

优先流研究现状及发展趋势

牛健植, 余新晓, 张志强

(北京林业大学水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要: 优先流是一种常见的土壤水分运动形式, 它是土壤水运动机理研究由均质走向非均质领域的标志, 但最初却没有真正的定义。综合介绍了目前国际上公认的土壤优先流定义、优先流多种表现形式及其重要特征, 系统阐述了优先流的静态(内在)和动态(外在)影响因素、开展研究的基础理论以及实验研究技术, 指出开展优先流研究可以有效及充分地解释早期水文学研究所困扰的不符合达西定律及对流-弥散方程等重大问题, 但由于优先流运动过程具有非平衡性及区域特点, 其自身类型较多, 开展优先流研究同时加大了水文过程研究的难度及深度, 所以长期以来没有得到充分重视, 到目前为止, 对于优先流运动机理尚未明确; 开展优先流研究判定标准多样, 但缺乏系统成形的判定标准; 由于土壤本身就是异质性系统, 对优先流研究需综合考虑尺度效应; 虽然已有多种方法可以有效开展优先流研究, 但缺少已获得国际标准认证的适用于具有快速环绕特性的优先流研究需要的现代仪器设备。同时还探讨了优先流研究的发展趋势。

关键词: 优先流; 影响因素; 基础理论; 实验技术

文章编号: 1000-0933(2006)01-0231-13 **中图分类号:** P463, Q14, S154.1, S157 **文献标识码:** A

The present and future research on preferential flow

NIU Jian-Zhi, YU Xin-Xiao, ZHANG Zhi-Qiang (Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Desertification Combating of the Ministry of Education, College of Soil and Water Conservation, Beijing 100083, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(1): 231 ~ 243.

Abstract: Preferential flow, an ordinary form of soil water movement, was proposed recently but had not been properly defined at first even though this expression has been adopted by various scientific communities. Preferential flow is a term describing a process whereby most of the water and contaminants move through porous medium following favored pathways from other parts of the medium. Research on preferential flow involves studying the mechanism of soil water movement from homogeneous to heterogeneous fields, and it is inevitable that performing experimental or technological analyses is difficult because this movement is not detected easily. This paper provides a broad overview of preferential flow with respect to definitions, types, basic meanings, basic theory, important characteristics and effectual factors, and systematically outlines the most recent methods to study preferential flow with quantificational experiments such as chemical tracing, mini-tensiometry and electrical resistance tomography, as well as other methods. We also provide a detailed analysis of modern apparatuses used effectively in the above-mentioned technological methods such as time-domain reflectometry (TDR), tension infiltrometry and ground penetrating radar. Research that takes into account preferential flow can effectively explain the problems of hydrological processes which may not be addressed by Darcy's law and the Convective-Diffusive Equation, but at the same time, considering preferential flow increases the difficulties and complexity of the research due to the non-equilibrium and regional characteristics and manifold types that are involved. To date, the mechanism of the movement of preferential flow still does not have a proper definition. There is a lack of systematic standards, which should take into account the spatial and temporal scale. There is also a lack of equipment that can obtain international standard authentication and that has high speed and bypassing characteristics necessary to measure preferential flow. In the end, the paper discusses the

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30471379); 国家重点基础研究发展计划资助项目(2002CB111502)

收稿日期: 2005-01-11; **修订日期:** 2005-11-29

作者简介: 牛健植(1974~), 女, 吉林四平人, 博士, 副教授, 主要从事森林水文和森林生态研究. E-mail: niujianzhi@126.com

Foundation item: Key Program of National Natural Science Foundation of China (No. 30471379) and the State Key Project of Fundamental Research (973) (No. 2002CB111502)

Received date: 2005-01-11; **Accepted date:** 2005-11-29

Biography: NIU Jian-Zhi, Ph. D., mainly engaged in forest hydrology and forest ecology. E-mail: niujianzhi@126.com

direction of the development of future research.

Key words: preferential flow; effectual factors; basic theory; experimental technology

优先流是近年来针对土壤水运动所提出的术语,它是一种较为常见的土壤水分运动形式^[1-3],是土壤水运动机理研究由均质走向非均质领域的标志,但其最初出现却没有真正的定义,仅被作为“pars pro toto”用于描述土壤水分快速流动现象^[4],许多专家针对所研究内容,对“优先流”提出自我认识^[5-9]。目前,对于土壤优先流定义公认的观点是“优先流是用于描述在多种环境条件下发生的非平衡流过程的术语”^[4]。优先流表现形式较多,如大孔隙流(Macropore Flow)^[10-13]、环绕流(Bypass Flow)、管流(Pipe Flow)^[14-18]、指流(Finger Flow)^[19-22]、漏斗流(Funnel Flow)^[23,24]、沟槽流(Channel Flow)、短路流(Short Circuiting Flow)、部分置换流(Partial Displacement)、地下强径流(Subsurface Storm Flow)、非饱和重力流(Gravity-Driven Unstable Flow)^[25-37],异质流(Heterogeneity-Driven Flow)^[38,39]、摆动流(Oscillatory Flow)及低洼再蓄满(Depression-Focused Recharge)^[40-44]等,其运移过程一般具有环绕性^[45,46]和非平衡性^[47,48]两个重要特征。由于优先流形成的影响因子多样、获取较困难且是一种常见现象,它的发现带来了许多不确定因素,并增加了水文学及生态学等领域研究的难度。

1 优先流的影响因素

优先流路径具有空间可变性^[49-51],其产生是静态(内在)和动态(外在)因素作用的结果。静态因素主要通过土壤基本性质而反映出来,动态因素表现在土壤及农作物管理等方面。

1.1 静态(内在)因素

1.1.1 土壤性质 土壤质地和结构的差异使土壤含水量不同,影响土壤水文过程,并影响优先流的表现形式及反映现象。在沙质等粗质土壤中,优先流与土壤驱水性有关,并可能发生一系列现象,如从湿润峰不稳定到指流,并最终形成沙丘的湿柱^[35];大孔隙流现象通常在粉沙和粘质土壤出现^[7];非饱和重力流和指流常出现在沙质或者细粒驱水性土壤^[28,29];漏斗流常在砂土发生,其层状倾斜结构就似毛管携带者,直接携带水进入集中的水管中^[24];异质流现象在具有高度空间相关异质土壤中较容易发生^[38,52]。

依靠土壤层位及持水特性,水和溶质在结构和非结构土壤中的流动也存在差异,一般来说,在结构土壤中,优先流首先在土壤表层出现,在非结构土壤中,优先流随时可以在土壤的任何层出现。优先流及其迁移过程与土壤的有机质含量有关,粘土与砂土相比,有较强结构的粘土阻碍优先流穿过程,所以水及溶质在沙壤土中运动较粘土快。

1.1.2 生物因素 生物因素是成土过程中最重要的一种因素,对土壤的性质有重要影响,是形成土壤大孔隙的一个重要原因,同时苔藓层和根系层等又是非饱和重力流等形成的诱发因子,生物因素对优先流产生具有至关重要的作用。本文以生物因素对大孔隙流作用为例来阐述说明。

动物是形成大孔隙的一个重要因素,如蚯蚓和蚂蚁通过钻进和伸出土壤,从土壤有机质中获取养分或者食用土壤表层新鲜的植物营养,为亚表层大孔隙和土壤表层水和化学物质之间建立更多的联系,并影响优先流过程;同一种动物的不同亚种的活动对优先流的影响不相同,并且还需考虑生境(包括食物来源)^[53-57]。植物根系对土壤优先流形成具有重要作用,其内部根孔(尤以垂直根孔为主)是形成土壤大孔隙的重要因素之一,是产生优先流现象的主要机制^[58-62]。在森林中,没有人为干扰,土壤中的大孔隙可以保持很长时间,由树根形成的大孔隙在含有30%粘粒的土壤中可保持50~100a,而一些动物如蚂蚁、鼯鼠所形成的可保持几百年,大孔隙存在的时间与土壤的结构稳定性有关。

