

水及溶质在有大孔隙的土壤中运移机制研究进展

冯 杰, 郝振纯

(河海大学水资源开发利用国家专业实验室, 江苏 南京 210098)

摘要 综述了水及溶质在有大孔隙的土壤中运移的实验和模型研究进展, 指出 : 今后应通过大量的室内外实验和改进观测方法来获得大量的数据资料, 从定性和定量两方面来研究大孔隙流 ; 只有在参数的测定和一些量的确定技术解决以后, 模型才能得到完善而达到实用的程度 ; 为解决大孔隙系统流动过程中的高度非线性和非稳定性问题, 需要新的模拟方法和数值计算方法 ; 今后模拟研究的重点应是随机模型而不是确定性模型 .

关键词 大孔隙 ; 土壤基质 ; 实验 ; 模型

中图分类号 S152.7+2 **文献标识码** : A **文章编号** : 1000-1980(2002)02-0063-08

土壤中的大孔隙由物理或生物过程形成 . 物理过程包括 : 由土壤的干湿作用造成的收缩和膨胀, 土壤中可溶性物质的溶解, 冻融的循环交替以及耕种等活动 . 生物过程包括蚯蚓和啮齿动物活动和植物根系的生长 . 大量的室内和田间实验表明, 大孔隙流是土壤中的一种普通存在的现象, 而不是一种例外 . 大孔隙虽然只占整个土壤体积的小部分 (0.1% ~ 5%), 但对水及溶质在土壤中的运移有着深刻影响^[1,2] . 当土壤中存在大孔隙时, 进入土壤中的水及溶质就绕过土壤基质, 经过大孔隙快速到达土壤深处或地下水中, 对地下水造成污染 .

1 水及溶质在有大孔隙的土壤中运移的实验研究

总体上讲, 有关水及溶质在有大孔隙的土壤中运移的实验共分为两类 : 一类是确定土壤大孔隙大小分布的实验 ; 另一类是含有大孔隙土壤的水流实验 .

1.1 确定大孔隙大小分布的实验

确定大孔隙大小分布, 除了较早采用的水的吸附-解吸附、N 的吸附和 Hg 的注入方法外, 还包括以下 7 种实验方法 .

a. 土柱浸泡的方法 . 将非扰动土柱放入石蜡^[3,4] 和聚酯树脂或环氧树脂^[5] 中浸泡, 观察从浸泡过的土柱中取出的土壤断面 . Dexter^[3] 采用人工计数方法确定土壤的大孔隙度 ; Vermeul 等^[4] 在紫外线光下对土壤断面拍照, 并对照片进行数字处理以确定耕种土和非耕种土的大孔隙度 ; Piyush 等^[5] 首先对聚酯树脂或环氧树脂浸泡过的土柱断面拍照, 然后用自动图像分析仪确定大孔隙的大小分布 .

b. 田间土壤开挖的方法 . 直接在试验地开挖不同深度的水平土壤面, 用吸尘器吸除表面浮土使孔隙露出, 然后用人工方法计算大孔隙数^[6] ; 用照相机对不同深度水平土壤面拍照, 使孔隙在闪光灯下呈现黑色, 对图像进行分析, 确定单位面积上不同大小大孔隙的数目和大孔隙度^[7] ; 用平铺在水平土壤面的塑料薄膜标记大孔隙的轮廓, 确定大孔隙的数目和大孔隙度^[8] .

c. 染色的方法 . 在土柱或田间土壤表面灌入一定深度的掺有染色剂的水, 让其充分入渗, 从而对土壤中水的流动路径染色, 开挖土壤剖面后即可看到染色剂清晰地显示导水大孔隙, 分析染色结果以确定大孔隙的分布 . 用染色方法确定大孔隙分布的缺点是 : 土样的挖取是破坏性的, 试验结果不能在同一地点重复获得 ; 虽然能看到大孔隙的空间分布, 但不能准确确定大孔隙的大小, 也不能确定溶质浓度的差异 . Omoti 等^[9] 用荧光

染料和紫外照相技术来描述土壤剖面中大孔隙的有效性; Bouma 等^[10]将切片和染色技术相结合研究大孔隙的分布; Flury 等^[11]选择瑞士所有类型的可耕种土壤进行了比较全面的染色研究。

d. 利用土壤水穿透曲线的方法. Radulovich^[12]利用基本流量方程和 Poiseuille 方程计算大孔隙半径, 这里的大孔隙半径代表每次收集出流溶液阶段(4~5 s)内导水大孔隙的平均半径, 然后计算从开始排水到饱和稳定流阶段大孔隙的大小分布。

