

分层多孔介质剖面中优先流运动特征^①

盛 丰^{1,2}, 张 彬^{1,3}

(1 长沙理工大学水利与环境工程学院, 长沙 410114; 2 长沙理工大学洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 长沙 410114; 3 长沙理工大学水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 长沙 410114)

摘 要: 通过染色示踪技术, 研究了均质细质地、均质粗质地、细质地覆盖粗质地、粗质地覆盖细质地、细质地含粗质地水平夹层和粗质地含细质地水平夹层 6 种不同多孔介质剖面结构中的水分分布规律与优先流运动特征。结果表明: 水流从粗质地介质进入细质地介质时产生的水力屏蔽作用抑制了细质地层中优先流的形成和发展, 而水流从细质地介质进入粗质地介质时产生的毛管屏蔽作用促进了粗质地层中优先流的形成和发展; 水力屏蔽作用和毛管屏蔽作用均对灌水入渗产生减渗作用, 降低了水流在分层多孔介质剖面中的入渗深度, 并导致分层多孔介质剖面的含水率沿深度方向呈现出明显的不连续分布状态; 均质细质地剖面中的优先流运动非均匀程度最高, 粗质地覆盖细质地剖面中的优先流运动非均匀程度最低, 含水平夹层剖面中的优先流运动非均匀程度高于水平两层分层结构中的优先流运动非均匀程度。

关键词: 优先流; 分层多孔介质; 入渗; 含水率; 染色示踪

中图分类号: S152.7 **文献标志码:** A

Preferential Flow Characteristics in Layered Porous Media

SHENG Feng^{1,2}, ZHANG Bin^{1,3}

(1 School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2 Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-environmental Control and Restoration of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 3 Key Laboratory of Water-sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: This study investigated water distribution patterns and preferential flow characteristics in six porous media with different profile structures (i.e. homogeneous fine media, homogeneous coarse media, fine media overlying coarse media, coarse media overlying fine media, fine media containing horizontal coarse layer, and coarse media containing horizontal fine layer) using dye tracing technique. The results showed that when water infiltrated from coarse to fine media, the hydraulic barrier effect inhibited the formation and development of preferential flow. In contrast, when water infiltrated from fine to coarse media, the capillary barrier effect promoted the formation and development of preferential flow. Both hydraulic and capillary barrier effects reduced the infiltration depth of water in the layered media profiles, leading to a distinct discontinuous distribution of moisture along the infiltration direction in the layered porous media profile. The preferential flow heterogeneity was the highest in the homogeneous fine media profile, the lowest in the coarse media overlying fine media profile, and higher in the media profile containing horizontal layered profile than in the media profile containing two different layers.

Key words: Preferential flow; Layered porous media; Infiltration; Moisture; Dye tracing

由于地质、气象、水文和生物过程的作用, 田间土壤大都呈现为层状结构^[1]。因此, 研究层状土壤中的水分入渗特征对水资源高效利用以及生态环境保护具有重要意义^[2]。国内外诸多学者也针对这一问题开展了相关研究。如, 王全九等^[1]根据沙土夹层土壤

入渗资料, 对层状土入渗机制及下层沙土对土壤入渗的影响进行了分析, 并建立了层状土壤水分分布及上层土壤蓄水量的计算方法; 侯林坊^[3]采用基于 van Genuchten-Mualem 理论的土壤水分运动数学模型, 研究了“上粗下细”和“上细下粗”两种分层土壤构

①基金项目: 国家自然科学基金项目(51579020)和湖南省自然科学基金面上项目(2022JJ30602)资助。

作者简介: 盛丰(1981—), 男, 湖南株洲人, 博士, 教授, 主要从事非饱和带水文学与水土环境学方面的研究。E-mail: fsaint8586@163.com

型中的垂直非饱和流动过程,发现这两种土壤构型中的湿润锋迁移距离和累积入渗量均与分层位置无关,而仅与土壤饱和水力传导度有关;李毅等^[4]通过室内积水入渗试验,研究了土壤质地变化对层状土入渗特征的影响,发现层状土的含水率分布具有不连续性,并指出传统的入渗模型无法用于定量模拟层状土中的入渗过程;马蒙蒙^[5]采用试验与理论相结合的方法,研究了 5 种不同分层构型土体中的水流和溶质运移特征,发现当层状土壤中存在较黏的土层时,水分和溶质会在黏-壤界面滞留,并使得附近的压力水头和溶质浓度高于其他地方;Corradini 等^[6]提出了一个可用于模拟不同降雨模式下上层比下层透水性强的土壤剖面中入渗过程的简单概念模型,该模型对动态累积入渗深度的平均预测误差小于 10%;Gohardoust 等^[7]在模拟层状多孔介质中的流动过程时,通过引入等效非饱和和导水率使得模型分析计算更为高效,并通过数值模拟指出,忽视层状结构可能导致显著高估土壤水流运动。