1.1.3 土壤初始含水量 土壤初始含水量是层状土壤上层物理特征的一个功能的反映,因此,它也是土壤上层持水曲线和毛管传导率作用的反映,对层状土壤的优先流产生具有重要作用^[64]。Edwards等实验研究发现,第1次降水30mm后过1周,进行第2次降水,两者水流的穿透时间存在较大差异^[65]。Edwards认为土壤初始含水量低时,在降水初期干燥的表层土壤颗粒与降水之间存在不湿润界面,限制了水向土壤基质的人渗。在初始含水量较高的土壤,施加农药,短时间的降雨,农药的迁移路径却很深^[65,66]。

1.2 动态(外在)因素

1.2.1 降雨强度和灌溉方法 降雨强度和灌溉方法影响优先流运动过程, Bouma 和 Dekker 研究发现在干粘质土壤中, 含示踪染料的溶质施用速度和总量会影响染色带的深度^[67]。优先流始于降雨或灌溉速率超过土壤入渗率或出现饱和流的时候, 高的降水强度使化学物质高度迁移, 低降水强度使化学物质较少迁移^[68]。降雨强度对优先流的影响还表现在影响水和溶质的融合时间, 从而影响到迁移速度。由于各季降雨量存在差异, 所以季节变化对优先流及优先迁移也有较大影响。Gang-Ling Ren 等通过不同灌溉方法对优先流影响的实验研究发现, 积水条件下溶质优先迁移的速度大于喷灌条件下溶质的优先迁移, 并且两者的水流量近似相等^[69]。

1.2.2 耕作方式 影响土壤物理特性的一个主要农业管理方法就是耕作。耕作范围从免耕地到较小耕地到连续深耕, 耕作改变了土壤的结构和孔隙度, 进而影响到土壤、大气和水的交换关系。耕作系统还影响包括腐殖质层和大型脊椎动物群落地区土壤的生物特征, 并通过它们影响生物、温度和含水量等化学过程。免耕增加了土壤渗透性, 流向地下水中的污染物比耕地也相应增加^[70], 同时免耕地中的大型脊椎动物也极大地驱动优先流产生。

1.2.3 干湿和冻融交替 受季节交替影响, 在干湿及冻融交替过程中, 土壤随水分增加和减少而发生膨胀和收缩。如在干燥季节, 土壤结构体收缩, 在地表产生宽而深的裂隙, 在湿润季节, 土壤结构体膨胀, 其表面相对紧密, 土壤膨胀和收缩的程度与土壤质地有关。区自清等研究分析指出, 冻融和干湿交替均可使土壤产生大孔隙和优先流路径, 而且前者的作用较后者强^[63]。

动态(外在)因素可能影响程度较大, 如干旱裂隙后的降雨郁闭而出现的干湿交替过程; 但也可能变化非常慢或有季节性, 如杀虫剂残余物运移。

上述优先流静态和动态因素(内在和外在因素)有效地决定了优先流的起源及过程, 对这些内外因素详细了解, 以及在一个给定研究区域中, 清楚明白什么因素是最重要的判定标准, 将有助于确定研究方法、明确现象特点及利用模型模拟优先流迁移过程^[68, 71, 72]。

2 土壤优先流研究的基础理论

2.1 能量理论

将能量观点融入土壤水分入渗规律是土壤物理学研究的飞跃。土水势是表示土壤能量的物理量, 一般由重力势、压力势、基质势和溶质势等分势构成。从土水势是土壤水分运动的主要决定因素及土壤水分运动的能量角度出发, 可知土壤优先流作为非平衡和快速流, 存在土水势的高度不平衡性。

2.2 混沌及分形理论

混沌及分形理论是 20 世纪 70 年代, 在非线性和科学研究中取得的重要成果之一。混沌理论侧重于从动力学角度研究不可积系统轨道不稳定性, 分形理论侧重于从几何学角度研究不可积系统几何图形的自相似性, 它们与许多具体的自然现象相联系, 而成为一门活跃的非线性交叉学科, 并在物理、化学、生物、地学及大气学中获得了广泛的应用。

“混沌”一词常用于描写物体动态过程^[73-75]。规则(非混沌状态)、随机和混沌系统都有各自的轨道模式, 如异质性裂隙介质中的混沌流形态形成的主要原因是水动态不稳定及其依存条件(包括降雨、温度、气压和含水量等), 它们通过如裂隙系统的几何连接度、小尺度裂隙异质性和粗糙度、空气截留和移动、传导性裂隙堵塞、基质裂隙排水动力学、有效水孔隙变量和水渗透性等非线性因素的综合作用而反映, 水滴下落^[76, 77]、大气温度、河流排水、降雨^[78, 79]和氧气同位素浓度^[80]等动态例子都可以反映这些系统参数的非线性混沌行为。

非饱和异质性和裂隙物质的非线性行为可以用非线性普通和局域微分方程表示, 它是有界非周期方法, 是确定性的、混沌-随机的并融有噪音成分^[73, 75, 81], 可用于预测水流和溶质迁移, 短期预测可用指数表示, 但如果存在动态变化, 则需长期预测。Sposito 和 Weeks 通过研究可知 Lagrangian 方程可用于稳定条件下的三维溶质被动对流分析^[82, 83]; Weeks 和 Sposito 将混沌理论用于 Borden 立地实验得到的结果可用于非稳定流混合特

性和拓扑分析;土壤和裂隙岩石中非饱和流的混沌和随机研究可以利用诸如 Hurst 指数、Lyapunov 指数、容量维、相关维和信息维和相关时间等一系列参数来估计^[84]。

Prazak 研究发现通过粗质孔隙介质中的重力水渗流实验所观察到的不规则摆动不能用传统理论解释^[85];在裂隙网格中二相断续流的可能机制原因可用 Thunvik 和 Braester 所作的数字模拟实验解释^[86],水从裂隙中滴落,随时间不规则运动,并存在一个波动区域^[87];Geller 利用平行盘之间的滴落水开展断续水流随时间变动实验^[88],并通过实验分析在粗糙玻璃表面上,混沌成因的重要性。

分形是用来描述物质占有空间结构的概念,是一种数学抽象,客观世界不是真正的分形,也不是真正的连续体。1975 年 Mandelbort 首次提出分形几何学,用于描述自然界中许多不规则事物^[89]。1992 年 Natano 等将分形理论引入土壤结构分析中,发现孔隙分维数与溶质运移的 Brenner 数有密切关系,从此之后,分形理论及方法在大孔隙流及溶质运移研究领域被广泛推广应用。分形几何作为一种实效方法,有自相似性和分形维数两个重要特征^[89],它只需很少数据就可确定出土壤大孔隙流性质,具有省时、省力等优点;分形理论与混沌理论、时间序列分析方法相结合,有效促进了优先流及优先运移理论发展,同时开展土壤优先流的时空变化规律研究,是今后研究的方向。

2.3 渗透理论

渗透理论所涉及的研究尺度范围极广,从孔隙到田间尺度,现已在孔隙及裂隙介质中的水运动规律研究中得到广泛应用^[90]。渗透理论具有直觉式反映特征,可用于复杂流动网格研究,并为孔隙管道、毛管和裂隙网格模型的建立提供概括性表述。传统渗透理论与网格连通性极度相关,如相对渗透性的稳定流研究^[91-94],现在“入侵渗透”及其变量已经广泛用于溶质混合置换动态研究中,如毛管指状^[95,96]和重力指状^[97]等。虽然渗透理论适合渗透介质流动的基本现象和格局描述,但在实际田间实验中,如何利用渗透理论来构建模型,解决问题,至今尚未明确。