e. 使用张力渗透仪的方法. 利用张力渗透仪测得的不同张力条件下的孔隙渗透速度来计算土壤大孔隙分布. Waston 和 Luxmoore^[13]以及 Wilson 和 Luxmoore^[14]使用张力渗透仪估计了森林流域大孔隙度. 使用张力渗透仪方法的好处在于所估计的大孔隙度是有效大孔隙度, 且成本较低, 操作快速简单. 其不足之处在于仍需进行密集采点测量, 且在计算大孔隙度时由于采用了 Poiseuille 公式, 必须作以下假定: (a) 层流; (b) 圆形孔隙; (c) 采用毛管理论确定大孔隙半径, 这与实际情况有出入, 因此测量结果不是十分精确。

f. CT 扫描的方法. X-射线 CT 扫描, 称为计算机断层扫描, 可用于非损坏测量小到 1 mm^3 尺度上非透明物体内密度的三维变化. 土样经过 CT 扫描仪扫描后, 得到扫描图像. 该图像由一定数量的图形元素组成, 每一个图形元素对应扫描物体的一个位置, 依据于物体各个位置的 X-射线衰减系数把亮度值付给图像中的每个图形元素, 扫描物体不同密度区就可在图像中以不同亮度表示, 土壤大孔隙就可清晰地显示出. 用 CT 定量描述土壤大孔隙, 根据图像分析方法的不同, 可将其分为两个阶段: (a) 传统统计法阶段. Warner^[15]对 CT 扫描图像作了可视化解释, 说明 CT 可准确揭示大孔隙的数目、大小和位置. Anderson^[16]介绍了一种简单的确定大孔隙直径的方法, 分析了密度统计参数在土柱中的分布规律, 并对密度作了自相关分析. Peyton^[17]认为文献^[16]所采用的确定大孔隙直径的方法是不正确的, 继而采用迭代方法确定大孔隙的等效直径, 得到扫描断层不同直径大孔隙的分布. (b) 分形几何法阶段. Peyton^[18]利用 CT 结合分形维数来描述大孔隙结构, 即对 CT 所得的二维矩阵图进行特殊处理, 用计算覆盖区域盒子数的方法求出大孔隙区或低密度区的盒维数, 再运用分形公式求出其周长或面积, 并比较不同结构土柱分形维数的差别. Zeng 等^[19]采用分形维数 D 和分形非均匀性 $C(L)$ 描述土壤大孔隙结构空间的非规则变化. 笔者认为, CT 扫描虽然可以精确地揭示大孔隙的数目、大小、位置以及连通性, 但 CT 扫描仪本身还存在一些缺陷, 而且 CT 扫描费用高。

g. 地透雷达法. 地透雷达法也是一种非破坏性的研究土壤大孔隙结构的方法. 地透雷达是宽带脉冲雷达装置, 包括天线、计算机控制系统和连接它们的信号线. 在研究区域的地表上拖动天线, 同时天线不断向地下发射雷达波, 当雷达波遇到绝缘值相差较大的两种物质的交界面时, 一部分波反射回地面, 被天线吸收, 土壤剖面含水量剧烈变化的边界是影响雷达波反射的一个重要因素. 这样一边拖动天线, 一边在计算机上显示每个雷达波的回波, 各个回波的组合形成地下剖面. 由于土壤大孔隙与土壤基质在绝缘性和含水量上差别比较大, 故大孔隙可以被地透雷达探测到并在土壤剖面中显示出来, 而且水及溶质在其中的流动也可以显示. 地透雷达法优于 CT 扫描法的一个重要原因是可以大范围地测定土壤内的大孔隙结构. Bouldin^[20]和 Freeland^[21]采用地透雷达法对位于美国西部田纳西州 400 m 长的分层土壤进行了大孔隙结构分析。

1.2 含有大孔隙土壤的水流实验

含有大孔隙土壤的水流实验分为室内实验和田间实验两类。

1.2.1 室内实验

从实验地取非扰动土柱, 在土柱表面施用染色剂或示踪剂, 然后施加一定深度的水量, 观察初始出流的时间, 计算滞后时间及在一定时间内流出的水量, 分析其中的示踪剂含量, 得出示踪剂穿透曲线, 出流完成以后, 可以将土柱不同部位切开, 观察染色剂染色情况, 得出大孔隙分布情况. 穿透曲线的较早初始穿透、拖尾和双峰现象以及曲线的不对称性可清晰地表示出大孔隙的作用^[22,23]. Edwards 等^[24]对取自非耕种麦地的土块进行出流实验, 研究雨强对水及溶质在有大孔隙的土壤中运移的影响; Shipitalo 等^[25,26]同样对取自非耕种麦地的土块进行出流实验, 研究雨强和初始含水量对溶质运移的影响。

