

土壤优先流研究现状与发展趋势^①

徐宗恒¹, 徐则民^{1*}, 曹军尉², 孟庆会¹

(1 昆明理工大学建筑工程学院土木系, 昆明 650500; 2 云南铜锌业股份有限公司, 昆明 650000)

摘要: 优先流是近年来针对土壤水运动所提出的术语, 是土壤中水运动机制研究由均匀走向非均匀领域的标志, 是指在土壤各向异性的情况下, 水分和溶质在多重因素的共同作用下, 沿着特定的路径向下发生非稳定渗流的现象。优先流是造成降雨型滑坡、泥石流等地质灾害以及地下水水质污染、农业土壤中养分流失等现象的主要诱因之一, 所以深入开展优先流的研究显得尤为重要。本文从优先流的界定出发, 主要介绍回顾了优先流数学模型的发展和研究优先流所采用的技术手段和方法, 最后总结并探讨了优先流研究中存在的问题和发展趋势。

关键词: 土壤; 优先流; 数学模型; 技术方法; 趋势

中图分类号: TU42

上世纪中期以来, 全球变暖趋势日益加剧, 强降雨及异常高温等极端天气过程及其诱发的次生灾害的发生频率越来越高^[1-5], 在山区流域, 包括暴雨、大暴雨和特大暴雨在内的强降雨过程^[6-9]促使广大的谷坡区形成了滑坡泥石流等区域性、群发性斜坡灾害。而对于这一现象, 既有研究更多概括为“降雨诱发滑坡”, 但这只是一种习惯性说法, 从斜坡水文学及水文工程地质学的角度看, 诱发植被发育斜坡失稳的并非降雨本身, 而是降雨转化的地下水, 从时序上来看, 降雨与滑坡是通过“降雨→部分雨水穿透植被盖层→大部分雨水以优先流形式迅速补充斜坡地下水→地下水与岩土体相互作用→滑坡”这一过程系列间接相连的。

1980年, 美国长岛东部居民的1000多个饮用水被Aldicarb所污染^[10-11]; 2004年11月, 第二届土壤污染和修复国际会议上中国土壤专家表示, 在长江三角洲地区已经测出16种多环芳烃类物质, 100多种多氯联苯, 还有10余种其他毒性更强的持久性有机污染物^[12], 对于这一现象, 污染物的源头和地下水体受污染主要是通过“农用化学物质施于田间或者工业废水等的排放→部分污染物经降雨、灌溉水分溶解→化学污染物与水分一起以优先流形式进入地下水并迁移→地下水体受污染”这一过程起作用的。

以上的现象并不是个别案例, 更多的例子此处不再详述^[7]。强降雨后尾随的斜坡地质灾害和地下水受

污染对人类造成的严重威胁已引起了世界各国的广泛关注, 而以上所述的现象与本文所研究的土壤优先流有着密切的关系, 深入开展优先流的研究工作显得尤为重要。

1 优先流的界定

优先流是一个土壤水文学概念, 由于土壤的异质性, 它是一种较为常见的土壤中水分运动形式, 优先流目前并没有统一的概念, 许多科学家仅针对自己的研究成果, 从不同角度提出了对优先流的不同认知。Beven和Germann^[13]1982年针对土壤在大孔隙中快速迁移的现象来阐述了优先流, 提出优先流就是水流通过大孔隙而绕过土壤基质快速向下迁移的现象。限于当时的条件和认知, 此种说法很狭隘地将优先流归结为大孔隙流。Hendrickx和Flury^[14]将优先流又称之为非均匀流, 非平衡流, 是水份和溶质沿某些特定的路径运动而绕过部分多孔介质向下入渗的现象。Suzanne等^[15]通过对用于优先流定量化研究的不同技术的回顾, 提出了优先流是水分(连同溶解物和悬浮物)通过在总孔隙网络中所占比例较小, 但比微观尺度大得多的孔隙中传输的现象。此观点从空间网络尺度对比的角度提出了对优先流的见解。总的来说, 各种观点的提出都有共同的特点, 即在土壤各向异性的情况下, 优先流就是在众多外部因素的共同作用下,

①基金项目: 国家自然科学基金-云南联合资金重点项目(U1033601)和交通部西部科技项目(200831876723)资助。

* 通讯作者(zeminxu@vip.kml69.net)

作者简介: 徐宗恒(1987—), 男, 云南永胜人, 博士研究生, 主要从事水文地质方面的研究。E-mail: xuzongheng208@163.com

沿着特定的路径向下发生非稳定性渗流的现象。所以说,水分在非饱和带中的运移是不简单的一维垂直向下流动,而是越过大部分土壤的体积沿着优先路径进行流动,其湿润前锋推进的速度远远超出了流动处于低速层流状态得到的 Richards 方程所预测得到的结果,即是说,开展土壤中优先流的研究要比对流动处于低速的平稳流研究要复杂得多。

由于土壤的异质性以及土壤中的干裂缝、植物根系、虫孔等大孔隙的存在,土壤优先流有多种的表现形式,有各自的流动形式。牛健植和余新晓^[11,16]在分析总结其他学者的研究成果的基础上,提出了优先流的表现形式主要有大孔隙流、环绕流、管流、指流、漏斗流、沟槽流、短路流、部分置换流、地下强径流、非饱和重力流、异质流、摆动流及低洼再蓄满; Suzanne 等^[15]在对优先流不同的研究技术回顾的基础上,指出优先流可划分为裂隙流、孔穴流、指流、侧向流以及大孔隙流。而就既有研究情况来看,优先流的研究主要偏重于大孔隙流,指流和漏斗流三类非平衡渗流方面^[17-19]。

对于优先流的研究,最早可以追溯到 1864 年入渗过程中针对“大孔”的研究^[11],之后各国学者针对土壤水入渗过程中水分和溶质沿裂缝、虫孔、植被根系快速迁移的大孔隙流和层状土壤中的指流等优先流现象进行了较系统的研究,但这些试验大多都是破坏性试验,而且这些研究都只是停留在对优先流现象的定性描述层次上。随着 Hounsfield 1973 年发明的计算机断层成像技术的问世,以及 20 世纪 90 年代初期,以 CT 成像技术为代表的现代化仪器以及染色示踪等无损试验技术在优先流研究领域得到了广泛的运用,极大地推动了优先流的定量化发展。进入 21 世纪,既有研究侧重于借用现代化仪器观测优先流现象,进一步揭示了优先流的形成机制以及对优先流现象进行精确定量化。

2 土壤优先流数学模型研究现状

优先流的存在,使水分的运动不遵循经典的达西定律,且由于优先流自身的表现形式很多,所以开展优先流的数学模型的研究难度较大。本节从水流动的 Richards 方程和溶质迁移的对流-弥散方程入手,来探讨在优先流数值模型方面取得的进展。

2.1 平衡渗流模型

最基本的渗流模型是基于水分迁移的 Richards 方程和基于溶质迁移的对流-弥散方程得到的平衡渗流模型^[20]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right)] - S \\ \frac{\partial \theta c}{\partial t} + \frac{\partial \rho s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (\theta D \frac{\partial c}{\partial z}) - \frac{\partial qc}{\partial z} - \mu(\theta c + \rho s) + \gamma \theta + \gamma \rho \end{cases} \quad (1)$$

