

土壤优势流研究方法综述

彭海英, 李小雁, 崔步礼, 张思毅

(北京师范大学资源学院, 北京 100875)

摘要:由土壤异质性引起的优势流(preferential flow, PF)是一种常见的土壤水分运动形式,由于其较少与土壤基质发生物理、化学和生物反应就快速进入深层土壤甚至地下水,因而优势流的研究对环境和人类健康均具有重要意义。由于优势流的过程复杂,类型较多,观测难度较大,因而直到近几十年来才得到重视。本文介绍了优势流的定义、特征和表现形式,对目前常用的优势流研究的技术和方法进行了比较、分析和评价。其中,剖面挖掘、拍照观察法和土壤染色法等简单易行、持续时间较短、安装维护费用低,但研究范围小,代表性不强;X射线扫描和显微成像技术等能定量描述土柱或土壤截面的大孔隙,能达到 $10^{-6} \sim 10^{-1}$ m的微观研究尺度,但是安装维护费用较高且要求操作人员具有专门的技术背景。今后需进一步发展野外和大尺度上的持续性和非破坏性的观测和研究方法,同时应将通过不同途径和初始条件下获取的数据进行比较研究以挖掘更多的信息,进而制定标准化的优势流研究方法以推动优势流研究。

关键词:土壤大孔隙;土壤异质性;研究技术与方法;水分和溶质的运移

中图分类号:S152.7+2

文献标识码:A

引言

土壤是覆盖于陆地表面的疏松物质,是绿色植物生长繁殖的自然基地。在土壤质地相同的区域内,土壤物理、化学和生物特性在同一时刻、不同空间位置上表现出差异性即为土壤异质性。如在森林或草地地区,由于植物根系的伸展与腐烂,土壤中动物的活动,土壤的冻融交替、干湿变化和化学风化溶解以及耕作等原因,会在土壤层中形成一系列大孔隙^[1],这些大孔隙相互连通就形成了大孔隙网络,水分及其携带的溶质在这样的大孔隙中优先快速流走,而较少与周围土壤基质发生物理、化学和生物的相互作用的过程就是优势流^[2],也说成是优先流^[3]。同一时刻,自然界土壤的空间异质性普遍存在,因而优势流也是普遍存在的现象而并非特例。

优势流在由地表向深层土壤的运移过程中,水和溶质主要是沿着土壤包气带中相互连通的大孔隙流动,以水分在入流边界上接受补给,水体快速流过上层土壤而很少与周围土壤基质发生相互作用为主要特征^[4],且水分在渗流过程中主要受重力影响而

不受土壤毛管力控制。在以天然降水为主要补给水源的地区,遇到大雨、暴雨等雨强较大的降雨事件时,在有大孔隙的土壤层中,即使土壤尚未达到饱和状态,大孔隙也能快速地充水同时快速排水,优势流能在几小时或几天之内引起基岩面以上水位线的快速升降^[5]。因而,优势流过程能使水和溶质通过大孔隙快速到达深层土壤,将其贮存在土壤库中,为动植物等组成的生态系统供给水分;另一方面由于水分和土壤基质的接触面积小、时间短,不(或较少)与土壤发生物理、化学成分的交换和吸附,其携带的污染物来不及降解就到达深层土壤或地下含水层,对生物生长、人类健康和自然环境都会产生较大的影响,因此优势流近来越来越受到人们的关注^[6-7]。

1 优势流的表现形式

从成因来讲,优势流有4种主要表现形式:裂隙流(crack flow, CF)、洞穴流(burrow flow, BF)、指流(finger flow, FF)和侧向流(lateral flow, LF)。

