

多孔介质中指流的研究综述及展望^①

李贺丽^{1,2}, 李怀恩^{1*}, 王智³, 史文娟¹

(1 西安理工大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710048; 2 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

3 美国加利福尼亚州立大学 Fresno 分校地球与环境科学系, 弗雷斯诺, 加利福尼亚 93740)

摘要: 指流是土壤中普遍存在的一种水分和溶质运移形式, 指流的研究对土壤水分调节、灌溉方式的确定、土壤及地下水污染预测、污染物迁移过程模拟及生态环境保护等具有重要影响。本文根据国内外指流的研究现状, 从指流的发生条件、产生机理、量化判据、侧向扩散、影响因素以及数学模型等方面对指流研究已取得的主要成果进行综述和简评, 以期为进一步的深入研究提供参考。

关键词: 指流; 非稳定流; 发育规律; 影响因素; 数学模型

中图分类号: S157.1

近年来的最新研究表明, 土壤水溶液在自然与扰动土中运动时的主要区别在于是否可能发生大孔隙流 (macropore flow)、漏斗流 (funnel flow) 和非稳定流 (unstable flow) 一总称为优先流^[1] (preferential flow)。大孔隙流显然是由于土壤物理、化学和生物孔隙所致, 一般限于表层。大孔隙流对饱和土壤水的运移影响较大, 其流量可用 Poiseuille 法则计算^[1]。漏斗流是由于土壤中坡度各异的层状结构和零星障碍物 (或土壤空间变异性) 所致。降雨或灌溉停止后的非饱和土壤水将避开大孔隙和疏松以及难以透水的介质, 选择进水值较低且导水率较高、最易下渗的通道漏入深层。漏斗流呈“伸舌”状, 最初被称舌流^[2]。漏斗流可用 Richards 方程模拟计算^[1]。较为复杂的非稳定流是在土壤水下渗过程中由于湿润锋界面水-气二相流动动态失衡所致, 结果产生“指形”流道, 或称指流^[3]。非稳定流可以在完美的均质和非均质土中发生, 也可以在无介质条件下水-气-油多相推移过程中发生^[3-6]。因此, 非稳定指流的形成实质是由于流体动力学的原因。介质的参与可以在不同程度上影响指流的发生几率和形态。当舌流和大孔隙流的前锋呈非稳定状时指流也会在孔壁或裂隙中形成。指流不仅可将有限的地表水和土壤水引入地下数十米甚至地下含水层造成污染, 而且可以较快地疏干表层土壤水而造成提前干旱^[7-8]。这使农业用水管理中降雨和灌溉以及以水压盐的效果不如想象的那么理想, 同时使可溶性物质

快速地抵达深层, 加速了土壤和地下水的污染, 影响了农药、杀虫剂等药效的充分发挥, 也减少了植物对水分和养分的吸收^[7-12]。

指流是在抽取石油的过程中发现的, 最早的针对性研究可追溯到 20 世纪 50 年代^[4-6]。在土壤学领域几乎无人想到会有指流发生。直到 1972 年, Hill 和 Parlange^[13] 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, 指流才受到越来越多的关注和研究^[14-47]。指流发生时, 占土体很小一部分的指流路径会通过较大的流量, 因此, 指流研究对土壤水分调节、灌溉方式的确定、污染物迁移过程模拟、土壤及地下水污染预测与生态环境保护等具有重要意义。无论在实验方面还是理论分析方面, 指流的研究都已取得了许多重要成果。本文将对指流的物理机制、发育规律、影响因素、数学模型等方面已取得的主要成果进行综述和简评, 以期为进一步研究提供参考。

1 指流产生的物理机制

1.1 指流产生的宏观条件

大量的实验研究证实^[2-8,11-46], 在许多土壤和水力条件下都可能产生指流。其中被普遍认可的条件有: ①层状结构土壤中, 若细质土层位于粗质土层之上, 则下渗过程中易出现指流^[13-14, 16-23]; ②具有斥水性 (water-repellency) 的土壤中水分的下渗过程易出现指

①基金项目: 陕西省重点实验室访问学者专项计划项目 (05JF11) 和国家自然科学基金项目 (50479067) 资助。

* 通讯作者 (lhuaen@mail.xaut.edu.cn)

作者简介: 李贺丽 (1982—), 女, 河南驻马店人, 硕士研究生, 主要从事环境水文方面研究。E-mail: lhl237666@126.com

流^[24-25,30,34]; ③当入渗率小于湿润锋所在介质的饱和导水率时, 粗质土壤中易发生指流^[11-41]; ④土壤入渗过程中, 若湿润锋前的空气不能被及时排出而导致气阻或土壤空气受压时, 则易于产生指流^[29-30,42-46]; ⑤入渗结束后土壤水的再分布过程中也易出现指流^[7-8, 34-36, 45]; ⑥由密度和黏度不同的两种液体组成的两相流, 在相互推移过程中也易出现指流^[3-6,15-16]。

