

非饱和土壤中指流的研究进展*

史文娟, 汪志荣, 沈冰, 张建丰

(西安理工大学 水资源研究所, 陕西 西安 710048)

[摘 要] 指流是土壤中普遍存在的一种水分和溶质运移形式, 土壤中发生的指流现象将导致水分和溶质快速向下迁移, 从而引起深层土壤和地下水的污染以及水分和养分的流失。因此, 掌握其研究动态并对其进行深入研究很有现实意义。针对指流的实际情况, 从非饱和土壤中指流的试验方法、机理研究和模型预测等方面, 综合评述了国内外的研究动态, 并探讨了目前存在的问题和发展前景。

[关键词] 非饱和土壤; 指流; 湿润锋稳定性

[中图分类号] S157.1

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2004)07-0128-05

指流(Finger flow)是优先流(Preferential flow)的一种, 是指水分和污染物在非饱和土壤中迁移时, 并非整齐均匀的向下流动, 而是绕过大部分土壤基质呈“指状”或“舌状”流动的现象。指流是土壤中普遍存在的一种水分和溶质运移形式, 指流发生时, 尽管其路径只占土壤基质的很小一部分, 但却会携带较大的水流量, 使污染物等可溶性物质快速的抵达深层土壤甚至地下水, 从而加速了土壤和地下水污染, 同时也减少了植物对水分和养分的吸收利用, 影响了农药、杀虫剂等药效的充分发挥^[1]。在农业用水管理中, 由于指流的普遍存在, 雨水和灌溉水对地下水的补给可能会在含水量到达田间持水量之前就已发生, 同时降雨和灌溉以及以水压盐的效果也不会如想象的那么理想^[2]。在石油工业领域, 指进(指流)的发育程度直接影响到流体的驱扫面积、饱和度分布和采收率^[3]。此外, 在地质结构形成的历史上, 岩浆渗流过程中发生的指流现象对北极陆面永冻层的溶化也起到了非常重要的作用^[4]。基于上述原因, 目前指流的研究越来越受到人们的广泛关注。现针对近年来指流的研究现状和进展进行综述, 以期为其在农业灌溉中的应用提供资料。

1 指流的理论研究

指流的研究始于 20 世纪 30 年代, 且最初是在石油工业领域开始的, 因为在注水采油过程中, 当两相流(如油和水)发生置换时, 由于两种流体的密度和粘滞度不同, 导致置换界面的湿润锋不稳定而出

现指流, 使油井很快见水, 石油的采收率降低^[3]。土壤学领域对指流的研究相对迟缓, 直到 1972 年, Hillel 和 Parlange^[5]利用层状土(细质土覆盖于粗质土之上)进行积水入渗时发现了指流现象, 指流研究才受到越来越多的关注, 指流特性和机理的理论研究也受到了广泛的重视。

1.1 试验研究

1.1.1 试验设计 在试验设计方面, 为了使指流的路径和形态可视化, 室内二维指流试验通常在两块间距 10 cm 左右玻璃板组成的二维容器中进行, 且多以粗质砂性土作为主要研究对象。较为简单的三维室内指流试验一般在直径大约 30 cm 的柱状容器内进行, 试验结束后将试验模型和土样速冻, 干土散落指流的形状和特性即会呈现出来^[6]。大田指流试验是将土面开挖后, 通过染色示踪法来观察入渗过程中的指流情况^[7, 8]。

1.1.2 研究方法 近年来, 为了观察土壤中指流的运动过程, 尤其是为了确定与指流发生有关的土壤学特性, 现已开发出了许多新技术。如为了观测水流和溶质的运移模式, 采用染色示踪技术, 对彩色或黑白照片进行处理以显示染色区域在水平和垂直方向上的百分比, 进而显示指流的范围和力学特性^[9]。因染色模式经常表现出无规律的回旋状几何特征, 从而促使许多学者从分形(Fractal)增长的角度对指流的发育予以描述和解释^[8, 10], 即利用两个分维来描述指流的空间结构, 其中一分维数与染色结构的周长有关, 另一分维数与空间填充特性有关。一般认

