

层状土壤指流实验研究

李怀恩¹, 拦继元², 史文娟¹, 张建丰¹, 王 智³, 李贺丽¹

(1. 西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 青海省环境科学研究设计院, 青海 西宁 810007;

3. 加利福尼亚州立大学 Fresno 分校地学与环境科学系)

摘 要: 为了解层状土条件下指流平均推进速度与上层土壤性状的关系, 分别以西北地区三种典型土壤(西峰土、榆林土、新疆沙土)为上层土、粗沙为下层土, 在室内进行充分供水条件下层状土壤指流实验。实验结果表明, 上层土的饱和导水率决定了下层沙土中指流的平均推进速度, 且上层土的饱和导水率与指流平均速度呈线性关系。该结论对指流特征预测具有重要参考意义。

关键词: 指流; 层状土; 湿润锋; 饱和导水率

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2007)06-0111-05

层状土壤是土壤剖面中普遍存在的土壤结构, 是土壤自然形成过程中的产物。如古河道地区沉积过程形成的盆地、冲积平原以及山前冲积扇、黄土地区以风力搬运作用为主形成的平原区等^[1]。指流是优先流的一种, 是指水分和污染物在土壤中迁移时, 并非整齐均匀的向下入渗, 而是绕过大部分土壤基质呈“指状”或“舌状”入渗的现象^[2], 其入渗速度很快, 所以指流发生时会对地下水造成潜在的污染威胁。显然, 指流与传统的均匀流入渗完全不同, 迫切需要对指流的推进速度等特性进行深入的研究。国外对于指流的研究开展得相对较早, 1972 年 Hillel 和 Parlange^[3]利用层状土(细质土覆盖于粗质土之上)进行积水入渗实验时发现了指流现象, 之后指流研究才受到越来越多的关注。近年来王智^[4~6]对均质土和层状土的指流发生条件和机理进行了深入研究, 取得了很多有价值的理论和成果。相比之下国内对指流的研究开展得较晚^[1], 杨金忠^[7]、程竹华等^[8]均在野外实验中观察到了指流现象。刘亚平^[9]介绍了国外优先流的研究成果。黄智达^[10]根据在国外的研究成果, 引用粘性驱替有关理论对层状结构多孔介质水分入渗湿润锋的稳定性进行了分析。史文娟等^[11]对非饱和土壤中的指流做过一些实验研究。张建丰^[1]对黄土地区层状结构土壤指流发生的条件进行了研究。但总的来说, 以上研究基本是以指流运动特性和指流发生机理为主。本文结合西北地区三种典型土壤的特点, 分别对不同层状结构土壤的指流入渗规律进行实验研究, 并探讨指流平均推进速度与土壤水力学特性参

数之间的关系, 以期用于指导实践。

1 实验设计与方法

1.1 实验设计

土壤的入渗实验装置主要由土箱和供水装置两大部分组成。根据张建丰^[1]及本文作者的初步实验结果^[12], 当实验土体厚度较大时, 部分湿润锋将不能从侧面被观察到, 因此, 为了充分了解水分入渗过程中的湿润锋变化情况, 将田间三维入渗现象通过二维实验装置进行模拟, 采用了比较小的土箱厚度。将二块有机玻璃面板(高×宽×厚为 0.6 m×0.5 m×0.008 m)固定于底座为工字型的钢板上, 前后两块玻璃板间距固定为 1.6 cm(之所以选定 1.6 cm 是因为当板间距大于此距离时湿润锋在前后两块玻璃板上显示的位置不尽相同), 即土箱的体积为定值。为了装土和取土的方便, 土箱设计成可拆卸式。土箱侧壁上标有刻度, 最小刻度单位为 mm, 供观测用。土箱底部设有排水口, 以排出到达土箱底部的水分。土箱实验装置示意图见图 1。供水装置采用马氏瓶供水, 并保持土表积水厚度为 2 cm。

1.2 实验方法

上层细质土壤分别取自陕西榆林、甘肃西峰和新疆石河子地区; 下层粗沙土壤, 取自自然河沙。三种细质土样及粗沙土的机械组成见表 1。土样取回后在自然条件下风干, 过 2 mm 筛, 分别按设定容重分层均匀装土, 上层细质土厚 8 cm, 下层沙土厚 45 cm。三种细质土样的容重分别为 1.55、1.40、1.55 g/cm³, 粗沙土的容重为 1.60 g/cm³。

收稿日期: 2007-06-06

基金项目: 陕西省重点实验室访问学者专项计划项目(05JF11); 教育部高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划项目(2001-282)

作者简介: 李怀恩(1969)男, 陕西南南人, 教授, 博士生导师, 主要从事水文与水环境保护研究, E-mail: Lhuaien@mail.xaut.edu.cn.