1.2.2 田间实验

在田间土壤表面施用一定数量的化学肥料或示踪剂, 让土壤接受天然降雨或一定水量的灌溉, 然后测量一定深度的土壤含水量和溶质浓度. Leaney 等^[27]分析了山坡土壤中氮和氯化物在降雨、土壤水和地下水中的浓度, 估计了大孔隙流对入渗和山坡径流的贡献. Espeby^[28]发现, 雪融化阶段有森林和冰川覆盖的山坡耕地上大孔隙决定雪水的入渗。

从以上有关水及溶质在有大孔隙的土壤中运移的实验研究可以看出,这些实验需要花费大量的人力、物力和时间,而且都是在土壤某一点或面上进行的,测量结果代表性不好,并且各实验或多或少地存在处理方法与精度方面的问题。土壤中的大孔隙系统是由不同大小和形状的、相互连通的或非连通的大孔隙或通道随机组合而成的,采用不同尺度水平观察大孔隙系统,发现它们具有相似性,因此,Brakensiek等^[29]和 Rawls等^[30,31]提出采用分形几何研究土壤大孔隙流,利用得到的分形公式,采用较少的数据就可确定出土壤大孔隙流性质,不需要大量的野外和室内实验数据。

2 水及溶质在有大孔隙的土壤中运移的模型研究

虽然土壤中大孔隙流的定量研究非常困难,但人们还是提出了许多描述水及溶质在有大孔隙的土壤中运移的模型。常见的有以下几种。

2.1 两域(Two-Domain)模型

该模型假定土壤由两个域构成,一个域代表土壤基质,另一个域代表土壤中的大孔隙,根据水及溶质在两域中的运移和两域之间水及溶质交换的不同,可分为以下几种类型。

2.1.1 流动-非流动型

水及溶质在大孔隙域中运移,而在基质域中呈静止状态,基本不流动,仅有一些缓慢的扩散。这样当溶质以一个脉冲加入到土壤中时,它首先从大孔隙域扩散到基质域中,然后,在脉冲通过整个域后,再返回到大孔隙域中。Van Genuchten等^[32,33]将此概念应用于建模中,即将土壤水分含量分为两部分:一是流动的水分含量;二是非流动的水分含量。溶质的浓度分为流动的溶质浓度和非流动的溶质浓度,溶质在大孔隙域中的运移是对流和弥散,而在基质域中溶质的对流微乎其微,大孔隙域以有限速率扩散方式与基质域进行溶质的交换。该模型中非流动水含量和交换系数只是人为定义,不能从土壤团粒几何形状和水力性质得出,当实验条件改变时,这些参数也随之发生变化。另外,实际中水及溶质在土壤基质中不是静止的,而是流动的,流动-非流动模型与实际情况不相符合。

2.1.2 流动-流动型

水及溶质在大孔隙域和基质域中都会运移,但在大孔隙域中的运移比在基质域中要快得多。对基质域的研究采用达西定律,已成定论。而对大孔隙域的研究,提出了如下一些研究方法。

a. 双重孔隙度(Dual-Porosity)型。将大孔隙域和基质域都看作孔隙系统,每个系统都被认为是均质介质,具有各自水流和溶质运移的性质,整个系统由两个水流速度、两个压力水头、两个含水量和溶质浓度来表示。每个系统水流及溶质运移用 Richard 方程和对流弥散方程来表示,两孔隙系统在压力水头和浓度梯度下进行水与溶质的交换。Skopp等^[34]得出了仅适用于两域间相互作用相对较小时的近似解析解,但仅限于稳态水流;Gerke等^[35,36]建立了模型中参数与土壤的物理性质相联系的双重孔隙度模型,模型可解决非饱和条件下水及溶质运移的复杂和高度瞬变过程;Javis等^[37,38]假定大孔隙域中水力梯度为单位水力梯度,并且由于大孔隙域中溶质对流是主要的,不考虑溶质的弥散和扩散,提出了一个包括粘土的膨胀和收缩的双重孔隙度模型;Chittaranjan等^[39]提出了双重孔隙度模型的改进形式,将一维模型扩展为二维模型,在溶质运移方程中加入线性吸附模数,在水流方程中加入植物根吸取项。该模型对非饱和两域采用 Richard 方程的假定对基质域比较合适,但对大孔隙域当水流从层流变到紊流时不合适。对于两孔隙系统之间的交换项来讲,由于缺乏田间和室内实验研究,很难确定两域间的水流交换是如何与两域性质相联系的。

