

## 土壤大孔隙流研究进展与展望

陈力, 顾迎春, 杨柳, 吕博, 陈俊奇, 于志国

### 引用本文:

陈力, 顾迎春, 杨柳, 等. 土壤大孔隙流研究进展与展望[J]. 农业环境科学学报, 2026, 415(1): 23-32.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2025-0238>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 三种环境材料复合对土壤水肥保持同步增效的影响

马妍, 刘振海, 刘陆涵, 史妍君, 黄占斌

农业环境科学学报. 2017, 36(12): 2471-2478 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0564>

#### 应用HYDRUS-1D模型模拟分析PFCs在土壤中的迁移特征

郇托娅, 郑跃军, 王金生

农业环境科学学报. 2018, 37(10): 2175-2182 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1637>

#### 干湿交替和模拟氮沉降对巴音布鲁克高寒湿地土壤CO<sub>2</sub>排放的影响

包振宗, 侯艳艳, 朱新萍, 赵成义, 胡保安, 贾宏涛, 徐晓龙

农业环境科学学报. 2018, 37(3): 598-604 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1646>

#### 水泥-生石灰对铬污染土固化效果及微观孔隙特征的影响

原奇, 申向东, 薛慧君, 李根峰, 熊路, 邹欲晓

农业环境科学学报. 2018, 37(6): 1141-1148 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1418>

#### 不同改良剂对旱地苹果园温室气体排放的影响

李钊, 刘帅, 丁艳宏, 孙文浩, 高晓东, 赵西宁

农业环境科学学报. 2021, 40(1): 227-236 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0846>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陈力, 顾迎春, 杨柳, 等. 土壤大孔隙流研究进展与展望[J]. 农业环境科学学报, 2026, 45(1): 23-32.

CHEN L, GU Y C, YANG L, et al. Research progresses and prospects of soil macropore flow[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2026, 45(1):23-32.



开放科学 OSID

# 土壤大孔隙流研究进展与展望

陈力<sup>1,2</sup>, 顾迎春<sup>1,2</sup>, 杨柳<sup>1,2</sup>, 吕博<sup>1,2</sup>, 陈俊奇<sup>1,2</sup>, 于志国<sup>1,2</sup>

(1. 南京信息工程大学水文水资源学院, 南京 210044; 2. 水利部水文气象灾害机理与预警重点实验室, 南京 210044)

**摘要:**大孔隙流在水分入渗过程中绕过大部分介质,快速迁移至深层剖面或地下水,研究这一普遍存在的现象及其机制对揭示土壤水分和溶质运移规律至关重要,在水资源、土壤环境和生态系统等领域具有重要应用价值。目前,大孔隙流的实验模拟、理论研究和模型构建已取得一定进展,但理论框架和实验方法仍需完善。本文系统阐述了大孔隙及大孔隙流的成因、定义、表征方法及其对土壤水分与溶质运移的影响,回顾了相关理论和模拟方法的历史和近期发展,总结了室内与田间实验以及观测技术,并探讨了包含大孔隙效应的模型模拟效果,以期为深入研究提供参考。

**关键词:**土壤水;土壤大孔隙;大孔隙流;人造大孔隙实验

中图分类号:S152.7 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2026)01-0023-10 doi:10.11654/jaes.2025-0238

## Research progresses and prospects of soil macropore flow

CHEN Li<sup>1,2</sup>, GU Yingchun<sup>1,2</sup>, YANG Liu<sup>1,2</sup>, LÜ Bo<sup>1,2</sup>, CHEN Junqi<sup>1,2</sup>, YU Zhiguo<sup>1,2</sup>

(1. School of Hydrology and Water Resources, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Key Laboratory of Hydrometeorological Disaster Mechanism and Early Warning of Ministry of Water Resources, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** Macropore flow can bypass soil matrix during water infiltration, moving rapidly to deeper soil layers or groundwater. Studying this widespread phenomenon and its mechanisms is crucial for understanding the patterns of soil water and solute transport, which will substantially benefit applications in water resources, soil environment, ecosystems, and related fields. Currently, progresses have been made in experimental studies, theoretical development, and modeling related to macropore flow, but the theoretical framework and experimental methods still require improvement. This paper comprehensively examines the causes, definitions, and characterization methods of macropore flow, along with its impact on soil water movement and solute transport. It reviews the historical and recent developments in related theories and simulation methods, summarizes laboratory and field experimental techniques, and discusses model simulations incorporating macropore effects, aiming to provide a reference for future research.

**Keywords:** soil moisture; soil macropore; macropore flow; artificial macropore experiment

自然状态下土壤具有很强的空间异质性<sup>[1]</sup>,其中的一个重要表现是土壤中的优先路径<sup>[2-3]</sup>。通过优先路径的水流运动会绕过大部分地下介质,通常比非饱和带中的其他类型水分流动更快、流量更大<sup>[4-5]</sup>,在其影响下,土壤中水、溶质和颗粒的运动与基于均一无结构的介质预测出的结果相差较大。

优先路径和优先流在土壤中普遍存在。土壤中的孔隙网络结构、介质水力性质以及含水量的空间分布不均匀都可促使优先流的形成<sup>[6]</sup>。实际土壤中,优先路径空间结构的随机性和其中流动状态的复杂性使得理论描述和模拟预测都面临很大困难。不仅如此,优先流形成后导致的水和溶质不规则分布,还可

收稿日期:2025-03-10 录用日期:2025-05-19

作者简介:陈力(1973—),男,浙江杭州人,博士,教授,博士生导师,主要研究水文与水沙过程机理与模拟。E-mail:lchen@nuist.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(12272186)

Project supported: National Natural Science Foundation of China(12272186)

造成土壤剖面不规则浸润,这一影响进一步增加了水分与溶质输移预测的难度。优先流的普遍性和复杂性使得研究土壤优先流的性质和影响成为土壤水文学中的核心挑战之一<sup>[7]</sup>。

土壤中的优先流可以划分为不同的子类别,其成因及影响程度各不相同。从触发机制来看,土壤中的优先流可以分为漏斗流、指流以及大孔隙流等<sup>[5]</sup>。土壤中介质水力性质的空间分布不均匀可形成漏斗流<sup>[8]</sup>,水分状态和通量分布的不均匀会促进指流的形成<sup>[9]</sup>,而水分在单个细长孔隙中运动的过程则会形成大孔隙流<sup>[4,6,10]</sup>。

大孔隙流过程中水分的流速往往远快于在一般孔隙中的流速,同时也会输送更多的水量到达更深的土层<sup>[4]</sup>。与其他子类别相比,大孔隙流的影响在优先流中占据主导地位<sup>[11-12]</sup>,因此对优先流的研究多集中在大孔隙流上。土壤中大孔隙的形成原因主要有生物活动、水文地质过程以及农业措施等<sup>[13-15]</sup>。大孔隙虽然一般仅占土壤体积的很小部分(0.1%~5.0%),但在很大程度上主导着水分及溶质在土壤中的运移(可达90%以上)<sup>[16-17]</sup>。大孔隙流的影响及研究意义体现在多个方面:在水文方面,了解大孔隙流对预测水循环过程中的入渗和径流、含水层补给、地下风暴流以及洪水灾害等至关重要<sup>[18-20]</sup>;在生态方面,大孔隙流对于塑造生态系统特征以及维持其功能具有重要作用;在农业方面,大孔隙流过程会影响灌溉、根区排水以及营养物质和有害化学污染物的运移和分布<sup>[19]</sup>。因此对大孔隙流的研究具有巨大的经济、环境和科学意义。

