

# 土壤中优势流现象的研究进展

程竹华 张佳宝

(中国科学院南京土壤研究所 南京 210008)

**摘要** 深层土壤和地下水的污染已经引起了人们的普遍关注。大量的研究证明,优势流是导致这一结果的不可忽视的主要因素之一。许多溶质迁移试验证明了土壤中优势流是普遍存在而不是个别的、例外的现象。优势流存在时,水分和溶质能够以比在均质多孔介质中更快的速度到达更深层次的土壤甚至是地下水,引起土壤和地下水环境的恶化。本文从人们对优势流的认识过程、数学模拟以及优势流与农业生产管理的关系三个方面综述了国际上优势流现象的研究进展。

**关键词** 土壤;优势流;环境恶化

随着现代农业的发展,大量的化学物质(化肥、农药、除草剂)作为其不可缺少的生产资料也随之进入土壤生态环境。我们知道,土壤生态系统本身具有一定的自净能力,而且这种自净能力对地下水也具有一定的屏蔽保护作用,因此,农业化学物质施用的负效应长期以来被人们所忽视。然而事实上,即使是一些迁移性小、降解周期短、残留量低的农业化学物质仍然能在地下水中检测到:1979年美国从机井中检出有机农药<sup>[1]</sup>;1980年美国24个州的地下水中检出有机污染物,在一些地区的地下水中亦发现杀虫剂和除草剂等农药,而且这些农药的滞留时间远比降解周期长得多<sup>[2]</sup>;京津地区的地下水也检出17种美国国家环保局优先监测和防治的有机污染物,有机氯农药在土壤、水体中残留至今仍可检出,所有采样点均可检出六六六类有机氯农药,而DDT约有近千分之一的剂量经土壤渗入到地下水中<sup>[3]</sup>。当然能够导致这一结果的因素很多,然而研究发现优势流(preferential flow)是其中不可忽视的主要因素之一。

## 1 土壤中优势流现象的认识过程

早在一个多世纪以前,J. B. Lawes等人<sup>[4]</sup>在Rothamsted研究降雨和排水的数量和成分时就已经发现,加到土壤表面上的水有相当数量通过大孔隙快速迁移,而与土壤本身所含水分只发生微弱的作用,随后的排出水才能更好地代表土壤基质中的水,因此他认为,土壤排出水可以分为两部分:(1)迁移过程中其成分未发生变化,由土壤开口管道排出的水;(2)由土壤饱和部分的孔隙排出的水。这就是优势流的最初发现。R. E. Horton认为<sup>[5]</sup>土壤裂隙、虫孔和根孔都能显著增加入渗。1940年G. R. Free等人<sup>[6]</sup>在研究68种土壤的理化性质时,也发现了入渗速率与非毛管孔隙度之间有一定的联系,但当时并未引起人们的重视。直到本世纪60、70年代,不少科学家在研究中才重新注意到了这种现象,即土壤水分和溶质能够绕过土壤基质通过大孔隙迁移,到达深层土壤甚至是地下水。森林学家R. Z. Whispkay研究指出<sup>[7]</sup>,暴雨过程中大量水分通过大孔隙迅速流失对于森林土壤来说是非常重要的现象,他把这种现象称为亚表层暴流(subsurface storm flow),并总结了前人在定量描述土壤大孔隙中的水分运动方面所作出的尝试。同样是森林土壤,G. M. Aubertin<sup>[8]</sup>测得水分可通过大孔隙迁移至10m或