裂隙流是指优势流沿着不饱和土壤中相互连通的裂隙流动,这些裂隙主要出现在有冻融交替或干

收稿日期:2011-03-10;改回日期:2011-04-25

基金项目:国家自然科学基金(40871025)资助

作者简介:彭海英(1983-),女,土家族,湖南张家界人,在读博士生,主要从事土壤水文学相关研究。E-mail: pengfish539@126.com

湿交替的粘土层中^[8]。裂隙的存在破坏了土体的完整性,因而在尺度不等、分布不均的裂隙之间具有强烈的不均匀性和各向异性,其形成的裂隙系统中存在不同程度的水力联系,在接受大气降水、人工灌溉等形式的水分补给时,水分在由尺度不等的裂隙构成的多级孔隙中流动时不再遵循达西定律,且水分的垂向渗透和水平渗透系数的差别可以达到 1~2 个数量级^[9]。在实际研究和观测方面,裂隙系统本身的复杂性使得对裂隙流的研究难度也较大。马佳等通过双环试验证实,在有裂隙的裂土中,双环试验的初始入渗率比达到饱和时的稳定入渗率要高好几倍甚至 1~2 个数量级^[10]。Etheridge 提出了裂隙流的渗流模型^[11],毛德强采用非稳定流方法的抽水试验提出了裂隙含水层中抽水井不均匀出水条件下的井流公式^[12],宫辉力用数值仿真实验探讨了岩溶—裂隙含水层中地下水最优开采量的方法^[13]。但是在有地表供水条件下,土壤包气带中形成的裂隙流过程和水流去向的研究尚不多见。

洞穴流主要出现在由生物活动形成的相互连通的虫洞、孔道中,遇到较大强度的降雨事件时,能形成优势流^[14-15]。如植物根系的老化和死亡能在地下形成相互连通的大孔隙,在暴雨期间大量水分在土壤中形成快速流动的水流,能迅速导走降落到地表的雨水。Branky 等在洪泛平原将桉树对洪水的渗透率同其附近的草地进行了比较,发现桉树根系周围土壤层的渗透率比草地高 2~17 倍^[16],Aubertin 测得在森林土壤中水分可通过大孔隙迁移至 10 m 或 10 m 以下的深度。由于水分的这种通过大孔隙“优先”向下的运动,水分最初并不使大孔隙周围土壤变湿,而是在一段时间以后(几小时或几天),由大孔隙中水分的横向运动才使得其周围土壤变得湿润,这一现象也由 Schaik 等人在西班牙半干旱区得到了证实^[17]。李利在黄河口潮滩地区的试验研究表明,当由潮汐引起的水流入渗进入受生物洞穴影响的土体时,由于细小孔隙来不及吸收全部水量,一部分便沿着渗透性良好的生物洞穴形成的通道优先快速入渗形成了优势流^[18]。Morales 还探讨了优势流和微生物的关系,认为微生物的细胞外聚合物对土壤导水率和生物结皮有潜在影响,生物群落(细菌、真菌、根和蠕虫)的分泌物对土壤持水性也有较大影响^[19]。

指流主要发生在水分流过性质相异的 2 层土壤的交界面时,如沙壤土地区细土覆盖在粗土层之上,

水分在自上而下的运移过程中,上下层土壤在交界面处并不是均匀下渗,而是绕过大部分下层土壤基质呈“指状”或“舌状”快速入渗的现象^[20]。通常情况下,上层细质土的饱和导水率小于下层粗质土的饱和导水率,为下层粗质土创造了一个非充分入渗的条件,因而上层细质土的质地与厚度控制了进入沙层的水分入渗通量。水分在自上而下的入渗过程中,尽管其受到的吸力值是连续的,但上、下土层交界面处的土壤含水量是不相等的,下层土壤含水量小于上层土壤含水量,在水势梯度力的作用下,入渗水流优先在部分孔隙中流动,出现湿润峰的不均匀性与不稳定性,最终发生指状水流。张建丰通过对上层为西安黄土下层为沙子的土样进行指流试验,分析得出土壤颗粒分布不均匀是指流产生的主要原因之一,当进入沙层的水分稳渗率小于沙层饱和导水率的 2% 时,即可发生明显的指流现象^[21]。

侧向流发生在水分下渗过程中遇到阻水性较强的土层、岩石^[22]或块体较大的根系^[23]时,水分沿着块体的一侧下渗,侧向流可使溶质快速地分布于土体的各个层次。在森林中,植物的浅层大根系在暴雨事件中能形成侧向优势流,迅速导走降落到地表的雨水。Kim 在加拿大不列颠哥伦比亚省西南部海岸山脉格雷斯流域林地中的试验表明,在其所挖取的土壤剖面中,暴雨事件会形成侧向优势流^[24]。

2 优势流的研究方法

虽然优势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,目前对优势流的研究大多还处在定性描述的阶段,也有部分研究借助现代科技手段来探讨土壤结构如何引发优势流以及优势流的运移过程和路径。用于优势流分析的现代技术主要有染色示踪技术、土壤导水率测量以及 X 射线 CT 扫描技术等,结合时域反射仪以及探地雷达等现代化的仪器设备,目前对优势流的认识和了解也在不断加深。