在自然情况下,土壤中大孔隙的空间结构呈现出高度复杂和随机性<sup>[10,16]</sup>,这一特性使得研究大孔隙流的物理机制面临极大的挑战。由于流动状态的复杂性和高观测难度,目前的理论刻画与数值模拟仍难以全面反映大孔隙流的实际过程与规律。观测与实验研究依然是推进大孔隙流认识的关键途径。为此,在大孔隙流研究中,不仅要使用多种技术手段获取自然条件下土壤大孔隙的几何结构和空间网络特征,还需通过人工模拟实验对大孔隙流水分运移过程进行模拟。大孔隙流研究的核心问题之一在于确定大孔隙域内水流的运动状态,其直接决定大孔隙域和基质域之间的水分交换过程<sup>[7,10]</sup>,因此实验研究中还原大孔隙流流态极为关键<sup>[21-22]</sup>,在此基础上进一步改进理论和模拟方法将是推进大孔隙流研究的可行途径。基于此,本文将系统介绍学术界已取得的对土壤大孔隙

和大孔隙流的主要认识,并重点评述近期在土壤大孔隙流理论构建和实验方法方面的研究进展。

## 1 土壤大孔隙及大孔隙流

### 1.1 土壤大孔隙定义

在自然土壤和耕作土壤中,大孔隙普遍存在。大孔隙的存在对土壤水分过程的影响主要体现在其为水分和溶质运动提供了快速通道,使得大量水分与溶质可以绕过土壤基质,直接向前输送<sup>[23]</sup>,从而显著增加了水分运动和溶质迁移的效率。生物洞穴(蚯蚓、鼯鼠等动物的通道)、植物根系的生长与腐烂、土壤冻融循环以及农业措施均是孔隙形成的重要因素<sup>[24]</sup>。土壤动物群形成的大孔隙多为管状结构,其直径范围广泛,从小于1 mm到超过50 mm不等。这些由土壤动物形成的大孔隙通常集中在土壤表层附近,便于其生存与活动。此外,一些群居性土壤生物,如蚂蚁和蚯蚓,还会进一步构建复杂的大孔隙网络,从而增强土壤的通透性和连通性<sup>[25]</sup>。植物根系形成的孔隙也多为管状,其中最为典型的是树木根系腐烂后留下的管道。这些管道结构清晰、连通性好,是土壤中极为重要的快速水流通通道<sup>[26]</sup>。

对实际土壤大孔隙的深入研究,为理解其特征与功能积累了丰富的经验性认识。为进一步提升对大孔隙与大孔隙流的理论认知,首要任务是构建一个能够精准反映大孔隙特征的科学生定义。土壤大孔隙的定义需综合考虑其形态、性质和功能,是研究大孔隙的理论基础和依据。然而,目前对于大孔隙与土壤孔隙的界定尚未形成统一标准。常见的定义方法包括如下两类:(1)基于孔隙功能的定义。将大孔隙的功能简单描述为允许地表积水向下传导的孔隙,这种方法是将大孔隙等价于毛管进行描述<sup>[27]</sup>。美国土壤科学协会(SSSA)给出的大孔隙孔径界定值为0.075 mm<sup>[28]</sup>;(2)基于毛管势的定义。通过毛管力与土水势的关系给出界定大孔隙的毛管势数值。Beven和Germann<sup>[6]</sup>提出以毛管势 $>-0.1$  kPa作为大孔隙的判定值。对于常温条件下的水,该值对应于约3 mm的孔隙直径。其他学者提出的毛管势界定值多在 $-10\sim-0.3$  kPa之间,对应孔径为0.03~1 mm。目前对大孔隙孔径界定标准的不一致,可能与不同领域研究目标的差异有关。对于水文研究中的产汇流过程,Beven和Germann给出的标准更有参考价值。

### 1.2 大孔隙流的物理特征

大孔隙流可简单定义为发生在土壤大孔隙系统

中的水流,但其物理特征远较这个简化描述复杂<sup>[2]</sup>。土壤中的大孔隙会导致水分入渗时湿润锋出现动力不稳定,从而宏观上出现速度相差很大的非均匀流场,其入渗速度和水分分布都与基于均一无结构介质的流场有较大差异<sup>[14]</sup>。Beven和Germann<sup>[6]</sup>指出土壤大孔隙流是通过大孔隙系统从而越过大部分土壤基质的集中快速水流,其流速可较基质流大若干数量级。大孔隙中水流可以呈毛管流形式,但更多呈自由表面膜状流形式,甚至呈湍流状态,其运动在时间上还可能出现显著的间歇特征。所有这些性质显示土壤大孔隙流与基质流在物理上有本质不同,重力和黏性力起到主要控制作用,而毛细力的影响往往较为次要。

## 2 大孔隙成因和大孔隙表征技术

### 2.1 大孔隙成因

大孔隙的成因呈现出多元且复杂的特征,主要可以划分为生物性因素(动植物作用)以及非生物性因素(冻融循环等)。土壤动物的活动是大孔隙形成的重要原因之一,诸如鼯鼠、地鼠等穴居动物挖掘的管状洞穴,蚯蚓构建的通道,以及蚂蚁营造的大孔隙网络<sup>[29]</sup>。植物根系在大孔隙形成中同样发挥关键作用。无论是处于生长状态的活根,还是已经腐烂的根系,都能形成大孔隙,而这些孔隙的结构则受到植物种类和生长条件的制约。在森林土壤中,此类大孔隙占据着相当可观的体积比例,但其占比会随着深度的增加而逐渐减少。除此之外,腐烂树桩、树木空洞以及草根等也会对大孔隙系统产生不同程度的影响<sup>[30]</sup>。土壤的物理变化也可产生大孔隙,如土壤干裂和风化也是大孔隙的重要成因。黏土在干燥环境下发生收缩、基岩材料遭受化学风化、寒区土壤的冻融循环作用以及特定的耕作技术等,都有可能形成裂缝和裂隙类大孔隙。不同大孔隙成因之间还可能产生协同效应,如土壤物理变化形成的土块间裂缝,还可能被土壤中植物根系和动物利用<sup>[31]</sup>,使大孔隙得到进一步发展。

### 2.2 大孔隙空间特征表征技术

大孔隙的空间特征是深入探究大孔隙及其内部水流特性的关键要素,主要包含了大孔隙的几何特征(如孔隙尺寸及其统计分布、弯曲度等)和结构特征(如孔隙网络结构和连通性等)。在自然土壤中,土壤大孔隙的空间特征几乎无法直接获取,往往需要根据测量数据进行推断,许多学者因此研发了用于描述、推断及量化大孔隙的技术<sup>[32]</sup>。不同技术可以提供不同类型的信息以相互补充,实际研究中通常会组合使

