隙形态(裂隙深度及宽度)的影响,还与裂隙分布特征(剖面上的主裂隙数)密切相关。其中,裂隙的分布特征主要通过影响裂隙间的连通性及土壤表面的导水能力影响优先流的分布。

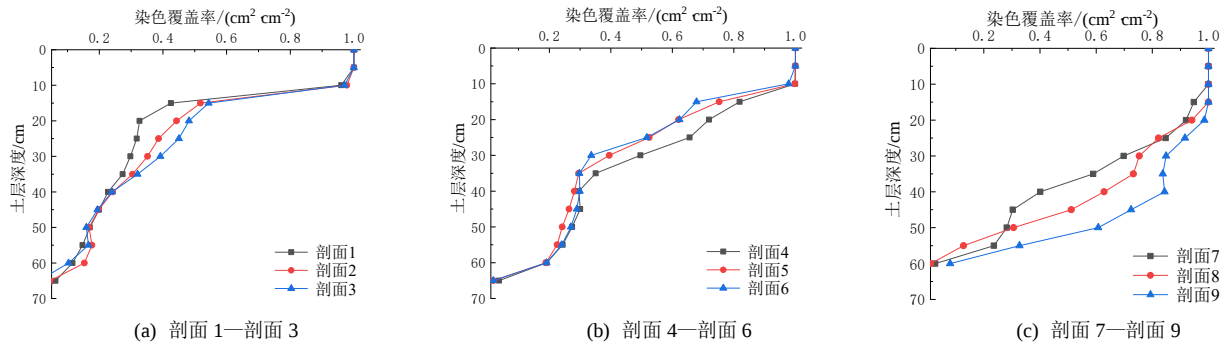


图3 典型剖面染色覆盖率随土层深度变化

Fig.3 Variations in dye coverage with soil depth for all profiles

表2 各剖面优先流评价参数

Table 2 Parameters of crack preferential flow for 9 profiles

剖面 序号	主裂 隙总 数/条	剖面裂 隙最大 深度/cm	基质流 深度/cm	染色覆盖率/ (cm ² cm ⁻²)	灌水均匀度/ (cm cm ⁻¹)
1	1	52.50	8.70	0.32	0.27
2	1	51.00	9.20	0.35	0.34
3	1	51.70	9.10	0.36	0.37
4	2	50.20	9.00	0.41	0.41
5	2	49.00	10.35	0.42	0.46
6	2	49.50	10.20	0.44	0.51
7	3	49.20	11.75	0.45	0.70
8	3	48.60	16.80	0.56	0.73
9	3	49.00	21.10	0.70	0.81

2.2 模型模拟与验证

采用Hydrus 2D对优先流进行分阶段模拟。基于剖面1的1/2对称区域进行建模,模拟区水平尺寸为40 cm,垂直尺寸为70 cm,半裂隙宽度为1 cm,裂隙深度为50 cm,各层土壤的物理-水力参数见表1。模拟灌溉强度 $R_0=0.10$ cm/min^[15],灌溉总时长为100 min^[16]。上边界条件采用Smith公式描述,其中的临界时间 t_p (又叫优先流发生时刻或径流点)通过数值模拟得到,基于土壤剖面形态与水力参数采用Hydrus2D模拟表面入渗,当表面含水率达到表层土壤饱和含水率时视为优先流发生,模拟可得 $t_p=14.4$ min。之后采用SPSS 25.0拟合计算Smith公式参数 A 、 α 和 t_0 ,其值分别为0.554、0.828、4.298 min。据此得到土壤上边界条件,由此计算出进入裂隙的流量,并根据水量平衡原理推算裂隙内的层流参数及水平吸渗参数。随后分阶段对入渗过程进行模拟,最大迭代数设定为10,不考虑入渗过程中裂隙的愈合情况,最后模拟得到该

