

包气带水气二相流实验研究*

彭 胜¹ 陈家军¹ 王金生¹ 李书绅² 王志明²

(1 北京师范大学环境科学研究所, 环境模拟与污染控制国家重点实验室, 北京 100875

2 中国辐射防护研究院, 太原 030006)

摘 要 本研究设计并建立了一维和二维实验装置, 通过水的入渗来驱动气相流动从而营造出水气二相流的流场, 并通过监测水的累积入渗量和湿润峰前进行情况及流场内各监测点气体的压力变化来研究水气二相流。本实验采用压力传感器并设计了气压自动采集系统来监测并记录一维及二维土柱中气体的压力变化, 在土柱的底部出气口, 用带阀门的微量流量计来控制并调节气体的出流速率。在一维入渗实验中, 我们发现控制气体出流的情况下水的入渗速率比在没有控制的情况下有所减少。在控制气体出流的实验中, 水的入渗速率对应于气体的出流速率有对应的变化, 并且总是较气体出流速率大。在二维实验中我们发现, 水的入渗速率及空气的压缩程度均为在垂向较为横向大。此外, 我们还得到了不同时刻空气压力的等值线图, 通过空气压力等值线图可以看出在供水槽与出气口之间的连线的直线方向上, 空气的流动最强烈。

关键词 二相流, 一维入渗, 二维入渗, 空气压缩, 空气压力

中图分类号 P641

水在土壤包气带中的入渗实质是水气两种互不混溶的流体在土壤孔隙中互相替代的过程^[1], 这个过程中既有水相的流动, 又有气相的流动。气相的流动在以往的研究中通常被忽略, 即被认为是静止的或其流动为自由流动, 在此过程中气相压力与大气压平衡。而在实际情况中, 如大的降雨^[2], 入渗下边界为较浅的水面或是不透水层, 土壤空气由于不能自由排出产生的压缩, 会在一定程度上降低水的入渗速率, 大量的实验室及野外实验都证明了这一点^[1-10]。

Wang^[3]在用装填干砂土的土柱入渗实验中观察到在闭气情况下比在排气情况下其入渗速率低得多, 并且空气由于压缩到了一个爆破值(Wang 定义其值为土表水头、湿润峰高度及土壤水的进气压力之和)时, 空气会冲破上覆含水层在其中形成气流通道, 并从土表溢出, 此时, 水的入渗速度达到最小, 接近于零。空气从土表溢出后, 气压迅速下降, 当下降至闭气值(Wang 定义其值为土表水头、湿润峰高度及土壤水的进水压力之和)时, 气流通道又重新被水占据, 此时水的入渗速率达到最大。Peck^[4-5]、Grismer^[2]及 Toma^[6]等人在他们的实验中也观察到了类似现象, 但 Grismer^[2]与 Toma^[6]认为气体在达到一个临界值而溢出土面后, 由于气体的出流速率就等于水的入渗速率, 因此气压便稳定在一临界值上, 并在土壤含水层中形成连续的通道。

* 中国辐射防护研究院国际合作资助项目(项目编号: CJ2-A-7)

收稿日期: 2000-10-10; 收到修改稿日期: 2001-01-18

以上大多数的水气二相流研究都是考虑一维入渗,而在现实中,当源为有限面源时的入渗,如废物处置沟产生的污染物入渗,特别是既能溶于水而随水迁移又能挥发为气体而随气迁移的污染物入渗,就有必要了解二维二相流动的情况。本研究将从另一个角度来观察水气二相流,即控制土柱末端空气的出流速率以观察不同气流速率下水的入渗情况及土柱中的气压分布与变化。将对二维条件下的水气二相流进行观测与分析,观察湿润峰的前进情况,以及由湿润峰前进引起的湿润峰下空气压力的变化及空气的流动情况。

1 实验材料与方法

图1为一维入渗实验的装置示意图。其中的土柱为高100 cm,内径14 cm,壁厚9 mm的有机玻璃柱,在柱壁的两个垂直对角方向从上至下开有4排孔径为1 cm的小孔,以留作安插负压计、压力传感器及测含水量取样用。马氏瓶也由有机玻璃制成,其高80 cm,内径9 cm,壁厚5 mm,在入渗实验中,累积入渗量可由马氏瓶的水位下降高度获得。负压计为地矿部水文地质工程地质研究所制作的WM-1型负压计。气压自动监测系统由PCE-4型压力传感器(Honeywell, Inc, 美国)、A/D转换及放大器与PC控制界面组成,采样间隔与采样个数可由控制界面调节。二维入渗实验装置与此类似,装土容器为一长40 cm,宽8 cm,高60 cm的有机玻璃箱。一维有机玻璃柱与二维有机玻璃箱上下都用法兰盘密封,且上下两端都设有水嘴,以作为进水和排气用。流量计为带阀门的微型流量计(Gilmont Instrument, Inc, 美国),通过调节阀门可以控制气体的出流速率。