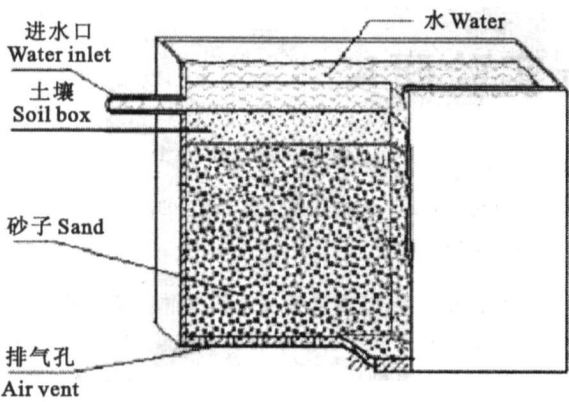


图 1 实验装置示意图^[1]

Fig.1 Sketch of experiment equipment^[1]

实验准备就绪后, 打开马氏瓶放水阀, 并开启秒

表记录时间, 保持表层积水厚度为 2 cm。随后每隔一定时间, 记录马氏瓶中水位变化并将湿润锋的位置在玻璃板上描绘出来, 待实验结束后再进行详细测量。记录过程持续到实验结束。

通过前期实验^[11], 测得西峰土、榆林土和新疆沙土的饱和导水率分别为 0.815、1.02、1.83 cm/min。

2 结果分析

2.1 不同层状结构土壤湿润锋运移特性

以土表面为入渗深度的参考面, 因此向下入渗为负值。对实验结果进行分析, 分别得到三种不同土壤结构下的湿润锋分布特征, 分别见图 2、图 3 和图 4。

表 1 供试土壤的机械组成

Table 1 Particle size distribution of experiment soils

土壤类型 Type of soil	粒级 Grains percentage(%)				
	<2.0 mm	<1.0 mm	<0.5 mm	<0.25 mm	<0.1 mm
榆林土 Yulin soil	100.00	99.96	93.09	72.59	9.59
新疆沙土 Xinjiang soil	100.00	100.00	100.00	98.46	8.61
西峰土 Xifeng soil	100.00	99.83	93.59	77.82	16.54
粗沙土 Bulky grain	100.00	98.42	88.07	18.59	0.29