2.1 研究尺度

优势流在时间和空间上的变异性非常大^[25-27],如裂隙流和洞穴流由于存在与地表直接连通的大孔隙,因而常在较短时间内发生,研究此类优势流宜在较短时间间隔内重复取样(取样频率为几分钟或几秒钟 1 次样本)。相比较而言,研究携带污染物的水团在地下水中的运移时,其取样间隔时间可以为每天 1 次或每周 1 次。取样频率也取决于研究空间

尺度的大小,如在较微观的孔隙尺度上(如用扫描技术研究指流现象)就需要比较小的时间间隔(几分之一秒),而在流域尺度上研究优势流水团的运动,其取样的时间间隔可以为几小时1次、每天1次或1周1次。此外,取样频率也取决于研究目标和研究预设,无论是研究优势流水团的运动还是研究某1次特殊的优势流过程,都存在研究尺度的大小和取样频率高低区别。

从空间尺度上来看,优势流的研究尺度包括微观孔隙尺度、土柱尺度、剖面尺度和流域景观尺度。在微观尺度上,用扫描技术或显微技术研究土壤孔隙结构可查找引发优势流的土壤初始状态。在土柱尺度上,用原状土柱和人工重新装填的土柱作比较研究,探讨优势流发生的条件以及优势流和土壤基质之间的相互作用。也可用体积较大的原状土柱,在设定的边界条件下模拟自然条件下的优势流运动,比较不同优势流过程特征及其对环境的影响。与土柱法相比,土壤剖面法能更好地观测土壤异质性及土壤中的优势流过程,且能更好地指示不同的优势流,但是研究难度较大,而且更加费时费力。在大尺度上了解水分和溶质的时空分布及其运移特征,并反应它们的异质性,获取充分的数据是其面临的主要难题:一方面,孔隙尺度上水分运移的控制机制在微米到毫米之间变化^[28];另一方面,地表水、地下水的运移却需要在米级或更大尺度上研究。而且,导致优势流发生的异质性在所有尺度上都存在,如斥水性发生在孔隙尺度上,大的裂隙发生在剖面尺度上,而隔水层表现在景观尺度上。为克服这些问题,在研究时需要进行研究尺度的升降,用模型或水分运动参数来研究优势流路径,以预测大尺度上的水分和溶质等的运动。

2.2 研究方法和技术

确定研究区及其土壤特征后,还需要选择适合于研究区优势流特征的研究技术。大多情况下,优势流的研究采用多种技术手段相结合的方法。如在对土壤结构进行观测的基础上,可选择制作土壤水分穿透曲线(Breakthrough curve, BTC)来计算土壤中大孔隙的数量、用染色示踪试验观测土壤水分的运动等综合研究优势流的特征,不同的技术方法能得到不同类型的优势流信息。

2.2.1 观测易发生优势流的土体结构

对土体结构的观测可了解引发优势流的尺度和优势流发生的过程,较常用的研究方法主要包括土

壤剖面挖掘法和土柱观察法。土壤剖面挖掘法简便易行,适用于表面张开的大孔隙,在土壤剖面上可直接观测到土壤异质性以及土壤中孔隙的位置、大小和数量。对土壤剖面或土柱拍照并结合影像分析技术能计算出用其他方法难以观测到的孔隙度,所需费用低且操作简单,适用于各种类型的土壤和野外环境,在冻土层中依然可用,但该类方法精度低,不能给出孔隙的长度、活性和连通度,而且是具破坏性的研究方法^[29]。此外,该类方法要求对研究区比较熟悉,对是否会发生优势流有初步假设,要和染色示踪试验相结合才能方便肉眼观察和照片拍摄,挖掘土壤剖面费时费力,是一种具破坏性的研究方法。同时,由于土壤异质性的存在,挖掘的土壤剖面 and 土柱只在较小的范围内有代表性。

目前,有很多精密仪器可用于微观尺度上的土壤观测,在有特殊扫描仪和计算机解译相结合的基础上,可用扫描技术来观测土体结构,如用X射线扫描或其他扫描技术可扫描土柱或土壤层的某一个断面得到二维或三维的图像,该法适宜于任何土壤,并能测定土壤中孔隙的大小^[30],但是扫描过程需要具有专业技术背景的人才能完成,扫描所需仪器设备较为昂贵,而且在研究过程中由于专业背景的限制,难免存在各种各样的误差。此外,由于用于扫描的土柱直径大多在0.2 m以下,因此其表达出的土壤结构可能存在以偏概全的问题。