10m以下的深度,而且由于水分的这种“优先”通过大孔隙向下的运动,大孔隙中水分最初并不使土壤变湿,而是在几小时后,由大孔隙中水分的横向运动湿润土壤。

研究者们逐渐发现,大孔隙不仅能将水分和溶质传导到深层土壤甚至是地下水,而且其传导的速率和数量相对于大孔隙所占的体积来讲都是十分可观的。W. Ehlers<sup>[9]</sup>在研究耕作土壤和非耕作土壤中虫孔对入渗速率的影响时发现,虽然虫孔的体积仅占到总体积的0.2%,但其最大导水率可达1mm/min。P. Germann和K. Beven<sup>[10]</sup>在用大型称重式渗漏测定仪研究水分运动时发现,当降雨强度很大时,土壤中水分运动在入渗过程中和入渗结束后较短的时间内都呈显著的非均一性,迁移速度快的水仅用1—2天的时间就可以到达220cm的渗漏测定仪的底部,而迁移速度慢的水分则需大约6个月的时间,其速率之比可达100:1—400:1。而Thomas. Aley<sup>[11]</sup>认为在其研究的土壤上,对地下水的补给,大孔隙流(macropore flow)是弥散流(diffuse flow或Darcy flow)的5倍。最近几年,关于植物根孔、土壤生物虫孔能使土壤导水率显著增加的报道很多<sup>[12-14]</sup>,在这些研究中,人们发现即使水流很小时,仍有优势流的发生。随着研究的深入,人们认为所谓的大孔隙并不仅仅指那些由土壤干燥收缩、土壤中物质的化学风化、冻结解冻循环、植物根孔、土壤生物虫孔等过程形成的可见的孔隙,只要是直径大于75 $\mu\text{m}$ 的孔隙都能导致水分和溶质的优势迁移<sup>[15,16]</sup>,甚至直径仅仅有40 $\mu\text{m}$ 的较小孔隙,如果在土壤中是连续的,其传导水分的数量仍然是相当可观的<sup>[17]</sup>。因此有人认为,只要是比由土壤个体颗粒(individual soil particle)简单堆集所形成的孔隙大的孔隙都可以称为大孔隙<sup>[18]</sup>。然而,将孔隙的大小作为判断其是否具备形成“大孔隙流”的唯一条件是不够的。孔隙的结构同样十分重要<sup>[19]</sup>。

另外,大孔隙也并非优势流产生的唯一土壤条件。研究表明,如果土壤溶液中存在某些能够与污染物结合的化合物,而这种结合使其可移性增加;或是非稳态流形成的“指状”或“舌状”流,同样会加速污染物在土壤中的迁移。因此,凡是溶质和水分能够加速迁移的过程都可称为优势流<sup>[14]</sup>。

从上述可以看出,优势流是田间土壤中非常普遍的一种水分和溶质运移形式,其存在将导致溶质快速向下迁移,从而有可能引起地下水污染,因此,对其进一步深入研究是很有必要的。目前对优势流的研究主要集中在对大孔隙流的研究上。

## 2 优势流现象的存在对溶质迁移理论研究的影响

当前,水分和溶质迁移的定量研究主要有两种途径<sup>[20]</sup>:一种方法是用统计学方法(statistical approach),从田间或实验室测得化学物质的浓度,进而将溶质迁移时间结构参数化,得到一个随机数学模型(例如R. Ababou等的复合模型<sup>[21]</sup>;W. A. Jury传递函数模型<sup>[22]</sup>)。另一种方法是现象学方法(phenomenological approach)。这种方法将溶质迁移过程用一个确定性的数学模型来表示,然后用解析法或者是数值法来求解方程。将这两种方法相结合,即用统计学方法为确定性模型选择参数值,或者将随机变量本身结合到控制方程中以组成随机方程,这样就可以缩小理论同观测结果之间的差距。这些准随机模型(quasi-statistical model)曾被应用成功,然而美中不足的是它们非常复杂,而且对未进行计算的地点和过程不能够保证其有效性,因此其应用又受到很大的限制。