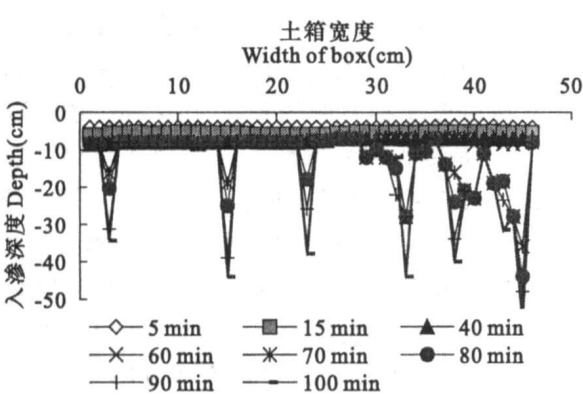


图 2 上层为西峰土的湿润锋动态分布

Fig.2 Wetting front dynamic distribution of Xifeng soil as upper soil

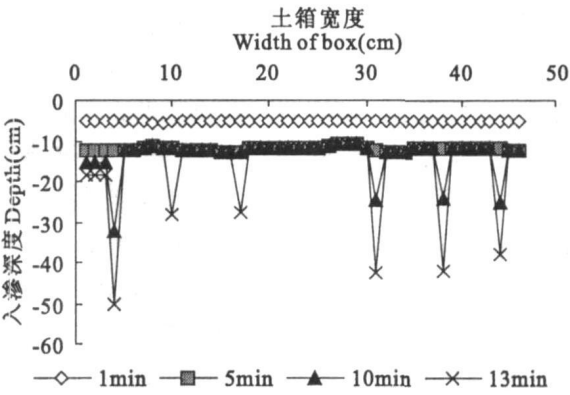


图 3 上层为榆林土的湿润锋动态分布

Fig.3 Wetting front dynamic distribution of Yulin soil as upper soil

由图 2、图 3、图 4 可以看出, 水分在上层细质土壤中入渗时, 湿润锋非常平整, 没有出现部分湿润锋突进的现象。当湿润锋下移至土沙界面并进入下层粗质土壤后, 一部分湿润锋突然快速向下移动, 而其他部分的湿润锋则停止下移, 由此便形成指状入渗的现象, 即产生指流(实验过程中没有发现壁流, 因此可以肯定为指流)。另外还可以看出上层土壤的土质不同, 则下层沙土中指流的数目、指流下移的速度也明显不同: 上层为西峰土的层状土出现了 6 条

指流, 且指流下移速度是三种层状土中最慢的; 上层为榆林土的层状土也出现了 6 条指流, 指流下移速度较快; 而上层为新疆沙土时则出现的指流数目为 9 条, 且指流下移速度最快。因此, 上层土壤的性质直接关系着下层土中指流的特性。

根据张建丰的研究^[1]: 当水分在层状土壤中入渗时, 上层土壤实际上是为下层土壤创造了一个非充分供水的入渗条件, 也就是通过上层土壤的控制(质地、性质、厚度等)为下层提供了一个小于其饱和

导水率的稳定入渗通量,从而使入渗水流在下层土内形成了一个非饱和水流的稳定供水入渗过程,在此情况下,下层土内仅有部分土壤孔隙起到了导水作用,而另一部分孔隙仍被土壤空气所占据。由于不同土壤的水分特征曲线不同,因此当两种不同质地的土壤迭放时,在一特定的积水入渗双层结构的土沙交界面处,尽管入渗水流通过时其吸力值是连续的,但上、下层土交界面处的土壤含水量是不相等的。下层沙土含水量明显小于上层土壤含水量。这就说明,对于这种条件下的入渗,在下层沙土中能够导水的只能是一部分孔隙较小的沙土,而较大的孔隙是不会导水的。因此湿润锋面将表现的极不稳定,从而产生指流。

2.2 不同层状结构土壤的指流特征分析

指流的特征可以采用指锋深度、指根深度、指流数目、指流推进速度等来表示^[1]。指流数目前已述及。指流的推进速度与指流长度有密切的关系(指流长度对时间的导数即为指流的推进速度),而指流

长度为指锋深度减去指根深度的差值。指锋深度是指由入渗土面到指流前沿的距离,指根深度是指由入渗土面到指流根部的距离。

2.2.1 指流长度变化规律 根据实验资料统计,将图 2、图 3、图 4 三种不同情况下每条指流的长度随时间的变化关系列于表 2。由表 2 可以看出,各种层状结构的指流长度均随入渗时间的增加而增大。将同种土壤某一入渗时间所对应的指流长度取其平均值,并绘出指流平均长度与时间的变化关系(见图 5)。图 5 表明,在入渗开始后的相同时间内,新疆沙土的指流长度最大(速度最快),榆林土的指流长度次之,西峰土的指流长度最小(速度最慢)。结合所测定的不同土质的饱和导水率可以看出,上层土的饱和导水率大,下层粗沙土中出现的指流长度就相应的比较长;反之,则下层粗沙的指流长度就比较短。如榆林土和新疆沙土的饱和导水率较大,所对应的指流下移的也比较快,在几分钟内就下移了十几厘米。

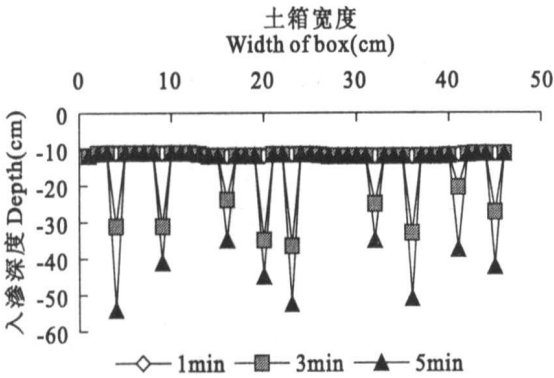


图 4 上层为新疆沙土的湿润锋动态分布
Fig.4 Wetting front dynamic distribution of Xinjiang soil as upper soil