2.2.2 优势流的染色示踪技术

在自然状态下,难以直接用肉眼观察到土壤层中的优势流,因此使用染色剂等对土壤水分的运动进行示踪可加强优势流的可视性。一般情况下,优势流的染色示踪可用在较小的时间和空间尺度上,如土柱和土壤剖面的染色示踪试验能在1 d或几d内完成。在选择示踪剂时应根据所要研究的土壤特征以及感兴趣的优势流类型审慎选择。如土壤的颜色与示踪剂溶于水后的颜色要有较鲜明的对比,示踪剂不容易被土壤吸收,同时还应考虑示踪剂的毒性、稳定性、适用性,以及可能用到的仪器和整个示踪过程所需要的费用等。对土壤进行染色示踪后,用肉眼可观察到水分在土柱或土壤剖面上的运动过程,把这个过程拍摄下来,将其影像或图片用计算机解译即可分析优势流在土壤中的入渗深度和对土壤的影响范围。

常用的示踪剂有离子示踪剂、同位素示踪剂、染色示踪剂和粒子示踪剂等。优势流研究中常用的离

子示踪剂有溴化物(Br^-)、氯化物(Cl^-)和碘化物(I^-)等卤化物系列染色剂。这些药品比较便宜,便于存储和分析,而且在土壤中的背景值较低,不容易被土壤吸收,且它们都是阴离子显色,有明确的离子电极,可用液体色谱法进行观察和测量^[31-33]。 ^{18}O 、 ^{16}O 、 ^2H 、 ^3H 、 ^3He 等稳定同位素可对古水和薪水做示踪试验,但在排出水分的年代较新时不容易被检测到^[34]。 ^{37}Ar 、 ^{39}Ar 、 ^{85}Kr 、 ^{81}Kr 等放射性同位素^[35]和 ^{137}Cs 、 ^{210}Pb 、 ^7Be 、 ^{222}Rn 、 ^{226}Ra 、 ^{87}Sr 、 ^{86}Sr 等放射性元素^[36]也可用于测量水的年龄或对被土壤吸附的污染物进行示踪等方面的研究。亮蓝、若丹明等染色剂是目前优势流研究中用得较多的染色剂,一般将粉末直接撒在地表,或将染色剂溶于水后直接将水分施于土壤表面任其自然下渗,这类染色剂与土壤颜色的对比差异大,背景值低,且价格便宜毒性较低,费用也比较低^[37-39]。将微粒球^[40]或纳米粒子^[41]加入示踪剂中进行土壤水分示踪,可观测到被微粒或病原体吸收的污染物的运移过程,虽然这些物质在土壤中没有背景值,可以对优势流进行量化,但是目前将微粒球或纳米粒子运用到优势流中的研究较少。

用一种示踪剂进行示踪试验能检测到一种状态下的土壤水分运动,但是用多种示踪在同一地区不同点上施用则能观测到不同溶质在土壤中的运移特征^[42]。若将几种溶质同时施加在一个点上,则能观测到同一点上优势流影响相对重要的区域,而且可以观测到土壤孔隙之间的连通性、化学物质对土壤的影响等^[43]。但是在多种示踪剂同时应用时,应注意避免示踪剂之间的相互影响和干扰,另外多种示踪剂同时应用涉及到较多的化学特性,因此在对所拍摄到的染色示踪照片进行影像分析时难度加大。

2.2.3 观测土壤水分的运动和分布

优势流是常见的土壤水分运动形式,因而可通过观测土壤水分的运动和分布特征来研究优势流。目前有各种各样的传感器可直接或间接观测到不同时间和空间分辨率下的土壤水分运动和分布。在较小的尺度上可通过观测土壤剖面或土柱的导水率、单个大孔隙的水通量来研究土壤水分的运动和分布。在大尺度上可用探地雷达和数字地形分析相结合的方法来观测土壤水分的分布,进而研究优势流现象。在野外,可用时域反射仪(TDR, Time Domain Reflectometer)测量土壤水分含量,用数理统计和地统计分析的方法来估计土壤异质性,从土壤异质性

的表现来解释优势流的分布。针对单个大孔隙,如草原上的鼠洞,用注水法即可观测到水分的运动方向以及大孔隙的出口,但这种方法仅能指示特定的大孔隙,属于破坏性观测,且难以发现土层深处的大孔隙^[44]。用马氏瓶、双环入渗仪或张力渗透计在一定压力水头下观测土壤的饱和导水率(K),用达西定律计算 K 值, K 值高于均质土的地区表示有优势流存在^[45]。该方法虽然简单、费用也较低,但是要研究大孔隙需要多点试验,而且野外土壤很难达到饱和,渗透计很难平衡,不能区别优势流类型^[46]。