式中: z 为坐标值、 t 为时间、 h 为压力水头、 θ 为含水量、 K 为非饱和水力传导系数、 c 和 S 为在固相和液相中溶质的含量、 q 为单位体积流量密度、 μ 为一阶速率常数、 γ 为零阶速率常数、 ρ 为土壤体积质量(容重)、 D 为弥散系数。虽然上述模型仅适用于平衡渗流的情况,但目前的很多模型,如双重孔隙模型和多重孔隙模型,都是附加假设条件,对平衡渗流模型进行改进得到的模型,所以平衡渗流模型是建立其他模型的基础。

对于上述模型的求解,因缺少计算非饱和导水系数 K 和弥散系数 D 的一般有效公式,使得计算存在一定的困难,而目前采用的经验法和反复迭代法使得计算具有很多的经验成分。王印杰和王玉珉^[21]针对上述的缺陷,从土壤微观统计学角度出发,用各向均一无结构土壤“切片”孔径级配函数构建的统计毛管束模型和土壤水分布的力学原理,提出了非饱和土壤水分特性函数的一般有效计算公式。王玉珉和王印杰^[22]根据前述一般有效计算公式,用分离变量法直接求解 Richards 方程,用土壤水动力学方法分别导出了含有渗前土湿因子的新入渗公式。为了协调平衡渗流模型在精度、稳定性和计算效率之间的矛盾,田富强和胡和平^[23]对时间步长进行优化控制,发展了一种变步长的计算模型,计算结果表明,该模型具有较高的计算精度、求解效率和稳定性好等优点; Kavetski 等^[24]给出了一种基于质量守恒,计算混合形式 Richards 方程的数值求解自适应的时间步长和容许误差的方法,该方法的关键在于压力水头局部截断误差近似值的计算。

2.2 单孔隙模型

最简单的非平衡渗流模型是 Ross 和 Smettem^[25]建立的单孔隙模型,它是基于平衡渗流模型得到的,将方程(1)中紧耦合的含水量 θ 和水头压力 h 解耦以后,附加一个线性的驱动函数,将得到的结果用隐式有限差分方程表示出来得到如下方程:

$$\theta^{j+1} = \theta^j + (\theta^{j+1} - \theta^j) [1 - \exp(-\Delta t / \tau)] \quad (2)$$

式中: τ 为平衡稳定时间, Δt 为时间步长,上标 $j+1$ 和 j 表示在时间间隔内两相邻的时间点。单孔隙模型优点在于模型中仅运用一个附加参数来研究非平衡渗流,而且还可以运用到现有的饱和和渗流模型中。

Nathan 等^[26]利用有效的场地尺度参数建立了地表下排水场地水分和溶质迁移的单孔隙模型,针对水

分：

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla[K(h)\nabla(h-z)] \\ q = -K(h)\nabla(h-z) \\ K(h) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)^{\frac{1}{2}} \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)^{\frac{n}{n-1}} \right]^{\frac{n-1}{n}} \right\}^2 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \theta = \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^{1-(1/n)}} + \theta_r & \text{当 } h < 0 \text{ 时} \\ \theta = \theta_s & \text{当 } h > 0 \text{ 时} \end{cases} \quad (4)$$

针对溶质：

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\theta C) = \nabla(D\nabla C - qC) \\ D = D_0 + \lambda \frac{q}{\theta} \end{cases} \quad (5)$$

式中： θ 为含水量； K 为水力传导系数； h 为压力水头； a 、 n 为压力-饱和度参数^[27]； t 、 z 为时间和空间坐标； C 为溶质的浓度； q 为水分通量； D 为水动力弥散系数，由弥散性 λ 和扩散系数 D_0 决定。

试验结果表明用有效场地尺度参数建立的单孔隙模型能捕获水分和溶质快速运动的迁移趋势，但是缺点在于对于有效场地尺度参数的物理意思没有更深一个层次的研究^[26]。

2.3 双重孔隙/渗透模型

双重孔隙模型是目前运用比较广泛的水分和溶质迁移模型，它的发展最早可以追溯到 1946 年 Muskat 将此模型运用于对石灰岩裂隙中的饱和渗流的研究^[19]。双重孔隙模型的建立是假定土壤介质是由两个域组成，即土壤中的大孔隙或裂隙网络和土壤颗粒的基质孔隙，前者称之为优先域，后者为基质域。

双重孔隙模型基本假定是假设流体在裂隙网络中流动是受限制的，而在基质孔隙中是静止的，流体在其中可以交换和储存，但不能对流。Philip^[28]将介质中的流体分为两部分，分别是基质以外孔隙中流动的流体 θ_f 和基质孔隙内静止的流体 θ_m ，即： $\theta = \theta_f + \theta_m$ ，根据 Richards 方程，可得到如下方程：

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1\right)] - S_f - \Gamma_w \\ \frac{\partial \theta_m}{\partial t} = -S_m + \Gamma_w \end{cases} \quad (6)$$

式中： S_f 和 S_m 为双重孔隙中的汇源项， Γ_w 为水分的迁移项，其余同前。

同样，Nathan 等^[26]利用有效的场地尺度参数建立了地表下排水场地水分和溶质迁移的双重孔隙模型，针对水分：

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta_m}{\partial t} = \nabla[K(h_m)\nabla(h_m - z)] - \Gamma_w \\ \frac{\partial \theta_{im}}{\partial t} = \Gamma_w \\ q = -K(h_m)\nabla(h_m - z) \\ \Gamma_w = \omega_w(h)(h_m - h_{im}) \end{cases} \quad (7)$$

针对溶质：

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\theta_m C_m) = \nabla(D_m \nabla C_m - q_m C_m) - \Gamma_s \\ D_m = D_{m0} + \lambda_m \frac{q_m}{\theta_m} \\ \frac{\partial}{\partial t}(\theta_{im} C_{im}) = \Gamma_s \\ \Gamma_s = \Gamma_w C^* + \omega_s(C_m - C_{im}) \end{cases} \quad (8)$$

式中： Γ_w 、 Γ_s 分别为水分和溶质的迁移项，当 $\Gamma_w > 0$ 时， $C^* = C_m$ ；当 $\Gamma_w < 0$ 时， $C^* = C_{im}$ ；常数 ω_w 为溶质迁移率系数； ω_w 根据 Gerke^[29]确定： $\omega_w = (\beta/d^2)K_a(h)\gamma_w$

（式中： β 为几何形状系数； d 为土壤基质的特征长度； γ_w 为相似系数； K_a 为裂隙基质交界面出的水力传导系数）Nathan 等^[26]建立的双重孔隙模型和前述的单孔隙模型都能较好地模拟出水分和溶质的快速迁移，但试验证明，双重孔隙模型比起单孔隙模型具有更好适用性。

双重孔隙模型适用于非平衡条件下的物质迁移，它主要的特点在于假定土壤介质是由两个域组成，并且假设流体在裂隙网络中流动是受限制的，而在基质孔隙中是静止的，模型使用的难点在于两域都需要许多参数来描述水和溶质在介质中的迁移，同时处理边界条件非常复杂。