用不同技术以获取更全面的认知。

CT扫描技术可以在不破坏土壤的前提下,精准获取土壤大孔隙的结构影像。通过CT扫描,不同密度的土壤会在图像中以不同亮度呈现,从而清晰地显示出大孔隙的分布和几何特征。基于此,可以进一步提取出土壤的大孔隙度、大孔隙网络参数以及大孔隙几何参数(如自相似性、尺度不变性、拓扑维数等)。Naveed等<sup>[33]</sup>从壤质田中提取土柱,使用工业X射线CT扫描仪进行扫描与处理,获取其大孔隙特征参数(大孔隙度、大孔隙表面积以及连通性等)。结果表明,X射线CT扫描得到的大孔隙网络特征参数之间存在紧密的内在联系,且这些特征参数又与大孔隙流特征参数(如导水率、透气率以及气体扩散率等)存在显著的相关性,该结果为深入理解大孔隙流的机制提供了重要依据。Casali等<sup>[34]</sup>通过将X射线图像得出的土壤结构指标与在不同土地利用方式、地点及深度采集的22个土柱排水实验估算的运动波指数值进行关联分析,发现犁底层和大孔隙度较小的底层土中生物孔隙占全部大孔隙的比例非常高,多数接近于垂直方向,因此在这两类土层中大孔隙流的流速更快。虽然CT扫描技术可生成较精细的孔隙结果,但在实际应用中仍面临诸多限制。首先,因其成本较高,获取扫描结果较为困难;其次,该技术难以直接在野外现场实施,多用于实验室研究。此外,图像重建过程中所采用的假设条件不同,可能导致对孔隙度的描述出现显著差异。

树脂浸泡固化<sup>[35]</sup>是一种成本较为低廉的方法,但使用该方法需要充足的准备工作。在提取原状土样时,需要避免破坏大孔隙结构,随后使土样完全干燥,将树脂溶剂倾倒在土表使其自然渗透,再通过静置或加热使得树脂硬化,最后进行切片,即可通过目视检查,并可将切片图像输入计算机进行图像分析。尽管该方法在成本上较为低廉,但其结果的精度在很大程度上取决于原状土样的完整度以及处理过程的精细程度。此外,由于该方法中使用的树脂本身与水的黏度有明显差异,且树脂并不能使土壤基质浸润,因此使用树脂固化法所得到的大孔隙结构所测得的表面积可能小于土壤湿润时的实际表面积,因此并不能完全等同于实际水流入渗时的孔隙结构。

使用类似于树脂的黏性硬化液体更加适用于检测大孔隙结构形态,此类液体需具备足够流动性,同时保持适当的黏性,以确保其仅在大孔隙中流动,而不会渗入土壤基质中。这种方法不仅快速且成本低

廉,还可以适用于野外操作。但该方法也存在一定的局限性:虽然能够提供关于大孔隙网络的空间几何特征信息,但无法精确描绘出水流在大孔隙中的流动路径和流态<sup>[36]</sup>。

### 3 大孔隙流触发机制和大孔隙流表征技术

#### 3.1 大孔隙流触发机制

大孔隙流发生前,水分运动局限于土壤基质中。当大孔隙周围基质部分或全部达到饱和,水分则可以进入大孔隙,形成大孔隙流。大孔隙的存在是大孔隙流形成的基础条件。在土壤中,具有一定尺寸的大孔隙为水分提供了快速流动的通道。较大的孔隙能够容纳更多的水分,且在相同的水力梯度下,水分在大孔隙中的流速显著高于一般孔隙<sup>[37]</sup>。此外,大孔隙的分布也会对大孔隙流的形成和发展产生重要影响。当大孔隙在土壤中分布较为均匀且相互连通时,水分更容易在大孔隙中形成连续的流动路径,促进大孔隙流的发展。相反,如果大孔隙分布不均匀或孤立存在,则可能会限制水分在大孔隙中的流动,不利于大孔隙流的形成<sup>[38]</sup>。大孔隙入口水分通量是影响大孔隙流形成的重要因素。较高的通量为水分进入大孔隙提供了更强的动力。当通量增加时,水分在大孔隙中的传输速度显著加快,且能够更快地到达大孔隙层底部并流出土体。这是因为高通量增大了土壤表面的水力梯度,水分更容易克服基质的阻力进入大孔隙,并在大孔隙中快速流动,从而促进大孔隙流的形成<sup>[37]</sup>。

大孔隙流不仅存在于地表开口的大孔隙系统,还可发生在土壤内部。其发生在土壤表面的必要条件是土壤基质导水率小于降雨强度或土壤表层接近饱和。此时,地表发生积水并向大孔隙供水,大孔隙中水流由水膜状态逐渐发展至大孔隙流,因此大孔隙周边地表微地形及其形成的大孔隙汇水面积,对大孔隙流的形成也具有重要作用。发生在土壤内部的大孔隙流则多存在于土壤浅层饱和带的未开放大孔隙中,其产生是连续水体的积聚、连通以及重力和水压的作用<sup>[6,10,39]</sup>。

#### 3.2 大孔隙流表征技术

大孔隙流的表征与大孔隙结构的表征并不完全对等,因为在水分入渗过程中,土壤中的大孔隙并不一定全部参与。大孔隙流的实际流动路径受大孔隙直径、大孔隙的倾斜度以及连通性等多种因素的影响,因此针对大孔隙流本身的表征也是必不可少的。研究中常将表征大孔隙结构的技术与表征水流的技

术相结合以便更好地推测大孔隙流。描述大孔隙流的技术手段主要可以分为观测水分分布、示踪剂实验、溶质穿透曲线以及图像分析方法。

示踪剂技术是最常用的土壤大孔隙流表征技术。这种技术使用具有可识别特性的特定物质,对水分在土壤中的迁移、转化和分布过程进行表征。示踪剂方法主要用于大孔隙分布的研究,通过染色方法区分水流经过的区域和未流经的区域从而确定大孔隙流的真实流动路径,同时结合图像识别技术,可以研究水分的运移通道以及优先流的发生机制<sup>[40]</sup>。除染色剂外,还可以使用非吸附性无机离子和放射性同位素作为示踪剂。在使用示踪剂时,需综合考虑示踪剂的性质(毒性、稳定性、成本和可用性)、仪器的可用性和土壤特性。然而,染色剂示踪实验过程通常需要对土壤进行破坏性挖取,导致实验结果无法在同一地点重复获得;此外,部分示踪剂可能被基质吸附,从而在研究水分运移时引入一定的迟滞性<sup>[41]</sup>。

土壤溶质穿透曲线法是通过在人工土柱表面施加染色剂或示踪剂,并对其进行人工降雨,观测出流中示踪剂浓度变化过程,得到示踪剂穿透曲线<sup>[41]</sup>。通过比较带大孔隙土壤与基质土壤的穿透曲线,可量化大孔隙对水流运动与溶质运移的影响<sup>[42]</sup>。

基于X射线和中子射线成像的图像分析方法可以观察大孔隙内的水流运动。例如,使用可吸收X射线的示踪剂,如碘化钾、碘化钙等,在实验室中可直观呈现水在大孔隙中的流动状态。然而,示踪剂会改变水分本身的黏度,可能会对观察结果产生一定影响<sup>[43]</sup>。