2.2.4 制作土壤水分突变曲线

通常采用染色示踪技术观测土壤水分的运动以制作土壤水分突变曲线(breakthrough curve, BTC)。在染色示踪所在土层中用相应的仪器在不同位置接收示踪剂,并测量示踪剂的浓度和性质变化,根据优势流过程中溶质浓度或其所携带的污染物等随时间的变化制作水分突变曲线(BTC),通过土壤水分突变曲线(BTC)的形状判断是否发生优势流,土壤水分突变曲线(BTC)呈双峰型则指示优势流存在^[47-49]。该方法操作简单,能求得土壤孔隙度,但不能对优势流过程进行量化。

2.2.5 其他方法

树脂渗透法是将树脂等材料渗入土柱的孔隙中,等到土柱和树脂干燥后可对其进行观测,计算大孔隙的面积和数量及其在土柱中的分布状态^[50]。由于树脂的渗透速度较慢,因此制作土柱的树脂渗透样本需要较长的准备时间,但样品做好之后容易保存,可用作长期反复观测。

野外注烟法是用高压将烟雾注入到一定深度的土壤中,通过烟雾的运动轨迹来确定土层中相互连通的大孔隙^[51],烟雾的运行时间指示水分流过土层所需要的时间。该方法适用于任何土壤,破坏性较小,尤其能用于冻土中相互连通的大孔隙的研究,安装简单且容易观测,能得到定量的结果。但是由于注烟实验所需仪器较多,且仅能定量估计土壤中大孔隙的连通度,所以目前注烟法用在土壤优势流中的研究并不多见。

2.3 优势流研究的维持费用

采用野外直接测量土壤饱和导水率和和非饱和导水率的方法,能在1~1 000 m尺度上描述水分的运动,从较粗略的层面上探讨优势流,测量时间短,维持费用也相对较低。测量方法可以是单点测量也可以在流域尺度上多点测量,可以根据研究目的仅仅

在地表测量,也可以在同一剖面沿垂直方向多组测量,从而得到二维或三维的土壤水分运移特征。但是通过测量土壤饱和导水率和非饱和导水率方法所得到研究结果仅仅是对水分运动的最终状态进行解释,而不能描述水分的运动过程。

利用张力入渗仪直接测量水分的入渗速度,直接在土壤中安装小型或大型蒸渗仪,或在水分染色示踪的基础上以某一土柱或某一土壤剖面为研究对象可观测到1~10 m尺度上的优势流现象。在这样的研究尺度上,可以实现对优势流过程的粗略估计,甚至可以在某一剖面上直接观测到由土壤大孔隙引起的水分运动过程,得到二维或三维的土壤水分运移特征。由于水流过程时间较短,因此,在这种尺度上的观测时间也比较短,维持费用比较低,但是土壤剖面的挖掘是破坏性的工作。

而采用X射线、计算机断层扫描、核磁共振成像扫描以及中子扫描等尖端技术对土柱或土壤的某一个断层进行扫描,能观测到土壤孔隙的精度达到 $10^{-6} \sim 10^{-1}$ m,可对土壤孔隙率进行定量化的研究,并可进行多种优势流过程的观测,得到一维到三维的结果。测量持续的时间较短,但是仪器的安装和维持费用较高,而且需要有专门的技术背景才能操作。

3 结论和展望

土壤基质流符合达西定律,但是在有大孔隙存在情况下的土壤优势流是否符合达西定律,目前还没有形成统一的认识。在过去几十年来有了较多的研究^[52-53],也有一些模型,如2域模型、多域模型、数值模型、2阶段模型、混合模型和多尺度平均模型等对土壤水分及其溶质的运移过程进行了初步的模拟,但是土壤异质性使得对土壤中水分及溶质的预测和模拟都非常困难,因此目前这些模型的模拟效果还难以让人满意^[54-57]。

本文参考国内外文献,分析总结了优势流的特征、表现形式和常用的研究技术方法。由于目前技术条件的限制和研究方法尚不完善,优势流的研究虽然取得了一定的成就,研究理论正逐步趋向完善,但仍然需要做进一步的研究。

(1)由于土壤优势流是土壤水分运动的常见现象,因此在目前优势流研究的背景下,应进一步发展大尺度上的非破坏性(如探地雷达)、可持续性的研究方法。在全球变化的大背景下,对冻土和解冻条