* [收稿日期] 2003-06-26

[基金项目] 国家自然科学基金项目(59879022; 49871038); 陕西省教育厅基金项目(04JK229-1); 西安理工大学青年基金项目

[作者简介] 史文娟(1972-), 女, 陕西武功人, 讲师, 在读博士, 主要从事农业水资源利用研究。

为, 后者包含更多的信息, 更能准确地描述优先途径的几何特征^[11], 但受人为因素的影响较大, 如摄像时胶片的灵敏性、所取角度的范围以及将图像由灰色尺度转为二进制时起始点的选择等都会因人而异。

1.1.3 参数测定 由于指流发生位置、时间的随机性和不可预测性, 其参数的测定尤其是含水量的分布就难以用传统的方法来测定。目前, 一种名为“水分视觉技术”的方法已在二维指流的定量研究中得到应用, 即在二维土样容器的背面安装均匀光源, 前面架设摄像机, 将穿过土样的光线录在录像带上, 借助计算机图像处理分析录像带上的图像, 即可得含水量; 也可用 X 光测定二维指流, 亦有运用地面渗透雷达测绘层状土及土壤夹层状况, 用计算机软件进行分析和处理^[12]。

测量土壤基质势的传统方法为张力计法, 但指流发育过程中基质势的变化较快, 而张力计本身又存在滞后效应较为明显这一缺陷, 因此测量难以做到实时监测。一种新型的张力计可使其对水分的反应时间小于 1 s, 从而使测量精度大大提高^[13]。

1.2 指流的发育机理

指流机理的研究是建立良好的定量化数值模型的基础。研究^[5, 14]表明, 指流多是在细颗粒土位于粗颗粒土之上时的两层土壤中产生, 最初的观点认为这是由于置换界面的不稳定所致。水流作为多相流的一个特例, 在非饱和土壤中入渗时, 气相和液相之间的界面会因种种因素的影响而变得不稳定, 从而产生指流。此种解释为多数学者所认可^[15, 16], 但并没有很好地解释起初均匀分布的水流会突然变成明显分离水流(即指流)的原因, 因此难以为人们所理解和接受。此后的研究在此方面作了进一步的探索, 1975 年 Philip 的试验^[17]表明, 当湿润锋后的压力梯度小于 0 时, 指流即会出现。Glass 则指出^[18], 湿润锋的不稳定主要由重力驱使, 由表面张力维持; 同时, 通过量纲分析推导, 认为当指流直径小于二维试验容器水平宽度或三维土柱直径时湿润锋不稳定, 反之湿润锋稳定。此两种解释都从理论上对湿润锋的稳定性作了定量说明, 但式中参数的物理意义却不明确。

1988 年, Hillel 等^[19, 20]提出, 土壤的粗细分层会导致湿润峰的不稳定, 并从能量守恒的观点予以解释, 即在积水入渗的早期, 湿润锋位于导水率较小的上层细质土壤中, 此时湿润锋处土壤的吸力很大, 以致于水分到达界面后不能直接进入导水率较大的粗

质砂层, 湿润锋暂停于界面, 而上层水在水势梯度下继续下渗, 水吸力逐渐减小直到水可以进入下层连通的最小孔隙并进而减小到可以进入周围的大孔隙。此时, 若下层土的饱和导水率大于上层土的供水速率, 界面处孔隙流速增加, 而砂层的空间变异性则会导致局部的加速现象发生, 其结果使起初均匀分布的流线趋于融合, 整个湿润锋面趋于狭窄, 并最终在空间上形成分离的流线即指流。此种解释基本上可以阐释直接观测到的指流现象, 因此更易于为人们所接受。