在野外研究中,通常设置多个地点和深度的水分传感器,如时域反射仪(TDR),来观测不同观测点不同深度处的含水量变化,进而研究入渗过程中水流的方向和非均匀性<sup>[9]</sup>。TDR可以实现高频率的数据采集,快速捕捉入渗过程,从而分辨跨越基质层传输的大孔隙流。在更大的时空尺度上,使用同位素可区分降雨事件前水(旧水)和事件来水,结合径流时间过程分析,可研究大孔隙流主导的地下快速径流输水机制<sup>[44]</sup>。当前研究中多用稳定同位素(如氢氧同位素)来估算水分来源,用放射性同位素(如氡、碳同位素)来估算水龄,从而量化新水和老水的混合比例。部分研究结果提示了旧水从基质排入大孔隙快速通道的传输机制并以此解释旧水主导快速径流的现象。

当前的检测技术仍难以方便地观测大孔隙内的水流运动,因此对于研究大孔隙域内的水流动态以及

大孔隙域和基质域间的相互作用仍有巨大欠缺。故而还需深入研究大孔隙网络简化方法,在此基础上进一步开展人造大孔隙室内实验以研究其运动机理。

## 4 大孔隙流理论和实验研究

### 4.1 大孔隙流理论描述与模拟方法

早期对大孔隙流的理论描述方法通常将优先流假定为非饱和基质中的扩散流,其物理基础是将流动近似为黏性流,并使用基质势来量化其驱动作用。基于这一理论框架,这种流动被进一步概括为表面张力黏性流(Surface tension viscous flow, STVF)。这种流仍然符合达西定律,对其模拟多通过Richards方程的不同形式来实现。Richards方程是通用的土壤基质流动基本控制方程,因此STVF模型允许大孔隙流与基质流使用同类方程来描述,在求解时可以充分利用已有的Richards方程研究成果。

基于大孔隙流简化表示的方法(图1)主要可以分为两类。其中,单域方法通常基于非饱和流的Richards方程,并使用修正的土壤水分特征曲线来统一涵盖基质流与优先流<sup>[3]</sup>。而双域方法将多孔介质分为两个空间上重叠的域,分别对应土壤基质和大孔隙系统,并使用不同的土壤水分特征曲线分别描述两个域的水力性质。在双域方法中,mobile-immobile方法假定土壤基质中的水是不流动的,水分仅在大孔隙中流动<sup>[45-46]</sup>。双孔隙度方法类似于mobile-immobile

方法,但加入了基质和大孔隙域间的质量交换<sup>[47-48]</sup>。双渗透率方法(Dual permeability)是模拟两个域中水流和质量交换的标准方法,假设基质域中的流动受毛细力和重力共同控制,使用Richards方程建模。在对大孔隙域的模拟中有一些研究假定大孔隙域也受毛细力和重力控制<sup>[49]</sup>,同样运用Richards方程建模,但使用适配大孔隙域的参数;而另一些研究假设大孔隙流主要受重力支配,并使用运动波方程来模拟<sup>[50]</sup>,基于运动波方程的双渗透率方法需要的参数更少。双渗透率模型所需的参数相对仍然较多,且大孔隙域参数多数较难量化,从而限制了其在实际中的应用<sup>[51]</sup>。

虽然STVF类模型提供了建模的便利性,但是由于表面张力在大孔隙流动中的作用较小,大孔隙中的流动与一般孔隙中的流动机制和流动状态有所不同,STVF模型难以有效模拟大多数优先流。为克服上述局限性,Nimmo<sup>[52]</sup>于2010年提出了源响应模型(Source-responsive model),将大孔隙定义为并非持续活跃的源响应域(SR),并且将大孔隙中的水流运动概化为沿大孔隙的自由表面膜状流(图1)。该模型将研究区域划分为扩散域(Diffuse-flow domain)和源响应域(Source-responsive domain)。在该模型中,模型参数代表介质特性,可以更好地进行物理解释,其整个系统的通量密度可以表示为:

$$q(z,t) = -K(\theta_D) + \frac{1}{3} \frac{g}{\nu} L_{\max}^3 Mf(z,t) \quad (1)$$

式中: $q(z,t)$ 为组合域的通量密度; $K$ 为非饱和导水

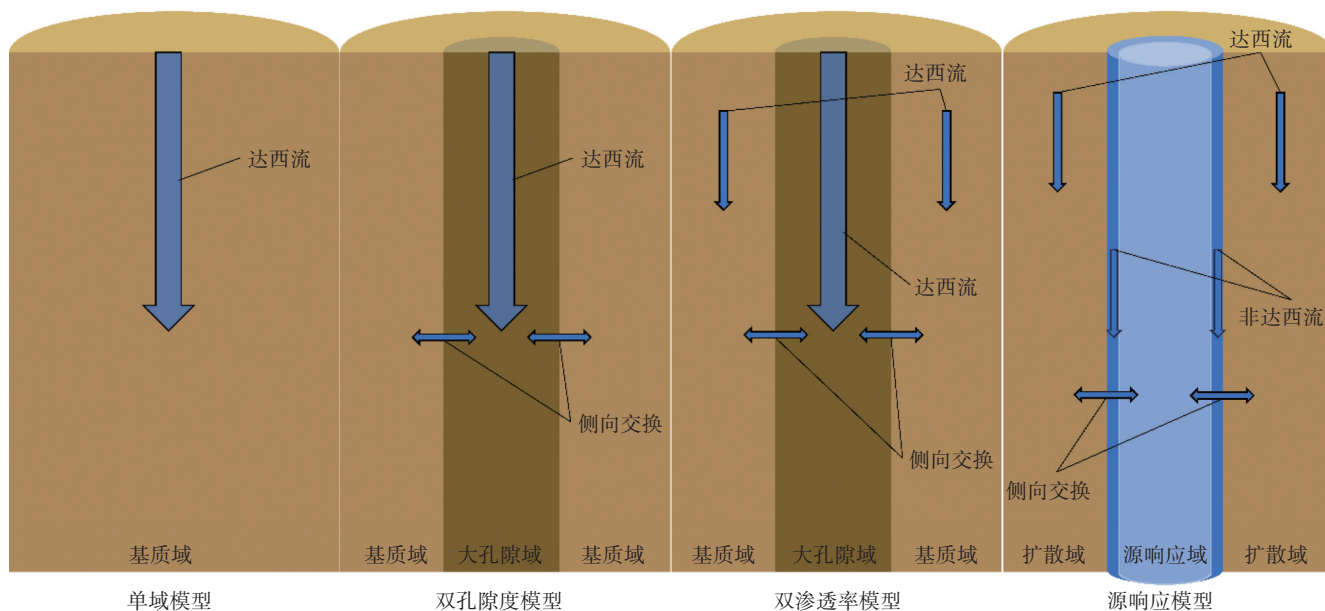


图1 大孔隙流概念模型分类

Figure 1 Classification of conceptual models of macropore flow

率;  $\theta_D$  为扩散流区域的体积含水量;  $g$  为重力加速度;  $\nu$  为液体的运动黏度;  $L_{\max}$  为大孔隙域表面最大可支撑的膜状流厚度;  $M$  为潜在膜状流面积, 即为给定介质内大孔隙总内表面面积与介质体积的比值;  $f$  为描述活性面积分数的无量纲因子, 可以等同于某深度水平切面中膜状流占大孔隙总周长的比例。