b. 运动波(Kinematic Wave)型。Beven等^[40]对土壤基质域运用达西定律,对土壤中的大孔隙域运用质量守恒原理,建立非饱和大孔隙域运动波水流方程。Germann等^[2]指出,对于土壤中的大孔隙域,水只在重力作用下通过该区,且水流速度和强度取决于土壤含水量,则大孔隙域中非稳定流可用运动波理论来解决。运动波理论包括一个与大孔隙流有关的汇函数,在入渗期间,水从大孔隙域渗入到土壤基质域中,大孔隙域周围的土壤基质域起着吸附边界的作用。假设土壤中大孔隙均匀分布,且湿润锋的运动可用活塞式流动来描述。该模型的预测结果与所观测的出流过程很接近,但由于模型假定的均匀大孔隙系统,其中湿润锋的运移被认为是活塞流,使模型的出流体积通量密度与观测值存在差异,而且模型中大孔隙域中的体积通量密度、水分含量以及所涉及到的参数的确定都很困难。

c. 边界层流动理论(Boundary Layer Flow Theory)型。Germann^[41]在假定粘性流的情况下,对大孔隙水流用

边界层流理论计算水力传导度、流动含水量、体积通量密度以及流动含水量与整个含水量的比值,然后运用运动波模型模拟水在土壤中的流动. Germann^[41]指出,文献[2]建立的运动波模型中,大孔隙含水量 θ 应为可流动含水量 ω ,即 $\omega \leq \theta$. 利用边界层流动理论,也可得到运动波模型中的参数值或其表达式. 该模型适用于层流,大孔隙水流存在一临界最大厚度,水流厚度超过它以后,层流变为紊流,模型不再适用,并且模型忽略了液固交界面的粘度和大孔隙的曲率.

d. 管流(Channeling or Tube Flow)型. Chen^[42]和 Wagenet^[43]将土壤分为基质域和大孔隙域两域,基质域中的水流方程采用 Richard 方程,大孔隙域中的水流近似看成管流,采用管流的 Hagen-Poiseuille 公式和 Chezy-Manning 公式来描述,采用 Philip 入渗公式计算从大孔隙域到基质域的水流速度. 该两域模型可以相当精确地进行预测,但仅适用于自由排水条件下. Beven^[44]和 Germann^[2]使用 Hagen-Poiseuille 公式得到了描述大孔隙流的非线性运动波方程,并得到了饱和大孔隙体积通量密度和大孔隙度的关系. Beven 等^[45]将 Green-Ampt 方程与 Hagen-Poiseuille 公式结合起来描述从大孔隙管道到土壤基质的辐射渗透. Workman 等^[46]使用 Hagen-Poiseuille 公式来描述土壤积水入渗条件下的大孔隙流,采用达西定律以压力差为驱动力定量描述侧向渗透.

总之,在两域模型的研究中,采用达西定律来对基质域进行研究,已成定论;而对大孔隙域的研究,存在以上多种方法,要根据已有的实验资料、边界和初始条件以及对模型精度的要求,在实际应用中加以选用模型. 需要指出的是,虽然两域模型在概念上简单易懂,在预测能力方面也大有改善,但由于两个域都需要许多参数来描述水和溶质在其中的运移,而这些参数又难于测定,同时边界条件的处理也非常复杂,故限制了该方法的应用.

2.2 多域(Multi-Domain)模型

根据土壤中孔隙的大小、土壤水的张力或渗透性,将土壤分为多个孔隙域,各孔隙域之间在压力水头差和浓度差的驱动下进行水及溶质的交换. Gwo 等^[47]对每个域采用达西定律,各域之间水及溶质的交换速率分别作为一阶压力水头差和一阶浓度差的函数,将土壤分为大孔隙域、中孔隙域、微孔隙域,建立了三孔隙域模型. Durner 等^[48]把土壤孔隙分成很多区域,每个区域代表一等效直径,将每个区域在垂直于平均水流方向的结构坐标上进行排列,区域内溶质在平均水流方向,以与孔隙大小特定的速率进行对流和扩散,区域间溶质的混合沿着结构坐标进行对流和弥散,建立多域模型模拟土壤中与孔隙大小有关的溶质运移.

由于大孔隙域中的水流不再符合达西定律,因此多域模型中每个域中水及溶质运移都采用达西定律是不合适的. 此外,与单一域或两域模型相比,虽然多域模型可以更好地描述水及溶质在有大孔隙土壤中的运移,并且模拟结果更贴近田间实验过程,但多域模型需要更多的参数,需要更加关注模型参数的物理相关性和显著性,而且土壤物理和化学性质的变化使模型变得异常复杂,大大限制了该模型的应用.