剖面优先流的发育过程如图4所示。

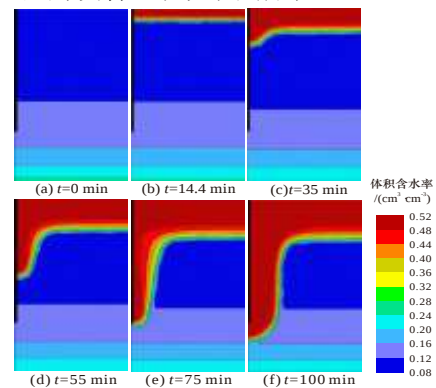


图4 数值模拟优先流发育过程

Fig.4 Numerical simulation for crack preferential flow

由图4可知,裂隙优先流的发育过程可分为:①基质流阶段($0 \leq t \leq 14.4$ min),水分垂直入渗,湿润峰均匀向下推进,呈基质流态,该阶段持续时间受灌水强度和初始含水率控制;②裂隙内层流推移阶段($14.4 \text{ min} \leq t \leq 75 \text{ min}$),当土壤表面达到饱和含水率后,多余的水分进入裂隙,并通过层流的方式向下推进,同时水分通过裂隙边壁向四周扩散,呈现出漏斗状的优先流态。层流推移速度主要受灌水强度控制,其最大推移深度受裂隙深度限制,因此裂隙深度很大程度上决定了优先流的最大入渗深度。③裂隙饱和入渗阶段($75 \text{ min} \leq t \leq 100 \text{ min}$),当层流运动到达裂隙底端,裂隙内逐渐积水饱和,之后裂隙底及边壁在积水作用下开始饱和入渗,因此优先流最大入渗深度往往略大于裂隙最大深度。该阶段优先流发育主要受裂隙边壁饱和入渗率和裂隙内压力水头的影响,优先流发育缓慢。

根据染色剖面与模拟图像,计算出染色覆盖率的实测值与模拟值如图5所示。经计算, $R^2=0.951$ ($P<0.01$), $RMSE$ 为0.095,说明该模型能较好地模拟优先流的分布特征。但模拟值在15~30 cm土层深度处的染色覆盖率略小于实测值,其原因在于实际喷灌过程中水分直接落入裂隙内并沿裂隙壁发生水平入渗造成实测结果与模拟结果存在一定差异。此外,由于裂隙深度测量不准确,测量深度小于实际深度,因此最大入渗深度的模拟值偏小。整体来看,基质流模拟的准确性高于优先流模拟部分。

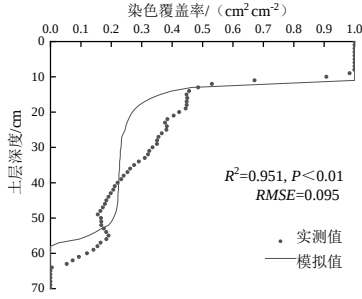


图5 裂隙优先流模拟值与实测值(剖面1)对比

Fig.5 Measured and simulated data of dye coverage of preferential flow for Profile 1

2.3 不同初始条件组合下的入渗模拟

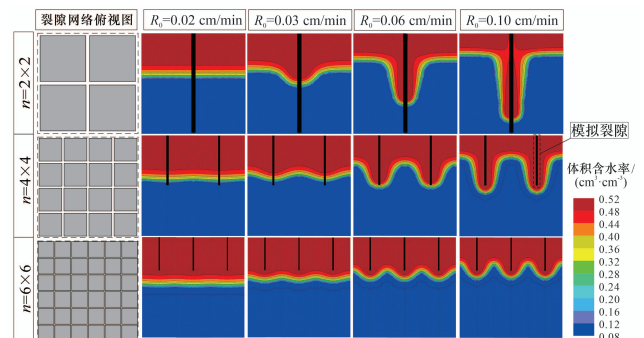
为进一步揭示不同土壤初始含水率、裂隙分布密度和灌水强度对优先流程度和灌水质量的影响,对裂隙优先流双域渗透模型进行应用。本文采用单位面积内收缩块区数量(n)反映裂隙分布密度。选取了2组初始含水率 θ_0 (0.2、0.35 cm^3/cm^3)、3组裂隙分布密度(2×2 、 4×4 、 6×6 cm/cm^2)以及4组灌水强度 R_0 (0.10、0.06、0.03、0.02 cm/min)进行旋转组合设计,各组处理灌水定额均为6.0 cm。基于前期研究成果可知,裂隙面积率及裂隙深度与土壤含水率负相关^[20],根据其相关曲线,得到含水率为0.2 cm^3/cm^3 和0.35 cm^3/cm^3 时所对应的裂隙面积率为9.5%和4.5%。同时,根据相同含水率下裂隙表面的裂隙率相同以及裂缝的平均宽度随裂隙分布密度增大而减小的规律^[12]确定裂隙分布密度下的裂隙宽度。裂隙深度按试验测定的宽深比 $K=0.04$ cm/cm 确定。数值模拟不同初始条件和边界条件的设定见表3。