1.2 指流发生机理研究

关于指流的产生机理, 最初认为是由于置换界面的不稳定所致, 此种解释为多数学者所认可^[3-6, 12-16], 但没能很好地阐明为何起初均匀分布的水流会突然变成明显分离水流的原因。孔祥言等^[48]对置换界面的稳定性与非稳定性给予了界定, 认为多孔介质不可能是完全均质的, 渗透性的不均匀导致动界面处产生微小的扰动, 若此扰动能随时间增强, 则指流产生。Biggar 和 Nielsen^[49]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表明, 指流可以在均质的多孔介质发生, 这与孔祥言等^[48]的分析有所矛盾。朱九成等^[9]则认为, 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。

然而, 土壤物理学领域最早认识指流的学者们^[12-17]认为, 指流的产生是由于介质沿流向的导水率增加, 致使水流沿流向的流速增加, 流场横断面积减小, 从而使原来空间均匀分布的、平整的湿润锋趋于收缩, 变成集中的水流, 即指流。这种解释能够对不同条件下产生的指流进行描述, 具有一定程度的普遍性, 对后来的研究起到启发和推动作用。

针对多种初始和边界条件下特别是在土壤水分再分布时产生的指流, Wang 等^[3,7-8,29-30,36]经过大量的实验与理论推断指出, 在下渗结束后的再分布过程中, 湿润剖面基质势梯度发生逆转, 即由负变正, 故而导致指流的出现, 并认为这种不稳定流集中出现的位置是随机的, 而不是由于介质的非均质性造成的; 同时指出这种不稳定流的出现必须有 3 个前提条件: ①毛管滞后作用, 多孔介质存在一个明显的基质势进水值 h_{we} (相当于毛管上升高度的负值, 位于吸湿曲线) 和明显的基质势进气值 h_{ac} (位于脱湿曲线); ②湿润锋处的基质势始终维持在该处土壤的进水值 (或以上), 否则湿润锋将停止前进 (这里指对流而非扩散); ③湿润锋后产生基质势正梯度 (基质势在接近湿润锋时增大, 远离时减小)。这 3 个条件的限定基本上可以解释已经观测到的所有指流现象, 易为人们所接受。

滞后作用、进水值、进气值, 以及湿润锋处自然存在的进水值(高含水率), 皆为多孔介质中液流的动态

属性。细质土的进水值低于粗质土, 因此当水流穿越有明显层状的土壤时, 若细质土在上, 粗质土在下, 水流会在界面处形成基质势正梯度, 故而产生不稳定指流^[13-14, 16-23]。反过来, 若粗质土在上, 细质土在下, 粗质土中原有的稳定流在下层细质土中仍为稳定流, 原有的非稳定流则在下层细质土中会被削弱转化为稳定流^[30]。在降雨或灌溉之后的土壤水再分布过程中, 由于排水和蒸发的作用, 地面基质势一般可降至进水值以下, 故基质势正梯度会自然形成, 详见 Peck^[45], Youngs 和 Poulouvassillis^[50] 所述土壤水分再分布剖面。因此, 土壤水的再分布过程一般会产指流。对于斥水性土壤或有土壤气阻发生时, 由于湿润锋前沿的进水值较高 (为正)^[30, 34], 基质势正梯度甚至可在淹水条件下产生, 因而指流可以在入渗开始不久便形成^[30]。关于湿润锋处自然存在的进水值和相应的高含水率, Eliassi 和 Glass^[53]称其为前锋积水效应 (hold-back-pile-up effect), Dicarolo^[37]称其为饱和过头 (saturation overshoot)。通常, 淋于窗户或墙壁的雨水所形成的指流乃是非饱和入渗所致, 其前锋积水效应十分明显。Geiger 和 Durnford^[54], Nicholl 等^[55]更为详细地观测到了均质沙土中和岩壁上出现的类似现象。对于细质 (可湿性) 土壤来说, 由于其进水值 (为负) 和导水率较低, 且临界湿润深度较大 (毛管作用强), 锋后正梯度较难形成, 因此不容易产生非稳定指流。

此外, 张建丰^[11]通过在层状介质进行指流实验, 指出土壤颗粒即孔隙分布不均匀是指流产生的主要原因之一, 这种解释与 Hillel 和 Baker^[16]提出的假说在形式上具有相似性, 但与 Wang 等^[7-8,36]的论断有所矛盾。