2.3 数值(Numerical)模型

为了描述非饱和土壤中存在大孔隙流情况下的溶质运移问题,Steenhuis 等^[49]提出了一种数值模型. 他们认为,水和溶质在流动路径中基本上以重力为主要驱动力作垂向运移. 模型作了如下 3 个基本假定:(a)每个孔隙组中的水力传导率是其水分含量的线性函数;(b)与基质势梯度有关的力和重力相比,虽然不是可以忽略的,但仍假定水力梯度是近似为 1 的常数;(c)水及溶质在大孔隙组间进行交换. 该模型的基本思想是:把作为水分含量函数的水力传导率分段进行线性近似,从而识别流动路径(或孔隙组),使水以独特的流速运移. 通过这样的方式选择线性近似,即在某一孔隙组中的流速看成其相邻孔隙组中流速的整数倍,就可以获得水和溶质以大孔隙流运移的一个简单的数值解. 孔隙组间溶质交换的特征可以根据被模拟系统本身的要求加以改变. 当孔隙组间的溶质完全混合时,数值模型就简化成对流-弥散方程. 如果孔隙组间没有混合,也就是孔隙组间没有溶质的交换,则模型变为孔隙簇模型.

该模型要求某个孔隙组中的流速是其相邻孔隙组中流速的整数倍,从而限制了孔隙组的最大数,因而得到的解是很粗糙的.

2.4 两阶段(Two-Phase)模型

该模型是由 Jurg Hosang^[50]提出的. 该模型把在有水入渗情况下,大孔隙流的形成分为两个阶段:第 1 阶段,只有少量的水缓慢入渗,使水分再分布,此阶段不产生大孔隙流;第 2 阶段,大量的水快速入渗并产生大孔隙流. 这两个阶段都可用 Richards 方程来描述水的流动,只不过是后一阶段的水力传导率比前一阶段的大而已. 这个模型作了两个基本假设:(a)如果降水分别超过或低于某一临界强度,大孔隙流则瞬时产生或停

止;(b)大孔隙流向下推进的深度和临界降水强度不随时间变化.野外测定的结果充分反映了在不同深度上大孔隙流效应比(b)中所给出的临界深度要大.

两阶段模型简单易懂,可操作性强,两个阶段都可用 Richards 方程来模拟.但它也存在一些不足,如:两个阶段的划分及临界入渗强度的确定任意性大,难以把握;第2阶段是否仍可用 Richards 方程来描述,证据不足等等.

2.5 混合层(Mixing-Layer)模型

Steenhuis 等^[51]以及 Shalit 等^[52]将土壤分为上下两层,上层为混合层,下层为大孔隙流层.土壤表面施加的水及溶质在混合层中充分混合,在混合层未达到饱和期间,存在溶质吸附现象,而当混合层达到饱和后,水及溶质以大孔隙流和基质流的形式进入下层,这时存在溶质解吸附现象.在大孔隙流层中大孔隙流以活塞流的形式快速通过大孔隙到达土壤深处或地下水中,其中的溶质浓度反映混合层达到饱和时的溶质浓度,基质流则缓慢地渗透.由于基质流非常慢,特别是对吸附溶质来讲,因此可以假定基质流中无溶质存在.

只需较少参数的简单混合层模型可以很好地模拟传统耕作土块的穿透曲线,但不能很好地模拟非耕作土块的穿透曲线.混合层模型假定混合层中溶质均匀分布,而实际上只有围绕大孔隙很少的一部分参与水流过程,假定大孔隙流层中只有大孔隙流存在而无基质流,也无大孔隙流与基质流之间的水及溶质的交换,这与实际情况不符,降低了模型的精度.

2.6 多尺度平均(Multiple-Scale Average)模型

Montal 等^[53]从微观尺度稳定饱和流条件下非反应溶质运移方程出发,在一系列尺度上采用体积平均的方法建立溶质运移方程,直至形成含有大孔隙流的对流弥散方程,该方程的流速剖面是周期性的和无方向性的.

与传统对流弥散方程相比,多尺度平均模型能比较精确地预测溶质穿透曲线,充分描述滞留溶质浓度,对溶质施用方法反应灵敏,正确反映水流的截断.但该模型使用条件为饱和稳定流条件下非活性溶质运移,并假定流速剖面为均质的,对于非饱和瞬变流条件下的活性溶质运移以及流速剖面为非均质的来讲,应需进一步研究.

2.7 随机(Stochastic)模型

由于大孔隙在土壤中是随机分布的,因此采用随机模型可以更好地描述水及溶质在有大孔隙土壤中的运移. Moreno^[54,55]采用离散的裂隙处理方式,运用随机数值分析方法,构造一定传导特性(由孔隙大小、连通长度和分布决定的各向异性)的网络结构,由压力条件求解水流速度场,用系综平均方法决定浓度分布. Jury^[56]将溶质运移视为一个随机过程,采用随机传递函数来描述溶质在非均质土壤中的运移,因而不必更多地了解控制溶质运移的确切的物理、化学和生物机理. White 等^[57]运用此方法对³HOH 和 CaCl₂在非扰动土柱中的运移进行了模拟. Grant^[58]建立了描述大孔隙土壤水流现象的简单随机渗透模型:假定土壤中饱和水力传导度 K_s 是对数正态分布的随机变量,建立累积入渗量和入渗率的概率密度函数 f_I 和 f_R ,假定不能入渗进入低渗透率土壤的水将在土壤表面流动,被高渗透率土壤均匀吸收,建立水平土壤入渗水通量的概率密度函数 f_v . Mallants 等^[59]根据实测资料,采用 Monte-Carlo 随机模拟方法,首先建立所用土壤水保持函数和水力传导度函数中参数的联合标准概率密度函数,然后确定综合的土壤水保持曲线和水力传导度,最后采用 Richard 方程模拟水在大孔隙土壤中的运移过程.