“细胞自动机”动态模型是入侵渗透最常见的表现形式,它是一种时间、空间和状态均离散的格子动力学模型,具有描述局域相互作用、局部因果关系的多体系统所表现出的集体行为及时间演化的能力,已广泛用于解决不同尺度上的流动性动态问题^[98]。其中“有限扩散聚合体(DLA)”已经用于水文动态非饱和混合置换的粘性指状分析^[99];“晶格结构气体模型”经实践论证特别适合于在不规则孔隙体中流动的小尺度(孔隙水平)上作模型模拟分析。利用入侵渗透构建的模型近几年也开始在流动和运移田间尺度上得到有效利用^[100],并且应用于断裂岩石中的溶质运移规律研究。

2.4 非稳定湿润锋理论

优先流是土壤入渗过程中出现的一种现象,土壤入渗过程根据土壤剖面含水率分布大致可分为饱和区、含水率有明显降落的过渡区、含水率变化不大的传导区和含水率迅速减少到初始值的湿润区四个区,湿润区的前锋称为湿润峰,优先流发生常伴有湿润锋的不稳定性。由 Rats^[101]、Philip^[102,103]以及 Parlange 和 Hill^[104]发展的非稳定湿润锋理论认为,如果湿润锋的速度随着入渗深度而增加,锋面将变得不稳定,这就意味着开始呈平状的湿润锋,当受到一个小扰动时,将增长并最终成为优先流路径。引起湿润锋不稳定的机理有多种,如土壤的驱水性、湿润锋前部空气压力的增加、非蓄水降雨的入渗(降雨强度小于土壤饱和和水力传导率)、成层性土壤及土壤非均一的水力传导率,在这些因素中,人们研究比较多的是土壤驱水性对不稳定湿润锋的影响。通常干旱地区的驱水性土壤难以湿润,迫使水和溶质经由优先流路径而通过非饱和带;在驱水性土壤中,经历了长时期干旱,下第一次雨后,优先流路径较易出现,在两条开始仅是微湿的优先流路径之间的干旱土壤,难以湿润,而优先流路径则变得越来越湿,这些路径可保持很长一段时间,但是当水位很高、整个土壤饱和或者持续长时间干旱等情况发生时,这种优先流路径却可能消失^[105-107]。

2.5 优先流模型

土壤优先流导致传统 Darcy 定律推算的迁移速度、迁移时间和迁移量不可信,依据均质假设建立的模型预测不准,有关溶质运移的对流-弥散模型不能充分描述田间运动过程,所以需要构建优先流模型。目前用

于优先流分析的模型,主要是针对示踪物迁移过程,综合考虑研究目的、基础过程的深度、模拟的灵敏性和准确性及野外条件的变动性等因素,模型定量研究主要依靠统计学方法(statistical approach)和现象学方法(phenomenological approach)两种途径。

统计方法是不考虑水分和溶质运动机理,建立在概率理论基础上的随机模型模拟的方法,即从田间或实验室测得化学物质的浓度,将溶质迁移时间结构参数化。这种方法不是精确预测,只得出一个范围。E. Bresler 及 W. A. Jury 等人都曾用这种方法建立模型^[108,109]。

现象方法就是构建一个确定性的数学模型,并用解析法或者数值法来求解。应用时,需根据研究目的及实际情况,选定相关参数及辅助方法进行分析^[71]。

以上述方法为基础,综合考虑模型本身特点、模拟方法及选定参数条件,构建优先流模型,一般来说,优先流模型分为机理模型、随机模型、确定性模型和传递模型 4 类^[110]。

构建模型时,需考虑运移路径连续性,可以通过在平衡孔隙介质连续模型公式及离散路径公式表示。连续模型依靠水文和离散平衡连续体基础上的明显流动路径进行构建,如果孔隙介质本质上不能渗透,如断裂岩石,它可能形成单一平衡连续体;如果孔隙介质完全可渗透(或者活跃反映),可能作为相互作用系列,活跃活动的连续体就可以形成诸如“双孔”模型^[111,112]。离散路径公式需要对几何路径清楚的表达,包括从一个简单非反应裂隙到相互作用路径的复杂网格结构^[113-117]。

3 优先流实验研究技术

虽然优先流是一种较为常见的土壤水分运动形式,但它在常规条件下不易发现,需要借助现代技术手段才能有效完成定性及量化分析。目前,用于优先流分析的现代技术主要有示踪技术、微张力测量及 X 线断层摄像术等,并需要时域反射仪及地下探测雷达等现代化的仪器设备支持,才能有效完成。

3.1 示踪技术

早在 1978 年, Bouma 和 Dekker 就利用示踪技术分析野外粘土的溶质迁移格局,他们开创了染料示踪分析之先河^[118]。随后, Andreini 和 Steenhuis、Booltink 和 Bouma、Ghodrati 和 Jury、Boll 等、Flury 等以及 Petersen 等人利用染料在实验室开展环绕流观测^[2,67,71,118-125], Flury 等利用染料在瑞士农田开展示踪物实验^[124], Kung 及 Ghodrati 和 Jury(1990)在砂性田间土壤做了染色试验^[24,122],均得出了许多有意义的结论。

染色示踪法结合图象分析仪可以直接查看分析判断优先流路径。现在用作示踪物分析的染料种类较多,较常用的染料有亮兰、亚甲基兰、罗丹明 B 及 Pyranine、fluorescein 等;应用范围广,如 Soilins 和 Radulovich 运用罗丹明染料研究了植物根孔中的优先水流和溶质运移, Natano 应用亚甲基蓝染色对大孔隙的形态进行了观测, Ghodrati 和 jury 利用一种阴离子含氮的染料 Azo Geranine 2G 研究了孔隙形态和水流通道, Flury 和 Forrer 等利用亮蓝对 14 种土壤中的大孔隙流进行观测, Gish 等同样利用亮蓝研究了免耕条件下水流运动过程及其影响因素^[122,124,126]。除染料外,还有 Cl^- 、 Br^- 、 NO_3^- 等非吸附性无机离子、大肠杆菌和 ^3H 、 ^{36}Cl 、 ^{15}N 等放射性同位素等可用作示踪分析。在有些仅需利用示踪物反映水分运移路径的试验,可用与周围土壤颜色明显区别的红墨水或黑墨汁来示踪^[127]。

张力入渗仪是示踪实验的有利补充,它具有有效增加可用信息数量,便于分析等优点。Casey 在不同张力作用下,将一种可溶示踪物添加到插有张力入渗仪的土样中,以确定非饱和导水率值、孔隙空间的可动部分和不可动部分以及可动-不可动区域之间的孔隙交错带的物质交换参数^[128]。1995 年, Brandi-Dohm 在渗流区域优先迁移溶质收集实验中,对张力入渗仪和吸力取样器的有效性开展对比判定分析,研究表明,张力入渗仪在渗流区域,可以得出一个非常令人满意的结果,吸力取样器会使大部分优先迁移溶质损失掉,不适用于渗流区域的优先流定量分析^[129]。

目前随着同步、实时、定位监测仪器的出现,染色示踪技术有了更进一步的应用,两者有效结合,得到土壤水分运动路径示意图,并最终形成水分运动图(hydrograph),可以有效看到优先流运动路径,并可进行优先流类型辨析^[130]。

虽然染色示踪技术可描述孔隙的大小及优先流分布情况,但不能给出优先流与其影响因子之间的关系,所以需要与其它方法结合使用。

3.2 微张力测量技术

农业化学物质造成地下水污染是一个长期存在的问题,由于土壤的复杂性导致渗流区域水和溶质的迁移规律很难探测清楚,而微张力测量技术就避免了此类缺点。微张力测量技术所用的典型仪器设备是时域反射仪(TDR)。TDR既可以测定水分,又可以测定土壤溶质含量,具有不破坏土壤结构、高效率、高精度、低劳力消耗及无扰动等优点,大量的室内实验^[131,132]及野外试验^[133,134]蓬勃开展,开始研究土壤溶质迁移中TDR的作用及以TDR测量的土壤含水量(θ)和体积传导率(σ_v)为基础的穿透曲线(BTC)度量等内容。如Wraith等利用TDR及非饱和稳定流柱流出物分析得到阻抗因子(λ)^[131],Vanclouser等、Ward等、Mallants等及Risler等利用TDR进行土壤穿透曲线BTC中选定参数分析^[134-136]。