由上述可以看出, 关于指流在土壤中产生机理的研究已趋成熟。但是, 国内外仍然有许多学者难以区分指流和漏斗流 (舌流) 的特性及成因 (如指流的出现是否源于介质的非均质性等)。然而, 这两种形式的优先流在自然界常常是并存的。进一步的研究还应将相关的物理机制进行整合并通过大量实验确定关键的模型应用参数。

1.3 指流产生的量化判据

指流产生的量化判据目前可概括为以下几种。

Hill 和 Parlange^[13], Parlange 和 Hill^[16] 在发现层状土中的指流现象时首先提出, 当流经上层土的通量 (亦即上下层的共通量) Q 小于下层土的饱和导水率 K_s 时 (即 $Q < K_s$), 下层土壤中会产生指流。Raats^[14] 和 Philip^[15] 也相继推导出相同的判据。不过, Hillel 和 Baker^[17] 认为应将判据中的饱和导水率 K_s 改为对应于进水值处的非饱和导水率 $K_c (h_{we})$, 当满足 $Q < K_c$ 这

一条件时, 下层土壤中会产生指流。

张建丰^[11]提出了一种判断指流产生与否的量化指标 D_f , 并将其定义为 $D_f = f_p/K_s$, 即系统稳渗率与下层土饱和导水率之比, 并初步将 0.02 定为 D_f 的临界值, 指出当 $D_f < 0.02$ 时, 指流产生。该指标与 Hillel 和 Baker^[16]提出的判据具有一定的相似性。不过, Yao 和 Hendrickx^[47]在均质沙土中的实验表明, 当 D_f 较小时, 指流反而消失, 原因是毛管吸力对水流起到控制作用。前述判据只考虑重力下渗, 未考虑毛管作用。

Nieber^[27]指出非饱和土壤中一个初始扰动是否会发展成为指流主要取决于吸湿曲线上毛管进水吸力的大小。若这一毛管吸力小于脱湿曲线的进气毛管吸力(这对于斥水性土壤才是真的), 则初始一个很小的扰动将会发展成为指流, 且形成的指流在随后的湿润、排水循环中被维持; 反之, 初始扰动被驱散, 不会形成指流。该判据可能只适用于斥水性土壤。

Wang 等^[36]认为, 若基质势梯度为正, 即 $dh/dz > 0$, 则湿润锋处的扰动会形成指流, 反之, 扰动被驱散。当把这一判据代入 Darcy 公式 $Q = K_s(1-dh/dz)$ 或 $Q = K_e(1-dh/dz)$ 时可知它与上述判据一致, 即当 $dh/dz > 0$ 时, $Q < K_s$ 或 $Q < K_e$ 。因此前述导水率型判据只反映出“湿润锋后基质势梯度为正”这一实质判据的不同侧面, 其物理意义和实际可操作性大不相同。例如, Chang 等^[57]的实验表明, 上细下粗的层状沙土中, 虽然 $Q < K_s$ 或 $Q < K_e$ 判据成立, 但当两种土壤的质地差异不大时, 指流并未出现。实际操作中, 通量 Q 、饱和导水率 K_s 以及进水值对应的导水率 K_e 不仅难测定而且误差较大, 当把这些参数用于判定其他条件下(如斥水性土壤中)的指流时, 显然会引起误导。

对于任意多孔介质中因流体密度和黏度不同(如水、油、气、液态污染物 NAPL 等)、上下位置不同、流动方向不同(包括向上、水平或任意角度)等造成的非稳定流, Wang 等^[3]、Javaux 等^[56]根据 Chuoke 等^[6]考虑毛管作用的流体动力学原理提出并完善了 24 项针对具体环境的非稳定流判据, 其中大部分已被实验证实。

此外, Wang 等^[36]在考虑毛管作用后还通过实验证明, 均质土壤中存在一个临界湿润深度 D ($D =$ 进水值 h_{we} - 进气值 h_{ac})。只有当实际降雨或灌溉湿润深度大于该临界湿润深度时, 再分布过程中会产生指流, 反之, 将不发生指流。这一判据为合理选择灌溉水量以阻止或促进指流的产生具有指导意义。例如, 不宜在粗质且均质的沙土中灌水过多, 否则会发生指流。细质或非均质土中则不容易发生指流。

显然, 要对指流进行量化和应用分析, 关键是要

准确、快速、有效地确定进水值 h_{we} 和进气值 h_{ac} 。理论上, 进水值和进气值被分别定义在吸湿曲线和脱湿曲线的拐点处, 故而可用 Van Genuchten 方程^[56]推算, 详见 Wang 等^[29,43]。Fallow 和 Elrick^[52]、Wang 等^[51]还提出了利用张力碟入渗仪 (tension disk infiltrometer) 等工具直接测定进气值和进水值的方法。