另一典型模型是双重渗透模型，双重渗透模型的特点跟双重孔隙模型类似，主要的区别点在于双重孔隙模型是假定水分在基质孔隙中是静止的，而双重渗透模型则相反，即假设水分在基质之外的孔隙、基质孔隙中都能流动。双重渗透模型的复杂点在于它需要知道两域的持水特性和所有可能的渗透系数方程。比较典型的双重渗透模型是 Gerke 和 Van Genuchten^[30]将 Richards 方程同时运用到了优先域和基质域中以及基于对流-弥散方程得到的模型，针对水分：

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (K_f \frac{\partial h_f}{\partial z} + K_f) - S_f - \frac{\Gamma_w}{w} \\ \frac{\partial \theta_m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (K_m \frac{\partial h_m}{\partial z} + K_m) - S_m + \frac{\Gamma_w}{1-w} \end{cases} \quad (9)$$

针对溶质：

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta_f c_f}{\partial t} + \frac{\partial f \rho s_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (\theta_f D_f \frac{\partial c_f}{\partial z}) - \frac{\partial q c_f}{\partial z} - \phi_f - \frac{\Gamma_s}{w} \\ \frac{\partial \theta_m c_m}{\partial t} + \frac{\partial (1-f) \rho s_m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (\theta_m D_m \frac{\partial c_m}{\partial z}) - \frac{\partial q c_m}{\partial z} - \phi_m - \frac{\Gamma_s}{1-w} \end{cases} \quad (10)$$

式中： w 为裂隙网络在所有孔隙中所在的体积比， $w = \theta_{fs} / \theta_s$ ，其余同前。

2.4 多重孔隙/渗透模型

多重孔隙/渗透模型在概念上与双重孔隙/渗透模型是相似的，只是模型中考虑了附加的重叠孔隙区域，划分附加区域的时候具有很大的灵活性，因此此种模型的建立增加了很多没有太大物理意义的参数。Gwo 等^[31]将孔隙分为 3 种：大孔隙、中孔隙、微孔隙，在计算过程中用到每种孔隙的水力性能函数，假设 3 种孔隙中的渗流都能运用 Richards 方程和对流-弥散方程，由此建立了 MURF 和 MURT 多重孔隙/渗透模型。Hutson 和 Wagenet^[32]将孔隙分为 n 个重叠的孔隙域。同样在 n 个孔隙域中渗流都运用 Richards 方程和对流-弥散方程，而且假设 n 重孔隙域中水分和溶质都是可以交换的，由此建立了 TRANSMIT 模型。我国学者柴军瑞和仵彦卿^[33]将岩体中的各种孔隙（裂隙）按规模和渗透性分为四级：一级真实裂隙网络、二级随机裂隙网络、三级等效连续介质体系、四级连续介质体系。假设各级孔隙（裂隙）都形成各自的裂隙网络系统，以水量平衡原理建立了各级裂隙网络之间的联系，并考虑各级裂隙渗流与应力不同的相互作用关系，建立了岩体渗流场与应力场耦合分析的多重孔隙/渗透模型，最后将模型运用于实际工程中，证明了该模型的适用性。

3 优先流研究的技术方法

对于土壤中优先流的研究，除了数值模拟方面取得很大的进步以外，随着科技的发展，更多现代化的技术手段也相继投入到优先流的定性和定量化的分析之中。目前，运用到优先流研究中的现代化技术主要有：染色示踪技术、非侵入式影像获得技术（包括 CT 技术、MRI 技术、伽马射线等）、地下雷达探测、声波探测技术、电阻率层析成像法等。

3.1 染色示踪技术

染色示踪技术，是利用示踪剂染料溶于水流中，让染色剂随着水流流动而分布染色于水流流过的区域，然后结合图像分析仪，直接查看并分析确定优先流的路径。由于染色示踪技术试验操作简单，染色剂相对其他现代技术的投入较为便宜，而且所选染色剂

一般颜色鲜明，从而能直观明了地显示出优先流的分布特点等优点，在室内室外研究中均得到比较广泛的应用。染色示踪技术的运用在于获得优先流路径、验证模型的假设正确性以及确定模型中所采用的参数。

目前，用作染色示踪试验的染色剂种类比较多。目前主要运用染色示踪研究的染料主要有：亮蓝、荧光素、荧光素钠、碘-淀粉、及罗丹明 B 等^[34-52]，Kathleen^[34]运用了溴化物和染色示踪剂试验在一块人工湿地上来研究养分以优先流形式的传输过程和速率；Wang 和 Zhang^[35]运用碘-淀粉染色示踪和亮蓝示踪试验来研究异质土壤的水分迁移及其与土壤大孔隙之间的关系。Lipsius^[36]结合图像分析技术，用亮蓝作为示踪剂来研究水流在受焦油污染的斥水性砂土中优先流特征。Edward 和 Colin^[37]用荧光素作为示踪剂，结合一个二维的物理模型方法来研究染色剂的分区运移以及与非水相液体的相互作用；Andrea 和 János^[38]用荧光光谱测定法研究了匈牙利的切克山脉的地下水系统，所选用的示踪剂是荧光素钠。除了对土壤进行染料染色示踪以外，还可以运用无吸附性的碘、氯、溴、钙等离子对水流的优先路径进行跟踪调查。其中由于亮蓝在水中的溶解度较高、色彩鲜明易于进行图像分析、低毒性等优点而得到较为广泛运用于室内和室外试验^[52]。由于土壤颗粒对鲜蓝分子具有吸附作用，在一定程度上，限制了鲜蓝在土壤优先流染色示踪试验中的使用^[53-56]。Hark 和 Sigrid^[53]指出不同性质的土壤对鲜蓝的吸附作用不同，同时研究了不同染色剂的吸附动力学。Judit 和 Markus^[56]研究了在不同的溶液 pH 值下和不同的钙和钾离子浓度下土壤颗粒对鲜蓝的吸附作用。另外，为了优先流研究的简便，试验条件有限的情况下，也可以采用与土壤周围区域有明显区别、便于图像分析的红墨水等溶液进行优先流路径的染色示踪^[57]。

3.2 非侵入式获得技术

非侵入式获得技术是指在不扰动岩土体的内部结构的情况下，对所分析的岩土体进行图像获取，图像分析的技术。目前进行优先流研究中所采用的非侵入式获得技术主要包括计算机 X 射线断层扫描技术（CT 技术）、磁共振技术（MRI）。

3.2.1 CT 技术 计算机 X 射线断层扫描技术是 1972 年由英国 EMI 公司工程师 Hounsfield 设计发明的，即 CT 扫描仪，CT 扫描技术作为顶尖成像技术的出现，被广泛地运用于医学方面各种病理的检查，为医学的突破打破了许多瓶颈问题。

到达 20 世纪 90 年代初期，由于 CT 成像技术的非破坏性、精确性、全面性、快速性等优点开始在土壤科学研究中得到广泛使用。目前既有的研究集中于通过 CT 扫描仪来确定大孔隙的分布情况，从而研究优先流的路径。Anderson 等^[58]用 CT 扫描仪对来自耕田里的土壤和森林土壤的试块进行扫描得到大孔隙分布情况进行对比，结果表明 CT 扫描仪对土壤结构的评价有很好的运用，Zeng 等^[59]利用分形维数来量化小尺度范围内的土壤结构，而所采用的数据都是运用 CT 扫描技术得到的。Warner 等^[60]及冯杰和郝振纯^[61]借助 CT 成像技术获得了土壤中孔隙的数量、大小、形状等信息，实现了孔隙的可视化和定量化。

