

# 水分再分布过程中指流特性及影响因素的实验研究

李贺丽<sup>1,2,3</sup>, 李怀恩<sup>2</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

2. 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; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘 要:** 水分在土壤中的运移过程可分为土体表面存在水分供给的入渗过程和水分供给结束后水分在土体中的再分布过程两个阶段。指流作为一种优先流, 区别于大孔隙流和漏斗流。国外已有研究指出, 指流可以在充分供水结束后的土壤水分再分布过程中出现。然而, 目前国内对指流的研究极少, 对其认识和理解也相当缺乏。由此, 本文采用石英砂介质对其进行了实验验证, 分析了水分再分布过程中指流的特性; 同时探讨了前期供水量、实验土箱尺寸、溶液浓度等因素对其发育的影响。研究结果表明, 水分再分布过程中, 均匀砂质土体中能够容易地出现指流; 前期供水量的多少对其后水分再分布过程中指流发育的最终形态影响不大, 但能够对其发育的进程产生明显的影响; 实验土箱较小时, 可使原来指流发生比较明显的土体系统呈现出稳定形态; 增大单一溶液的浓度对指流发育有着明显的促进作用, 但其指流现象较采用自来水的处理为弱。

**关 键 词:** 指流; 影响因素; 水分再分布过程; 实验研究

水分在土壤中的运移过程可分为土体表面存在水分供给的入渗过程和水分供给结束后水分在土体中的再分布过程两个阶段。指流(Finger Flow)是指在水分在土壤中运移时, 由于湿润锋界面水~气二相流的动态失衡而产生的“指形”流道<sup>[1]</sup>, 是优先流的一种(如图 1)。不同于大孔隙流和漏斗流, 指流形成的实质是由于流体动力学原因, 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<sup>[2]</sup>。当其发生时, 较小的土体会携带较大的水流量, 不仅可将有限的地表水和土壤水引入地下数 10 m 甚至地下含水层造成污染, 而且可以较快的疏干表层土壤水进而造成提前干旱, 影响了农药、杀虫剂等药效的充分发挥, 同时减少了植物对水分和养分的吸收<sup>[3-9]</sup>。近 10 多年来, 欧美学术界对指流进行了不少实验与理论研究。然而, 国内有关指流的研究鲜有开展<sup>[2]</sup>。已有研究<sup>[5,6,10-13]</sup>指出, 指流可以在充分供水结束后的土壤水分再分布过程中出现。鉴于此, 本文以石英砂为土壤介质进行实验, 分析了水分再分布过程中指流的特性; 同时探讨了前期供水量、实验土箱尺寸、溶液浓度等因素对其发育的影响, 以为进一步的研究提供指导。

## 1 材料及方法

### 1.1 实验设备

在参考国内外指流研究实验方法<sup>[5,9,14-15]</sup>的基础上, 本次实验于 2006 年 3 月-2006 年 10 月在西安

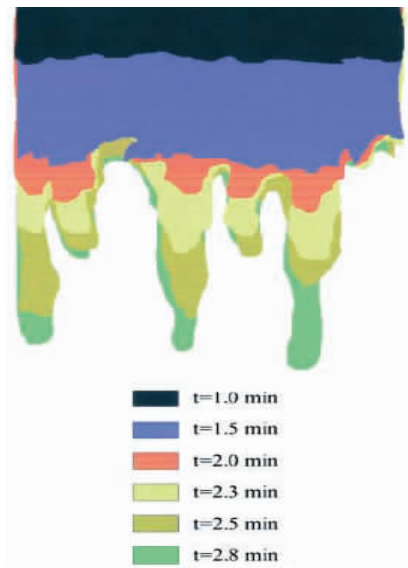


图 1 指流发生过程示意图<sup>[11]</sup>

Fig.1 Sketch of finger flow<sup>[11]</sup>

收稿日期: 2009-02; 修订日期: 2009-06.