然而,目前已有的研究大多将层状多孔介质中的水流运动过程简化为均匀流(如马蒙蒙^[5])或一维垂直水流运动过程(如侯林坊^[3]和 Gohardoust 等^[7]),并结合 HYDRUS-1D^[8]等软件来模拟分析层状土中的水流运动,或者仅对地表入渗过程或湿润锋迁移过程开展研究,而不关注具体的水流运动结构特征(如王全九

等^[1]、李毅等^[4]和 Corradini 等^[6])。大量研究表明,优先流是土壤水流运动的常态(有的学者将之称为土壤水流运动的“规则”)^[9]。但优先流仅通过部分土壤运动,减少了土壤颗粒对污染物的吸附和截留;且水和污染物质在优先流通道中的运移速度远大于其以基质流形式运移的速度,增大了灌水施肥的渗漏损失量、缩短了污染物在土壤中停留降解的时间,这些都将增大地下水受污染的风险^[10]。目前学术界虽对层状多孔介质中的水流运动有所研究,但对层状多孔介质中优先流结构特征的研究仍较为缺乏。因此,本研究通过室内染色示踪试验,对 2 类共 4 种不同分层多孔介质剖面结构中的水分分布规律和优先流运动特征进行了研究,旨在为农业灌溉水资源高效利用与地下水污染防控提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用土(细质地介质)采自长沙理工大学云塘校区体育馆附近,为湖南地区典型红壤。采集表层 0 ~ 20 cm 的土壤,置于室内阴凉通风处风干,研磨过 2 mm 筛备用。试验用砂(粗质地介质)为经水洗去除淤泥质后的风干河砂,过 2 mm 筛后备用。供试土壤和河砂的物理性质与水动力参数分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 试验用土的物理性质及水动力参数
Table 1 Physical and hydrodynamic properties of soil tested

粒径分布(g/kg)			容重 (g/cm ³)	孔隙度 (cm ³ /cm ³)	饱和水力传导度 (cm/s)
>0.05 mm	0.002 ~ 0.05 mm	<0.002 mm			
114.78	636.30	248.92	1.42	0.396	1.08×10 ⁻⁴

表 2 试验用砂的物理性质及水动力参数
Table 2 Physical and hydrodynamic properties of sands tested

粒径分布(g/kg)				容重 (g/cm ³)	孔隙度 (cm ³ /cm ³)	饱和水力传导度 (cm/s)
>0.5 mm	0.25 ~ 0.5 mm	0.1 ~ 0.25 mm	<0.1 mm			
9.74	800.75	166.19	23.32	1.50	0.435	5.79×10 ⁻³

1.2 试验设计

采用在有机玻璃入渗框中人工填充的多孔介质剖面(有机玻璃框内部长、宽、高尺寸分别为 30、30、50 cm,剖面填充高度为 45 cm,预留 5 cm 高度作为灌水使用以免灌水溢出试验框)开展灌水入渗试验,分别开展了水平两层分层(包括细质地覆盖粗质地和粗质地覆盖细质地剖面结构)和含水平夹层(包括细质地含粗质地水平夹层和粗质地含细质地水平夹层剖面结构)2 类共 4 种不同分层多孔介质剖面结构中的优先流

运动特征研究;同时,对均质细质地和均质粗质地剖面结构中的优先流运动特征也开展了研究,用以作为对照试验。根据试验用土和用砂的容重,按 5 cm 一层称取土、砂后分层填充剖面。在填充上一层介质时,先将下层填充介质表面用钢刷刮毛后再填充。各剖面结构均开展 2 个重复试验,以降低和消除单次试验所带来的误差。各试验的具体条件设置如表 3 所示。

为显示不同剖面结构条件下的优先流结构特征,各试验均采用灌水深度为 20 mm(合 1.8 L)、浓度为

表 3 不同类型的多孔介质剖面结构条件设置
Table 3 Test condition settings for porous media with different profile structures

剖面类型	试验编号	填充介质	剖面结构	备注
均质剖面	试验 1、2	土(细质地)	均质细质地	均质、不分层
	试验 3、4	砂(粗质地)	均质粗质地	均质、不分层
水平两层分层剖面	试验 5、6	土、砂	细质地覆盖粗质地	表层 5 cm 为土层，其下为砂层
	试验 7、8	土、砂	粗质地覆盖细质地	表层 5 cm 为砂层，其下为土层
含水平夹层剖面	试验 9、10	土、砂	细质地含粗质地水平夹层	5 ~ 10 cm 为砂层，其上、下均为土层
	试验 11、12	土、砂	粗质地含细质地水平夹层	5 ~ 10 cm 为土层，其上、下均为砂层