表3 数值模拟初始条件和边界条件的旋转组合设计

Table 3 Rotation design of initial conditions and boundary conditions for modeling

初始土壤含水率/ (cm^3/cm^3)	初始裂隙率/%	裂隙分布密度/ (cm/cm^2)	裂隙宽度/cm	裂隙深度/cm	灌水强度/ (cm/min)
0.20	9.5	2×2	2.00	50.0	0.10、0.06、 0.03、0.02
0.35	4.5	2×2	1.00	25.0	
0.20	9.5	4×4	1.30	32.4	
0.35	4.5	4×4	0.60	15.4	
0.20	9.5	6×6	1.00	25.0	
0.35	4.5	6×6	0.40	10.0	

根据模拟结果(图6)可知,灌水强度 R_0 、初始土壤含水率 θ_0 以及裂隙分布密度均将影响优先流的发育程度。横向对比相同初始含水率及裂隙分布密度的优先流可知,随着灌水强度的增加,基质流深度降低,优先流程度显著增加。其原因在于灌水强度的增加使土壤表面更快达到饱和含水率,加快灌溉水由表层入渗转为沿裂隙优先下渗,基质流阶段缩短,基质流深度降低。此外,灌水强度越大,层流推进速度越快,相同时间内最大入渗深度增大。当灌水强度较小(如灌水强度 $R_0=0.02$ cm/min)且趋近土壤饱和导水率 $K_s=0.0186$ cm/min 时,灌溉水几乎全部通过土壤基质吸渗进入土壤中,无优先流现象。因此,接近土壤饱和导水率的灌水强度无法触发优先流。纵向对比相同灌水强度及裂隙分布密度下的优先流可知,随着土壤含水率升高,基质流深度增加,优先流程度显著降低。其原因在于土壤初始含水率的增加导致初始裂隙形态的深度和宽度降低,由于优先流最大入渗深度很大程度取决于裂隙深度,因此最大入渗深度显著降低;其次,高含水率下土壤基质导水能力的提高和储水能力的降低^[21],使得湿润峰推移速度加快,因此土壤基质流的深度增大、水平入渗距离增加。最后,纵向对比相同含水率及灌水强度的优先流可知,随着裂隙分布密度的增加,优先流程度显著减弱。其主要原因在于随着裂隙条数和总长度增加,裂缝的平均深度和宽度相应减小^[12],因此优先流的最大入渗深度显著降低;而裂隙条数和总长度的增加会增大裂隙边壁的总表面积,这不会增大表层土壤的入渗能力,使得基质流深度增加,而且会使裂隙域与基质域的水分交换量的占比增加,导致沿裂隙边壁下渗的层流厚度和最大入渗深度降低;此外,随着裂隙分布密度和网络节点数的增加,裂隙间的水平连通度提高^[22],增加了水分的横向交换,超过土壤表面入渗能力的灌溉水能沿多个裂隙通道下渗,避免了集中下渗,提高了入渗的均匀性。综上所述,不是任何一个连通、延长的裂隙都能产生优先流,它仅提供了传导优先流的一个基础条件,灌水强度才是决定优先流能否触发和触发快慢的重要条件;而土壤初始含水率反映了一种环境条件,影响了触发优先流的容易程度。



(a) 初始含水率 $\theta_0=0.20$ cm^3/cm^3 下的优先流数值模拟结果

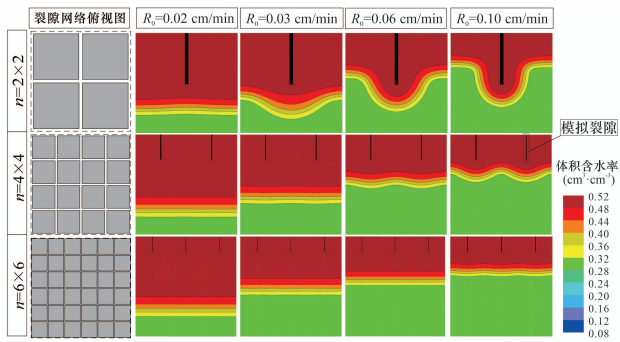
(b) 初始含水率 $\theta_0=0.35 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 下的优先流数值模拟结果