2 指流的发育规律研究

2.1 指流的发育过程

Jury 等^[35]对指流的产生机理和发育过程做出如下概括。水分在多孔介质中入渗时, 干湿区接触面处的水势只有在大于或等于进水值的情况下, 湿润锋才能够进入到其下方的干燥土壤中。指流产生前, 湿润锋处的水势都等于进水值, 在临界状态下, 当锋面某点处的下渗深度稍大于其他点处的下渗深度时, 自然界的扰动波产生耦合放大并使此点处的竖向压力分布值垂直下移一点距离, 这种压力位移改变了其上方的水压力分布, 诱发了水平压力梯度的出现, 从而导致了水分的侧向流动。水分的这种侧向流动, 为指流的产生提供水分, 促进了指流的进一步发育, 使指流的湿润锋快速前进; 同时使指间湿润锋处的水势降低至进水值以下, 该区的水分停止向下运动。指流的持续伸展, 使上部供水区的水分快速消失。当含水量剖面最终达到水静力学平衡时, 指部区域及其上方的稳渗湿润区域中流动均停止, 指流发育完成。

2.2 指流的侧向扩散

大量指流实验反复表明, 指流的侧向扩散速度 (diffusion) 远小于指流的向下传播速度 (advection), 它以狭长的形状传播并在流动停止后持续相当长的时间。Glass 等^[19]认为滞后作用导致了含水量的不连续且稳定存在, 解释了指流在较长时间内不发生明显侧向扩散的原因。此外, 也有研究认为在一定的含水量范围内, 滞后作用能够将水分有效的侧向扩散变为 0 或负值。Dicarlo 等^[31]实验表明, 滞后作用能够引起这一称为“负扩散”的有趣现象: 指流扩散区的水势低于周围较干燥区域的水势, 从而诱发产生了一个促使水分从较干燥区流向较湿润区的水平向驱动力, 这种驱动力在实际上是否会导致产生一种可观测到的、从干区流向湿区的非常规流动有待于进一步研究^[37,54]。

总之, 在任何情况下, 优先流产生后水平向(或侧向)的水分再分布过程都为水分研究提供了一个独特的系统。

3 指流的影响因素

大量研究对指流的影响因素进行了初步的理论分

析及实验验证,认为其影响因素主要有土壤质地、性质及结构,流体的密度及黏度等特性,实验装置的大小及通气情况,系统的初始含水量和下渗结束后水分的再分布过程等^[11,17-18,21,24,26,33,35-36,39]。

土壤质地方面,认为粗质地土壤易产生指流,细质地土壤较难产生指流;性质方面,则是斥水性土壤易产生指流,易被水湿润的土壤不易产生指流;结构方面,认为层状结构特别是上下层土壤质地差异较大的系统较均质土系统更易产生指流。液体的特性如密度、黏度、表面张力等对指流的产生有很大影响,例如非水相流体 NAPL (nonaqueous phase liquid) 系统较水相系统来说,产生指流的可能性较大。

Glass 等^[19]发现,当指流宽度小于土箱宽度的一半时,指流产生;反之,系统呈现稳定。由于多孔介质的平均颗粒大小对指流宽度有影响,多孔介质越粗,能够形成的最小指流宽度越小,小于土箱宽度的可能性就越大,则系统就越易于呈现出不稳定性,这在一定程度上解释了多数指流现象都是在粗介质中观察到的原因。Hillel 和 Baker^[16]指出,对于任何一种特殊的介质,实际上都存在一个最小的指流宽度(三维系统中为指流直径),因此如果实验装置的宽度不是足够大时,会抑制指流的发展。

另外,装置底部是否设有通气小孔对指流的产生有很大影响,当装置底部不设置通气小孔时,在下渗过程中,会造成湿润锋前面的空气压缩,能够促进指流的产生^[29-30,46]。不过大量实验都在装置底部设有通气小孔,目的是为了研究锋前空气不被压缩的条件下指流的发生情况。对于有垂直节理、透气性差的土壤,当地下水位较高且有高强度灌溉时,土壤中易产生气阻^[29]。

指流的形成与系统的初始含水量及其分布也有很大关系。Baker 和 Hillel^[21]以及 Bauters 等^[33]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,较容易产生指流,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一致。此外,其他学者^[7,19,26,40]研究发现,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。