另一方面，CT 成像技术集中于分析原状土壤中优先流的路径及水分和溶质在土壤中的实时分布情况。由于染色剂具有鲜明对比性的优点，成像效果好，所以 CT 技术常与示踪技术结合使用，做到优先流的定性和定量化分析方法的结合。Sacha 和 Morris^[62]利用氯化物和亮蓝作为染色剂进行优先流路径示踪，然后加以 CT 扫描技术进行扫描，提出了一种利用可视化技术来分析迁移机制的多尺度方法。Withjack 等^[63]利用 CT 仪器进行扫描得到岩块的特性，并观察流体在其中的运动情况，并将得到的结果与用常规方法得到的结果做对比。Wildenschild 等^[64]运用 CT 扫描技术对一个直径为 10 cm、高度为 30 cm 的非扰动完整土柱进行扫描，得到其土壤内部结构图，并选择两个关键位置点，用 CT 扫描技术捕获其实时溶质分布情况。

虽然 CT 技术作为研究优先流中所运用较广的现代化仪器，但是目前还没有针对土壤水分和溶质迁移过程研究的专用 CT 扫描仪，所以，进行土样扫描和优先流实时监测的时候，需要外送扫描样品（例如：医院），而且需要专业技术、代价高、小尺度的样品不能起到代表作用、稍大的样品扫描困难、处理困难以及得到的数据误差大等一系列不足之处。所以设计发明一套专用于优先流研究的 CT 扫描仪是目前科研人员的一个攻克目标。

3.2.2 MRI 技术 1993 年问世的 Magnetom Open 产品是全球第一个能够生产开放式磁共振成像系统的产品，以及 1999 年西门子推出的可自动进床的 Magnetom Harmony 和 Symphony 系统，为磁共振技术带来新的突破。磁共振成像技术运用于土壤科学的基本原理是利用土壤结构的核磁共振现象，将所得射频信号经过电子计算机处理，重建出土壤中某层面的图像的技术。Paola^[65]2005 年在 MRPM（多孔介质研究中磁共振成像技术）会议报告中回顾了磁共振成像技

术自 19 世纪 80 年代中期开始至当前在博洛尼亚大学的多孔介质研究中取得的进展，指出了磁共振成像技术的松弛测量值和多孔介质参数（如：多孔介质的渗透率、束缚水饱和度、残余油饱和度）的新联系，报告说明了磁共振成像技术虽然起步较晚，但由于其具有 CT 技术一样类似的优点，所以很快被广泛运用于多孔介质中水分和溶质的扩散、迁移等问题的研究，由此，磁共振技术的出现也极大地推动了优先流定量化的研究^[66-70]。Posadas 等^[66]用人工的双层的砂质土壤来模拟分层土壤，用磁共振成像技术获得分层土壤中指流的指数量、指的长度和直径等信息，以此来分析指流的动力特性。Oswald 等^[67]以人造的多孔介质为研究对象，借助磁共振成像技术，研究土壤的异质性和密度驱动流的现象，以及湿润前锋的推进速率并与计算得到的结果相对比，结果表明磁共振成像技术具有较好的运用性，可作为一个检验计算正确与否的工具。为了使图像具有很好的成像效果，使优先流路径更具直观性，便于研究，CT 成像技术往往也和示踪技术结合使用，Jelinkova 等^[69]利用磁共振成像技术和示踪技术（示踪剂为硝酸镍）对原状粗质砂土进行土壤结构和优先流路径的分析，建立了镍的穿透曲线。

3.3 地下雷达探测技术

地下雷达探测技术方法是一种应用于确定地下介质分布的广谱（1MHz ~ 1GHz）电磁技术。地下雷达探测是利用一个天线发射高频宽频带电磁波，另一个天线接收来自地下介质界面的反射波。电磁波在介质中传播时，其路径、电磁强度与波形将随所通过介质的电性质及几何形态而变化。

近年来，地下雷达探测技术作为一种地球物理方法，常用来确定地下水位位置，分析地下土壤的风化层面以及结构构造等情况^[71-75]。Doolittle 等^[71]指出利用地下雷达探测技术得到地下水位深度图像具有连续性、记录结果分辨率高等特点，他利用地下雷达探测技术研究了风积景观下的一个非承压含水层变动的地下水位深度和地下水的流动形式。Harari^[73]对沙特阿拉伯的东部城市的一个沙丘有地下雷达探测技术内部结构进行探测，指出此技术能清楚地辨认沙丘地下的层理结构、确定地下水位，能给了解沙丘的演化史提供一个合理的依据。

目前运用地下雷达探测技术进行优先流的研究较少，Harari^[73]在前述试验情况下，指出在降雨条件下，地下雷达探测能实现沙丘的不连续湿润前锋推进和优先流路径的可视化。限制地下雷达探测技术在优先流研究中的主要原因是此技术主要运用于大尺度条件下

的测量,而优先流的研究多属小尺度情况下,再者地下雷达的探测深度是有限的。

3.4 微张力测量技术

微张力测量技术中所采用的典型仪器设备是时域反射仪(TDR),TDR起源于20世纪60年代,该技术包括产生沿传输线传播的时间阶跃电压,用示波器检测来自阻抗的反射,测量输入电压与反射电压比,从而计算不连续的阻抗^[76]。用时域反射原理制成的TDR土壤水分仪是目前测量土壤含水量常用的仪器,它既可以测量水分含量,也可以测量溶质含量,该方法的优点在于仪器使用过程中的非扰动性、低劳力消耗以及操作简易性和便于携带性。Datonetal^[77]1984年首次采用了TDR仪器进行土壤的电导率和土壤溶质含量的测量,随后该方法得到了广泛运用,Jon和Bhabani^[78]运用TDR对土壤的单位体积含水量和体积电导率、以及离子溶质的分布情况进行测定,指出TDR独有的特性在于土壤水分含量和土壤体积电导率在同一个单元体积中可以测定,在多处设置的传感器能进行多路复用以及能进行连续性监测。

虽然TDR仪器早期应用很少涉及到优先流研究,但是后期运用较多。Beven和Germann^[13,79]首先将TDR方法引入到优先流的研究,他们通过试验研究得出TDR的连续监测性和灵敏性有助于进行土壤中优先流的量化研究,可以有效地捕捉到优先流现象。Ritsema和Dekker^[80]利用TDR在7次暴雨条件下跟踪了斥水砂性土壤的优先流路径,用一个二维的渗流模型来模拟得出当降雨渗入干燥的斥水性土壤(含水量在临界范围内)时会形成优先流路径。Lee等^[81]用一个20cm高,直径为12cm的非扰动土柱进行室内试验,用TDR技术得到的穿透曲线,用来估计MIM(mobile/immobile model)模型中的参数,而用这些数据与出流量观测估计出来的参数作比较,结果表明两者相似,由TDR得到的结果具有95%的保证率。