4.0 g/L 的亮蓝溶液作为示踪溶液。为避免灌水对多孔介质剖面表层造成冲刷，灌水前在入渗框内多孔介质剖面表层先铺上两层拒水薄膜，将清水和亮蓝溶液首先注至拒水薄膜上，然后再迅速抽去拒水膜以形成瞬间积水入渗条件。入渗结束后，在入渗框表面覆盖塑料薄膜以消除蒸发影响。亮蓝染色剂溶液自由入渗 24 h 后，移除表层覆盖的薄膜，用数码相机拍照记录各试验框 4 个侧面的优先流分布情况。拍照结束后，按间距 2.5 cm 人工开挖水平剖面。水平剖面开挖完成后，用数码相机记录各水平剖面上的优先流流场分布情况。各水平剖面拍照结束后，用小勺在染色区内取样，以测定优先流流场区内的含水率分布。

1.3 试验指标测定与分析

1.3.1 土壤含水率 土壤含水率采用烘干法测定。

1.3.2 总染色面积比 总染色面积比是常用的评价优先流发育程度的指标。一般而言，总染色面积比越大在一定程度上表明优先流的发育程度越低^[11]。总染色面积比计算公式如下：

$$D = \frac{D_T}{D_T + N_D} \times 100\%$$
 (1)

式中：D 为总染色面积比，%；D_T 为土壤剖面总染色面积，cm²；N_D 为土壤剖面未染色面积，cm²。

1.3.3 优先流比 将染色面积大于 80% 以上的区域定义为基质流区域，所对应的入渗深度为基质流深度，基质流深度以下的染色区域视为优先流区，优先流区面积与总面积(基质流区+优先流区)的比值称为优先流比。优先流比越大，在一定程度上表明优先流发育程度越高^[12]。

1.3.4 优先流通道弯曲系数 优先流通道弯曲系数为优先流通道曲面面积与地表灌水面积(即入渗框水平截面面积)之比。优先流发育程度越高，其通道越不均匀，优先流通道弯曲系数也越大^[13]。优先流通道弯曲系数计算公式如下：

$$C_v = \frac{S_R}{S_L}$$
 (2)

式中：C_v 为优先流通道弯曲系数；S_R 为优先流流场曲面面积，cm²；S_L 为试验土柱平面面积，cm²。

1.4 数据处理与统计分析

采用 Excel 2022 软件进行数据处理；采用 Origin 2018 绘制数据图；采用 SPSS 26 进行数据分析，通过单因素方差分析进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 水平两层分层剖面结构中的水流运动

2.1.1 含水率分布 细质地覆盖粗质地和粗质地覆盖细质地以及均质细质地和均质粗质地 4 种剖面结构条件下，染色示踪剂溶液入渗后的含水率随入渗深度的分布如图 1 所示。在此基础上，计算了各剖面结构下 0 ~ 5 cm(覆盖层)和 5 ~ Z_{max}(覆盖层以下至灌溉水最大入渗深度(Z_{max}，cm)范围土层)的含水率差异，结果如表 4 所示。

由图 1 与表 4 可知，均质(包括均质细质地和均质粗质地)剖面结构下，灌水入渗后的含水率分布无

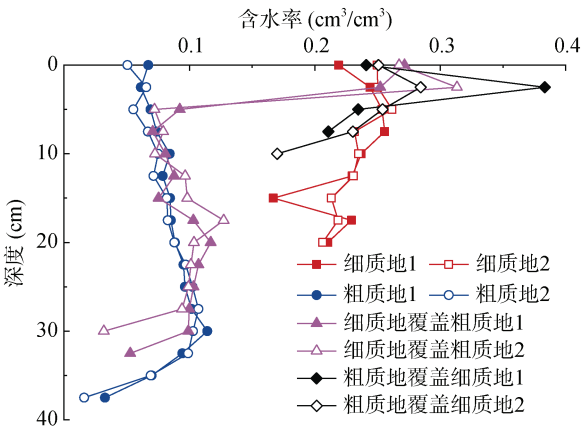


图 1 水平两层分层剖面结构与均质剖面结构土壤含水率随剖面深度的变化

Fig.1 Soil moistures distributions with infiltration depth for stratified two-layer profile and homogeneous profile structures

表 4 水平两层分层剖面结构与均质剖面结构的含水率统计结果(cm^3/cm^3)
Table 4 Statistical results of soil moistures for stratified two-layer profile and homogeneous profile structures