3 展 望

有各种物理和生物过程形成的大孔隙及由此造成的大孔隙流是土壤中一种普遍存在的现象,大孔隙虽然只占整个土壤体积的一小部分,但对水及溶质在土壤中的运移有着深刻的影响.虽然通过大量的室内外实验已对大孔隙流问题有了一定的认识,但由于大孔隙流在时间和空间上变化的复杂性,仍存在不少难点问题需要解决.因此,在当前和未来较长一段时间内,有关大孔隙流问题的研究应侧重于大量的田间综合实验,并发展新的观测技术,使得该技术可以从时间和空间上观测大孔隙流的发生和发展,从而获得足够多的数据资料,以便从定性和定量两方面来研究大孔隙流.大孔隙流的模拟研究还处于初步阶段,各种描述水及溶质在有大孔隙的土壤中运移模型均有其不足之处,只有在参数的测定和一些量的确定技术解决以后,模型才能得到完善,从而达到实用的程度.为解决大孔隙系统流动过程中的高度非线性和非稳定性问题,需要发展新的

模拟方法和数值计算方法.另外,大孔隙在土壤中是随机分布的,今后模拟研究的重点应是随机模型而不是确定性模型.

参考文献:

- [1] Germann P F, Beven K. Water flow in soil macropores, I. An experimental approach [J]. J Soil Sci, 1981, 32 :1 ~ 13.
- [2] Germann P F, Beven K. Kinematic wave approximation to infiltration into soils with sorbing macropores [J]. Water Resour Res, 1985, 21 :990 ~ 996.
- [3] Dexter A R. Internal structure of tilled soil [J]. J Soil Sci, 1976, 27 :267 ~ 278.
- [4] Vermeul V R, Istok J D, Flint A L, et al. An improved method for quantifying soil macroporosity [J]. Soil Sci Soc Am J, 1993, 57 :809 ~ 816.
- [5] Piyush Singh, Kanwar R S. Macropore characterization for two tillage systems using resin impregnation technique [J]. Soil Sci Soc Am J, 1991, 55 :1674 ~ 1679.
- [6] Ehlers W, Kopke U, Hesse F, et al. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and un-tilled loose soil [J]. Soil Tillage Res, 1983, 3(2) :261 ~ 275.
- [7] Edwards W M, Norton L D, Redmond C E. Characterizing macropores that affect infiltration into nontilled soil [J]. Soil Sci Soc Am J, 1988, 52(2) :483 ~ 487.
- [8] Logsdon S D, Allmaras R R, Wu L, et al. Macroporosity and its relation to saturated hydraulic conductivity under different tillage practices [J]. Soil Sci Soc Am J, 1990, 54(4) :1096 ~ 1101.
- [9] Omoti U, Wild A. Use of fluorescent dyes to mark the pathways of solute movement through soils under leaching condition, 2. Field experiment [J]. Soil Sci, 1978, 128 :98 ~ 104.
- [10] Bouma J, Wosten J. Flow patterns during extended saturated flow in two unsaturated swelling clay soils with different macrostructures [J]. Soil Sci Soc Am J, 1979, 43 :16 ~ 22.
- [11] Flury M, Fluhler H. Susceptibility of soils to preferential flow of water : A field study [J]. Water Resour Res, 1994, 30 :1945 ~ 1954.
- [12] Radulovich R, Solorzano E, Sollins P. Soil macropore size distribution from water breakthrough curves [J]. Soil Sci Soc Am J, 1989, 53 :556 ~ 559.
- [13] Watson K M, Luxmoore R J. Estimating macroporosity in a forest watershed by use of a tension infiltrometer [J]. Soil Sci Soc Am J, 1986, 50(3) :578 ~ 582.
- [14] Wilson G V, Luxmoore R J. Infiltration macroporosity and mesoporosity distribution on two watersheds [J]. Soil Sci Soc Am J, 1988, 52 :329 ~ 335.
- [15] Warner G S, Nieber J L, Moore I D, et al. Characterizing macropores in soil by computed tomography [J]. Soil Sci Am J, 1989, 53 :653 ~ 660.
- [16] Anderson S H, Peyton R L, Gantzer C J. Evaluation of constructed and natural soil macropores using X-ray computed tomography [J]. Geoderma, 1990, 46 :13 ~ 29.
- [17] Peyton R L, Anderson S H, Gantzer C J. Applying X-ray CT to measure macropore diameters in undisturbed soil cores [J]. Geoderma, 1992, 53 :329 ~ 340.
- [18] Peyton R L, Gantzer C J, Anderson S H, et al. Fractal dimension to describe soil macropore structure using X-ray computed tomography [J]. Water Resour Res, 1994, 30 :691 ~ 700.
- [19] Zeng Y, Gantzer C J, Payton R L, et al. Fractal dimension and lacunarity determined with X-ray computed tomography [J]. Soil Sci Soc Am J, 1996, 60 :1718 ~ 1724.
- [20] Bouldin J D, Freeland R S, Yoder R E, et al. Nonintrusive mapping of preferential water flow paths in West Tennessee using ground penetrating radar [A]. In : Proceedings of the Seventh TN Water Resources Symposium [C]. Nashville, TN, 1997. 24 ~ 29.
- [21] Freeland R S, Yoder R E, Ammons D T. Observing preferential flow paths beneath West Tennessee 's loess terrains using ground penetrating radar [J]. Tennessee Agri Science, 1997, 181 :51 ~ 56.
- [22] Piyush Singh, Kanwar R S. Preferential solute transport through macropores in large undisturbed saturated soil columns [J]. J Environ Qual, 1991, 20 :295 ~ 300.
- [23] Li Yimin, Masoud Ghodrati. Preferential transport of solute through soil columns containing constructed macropores [J]. Soil Sci Soc Am J, 1997, 61 :1308 ~ 1317.
- [24] Edwards W M, Shipitalo M J, Dick W A, et al. Rainfall intensity affects transport of water and chemicals through macropores in no-till