件下优势流特征的研究也日趋重要,因此还需发展在冻土条件下观测和研究优势流的技术和方法。

(2)目前在大尺度上对优势流的量化研究较少,究竟是哪些过程控制水分和溶质在土壤中的运移尚不清楚。因此,在数据获取和分析方面,可将通过不同途径和不同初始条件下获取的数据进行相互比较,以挖掘更多的信息。如将通过扫描得到的图像与直接对土壤剖面拍照得到的图片相互比较、相互验证,以将影像上表达的信息进一步细化来获取更多的信息,对优势流进一步分级和量化。通过比较土壤大孔隙内部和土壤大孔隙—基质交界面上水分流动特征,得到优势流发生的边界条件和优势流运移过程的特征。

(3)对优势流理论的研究才几十年,由于研究难度较大,许多研究人员根据自己的研究内容及目的,选择不同的仪器及技术方法,提出各自的判别标准,导致研究结果表现出较大的差异性。因此,有必要建立适用于优势流研究需要的现代仪器设备和其相应的技术指标及优势流判别标准。如设定示踪技术在溶液配置、渗透时间以及影像解译方面的标准,将通过不同途径和方法得到的结果进行标准化等等都可推动对优势流的进一步研究。

参考文献:

- [1] de Rooij G h. Modeling fingered flow of water in soils owing to wetting front instability: a review [J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 231-232:277-294.
- [2] Allaire E S, Roulier S, Cessna A J. Quantifying preferential flow in soils: A review of different techniques [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 378:179-204.
- [3] 牛健植,余新晓,张志强. 优先流研究进展及发展趋势[J]. *生态学报*, 2006(1):231-243.
- [4] 徐绍辉,张佳宝. 土壤中优势流的几个基本问题研究[J]. *水文地质工程地质*, 1999(6):27-31.
- [5] van Schaik N L M B, Schnabel S, Jetten V G. The influence of preferential flow on hillslope hydrology in a semi-arid watershed (in the Spanish Dehesas) [J]. *Hydrological Process*, 2008, 22:3844-3855.
- [6] 张强,王胜. 关于干旱和半干旱区陆面水分过程的研究[J]. *干旱气象*, 2007,25(2):1-4.
- [7] 赵鸿,李凤民,熊友才,等. 土壤干旱对作物过程和产量影响的研究进展[J]. *干旱气象*, 2008,26(3):67-71.
- [8] Hendrickx J M H, Flury M. Uniform and preferential flow mechanisms in the vadose zone[A]. In: National Committee for Rock Mechanics (Eds.), *Conceptual Models of Flow and Transport in the Fractured Vadose Zone*[M]. National Academic Press, Washington, DC, USA, 2001. 149-187.