入渗深度(cm)	均质细质地	均质粗质地	细质地覆盖粗质地	粗质地覆盖细质地
0 ~ 5	0.241 ± 0.016 aB	0.061 ± 0.008 aC	0.276 ± 0.074 aB	0.290 ± 0.064 aA
5 ~ Z_{max}	0.234 ± 0.017 aA	0.084 ± 0.015 aB	0.090 ± 0.023 bB	0.220 ± 0.028 bA

注：表中数据为平均值±标准差；同列不同小写字母表示同一土壤剖面结构不同入渗深度间存在显著差异($P<0.05$)，同行不同大写字母表示相同入渗深度不同土壤剖面结构间存在显著差异($P<0.05$)；下同。

明显的分层分布特征,含水率沿入渗深度方向连续分布;而水平两层分层(包括细质地覆盖粗质地和粗质地覆盖细质地)剖面结构下,灌水入渗后的含水率在不同介质层之间存在显著性差异($P<0.05$),且含水率沿深度方向不连续分布。这一现象符合层状土含水率在分层界面突变的人渗规律^[14]。进一步分析 4 种剖面结构下的含水率分布可知,在水平两层分层剖面结构中,覆盖层的含水率明显高于均质剖面结构相同深度范围的含水率;尤其是覆盖层质地与均质剖面结构相同深度(0 ~ 5 cm)质地相异时(如均质细质地剖面结构和粗质地覆盖细质地剖面结构的 0 ~ 5 cm 深度,以及均质粗质地剖面结构与细质地覆盖粗质地剖面结

构的 0 ~ 5 cm 深度),覆盖层的含水率均显著大于均质剖面结构相同深度处的含水率($P<0.05$),而覆盖层以下深度范围的含水率与均质剖面结构相同深度范围(介质相同)的含水率之间却并无显著差异($P>0.05$)。该结果表明,在水平两层分层剖面结构中,覆盖层阻滞了水分向被覆盖层流动,使入渗水更多地滞蓄在覆盖层中。

2.1.2 优先流结构 细质地覆盖粗质地和粗质地覆盖细质地以及均质细质地和均质粗质地 4 种剖面结构条件下,染色示踪剂溶液入渗后的最大入渗深度、基质流深度、优先流比、总染色面积比、优先流通道弯曲系数的计算结果如表 5 所示。

表 5 水平两层分层剖面结构与均质剖面结构中的优先流特征指标
Table 5 Preferential flow indices for stratified two-layer profile and homogeneous profile structures

剖面结构	最大入渗深度(cm)	基质流深度(cm)	优先流比(%)	总染色面积比(%)	优先流通道弯曲系数
均质细质地	20.0	4.47	58.72	49.65	3.37
均质粗质地	37.5	19.11	38.68	76.68	2.15
细质地覆盖粗质地	32.5	11.47	46.35	61.25	2.96
粗质地覆盖细质地	10.0	5.50	14.90	85.09	1.05

图 1 和表 5 显示,均质粗质地剖面结构的水流最大入渗深度(两个重复试验均为 37.5 cm)最大,细质地覆盖粗质地剖面结构的水流最大入渗深度(两个重复试验分别为 30.0 和 32.5 cm)次之;而粗质地覆盖细质地剖面结构的水流最大入渗深度最小(两个重复试验分别为 7.5 和 10.0 cm),甚至明显小于均质细质地剖面结构的水流最大入渗深度(两个重复试验均为 20.0 cm)。以上结果表明,不论是细质地覆盖粗质地剖面结构还是粗质地覆盖细质地剖面结构,均能明显降低灌溉水的最大入渗深度,即均具有减渗作用。其中,粗质地覆盖细质地剖面结构的减渗效果更为明显(最大入渗深度降低了 50.0%,而细质地覆盖粗质地剖面结构相对均质粗质地剖面结构的最大入渗深度降低仅为 13.3%)。由于细质地覆盖粗质地剖面结构的强烈减渗效果,使得该剖面结构下的灌溉入渗水主要集中在粗质地覆盖层中,并显著高于其他 3 种剖面结构($P<0.05$,图 1 和表 4 所示),该分层剖面结构的

染色面积分布也由覆盖层中的大于 80%(基质流区,表 5)迅速降低至 0(10 cm 深度)。

另外,优先流比、总染色面积比、优先流通道弯曲系数 3 个参数均表明,4 种剖面结构下的入渗水流运动均表现出明显的非均匀流动特征,且 3 个参数所描述的 4 种剖面结构下的优先流运动非均匀特征具有较好的一致性:均质细质地剖面结构中的优先流运动非均匀程度最高,粗质地覆盖细质地剖面结构中的优先流运动非均匀程度最低;细质地覆盖粗质地和均质粗质地两种剖面结构中的优先流运动非均匀程度介于以上两种剖面结构之间,其中前者中的优先流运动非均匀程度相对更高(表 5)。此外,在均质结构上覆盖一层异质均质结构时(如在细质地结构上覆盖一层粗质地结构、在粗质地结构上覆盖一层细质地结构),虽都能降低灌溉水的最大入渗深度,但对基质流深度和优先流运动非均匀程度的影响却有着明显的差异性:在细质地结构上覆盖一层粗质地结构时,