虽然TDR早期应用很少涉及到优先流,但是许多研究表明TDR是获得优先流模型建立所需参数的重要工具。Germann和Di pietro是第一个将TDR的方法引入到优先流研究的人,他们以在土壤剖面不连续间隔处惯性流(动力交换率)计算(主要是含水量测定)为基础,通过实验分析确定优先流,研究表明TDR的快速反映特性非常有利于土壤优先流定量分析,可帮助确定土壤哪一部分有活跃的优先流现象,并可将来动力波模型参数化^[137]。

3.3 非侵入式影像获得技术

最早将影像技术用于土壤水分运动及优先流运动过程分析的是“水分视觉技术”,这也是最早用于大孔隙流分析的技术^[138,139]。现在,随着科学技术的发展,非侵入式影像获得技术被引入到优先流研究中。非侵入式影像获得技术是指对土壤进行几何形态分析,而不干扰其内部结构。其中最著名的就是计算机X线断层摄像术,即CT技术。

3.3.1 CT技术 CT技术是由Petrovic等、Hainsworth和Aylmore及Crestana等引入土壤科学研究领域的,到1992年,Natano等将分形理论引入土壤结构研究中,更为其技术发展和实践应用唤起生机。CT技术是一种非破坏性的测量技术,可用于对非扰动土柱进行扫描,确定不同深度大孔隙形状、数目以及连通性,并可得到扫描土壤断层图像和二维矩阵CTN图即断层小尺度容重变化图,具有直观、扫描快速方便、直接研究孔隙三维结构、非破坏性测量等优点,对优先流定量分析具有极大的潜力。Anderson, Peyton, 冯杰等都呈应用了此技术^[140,141]。CT技术除用于大孔隙测量外,还用于优先流路径中的染色示踪水图(hydrograph)制作^[130]。

虽然CT扫描仪已经广泛用于土壤优先流研究中,但是目前还没有针对土壤水分运移过程的专用CT扫描仪,导致扫描实验费用高,实验软件需要修正,实验过程繁琐且可能结果不准确,开发和研制小型的、造价低的专为土壤科学研究所用的扫描仪已是科研技术人员的攻克目标。

3.3.2 磁共振影像 磁共振影像(MRI)也被用于土壤结构研究及土柱优先流探测^[142],但是它波及辐射范围较小,同时顺磁物质的存在,干扰了像生成,但只要避免此现象发生,MRI就会较好地发挥作用^[143]。

3.3.3 扫描显微法 扫描显微法可以提供从极微小到原子尺度的物质表面影像,并可提供矿石表面影像,是一项具有潜力的技术。但是,由于它仅反映显微形态,而自然物质在其自身尺度上有异质性,样品准备就是一个难题。在巴西砖红壤土中,曾用扫描显微法进行粘土颗粒探测分析。

非侵入式影像获得技术常被看作是有效利用同步、实时、定位监测仪器而开展的方法技术。除上述介绍技术,还有如电子顺磁共振EPR、核磁共振NMR、紫外光谱仪^[144]等非侵入式影像获得技术,现在都已在土壤形态分析及优先流、优先路径探测等方面得到广泛应用。

3.4 地下雷达探测技术

地下雷达探测法是一种地球物理方法,现在已经成功地应用于发现和勾绘优先流现象。如Kung、Kung和Donohue和Harari都文献记载了地下雷达探测技术在优先流研究中的有效性,Kung和Donohue利用勾绘的亚表层图来判定饱和取样器的摆放位置^[145],Harari通过实验分析可知地下雷达探测法是判断由于夹层垂直流

间断性而造成的不连续湿润峰和优先流的有效方法^[146]。

上述技术有时需要同时使用,才可达到预期的优先流研究目的。如 Kranz 在 1998 年,从农田中取 1m³ 原状土块,利用 TDR、微张力测量法,并将 36 个负压计安装在每个土块基底的网格内,用阴离子示踪物探测水运移情况,综合 TDR 和微张力计自记数据以及负压计数据,快速而准确地分析土壤优先流动态过程^[147]。

综合上述方法可知,进行优先流问题研究时,要与土壤入渗、地表蒸发、土壤-植物-大气连续体中的水流问题紧密联系在一起,要求技术手段与定量模型模拟机理分析密切配合,需要花费大量的人力、物力和时间,开展野外和室内实验,实时监测。

4 优先流研究中存在的主要问题与发展趋势

4.1 存在的主要问题

4.1.1 优先流运动机理尚未明确 优先流是土壤水分运动的常见现象,开展优先流研究可以有效及充分地解释早期水文学研究所困扰的问题,但是优先流具有非平衡性,加大了水文过程研究的难度及深度,这也是长期以来没有得到充分重视的一个原因,同时优先流研究具有区域特点,其自身类型较多,所以到目前为止,对于优先流运动机理尚未明确。

4.1.2 缺乏系统的判定标准 对优先流进行理论研究是近 20a 的事情,时间较短,同时土壤异质性更增加了研究难度。目前对于优先流的判定,许多研究人员根据自己的研究内容及目的,提出各自的判断标准。如 Andreini 等指出,优先流现象与未扰动土壤相依存,大孔隙影响溶质运移速度,是产生空间变异的主要原因^[71]。ZQ OU 等从土壤出流量和穿透时间出发,以表面活性剂直链烷基苯磺酸盐(LAS)与土壤发生吸附解析平衡的时间为基础,认为土壤优先流导致溶质快速非平衡穿透,使 LAS 没有与土体发生充分的相互作用和应有的解析吸附过程,并以此作为判断土壤优先流的依据^[148]。Rahe 通过大肠杆菌在土壤中穿透,认为较高浓度的大肠杆菌穿透是优先流的穿透^[149]。Singh 认为,较早的初始穿透和出流中相对溶质浓度为 0.5 时的孔隙容积 $V/V_0 > 1$ 可以作为判断土壤优先流存在的依据^[150]。

4.1.3 需综合考虑尺度效应 优先流及优先迁移研究需在一定的时间范围内进行。因为超过这段时间后,优先流路径达到相对稳定阶段,优先流与水及化学物质施用时间段呈从属关系。同时由于土壤是一个异质性系统,优先流运动过程还需要考虑空间尺度,如介质中弥散度随着溶质运移距离增加而增大的多尺度现象就是溶质在裂隙岩体运移中存在明显尺度效应的体现;进行裂隙介质研究时,有时需要较长的空间距离及时间跨度的水流动运移计算。综合起来可知,优先流运动过程研究中,无论是通过原位观测对系统特征进行描述,还是系统的概念化和模拟,都会遇到时空尺度问题,为使研究精确且针对性强,在研究过程中,需要考虑尺度效应。

4.1.4 缺乏具有国际标准的现代化仪器设备 综合国内外有关优先流研究的文献资料可知,目前开展优先流研究主要是针对所研究区域,自己组装仪器设备,并根据进行优先流研究的目的,适当填装 TDR、负压计、X 射线同步扫描仪等辅助仪器。目前还没有已获得国际标准认证的适用于具有快速环绕特性的优先流研究需要的现代仪器设备。

4.2 研究发展趋势

4.2.1 注重优先流机理研究 优先流现象对于土壤水分运动规律、植物和农作物生长、农药和肥料施加及表层水和地下水污染等研究具有重要价值,同时土壤本身物理性质以及苔藓、枯落物和根系生长又是优先流产生的重要影响因素之一。因此,优先流的起源、影响因素、水分和溶质在优先流路径中的运移规律等仍是未来研究的重点。