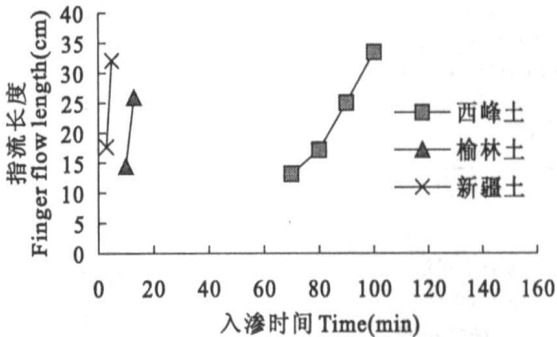


图 5 指流长度随时间的变化
Fig.5 Change of finger flow length of three soils during experiment

表 2 不同层状结构土壤指流长度随时间的变化												
Table 2 Relationship between finger flow length and time for different layered soils												
土类及编号 Type of soil	时间 Time (min)	指流编号及长度(cm) Finger flow length									平均长度 Mean length (cm)	饱和导水率 Saturated water conductivity (cm/min)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1 上西峰下粗沙 Up Xifeng soil Bellow bulky grain	70	7.8	11	—	17	2	28	—	—	—	13.160	0.82
	80	12.3	17	10.2	17	10	36	—	—	—	17.083	
	90	23.7	31	18.2	17	20	40	—	—	—	24.983	
	100	26.3	36	30.3	34	26	48	—	—	—	33.433	
2 上榆林下粗沙 UP Yulin soil Bellow bulky grain	10	20.0	—	—	13	12	13	—	—	—	14.375	1.02
	13	38.0	16	15.0	31	30	26	—	—	—	25.917	
3 上新疆下粗沙 Up Xijiang soil Bellow bulky grain	3	20.0	20	12.0	23	25	13	21	8.7	16	17.633	1.83
	5	43.0	30	23.0	33	41	23	39	25.7	31	32.078	

2.2.2 指锋深度变化规律 实验结果表明,在入渗深度较浅的情况下,层状土中出现的每一条指流的指锋深度与入渗时间均呈良好的线性关系,可引用张建丰的指流速度特征指标描述^[1]:

$$Z_p = A_p T + B_p \tag{1}$$

式中: Z_p 为指锋深度(cm), T 为入渗时间, A_p 、 B_p 为似合系数,表 3 所列出了三种层状土结构下每条指流的 A_p 、 B_p 的系数值。由表可见,采用指流速度特征指标来拟合的指锋深度 Z_p 与时间 T 的关系,相关系数大都在 0.90 以上。说明当入渗深度较浅时采用线性关系拟和是合适的。

将(1)式对时间 T 求导,则系数 A_p 即为指流的推进速度 V_p ^[1],即:

$$V_p = \frac{dZ_p}{dT} = A_p \tag{2}$$

式中: V_p 为指流的推进速度。将相同土壤层状结构下所产生的每条指流的系数 A_p 取其平均值即为对应的指流平均推进速度 $\overline{A_p}$,结果见表 3。由表 3 可见,上层为新疆沙土时产生的指流推进速度最快,榆林土次之,上层为西峰土时产生指流的推进速度最慢。对照饱和导水率可以看出指流的平均推进速度 $\overline{A_p}$ 与上层土的饱和导水率有密切关系,上层土饱和导水率大则指流的平均推进速度快,反之上层土的饱和导水率小则下层土产生指流后,指流的平均推进速度较慢。

表 3 不同实验条件下各条指流的拟合参数
Table 3 Fitted parameters of each finger flow for different treatments

土壤类型 Soil type	指流编号 No.	A_p	B_p	R^2	$\overline{A_p}$	饱和导水率 K_s Saturated water conductivity (cm/min)
上西峰下粗沙 Up Xifeng soil Bellow bulky grain	1	0.67	−31.50	0.9742	0.837	0.82
	2	0.92	−46.60	0.9818		
	3	0.78	−43.00	0.9343		
	4	0.74	−32.02	0.7916		
	5	0.84	−43.00	0.9955		
	6	1.07	−47.76	0.8576		
上榆林下粗沙 Up Yulin soil Bellow bulky grain	1	4.67	−11.79	0.9873	4.043	1.02
	2	5.33	−41.33	0.9897		
	3	5.00	−37.30	0.9872		
	4	3.61	−7.21	0.9347		
	5	2.94	−0.57	0.9317		
	6	2.70	0.49	0.9691		
上新疆下粗沙 Up Xijiang soil Bellow bulky grain	1	10.75	−0.15	0.9984	8.028	1.83
	2	7.50	5.27	0.9643		
	3	5.75	6.32	0.9994		
	4	8.25	5.82	0.9508		
	5	10.25	2.75	0.9842		
	6	5.75	6.75	0.9944		
	7	9.75	2.75	0.9980		
	8	6.50	3.67	0.9694		
	9	7.75	3.76	0.9997		