粗质地覆盖层增大了基质流深度从而降低了优先流运动的非均匀程度；而粗质地结构上覆盖一层细质地结构时，细质地覆盖层降低了基质流深度，从而增大了优先流运动的非均匀程度。

2.2 含水平夹层剖面结构中的水流运动

2.2.1 含水率分布 细质地含粗质地水平夹层和粗质地含细质地水平夹层以及均质细质地和均质粗质地 4 种剖面结构下，染色示踪剂溶液入渗后的土壤剖面含水率随入渗深度的分布如图 2 所示。在此基础上，计算了各剖面结构下 0 ~ 5、5 ~ 10 cm 和 10 ~ Z_{\max} 土层(分别对应于含水平夹层剖面结构的上覆层、夹层和夹层以下至灌溉水最大入渗深度范围土层)的含水率差异，结果如表 6 所示。

由图 2 和表 6 可知，细质地含粗质地水平夹层剖面结构的含水率随着入渗深度的增加呈现出明显的先急剧减小后急剧增大再缓慢减小的变化趋势，并且含水率在 5 cm(细质地转为粗质地的交界面)和 10 cm(粗质地转为细质地的交界面)两处介质交界面处发生明显的突变；其上覆细质地层(0 ~ 5 cm)的含水率显著大于均质细质地剖面结构相同深度的含水率($P<0.05$)，中间粗质地夹层(5 ~ 10 cm)的含水率同样显著大于均质粗质地剖面结构相同深度的含水率($P<0.05$)，粗质地夹层以下至最大入渗深度范围(10 ~ Z_{\max})的含水率也明显大于均质细质地剖面结构相同深度的含水率。粗质地含细质地水平夹层剖面结构的含水率随着入渗深度的增加呈现出明显的先急剧增大后急剧减小再缓慢减小的变化趋势，并且含水率在 5 cm(粗质地转为细质地的交界面)和 10 cm(细质地转为粗质地的交界面)两处介质交界面处发生明显的突

变；其上覆粗质地层(0 ~ 5 cm)的含水率显著大于均质粗质地剖面结构相同深度的含水率($P<0.05$)，中间细质地夹层(5 ~ 10 cm)的含水率同样显著大于均质细质地剖面结构相同深度的含水率($P<0.05$)，细质地夹层以下至最大入渗深度范围(10 ~ Z_{\max})的含水率也显著大于均质粗质地剖面结构相同深度的含水率($P<0.05$)。以上结果表明，夹层结构能够有效阻滞水分的垂直入渗。

2.2.2 优先流结构 细质地含粗质地水平夹层和粗质地含细质地水平夹层以及均质细质地和均质粗质地 4 种剖面结构下，染色示踪剂溶液入渗后的最大入渗深度、基质流深度、优先流比、总染色面积比和优先流通道弯曲系数的计算结果如表 7 所示。

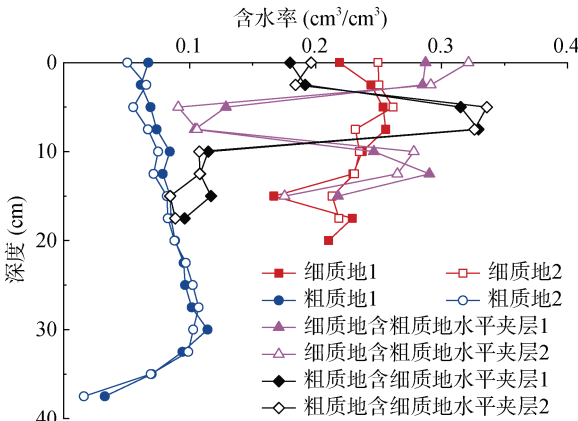


图 2 含水平夹层剖面结构与均质剖面结构的含水率随剖面深度的变化

Fig.2 Soil moisture distributions with infiltration depth for profile structure containing horizontal interlayer and homogeneous profile structure

表 6 含水平夹层剖面结构与均质剖面结构的含水率统计结果(cm^3/cm^3)

Table 6 Statistical results of soil moistures for profile structure containing horizontal interlayer and homogeneous profile structure