3.5 声波探测技术

声波探测技术是无损检测的主要方法之一,近年来,它广泛运用于检测材料内部和表面缺陷的大小、成分和分布情况。其基本原理是利用声波在材料界面上传播时将产生反射、折射和波型的转换,利用这些特性,可以获得从缺陷界面反射回来的反射波,从而达到探测缺陷的目的。声波探测技术运用于优先流最早可以追溯到的1954年Brandt^[82]针对声波在多孔粒状介质中的传播速度的研究,但研究的开始仅局限于声波在多孔介质中的传播速度,传播频率等,或者是多孔介质中溶质和水分对声波的传播影响,较少涉及

到用声波探测来定量研究水分和溶质在多孔介质中的分布。之后1961年和1964年Geertsma和Smit^[83]及Brutsaert^[84]分别较系统地研究了非饱和土壤中的浅层土壤的溶质含量与声波传播速度的关系以及砂土中黏粒含量和孔隙特性对介质中声波波速的影响。

到达20世纪末,声波探测作为一种辅助工具,与TDR技术,或者染色示踪技术相结合,被广泛地运用于非饱和渗流问题的研究中,以此来确定水分和溶质在非饱和带土壤中的分布。Flammer等^[85]和Blum等^[86]是最先将声波探测技术运用于非饱和渗流研究的人。Flammer等^[85]利用声波探测技术研究了非饱和土壤中的水分流动形式,他通过用穿过土壤的声波脉冲信号的传输速率和土壤对声波的吸收情况来反映土壤含水量的变化,并用Brutsaert模型对实验数据进行数值模拟,将得到的结果和示踪剂得到的水分分布情况作对比,结果表明用示踪剂试验得到的结果与理论分析和声波脉冲试验方法得到的结果相吻合。Blum等^[86]用TDR技术将声波的传输时间转换成声波的速度分布,再将声波的速度分布通过21个时间系列转换成土壤的含水量,从而确定土壤的优先流路径。

3.6 电阻率层析成像法

电阻率层析成像是通过向地下供电,形成以供电电极为源的等效点电源激发的电场,再由在不同方向观测的电位或电位差来研究探测区的电阻率分布的一种地球物理方法^[87]。由于土体的电阻系数是土壤含水量、结构等物理参数的空间和时间变异性的反映(土壤电阻系数可以表示成土壤物理参数的函数),所以该方法为研究土壤中物理参数随时间的变化提供了有利的工具。电阻率层析成像技术具有探测深度大、分辨率高、代价小等优点,广泛运用于地下水探测、水分和溶质迁移等土壤科学研究中。

1987年Shima和Sakayama在SEG(经济地质学家学会)会议上首次提出了这种具有非破坏性的探测技术,并称之为“resistivity tomography”^[88],随后,Scollar等^[89]给出了此种地球物理探测方法用于获取物理参数的基本原理,指出用电阻率层析成像法来研究土壤电导率和土壤物理参数之间关系主要集中在研究其与土壤含水量之间的关系,而在研究时都是假定了溶质的导电性是恒定不变的,忽略了其于土壤含水量变异对其的影响。Archie^[90-91]用新鲜的砂岩在实验室条件下研究得到经验公式(Archie定律): $S^n = a\rho_w / \phi^m \rho$,式中: S 为饱和度, n 为与饱和度有关的系数,常数 a 为饱和系数,常数 m 为胶结因子, ρ_w 为孔隙水的电阻率, ϕ 为孔隙度。

电阻率层析成像方法研究渗流问题属于反演计算的范畴，它是通过探测技术获得了土壤含水量等参数随时间的变化结果，然后重组各参数在空间的分布问题，然而在反演计算过程中，一些反演问题是欠定的，而且该方法获得的数据仅局限于二维平面内，从而增加了使用该方法的困难。为了克服此缺陷，Vanderborght 等^[92]以人造蓄水层为研究对象，借助延

时 ERT 方法，用数值的示踪试验来研究了土壤渗透系数和二维平面内染色剂迁移特性的空间关系，其中示踪剂在平面内的迁移模式用等效的对流-弥散迁移模型来解释，获得其在空间内的等效迁移特性，并用流管模型来表征局部的穿透曲线。

表 1 列出了 6 种目前常用的试验技术手段的优点和缺点。

表 1 6 种优先流研究所采用的技术方法优缺点对照表

Table 1 Advantages and disadvantages of six technical means for preferential flow research

技术	优点	缺点
染色示踪技术	操作简单、代价小、直观明了	大都是破坏性试验、定性、需借助现代化设备才能实现定量化
非侵入式影像获得技术	CT 技术 MRI 技术	需要专业技术、代价高、需要往外送扫描单样品、小尺度的样品不能起到代表作用、稍大的样品扫描困难、处理以及误差大 非破坏、精确度高、3D 水分或溶质迁移有很高的空间分辨率
地下雷达探测 (GPR) 技术	位置确定准确、精度高	探测深度有限、多适用于大尺度条件下
微张力测量 (TDR) 技术	非扰动性、低劳力消耗、操作简易、便于携带性	会受温度和湿度等多因素的影响、输入电磁波的能量耗散大，会导致反射接收的信息模糊，造成失准 ^[93]
声波探测技术	声波对水分的分布更敏感、穿透力强、设备简单、对人体无害	显示不太直观、探测难度大、识别需要一定的专业技术
电阻率层析成像法 (ERT)	探测深度大、分辨率高、经济实惠	反演问题一般欠定，获取数据仅局限于平面内

现代化技术在研究多孔介质水份分布和溶质迁移方面起到了重要作用，除上述的现代化技术外，如光子发射 (SPEC)^[94]，伽马射线^[95]，中子成像^[96]等一系列的成像技术，如烟气注射^[97]、松脂浸入^[98]等一些简单易行的方法也相继运用于非饱和介质渗透研究，但这些技术目前运用在实践中不是很成熟，仍需一个实践的过程，过程中反映出来的不足之处也是目前学者们需要解决的一系列问题。

需要提出的是，单独使用各种试验研究技术进行优先流研究的时候，会有各自的缺陷。如：运用 CT 技术可以精确地构建土壤中大孔隙网络图，但并不能知道在哪个孔隙网络部分水力性能活跃。以及染色示踪的剖面能显示示踪剂在孔隙网络的传输，而土壤的吸附作用可能会使示踪剂在某一孔隙网络中得不到真实的反映。所以，很多时候试验研究技术需要同时使用来互相弥补不足或者利用多个方法得到的试验数据进行比对论证，才可达到预期的研究优先流的目的^[13,16]。如：Morris 和 Mooney^[99]在实验室条件下进行人工降雨，取一个大体积非扰动土柱，用染色示踪技术结合 TDR 技术来研究优先流的物理和形态学特性，为获取一系列的高分辨率的优先流路径图像提供了一种方法。

4 土壤优先流研究中的问题和展望

(1) 前期土壤优先流的研究大致可以分为 3 个阶段：①最初对入渗过程中大孔现象研究引起的对优先流定性化的研究；②CT 成像等无损技术投入到室内室外试验中，并借助数学手段对优先流进行定量化的研究；③目前更多的先进仪器投入到试验中，提高了计算精度。下一步的研究重点仍在于借助先进仪器，采用多因素综合分析方法，使得优先流的研究进一步精确定量以此来揭示优先流运动机理。