基金项目: 国家重大水专项(2009ZX07212-002); 国家自然科学基金项目(90610030)。

作者简介: 李贺丽(1982-), 女, 河南驻马店人, 博士研究生, 主要从事生态水文方面的研究。E-mail: lhl237666@126.com;

通讯作者: 李怀恩, E-mail: lhuaien@mail.xaut.edu.cn

理工大学教育部西北水资源与环境生态重点实验室内进行的(图 2)。实验土箱由两块有机玻璃板制成。大实验土箱高×宽×厚尺寸为 98 cm×100 cm×1 cm,并在有机玻璃板上绘有 2 cm×2 cm 的网格线用以描绘湿润锋形态。土箱底部设有 9 个 0.3 cm 的孔与大气连用于防止空气压缩及用于底部排水。供水装置采用马氏瓶,通过乳胶管将其与土箱上方的配水管相连。配水管下部设有 8 个针头连接口,可根据不同的供水流量需求安装不同型号的针头。小实验土箱高×宽×厚尺寸为 58 cm×46 cm×1.6 cm,正面绘有 1 cm×1 cm 的网格线用以描绘湿润锋形态,结构与大土箱相同。降雨模拟装置的动力控制设备包括一台电动机,两个双向开关,一个电子中继系统和链条传动装置。实验时,将配水管固定于传动装置的链条上,这样配水管在电动机的带动下可以在土箱上方做往复运动,形成一个连续线源供水装置,可以将水均匀地降落于土体表面。

为防止装土过程中土壤颗粒的自然筛分,装土时,先将实验土箱水平放置并移去上面的有机玻璃板,将称重后的土壤介质直接倾倒在下方的另一块有机玻璃板上,然后铺平压实至 1 cm 厚时,将上面的玻璃板重新压上并用螺栓紧紧固定,然后将土箱竖立起来,用橡皮锤轻拍土箱使土壤颗粒自行下沉、压缩至密实,最后平整土壤表面至最终设计高度 86 cm。

1.2 处理设计

本次实验采用风干石英砂装成均质的土壤结构,共设计了 5 种处理方案(表 1)。此外,每种处理至少进行 2 次重复实验以排除实验结果的偶然性。按照常规实验方法,经测定,石英砂的饱和水力传导度为 0.0015 cm·s<sup>-1</sup>,饱和体积含水量为 0.465 cm<sup>3</sup>·cm<sup>-3</sup>,容重为 1.58 g·cm<sup>-3</sup>;机械组成(表 2)。

实验采用统一的供水方式,即瞬间向土体表面均匀灌水,折算得出供水强度大小约为 0.2273cm·s<sup>-1</sup>,足以使土体表面产生积水,即为充分供水。水分再分布过程从积水消失时刻开始计起。

2 结果与分析

2.1 水分再分布过程中指流的发育过程

处理 1 的设计及参数见表 1。供水过程中土表能够产生深度大约为 1cm 的积水层,为充分供水;当累积供水量达 750 cm<sup>3</sup>时,停止供水;供水停止后

积水层随即消失,水分充分再分布过程自此开始。本处理中指流的形成过程见图 3。

如图 3 所示,当水分再分布过程开始时,湿润锋已达土表以下 20 cm 的深度,锋面稳定,波动不大;然而,在随后的水分再分布过程中,稳定的湿润锋面迅速分离并以极快的速度向下传播,当水分再分布过程持续进行 10 min 时,若干形态细长的指流已经形成,指锋已接近土箱的下边界;随后,指锋前移的速度稍微减慢,指间锋面基本停止向下移动,由于毛管的滞后作用,侧向发育受到抑制,指流的垂向发育继续进行,至 17 min 时,指锋到达土箱的下边界,此时,指流的平均长度约为 60 cm,平均指宽小于 10 cm,指流形态非常明显。