入渗深度(cm)	均质细质地	均质粗质地	细质地含粗质地水平夹层	粗质地含细质地水平夹层
0 ~ 5	$0.241 \pm 0.016 \text{ aB}$	$0.061 \pm 0.008 \text{ aD}$	$0.296 \pm 0.026 \text{ aA}$	$0.188 \pm 0.014 \text{ bC}$
5 ~ 10	$0.251 \pm 0.013 \text{ aB}$	$0.066 \pm 0.008 \text{ aD}$	$0.108 \pm 0.024 \text{ cC}$	$0.327 \pm 0.027 \text{ aA}$
10 ~ Z_{\max}	$0.226 \pm 0.011 \text{ aA}$	$0.087 \pm 0.011 \text{ aC}$	$0.246 \pm 0.040 \text{ bA}$	$0.104 \pm 0.012 \text{ cB}$

表 7 含水平夹层剖面与均质剖面的优先流特征指标

Table 7 Preferential flow indices for profile structure containing horizontal interlayer and homogeneous profile structure

试验设置	最大入渗深度(cm)	基质流深度(cm)	优先流比(%)	总染色面积比(%)	优先流通道弯曲系数
均质细质地	20.0	4.47	58.72	49.65	3.37
均质粗质地	37.5	19.11	38.68	76.68	2.15
细质地含粗质地水平夹层	15.0	9.00	17.79	85.24	1.61
粗质地含细质地水平夹层	17.5	5.69	45.43	63.74	3.27

图 2 和表 7 显示,均质粗质地剖面结构的水流入渗深度(两个重复试验均为 37.5 cm)最大,粗质地含细质地水平夹层剖面结构的最大入渗深度(两个重复试验均为 17.5 cm)略小于均质细质地剖面结构的最大入渗深度(两个重复试验均为 20.0 cm),细质地含粗质地水平夹层剖面结构的水流最大入渗深度(两个重复试验均为 15.0 cm)最小。以上结果表明,水平夹层结构对灌溉水入渗有非常明显的减渗作用,其中,细质地含粗质地水平夹层剖面结构相对均质细质地剖面结构的最大入渗深度降低了 25.0%,而粗质地含细质地水平夹层剖面结构相对于均质粗质地剖面结构的最大入渗深度降低了 53.3%。

表 7 数据同时显示,均质细质地剖面结构中的优先流运动非均匀程度最高,细质地含粗质地水平夹层剖面结构中的优先流运动非均匀程度最低;粗质地含细质地水平夹层和均质粗质地两种剖面结构中的优先流运动非均匀程度介于以上两种剖面结构之间,其中前者中的优先流运动非均匀程度更高。此外,两种含水平夹层的剖面结构虽都能降低灌溉水的最大入渗深度,但对基质流深度和优先流运动非均匀程度的影响却有着明显的差异性:当细质地结构中间含夹一层粗质地结构时,粗质地夹层增大了基质流深度,从而降低了优先流运动的非均匀程度;而粗质地结构中含夹一层细质地结构时,细质地夹层降低了基质流深度,从而增大了优先流运动的非均匀程度。

3 讨论

3.1 覆盖层和水平夹层的减渗机理

本试验表明,无论是覆盖层还是水平夹层均大幅降低了其原剖面结构的入渗深度。这主要是因为多孔介质剖面中的水流运动在通过不同介质的交界面时,其流动结构首先需要进行调整平衡后才能继续完成进一步的入渗,这种调整平衡作用使得入渗水聚集在分层剖面结构的上层,从而导致减渗作用的发生。虽然,水流从细质地介质入渗到粗质地介质中和从粗质地介质入渗到细质地介质中均会发生减渗作用,但减渗的机理却截然不同,前者主要为毛管屏蔽作用^[15-16],而后者则是主要是水力屏蔽作用^[17-18]。当水流从上层细质地结构进入到下层粗质地结构时,由于细质地和粗质地自身孔隙结构不同,在交界面位置处会出现孔隙吸力降低,其中,上层细质地结构的孔隙孔径小、基质势低(吸力大),而下层粗质地结构的孔隙孔径大、基质势高(吸力小),从而导致水流下渗通道失去连续性,阻滞了水分向下层粗质地结构运动。只有当

上层细质地结构中的含水率增大到使其基质势上升至与下层粗质地结构基质势达到平衡时,水分方能入渗进入下层粗质地结构中。而当水流从上层粗质地结构进入到下层细质地结构时,由于细质地和粗质地自身孔隙结构不同,在交界面位置处会出现水力传导度降低,其中,上层粗质地结构的孔隙孔径大、导水能力强,而下层细质地结构的孔隙孔径小、导水能力差,从而导致上层粗质地结构排水速度降低,水分在粗质地层蓄积^[19]。