4.2.2 建立优先流分类体系 优先流现象,造成地下水位上涨,引发生态灾难,造成经济损失,对于人类生态安全及保护敲响警钟。但是优先流形成机制较复杂、其表征现象较庞杂,给优先流研究带来困难,所以开展优先流研究应首先建立一个国际通用的优先流分类体系。

4.2.3 构建一个系统成形的优先流判定标准 对优先流进行研究,可以明确径流机理、进行产流预测、有效

开展地表水和地下水资源管理、防治地下侵蚀及山体崩塌、泥石流滑坡,但是到现在为止,有关优先流特性还存在不明之处,并且没有一个相对量化、系统成形的标准。为清楚明晰所要研究问题,应首先建立一个系统成形的判断标准。

4.2.4 建立一个综合的“优先流”过程模型 目前的优先流模型往往没有正确的过程描述以及没有充分分析异质性流域(如没有考虑到优先流、径流过程及生物地球化学“热点”),即使是分布式水文模型,也是 Darcy 或 Richard 方程及对流弥散方程进行混合流描述,而没有全面考虑到参数的确定性及过程的连续性等。建立一个综合考虑到水质水量因素的快速连续的“优先流”过程模型是今后发展的方向,在此类模型建立之前,首先应充分有效应用现有模型及度量技术,以提高水资源有效管理;同时建立模型过程中,注重模型的简单实用性,简化模型参数,使模型的预测及模拟更接近真实情况。

4.2.5 注重优先流结构研究 优先流的表征类型较多,且具有时空异质性,并且土壤本身在空间上就存在较大的变异性,从实验室或者野外实验获取的参数往往不具有普遍性,并且对于优先流研究的某些参数计算尚未形成统一标准,这就会影响到所建立模型的预测精度。所以需加强优先流的结构形态研究,在计算机的帮助下,使之可视化,一方面可直观验证模型的运行结果,另一方面也可以帮助完善已有的模型。

4.2.6 扩大优先流研究应用领域 优先流现象极大地影响土地荒漠化程度,并是山体崩塌、泥石流及滑坡等灾害现象的诱发因子之一。世界各国都针对本国国情及实际情况,建立了自己的水土流失、泥石流和荒漠化等方面预警系统。但相对来说,预警系统中考察指标及参数都是宏观测量分析得到的,而诸如优先流等需要微观技术及宏观表征则涉及较少。所以应将优先流研究融入灾害预警系统中,进一步将灾害消于萌芽。

优先流路径在某种程度上是农药、杀虫剂以及病原体活动的通道,所以开展优先流研究可以有效切断上述有害物质的传播途径,遏止蔓延,并可切断病原体的传染源。未来优先流领域的研究可以扩展到医药学、病理学等应用领域,学科之间有效协作,变不利为有利,为人类创造价值。

References:

- [1] Dekker LW, Ritsema C J, Wendroth O, *et al.* Moisture distributions and wetting rates of soils at experimental fields in the Netherlands, France, Sweden and Germany. *Journal of Hydrology*, 1999, 215, 4~22.
- [2] Flury M, Flühler H, Jury W A, Leuenberger J. Susceptibility of soils to preferential flow of water: A field study. *Water Resources Research*, 1994, 30 (7): 1945~1954.
- [3] Wang Z, Feyen J, Ritsema C J. Susceptibility and predictability of conditions for preferential flow. *Water Resources Research*, 1998, 34, 2169~2182.
- [4] Flühler H, Ursino N, Bundt M, *et al.* The Preferential Flow Syndrom—A Buzzword or a Scientific Problem. In *Preferential Flow Water: Movement and Chemical Transport in the Environment, Proc. 2nd Intl. Symp. (3~5 January 2001, Honolulu, Hawaii, USA)*, eds. David Bosch & Kevin King, St. Joseph, Michigan: ASAE. 701P0006.
- [5] Bei Y Z. Study on the relation of pipe flow and macropore. *Science of Hydraulic Engineering*, 1996, 227: 81~114.
- [6] Zhang H J, Wang Y J, Bei Y Z, *et al.* A study in pipe flow on the slope of granite region of the three-gorge of Yangtze River. *Journal of Beijing Forestry University*, 2000, 22(5): 53~57.
- [7] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils. *Water Resour. Res.*, 1982, 18(5): 1311~1325.
- [8] Bouma J. Soil morphology and preferential flow along macropores. *Agric. Water Manage.*, 1981, 3:235~250.
- [9] Helling C S, Gish T J. Physical and chemical processes affecting preferential flow. 1991, 77~86. In: T. J. Gish and A. Shirmohammadi eds. *Preferential flow. Proc. Natl. Symp.*, 16~17 Dec. 1991, Chicago, IL. Am. Soc. Agric. Engr., St. Joseph, MI.
- [10] Beven K, Germann P. Water flow in soil macropores 2. A combined flow model. *J. Soil Sci.*, 1981, 32:15~29.
- [11] Bouma J, Belmans C F M, Dekker L W. Water infiltration and redistribution in a silt loam subsoil with vertical worm channels. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1982, 46, 917~921.
- [12] Hornberger G M, Germann P F, Beven K J. Throughflow and solute transport in an isolated sloping soil block in a forested catchment. *Journal of Hydrology*, 1991, 124, (1-2): 81~99.
- [13] Lawes J B, Gilbert J H, Warington R. On the amount and composition of the rain and drainage water collected at Rothamsted. Williams, Clowes and Sons, Lt., London, 1882.
- [14] Elsenbeer H, Lack A. Hydrometric and hydrochemical evidence for fast flowpaths at La Cuenca, western Amazonia. *J. Hydrol.*, 1996, 180, 237~250.