此后的研究^[21]进一步表明, 湿润锋前气压的变化也会引起湿润锋的不稳定性。在入渗过程中, 湿润锋前的气压会随入渗的进行逐渐增加, 当压力值大于积水深度和湿润锋前的毛管驱动力时, 气体逸出, 入渗率和湿润锋暂时稳定, 随后又处于周期性的波动状态, 这种不稳定的波动状态随时会诱发指流的产生。近年来, 一些大田试验的研究结果^[22, 23]显示, 土壤的斥水性(Water repellency)也是湿润锋不稳定的主要原因之一。砂性土壤因砂粒的比表面质地粗糙, 易形成斥水层, 当土壤湿度增加或温度升高时, 斥水性降低甚至消失^[24]; 当湿度减小时, 其斥水性较强且导水率较小, 因而极易产生指流^[22], 这也可能是层状土指流试验时底层选用砂性土的主要原因。此外, 也有人认为^[25], 当降雨强度或入渗通量小于土壤的饱和导水率, 即发生非蓄水性降雨入渗时, 会出现湿润锋的不稳定现象。

可以说, 湿润锋的稳定性和非稳定性是整个指流机理探索过程中的主要研究内容之一。孔祥言等^[3]进一步对置换界面的稳定性与非稳定性给予了界定, 认为土壤作为一种多孔介质, 不可能是完全均质的, 当介质中某一点邻域的渗透性比周围区域好, 即该点渗透率大于周围区域, 则界面运动到该点邻域时, 液体流动较快, 导致动界面在该点处产生一个“突点”; 即动界面在该点受到一个微小的扰动, 若此界面受到此微小扰动后能随时间增大而衰减, 则该界面是稳定的; 反之, 该界面不稳定。同时还指出, 若置换流体的流动性好于被置换流体, 则会导致动界面上任何微小的扰动迅速增长, 从而使得突点以“手指状”迅速向前延伸, 即产生指流现象。

指流除了在层状土壤中产生外, 亦可以在均质土壤中发生^[25, 26]。利用粒径大小一致的玻璃球进行易混合两相流置换试验的结果^[26]表明, 由于注入流体水溶液中无机盐浓度和梯度的差异, 使得置换液与被置换液的密度和粘滞度不会完全相同, 这样在

某种条件下,置换锋(湿润锋)就会变得不规则,尤其当一种密度更大、更粘滞的液体置换密度更小、更易流动的液体时,由于密度差异而引起的不平衡力会驱使前者加速,而后的粘滞力如不能平衡此力时,前者会以指状形式进入后者,即产生指流,这与孔祥言^[3]的分析有所矛盾。朱九成等^[27]认为,即使对于孔隙大小均匀的理想介质,由于注入流体速率的微小波动、注入通道的微小不规则性及实际渗流通道的迂曲性等就足以引发指流,虽然该文献并未对置换液和被置换液的密度和粘滞度进行分析,但最终都将置换界面的稳定性归结为三个因素,即流体密度、粘滞性及多孔介质的渗透性。笔者通过试验发现^①,对于结构相同的土体,当温度较低时不易产生指流,原因可能是由于温度降低导致水的粘滞性增加所致。

指流的形成除了与上述因素有关外,还与下层粗质砂土的初始含水量及分布有关。Baker 等^[20]的研究结果表明,当初始含水量较大时,指流发生的可能性会减小;而初始含水量较小且均匀分布时,则很容易引起湿润锋的不稳定而产生指流,这与较低含水量条件下砂土因斥水性较强而易产生指流的结论^[28]一致。Liu 等^[28]、Yuefa 等^[29]和 Docarlo 等^[30]发现,在早期入渗过后,当含水量剖面分布呈较大的空间变异性时,由于滞后作用的影响,早期的指流路径将会在随后入渗周期的较长一段时间内得以保持,从而导致长期指流过程的重复再现。当然也有持不同意见者, Glass^[11]曾报道,当指流接近试验装置的下界面时,指流路径中的水分会逐渐横向扩散到两边的干土中,直到整个剖面完全变湿,当侧向流停止时,指流路径仍是大部分水流的主要通道,这与笔者观测结果一致^①。

1.3 模型研究

了解指流的发生发展,量化其变化进程,并预测其发展趋势,除了应对指流的机理加以研究外,许多学者也提出了描述水分和溶质指流运移规律的模型。

在建立模型时,大多数学者以指流直径和指尖流速作为两个主要参数。Philip^[16]应用 Green-Ampt 入渗模型推导出指流直径的表达式,但其中的参数并没有考虑多孔介质的特性。Parlange^[15]和 Hillel^[19]在假定指流路径中水分饱和的前提下,根据湿润锋不稳定理论提出了有关指流直径的模型,