此外,Wang 等^[7]指出,在均质土壤中若实际湿润深度达到或超过一个临界湿润深度,其随后的水分再分布过程能引发指流,后续指流远远超出已有指流的长度。

4 指流模型简介

4.1 指流特征的描述

指流形状最重要的两个特征参数是指流直径(或宽度) d 和指流面积百分比 β ,此外,指流的特征参数还包括指流速度 v 及指流的下渗深度 $x(t)$ 等。

4.1.1 指流直径(或宽度)的预测 Parlange 和 Hill^[16]提出的指流直径(或宽度)的计算式如下:

$$d = \frac{2.4S^2}{K_s(\theta_s - \theta_i)} \left(\frac{1}{1 - R_s} \right) \quad (1)$$

式中, K_s 为指流所在介质的饱和导水率; R_s 为系统流率比,等于指流产生时系统下渗率(即向指区的供水速率)与介质的饱和导水率之比,即 $R_s = iK_s$; S 为土壤吸水常数; θ_s 为指流所在介质的饱和含水量, θ_i 为指流所在介质的初始含水量。

Wang 等^[3]在 Glass 等^[18]及 Chuoke 等^[6]研究的基础上提出:

$$d = a \sqrt{\frac{R^* h_{we}}{1 - R_s}} \quad (2)$$

式中, a 为一个常数,二维中, $a = 3.14$,三维中, $a = 4.8$, h_{we} 为湿润锋处介质的进水值($\text{cm H}_2\text{O}$), R^* 为湿润锋处气水接触面的平均有效曲率半径(R^* 变化在 $0.3 \text{ cm} \sim 0.7 \text{ cm}$,对照已有实验结果当估算误差最小时, $R^* = 0.5 \text{ cm}$)。该式简单、无未定参数,且能很好地预测指流直径(或宽度),容易满足室内和田间实验的实用要求。

Glass 等^[18]根据量纲分析导出了指流宽度与系统参数及初始/边界条件的关系:

$$\bar{d} = \frac{S^2}{K_s(\theta_s - \theta_i)} f_{ds}(R_s) \quad (3)$$

式中, \bar{d} 为系统中形成的指流平均宽度, $f_{ds}(R_s)$ 为以 R_s 为变量的待定函数,具体形式可由实验确定或经分析推导确定。

上述指流宽度的计算式多是基于风干介质情况下提出的,Liu 等^[26]进一步简化了 Parlange-Hill 的适用于初始干燥介质的指流宽度计算式(即式(1)),且考虑滞后作用,并适用于含水量变化范围较大的砂性土壤中出现的二维指流的宽度计算公式,

$$d = \frac{2\pi\theta_f \frac{dh}{d\theta}}{\eta + 1.5} \quad (4)$$

式中, θ_f 为指流处的含水量, $\frac{dh}{d\theta}$ 为土壤水分特征曲线的斜率(值为正); $\eta = \frac{2}{\lambda} + 3$, λ 是一个和土壤孔隙分布有关的常数,由实验数据拟合确定。该式可体现出系统初始含水量对指流宽度的影响。

4.1.2 指流面积百分比 β 的预测 Glass 等^[19]就此进行了大量实验。Jury 等^[35]通过数据分析得出了如下经验计算式:

$$\beta = 0.08 + 0.90\sqrt{R_s} \quad (R^2 = 0.955) \quad (5)$$

作为对比, Hillel 和 Baker^[16]基于物理讨论计算了层状土层间界面处的 β 值:

$$\beta = \frac{A_f}{A_m} = \frac{i}{K(h_{we})} = \frac{R_s}{K_r(h_{we})}; \quad K_r(h_{we}) = \frac{k(h_{we})}{K_s} \quad (6)$$

式中, i 为向指区的供水速率 (等于流经上层土的下渗通量); $K(h_{we})$ 为下层土在进水势极值处的导水率; $K_r(h_{we})$ 为下层土在进水势极值处的相对导水率。

经对比可以发现, 式 (5) 和式 (6) 都是用 R_s 的函数来表征 β 的大小, 但形式不同。此外, 在基质势阻碍流动的水分再分布过程中, 式 (6) 有可能会低估 β 值。

由于湿润锋处指流所占的面积百分比 β 不但依赖于介质基质向指流区域的供水速率, 还取决于指流内部的流率, 因此预测起来比较困难。目前对 β 值的预测精度尚不够高, 所以, 为了提出计算 β 值的更精确模型, 今后还需进行大量的不同条件下的实验研究。