3.2 覆盖层对优先流的作用

优先流的形成和影响因素有很多,多孔介质的结构和质地、入渗的初始条件和边界条件,以及水流运动的非稳定性(非线性)均能导致优先流的产生并影响优先流的发展^[20]。动物和植物根系活动以及多孔介质自身干缩开裂等因素形成的大孔隙是土壤优先流的重要通道^[21]。当多孔介质剖面结构不存大孔隙时,由于入渗湿润锋不稳定也能在土壤中形成指状的优先流通道^[22]。其中,水力传导度随多孔介质深度增加被公认为是导致入渗湿润锋失稳和优先流形成的重要因素^[23-25],而多孔介质水分特征曲线的滞后作用则控制着优先流沿着相同路径重复发生。粗质地介质的水分特征曲线滞后性弱,难以维持优先流通道结构的稳定发展;而细质地介质的水分特征曲线滞后性强,有利于优先流沿着相同路径再发生^[26]。因此,粗质地剖面结构中的优先流运动非均匀程度要低于细质地剖面结构中的优先流运动非均匀程度。细质地覆盖粗质地剖面结构中,剖面水力传导度沿入渗方向增大,有利于优先流的形成和发展。然而,毛管屏蔽作用使得灌溉水积蓄在覆盖层而较少下渗,从而降低了灌水入渗深度。因此,虽然细质地覆盖粗质地剖面结构中的优先流运动非均匀程度要明显高于均质粗质地剖面结构中的优先流运动非均匀程度,但其入渗深度却明显小于均质粗质地剖面结构中的入渗深度。由于细质地覆盖粗质地剖面结构中粗质地层较弱的水分特征曲线滞后作用,降低了粗质地层中的优先流沿相同路径重复发生的概率,且毛管屏蔽作用使得灌溉水积蓄在覆盖层而较少下渗,因此,优先流在细质地覆盖粗质地剖面结构中的粗质地层发育并不充分,其优先流运动非均匀程度小于均质细质地剖面结构中的优先流运动非均匀程度。与细质地覆盖粗质地剖面结构相反,粗质地覆盖细质地剖面结构的水力传导度沿深度方向降低,可有效抑制优先流的形成和发展,且水力屏蔽作用使得灌溉水蓄积在覆盖层而较少下渗,因此,粗质地覆盖细质地剖面结构的最大入渗

深度最小、优先流运动非均匀程度最低。

3.3 水平夹层对优先流的作用

本研究中,对于细质地含粗质地水平夹层剖面结构,当水流从细质地层进入粗质地层时,水力传导度沿深度方向增大,有利于粗质地夹层中优先流的形成和发展;优先流传导的水流到达粗质地夹层与细质地层交界面时,水力传导度沿深度方向降低的分布结构及水力屏蔽作用降低了下部细质地层中优先流运动的非均匀程度,但由于粗质地夹层中的优先流结构将上层细质地结构传导的水流集中在优先流通道中输移,从而使得下部细质地层中的优先流结构也能得以较为充分和快速的发展,因此,细质地含粗质地水平夹层剖面结构中的优先流非均匀程度虽然不及其他剖面中的优先流非均匀程度高,但却高于粗质地覆盖细质地剖面结构中的优先流运动非均匀程度。与细质地含粗质地水平夹层剖面结构不同,水流在粗质地含细质地水平夹层剖面结构中运动时首先穿透粗质地与细质地交界面,然后再穿透细质地与粗质地交界面,前者降低了优先流运动的非均匀程度,而后者则增大了优先流运动的非均匀程度。由于顶层粗质地层的持水能力差而排水能力强,加之细质地水平夹层厚度较小(5 cm),一部分水流到达细质地与粗质地交界面后即在底层粗质地层中引发明显的优先流运动。因此,尽管粗质地含细质地水平夹层剖面结构因粗质地与细质地交界面的水力屏蔽作用和细质地与粗质地交界面的毛管屏蔽作用产生明显的减渗作用(最大入渗深度仅为 17.5 cm,在 6 种剖面结构中排第 4),但其水流运动的非均匀程度却很高,仅次于均质细质地剖面结构中的优先流运动非均匀程度。

4 结论

1) 覆盖层和夹层对水流运动均具有明显的减渗作用。其中,水流从细质地介质入渗到粗质地介质时主要为毛管屏蔽作用导致减渗,而水流从粗质地介质入渗到细质地介质时主要为水力屏蔽作用导致减渗。

2) 毛管屏蔽作用和水力屏蔽作用不仅降低了灌水在多孔介质中的入渗深度,同时使得分层多孔介质剖面的含水率沿深度方向不连续分布。

3) 毛管屏蔽作用增大了分层多孔介质剖面结构中的优先流运动非均匀程度,而水力屏蔽作用则降低了分层多孔介质剖面结构中的优先流运动非均匀程度;相对于覆盖层,水平夹层加剧了优先流运动非均匀程度。