## 2.1 现象学理论模型

由于土壤孔隙的几何形状非常复杂,要从微观水平上(即以单个孔隙或孔隙系列为基础)来模拟溶质迁移很困难,所以,目前大多数的现象学模型都是从宏观水平上来描述溶质迁移的。这些理论认为,在宏观水平上,化学物质随流体进行对流迁移,同时伴随着弥散过程,使得化学物质混合、传播至达到平均孔隙流速。而在这些过程的基础上,再附加另外的一些相关的化学过程,如吸附-解吸;反应和降解等。也就是说,这些模型都是建立在传统的溶质迁移方程-对流-弥散方程(Convective-Diffusive Equation, 简称CDE)<sup>[23]</sup>的基础上的,描述的是均质多孔介质中平均的水流路径下的溶质迁移规律。CDE方程没有考虑大孔隙等优势路径中的溶质迁移,也不能预测发生在地下水中的化学物质浓度的时空变异性。然而,在过去相当长的时间里该方程被广泛地应用于实验室土柱模拟试验。对流-弥散过程被认为是得到充分认识和理解的一个过程,即使是在田间试验中,这一过程仍能很好地得到解释。因此无论是在实验室还是在田间试验中凡是出现预测值与实测值发生偏离(在穿透曲线上表现为溶质较早的初始穿透和拖尾现象),一般被归因于其它相关的化学过程的存在而不是对流-弥散模型的失败。然而,研究者逐渐发现CDE方程描述的平均速度在田间其意义不大,这一结论是通过示踪试验得到的。M. S. Andreini 和 T. S. Steenhuis<sup>[24]</sup>通过染色示踪试验,利用格式渗漏测定仪收集土柱流出液时发现,不同格室中流出液的流出速率、最高浓度都有明显的差异,而且示踪剂和染料的穿透时间都表现为免耕土壤比传统耕作土壤要早得多。因此要定量描述溶质迁移过程就必须发展融合优势流在内的数学模型。最先作出这种尝试的是 M. Th. Van Genuchten 和 P. J. Wierenga<sup>[25]</sup>、T. M. Addiscott<sup>[26]</sup>以及 D. A. Barry 等人<sup>[27]</sup>,他们提出了活动水(mobile water)和非活动水(immobile water)的概念,这一理论认为在团聚体内部的小孔隙往往一端开口,而另外一端被封堵,互不连通,水在其中呈静止状态,基本不流动,仅有一些缓慢的扩散;而团聚体之间的一些大孔隙,其连续度大,水流动得快,是水流的主要通道。因此对这种土壤进行溶质研究时应考虑其基模的非均一性。于是,在建立模型时,土壤水被划分为存在于截然不同的两类孔隙中的水,对每一类孔隙组分别运用CDE方程,而两方程以一个源汇项相联系,此类模型在描述溶质穿透前期和拖尾现象时都较CDE方程有了改进,但是它也存在着很大的缺陷:将土壤水仅分为两部分是不切实际的,因而输入参数往往是靠穿透曲线的拟合来获得,而且非稳态条件下不能应用。除此之外,1990年 T. S. Steenhuis 等人提出了重力流理论及其模型<sup>[20]</sup>,这种理论假设水分和溶质主要在重力的作用下作垂直运动,将导水率看成土壤含水量的函数,分段近似,以此来确定不同流速下的水流路径,在一定的水流路径中(即一定的孔隙组群中),水和溶质以一定的速度进行迁移,而不同的水流路径之间又进行着溶质的相互交换,当这种交换进行得完全彻底时,模型简化为传统的溶质迁移模型-CDE,即相当于均质介质中的水分和溶质迁移,没有优势流现象的存在;M. Th. van Genuchten 与 R. J. Wagenet 在前人工作的基础上提出了两位-两区模型(two-site/two-region models)<sup>[28]</sup>;Peter F. Germann 与 Keith Beven<sup>[29]</sup>用运动波理论来模拟大孔隙流,同时设立一个库函数来描述大孔隙周围的土壤基质对大孔隙流的吸附等等。所有上述理论和模型都由于其种种假设条件使得土壤系统模型过于简化,脱离土壤实际情况而存在着这样或那样的缺陷。

## 2.2 统计学模型

水分和溶质在土壤中的迁移受诸多因素的影响,土壤固有的变异性是其中最主要的因素之一,只有对土壤中各种作用机制都有一个准确的描述,才能找到较为理想的模型,但这是异常困难的事。因为田间土壤的空间变异性很大而且异常复杂,以至于有的研究者甚至认为建立机理模型是不可能的事情。为避开对土壤这一复杂系统的描述,人们提出将土壤系统看成一个“黑箱”,不考虑水分和溶质在其中运动的真正机理,而以建立在概率理论基础上的随机模型来模拟土壤中溶质迁移,这就是统计学方法。E. Bresler 和 G. Dagan<sup>[30]</sup>、A. Amoozegar - Fard 等人<sup>[31]</sup>以及 W. A. Jury<sup>[22]</sup>都曾用这种方法建立模型。在前两者的模型中,都是假设水分和溶质的迁移区域是由许多多孔柱状物组成,每一个多孔柱都有明确的特性和边界条件,而弥散系数与孔隙中水分运动速度成比例,这两者都呈对数分布,在每一个水流区域中土壤特性是一致的,一维的 CDE 是适用的,弥散系数也是确定的常数。W. A. Jury<sup>[22]</sup>提出的传递函数理论及其模型中,土壤被看成一个线性系统,而溶质迁移的各个方面都是局部溶质的线性函数,因此所有影响溶质分子在土壤中的存在时间或与之相当的迁移距离的过程都可以用一个概率密度函数(pdf)来表示,这个概率密度函数称为该系统的传递函数。进、出该系统的溶质浓度存在着以下的关系:

$$C_o(t) = \int_0^t C_S(t-t')f(t')dt'$$

其中  $f(t')$  是溶质迁移时间的概率密度函数。当测得某一深度的溶质速率分布的平均和标准偏差时,就能精确预测出溶质在更深的土层和以后更长时间里的分布,这种方法在理论上是很吸引人的,但是这里有一个假设条件:土壤物理性质随深度的增加没有显著的变化。可以看出假设条件本身就已简化了土壤系统。而且对以下这些问题,目前人们尚不能解释:(1)在长为  $l$  土柱中测得的某个稳态水流速率下的概率密度函数是否能用于预测另一流速下的出流体浓度;(2)在一定长度的土柱中,一定的稳定流速下测得的某一深度的概率密度函数,是否能用于预测同一土柱、同一流速的另一深度下的出流体的浓度等等。即使没有以上问题,要预测田间任何一个新点的水分和溶质迁移状况,所有的参数都必须重新测定,因此,其田间应用受到很大的限制。