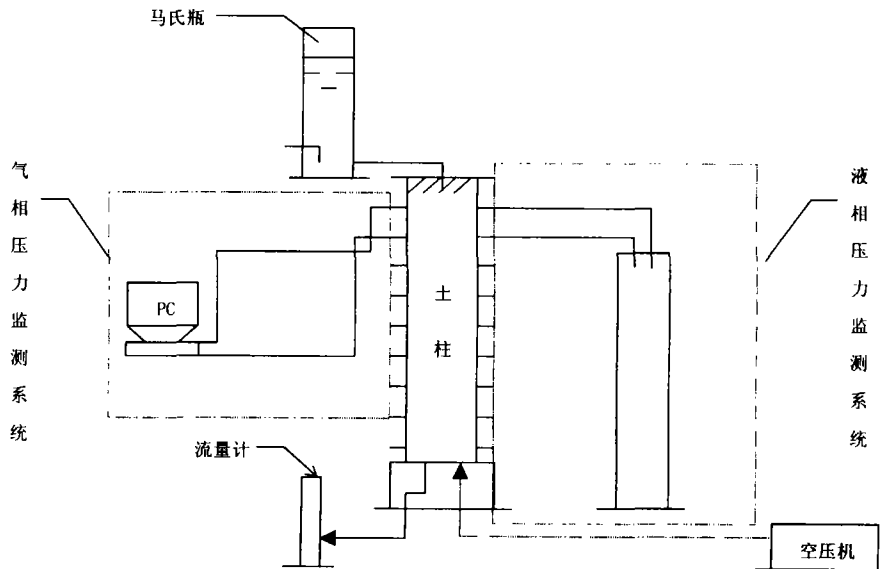


图1 实验整体构架示意图

Fig.1 A schematic map of structure of the experiment apparatus

本实验采用从中国辐射防护研究院(CIRP)的榆次试验场现场采集的扰动土。试验场区包气带黄土的粒度成分以粉粒为主,约占全土的50%以上;粘粒含量次之,约占全土的20%~33%左右;砂粒含量较少,粒径大于0.1毫米的颗粒含量小于10%。按粒度成分的分类应属于粉质亚粘土或轻粘土。土样筛过后自然风干,按照土壤质地分类标准,筛过后的土属于粉质粘性土。有机玻璃柱固定在一高25 cm的铁架平台上,柱底部留有一外径6 mm,长4 cm的水嘴以用来通气及出水。为了防止土粒阻塞水嘴,填土之前先铺上

一层厚 7.5 cm 的石英砂,在石英砂上铺上金属滤网,然后将土样均匀填入土柱,并均匀地压实,压实后整个土柱高为 85 cm,然后在土面铺上滤网及 6 cm 厚的石英砂以压紧土面防止水入渗时土表的土壤颗粒翻动。填好的土样平均密度为 1.419 g cm^{-3} ,孔隙度为 0.45。填注二维有机玻璃箱也采取同样的方法,土面与箱的上端平齐。在土箱的右上角,铺上和土箱同宽度的 10 cm 长,1.5 cm 厚的石英砂作为供水槽,供水槽与旁边的土用橡皮泥隔开,在用法兰盘密封箱口时,法兰盘与土面间用黄土严密贴紧,法兰盘同时把橡皮泥压实,以防止水入渗时直接从供水槽水平地溢到整个土箱顶部而破坏二维入渗的实验条件。为记录二维入渗时的湿润峰前进过程,在有机玻璃箱正面粘上透明坐标纸,坐标顶点为土箱的右上角,选择不同的时间间隔用铅笔记录湿润峰的位置。

在一维与二维入渗实验中,均以马氏瓶提供定水头,一维实验水头(距土面)为 16.3 cm,二维实验中水头(距土面)为 16 cm。所有的实验都在室温 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、一个标准大气压下进行。

2 实验结果与讨论

2.1 一维二相流实验

2.1.1 水入渗速率 为了进行对照,观察空气压缩对水入渗的影响,将土柱底部的水嘴打开,让空气自由流出。在另一初始条件相同的土柱中,则在底部用微量流量计控制气体出流速率。实验得到的数据及拟合结果如图 2。