在假设湿润锋速度是由一个尖峰速度和一个平均速度组成的前提下,认为指流直径和指尖流速取决于土壤特性和边界供水条件。Glass 等^[11]通过量纲分析,从理论上推导出了指流直径和指尖流速的预报模型,认为流速越大,指流直径越大,其最小直径与土壤平均粒径有关,粒径越小,指流直径越大。对于细质砂土而言,最小指流直径可能都会大于所用试验容器的尺寸;而粗质砂土的最小指流直径可能要小于所用试验容器的尺寸,因而在试验条件下,指流现象更易在粗质砂土中被观测到。

此外,也有一些模型对有关指流的物理参数进行了预测。Selker 等^[11]通过指流发育过程中流速为常数的假定,求得了 Richard 方程的解析解,从而获得了经试验验证的指流含水量剖面分布的定量描述,同时提出了基质势实时监测情况下非饱和导水率的计算方法,并认为如果将导水率的计算与 Glass 等^[11]的指流预报模型相结合,就可以直接计算给定通量下的指流空间分布,并预测指流在多孔介质中的有效传输时间,这对于进一步预测指流易发区地下水污染的潜在威胁是很有价值的。

2 应用研究

对指流的研究是土壤水运动机理研究由均质走向非均质的一种体现^[31]。因此,对指流研究的进一步深入,首先促进了土壤水分、水势及水流模式等测试技术上的进步,这主要体现在染色技术、水分视觉技术及新型的张力计等方面;其次,水分和污染物在非饱和土壤中的迁移是目前土壤水和地下水研究的重要课题,多年来一直用一维数学模型进行估算,但并未能预测溶质对地下水污染所构成的潜在威胁,若考虑土壤中优先流的存在,则研究成果需重新估计^[32,33]。此外,“指流”的研究在土壤改良方面也发挥着重要作用,根据 Vervoot 等^[34]的结论,结构发育良好的土壤,水动力弥散系数较大,指流出现的几率小,此种成果将会直接地用以指导土壤的改良;斥水土壤很难被雨水湿润且分布面积较广,其中的水分分布主要呈无规律的“指状”,从而造成地表干燥,引起风蚀水蚀,导致土地退化。这一问题已引起澳大利亚、荷兰等许多国家的重视^[35]。为了去除斥水性,消除“指流”,研究人员^[3,5]在多年理论研究的基础上,提出了一些斥水土壤改良方法,如耕松或镇压土表及施用湿润剂等。

①2002 年资料,尚未公开发表。

在注水采油过程中, 指流的出现会使石油井很快见水, 从而导致采收率降低。针对二相流或多相渗流中指流的形成机理和发育规律, 在石油的注水开发过程中, 已采取了一些积极措施, 如在水中加入聚合物、表面活性剂、氢氧化钠、微乳液(胶东)等溶剂, 其目的在于增加注入液的粘度, 降低油水流动度比(渗透率与液体粘度之比), 进而削弱指流现象和增加驱扫面积, 提高采收率。此外, 也有在注入水中掺入空气、烟道气或天然气, 利用气阻效应, 阻止水沿大孔隙或高渗区窜流, 从而增加驱扫面积, 提高采收率^[3]。

多孔介质中优先流的研究是当前土壤物理、农业、水资源以及环境学科等研究的前沿问题^[36], 随着指流问题研究的逐步深入, 其成果会在相关领域得以应用和拓展。

3 问题与展望

指流的形成、存在以及发展是个相当复杂的问题, 目前尽管已有了一定的研究基础, 但是有关指流的研究尚处于很不完善的阶段, 仍存在着许多问题有待深入研究。

1) 研究表明, 粗质砂土易诱发指流的产生, 但对粗质砂土的定义却无严格的界定, 笔者曾以小于0.5

mm 的细沙为对象, 进行了二维条件下的指流试验^①, 发现指流现象仍会发生, 因此, 对于指流发生的砂土条件仍需作进一步的研究。

2) 由于指流发生的随机性和复杂性, 致使现有模型都存在一定的局限性。在室内严格控制条件下, 其预测结果与测试结果符合较好, 但由于缺乏大量田间实测资料的验证, 其实用性也受到质疑。同时, 现有的模型主要以确定性模型为主, 只有引入随机理论, 才能使模型得以完善, 并达到实用的程度。