(2) 优先流是造成降雨型滑坡、地下水水质受污染、泥石流等灾害以及农业土壤中养分流失等现象的主要诱因之一，但所进行的相关试验条件则有偏于实际情况，如针对降雨型滑坡、泥石流的研究，Zhang 等^[100]在三峡船闸附近进行现场渗透试验时，为消除植被对入渗的影响，铲除了植被及其根带；周中等^[101]在贵州某堆积层边坡进行降雨致滑试验时不仅清除了试验区植被，而且按 1:2.5 坡度进行了刷坡；室内模拟试验^[102-103]更无法再现真实的植被覆盖及其枯落物对降雨入渗的影响。这些既有成果来描述无植被裸坡对降雨入渗产生的优先流现象的响应，显然与植被发育斜坡对优先流的响应行为之间的差异显然是巨大的。所以，所进行的试验应该尊重研究对象的实际情况，得到的

研究成果才更具针对性, 指导意义更明确。

(3) 土壤优先流既有研究对象单一, 主要集中在斥水性砂土、粗质砂土、黄土粉土等性质的土壤, 试验条件也较少涉及冻土等异类环境条件。另一方面研究主要集中在水分和溶质在优先流路径中的非平衡迁移, 较少涉及到微粒随水分或有毒气体(如: 瓦斯等)在土壤或岩体中的非平衡迁移, 所以优先流的研究应该扩展于广义的优先流范畴, 让其更具一般性。

(4) 土壤优先流的既有研究具有分散性, 并未形成一个统一的研究体系。学者们对优先流都有着自我认知, 所进行的试验提取的数据均具有强地域性, 使得研究不具有普遍性, 确定优先流中的参数同时就有了地域性。因此, 应该加强优先流的统一化研究, 一方面可以引入和完善随机理论(如: 蒙特卡洛法)、统计学方法等理论来完善既有的研究成果, 另一方面可以提高试验手段和精确数据处理。

(5) 优先流的量化是一个研究热点, 光子发射(SPEC)、伽马射线及中子成像等一系列的现代化成像技术将会为量化研究带来新的曙光, 尝试运用新技术进行试验将是优先流研究往后发展的趋势。另外, CT 扫描技术、磁共振技术等存在诸多的不足, 它们并不是专属于土壤优先流的研究工具, 所以设计发明一套专业的、简单但又不失精度的专用于优先流研究的仪器是当前科研人员的一个攻克目标。

参考文献:

- [1] Dehn M, Bürger G, Buma J, Gasparetto P. Impact of climate change on slope stability using expanded downscaling. *Engineering Geology*, 2000, 55(3): 193-204
- [2] IPCC. Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom. Cambridge University Press, 2001
- [3] 赵玲, 王林凤, 王利. 两次不同性质强降雨的对比分析. *气象*, 2005, 31(11): 69-73
- [4] IPCC. Climate Change 2007: The Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. <http://www.ipcc.ch/>
- [5] Turner NJ, Clifton H. "It's so different today": Climate change and indigenous lifeways in British Columbia, Canada. *Global Environmental Change*, 2009, 19(2): 180-190
- [6] 张永双, 吴树仁, 赵越, 何峰, 石菊松, 罗菊英. 湖北省巴东县桐木园山坡型泥石流的形成机理及预警指标——以 2003-03-31 强降雨过程为例. *地质通报*, 2003, 22(10): 833-838
- [7] Corominas J, Moya J. A review of assessing landslide frequency for hazard zoning purposes. *Engineering Geology*, 2008, 102(3):193-213
- [8] 荣冠, 王思敬, 王恩志, 王建新. 强降雨下元磨公路典型工程边坡稳定性研究. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(4): 704-711
- [9] Jakob M, Lambert S. Climate change effects on landslides along the southwest coast of British Columbia. *Geomorphology*, 2009, 107(3): 275-284
- [10] 胡博, 王冬梅. 农地非点源磷污染的优先流路径研究. *亚热带水土保持*, 2007, 19(2): 16-19
- [11] 牛健植, 余新晓. 优先流问题研究及其科学意义. *中国水土保持科学*, 3(3): 110-116
- [12] 上海泓济环保工程有限公司. 重金属中毒事件追踪. 2009-8-31. <http://www.honesty.cn/newsView.asp?id=131>
- [13] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils. *Water Resource Reserch*, 1982, 18(5): 1311-1325
- [14] Hendrickx JMH, Flury M. Uniform and preferential flow, mechanisms in the vadose zone // *Conceptual Models of Flow and Transport in the Fractured Vadose Zone*. National Research Council, Washington DC: National Academy Press, 2001: 149-187
- [15] Suzanne EA, Stéphanie R, Allan JC. Quantifying preferential flow in soils: A review of different techniques. *Journal of Hydrology*, 2009, 378(1/2): 179-204
- [16] 牛健植, 余新晓, 张志强. 优先流研究现状及发展趋势. *生态学报*, 2006, 16(1): 231-243
- [17] Tsuyohi M. Preferential flow. *Water Flow in Soils*, 1992:134-143
- [18] 刘亚平, 陈川. 土壤非饱和带中的优先流. *水科学进展*, 1992, 7(1): 85-89
- [19] 秦耀东, 任理, 王济. 土壤中大孔隙流研究进展与现状. *水科学进展*, 2000, 11(2): 203-207
- [20] Šimůnek J, Jarvis NJ, Van Genuchten M T, Gärdenäs A. Review and comparison of models for describing non- equilibrium and preferential flow and transport in the vadose zone. *Journal of Hydrology*, 2003, 272(1/4):14-35
- [21] 王印杰, 王玉珉. 非饱和土壤水分函数解析与 Richards 方程入渗新解. *水文*, 1996(2): 1-9
- [22] 王玉珉, 王印杰. 非饱和土壤 Richards 方程入渗求解探讨. *水文地质工程地质*, 2004, 31(1): 9-13
- [23] 田富强, 胡和平. 基于常微分方程求解器的 Richards 方程数值模型. *清华大学学报(自然科学版)*, 2007, 47(6): 785-788
- [24] Kavetski D, Binning P, Sloan SW. Adaptive time stepping and error control in a mass conservative numerical