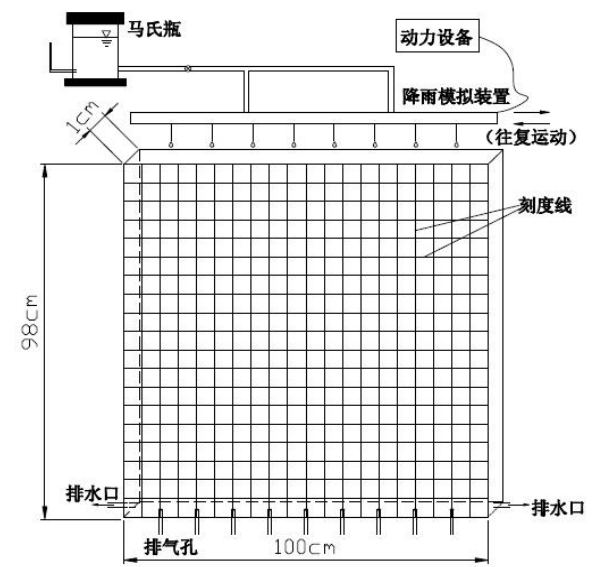


图 2 实验装置

Fig.2 Sketch of experiment equipment

表 1 实验设计方案及基本数据

Tab.1 Experimental arrangements and data designed

| 序号 | 土壤结构 | 土箱型号 | 供水量/cm <sup>3</sup> | 液体种类                | 溶液浓度/mg·l <sup>-1</sup> |
|----|------|------|---------------------|---------------------|-------------------------|
| 1  | 均质   | 大    | 750                 | 自来水                 | —                       |
| 2  |      | 大    | 360                 |                     |                         |
| 3  |      | 小    | 350                 |                     |                         |
| 4  |      | 大    | 750                 | KNO <sub>3</sub> 溶液 | 0                       |
| 5  |      | 大    | 750                 |                     | 7214                    |

表 2 石英砂的机械组成

Tab.2 Particle size distribution of the sand used in this study

| 土壤类型 | 小于某一粒径 (mm) 的百分比/% |        |       |       |        |
|------|--------------------|--------|-------|-------|--------|
|      | <0.05              | <0.098 | <0.25 | <0.5  | <1.00  |
| 石英砂  | 0.00               | 0.00   | 6.00  | 47.00 | 100.00 |

本处理通过实验再次证实,充分供水条件下,在供水结束之后的水分再分布过程中,均质结构粗颗粒石英砂中能够容易出现指流。这与 Wang 等<sup>[5,6]</sup>的研究结果是一致的,他认为在下渗结束后的水分再分布过程中,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,并不是由于土体介质的非均质性。

2.2 供水量对指流形成过程的影响

研究前期供水量对水分再分布过程中指流发育的影响,对于易于出现指流的农区进行农业灌水方式调整以避免指流的出现是具有非常重要的实际指导意义的。

处理 2 用于研究前期供水量的多少对后期水分再分布过程中湿润锋形态发展的影响,处理设计及参数见表 1。累积供水量为 360 cm<sup>3</sup>。水分的再分布过程开始于土表积水消失的时刻。指流的发育情况如图 4。

如图 4 所示,积水消失时刻,湿润锋面平整;在随后的水分再分布过程中,平整的锋面迅速分离为若干形态细长的指流并以极快的速度向下传播;随后,指间湿润锋停止向下移动,指流的侧向发育受到抑制,垂向发育继续进行,再分布过程持续 60 min 后,土箱左侧发育较快的两个指流的指锋到达土箱的下边界,此时,指流的平均长度大于 70 cm,平均指宽不到 15 cm,指流形态与处理 1 情况相近。对比处理 1 可以看出,一定范围内,前期施加水量的多少对其后水分再分布过程中指流发育的最终形态影响不大,但能够对其发育的进程产生明显的影响。供水量越大,指锋向下传播的速度越快,其达到土体下边界时所需的时间越短,指流发育过程进行的越快。这是由于前期供水量较大时,在其后的水分再分布过程中,在重力的作用下,存在更多的水分供给,形成的正的基质势梯度也较大,促进了指流的垂向发展,指流发育的速度也较快。因此,实际农业灌水操作中,可以采取少灌多次的方式,抑制指流的发育,减少从土壤层或根区快速渗漏的水分,从而提高灌溉水的利用效率。

2.3 土箱尺寸对指流形成的影响

Hillel 和 Baker<sup>[16]</sup>指出,指流的发展不但受能够使其向下传播的重力作用,而且也受制于

土壤吸力。由于土壤吸力受土壤质地及前期含水量的影响较大,因此,对于任何一种特定的土壤介质,出现的指流实际上都存在一个最小的指宽(或直径),且与土壤粒径大小成反比<sup>[17]</sup>,这或许也从一方面解释了指流在较粗的土壤介质中容易出现的原因。那么对于特定某类型的土壤介质,如果实验土箱宽度不足够大,可能会抑制指流的发展,致使实际中能够出现的指流现象却在实验中观测不到,产生误导。