4.1.3 指流速度 v 的预测 Glass 等^[18]根据量纲分析导出了指流速度与系统参数及初始/边界条件的关系:

$$\bar{v} = \frac{K_s}{(\theta_s - \theta_i)} f_{vs}(R_s) \quad (7)$$

式中, \bar{v} 为系统中形成的指流平均速度; $f_{vs}(R_s)$ 为以 R_s 为变量的待定函数, 具体形式可由实验确定或经分析推导确定。

此外, Jury 等^[35]提出了一种可动态描述水分再分布中指流传播过程的概念模型, 给出了任一时刻指流的下渗深度 $x(t)$ 的计算方法, 在此基础上对已求得的任一时刻指流的下渗深度 $x(t)$ 再求一阶导数, 也可获得任一时刻指流的下渗速度 $v(t)$ 。

4.2 指流过程的模拟

Nieber^[27]通过考虑土壤水分特征曲线的滞后作用, 运用 Richards 方程数值模拟了初始干燥的多孔介质中单个指流的发展过程及其持续性, 并成功地将指流路径可视化。然而在 Nieber 的研究中, 指流宽度为常数的假定在相对较短的时间内是合理的, 但若指流持续较长的时间, 水分的侧向运动将导致指流明显地膨胀。

Kawamoto 等^[28]以及 Kawamoto 和 Miyazaki 等^[31]根据侧向扩散速度是否 $> 1 \text{ cm/h}$ 将指流分为低率侧散指流 (low-swell finger) 和高率侧散指流 (high-swell finger) 两类。在此基础上, Kawamoto 等^[28]根据实验提出了分别对应于 LSF 和 HSF 的不同水分侧向扩散方程, 并运用这些侧向扩散方程建立了一种考虑指区

侧向扩散的指流向发展模型, 很好地估算了被指流湿润的面积百分比。

Jury 等^[35]提出了一种概念性模型, 用于表征均质土壤水分再分布的指流发展过程。该模型给出了指流宽度、指流面积百分比、任一时刻指流的下渗深度和下渗速度以及指流的最大下渗深度 Z_{\max} 的计算方法, 并指出土壤产生和维持指流的最重要的特性是滞后作用 (即持水能力, 与介质颗粒大小有关) 和进水值 (与初始含水量有关)。

总之, 由于指流发生的随机性和复杂性, 致使现有模型尚不完整。为准确地预测多孔介质中的指流路径, 在模拟方法上还需要进一步的研究和率定。

5 结语

指流是多孔介质中常见的一种水分及溶质运移形式。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^[59]。但由于指流的发生具有随机性和复杂性, 从而导致指流的研究难度较大。总体来讲, 指流是多方面因素造成的干扰波在临界非稳定状态下产生耦合放大的结果: 土壤和流体特性是指流产生的内因, 施水方式及初始、边界条件是促使指流产生的外部条件。未来需要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, 进而将指流机理与已有的水分及溶质的运移模型连接, 才能使土壤水流运动理论得到完善。

参考文献:

- [1] Jury WA, Horton R. Soil Physics. 6th. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2004: 146-149
- [2] Kung KJS. Preferential flow in a sandy vadose zone I. Field observations. Geoderma, 1990, 46: 51-58
- [3] Wang Z, Feyen J, Elrick DE. Prediction of fingering in porous media. Water Resour. Res., 1998, 34: 2183-2190
- [4] Taylor GI. The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their plane. Proc. R. Soc. London, 1950, A201: 192-196
- [5] Saffman PG, Taylor SG. The penetration of fluid into a porous medium or Hele-Shaw cell containing a more viscous liquid. Proc. Roy. Soc. A., 1958, 245: 312-329
- [6] Chuoke RL, van Meurs P, van der PC. The instability of slow, immiscible, viscous liquid-liquid displacements in permeable media, Tran. Am. Inst. Min. Metall. Pet. Eng., 1959, 216: 188-194
- [7] Wang Z, Tuli A, Jury WA. Unstable flow during redistribution in homogeneous soil. Vadose Zone J. 2003, 2: 52-60
- [8] Wang Z, Wu L, Harter T, Lu J, Jury WA. A field study of unstable