- [15] Elsenbeer H, Lack A, Cassel K. Chemical fingerprints of hydrological compartments and flow paths at La Cuenca, western Amazonia. *Water Resour. Res.*, 1995, 31: 3051 ~ 3058.
- [16] Jones J A A. Soil piping and stream channel initiation. *Water Resour. Res.*, 1971, 7: 602 ~ 610.
- [17] Walsh R PD, Howells K A. Soil pipes and their role in runoff generation and chemical denudation in humid tropical catchment in Dominica. *Earth Surf. Proc. Landf.*, 1988, 13, 9 ~ 17.
- [18] Woo M, diCenzo P. Pipe flow in James Bay coastal wetlands. *Can. J. Earth Sci.*, 1988, 25, 625 ~ 629.
- [19] Hill D E, Parlange J Y. Wetting front instability in layered soils. *Soil Sci. Am. Proc.*, 1972, 36: 697 ~ 702.
- [20] Mabuchi T. Infiltration and ensuing percolation in columns of laggard glass particles packed in laboratory. *Trans Agric. Eng. Soc. Jpn.* 1961, 13 ~ 19.
- [21] Miller D E, Gardner W H. Water infiltration into stratified soil. *Soil Sci. Am. Proc.*, 1962, 26: 115 ~ 119.
- [22] Ritsema C J, Dekker L W, Nieber J L, Steenhuis T S. Modeling and field evidence of finger formation and finger recurrence in a water repellent sandy soil. *Water Resour. Res.*, 1998, 34(4): 555 ~ 567.
- [23] Kung K J S. Preferential flow in a sandy vadose zone soil 1. Field observation. *Geoderma*, 1990, 46: 51 ~ 58.
- [24] Kung K J S. Preferential flow in a sandy vadose zone soil 2. Mechanism and implications. *Geoderma*, 1990, 46: 59 ~ 71.
- [25] Bauters T W J, DiCarlo D A, Steenhuis T S, Parlange J Y. Preferential flow in water-repellent sands. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1998, 62: 1185 ~ 1190.
- [26] De Rooij G H, De Vries P. Solute leaching in a sandy soil with a water-repellent surface layer: A simulation. *Geoderma*, 1996, 70(2-4): 253 ~ 263.
- [27] De Rooij G H. A three-region analytical model of solute leaching in a soil with a water repellent top layer. *Water Resour. Res.*, 1995, 31, 2701 ~ 2707.
- [28] Dekker L W, Ritsema C J. Variation in water content and wetting patterns in Dutch water repellent peaty clay and clayey peat soils. *Catena*, 1996a, 28: 89 ~ 105.
- [29] Dekker L W, Ritsema C J. Preferential flow paths in a water repellent clay soil with grass cover. *Water Resour. Res.*, 1996b, 32: 1239 ~ 1249.
- [30] Dekker L W, Ritsema C J. Fingering flow: the creator of sand columns in dune and beach sands. *Earth Surf. Process and Landforms*, 1994, 19: 153 ~ 164.
- [31] Glass R J, Steenhuis T S, Parlange J Y. Mechanism for finger persistence in homogeneous unsaturated porous media: theory and verification. *Soil Sci.*, 1989, 148: 60 ~ 70.
- [32] Hendrickx J M H, Dekker L W, Boersma O H. Unstable wetting fronts in water repellent field soils. *J. Environ. Qual.*, 1993, 22, 109 ~ 118.
- [33] Jamison V C. The penetration of irrigation and rain water into sandy soils of Central Florida. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1945, 10.
- [34] Flint A L, Havesi J A, Flint L E. Conceptual and numerical model of infiltration for the Yucca Mountain Area, Nevada, U.S. Geol. Surv. *Water Resour. Invest. Rep.*, 1997.
- [35] Ritsema C J, Dekker L W. Preferential flow mechanism in a water repellent sandy soil. *Water Resour. Res.*, 1993, 29 (7): 2183 ~ 2193.
- [36] Ritsema C J, Nieber J L, Dekker L W, Steenhuis T S. Stable or unstable wetting fronts in water repellent soils-effect of antecedent soil moisture content. *Soil Tillage Res.*, 1998, 47: 111 ~ 123.
- [37] Van Dam J C, Hendrickx J M H, van Ommen H C, *et al.* Water and solute movement in a coarse-textured water-repellent field soil. *J. Hydrol.*, 1990, 120: 359 ~ 379.
- [38] Roth K. Steady state flow in an unsaturated, two-dimensional, macroscopically homogeneous. Millersimilar medium. *Water Resour. Res.*, 1995, 31: 2127 ~ 2140.
- [39] Tani M. Runoff generation processes estimated from hydrological observation on a steep forested hillslope with a thin soil layer. *J. Hydrol.*, 1997, 200: 84 ~ 109.
- [40] Freeze R A, Banner J. The mechanisms of natural groundwater recharge and discharge, 2. Large column experiments and field measurements. *Water Resour. Res.*, 1970, 6: 138 ~ 155.
- [41] Lissey A. Depression-focused transient groundwater flow patterns in Manitoba. *Geological Association of Canada Special Paper*, 1971, 9: 333 ~ 341.
- [42] Nieber J L, Misra D. Modeling flow and transport in heterogeneous, dual-porosity drained soils. In: *Journal of Irrigation and Drainage Systems*, 1995, 9: 217 ~ 237.
- [43] Nieber J L, Van Den Eertwegh G A P H, Feddes R A. Modeling Multidimensional Water Flow and Solute Transport in Dual-Porosity Soils. In: *Drainage in the 21st Century: Food Production and the Environment. Proceedings of the 7th Annual Drainage Symposium. American Society of Agricultural Engineers.* 1998, 227 ~ 235.
- [44] Tosomeen C A S. Modeling the effects of depression focusing on groundwater recharge. M. S. thesis. Department of Biosystems and Agricultural Engineering. University of Minnesota, 1991.
- [45] Flury M. Experimental evidence of transport of pesticides through field soils——A review. *J. Environ. Qual.*, 1996, 25: 25 ~ 45.
- [46] Beven K. Modeling preferential flow: an uncertain future?. In: Gish T J, Shirmohannadi, A. Eds. *Preferential Flow*, American Society of Agricultural Engineers, St Joseph, MI, 1991. 1 ~ 11.
- [47] Jarvis N. Modeling the impact of preferential flow on non-point source pollution. In Selim and Ma eds. *Physical Non-equilibrium in Soils*. Ann Arbor Press,

- 1998, 195 ~ 221.
- [48] Skopp J. Comment on 'Micro- meso- and macroporosity of soil'. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1981, 45, 1246.
- [49] Quisenberry VL, Phillips R E, Zeleznik J M. Spatial distribution of water and chloride macropore flow in a well-structured soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1994, 58:1294 ~ 1300.
- [50] Wildenschild D, Jensen K H, Villholth K, and Illangasekare TH. A laboratory analysis of the effect of macropores on solute transport. *Ground Water*, 1994, 32: 381 ~ 389.
- [51] de Rooij G H, and Stagnitti F. Spatial variability of solute leaching: Experimental validation of a quantitative parameterization. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2000, 64: 499 ~ 504.
- [52] Birkholzer J, Tsang C F. Solute channeling in unsaturated heterogeneous porous media. *Water Resources Research*, 1997, 33(10): 2221-2238.
- [53] Fuchs D J, Linden D R. An earthworm population and activity survey of selected agronomic areas in Minnesota. Unpublished manuscript, 1988.
- [54] Dickey J B. Earthworm numbers, distribution, and sampling under conservation tillage. Ph. D. Thesis, Purdue University, 1990.
- [55] Lee K E. Earthworms: Their ecology and relationships with soils and land use. Academic press, Inc., Orlando, FL, 1985. 411.
- [56] Edwards W M, Norton L D, Redmond C E. Characterizing macropores that affect infiltration into non-tilled soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1988, 52: 483 ~ 487.
- [57] Munyankusi E, Gupta S C, Moncrief J F, Berry E C. Earthworm macropores and preferential transport in a long-term manure applied Typic Hapludalf. *J. Environ. Qual.* 1994, 23: 773 ~ 784.
- [58] Gish T J, Jury W A. Estimating solute travel times through a crop root zone. *Soil Science*, 1982, 133(2):124 ~ 130.
- [59] Gish T J, Gimenez D, Rawls W J. Impact of roots on groundwater quality. *Plant and Soil*, 1998, 200: 47 ~ 54.
- [60] Ellsworth T R, Jury W A, Ernst F R, *et al.* A three-dimensional field study of solute transport through unsaturated, layered, porous media 1. Methodology, mass recovery and mean transport. *Water Resour. Res.*, 1991, 27: 951 ~ 967.
- [61] Gaiser R N. Root channels and roots in forest soils. *Soil Science Society Proceedings*, 1952, 16(1): 62 ~ 65.
- [62] Wang D L, Yin Ch Q. Functions of root channels in the soil system. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20, (5): 869 ~ 874.
- [63] Ou Z Q, Jia L Q, Jin H Y, *et al.* Macropores and preferential flow and their effects on pollutant migration in soils. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(3): 341 ~ 347.
- [64] Baker R S, Hillel D. Laboratory tests of a theory of fingering during infiltration into layered soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1990, 54: 20 ~ 30.
- [65] Edwards W M, Shipitalo M J, Owens L B, Dick W A. Factors affecting preferential flow of water and atrazine through earthworm burrows under continuous no-till corn. *J. Environ. Qual.*, 1993, 22: 453 ~ 457.
- [66] Essington M E, Tyler D D, Wilson G V. Fluometuron behavior in long-term tillage plots. *Soil Sci.*, 1995, 160(6): 405 ~ 414.
- [67] Bouma J, Dekker LW. A case study on infiltration into dry clay soil. I Morphological observations. *Geoderma*, 1978, 20: 27 ~ 40.
- [68] Edwards W M, Shipitalo M J, Dick W A, Owens L B. Rainfall intensity affects transport of water and chemicals through macropores in no-till soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1992, 56:52 ~ 58.
- [69] Gang-Ling Ren, Izadi B, King B, Dowding E. Preferential transport of bromide in undisturbed cores under different irrigation methods. *Soil Sci.*, 1996, 161(4): 214 ~ 225.
- [70] Gish T J, Coffman C B. Solute transport under no-till field corn. *Trans. ASAE.*, 1987, 30(5):1358 ~ 1363.
- [71] Andreini M S, Steenhuis T S. Preferential flow paths under conventional and conservation tillage. *Geoderma*, 1990, 46:85 ~ 102.
- [72] Shipitalo M J, Edwards W M, Dick W A, Owens L B. Initial storm effects on macropore transport of surface-applied chemicals in no-till soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1990, 54:1530 ~ 1536.
- [73] Moon F C. *Chaotic Vibrations, An Introduction for Applied Scientists and Engineers.* New York: Wiley, 1987.
- [74] Schuster H C. *Deterministic chaos: an introduction.* Weinheim, Federal Republic of Germany, 1988.
- [75] Tsonev A A. *Chaos: From Theory to Applications.* Plenum, 1992.
- [76] Shaw R. *The Dripping Faucet as a Model Chaotic System.* Aerial Press, Santa Cruz, CA, 1984.
- [77] Cheng Z, Redner S, Meakin P, Family F. Avalanche dynamics in a deposition model with 'sliding'. *Phys. Rev.*, 1989, 40(10): 5922 ~ 5935.
- [78] Pasternak G B. Assessing claims for chaos in hydrologic records. *Hydrology Days*, 1996, 395 ~ 406.
- [79] Pelletier J D. Power spectral analyses of climatological and hydrological time series: identification of the Hurst phenomenon and application to drought hazard assessment. *Hydrology Days*, 1996, 407 ~ 422.
- [80] Nicolis G, Prigogine I. *Exploring Complexity: An Introduction.* W.H. Freeman, New York, NY., 1989.
- [81] Kapitaniak T. *Chaos in Systems With Noise.* World Scientific, Teanick, NJ, 1988.
- [82] Sposito G, Weeks S W. Dynamical systems theory and fluid flow in subsurface zones. *Proc. of 1997 Fall AGU Meeting, San Francisco*, p. F 247, 1997.
- [83] Weeks S W, Sposito G. Mixing and stretching efficiency in steady and unsteady subsurface fluid flows, *Proc. of 1997 Fall AGU Meeting, San Francisco*,