- [9] Li T Y, Zhu X, Zhao Y, et al. The wave propagation and vibrational energy flow characteristics of a plate with a part-through surface crack[J]. *International Journal of Engineering Science*, 2009, 47: 1025 – 1037.
- [10] 马佳. 烈土优势流与边坡稳定性分析方法[D]. 中国科学院研究生院硕士学位论文. 2007.
- [11] Etheridge D W. A Note on Crack Flow Equations for Ventilation Modelling[J]. *Building and Environment*, 1998, 33(5): 325 – 328.
- [12] 毛德强, 万力, 张美静, 等. 裂隙含水层中抽水井不均匀出水条件下的井流公式[J]. *工程勘察*, 2008(1): 35 – 39.
- [13] 宫辉力, 赵文吉, 诸云强. 裂隙-岩溶介质空间水流数值仿真与流场优化[J]. *系统仿真学报*, 2002(2): 186 – 188.
- [14] Zehe E, Flüher H. Preferential transport of isoproturon at a plot scale and a field scale tile-drained site [J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 247: 100 – 115.
- [15] Breasely R S. Contribution of subsurface flow from the upper slopes of forested watershed to channel flow [J]. *Soil Science and Society of America*, 1976, 40: 955 – 957.
- [16] Bramley J, Tyerman S D H. Floodwater infiltration through root channels on a sodic clay floodplain and the influence on a local tree species *Eucalyptus largiflorens* [J]. *Plant and Soil*, 2003, 253: 275 – 286.
- [17] N L M B van Schaik, Schnabel S, Jetten V G. The influence of preferential flow on hillslope hydrology in a semi-arid watershed (in the Spanish Dehesas) [J]. *Hydrological Process*, 2008, 22: 3844 – 3855.
- [18] 李利. 生物洞穴影响下黄河口潮滩沉积物优势流的试验研究[D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 2008.
- [19] Morales V L, Parlange J Y, Steenhuis T S. Are preferential flow paths perpetuated by microbial activity in the soil matrix? A review [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, doi:10.1016/j.jhydrol. 2009. 12.048.
- [20] Rezanezhad F, Vogel H J, Roth K. Experimental study of fingered flow through initially dry sand [J]. *Hydrology and Earth System Science Discussions*, 2006, 3, 2595 – 2620.
- [21] 张建丰, 王文焰. 沙层在黄土中发生指流条件的试验研究[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(3): 82 – 86.
- [22] McDonnell J J. The influence of macropores on debris flow initiation [J]. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 1990, 23, 325 – 331.
- [23] Weiler M, McDonnell J J. Conceptualizing lateral preferential flow and flow networks and simulating the effects on gauged and ungauged hillslopes [J]. *Water Resources Research*, 2007, 43: Article number W03403. doi:10.1029/2006WR004867.
- [24] Hyeon J K, Sidle C R, Moore R D. Shallow lateral flow from a forested hillslope: Influence of antecedent wetness [J]. *Catena*, 2005, 60: 293 – 306.
- [25] Cammeraat L H. Hydro-geomorphologic processes in a small forested sub-catchment: preferred flow – paths of water [D]. PhD Thesis, Universiteit van Amsterdam, Amsterdam, 1992.
- [26] Van Beek L P H, Van T W J. Asch A combined conceptual model for the effect of fissure—Induced infiltration on slope stability [A]. In *Process Modelling and Landform Evolution* [M]. Hergarten S, Neugebauer H (eds). Springer – Verlag: New York; 1998. 147 – 169.
- [27] Legout A, Legout C, Nys C, et al. Transport through the soil of a forested landscape (Fougères, France) [J]. *Geoderma*, 2009, 151: 179 – 190.
- [28] Robinson D A, Campbell C S, Hopmans J W. Soil Moisture Measurement for Ecological and Hydrological Watershed – Scale Observations: A Review [J]. *www.vadosezonejournal.org*, 2008, 7(1): 358 – 389.
- [29] Weiler M, Naef F. An experimental tracer study of the role of macropores in infiltration in grassland soils [J]. *Hydrological Processes*, 2003, 17: 477 – 493.
- [30] Mooney S J, Morris C. Morphological approach to understanding preferential flow using image analysis with dye tracers and X-ray computed tomography [J]. *Catena*, 2008, 73(2): 204 – 211.
- [31] Buttle J M, McDonald D J. Coupled vertical and lateral preferential flow on a forested slope [J]. *Water Resources Research*, 2002, 38. doi: 10.1029/2001WR000773.
- [32] Tallon L K, Si B C, Korber D, et al. Soil wetting state and preferential transport of *Escherichia coli* in clay soils [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2007, 87: 61 – 72.
- [33] Davis S N, Campbell D J, Bentley H W, et al. Groundwater Tracers: National Water Well Association [C], Worthington, OH. EPA Contract CR – 810036, 1985.
- [34] Kracht O, Gresch M, Grujer W. Innovative tracer methods for sewer infiltration monitoring [J]. *Urban Water Journal*, 2008, 5: 173 – 185.
- [35] Loosli H H, Lehmann B E, Smethie W M. Noble gas radioisotopes [A]. In: Cook P, Herczeg A L (Eds.). *Environmental Tracers in Subsurface Hydrology* [M]. Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, USA, 2000. 379 – 396.
- [36] Vroon P Z, Wagt B V, Koornneef J M, et al. Problems in obtaining precise and accurate Strontium isotope analysis from geological materials using laser ablation MC – ICPMS [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2008, 390: 465 – 476.
- [37] Forrer I, Papritz A, Kasteel R, et al. Quantifying dye tracers in soil profiles by image processing [J]. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51: 313 – 322.
- [38] Flury M, Wai N N. Dyes as tracers for vadose zone hydrology [J]. *Reviews of Geophysics*, 2003, 41(1): Article number 1002. doi:10.1029/2001RG000109.
- [39] Lang P. Application of Artificial Tracers in Hydrology – Guideline. *Bulletin d'hydrogéologie, Special Issue number*, 2004, 20. Centre d'hydrogéologie, Université de Neuchâtel, France.
- [40] Pryce O, Quninton J, Heathwaite L. Development of environmental tracers for phosphorous and sediments [J]. *Geophysical Research Abstracts*, 2007, 9. Article Number 00782.
- [41] D Nowack, Hug H, Behra R, et al. Nanoparticles in the Environment: Implications and Applications. *Book of Abstracts. Conf. 2 – 7 March, 2008, Centro Stefano Franscini, Monte Verità, Asco-*