- solution of the mixed form of Richards equation. *Advances in Water Resources*, 2001, 24(6): 595–605
- [25] Ross PJ, Smettem KRJ. A simple treatment of physical nonequilibrium water flow in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(6): 1926–1930
- [26] Nathan WH, Suresh P, Rao C, Simunek J, Irene CP. Single-porosity and dual-porosity modeling of water flow and solute transport in subsurface-drained fields using effective field-scale parameters. *Journal of Hydrology*, 2005, 313(3/4): 257–273
- [27] Van Genuchten MT. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(5): 892–898
- [28] Philip JR. The theory of absorption in aggregated media. *Australian Journal of Soil Research*, 1968, 6(1): 1–19
- [29] Gerke HH, Van Genuchten MT. Evaluation of a first-order water transfer term for variably saturated dual-porosity flow models. *Water Resource Research*, 1993, 29(4): 1225–1238
- [30] Gerke HH, Van Genuchten MT. A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media. *Water Resource Research*, 1993, 29(2): 305–319
- [31] Gwo JP, Jardine PM, Wilson GV, Yeh GT. A multiple-pore-region concept to modeling mass transfer in subsurface media. *Journal of Hydrology*, 1995, 164(1/4): 217–237
- [32] Hutson JL, Wagenet RJ. A multiregion model describing water flow and solute transport in heterogeneous soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1995, 59(3): 743–751
- [33] 柴军瑞, 仵彦卿. 岩体渗流场与应力场耦合分析的多重裂隙网络模型. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(6): 712–717
- [34] Kathleen HB. Nutrient removal from effluents by an artificial wetland: Influence of rhizosphere aeration and preferential flow studied using bromide and dye tracers. *Water Research*, 1987, 21(5): 591–599
- [35] Wang K, Zhang RD. Heterogeneous soil water flow and macropores described with combined tracers of dye and iodine. *Journal of Hydrology*, 2011, 397(1/2): 105–117
- [36] Lipsius K, Mooney SJ. Using image analysis of tracer staining to examine the infiltration patterns in a water repellent contaminated sandy soil. *Geoderma*, 2006, 136(3/4): 865–875
- [37] Edward HJ, Colin CS. Non-equilibrium partitioning tracer transport in porous media: 2-D physical modelling and imaging using a partitioning fluorescent dye. *Water Research*, 2005, 39(20): 5099–5111
- [38] Andrea B, János E, Gábor P. Determination of uranine tracer dye from underground water of Mecsek Hill, Hungary. *Journal of Biochemical and Biophysical Methods*, 2006, 69(1/2): 207–214
- [39] Sacha JM, Morris C. A morphological approach to understanding preferential flow using image analysis with dye tracers and X-ray computed tomography. *CATENA*, 2008, 73(2): 204–211
- [40] Morris C, Mooney SJ, Young SD. Sorption and desorption characteristics of the dye tracer, Brilliant Blue FCF, in sandy and clay soils. *Geoderma*, 2008, 146(3/4): 434–438
- [41] Abidi SL. Detection of diethylnitrosamine in nitrite-rich water following treatment with rhodamine flow tracers. *Water Research*, 1982, 16(2): 199–204
- [42] Alaoui A, Goetz B. Dye tracer and infiltration experiments to investigate macropore flow. *Geoderma*, 2008, 144(1/2): 279–286
- [43] Wessolek G, Stoffregena H, Täumer K. Persistency of flow patterns in a water repellent sandy soil—Conclusions of TDR readings and a time-delayed double tracer experiment. *Journal of Hydrology*, 2009, 375(3/4): 524–535
- [44] David A, Khanbilvardi R, James CA, Richardson W. Description of flow through a natural wetland using dye tracer tests. *Ecological Engineering*, 2011, 18(2): 173–184
- [45] Morris C, Mooney SJ. A high-resolution system for the quantification of preferential flow in undisturbed soil using observations of tracers. *Geoderma*, 2004, 118(1/2): 133–143
- [46] Öhrström P, Persson M, Albergel J, Zante P, Nasri S, Berndtsson R, Olsson J. Field-scale variation of preferential flow as indicated from dye coverage. *Geoderma*, 2002, 257(1/4): 164–173
- [47] Albrecht A, Schultze U, Bello BP, Wydler H, Frossard E, Flühler H. Behavior of a surface applied radionuclide and a dye tracer in structured and repacked soil monoliths. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2003, 68(1): 47–64
- [48] Houghton RW. Diapycnal flow through a tidal front: A dye tracer study on Georges Bank. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2002, 37(1/3): 31–46
- [49] Niu JZ, Yu XX, Zhang ZQ. Soil preferential flow in the dark coniferous forest of Gongga Mountain based on the kinetic wave model with dispersion wave (KDW preferential flow model). *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(9): 3541–3555
- [50] Markus W, Hannes F. Inferring flow types from dye patterns in macroporous soils. *Geoderma*, 2004, 120(1/2): 137–153
- [51] Wang K, Zhang RD, Yasuda H. Characterizing heterogeneity of soil water flow by dye infiltration experiments. *Journal of Hydrology*, 2006, 328(3/4): 559–571

- [52] Hury M. Brilliant Blue FCF as a dye tracer for solute transport studies-A toxicological overview. *Journal of Environmental Quality*, 1994, 23(1):1 108-1 112
- [53] Hark K, Sigrid MW. Adsorption of brilliant blue FCF by soils. *Geoderma*, 1999, 90(1/2): 131-145
- [54] Hury M, Fluhler H. Tracer characteristics of Brilliant Blue FCF. *Soil Science Society of America Journal*, 1995, 59(1): 22-27
- [55] Kasteel R, Vogel H J, Roth K. Effect of non-linear adsorption on the transport behaviour of Brilliant Blue in a field soil. *European Journal of Soil Science*, 2002, 53(2): 231-240
- [56] Judit G, Markus F. Sorption of Brilliant Blue FCF in soils as affected by pH and ionic strength. *Geoderma*, 2000, 97(1/2): 87-101
- [57] 牛健植. 长江上游暗针叶林生态系统优先流机理研究(博士学位论文). 北京: 北京林业大学, 2003
- [58] Anderson SH, Peyton RL, Gantzer CJ. Evaluation of constructed and natural soil macro-pores using X-ray computed tomography. *Geoderma*, 1990, 46(1/3): 13-29
- [59] Zeng Y, Gantzer CJ, Payton RL, Anderson SH. Fractal dimension and lacunarity determined with X-ray computed tomography. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60(6):1 718-1 724
- [60] Warner GS, Nieber JL, Moore ID, Geise RA. Characterizing macropores in soils by computed tomography. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53(3): 653-660
- [61] 冯杰, 郝振纯. CT 扫描土壤大孔隙. *水科学进展*, 2002, 13(5): 611-617
- [62] Sacha JM, Morris C. A morphological approach to understanding preferential flow using image analysis with dye tracers and X-ray Computed Tomography. *CATENA*, 2008, 73(2): 204-211
- [63] Withjack EM, Arco O, Gas C. Computed Tomography for Rock-Property Determination and Fluid-Flow Visualization. *SPE formation evaluation*, 1988, 3(4): 696-704
- [64] Wildenschild D, PVaz CM, Rivers ML, Rikard D, Christensen BSB. Using X-ray computed tomography in hydrology: systems, resolutions, and limitations. *Journal of Hydrology*, 2002, 267(3/4): 285-297
- [65] Paola F. Magnetic resonance for fluids in porous media at the University of Bologna. *Magnetic Resonance Imaging*, 2005, 23(2): 125-131
- [66] Posadas DAN, Panepucci H, Crestana S. Magnetic resonance imaging as a non-invasive technique for investigating 3-D preferential flow occurring within stratified soil samples. *Computers and Electronics in Agriculture*, 1996, 14(4): 255-267
- [67] Oswald S, Kinzelbach W, Greine A, Brix G. Observation of flow and transport processes in artificial porous media via magnetic resonance imaging in three dimensions. *Geoderma*, 1997, 80(3/4): 417-429
- [68] Herrmann KH, Pohlmeier A, Gembris D, Vereecken H. Three-dimensional imaging of pore water diffusion and motion in porous media by nuclear magnetic resonance imaging. *Journal of Hydrology*, 2002, 267(3/4): 244-257
- [69] Jelinkova V, Snehota M, Pohlmeier A, Dusschoten DV, Cislerova M. Effects of entrapped residual air bubbles on tracer transport in heterogeneous soil: Magnetic resonance imaging study. *Organic Geochemistry*, 2011, 42(8): 991-998
- [70] Pohlmeier A, Dusschoten DV, Weihermüller L, Schurr U, Vereecken H. Imaging water fluxes in porous media by magnetic resonance imaging using D₂O as a tracer. *Magnetic Resonance Imaging*, 2009, 27(2): 285-292
- [71] Doolittle JA, Jenkinson B, Hopkins D, Ulmerand M, Tuttle W. Hydrogeological investigations with ground-penetrating radar(GPR): Estimating water-table depths and local ground-water flow pattern in areas of coarse-textured soils. *Geoderma*, 2006, 131(3/4): 317-329
- [72] Aranha PRA, Augustin CHRR, Sobreira FG. The use of GPR for characterizing underground weathered profiles in the sub-humid tropics. *Journal of Applied Geophysics*, 2002, 49(4): 195-210
- [73] Harari Z. Ground-penetrating radar(GPR) for imaging stratigraphic features and groundwater in sand dunes. *Journal of Applied Geophysics*, 1996, 36(1): 43-52
- [74] Gómez-Ortiz D, Martín-Crespo T, Rodríguez I, Sánchez MJ, Montoya I. The internal structure of modern barchan dunes of the Ebro River Delta (Spain) from ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, 2009, 68(2):159-170
- [75] Neal A, Richards J, Pye K. Structure and development of shell cheniers in Essex, southeast England, investigated using high-frequency ground-penetrating radar. *Geology*, 2002, 185(3/4): 435-469
- [76] 百度百科. 时域反射计(TDR): <http://baike.baidu.com/view/1295902.htm#2>
- [77] 孙玉龙, 郝振纯. TDR 技术及其在土壤水分及土壤溶质测定方面的应用. *灌溉排水*, 2000, 19(1): 37-41
- [78] Jon MW, Bhabani SD. Monitoring soil water and ionic solute distributions using time-domain reflectometry. *Soil and Tillage Research*, 1998, 47(1/2): 145-150
- [79] Germann PF. Scales and dimensions of momentum dissipation