- p. F247, 1997.
- [84] Faybishenko B. Theory and numerical evaluation of the parameters of the chaotic behavior of flow in unsaturated soils and rocks, Abstract presented at the Chapman Conference on Fractal Scaling, Nonlinear Dynamics and Chaos in Hydrologic Systems, 1998.
- [85] Prazak J, Sir M, Kubik F, Tywoniak J, Zarcone C. Oscillation phenomena in gravity-driven drainage in coarse porous media. *Water Resources Res.*, 1992, 28(7): 849 ~ 1855.
- [86] Thunvik R, Braester C. Gas migration in discrete fracture networks. *Water Resources Res.*, 1990, 26(10): 2425 ~ 2434.
- [87] Podgomey R, Wood T R, Stoops T. Outcrop infiltration experiments, Data Summary Report, 1997.
- [88] Geller J T, Borglin S, Faybishenko B. Experimental Study and Evaluation of Dripping Water in Fracture Models, Abstract presented at the Chapman Conference on Fractal Scaling, Nonlinear Dynamics and Chaos in Hydrologic Systems, 1998.
- [89] Mandelbrot B B. *The Fractal Geometry of Nature*. W.H. Freeman, New York, NY, 1983.
- [90] Sahimi M. Flow, dispersion, and displacement processes in porous media and fractured rocks: from continuum models to fractals, percolation, cellular automata and simulated annealing. *Reviews of Modern Physics*, 1993, 65(4): 1393 ~ 1534.
- [91] Heiba A A, Sahimi M, Scriven L E, Davis H T. Percolation theory of two-phase relative permeability, Paper SPE-11015, presented at SPE 57th Annual Fall Technical Conference and Exhibition, New Orleans, LA, 1982.
- [92] Parlar M, Yortsos Y C. Percolation theory of steamwater relative permeability, Paper SPE-16969, presented at SPE 62nd Annual Fall Technical Conference and Exhibition, Dallas, TX, 1987.
- [93] Blunt M, King M J, Scher H. Simulation and theory of two-phase flow in porous media. *Phys. Rev. A.*, 1992, 46(12): 7680 ~ 7699.
- [94] Rossen W R, Kumar A T A. Single- and two-phase flow in natural fractures, Paper SPE-24195, Presented at the Society of Petroleum Engineers 67th Annual Technical Conference and Exhibition, Washington, D.C., 1992.
- [95] Lenormand R, Zarcone C. Invasion percolation in an etched network: measurement of a fractal dimension. *Phys. Rev. Lett.*, 1985, 54(20): 2226 ~ 2229.
- [96] Lenormand R, Zarcone C. Capillary fingering: percolation and fractal dimension. *Transport in Porous Media*, 1989, 4, 599 ~ 612.
- [97] Glass R J, Yarrington L. Simulation of gravity fingering in porous media using a modified invasion percolation model. *Geoderma*, 1996, 70, 231 ~ 252.
- [98] Wolfram S. Cellular automaton fluids 1. Basic theory. *J. Stat. Phys.*, 1986, 45 (3/4): 471 ~ 526.
- [99] Paterson L. Diffusion-limited aggregation and two-fluid displacements in porous media. *Phys. Rev. Lett.*, 1984, 52(18): 1621 ~ 1624.
- [100] Klafter J, Shlesinger M F, Zumofen G. Beyond Brownian motion. *Physics Today*, 1996, 49(2): 33 ~ 39.
- [101] Raats P A C. Unstable wetting fronts in uniform and nonuniform soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1973, 37, 681 ~ 685.
- [102] Philip J R. Stability analysis of infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1975a, 39, 1042 ~ 1049.
- [103] Philip J R. The growth of disturbances in unstable infiltration flows. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1975b, 39, 1049 ~ 1053.
- [104] Parlange J Y, Hill D E. Theoretical analysis of wetting front instability in soils. *Soil Sci.*, 1976, 122: 236 ~ 239.
- [105] Germann P. Kinematic wave approach to infiltration and drainage into and from soil macropores. *Transactions of the Am. Soc. Agric. Engineers*, 1985, 28(3): 745 ~ 749.
- [106] Germann P, Beven K. Kinematic wave approximation to infiltration into soils with sorbing macropores. *Water Resour. Res.*, 1985, 21(7): 990 ~ 996.
- [107] Glass R J, Cann S, King J, Baily N, *et al.* Wetting front instability in unsaturated porous media: a three-dimensional study in initially dry sand. *Transp. Porous Media*, 1990, 5, 247 ~ 268.
- [108] Bresler E. Simultaneous transport of solutes and water under transient unsaturated flow conditions. *Water Resour. Res.*, 1973, 9: 975 ~ 986.
- [109] Jury W A. Simulation of solute transport using a transfer function model. *Water Resources Research*, 1982, 18: 363 ~ 368.
- [110] Ni Y W. A study of preferential flow and solute preferential migration in soils. Ph. D. Thesis, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, 2000.
- [111] Berkowitz B, Bear J, Braester C. Continuum models for contaminant transport in fractured porous formations. *Water Resour. Res.*, 1988, 24(8): 1225 ~ 1236.
- [112] Huyakorn P S, Nilkuha K. Solution of transient transport equation using an upstream finite element scheme. *Applied Mathematical Modelling*, 1979, 3 (1): 7 ~ 17.
- [113] Cacas M C, Ledoux E, de Marsily G, *et al.* Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: calibration and validation 1. The flow model. *Water Resour. Res.*, 1990, 26, (3): 479 ~ 489.
- [114] Cacas M C, Ledoux E, de Marsily G, *et al.* Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: calibration and validation 2. The transport model. *Water Resour. Res.*, 1990, 26(3): 491 ~ 500.
- [115] Ewing R P, Jaynes D B. Issues in single-fracture transport modeling: scales, algorithms, and grid types. *Water Resources Research*, 1995, 31(2): 303 ~ 312.