另外,除以上两种主要的研究方法外,人们还试图通过分析形态学数据来揭示优势流存在情况下的溶质迁移规律<sup>[18]</sup>。用微观形态学方法测得大孔隙的大小、类型、形状以及其连续性,然后,可以对优势流的形成作经验性的阐述。目前,用这种方法可对质地相同但大孔隙结构不同的土壤的穿透曲线作出合理的解释。另外,结合染色技术,为新发展的物理模型提供基本的边界条件。

总之,在存在优势流现象的土壤中,水分和溶质迁移的模拟研究还有待进一步深入展开。

### 3 优势流现象与农业生产管理的关系

“雷雨不湿土”的现象在农业生产管理中经常会遇到,发生这种情况的原因,除了降雨强度大时雨水通过地表径流流失外,水“穿过”土壤(既优势流)只在土壤中留一小部分,是另一个重要的水分损失途径。V. L. Quisenberry 和 R. E. Phillips 研究指出<sup>[32]</sup>:在一些结构良好的土壤上,如果供水强度很大的话,大部分的水分都通过土壤大孔隙流走,几乎没有与土壤基质中的水分发生置换作用,而在其它结构性差的土壤上,50%或更多一些的水分被置换。由于置换数

量与水流在大孔隙中和土壤基质中的速率之比有关,而这一比率受供水强度、土壤结构、孔隙相对大小以及土壤含水量和耕作影响,因此农业管理措施能在很大程度上影响优势流的发生及其强度。目前,美国不少农田实行保护性耕作(conservation tillage),预计到2010年将有近一半的农田采用这种耕作方式,保护性耕作能够防止土壤压板,保持土壤水分,改善表土的结构状况等,但同时由于土壤中许多植物根孔和动物孔穴得以保存,大大改善了土壤的大孔隙度,因此,保护性耕作的土壤比传统耕作条件下的土壤更容易发生优势流<sup>[24]</sup>,这是否会对农业生产直接产生以下影响则是完全可以推断出来的<sup>[33]</sup>:

- (1) 由于部分水很快流到根区以下,因此降雨和灌溉的效果就不象预想的那样明显;
- (2) 雨水或灌溉水对地下水的补给可能在土壤含水量达到田间持水量以前就已发生;
- (3) 利用以水压盐的方法来改良盐土的结果可能是,土壤表面部分盐分能够移动到更深的土层,然而许多盐分却被水绕过,仍然停留在近地表的地方;效果不理想;
- (4) 虽然不太可能发生某一时间根据达西理论水流将大量污染物带到地下水的情况,但是,通过优势流一些农业化学物质却可以以更快的速度到达更深层次的土壤甚至是地下水,造成化肥、农药和除草剂的施用效果不明显,而且对土壤和地下水的生态环境也造成了威胁。因此,如何通过合理的农业管理措施来控制优势流,成为一个重要的研究课题。

#### 4 结语

优势流现象是土壤中客观存在的一种很重要的现象。它的存在不仅对地下水的质量构成了威胁,而且同时会造成化肥的流失、农药和除草剂的药效不能充分发挥。因此,加强优势流运动规律的研究对田间土壤水分和溶质迁移的实用模型的建立、水分利用率的提高、地下水污染防治措施的选择具有关键作用。现有理论模型没有一种能证明是坚实可靠的,因为优势流是发生在田间的一种现象,大量的田间资料的缺乏使理论验证工作还无法进行。我国是一个农业大国,化学物质的施用量很大,而且还有日渐增加的趋势。然而目前我国在这方面的工作开展得还比较少,这是值得重视的一个问题。