此模拟方法使用源响应项来描述大孔隙流的影响, 在此基础上得到组合域的通用源响应方程:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial K(\theta_D)}{\partial z} \frac{\partial \phi}{\partial z} + K(\theta_D) \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} - \frac{\partial f q_{s_{\max}}}{\partial z} \quad (2)$$

式中:  $\theta$  为组合域的体积含水量;  $K$  为非饱和导水率;  $\theta_D$  为扩散域的体积含水量;  $\phi$  为扩散域的总水势;  $q_{s_{\max}}$  为源响应域的最大通量速度。

Nimmo 和 Mitchell<sup>[53]</sup> 于 2013 年提出 SR 模型的简化方法, 其限制条件是基于恒定的雨强并忽略基质域的表面渗透, 仅通过实验和点尺度的含水量测量验证。源响应模型是当前尤其值得关注的理论方法, 在理论和应用方面都有较大潜力。

模型边界条件是除了控制方程以外模拟工作的另一个重要方面, 土壤表面边界条件的设定对于大孔隙域和基质域的水量分配模拟具有决定性作用。Beven 和 Germann<sup>[11]</sup> 于 1981 年提出的理论使用概念化方法来划分水分的分配。当基质未达到饱和时, 表面的输入水量全部进入基质内(此时孔隙内的通量为 0), 当基质达到饱和时, 基质以饱和导水率向孔隙内供水<sup>[6]</sup>。与此假定方式类似的还有 IN<sup>3</sup>Model<sup>[54]</sup>, 该模型将土壤进行分层处理, 水分由上而下依次对每个土层进行补给, 该模型先使用 Green-Ampt 方法来计算基质中的水分入渗, 将该层不能入渗到基质中的水分归为上层大孔隙流的产出量, 且规定土壤基质处于饱和状态时, 孔隙与基质间没有水分交换。IN<sup>3</sup>Model 方法还考虑了模型下边界的不同处理方式, 对于水分和溶质输移特征, 如含水量变化、基质最终含水量变化深度、染色剂图案特征以及溶质总通量变化都取得了较好的模拟效果。此外, 考虑到孔隙参数难以获取的特性, 一些研究着眼于通过统计分类的方式来划分不同土壤质地对大孔隙流的敏感性, 以简化模型参数化步骤<sup>[54]</sup>。

在大孔隙流模拟过程中, 孔隙域与基质域之间的质量交换是备受关注的重点问题。两域之间交换量的计算方式对于水分的时空分布以及流速的预测具有至关重要的作用。不同的大孔隙模型在处理这一问题时各有不同, 通常情况下会采用一阶扩散方程来

表示<sup>[55]</sup>, 即通过基质势梯度和扩散率来进行描述。此外, 也有研究采用其近似简化的方式来描述, 即以基质和孔隙的含水量差乘以扩散系数得到扩散率<sup>[53]</sup>。源响应模型正是运用该方法来计算交换项。然而, 由于达西流是由土壤水势梯度所驱动的, 因此若以含水量代替基质势进行计算, 便会在一定程度上损失真实性。从原理上来说, 无论是采用一阶扩散方程还是其近似方式来模拟域间交换量, 本质上并无二致。不过, 过往的实验研究对于该变量的测量精度并不理想, 因此, 采用一阶扩散方程来描述这一过程是否合理, 仍有待进一步深入探究。

#### 4.2 大孔隙田间实验

田间实验是研究大孔隙流的重要手段, 这一研究方法既拥有显著的优势, 也存在一些局限性。研究一般在植被发育区仔细选择代表性地块(地形相对平坦且具有与研究目标相一致的植被覆盖状态的区域), 在土壤表面施加肥料或示踪剂, 同时借助多种观测设备和仪器, 如时域反射仪、中子仪、离子色谱仪、径流槽和集水器等, 对土壤水分状态、产流和溶质运移过程进行监测, 结合染色实验并挖取土壤剖面进行影像分析、张力入渗实验、地质雷达扫描等方法, 可较为细致地量化研究大孔隙流影响<sup>[16]</sup>。

吴华山等<sup>[56]</sup>利用染色和计算机解译的方法确定了太湖地区 3 种主要水稻土的优先流路径和大孔隙分布情况, 用染色深浅的百分比表示大孔隙分布, 发现 3 种土壤染色百分比均为表层最大, 且染色百分比与容重具有很好的相关性, 容重越大时孔隙度越小, 则染色百分比越小。Cey 和 Rudolph<sup>[57]</sup>在加拿大安大略省西南部的两个野外场地使用亮蓝色燃料示踪剂进行大孔隙流田间实验, 通过挖掘、绘图以及图像分析表征染料染色图案和大孔隙网络, 实验中得出沿大孔隙的膜状流和细小水流的垂直流速超过  $40 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 。Anderson 等<sup>[58]</sup>通过挖掘沟渠并应用稳定的人工降雨, 在山坡上添加 NaCl 作为示踪剂来量化山坡尺度的大孔隙流流速。

田间实验的优势在于其符合自然条件, 能够真实反映大孔隙流在实际土壤中的发生和发展情况, 实验结果更具代表性和可靠性。此外, 它还具有综合观测能力强的特点, 可以同时获取土壤含水量、溶质浓度和产流过程等多个相关指标的数据, 为深入研究大孔隙流对土壤水分和溶质运移的影响提供丰富而全面的数据支持, 在农业生产和水资源管理方面具有重要的实践应用价值<sup>[59]</sup>。

然而,田间实验也存在一些局限性。自然条件的干扰较大,天气、土壤质地、植被类型等因素的变化会导致实验结果的不确定性和不稳定性,可能降低实验的可重复性和代表性。同时,观测误差难以控制,实验环境的复杂性使得观测设备和方法可能存在一定的误差,从而影响实验结果的准确性和可靠性。此外,数据处理和分析过程也较为复杂,需要运用专业的统计软件和数学模型进行处理,对研究人员的专业知识和技能要求较高。

#### 4.3 人造大孔隙实验

大孔隙的几何形状多样且空间分布复杂,对大孔隙的定性和定量描述目前尚未形成统一的标准,在野外降雨实验或基于原状土进行大孔隙流研究时,大孔隙网络的复杂性、基质中水分的空间分布以及水力性质的不均匀性极大地限制了对大孔隙流微观过程的研究。为了能够更加精细地描述大孔隙流的物理过程,人造大孔隙实验对大孔隙网络和几何形状进行简化,对大孔隙流的水分运移过程进行可控的模拟,从而为大孔隙流的理论与建模提供更加准确的经验认识和数据基础。进一步,可将网络结构和几何形状纳入考量,从而得到接近自然条件下的预测结果。