为体现实验土箱尺寸对指流发育过程的影响,处理 3 采用风干石英砂在小实验土箱(高×宽×厚尺

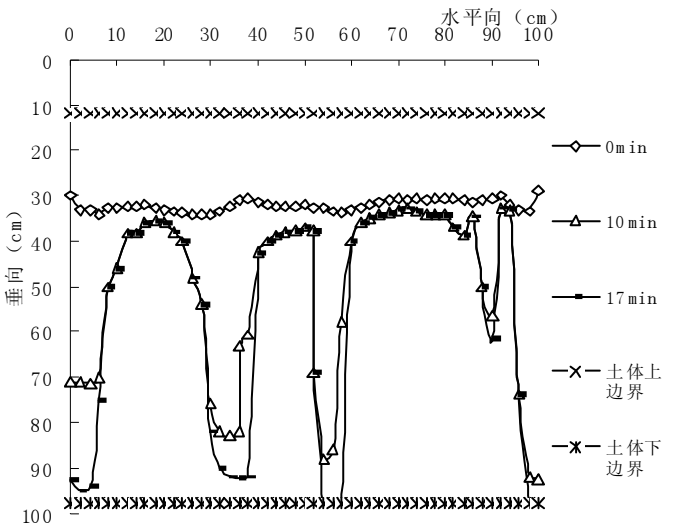


图 3 处理 1 中指流的形成过程

Fig.3 Tracings of wetting-front position with time (min) during redistribution in treatment 1#

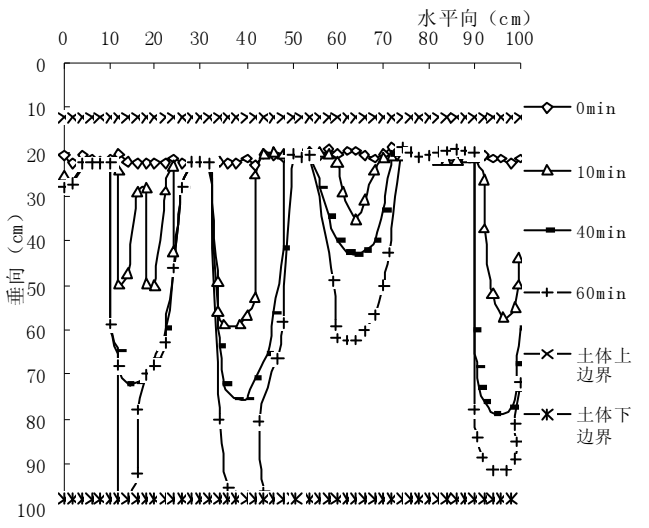


图 4 处理 2 指流的发展状况

Fig.4 Tracings of wetting-front position with time (min) during redistribution in treatment 2#

寸为 58 cm×46 cm×1.6 cm) 中装成均质的土壤结构。实验时,供水量按照实验土箱的体积比例与处理 1 保持一致,为 350 cm<sup>3</sup>,指流的发育情况如图 5。

由图 5 可以看出,处理 3 在充分施水 350 cm<sup>3</sup> 后的水分再分布过程中,湿润锋平稳地向前推进,且前移速度随着再分布过程的进行逐渐变慢;65 min 后,湿润锋接近土箱的下边界,锋面依然稳定、波动不大,此次处理中指流基本没有发育。

与处理 1 相比可以看出,较小的实验土箱尺寸能够抑制指流的发育,可使原来指流发生比较明显的土体系统呈现出稳定形态,这或许是由于横断面太小而不能够显示指流的若干个形态的缘故。因此,用一个较大的实验土箱进行指流的实验研究是有必要的。

### 2.4 溶液浓度对指流形成的影响

农业生产中,为了提高灌水的效率,采用灌溉伴随施肥即用肥液进行灌溉的情况已越来越广泛,同时传统的施肥后再进行灌溉的情况也相当普遍,那么这些不同的施肥方式到底效果如何,是否会促进指流的发育,即为本次研究溶液浓度对指流发育影响的意义之所在。

已有研究<sup>[18,19]</sup>从理论推导角度描述了流体特性对指流宽度及指流发育速度的影响:即指流宽度流体的密度成反比,与流体的表面张力成正比;指流的发育速度流体的密度成正比,与流体的粘度成反比。对此,本次实验采用二次蒸馏水、参照实际生产中氮肥的施用水平配制了不同浓度的硝酸钾(KNO<sub>3</sub>)溶液进行实验,即处理 4~5(表 1),并与同条件下采用自来水进行的指流实验(处理 1)作对比,以分析溶液浓度对指流发育过程的影响。