图6 等灌水定额下初始含水率-灌水强度-裂隙密度组合设计的优先流数值模拟结果

Fig.6 Numerical simulations of preferential flow by initial water content-irrigation crack density rotation-combination design under the same irrigation quota

图7分析了不同土壤初始含水率、裂隙分布密度和灌水强度数值模拟下的优先流评价指标,包括优先流指数、最大入渗深度、基质流深度和灌水均匀度4个参数。据此建立了各因素与优先流的关系网络。

由图7可知,随着灌水强度增大,基质流深度和灌水均匀度降低,优先流指数增大;随着初始含水率降低,基质流深度减小,最大入渗深度和优先流指数

增大;随着裂隙分布密度增加,基质流深度和灌水均匀度增大,优先流程度减弱。当土壤初始含水率 $\theta_0=0.20 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 、裂隙分布密度为 $2 \times 2 \text{ cm}^2/\text{cm}^2$ 、灌水强度 $R_0=0.10 \text{ cm/min}$ 时,优先流指数达到最大值,基质流深度和灌水均匀度最小。针对低初始含水率时,最大入渗深度与灌水强度正相关;而初始含水率较高 ($\theta_0=0.35 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) 时,最大入渗深度与灌水强度负相关,归因于高含水率下土壤的储水量和裂隙深度大大降低,此时较大的灌水强度可能会超过土壤表层和裂隙边壁最大入渗能力的总和,大量水分在模拟灌溉结束时并没有进入土体中,入渗深度因此反而降低。综上所述,灌水强度主要通过影响表层土壤达到饱和的时间以及裂隙内的层流推移速度,分别影响基质流深度和最大入渗深度,从而影响优先流程度;土壤初始含水率主要通过影响裂隙深度和土壤导水性质,分别影响最大入渗深度和基质流深度,由此影响优先流程度;而裂隙分布密度主要通过影响裂隙深度、土壤的导水性质以及裂隙网络连通性,分别影响最大入渗深度、基质流深度以及灌水均匀度,从而对优先流程度产生影响。

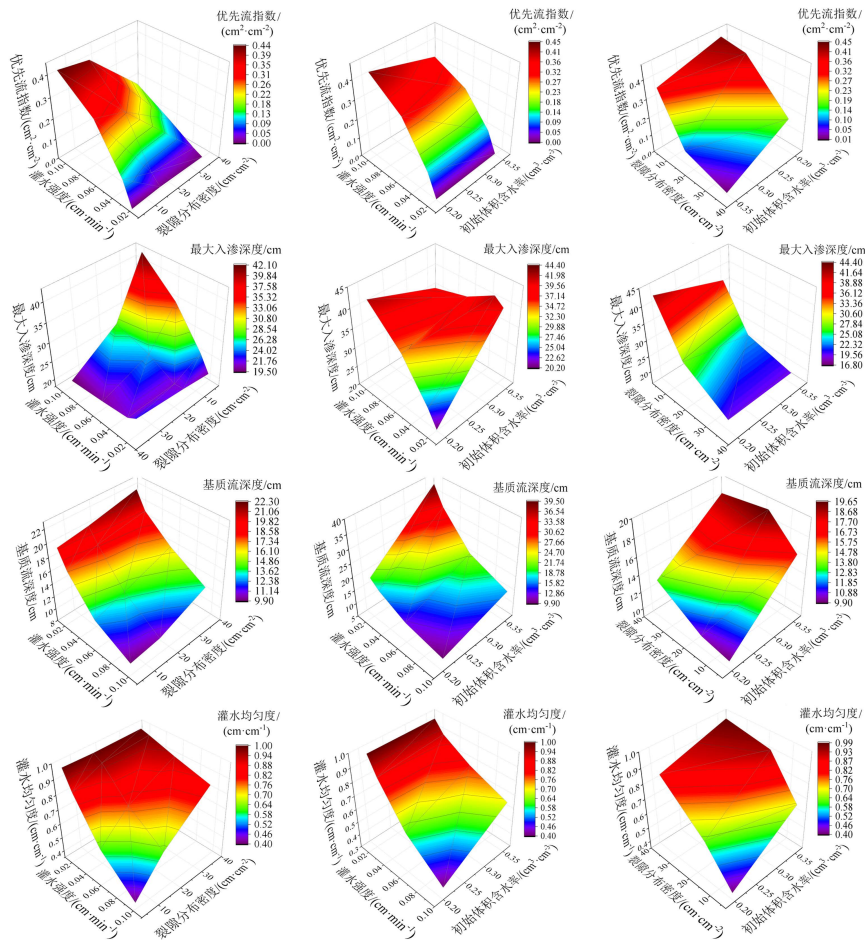


图7 土壤初始含水率-灌水强度-裂隙密度旋转设计模拟结果的优先流评价参数

Fig.7 Indexes of preferential flow from simulations by initial water content-irrigation intensity-crack density rotation- number of shrinkage blocks combination design