Buttle等<sup>[38]</sup>采用在实验室土柱中创建人工大孔隙(含连续和不连续大孔隙)的新方法,用经特定处理的水对土柱进行预处理,模拟融雪脉冲实验并监测相关数据,研究大孔隙对砂壤土入渗的作用,发现直径约为2 mm的大孔隙在一些土壤的大孔隙中占主导地位。Ghodrati等<sup>[37]</sup>为研究土壤大孔隙流机制,采用分体大孔隙柱(SMC),实验装置由一个半圆柱形土壤柱和在其平面主轴上的半圆柱形大孔隙组成,该设置可以观察到大孔隙域内的水流和侧向交换过程,结合混溶驱替实验,通过示踪剂在土壤中的运移过程来分析土壤大孔隙流的特性,控制相关物理参数并观察界面影响,发现大孔隙流受基质孔隙与大孔隙尺寸比例的影响比单独受大孔隙尺寸的影响更大,且土柱中水流存在基质-大孔隙界面薄膜流、紧邻大孔隙的基质流(可与大孔隙域发生交换)和其余基质流3个区域。这些精心设计的人造大孔隙实验研究,为深入理解大孔隙流动力机制提供了重要依据。

人工大孔隙实验对大孔隙域的设置方面已经开展了一些探索,目前使用较广泛的方法主要有两种:一是预埋亚克力杆后抽出以创造人造大孔隙。预埋亚克力杆的实验方法要求在填装土柱时,将实验所需大孔隙直径的亚克力杆(或光滑不锈钢杆)预埋进实

验土柱中。该方案需要土壤具有一定初始含水量以维持大孔隙结构的稳定性,只能适用于雨强较小的实验场景。若雨强较大,产流进入大孔隙会冲刷大孔隙内壁,导致其垮塌,无法维持结构稳定性。二是在大孔隙域通过填装高导水介质来近似的方法<sup>[60]</sup>,也是当前室内人造大孔隙模拟较为常用的大孔隙域设置方法。该方法一般选取粗砂作为高导水介质来模拟大孔隙域,如此设置可以保证大孔隙域在水分入渗及产流过程中的结构稳定,该近似大孔隙的模拟方法也存在较为明显的局限性,在这种条件下的大孔隙流实际与遵循达西定律的基质流处于同样流态,该水流形态与在自然条件下重力主导的情况不相符。Buttle等<sup>[38]</sup>构建大孔隙域的方法为:在装填砂壤土的过程中,在土柱中心插入一根直径2 mm的可生物降解泡沫柱。土柱装填完成后,用溶剂对土柱进行预处理,使泡沫柱溶解,从而在土柱中形成直径2 mm的大孔隙,该方法可以避免构建大孔隙时对土体可能造成的破坏。

对于大孔隙域的设置要求主要包括两个方面:一是尽可能使其能模拟自然条件下的水流状态,二是为了研究其在稳态情况下的水流量以及侧向交换过程,需要在实验中保持其优先通道的稳定性。基于此,部分研究使用了不锈钢丝网设置大孔隙域。然而,由于不锈钢网管不具备足够的刚性,该方案仍需在不锈钢丝网管内填装粗砂作为支撑,因此仍与直接填装粗砂的方法近似。未来实验研究工作仍需寻找更合适的方法,以保证大孔隙在保持足够透水能力的同时又能维持大孔隙域的稳定。

## 5 考虑大孔隙流影响的水文模型应用

当前,众多研究已在测点、山坡到流域的不同尺度水文及山地灾害模拟工作中,考虑了大孔隙流的影响。鉴于大孔隙流在诸多实际土壤水文过程中扮演着极为关键的角色,这些研究为推进模拟真实的地下水文过程提供了极具价值的尝试与参考<sup>[11-12]</sup>。考虑大孔隙影响的水文模型按尺度划分主要有坡面汇流模型以及流域产汇流模型。Wang等<sup>[61]</sup>基于土壤大孔隙效应,构建了一个全新的浅层滑坡模型,旨在明确华南地区浅层滑坡发生的降雨临界值。通过深入探究大孔隙流的水文作用机制,引入花岗岩残积土的大孔隙系数,构建的考虑大孔隙流的浅层滑坡力学模型架构,可准确确定研究域内各个坡体单元的滑坡降雨阈值。Pollacco等<sup>[62]</sup>引入新型的双峰对数正态函数用于土壤持水曲线和非饱和导水率,利用313个实

验室观测点进行验证,结果表明该方法显著提高了预测效果,降低了水力参数非唯一性风险,还可计算大孔隙土壤含水量。

Que 等<sup>[63]</sup>采用联合双渗透率模型与运动波模型的方法,对降雨条件下含大孔隙土壤斜坡的雨水入渗和地表径流展开综合分析,同时研究了降雨强度、初始孔隙水压力、土壤基质渗透系数和斜坡角度的影响。结果表明,大孔隙可极大促进雨水在斜坡中流动,使湿润锋最大深度比无大孔隙时大一个数量级。Ranjit Kumar 等<sup>[7]</sup>基于土壤孔隙形态测量、大孔隙尺寸分布及土壤孔隙和染色模式分形维数的观测数据,构建大孔隙流模型并将其纳入流域过程模拟(WAPROS)模型,将模型应用于实际流域并分析大孔隙流子模型敏感性,还对5种土壤类型展开模拟,发现WAPROS模型表现良好,调整因子与大孔隙流呈线性关系,模拟生成相关数据且取得了较好的模拟效果。Bao 等<sup>[64]</sup>用CT扫描建立了土柱样本的真实三维大孔隙网络模型,基于MODFLOW模型模拟大孔隙水流传输过程,研究发现,大孔隙形状有圆管状和片状,流速达 $0.2\sim 0.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,且垂直于延伸方向的中轴线处以及沿延伸方向的喉部流速最大。大孔隙网络系统使雨水快速穿过土壤剖面,缩短了对降雨峰值流量响应的滞后时间,但由于快速水流的冲刷会使土壤颗粒流失,大孔隙空间增大,给边坡失稳埋下隐患。这些研究不仅深入探讨了大孔隙流的水文作用机制、土壤孔隙形态及分布等,还在实际应用中,如水资源管理、浅层滑坡预测、流域过程模拟等方面取得了积极成果,为相关领域的进一步发展提供了重要的理论和实践依据。

目前在大孔隙流模拟工作中,模型结构仍多是基于STVF的理论框架。另外,对大孔隙参数的确定仍是模拟的难点。研究中选取的数值往往难以精确反映研究区域土壤大孔隙的真实水力特性,同时现实条件下的降雨过程、地下水流动和边坡环境往往更为复杂,模拟条件难以完全涵盖这些复杂情况,从而可能降低模拟结果的代表性。未来模拟工作需结合最新大孔隙流理论及实验观测成果,全面提升模型的基本结构和参数化方法,获得更能反映真实物理机制和过程的模拟结果。