3) 染色技术在指流研究中的应用, 使复杂的水流模式可以以很高的分辨率清晰地呈现出来, 因此一度为人们所接受和欢迎, 但其应用有一定的局限性, 如染色土样的挖取具有破坏性, 试验结果不可能在同一地点重复获得。另外, 在染色模式内, 得不到污染物浓度的差异特性; 且要求染色剂的化学性质不能对土壤和地下水造成污染。

指流是多孔介质中非常普遍的一种水分和溶质运移形式, 但由于上述原因, 使指流的研究难度较大, 只有进行大量的室内外试验, 同时改进观测方法, 获取大量的数据资料, 并提高模拟手段, 才能使指流理论不断完善, 进而解决非饱和土壤中与指流有关的水和溶质运移问题。

[参考文献]

- [1] Selker J, Leclerc P, Parlange J Y, et al. Fingering flow in two dimensions: predicting finger moisture profile[J]. Water Resource Research, 1992, 28(9): 2523- 2528
- [2] Izadi G R B, King B, Downing E. Preferential transport of bromide in undisturbed cores under different irrigation methods[J]. Soil Sci, 1996, 161(4): 214- 225
- [3] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 北京: 中国科学技术大学出版社, 2000
- [4] Gosink J P, Baker G C. Salt fingering in subsea permafrost: some stability and energy consideration[J]. J Geophys Res, 1990, 95: 9575- 9583
- [5] Hillel D E, Parlange J Y. Wetting front instability in layered soil[J]. Soil Sci Soc Am Proc, 1972, 36(5): 697- 702
- [6] 刘亚萍, 陈川. 土壤非饱和带的优先流[J]. 水科学进展, 1996, 7(1): 85- 89
- [7] Starr J L, Deroo H C, Frink C R, et al. Leaching characteristics of a layered field soil[J]. Soil Sci Soc Am J, 1978, 42: 376- 391
- [8] Hatano R, Booltink H W G. Using fractal dimensions of stained flow patterns in a clay soil to predict bypass flow[J]. J Hydrol, 1992, 135: 121- 131
- [9] Natsch A C, J Keel, Troxler J, et al. Importance of preferential flow and soil management in vertical transport of a biocontrol strain of *Pseudomonas fluorescens* in structured field soil[J]. Appl Environ Microbiol, 1996, 62: 33- 40
- [10] Bavette P, Boast C W, Ogawa S, et al. Influence of image resolution and thresholding on the apparent mass fractal characteristics of preferential flow patterns in field soils[J]. Water Resources research, 1998, 34(11): 2783- 2796
- [11] Glass R J, Parlange J Y, Steenhuis T S. Wetting front instability. I. Theoretical discussion and dimensional analysis[J]. Water Resources Research, 1989, 25(6): 1187- 1194
- [12] Liu Y, Bierck B, Selker J S, et al. High intensity X-ray and tensiometer measurements in rapidly changing preferential flow fields[J]. Soil Sci Soc Am J, 1993, 51: 1188- 1192