3 讨论

3.1 裂隙特征对优先流的影响

本研究发现, 浅小裂隙对增强优先流无明显作用; 裂隙深度越深, 水分最大入渗深度越大, 优先流程度越高。这一结论与 Wells 等^[10]的试验结果吻合。其主要原因在于裂隙内由重力势主导的层流运动常高出基质流速几个数量级, 在灌溉水有充足补充的情况下, 水分会以极快的速度沿裂隙边壁层流推移, 且层流推移的最大深度取决于裂隙深度, 因此裂隙越深, 最大入渗深度越大, 优先流越明显。但本试验及模型均采用均质土, 土壤原有孔隙结构被破坏, 实际情况下优先流形成的深层湿润锋可能会与土壤中其他类型的孔隙流道(虫洞、根通道)相连接, 优先流更为显著。因此, 具有一定延伸深度或纵向连通性的裂隙/大孔隙网络是优先流传导的前提条件, 裂隙的延伸深度通过影响水分的最大入渗深度与总入渗量成为了影响优先流程度的关键因素。而裂隙发育宽度会影响灌水过程中裂隙的愈合速度, 是影响优先流发育的另一重要因素。此外, 优先流程度与裂隙分布特征也有密切联系, 裂隙分布特征包括裂隙连通性及裂隙分布密度。对于一些具有较强的纵向连通性和垂直连续性的裂隙或孔隙网络, 即使在低强度降雨下, 也会发生明显的优先流^[23]。裂隙/大孔隙网络的连通性越强, 土壤导水能力越强^[11], 因此, 裂隙连通性一般会促进优先流发育。而本文数值模拟发现, 随着裂隙分布密度的增加, 裂隙间的横向连通性增强, 避免了土壤水的局部集中下渗, 提升了入渗的均匀性, 优先流程度减弱。因此, 连通度对优先流的影响效果主要取决于裂隙间连通度的增加是抑制还是促进了水分的集中下渗。此外, 根据土壤开裂规律及模拟结果发现, 若土体收缩块区减小, 尽管裂隙分布密度增大, 但裂隙发育的深度和宽度降低^[12], 优先流程度和最大入渗深度因此大幅降低, 这为抑制土壤裂隙优先流提供了新思路。综上所述, 裂隙网络是优先流产生的前提条件, 裂隙的几何形态、弯曲度以及网络连通度等特征通过影响水流在土壤中流动的路径与速率, 直接影响了优先流的空间结构与发育程度。因此, 抑制裂隙优先流的根本方法是抑制裂隙发育。除了通过增施有机肥、植被覆盖等方法抑制土壤开裂外, 在土壤中添加秸秆等植物残体或纤维能通过改变土壤的塑性和破碎强度, 缩小收缩块区, 从而有效抑制裂隙宽度和深度的开展^[24], 但其对优先流的抑制效果, 有待在试验与生产实际中验证。