## 6 存在问题和展望

尽管对大孔隙流的研究已取得显著进展,但在若干关键方面仍存在明显的局限性。当前普遍使用的基于表面张力黏性流(STVF)理论的Richards方程或

其变体并不适用于描述大孔隙流运动。这主要是因为在大孔隙流中,表面张力的作用相对次要,与STVF理论中表面张力占据主导地位的核心假设相矛盾。此外,这些模型大多未充分考虑大孔隙中通常水流仅部分填充这一实际情况,导致其无法准确刻画大孔隙流的物理机制。对源响应模型开展深入研究并进一步发展可能是推进这方面工作的有效途径。另外,基质与大孔隙之间的相互作用极为复杂,涉及多种主控机制,而传统模型难以精准模拟这一动态过程。同时,模型参数的确定也面临显著挑战:一方面,准确测量与大孔隙流相关的土壤和岩石特性参数(如粗糙度、疏水性、涂层、连通性等)仍缺乏有效手段;另一方面,如何将这些特性进行合理概化并应用于模型中也存在较大困难。这些问题严重制约了模型的准确性及其在不同条件下的适用性。因此,需在微观和宏观尺度上将成像技术(如X射线、磁共振成像等)、传统实验方法(如突破曲线、时域反射计等)以及地球物理技术(如探地雷达、电阻率断层扫描等)和先进的数据分析方法相结合,进一步精确大孔隙空间特征的物理描述,从而促进参数的量化。

自然条件下大孔隙的几何多样性以及空间分布复杂性导致现有模型存在一定局限性,田间实验的实测资料是验证模型预测效果的关键,当前基于田间尺度以及流域尺度的研究仍然较少,小尺度实验的研究与实际情况仍存在较大差距,未来仍需进行大量的大尺度、长历时的研究以提高大孔隙流理论的实用性。

人造大孔隙实验对深化大孔隙流物理机理的研究具有极为重要的意义。然而,在以往实验研究中,建立大孔隙域的方法尚不能充分兼顾大孔隙的多方面特性,缺乏一种简单有效的解决方案。此外,大孔隙域内的水流特征,尤其是水头分布,在实验中获取难度较大,这已成为制约探索大孔隙流在真实条件下通量和侧向交换的关键瓶颈。因此,在后续研究中,亟需发展一种广泛适用的大孔隙域设置方法,并借助更加精密的观测手段,对大孔隙域内的水分状态进行更清晰、更准确地观测,从而进一步推动大孔隙流理论研究的深入发展。

### 参考文献:

- [1] JARVIS N, KOESTEL J, LARSBO M. Understanding preferential flow in the vadose zone: recent advances and future prospects[J]. *Vadose Zone Journal*, 2016, 15(12):1-11.
- [2] LIU C, YUAN Y, ZHOU A H, et al. Development trends and research frontiers of preferential flow in soil based on CiteSpace[J]. *Water*, 2022,

- 14(19):3036.
- [3] OROZCO-LÓPEZ E, MUÑOZ-CARPENA R, GAO B, et al. Riparian vadose zone preferential flow: review of concepts, limitations, and perspectives[J]. *Vadose Zone Journal*, 2018, 17(1):1-20.
- [4] BEVEN K. A century of denial: preferential and nonequilibrium water flow in soils, 1864—1984[J]. *Vadose Zone Journal*, 2018, 17(1):1-17.
- [5] NIMMO J R. The processes of preferential flow in the unsaturated zone [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2021, 85(1):1-27.
- [6] BEVEN K, GERMAN P. Macropores and water flow in soils[J]. *Water Resources Research*, 1982, 18(5):1311-1325.
- [7] RANJIT KUMAR M, MEENAMBAL T, KUMAR V. Macropore flow as a groundwater component in hydrologic simulation: modelling, applications and results[J]. *Current Science*, 2017, 112(6):1197.
- [8] SCAINI A, HISSLER C, FENICIA F, et al. Hillslope response to sprinkling and natural rainfall using velocity and celerity estimates in a slate-bedrock catchment[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 558: 366-379.
- [9] 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.
- [10] BEVEN K, GERMAN P. Macropores and water flow in soils revisited [J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(6):3071-3092.
- [11] BEVEN K, GERMAN P. Water flow in soil macropores II : a combined flow model[J]. *Journal of Soil Science*, 1981, 32(1):15-29.
- [12] GERMAN P F, BEVEN K. Kinematic wave approximation to infiltration into soils with sorbing macropores[J]. *Water Resources Research*, 1985, 21(7):990-996.
- [13] LARSBO M, KOESTEL J, JARVIS N. Relations between macropore network characteristics and the degree of preferential solute transport [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18(12):5255-5269.
- [14] 秦耀东, 任理, 王济. 土壤中大孔隙流研究进展与现状[J]. *水科学进展*, 2000, 11(2):203-207. QIN Y D, REN L, WANG J. Review on the study of macropore flow in soil[J]. *Advances in Water Science*, 2000, 11(2):203-207.
- [15] 冯杰, 郝振纯. 土壤大孔隙流研究中分形几何的应用进展[J]. *水文地质工程地质*, 2001, 28(3):9-13. FENG J, HAO Z C. Fractal geometry application to the study of macropore flow in soil[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2001, 28(3):9-13.
- [16] 李伟莉, 金昌杰, 王安志, 等. 土壤大孔隙流研究进展[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(4):888-894. LI W L, JIN C J, WANG A Z, et al. Research progress in soil macropore flow[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(4):888-894.
- [17] HEEREN D M, FOX G A, PENN C J, et al. Impact of macropores and gravel outcrops on phosphorus leaching at the plot scale in silt loam soils[J]. *Transactions of the ASABE*, 2017, 60(3):823-835.
- [18] WEILER M, MCDONNELL J J, TROMP-VAN MEERVELD I, et al. Subsurface stormflow[M]//ANDERSON M G. Encyclopedia of hydrological science. Hoboken:John Wiley & Sons Press, 2005:1-14.
- [19] 曾辉, 温娜, 张建丰, 等. 华北平原大孔隙优先流对农田氮素淋溶的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 29(1):66-75. ZENG H, WEN N, ZHANG J F, et al. Effect of macropore preferential flow on nitrogen leaching in a North China Plain farmland[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(1):66-75.
- [20] 高朝侠, 徐学选, 赵娇娜, 等. 土壤大孔隙流研究现状与发展趋势[J]. *生态学报*, 2014, 34(11):2801-2811. GAO Z X, XU X X, ZHAO J N, et al. Review on macropore flow in soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(11):2801-2811.
- [21] KÖHNE J M, KÖHNE S, ŠIMŮNEK J. A review of model applications for structured soils: a) Water flow and tracer transport[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2009, 104(1/2/3/4):4-35.
- [22] 解河海, 冯杰, 冯青, 等. 考虑大孔隙的土壤入渗模型[J]. *水利水电科技进展*, 2011, 31(5):35-38. XIE H H, FENG J, FENG Q, et al. Infiltration model for soils considering macropores[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2011, 31(5):35-38.
- [23] GERMAN P F, EDWARDS W M, OWENS L B. Profiles of bromide and increased soil moisture after infiltration into soils with macropores [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48(2):237-244.
- [24] EDWARDS W M, SHIPITALO M J, OWENS L B, et al. Factors affecting preferential flow of water and atrazine through earthworm burrows under continuous no-till corn[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1993, 22(3):453-457.
- [25] EHLERS W. Observations on earthworm channels and infiltration on tilled and untilled loess soil[J]. *Soil Science*, 1975, 119(3):242-249.
- [26] GAISER R N. Root channels and roots in forest soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1952, 16(1):62-65.
- [27] LUXMOORE R J. Micro-, meso-, and macroporosity of soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1981, 45(3):671-672.
- [28] Soil Science Glossary Terms Committee. Glossary of soil science terms 2008[M]. USA: American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, 2008.
- [29] OMOTI U, WILD A. Use of fluorescent dyes to mark the pathways of salute movement through soils under leaching conditions[J]. *Soil Science*, 1979, 128(1):28-33.
- [30] MOSLEY M P. Streamflow generation in a forested watershed, New Zealand[J]. *Water Resources Research*, 1979, 15(4):795-806.
- [31] REEVES M J. Recharge and pollution of the English chalk: some possible mechanisms[J]. *Engineering Geology*, 1979, 14(4):231-240.
- [32] DE ROOIJ G H. Modeling fingered flow of water in soils owing to wetting front instability: a review[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 231: 277-294.
- [33] NAVEED M, MOLDRUP P, SCHAAP M, et al. Macropore flow at the field scale: predictive performance of empirical models and X-ray CT analyzed macropore characteristics[J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2015, 12(11):12089-12120.
- [34] CASALI E, LARSBO M, KOESTEL J, et al. Macropore flow in relation to the geometry and topology of soil macropore networks: revisiting the kinematic wave equation[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 630:130732.
- [35] MORAN C J, MCBRATNEY A B. Acquisition and analysis of three-component digital images of soil pore structure. I. method[J]. *Journal of Soil Science*, 1992, 43(3):541-549.
- [36] SHIPITALO M J, NUUTINEN V, BUTT K R. Interaction of