为了印证上层土的饱和导水率与指流平均推进速度的关系,又进一步对其进行拟和,得到如下关系式:

$$\overline{A_p} = 6.4707 K_s - 3.6025 \quad R^2 = 0.9294 \tag{3}$$

式中: $\overline{A_p}$ 为指流平均推进速度, K_s 为相应层状土的饱和导水率。可见其相关系数较高,表明上层土的饱和导水率对下层土中指流的平均推进速度有很大影

响。在实际工作中,若已知土壤的饱和导水率,可以根据(3)式近似估算出土壤中指流的平均推进速度,这对地下水污染等现象的预测具有重要参考意义。

3 结 论

1) 积水入渗条件下,上层为细质土、下层为粗

质土时,易于形成指流。

2) 采用指流长度、指锋深度、指锋的平均推进速度等指标作为描述指流发展过程是可行的;入渗深度较浅时,指锋深度与入渗时间之间呈线性关系。

3) 当层状土壤出现指流后,指流的平均推进速度受上层土的饱和导水率制约。上层土的饱和导水率大,则指流的平均推进速度快,反之亦然。

4) 在入渗深度较浅的情况下,下层土壤中指流的平均推进速度与上层土壤的饱和导水率之间呈线性关系。

参 考 文 献:

[1] 张建丰.黄土区层状土入渗特性及其指流的实验研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2004.1—2.
[2] 牛健植.长江上游暗针叶林生态系统优先流机理研究[D].北京:北京林业大学,2003.2—4.
[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] Zhi Wang, Wu Q J, Wu L. Effects of soil water repellency on in-

filtration rate and flow instability [J]. Journal of Hydrology, 2000, (4); 265—276.
[5] Zhi Wang, William A, Jury. Unstable Flow during Redistribution; Controlling Factor and Pratical Implications [J]. Vadose Zone Journal, 2004, (3); 549—559.
[6] William A, Jury, Zhi Wang. A Conceptual of Unstable Flow in Unsaturated Soil during Redistribution[J]. Vadose Zone Journal, 2003, (2); 61—67.
[7] 杨金忠.野外非饱和土壤水流运动速度的空间变异性及其对溶质运移的影响[J].水科学进展,1994, (5); 9—17.
[8] 程竹华,张佳宝,徐绍辉,黄维海.平原三种土壤中优势流现象的试验研究[J].土壤学报,1999, 36(2); 154—161.
[9] 刘亚平,陈 川.土壤非饱和带中的优先流[J].水科学进展,1996, 7(1); 85—89.
[10] Huang Zhida. Wetting Front Instability Analysis of Infiltration in Layered Porous Media[J]. Math Research, 1998, 6(2); 122—131.
[11] 史文娟,汪志荣,沈 冰,等.非饱和土壤中指流的研究进展[J].西北农林科技大学学报, 2004, (7); 128—132.
[12] 拦继元,李怀恩,史文娟,等.西北地区三种典型土壤入渗特性对比研究[A]. 沈冰.中国第三届水问题论坛[C]. 西安:中国水利水电出版社,2005. 489—493.

Laboratory study of finger flow in layered soils

LI Huai-en¹, LAN Ji-yuan², SHI Wen-juan¹, ZHANG Jian-feng¹, WANG Zhi³, Li He-li¹

(1. Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2. Qinghai Institute of Environmental Research and Design, Xining, Qinghai 810007, China;

3. Department of Earth and Environmental Sciences, California State University, Fresno, California, USA)

Abstract: The finger flow experiment on layered soils, with three typical soils (Xifeng soil, Yulin soil, Xinjiang sand soil) as upper soils and bulky grain as lower soils, in the condition of sufficient water supply indoors was carried out for the relationship between the rate of finger flow and upper soil characteristics. The results show that, the average rate of finger flow was controlled by the hydraulic conductivity rate of upper soil, and there was a good linear relationship between the hydraulic conductivity rate of upper soil and the average rate of finger flow. This is an important conclusion to the forecast of the finger flow characteristics.

Keywords: finger flow; layered soils; wetting front; saturated hydraulic conductivity