处理 4 中硝酸钾(KNO<sub>3</sub>)溶液的浓度为 0mg·l<sup>-1</sup>,即向土体施加的液体为纯净的去离子水,指流的发育情况如图 6。可以看出,在积水消失时刻及其以后的再分布过程中,湿润锋平稳地向前推进,在整个再分布过程持续的 120 min 内,指流基本没有发育。

处理 5 中硝酸钾(KNO<sub>3</sub>)溶液的浓度为 7214 mg·l<sup>-1</sup>,对应于氮(N)的浓度为 1000 mg·l<sup>-1</sup>,为实际施氮水平的较大值,指流的发育情况如图 7。土表积水消失时刻,锋面平整;然而,水分再分布过程一旦开始,湿润锋立即失稳并分裂成若干形态各异的指流迅速向下传播;随着再分布过程的进行,指流继续发育,邻近较小的两个指流可以合并成一个形体

较大的指流,但指锋向下传播的速度明显变缓;当再分布过程持续 60 min 后,指锋达土体的下边界。

对比处理 4~5 可以看出,水分再分布过程中,在其他条件一致的情况下,所施加溶液的浓度越大时,其密度越大,表面张力越小,则指流的发育速度越快,再分布过程所持续的时间越短,产生的指流宽度越小,指流的形态越明显,即指流越易于产生,这与已有研究<sup>[18,19]</sup>通过理论推导得出的结论是一致的。

然而,值得提及的是:对比图 1 可以看出,在其他条件一致的条件下,当处理采用的液体为自来水

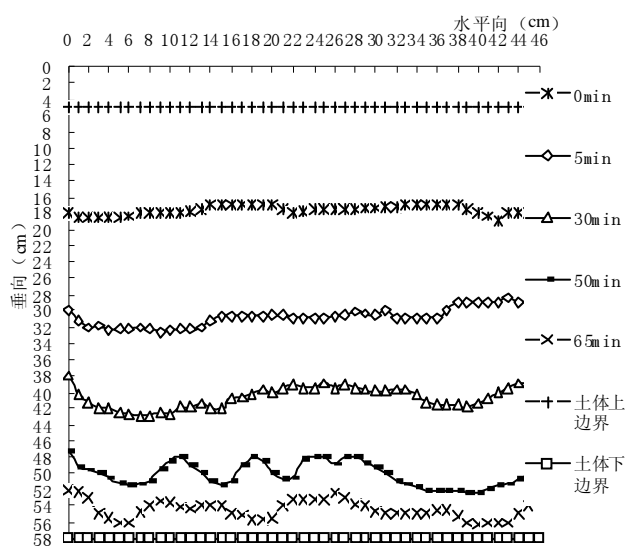


图 5 处理 3 指流的发育情况  
Fig.5 Tracings of wetting-front position with time (min) during redistribution in treatment 3#

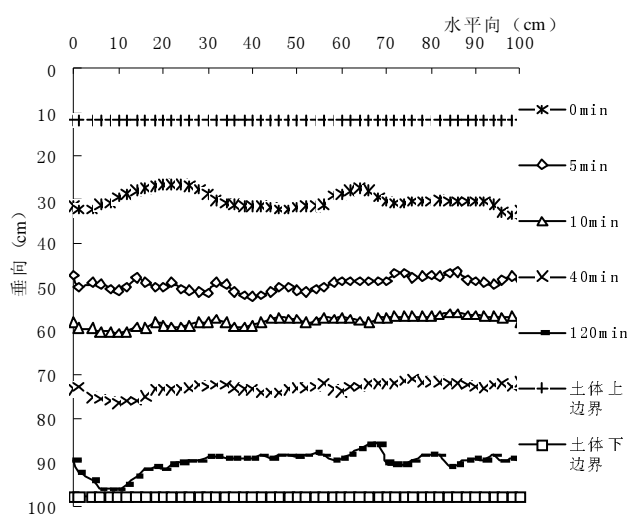


图 6 处理 4 指流的发育情况  
Fig.6 Tracings of wetting-front position with time (min) during redistribution in treatment 4#