- earthworm burrows and cracks in a clayey, subsurface-drained, soil [J]. *Applied Soil Ecology*, 2004, 26(3):209–217.
- [37] GHODRATI M, CHENDORAIN M, CHANG Y J. Characterization of macropore flow mechanisms in soil by means of a split macropore column[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(5): 1093–1101.
- [38] BUTTLE J M, LEIGH D G. The influence of artificial macropores on water and solute transport in laboratory soil columns[J]. *Journal of Hydrology*, 1997, 191(1/2/3/4):290–313.
- [39] GERKE H H, GERMANN P, NIEBER J. Preferential and unstable flow: from the pore to the catchment scale[J]. *Vadose Zone Journal*, 2010, 9(2):207–212.
- [40] MORRIS C, MOONEY S J. A high-resolution system for the quantification of preferential flow in undisturbed soil using observations of tracers[J]. *Geoderma*, 2004, 118(1/2):133–143.
- [41] HENDRICKX J M H, DEKKER L W, BOERSMA O H. Unstable wetting fronts in water-repellent field soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1993, 22(1):109–118.
- [42] HAWS N W, DAS B S, RAO P S C. Dual-domain solute transfer and transport processes: evaluation in batch and transport experiments[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2004, 75(3/4):257–280.
- [43] KAESTNER A, LEHMANN E, STAMPANONI M. Imaging and image processing in porous media research[J]. *Advances in Water Resources*, 2008, 31(9):1174–1187.
- [44] LOOSLI H, LEHMANN B E, SMETHIE W. Noble gas radioisotopes: <sup>37</sup>Ar, <sup>85</sup>Kr, <sup>39</sup>Ar, <sup>81</sup>Kr[M]//Environmental tracers in subsurface hydrology. Boston, MA: Springer US, 2000:379–396.
- [45] VAN GENUCHTEN M T, WIERENGA P J. Mass transfer studies in sorbing porous media: II. experimental evaluation with tritium (3H<sub>2</sub>O) [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1977, 41(2):272–278.
- [46] VAN GENUCHTEN M T, WIERENGA P J. Mass transfer studies in sorbing porous media I. analytical solutions[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1976, 40(4):473–480.
- [47] GERKE H H, VAN GENUCHTEN M T. A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media[J]. *Water Resources Research*, 1993, 29(2): 305–319.
- [48] GERKE H H, VAN GENUCHTEN M T. Evaluation of a first-order water transfer term for variably saturated dual-porosity flow models [J]. *Water Resources Research*, 1993, 29(4):1225–1238.
- [49] AGUILAR-LÓPEZ J P, BOGAARD T, GERKE H H. Dual-permeability model improvements for representation of preferential flow in fractured clays[J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(8): e2020WR027304.
- [50] BEVEN K. Kinematic subsurface stormflow[J]. *Water Resources Research*, 1981, 17(5):1419–1424.
- [51] DI PIETRO L, RUY S, CAPOWIEZ Y. Predicting preferential water flow in soils by traveling-dispersive waves[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 278(1/2/3/4):64–75.
- [52] NIMMO J R. Theory for source-responsive and free-surface film modeling of unsaturated flow[J]. *Vadose Zone Journal*, 2010, 9(2): 295–306.
- [53] NIMMO J R, MITCHELL L. Predicting vertically nonsequential wetting patterns with a source-responsive model[J]. *Vadose Zone Journal*, 2013, 12(4):1–11.
- [54] WEILER M. An infiltration model based on flow variability in macropores: development, sensitivity analysis and applications[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 310(1/2/3/4):294–315.
- [55] CASTIGLIONE P, MOHANTY B P, SHOUSE P J, et al. Lateral water diffusion in an artificial macroporous system: modeling and experimental evidence[J]. *Vadose Zone Journal*, 2003, 2(2):212–221.
- [56] 吴华山, 陈效民, 邱琳, 等. 染色法测定、计算机解译农田土壤中大孔隙数量的研究[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(3):145–149. WU H S, CHEN X M, QIU L, et al. Study on quantity of macropore in farmland soils with computer interpretation and coloration[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(3):145–149.
- [57] CEY E E, RUDOLPH D L. Field study of macropore flow processes using tension infiltration of a dye tracer in partially saturated soils[J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(12):1768–1779.
- [58] ANDERSON A E, WEILER M, ALILA Y, et al. Dye staining and excavation of a lateral preferential flow network[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, 13(6):935–944.
- [59] 冯杰, 黄国如, 解河海, 等. 土壤大孔隙流机理及产汇流模型研究[M]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2012. FENG J, HUANG G R, XIE H H, et al. Research on the mechanism of macropore flow and runoff generation and concentration models in soils[M]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2012.
- [60] KÖHNE J M, MOHANTY B P. Water flow processes in a soil column with a cylindrical macropore: experiment and hierarchical modeling [J]. *Water Resources Research*, 2005, 41(3):W03010.
- [61] WANG J, GONG Q H, YUAN S X, et al. Combining soil macropore flow with formation mechanism to the development of shallow landslide warning threshold in south China[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 10:1048427.
- [62] POLLACCO J A P, EGER A, RAJANAYAKA C, et al. Improved partitioning between matrix and macropore flow: novel bimodal lognormal functions for water retention and hydraulic conductivity in pumice and non-pumice soils[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 644: 131985.
- [63] QUE Y, LIN P Y, LIN D H. Integrative analysis of surface runoff and macropore flow for slopes under rainfall conditions[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, 2018(1):9458410.
- [64] BAO J, WANG K, XU Z. Transmission characteristics of the macropore flow in vegetated slope soils and its implication for slope stability[J]. *Sustainability*, 2024, 16(18):7897.

(责任编辑:李丹)