①2002 年资料, 尚未公开发表。

- [13] Selker J, Leclerc P, Parlange J Y, et al. Fingering flow in two dimensions I. Measurement of matric potential[J]. Water Resource Research, 1992, 28(9): 2513- 2521.
- [14] Raats P A C. Unstable wetting fronts in uniform and nonuniform soil[J]. Soil Sci Soc Am Proc, 1973, 37: 167- 172.
- [15] Parlange J Y, Hill E D. Theoretical analysis of wetting front instability in soils[J]. Soil Sci, 1976, 122: 236- 239.
- [16] Philip J R. Stability analysis of infiltration[J]. Soil Sci Soc Am Proc, 1975, 39: 1042- 1049.
- [17] Philip J R. The growth of disturbances in unstable infiltration flow[J]. Soil Sci Soc Am Proc, 1975, 39: 1049- 1053.
- [18] Glass R J. A study of wetting front instability in layered porous media[D]. New York: Cornell Univ, 1985.
- [19] Hillel D, Baker R S. A descriptive theory of fingering during infiltration into layered soils[J]. Soil Sci, 1988, 146(1): 51- 55.
- [20] Baker R S, Hillel D. Laboratory tests of theory of fingering during infiltration into layered soils[J]. Soil Sci Soc Am J, 1990, 54(1): 20- 30.
- [21] Grismer M E, Orang M N, Clausnitzer V, et al. Effects of air compression and counterflow in infiltration into soils[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1994, 120(4): 775- 781.
- [22] Rensma C J, Dekker L W, Hendrix J M H. Preferential flow mechanism in a water repellent sandy soil[J]. Water Resources Research, 1993, 29(7): 2183- 2193.
- [23] Dekker L W, Rensma C J. How water moves in a water repellent sandy soil I. Potential and actual water repellency[J]. Water Resources Research, 1994, 30(9): 2507- 2517.
- [24] 杨邦杰, Blackwell P S, Nicholson D F. 斥水性土壤中的水热运动规律与数值模型[J]. 土壤学报, 1996, 33(4): 351- 359.
- [25] Selker J S, Steenhuis T S, Parlange J Y. Wetting front instability in homogeneous sandy soils under continuous infiltration[J]. Soil Sci Soc Am J, 1992, 56(2): 1346- 1350.
- [26] Biggar J W, Nielsen D R. Chloride-36 diffusion during stable and unstable flow through glass beads[J]. Soil Sci Soc Am Proc, 1964, 28: 591- 595.
- [27] 朱九成, 郎兆新, 张丽华. 多孔介质中指进的发育机理及描述方法[J]. 水动力学研究进展, 1996, 11(3): 294- 297.
- [28] Liu Y, Steenhuis T S, Parlange J Y. Closed-form solution for finger width in sandy soils at different water contents[J]. Water Resources Research, 1994, 30(4): 949- 952.
- [29] Yuefa W, Zaisha M, Jayong C. The relationship between hysteresis and liquid flow distribution in trickle beds[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 1999, 7(3): 221- 229.
- [30] Docarlo D A, Bauters T W J, Darnault C J G, et al. Lateral expansion of preferential flow paths in sands[J]. Water Resource Research, 1999, 35(2): 427- 434.
- [31] 雷志栋, 胡和平, 杨诗秀. 土壤水研究进展与评述[J]. 水科学进展, 1999, 10(3): 311- 318.
- [32] Glass R J, Steenhuis T S, Parlange J Y. Wetting front instability as a rapid and far-reaching hydrologic process in the vadose zone[J]. J Contam Hydro, 1988, 3(2- 4): 207- 226.
- [33] Steenhuis T S. Preferential flow influences on drainage of shallow sloping soils[J]. Agr Water Manag, 1988, 14: 1- 4.
- [34] Vervoot R W, Radcliffe D E, West L T. Soil structure development and preferential solute flow [J]. Water Resource Research, 1999, 35(4): 913- 928.
- [35] 杨邦杰. 土壤斥水性引起的土地退化、调查方法与改良措施的研究[J]. 环境科学, 1994, 15(4): 88- 90.
- [36] 庄季屏. 中国土壤学在前进: 近半个世纪以来的中国土壤物理研究[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1995. 81- 83.

Review on the study of finger flow in unsaturated soil

SHI Wen-juan, WANG Zhi-rong, SHEN Bing, ZHANG Jan-feng

(Institute of Water Resources, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: Finger flow often occurs when water and solute transport in unsaturated soil. This will result in increasing contaminant for deeper soil and groundwater and exceed leaching of nutrient. The paper reviews and summarizes the studies home and abroad in experiment methods, origination mechanism, modeling and application, and points out the existing problem of recent researches and its progress in the future.

Key words: unsaturated soil; finger flow; wetting front stability