- during preferential flow in soils. *Water Resources Reserches*, 1999, 35(5): 1 443-1 454
- [80] Ritsema CJ, Dekker LW. Preferential flow in water repellent sandy soils: Principles and modeling implications. *Journal of Hydrology*, 2000, 231/232: 308-319
- [81] Lee J, Horton R, Noborio K, Jaynes DB. Characterization of preferential flow in undisturbed, structured soil columns using a vertical TDR probe. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2001, 51(3/4): 131-144
- [82] Brandt H. A study of the speed of sound in porous granular media. *Journal of Applied Mechanics*, 1954, 22: 479-486
- [83] Geertsma J, Smit DC. Some aspects of elastic wave propagation in fluid-saturated porous solids. *Geophysics*, 1961, 26(2): 169-181
- [84] Brutsaert W. The propagation of elastic waves in unconsolidated unsaturated granular mediums. *Journal of Geophysical Research*, 1964, 69(2): 243-257
- [85] Flammer I, Blum A, Leiser A, Germann P. Acoustic assessment of flow patterns in unsaturated soil. *Journal of Applied Geophysics*, 2001, 46(2): 115-128
- [86] Blum A, Flamme I, Friedli T, Germann P. Acoustic tomography applied to water flow in unsaturated soils. *Soil Science Society of America*, 2004, 3: 288-299
- [87] 肖晓, 汤井田, 杜华坤. 电阻率层析成像方法综述. *当代矿山地质地球物理新进展*, 2004: 264-269
- [88] Sasaki Y. Resolution of resistivity tomography inferred from numerical SIMULATION1. *Geophysical Prospecting*, 1992, 40 (4): 453-463
- [89] Scollar I, Tabbagh A, Hesse A, Herzog I. *Archaeological Prospecting and Remote Sensing*. United Kingdom: Cambridge University Press, 1990: 674
- [90] Archie GE. The electrical resistivity log as an aid indetermning some reservoir characteristics. *Transactions of the American Institute of Mining*, 1946, 146: 54-62
- [91] Archie GE 著. 李宁 译. 用电阻率测井曲线确定若干储层特征参数. *地球物理测井*, 1991, 15(5): 297-303
- [92] Vanderborcht J, Kemna A, Hardelauf H, Vereecken H. Potential of electrical resistivity tomography to infer aquifer transport characteristics from tracer studies: A synthetic case study. *Water Resource Research*, 2005, 41: W06013
- [93] 周凌云, 陈志雄, 李卫民. TDR 法测定土壤含水量的标定研究. *土壤学报*, 2003, 40(1): 59-64
- [94] Perret J, Prasher SO, Kantzas A, Langford C, Hamilton K. Preferential solute flow in intact soil columns measured by SPECT scanning. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64: 469-477
- [95] Anderson SH, Hopmans JW. *Tomography of Soil-Water-Root Processes*. Madison, Wisconsin, USA: SSSA, 1994: 87-98
- [96] Kaestner A, Lehmann E, Stampanoni M. Imaging and image processing in porous media research. *Advances in Water Resources*, 2008, 31(9): 1 174-1 187
- [97] Shipitalo MJ, Gibbs F. Potential of earthworm burrows to transmit injected animal wastes to tile drains. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64: 2 103-2 109
- [98] Vervoort RW, Cattle SR, Minasny B. The hydrology of vertosols used for cotton production: I. Hydraulic, structural and fundamental soil properties. *Australian Journal of Soil Research*, 2003, 41(7):1 255-1 272
- [99] Morris C, Mooney SJ. A high-resolution system for the quantification of preferential flow in undisturbed soil using observations of tracers. *Geoderma*, 2004, 118(1/2): 133-143
- [100] Zhang J, Jiao JJ, Yang J. In situ rainfall infiltration studies at a hillside in Hubei Province, China. *Engineering Geology*, 2000, 57(1/2): 31-38
- [101] 周中, 傅鹤林, 刘宝琛, 谭捍华, 龙万学, 周勇. 堆积层边坡人工降雨致滑的原位监测试验研究. *中国铁道科学*, 2006, 27(04): 11-16
- [102] 黄涛, 罗喜元, 邬强, 郑黎明. 地表水入渗环境下边坡稳定性的模型试验研究. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23 (16): 2 671-2 675
- [103] 程平, 程耕国. 降雨产生地下水流的实验与仿真结果的比较. *武汉理工大学学报*, 2006, 28(8): 94-96

Present and Future Research of Preferential Flow in Soil

XU Zong-heng¹, XU Ze-min¹, CAO Jun-wei², MENG Qing-hui¹

(1 *Department of Civil Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;*

2 *Yunnan Yuntong Zinc Co., Ltd, Kunming 650000, China*)

Abstract: The preferential flow, a term proposed by scholars according to water transport in soil in recent years, is the symbol of soil water transport mechanism study transforming from uniformity to non-uniformity. It can be defined as the unstable seepage phenomena of water and solute along the specific path, under the impacts of multiple factors. It is one of main causes that lead to geological hazards of rainfall-induced landslides, debris flow, and groundwater pollution, nutrient loss in farm field, so the study on preferential flow is particularly important. This paper, beginning with the definition of preferential flow, mainly reviewed the study development on mathematical models and technical means, and at the end the existing problems were discussed and the future research was put forward.

Key words: Soil, Preferential flow, Mathematical models, Technical means, Future research