3.2 灌水特征对优先流的影响

灌水或降水过程中, 当灌水强度超过周围土壤基

质的入渗能力, 或在土壤表层含水率达到一个阈值时, 便会触发土壤水的优先流动^[1]。Edwards等^[25]发现, 灌水强度越大, 土壤水入渗量越大, 优先流发生时间越短。本文数值模拟结果与该结果一致。其原因之一在于灌水强度影响了优先流的触发时间。当灌水强度低于土壤表面的饱和导水率时, 灌溉水全部以基质流的形式均匀下渗, 难以触发优先流, 而较高的灌水强度会使土壤表面更快达到饱和, 加快表层均匀入渗转为沿裂隙优先下渗, 缩短优先流触发时间, 增强了优先流程度。其次, 高强度灌溉提高了裂隙通道内的水流量, 改变了土壤水分运动时以毛管势为主导的能量驱动方式。当灌水强度较低时, 进入优先通道内的水分较少, 优先流只能以薄膜的状态沿着孔壁和团聚体接触点缓慢迁移^[1], 此时毛管势为主要的驱动力, 限制了水分快速流动。只有当水膜达到一定厚度(高达约100 μm)^[26], 水膜才能在以重力势为主导的驱动方式下实现快速流动。较高的灌水强度能帮助土壤表层建立更多的正压势, 提高进入优先通道的水流量, 增加水膜厚度, 改变水分驱动方式, 推动水膜实现连续快速的优先流动。因此, 灌水强度是决定优先流能否触发和触发快慢的重要条件。此外, Gjettermann等^[27]研究表明, 灌溉强度越高, 在土壤表面35 cm以下区域, 被染色的优先流通道越多, 这表明较高的灌溉强度会激活更多的优先流通道, 促进优先流的形成。此外, 灌水持续时间、灌溉时间节点及灌溉方式等也是影响优先流程度的重要外部条件^[28-29]。因此, 因地制宜地选择灌溉制度或灌溉方式是抑制优先流、提高灌水质量的关键。例如, 对于优先通道延伸深度较大且地下水污染敏感性较强的地区, 可通过低强度持续喷灌, 以防止水分深层渗漏造成污染^[30]。

3.3 土壤初始含水率对裂隙优先流的影响

土壤初始含水率通过影响水分的入渗和传导, 成为影响优先流发育的另一关键因素。本研究显示, 较低的土壤含水率会使优先流更明显。其原因在于, 对于缩胀性较强的土壤, 如本试验中的黏壤土, 含水率的降低会加剧土壤裂隙的收缩^[20], 裂隙深度和体积的增加将引起水分的大量渗漏^[19]。此外, 土壤的疏水性也是造成低含水率下优先流加剧的关键原因^[31]。疏水性常发生在沙质土壤或有机质量丰富的土壤中, 与土壤湿度成反比^[32]。因此, 干燥土壤的表面常会因为疏水性存在较大的入水势, 导致灌溉水难以从土壤基质入渗而被迫流向大孔或裂隙通道内产生优先流。由于孔隙通道内的生物活动和有机质降解, 很多裂隙或大孔隙内壁也存在一定的疏水性^[9], 这将阻止孔隙通道内的水分与基质水分交换, 进一步加剧优先流的发育。

此外,低含水率下的低导水率也是迫使水分进入裂隙产生优先流的原因之一。然而,较高的初始含水率会促进优先流的发育,这种情况通常发生在以壤土或粉土为主的稳定大孔隙或生物孔隙(而不是收缩裂缝)中^[8]。较高的土壤初始含水率降低了土壤基质吸力和土壤基质中的储水空间,减少了从大孔隙到土壤基质的侧向渗透^[33],推动水分向深层土壤中移动,因此优先流的总渗流量和穿透深度增加。此外,湿润土壤的孔隙活跃度更高,大孔间的连通性更强^[34],有助于建立更高效的流动网络,增强优先流动。综上所述,由于土壤基质的导水特性、孔隙特征及疏水性的强弱程度随初始含水率的变化趋势受土壤质地结构的影响较大,土壤初始含水率对优先流的影响效果难以进行普遍性归纳。

4 结论

1) 浅小型裂隙(裂隙平均宽度 $0.2\text{ cm} \leq w_c \leq 1.0\text{ cm}$, 平均深度 $0.5\text{ cm} \leq d \leq 10\text{ cm}$)与优先流发育没有直接联系,宽深型裂隙(裂隙平均宽度 $w_c \geq 2\text{ cm}$, 平均深度 $d \geq 50\text{ cm}$)是产生裂隙优先流的主要原因;宽深型裂隙分布密度增大,基质流深度、染色面积率以及灌水均匀度显著增加。

2) 优先流双域渗透模型对裂隙优先流的模拟效果较好,典型剖面染色覆盖率的模拟值与实测值极显著相关(决定系数 $R^2=0.951$, 均方根误差 $RMSE=0.095$)。

3) 接近土壤饱和和导水率的灌水强度无法触发优先流,灌水强度提高,基质流深度和灌水均匀度显著降低,优先流程度增加;初始含水率和裂隙分布密度增大,基质流深度和灌水均匀度增大,优先流程度减弱。

参考文献:

- [1] NIMMO J R. The processes of preferential flow in the unsaturated zone[J]. Soil Science Society of America Journal, 2021, 85(1): 1-27.
- [2] DADFAH R, ALLAIRE S E, DE JONG R, et al. Development of a method for estimating the likelihood of crack flow in Canadian agricultural soils at the landscape scale[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2010, 90(1): 129-149.
- [3] NOVÁK V, ŠIMÁUNEK J, VAN GENUCHTEN M T. Infiltration of water into soil with cracks[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2000, 126(1): 41-47.
- [4] LIU C W, CHENG S W, YU W S, et al. Water infiltration rate in cracked paddy soil[J]. Geoderma, 2003, 117(1/2): 169-181.
- [5] LI J H, ZHANG L M. Geometric parameters and REV of a crack network in soil[J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37(4): 466-475.
- [6] GUO L, LIN H. Addressing two bottlenecks to advance the understanding of preferential flow in soils[J]. Advances in Agronomy, 2018, 147: 61-117.
- [7] QUISENBERRY V L, PHILLIPS R E. Percolation of surface-applied water in the field[J]. Soil Science Society of America Journal, 1976, 40(4): 484-489.

- [8] HARDIE M A, COTCHING W E, DOYLE R B, et al. Effect of antecedent soil moisture on preferential flow in a texture-contrast soil[J]. Journal of Hydrology, 2011, 398(3/4): 191-201.
- [9] JARVIS N J. A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: Principles, controlling factors and consequences for water quality[J]. European Journal of Soil Science, 2020, 71(3): 279-302.
- [10] WELLS R R, DICARLO D A, STEENHUIS T S, et al. Infiltration and surface geometry features of a swelling soil following successive simulated rainstorms[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(5): 1 344-1 351.
- [11] LUO L F, LIN H, LI S C. Quantification of 3-D soil macropore networks in different soil types and land uses using computed tomography[J]. Journal of Hydrology, 2010, 393(1/2): 53-64.
- [12] 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): 1 186-1 193.
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): 1 186-1 193.
- [13] DEMAND D, BLUME T, WEILER M. Spatio-temporal relevance and controls of preferential flow at the landscape scale[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2019, 23: 4 869-4 889.
- [14] 王策, 张展羽, 陈晓安, 等. 基于水量平衡原理的裂隙优先流双域渗透模型及其应用[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 314-326, 348.
WANG Ce, ZHANG Zhanyu, CHEN Xiaolan, et al. Dual-permeability model for crack preferential flow based on principle of water volume balance and its application[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 314-326, 348.
- [15] 王康, 张仁铎, 缴锡云. 多孔介质中非均匀流动特性的染色示踪试验研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(5): 662-667.
WANG Kang, ZHANG Renduo, JIAO Xiyun. Characterizing heterogeneity of water flow and solute transport in the porous media using dye tracer[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(5): 662-667.
- [16] 朱磊, 尤今, 陈玖泓. 裂隙网络对坡面流及土壤水分入渗影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(12): 95-100.
ZHU Lei, YOU Jin, CHEN Jiuhong. The influence of fracture network on overland flow and water infiltration in soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(12): 95-100.
- [17] COPPOLA A, COMEGNA A, DRAGONETTI G, et al. Simulated preferential water flow and solute transport in shrinking soils[J]. Vadose Zone Journal, 2015, 14(9): 1-22.
- [18] 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.
LEI Zhidong, YANG Shixiu, XIE Senchuan. Soil hydrodynamics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988.
- [19] 张展羽, 陈于, 孔莉莉, 等. 土壤干缩裂缝几何特征对入渗的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 192-197.
ZHANG Zhanyu, CHEN Yu, KONG Lili, et al. Impacts of desiccation crack geometric characteristics on infiltration in soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 192-197.
- [20] WANG C, FENG G X, ZHANG Z Y, et al. Geometrical and statistical analysis of dynamic crack morphology in shrink-swell soils with addition of maize roots or salinity (NaCl)[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 212: 105 057.
- [21] 张俊, 牛文全, 张琳琳, 等. 初始含水率对微润灌溉线源入渗特征的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(1): 72-79.
ZHANG Jun, NIU Wenquan, ZHANG Linlin, et al. Effects of soil initial water content on line-source infiltration characteristic in moisture irrigation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(1): 72-79.
- [22] SMET S, BECKERS E, PLOUGONVEN E, et al. Can the pore scale