- soil [J]. Soil Sci Soc Am J, 1992, 56 :52 ~ 58.
- [25] Shipitalo M J, Edwards W M, Dick W A, et al. Initial storm effects on macropore transport of surface-applied chemicals in nontilled soil [J]. Soil Sci Soc Am J, 1990, 54 :1530 ~ 1536.
- [26] Shipitalo M J, Edwards W M. Effects of initial water content on macropore/matrix flow and transport of surface-applied chemical [J]. J Environ Qual, 1996, 25 :662 ~ 670.
- [27] Leaney F W, Smettem K R J, Chittleborough D J. Estimating the contribution of preferential flow to subsurface runoff from a hillslope using deuterium and chloride [J]. J Hydrol, 1993, 147 :83 ~ 103.
- [28] Espeby, Bengt. Tracing the origin of natural waters in a glacial till slope during snowmelt [J]. J Hydrol, 1990, 118 :107 ~ 127.
- [29] Brakensiek D L, Rawls W J, Longsdon S D. Fractal description of macroporosity [J]. Soil Sci Soc Am J, 1992, 56 :1721 ~ 1723.
- [30] Rawls W J, Brakensiek D L, Longsdon S D. Predicting saturated hydraulic conductivity utilizing fractal principles [J]. Soil Sci Soc Am J, 1993, 57 :1193 ~ 1197.
- [31] Rawls W J, Brakensiek D L, Longsdon S D. Estimation of macropore properties for nontilled soils [J]. Transactions of the ASAE, 1995, 39(1) :91 ~ 95.
- [32] Van Genuchten M T, Wierenga P J. Mass transfer studies in sorbing porous media, I. Analytical solutions [J]. Soil Sci Soc Am J, 1976, 40 :473 ~ 480.
- [33] Van Genuchten M T, Wierenga P J. Mass transfer studies in sorbing porous media, II. Experimental evaluation with tritium ($^3\text{H}_2\text{O}$) [J]. Soil Sci Soc Am J, 1977, 41 :272 ~ 278.
- [34] Skopp J, Gardner W R, Tyler E J. Solute movement in structured soils : two-region model with small interaction [J]. Soil Sci Soc Am J, 1981, 45 :837 ~ 842.
- [35] Gerke H H, van Genuchten M T. A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media [J]. Water Resour Res, 1993, 29 :305 ~ 319.
- [36] Gerke H H, van Genuchten M T. Evaluation of a first-order water transfer term for variably saturated dual-porosity flow models [J]. Water Resour Res, 1993, 29 :1225 ~ 1238.
- [37] Jarvis N J, Jansson P E, Dik P E, et al. Modelling water and solute transport in macroporous soil, I. Model description and sensitivity analysis [J]. J Soil Sci, 1991, 42 :59 ~ 70.
- [38] Jarvis N J, Bergstrom L, Dik P E. Modelling water and solute transport in macroporous soil, II. Chloride breakthrough under non-steady flow [J]. J Soil Sci, 1991, 42 :71 ~ 81.
- [39] Chittaranjan Ray, Ellsworth T R, Valocchi A J, et al. An improved dual porosity model for chemical transport in macroporous soils [J]. J Hydrol, 1997, 193 :270 ~ 292.
- [40] Beven K, Germann P. Water flow in soil macropores, II. A combined flow model [J]. J Soil Sci, 1981, 32 :15 ~ 29.
- [41] Germann P. Preferential flow and the generation of runoff, 1. Boundary layer flow theory [J]. Water Resour Res, 1990, 26 :3055 ~ 3063.
- [42] Chen C, Wagenet R J. Simulation of water and chemicals in macropore soils, I. Representation of the equivalent macropore influence and its effect on soil-water flow [J]. J Hydrol, 1992, 130 :105 ~ 126.
- [43] Chen C, Wagenet R J. Simulation of water and chemicals in macropore soils, Part 2. Application of linear filter theory [J]. J Hydrol, 1992, 130 :127 ~ 149.
- [44] Beven K J, Germann P. Water flow in soil macropores, III. A statistical approach [J]. J Soil Sci, 1981, 32 :31 ~ 39.
- [45] Beven K J, Robin Charke T. On the variation of infiltration into a homogeneous soil matrix containing a population of macropores [J]. Water Resour Res, 1986, 22 :383 ~ 388.
- [46] Workman S R, Skaggs R. A water management model capable of simulating preferential flow [J]. American Society of Agricultural Engineers, 1990, 33(6) :1939 ~ 1948.
- [47] Gwo J P, Jardine P M, Wilson G V, et al. A multiple-pore-region concept to modeling mass transfer in subsurface media [J]. J Hydrol, 1995, 164 :217 ~ 237.
- [48] Durner W, Fluhler H. Multi-domain model for pore-size dependent transport of solutes in soils [J]. Geoderma, 1996, 70 :281 ~ 297.
- [49] Steenhuis T S, Parlange J Y, Andreini M S. A numerical model for preferential solute movement in structured soils [J]. Geoderma, 1990, 46 :193 ~ 208.
- [50] Jurg Hosang. Modelling preferential flow of water in soils—a two-phase approach for field conditions [J]. Geoderma, 1993, 58 :149 ~ 163.
- [51] Steenhuis T S, Boll J, Shalit G, et al. Simple equations for predicting preferential flow solute concentration [J]. J Environ Qual, 1994,