- preferential flow during soil water redistribution. *Water Resour. Res.*, 2003, 39(4): 1075
- [9] 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. *水动力学研究进展*, 1996, 11(3): 294-297
- [10] 史文娟, 汪志荣, 沈冰, 张建丰. 非饱和土壤中指流的研究进展. *西北农林科技大学学报*, 2004, 7: 128-132
- [11] 张建丰. 黄土区层状土入渗特性及其指流的实验研究 (博士学位论文). 杨凌: 西北农林科技大学, 2004
- [12] Izadi GRB, King B, Dowing E. Preferential transport of bromide in undisturbed core under different irrigation method. *Soil Sci.*, 1996, 161(4): 214-225
- [13] Hill DE, Parlange JY. Wetting front instability in layered soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1972, 36(5): 697-702
- [14] Raats PAC. Unstable wetting fronts in uniform and non-uniform soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1973, 37: 681-685
- [15] Philip JR. Stability analysis of infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1975, 39:1042-1049
- [16] Parlange JY, Hill DE. Theoretical analysis of wetting front instability in soils. *Soil Sci.*, 1976, 122: 236-239
- [17] Hillel D, Baker RS. A descriptive theory of fingering during infiltration into layered soils. *Soil Sci.*, 1988, 146(1): 51-55
- [18] Glass RJ, Parlange JY, Steenhuis TS. Wetting front instability I. Theoretical discussion and dimension analysis. *Water Resources Research*, 1989, 25(6): 1187-1194
- [19] Glass RJ, Steenhuis TS, Parlange JY. Wetting front instability II. Experimental determination of relationships between system parameters and two-dimensional unstable flowfield behavior in initially dry porous media. *Water Resources Research*, 1989, 25(6): 1195-1207
- [20] Glass RJ, Steenhuis TS, Parlange JY. Mechanism for finger persistence in homogeneous, unsaturated, porous-media theory and verification. *Soil Sci.*, 1989, 148: 60-70
- [21] Baker RS, Hillel D. Laboratory tests of theory of fingering during infiltration into layered soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1990, 54(1): 20-30
- [22] Selker J, Parlange JY, Steenhuis TS. Fingering flow in two dimensions: Predicting finger moisture profile. *Water Resource Research*, 1992, 28(9): 2523-2528
- [23] Selker JS, Steenhuis TS, Parlange JY. Wetting front instability in homogeneous sandy soils under continuous infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1992, 56 (2): 1346-1350
- [24] Ritsema CJ, Dekker LW, Hendrickx JMH. Preferential flow mechanism in a water repellent sandy soil. *Water Resources Research*, 1993, 29 (7): 2183-2193
- [25] Dekker LW, Ritsema CJ. How water moves in a water repellent sandy soil I. Potential and actual water repellency. *Water Resources Research*, 1994, 30 (9): 2507-2517
- [26] Liu Y, Steenhuis TS, Parlange JY. Closed-form solution for finger width in sandy soils at different water contents. *Water Resources Research*, 1994, 30(4): 949-952
- [27] Nieber JL. Modeling finger development and persistence in initially dry porous media. *Geoderma*, 1996, 70: 207-229
- [28] Kawamoto K, Miyazaki T, Nakano M. Leaching efficiency depending on the type of fingering flow in sandy soils. *Trans. Jpn. Soc. Irrig. Drain. Eng.* 1996, 186: 89-96
- [29] Wang Z, Feyen J, van Genuchten MTh, Nielsen DR. Air entrapment effects on infiltration rate and flow instability. *Water Resour. Res.*, 1998, 34: 213-222
- [30] Wang Z, Feyen J, Ritsema CJ. Susceptibility and predictability of conditions for preferential flow. *Water Resour. Res.*, 1998, 34: 2169-2182
- [31] Kawamoto K, Miyazaki T. Fingering flow in homogeneous sandy soils under continuous rainfall infiltration. *Soils and Foundations*, 1999, 39: 79-91
- [32] DiCarlo DA, Bauters TWJ, Darnault CJG, Steenhuis TS, Parlange JY. Lateral expansion of preferential flow paths in sands. *Water Resource Research*, 1999, 35 (2): 427-434
- [33] Bauters TWJ, DiCarlo DA, Steenhuis TS, Parlange JY. Soil water content dependent wetting front characteristics in sands. *J Hydrol.*, 2000, 231/232: 244-254
- [34] Wang Z, Wu QJ, Wu L, Ritsema CJ, Dekker LW, Feyen J. Effects of soil water repellency on infiltration rate and flow instability. *J. Hydrol.*, 2000, 231/232: 265-276
- [35] Jury WA, Wang Z, Tuli A. A conceptual of unstable flow in unsaturated soil during redistribution. *Vadose Zone Journal*, 2003, 2: 61-67
- [36] Wang Z, Jury WA, Atac T, Kim DJ. Unstable flow during redistribution: Controlling factors and practical implications. *Vadose Zone Journal*, 2004, 3: 549-559
- [37] DiCarlo DA. Experimental measurements of saturation overshoot on infiltration. *Water Resources Research*, 2004, 40: W04215
- [38] Kawamoto KS, Mashino M, Miyazaki OT. Moisture structures of laterally expanding fingering flows in sandy soils. *Geoderma*, 2004, 119: 197-217
- [39] 拦继元. 指流形成机理及其主要影响因素的实验研究 (硕士学位论文). 西安: 西安理工大学, 2006
- [40] Wang YF, Mao ZS, Chen JY. The relationship between hysteresis and liquid flow distribution in trickle beds. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 1999, 7 (3): 221-229
- [41] Tamai N, Asaeda T, Jeevaraj CG. Fingering in two-dimensional, homogeneous, unsaturated porous media. *Soil Sci.*, 1987, 144: 107-112
- [42] Grismer ME, Orang MN, Clausnitzer V, Kinney K. Effects of air compression and counterflow in infiltration into soils. *Journal of*