- geometry explain soil sample scale hydrodynamic properties?[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2018, 6: 20.
- [23] SAMMARTINO S, MICHEL E, CAPOWIEZ Y. A novel method to visualize and characterize preferential flow in undisturbed soil cores by using multislice helical CT[J]. *Vadose Zone Journal*, 2012, 11(1): 1-13.
- [24] TANG C S, SHI B, CUI Y J, et al. Desiccation cracking behavior of polypropylene fiber-reinforced clayey soil[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2012, 49(9): 1 088-1 101.
- [25] EDWARDS W M, SHIPITALO M J, OWENS L B, et al. Rainfall intensity affects transport of water and chemicals through macropores in no-till soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(1): 52-58.
- [26] TOKUNAGA T K, WAN J M. Approximate boundaries between different flow regimes in fractured rocks[J]. *Water Resources Research*, 2001, 37(8): 2 103-2 111.
- [27] GJETTERMANN B, NIELSEN K L, PETERSEN C T, et al. Preferential flow in sandy loam soils as affected by irrigation intensity[J]. *Soil Technology*, 1997, 11(2): 139-152.
- [28] HOPKINS I, GALL H, LIN H. Natural and anthropogenic controls on the frequency of preferential flow occurrence in a wastewater spray irrigation field[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 178: 248-257.
- [29] QI W, ZHANG Z Y, WANG C, et al. Crack closure and flow regimes in cracked clay loam subjected to different irrigation methods[J]. *Geoderma*, 2020, 358: 113 978.
- [30] CHEN C C, ROSEBERG R J, SELKER J S. Using microsprinkler irrigation to reduce leaching in a shrink/swell clay soil[J]. *Agricultural Water Management*, 2002, 54(2): 159-171.
- [31] TÄUMER K, STOFFREGEN H, WESSOLEK G. Seasonal dynamics of preferential flow in a water repellent soil[J]. *Vadose Zone Journal*, 2006, 5(1): 405-411.
- [32] BISDOM E B A, DEKKER L W, SCHOUTE J F T. Water repellency of sieve fractions from sandy soils and relationships with organic material and soil structure[J]. *Geoderma*, 1993, 56(1/2/3/4): 105-118.
- [33] BEVEN K, GERMANN P. Macropores and water flow in soils[J]. *Water Resources Research*, 1982, 18(5): 1 311-1 325.
- [34] WEILER M, NAEF F. Simulating surface and subsurface initiation of macropore flow[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 273(1/2/3/4): 139-154.

Effects of Cracking Patterns and Antecedent Soil Water Content on Preferential Flow of Irrigated Water

DUAN Fengyi¹, ZHU Chengli¹, WANG Ce^{1*}, CHEN Yu², MA Liang¹

(1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. Jiangsu Rural Water Conservancy Science and Technology Development Center, Nanjing 210029, China)

Abstract: 【Objective】 Macropores formed by physical and biological processes provide fast pathways for rainfall and irrigation water to bypass soil matrix. It has important implications not only for hydrological processes but also for biogeochemical processes. In this paper, we investigated the effect of cracking patterns and antecedent soil moisture content on preferential flow of irrigated water. 【Method】 Our study was based on numerical simulation and experiment. We first validated a dual-permeability model against a dye tracing experiment, and then applied it to elucidate how crack patterns, antecedent soil moisture content and irrigation intensity combined to modulate the formation and development of preferential flow of irrigated water in soil. 【Result】 Comparison with experimental results showed that the model is accurate for predicting preferential flow, with $R^2=0.951$ and $P<0.01$. Shallow small cracks with aperture in the range of 0.2~1.0 cm and in the depth of 0.5~10 cm had little impact on preferential flow, and large cracks with aperture more than 2 cm and expanding to the depth beyond 50 cm were the mechanisms underlying the formation and development of preferential flow. An increase in crack density enhanced both infiltration depth in soil matrix and soil water uniformity. Irrigation intensity less than saturated soil hydraulic conductivity did not trigger preferential flow. Increasing irrigation intensity increased infiltration depth in soil matrix and soil water uniformity in the soil. An increase in antecedent soil water content and cracking density increased water flow in soil matrix and soil water uniformity because of the reduced preferential flow. 【Conclusion】 In the fields with soil shrinkages and rich organic matters, reducing irrigation intensity and irrigating before soil water content drops below a certain level can reduce preferential flow and improve irrigation uniformity consequently.

Key words: crack preferential flow; dual-permeability models; fracture distribution density; antecedent water content; irrigation intensity

责任编辑：白芳芳