#### 参 考 文 献

- 1 刘兆昌等.地下水系统的污染与控制.北京:中国环境科学出版社.1991.124-125
- 2 刘兆昌等.地下水系统的污染与控制.北京:中国环境科学出版社.1991.185
- 3 魏爱雪等.京津地区地下水中有机的研究.环境科学学报,1986,6(3):295-305
- 4 Lawes J. B., J. H. Gilbert, R. Warrington. On the amount and composition of the rain and drainage waters collected at Rothamsted. William Clowes and Sons, LTD. London. 1882.
- 5 Horton, R. E., Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1936, 1:401-429
- 6 Free, G. R., Browning, G. M. and Musgraves, G. W., Relative infiltration and related physical characteristics of certain soils. in U.S. Dep. Agric. Tech. Bull., 1940, 729:52pp
- 7 Whiphkey, R. Z., Theory and mechanics of subsurface stormflow. in W. E. Sopper and H. W. Lull (ed.) Int. Symp. on For. Hydrol., Natl. Sci. Found., New York: Pennsylvania State Univ., University Park, Pa. Pergamon Press. 1965, p255-260

(下转第331页)

或不施,以发挥锌肥的后效作用。

## 参 考 文 献

- 1 中科院南京土壤研究所微量元素组编著. 土壤和植物中微量元素分析方法, 科学出版社, 1997年, 390—394



(上接第319页)

- 8 Aubertin, G. M. . Nature and extent of macropores in forest soils and their influence on subsurface water movement. USDA For. Serv. Res. Pap. NE-192. Northeast. For Exp., Stn., Upper Darby, Pa.:33
- 9 Ehlers, W. . Soil Sci., 1975, 119:242-249
- 10 Germann, P. and K. Beven. J. Soil Sci., 1981, 32:31-39
- 11 Aley, Thomas. A model for relating land use and groundwater quality in southern Missouri. In R. R. Dillmarter and S. C. Csallany (ed). Hydraulic problems in Karst regions. Western Kentucky Univ., Bowling Green, Ky. 1977 p.232-332
- 12 Bichi, T. J., T., E., Fenton, H. D. Luce, T. A. Dewitt. Soil Sci. Soc. Am. J., 1988, 52:1708-1714
- 13 Sollins, P., R. Radulovich. Soil Sci. Soc. Am. J., 1988, 52:1168-1173
- 14 Yimin Li and Masoud Ghodrati. Soil Sci. Soc. Am. J., 1994, 58:653-659
- 15 Johnson, W. M., McClelland, J. E. and McCaleb, S. A. . Soil Sci., 1960, 89:319-321
- 16 Brewer, R. . Fabric and mineral analysis of soils. John Wiley New York, NY. 1964. pp 320
- 17 Bouma, J., Jongenius, A. and Schoonderbeek, D. . Soil Sci. Soc. Am. J., 43:261-265
- 18 Bouma, J., Agric. Water Manage., 1981, 3:235-250
- 19 Luxmoore, R. J. . Soil Sci. Soc. Am. J., 1981, 45:671
- 20 Steenhuis, T. S., J. Y. Parlange and M. S. Andreini. Geoderma, 1990, 46:193-208
- 21 Ababou, R., McLaughlin, D., Gelhar, L. W. and Tompson, A. F. B. Numerical simulation of saturated/unsaturated flow fields in randomly heterogeneous porous media: computational aspects. Supercomputers in hydrology-Future Directions DOE/ER-0331. 1986, PP 33, 34
- 22 Jury, W. M., Water Resour. Res., 1982, 18:363-368
- 23 Biggar, J. W. and D. R. Nielsen. Agronomy, 1967, 11:254-274
- 24 Andreini, M. S. and Steenhuis, T. S. Geoderma, 1990, 46:85-102
- 25 Van Genuchten, M. Th. and Wierenga, P. J., Soil Sci. Am. J., 1976, 40:473-480
- 26 Addiscott, T. M., J. Soil Sci., 1977, 28:554-563
- 27 Bary, D. A., Parlange, J. Y., Saffinga, P. G. and Rose, C. W., Irrig. Sci., 1983, 4:277-287
- 28 Van Genuchten, M. Th. and R. J. Wagenet, Soil Sci. Soc. Am. J., 1989, 53:1303-1310
- 29 Peter F. Ggermann and Keith Beven, Water Resour. Res., 1985, 21:990-996
- 30 Bresler, E. and G. Dagan, Water Resour. Res., 1981, 17:1683-1693
- 31 Amoozegar-Fard, A., D. R. Nielsen. and A. W. Warrick, Soil Sci. Soc. Am. J., 1982, 46:3-9
- 32 Quisenberry, V. L. and R. E. Phillips, Soil Sci. Soc. Am. J., 1976, 40:484-489
- 33 Grant W. Thomas and Ronald E. Phillips, J. Environ. Qual., 1979, 8:149-152