- Irrigation and Drainage Engineering, 1994, 120 (4): 775-781
- [43] Wang Z, Feyen J, Nielsen DR, van Genuchten MTh. Two-phase flow infiltration equations accounting for air entrapment effects. *Water Resour. Res.*, 1997, 33: 2759-2767
- [44] Peck AJ. Moisture profile development and air compression during water uptake by bounded porous bodies: 3. Vertical columns. *Soil Sci.*, 1965, 100: 44-51
- [45] Peck AJ. Redistribution of soil water after infiltration. *Aust. J. Soil Res.*, 1971, 9: 59-71
- [46] White I, Colombero PM, Philip JR. Experimental studies of wetting front instability induced by gradual changes of pressure gradient and by heterogeneous porous media. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1977, 41: 483-489
- [47] Yao TM, Hendrickx JMH. Stability of wetting fronts in dry homogeneous soils under low infiltration rates. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1996, 60: 20-28
- [48] 孔祥言编著. 高等渗流力学. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2000
- [49] Biggar JW, Nielsen DR. Chloride²³⁶ diffusion during stable and unstable flow through glass beads. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1964, 28: 591-595
- [50] Youngs EG, Pouloussillis A. The different forms of moisture profile development during the redistribution of soil water after infiltration. *Water Resour. Res.*, 1976, 12: 1007-1012
- [51] Wang Z, Wu L, Wu QJ. Water-entry value as an alternative indicator of soil water-repellency and wettability, *Journal of Hydrology*, 2000, 231/232: 76-83
- [52] Fallow DJ, Elrick DE. Field measurement of air-entry and water-entry soil water pressure heads. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1996, 60: 1036-1039
- [53] Eliassi M, Glass RJ. On the porous continuum-scale modeling of gravity-driven fingers in unsaturated materials: Numerical solution of a hypodiffusive governing equation that incorporates a hold-back-pile-up effect. *Water Resources Research*, 2003, 39(6): 1167
- [54] Geiger SL, Durnford DS. Infiltration in homogeneous sands and a mechanistic model of unstable flow. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2000, 64: 460-469
- [55] Nicholl MJ, Glass RJ, Wheatcraft SW. Gravity-driven infiltration instability in initially dry nonhorizontal fractures. *Water Resour. Res.*, 1994, 30: 2553-2546
- [56] Javaux M, Wang Z, Feyen J, Elrick DE, Vanclooster M. Correction to "Prediction of fingering in porous media". *Water Resources Research*, 2005, 41: W04005
- [57] Chang WL, Biggar JW, Nielsen DR. Fractal description of wetting front instability in layered soils. *Water Resour. Res.*, 1994, 30:125-132
- [58] van Genuchten MTh. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1980, 44: 892-898
- [59] 雷志栋, 胡和平, 杨诗秀. 土壤水研究进展与评述. *水科学进展*, 1999, 10(3): 311-318

Research of Finger Flow in Porous Media: Review and Perspective

LI He-li^{1,2}, LI Huai-en¹, WANG Zhi³, SHI Wen-juan¹

(1 Key Laboratory of Water Resources, Environmental and Ecology in Northwest China, Ministry of Education, Xi'an University of Technology,

Xi'an 710048, China; 2 Institute of Geographical Science and Natural Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

3 Department of Earth & Environmental Sciences, California State University, Fresno, California 93740, USA)

Abstract: Finger flow is a form of water and solute transport occurring commonly in field soils. Research of finger flow is of great significance in a number of fields, such as soil water management, determination of irrigation and drainage patterns, prediction of soil and groundwater pollution, simulation of transport process of contaminants, and environment protection. Based on the information available about researches on finger flow that have been carried out both at home and abroad, major findings in the aspects of conditions and mechanism of fingering, quantitative criteria for onset of instability, attributing factors, lateral expansion of fingers, and modeling, were reviewed and commented. It is expected that this summary may be used as a step stone for further study in this area.

Key words: Finger flow, Unstable flow, Finger development, Attributing factors, Modeling