时,指流的发育比采用浓度为  $7214\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  硝酸钾( $\text{KNO}_3$ )溶液更为明显;但自来水的密度小于浓度为  $7214\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  硝酸钾( $\text{KNO}_3$ )溶液的密度,该处理的实验结果表面看来与已有研究<sup>[18-19]</sup>通过理论推导得出的结论不一致。原因可能在于:① 指流的发育进程及最终的发育形态受流体的密度、表面张力及粘度等方面的多重影响,自来水中所含有的化学元素种类较多,且化合物间的相互作用复杂,虽然其密度较小,但其表面张力也可能小于浓度为  $7214\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  硝酸钾( $\text{KNO}_3$ )溶液的表面张力;② 水分在土壤介质中进行运移时,不同离子或化合物与土壤颗粒间的相互作用各异,当液体中含有的离子或化合物种类较多时,这种相互作用比具有单一成分的流体与土壤的相互作用要复杂的多,因此,也会对湿润锋的稳定性产生影响。不过笔者的这种解释有待今后设计实验进一步地验证和深入讨论。

### 3 结 论

- (1) 水分再分布过程中,均质结构砂质介质中能够容易地出现指流;
  - (2) 前期供水量的多少对其后水分再分布过程中指流发育的最终形态影响不大,但能够对其发育的进程产生明显的影响;
  - (3) 实验土箱较小时,可使原来指流发生比较明显的土体系统呈现出稳定形态。因此,用一个较大的实验土箱进行指流的实验研究是有必要的;
  - (4) 实验表明:水分再分布过程中,对于成分单一的  $\text{KNO}_3$  溶液来说,所施加溶液的浓度越大时,指流的发育速度越快,产生的指流宽度越小,指流的形态越明显,与已有研究的理论推导得出的结论一致;
  - (5) 然而,相同条件下,当采用密度较小的自来水作为流体时,指流的发育比采用浓度为  $7214\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  硝酸钾( $\text{KNO}_3$ )溶液更为明显。表面看来该实验处理结果与已有研究的理论推导得出的结论不符,这可能与指流形成的其他因素有关,有待今后设计实验进一步地研究。
- 由于指流发生的随机性和复杂性,有关水分数量和能量的参数在指流的发育过程中其大小及分布很难用传统的方法来测定。本次研究以实验为手段对水分再分布过程中指流的发育进行了分析,得

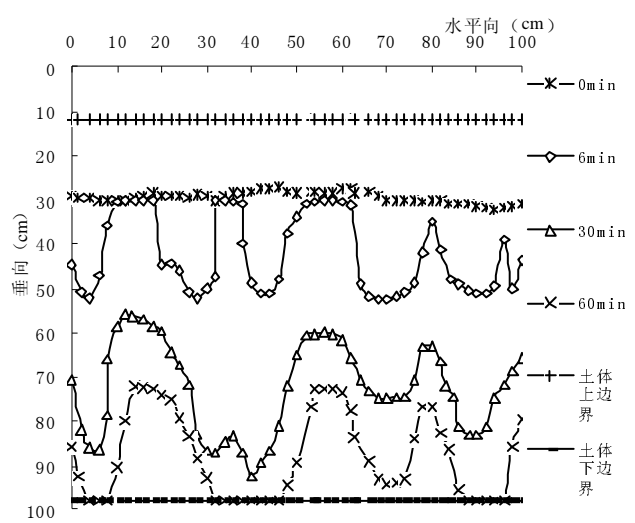


图 7 处理 5 指流的发育情况  
Fig.7 Tracings of wetting-front position with time (min) during redistribution in treatment 5#

到若干结论,旨在能为充实指流理论及指导生产实践提供必要的科学依据。进一步的研究还需要改善观测方法,并获取大量的实验资料,以促进指流理论及模拟方法不断地完善,进而更好地解决多孔介质中与指流有关的水分及溶质运移问题。