- na, Switzerland.
- [42] Nobles M M, McInnes L P K J W. Pathways of dye tracer movement through structured soils on a macroscopic scale[J]. *Soil Science*, 2000, 169: 229 – 242.
- [43] Zehe E, Flühler H. Preferential transport of isoproturon at a plot scale and a field scale tile – drained site[J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 247: 100 – 115.
- [44] Kaestner A, Lehmann E, Stamparoni M. Imaging and image processing in porous media research[J]. *Advances in Water Resources*, 2008, 31: 1174 – 1187.
- [45] Pelley A J, Tufenkji N. Effect of particle size and natural organic matter on the migration of nano – and microscale latex particles in saturated porous media[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2008, 321: 74 – 83.
- [46] Guber A K. Unsaturated soil hydraulic conductivity: the field infiltrometer method[A]. In: Sein E V, Karpachevsky L O (Eds.). *Theory of Methods of Soil Physics*[M]. Grif and Company Publishing House, Moscow, Russia, 2007. 270 – 273.
- [47] Roulier S, Robinson B, Kuster E, et al. Analysing the preferential transport of lead in a vegetated roadside soil using lysimeter experiments and a dual – porosity model[J]. *European Journal of Soil Science*, 2008, 59: 61 – 70.
- [48] Durner W, Jansen U, Iden C. Effective hydraulic properties of layered soils at the lysimeter scale determined by inverse modeling[J]. *European Journal of Soil Science*, 2008, 59: 114 – 124.
- [49] Weihermüller L, Siemens J, Deurer M, et al. In situ soil water ex- traction: a review[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2007, 36: 1735 – 1748.
- [50] Vervoort R W, Cattle S R, Minasny B. The hydrology of vertosols used for cotton production: I. Hydraulic, structural and fundamental soil properties[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2003, 41: 1255 – 1272.
- [51] Shipitalo M J, Gibbs F. Potential of earthworm burrows to transmit injected animal wastes to tile drains[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64: 2103 – 2109.
- [52] Legout A, Legout C, Nys C, et al. Preferential flow and slow convective chloride transport through the soil of a forested landscape[J]. *Geoderma*, 2009, 151 (3 – 4): 179 – 190.
- [53] Gupta A, Destouni G, Jensen M B. Modelling tritium and phosphorus transport by preferential flow in structured soil[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 1999, 35(4): 389 – 407.
- [54] Simunek J, Jarvis N J, Genuchten M T, et al. Review and comparison of models for describing non – equilibrium and preferential flow and transport in the vadose zone[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 272 (1 – 4): 14 – 35.
- [55] Stagnittia F, Lic L, Allinsona G, et al. A mathematical model for estimating the extent of solute – and water – flux heterogeneity in multiple sample percolation Experiments[J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 215: 59 – 69.
- [56] Khne J M, Khne S, imnek J. A review of model applications for structured soils: a) Water flow and tracer transport[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2009, 104: 4 – 35.

Review on the Study of Preferential Flow in Soil

PENG Haiying, LI Xiaoyan, CUI Buli, ZHANG Siyi

(College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Preferential flow (PF) resulted from soil heterogeneity is an ordinary form of water movement, which has significance on study both environment and human health because it transports contaminant to deeper soil even groundwater without physical – chemical and biological interaction within the upper layer of soil. There were various Preferential flow(PF) processes occur in soil, and it was difficult to be measured and quantified. So there weren't many researches paying attention to it until recent decades. This paper introduced the definition, characteristics and manifestation of preferential flow(PF), and compared techniques which commonly used in preferential flow(PF) studying now. Techniques such as simple excavation and profiles observation, dye tracing and so on, are easy, inexpensive and no time consuming, but has no regional characteristics. X – ray scanning and microscopic imaging techniques can quantify macropores in soil core and profile, it can attain microcosmic scale ranged from 10^{-6} to 10^{-1} m, but it is expensive and professional technicians are needed for the operation of instrument. The current state of knowledge is inadequate in continuity measuring preferential flow(PF) in the field and on larger scale without soil disturbance. Furthermore, comparing data obtained with different approaches or different initial conditions would bring new information on a large number of studies, and standardized and systematic studying methods are necessary for improving the research of preferential flow(PF).

Key words: macropore; soil heterogeneity; research techniques; water and solutes distribution and movement