参考文献:

- [1] 王全九,汪志荣,张建丰,等. 层状土入渗机制与数学模型[J]. 水利学报, 1998, 29(S1): 77-80.
- [2] 林青,徐绍辉. ERT 与 TDR 联合反演层状土壤水分运动过程[J]. 土壤学报, 2023, 60(2): 390-398.
- [3] 侯林坊. 基于 van Genuchten-Mualem 模型的层状土水分运动数值模拟及参数估计[D]. 西安: 西安理工大学, 2022.
- [4] 李毅,任鑫, Horton Robert. 不同质地和夹层位置对层状土入渗规律的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(4): 485-490.
- [5] 马蒙蒙. 层状土壤中水流和溶质运移特征及数值模拟[D]. 青岛: 青岛大学, 2020.
- [6] Corradini C, Morbidelli R, Flammini A, et al. A parameterized model for local infiltration in two-layered soils with a more permeable upper layer[J]. Journal of Hydrology, 2011, 396(3/4): 221-232.
- [7] Gohardoust M R, Sadeghi M, Ziatabar Ahmadi M, et al. Hydraulic conductivity of stratified unsaturated soils: Effects of random variability and layering[J]. Journal of Hydrology, 2017, 546: 81-89.
- [8] Simunek J, Sejna M, Saito H, et al. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media, Version 4.0[M]. CA.: University of California, Riverside, 2008.
- [9] 刘目兴,宋兴敏,卢世国,等. 三峡库区不同植被覆盖坡地的土壤优先流运动特征研究[J]. 土壤学报, 2022, 59(5): 1321-1335.
- [10] 宋艺琳,毕华兴,赵丹阳,等. 晋西黄土区不同入渗水量下刺槐林地优先流特征[J]. 土壤, 2024, 56(2): 448-456.
- [11] 朱美菲,程金花. 永定河典型护岸植被土壤水分入渗特征及影响因素[J]. 土壤, 2023, 55(5): 1129-1137.
- [12] 陈晓冰,严磊,李振东,等. 耕作方式对岩溶区甘蔗地土壤优先流特征的影响[J]. 土壤, 2019, 51(4): 786-794.
- [13] 盛丰,张敏,薛如霞,等. 灌溉水中盐分对土壤结构性质及水流运动特征的影响[J]. 水利学报, 2019, 50(3): 346-355.
- [14] 葛建,黄德文,高旭,等. 分层土壤的持水性能研究[J]. 西南农业学报, 2019, 32(9): 2126-2132.
- [15] Cui G T, Zhu J T. Prediction of unsaturated flow and water backfill during infiltration in layered soils[J]. Journal of Hydrology, 2018, 557: 509-521.
- [16] Yetbarek E, Kumar S, Ojha R. Effects of soil heterogeneity on subsurface water movement in agricultural fields: A numerical study[J]. Journal of Hydrology, 2020, 590: 125420.
- [17] Si B, Dyck M, Parkin G. Flow and transport in layered soils[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2011, 91(2): 127-132.
- [18] He J H, Hantush M M, Kalin L, et al. Two-layer numerical model of soil moisture dynamics: Model assessment and

- Bayesian uncertainty estimation[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 613: 128327.
- [19] 王文焰, 张建丰, 汪志荣, 等. 黄土中砂层对入渗特性的影响[J]. *岩土工程学报*, 1995, 17(5): 33–41.
- [20] 盛丰, 张利勇, 吴丹. 土壤优先流模型理论与观测技术的研究进展[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(6): 1–10.
- [21] 韩巧玲, 柏浩, 赵玥, 等. 采用染色示踪技术的土壤优先流自动分割与量化系统[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(6): 127–134.
- [22] Flury M, Flühler H. Modeling solute leaching in soils by diffusion-limited aggregation: Basic concepts and application to conservative solutes[J]. *Water Resources Research*, 1995, 31(10): 2443–2452.
- [23] Philip J R. The growth of disturbances in unstable infiltration flows[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1975, 39(6): 1049–1053.
- [24] Nguyen H V, Nieber J L, Ritsema C J, et al. Modeling gravity driven unstable flow in a water repellent soil[J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 215(1/2/3/4): 202–214.
- [25] Scarfone R, Wheeler S J, Lloret-Cabot M. A hysteretic hydraulic constitutive model for unsaturated soils and application to capillary barrier systems[J]. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2022, 30: 100224.
- [26] Tsoar H. Sand dunes mobility and stability in relation to climate[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2005, 357(1): 50–56.