23 :1058 ~ 1064.

- [52] Shalit G, Steenhuis T S. A simple mixing layer model predicting solute flow to drainage lines under preferential flow [J]. J Hydrol, 1996, 183 :139 ~ 149.
- [53] Montas H J, Eigel J D, Engel B A, et al. Deterministic modelling of solute transport in soils with preferential flow pathways, Part1. model development [J]. American Society of Agricultural Engineers, 1997, 40(5) :1245 ~ 1256.
- [54] Moreno L, Tsang C F. Flow channeling in strongly heterogeneous porous media : A numerical study [J]. Water Resour Res, 1994, 30 : 1421 ~ 1430.
- [55] Moreno L, Tsang W Y, Tsang C F, et al. Flow and tracer transport in a single fracture : A stochastic model and its relation to some field observations [J]. Water Resour Res, 1988, 12 :2033 ~ 2048.
- [56] Jury W. A Simulation of solute transport using a transfer function model [J]. Water Resour Res, 1982, 18 :363 ~ 368.
- [57] White R E, Thomas G W, Smith M S. Modeling water flow through undisturbed soil cores using a transfer function model derived from $^3\text{H}_2\text{O}$ and C_l transport [J]. J Soil Sci, 1984, 35 :159 ~ 168.
- [58] Grant S A, Jabro J D, Fritton D D, et al. A stochastic model of infiltration which simulates “ macropore ” soil water flow [J]. Water Resour Res, 1991, 27 :1439 ~ 1446.
- [59] Mallants D, Jacques D, Vanclooster M, et al. A stochastic approach to simulate water flow in macroporous soil [J]. Geoderma, 1996, 70 :299 ~ 324.

Advances in Study of Water and Solute Transport Mechanism in Macroporous Soil

FENG Jie, HAO Zhen-chun

(*Water Resources Development and Utilization Laboratory, Hohai Univ., Nanjing 210098, China*)

Abstract : Advances in the study of experiments on and models for water and solute transport in macroporous soils are summarized. It is pointed out that a large number of experiments should be done and observing method improved so that a vast amount of data can be obtained and macropore flow be studied qualitatively and quantitatively, that models can be improved and applied to practice only when the technology for parameter measurement and determination is developed, that new simulating and numerical methods are needed to solve highly nonlinear and unsteady problems in macropore flow, and that the key point for future simulation research should not be deterministic models but stochastic models.

Key words : macropore ; soil matrix ; experiment ; model