- [116] Rowe R K, Booker J R. Contaminant migration through fractured till into an underlying aquifer. *Can Geotech J.*, 1990, 27 (4): 484 ~ 495.
- [117] Moreno L, Tsang Y W, Tsang C F, *et al.* Flow and tracer transport in a single fracture: a stochastic model and its relation to some field observations. *Water Resour Res.*, 1988, 24(12): 2033 ~ 2048.
- [118] Bouma J, Dekker L W, Wösten J H M. A case study on infiltration into dry clay soil II. physical measurements. *Geoderma*, 1978, 20(1): 41 ~ 51.
- [119] Gish T J, Isensee A R, Nash R G, Helling C S. Impact of pesticides on shallow groundwater quality. *Trans. Am. Soc. Ag. Eng.*, 1991, 34:1745 ~ 1753.
- [120] Gish T J, Shirmohammadi A. Preferential Flow, Proc. of the National Symposium, Chicago Ill., Dec. 16-17, 1991, American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI.
- [121] Booltink H W G, Bouma J. Physical and morphological characterization of bypass flow in a well-structured clay soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1991, 55: 1249 ~ 1254.
- [122] Ghodrati M, Jury W A. A field study using dyes to characterize preferential flow of water. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1990, 54 (6): 1558 ~ 1563.
- [123] Boll J, Steenhuis T S, Selker J S. Fiberglass wicks for sampling of water and solutes in the vadose zone. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1992, 56: 701 ~ 707.
- [124] Flury M, Fluhler H. Brilliant Blue FCF as a dye tracer for solute transport studies—A toxicological overview. *J. Environ. Qual.*, 1994, 23: 1108 ~ 1112.
- [125] Petersen C T, Hansen S, Jensen H E. Tillage-induced periodicity of preferential flow in the root zone. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1997, 61: 586 ~ 594.
- [126] Forrer I. Solute Transport in a Unsaturated Field Soil: Visualization and Quantification of Flow Patterns Using Image Analysis. ETHZ, Zürich, Switzerland. 1997, 128.
- [127] Niu J Zh. Study on preferential flow of dark coniferous forest ecosystem in the upper reach area of Yangtze River. Ph. D. Thesis, Beijing Forestry University. 2003.
- [128] Casey F X M, Logsdon S D, Horton R, Jaynes D B. Measurement of field soil hydraulic and solute transport parameters. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1998, 62: 1172 ~ 1177.
- [129] Brandi-Dohrn F M, Leibundgut C, Dick R P, Selker J S. Collecting tracers in the vadose zone. *Tracer Technologies for Hydrological Systems, IAHS*, 1995, 229:173 ~ 181.
- [130] Di Pietro. Predicting preferential water flow in soils by traveling-dispersive waves. *Journal of Hydrology*, 2003.
- [131] Wraith J M, Bhabani S D. Monitoring soil water and ionic solute distributions using time-domain reflectometry. *Soil and Tillage Research*, 1998, 47 (1-2): 145 ~ 150.
- [132] Ward A D, Hatfield J L, Lamb J A, *et al.* The Management Systems Evaluation Areas program: Tillage and water quality research. *Soil & Tillage Res.* 1994, 30: 49 ~ 74.
- [133] Kachanoski RG, Pringle E, Ward A. Field measurements of solute travel times using time domain reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1992, 56: 47 ~ 52.
- [134] Vanclooster M, Mallants D, Diels J, Feyen J. Determining local-scale solute transport parameters using time domain reflectometry (TDR). *Journal of Hydrology*, 1993, 148(1-4): 93 ~ 107.
- [135] Mallants D, Vanclooster M, Meddahi M, Feyen J. Estimating solute transport in undisturbed soil columns using time-domain reflectometry. *Journal of Contaminant Hydrology*, 1994, 17(2): 91 ~ 109.
- [136] Risler P D, Wraith J M, Gaber H M. Solute transport under transient flow conditions estimated using time domain reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1996, 60, 1297 ~ 1305.
- [137] Germann P, Di Pietro L. Scales and dimensions of momentum dissipation during preferential flow in soils. *Water Resour. Res.*, 1999, 35(5): 1443 ~ 1454.
- [138] Murphy B W, Koen T B, Jones B A, Huxedurp L M. Temporal variation of hydraulic properties for some soils with fragile structure. *Aust. J. Soil Res.*, 1993. 31: 179 ~ 197.
- [139] Ehlers W. Observation on earthworm channels and infiltration on tilled and untilled loess soil. *Soil Sci.*, 1993, 119 (3): 242 ~ 249.
- [140] Anderson S H, Peyton R L, Gantzer C J. Evaluation of constructed and natural soil macro-pores using X-ray computed tomography. *Geoderma*, 1990, 46, 13 ~ 29.
- [141] Feng J, Hao Zh Ch. Distribution of soil macropores characterized by CT. *Advances in Water Science*, 2002, 13(5): 611 ~ 617
- [142] Posadas D A N, Tannús A, 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.
- [143] Silvio Crestana, Carlos Manoel Pedro Vaz. Non-invasive instrumentation opportunities for characterizing soil porous systems. *Soil and Tillage Research*, 1998, 47(1-2): 19 ~ 26.
- [144] Ladislau Martin-Neto, Ramón Rosell, Garrison Sposito. Correlation of spectroscopic indicators of humification with mean annual rainfall along a temperate

- grassland climosequence. *Geoderma*, 1998, 81(3-4): 305 ~ 311.
- [145] Kung K J S, Donohue S V. Improved solute-sampling protocol in a sandy vadose zone using ground-penetrating radar. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1991, 55: 1543 ~ 1545.
- [146] Harari Z. Ground-penetrating radar (GPR) for imaging stratigraphic features and groundwater in sand dunes. *J. Appl. Geophys.*, 1996, 36:43 ~ 52.
- [147] Kranz W L, Kanwar R S, Pederson C E. Collection and monitoring of one-meter cubic soil monoliths for leaching studies. *Trans. ASAE*, 1998, 41:333 ~ 344.
- [148] ZQ OU, LQ Jia, Yediler A, *et al.* Formation of soil macropore and preferential migration of linear allylbenzene sulfonate(LAS) in soil. *Chemosphere*, 1999, 38(9): 1985 ~ 1996.
- [149] Rahe T H, Hagedorn C, McCoy E L, Kling G F. Transport in aggregated porous media: theoretical and experimental evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1978, 44: 1139 ~ 1146.
- [150] Singh P, Kanwar R S. Preferential solute transport through macropore in large undisturbed saturated soil column. *J. Environ. Qual.*, 1991, 20: 295 ~ 300.

参考文献:

- [6] 张洪江, 王玉杰, 北原曜, 等. 长江三峡花岗岩坡面管流研究. *北京林业大学学报*, 2000, 22(5): 53 ~ 57.
- [62] 王大力, 尹澄清. 植物根孔在土壤生态系统中的功能. *生态学报*, 2000, 20, (5): 869 ~ 874.
- [63] 区自清, 贾良清, 金海燕, 等. 大孔隙和优先水流及其对污染物在土壤中迁移行为的影响. *土壤学报*, 1999, 36(3):341 ~ 347.
- [110] 倪余文. 土壤优先水流及溶质优先迁移的研究. 博士论文, 2000.
- [127] 牛健植. 长江上游暗针叶林生态系统优先流机理研究. 博士论文, 2003.
- [141] 冯杰, 郝振纯. CT扫描确定土壤大孔隙分布. *水科学进展*, 2002, 13(5): 611 ~ 617.