### 参考文献

- [1] Wang Z, Feyen J, Elrick D E. Prediction of fingering in porous media. *Water Resource Research*, 1998, 34 (9): 2183-2190.
- [2] 李贺丽,李怀恩,王智,等. 多孔介质中指流的研究综述及展望. *土壤*, 2008, 40(1): 27-33.
- [3] Izadi G R B, King B, Dowing E. Preferential transport of bromide in undisturbed core under different irrigation method. *Soil Science*, 1996, 161(4): 214-225.
- [4] Selker J, Lecelero P, Parlange J Y, et al. Fingered flow in two dimensions: predicting finger moisture profile. *Water Resource Research*, 1992, 28(9): 2523-2528.
- [5] Wang Z, Tuli A, Jury W A. Unstable flow during redistribution in homogeneous soil. *Vadose Zone Journal*, 2003, 2:52-60.
- [6] Wang Z, Wu L, Harter T, et al. A field study of unstable preferential flow during soil water redistribution. *Water Resource Research*, 2003, 39 (4):1075-1089.
- [7] 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.
- [8] 史文娟,汪志荣,沈冰,等. 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.
- [9] 张建丰. 黄土区层状土入渗特性及其指流的实验研究. 杨陵: 西北农林科技大学博士学位论文, 2004.
- [10] Wang Z, Wu Q J, Wu L, et al. Effects of soil water repel-

- lency on infiltration rate and flow instability. *Journal of Hydrology*, 2000, 231–232: 265–276.
- [11] Jury W A, Wang Z, Tuli A. A conceptual of unstable Flow in unsaturated soil during redistribution. *Vadose Zone Journal*, 2003, 2: 61–67.
- [12] Wang Z, Jury W A., Atac T, et al. Unstable flow during redistribution: controlling factors and practical implications. *Vadose Zone Journal*, 2004, 3: 549–559.
- [13] Peck A J. Redistribution of soil water after infiltration. *Australian Journal of Soil Research*, 1971, 9: 59–71.
- [14] 拦继元. 指流形成机理及主要影响因素的初步实验研究. 西安: 西安理工大学硕士学位论文, 2006.
- [15] Kawamoto K, Mashino S, Oda M, et al. Moisture structures of laterally expanding fingering flows in sandy soils. *Geoderma*, 2004, 119: 197–217.
- [16] Hillel D, Baker R S. A descriptive theory of fingering during infiltration into layered soils. *Soil Science*, 1988, 146 (1): 51–55.
- [17] Glass R J, Parlange J Y, Steenhuis T S. Wetting front instability I. Theoretical discussion and dimension analysis. *Water Resource Research*, 1989, 25(6): 1187–1194.
- [18] Miller E E, Miller R D. Physical theory for capillary flow phenomena. *Journal of Applied Physics*, 1956, 27:324–332.
- [19] Selker J S, Schroth M H. Evaluation of hydrodynamic scaling in porous media using finger dimensions. *Water Resource Research*, 1998, 34(8):1935–1940.

## Experimental Research on Characteristics and Effect Factors of Finger Flow during Redistribution in Sandy Soil

LI Heli<sup>1,2,3</sup>, LI Hua<sup>2</sup>

(1. Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Key Laboratory of Water Resources, Environmental and Ecology in Northwest China, Ministry of Education, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, CAS, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The process of water transferring through soil zone can be divided into two phases: the foregoing infiltration and the following redistribution. Finger flow as a form of the preferential flow of water, differs from macro-pore flow and funnel flow. It has been validated that finger flow can occur during the redistribution following the infiltration of soil water. However, domestic studies on finger flow are very few at present, and cognition about it is very scarce either. Hereby, in this paper, the experiments were designed to discuss the characteristics and the effects of different factors on the development of finger flow during redistribution with a sandy soil. The effect factors included the quantity of the water supplied in prior process of infiltration, the size of the experimental box, the fluid characteristics and so on. The major results are as follows: finger flow can develop easily during water redistribution process with prior sufficient water supply; the quantity of water increased in prior process of infiltration has little influence on the final form of finger flow developed whereas quickens the speed of the finger flow development; the smaller experiment box can restrain the development of finger flow; the finger flow develops faster with its form clearer during the water redistribution process when the concentration of simplex solution is increased, but when compared with the experiment in which tap water is used, the experimental result is reversed.

**Key words:** finger flow; effect factors; redistribution; experimental research

本文引用格式:

李贺丽, 李怀恩. 水分再分布过程中指流特性及影响因素的实验研究. *地理科学进展*, 2010, 29(2):173–178.