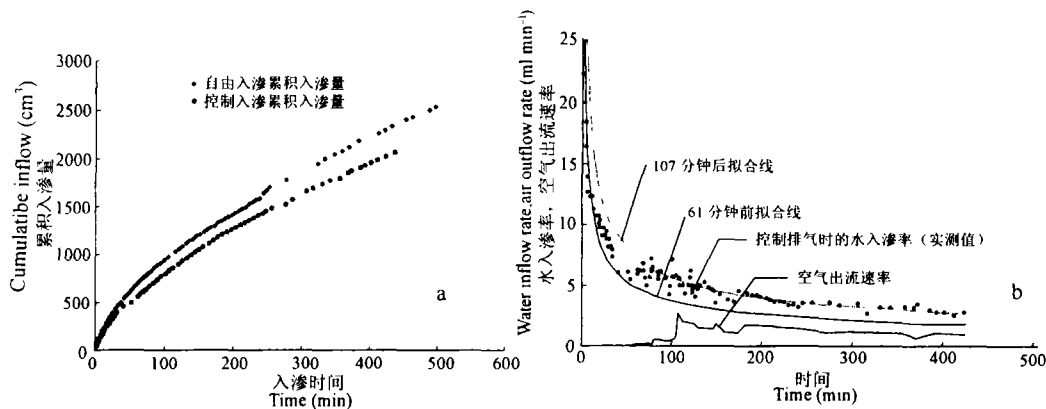


图 2 累积入渗量及入渗率曲线。(a, 空气自由流出与控制其流动的累积入渗量对比数据; b, 不同空气出流速率下水的入渗率)

Fig. 2 Cumulative inflow and inflow rate curves (a. Comparisons in cumulative inflow between free airflow and controlled airflow b. Water inflow rate related to air outflow rate)

从图 2a 中可以看出,控制空气流动时水的入渗速率同空气自由流出时相比较,有明显的下降,这说明空气由于不能自由排出而在湿润峰下产生压缩,增大了水的入渗阻力,从而减少了水的入渗速率。图 2b 中的两条拟合线是根据 Philip 经验公式拟合得到的, Philip 公式如下:

$$i(t) = \frac{1}{2} S t^{-\frac{1}{2}} + A \quad (4)$$

式中 $i(t)$ 为入渗率, S 称为吸渗率, A 称为稳定入渗率, t 为入渗时间。图 2b 的两条

拟合线分别是根据前 60 分钟,即控制气流为零的时段,与有气流时的数据得到的。当有气流流出时,可以看到水的入渗率较按闭气情况下的入渗率趋势有一定的增加,当在 107 分钟调节气流使之增大至 2.86 ml min^{-1} 之前,气流比较小,这段时间内,水入渗率比按气流增大后的拟合趋势略小,说明这段时间气流不能充分地流出,仍然有些压缩,使水的入渗率减小。从 107 分钟后,气体压缩程度逐渐减小,气体压缩对水的入渗影响程度也逐渐减小,此时,水的入渗速率变化趋势基本上与气流的变化趋势一致,但是因空气在湿润峰前及湿润峰后都仍有一定程度的压缩,所以气体出流速率较水流速率要小。

2.1.2 气体压力变化 在土面以下 20、34、50、66、82 cm 处插置传感器测定这些高度处的气压。在土壤空气自由流出的情况下,入渗过程中传感器得到的压力基本上为零。控制气体出流速率的实验中土柱内空气压力的分布及变化情况如图 3。

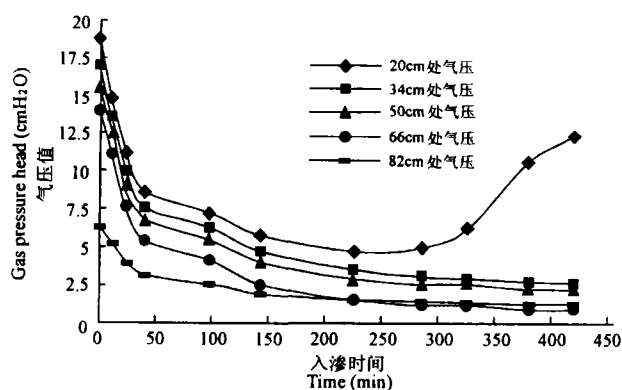


图 3 各采集点处空气压力随时间的变化曲线

Fig.3 Curves for air pressure vs time at different sampling points

计入渗开始时间为零时刻,从 $t = 0$ 到 $t = 60 \text{ min}$ 时段内,控制微量气流计流量为零,在这一时段内,从图 3 中可以看出,由于气体的压缩,气体压力开始增加,但由于在现有实验条件下由于传感器及负压计陶土头与土柱的接口处贴合的不是非常紧密,而产生的难以避免的漏气现象,所以当气体压力增加到 2 分钟,最高气压为 19.067 cm 时,气压开始下降。到 60 分钟时各点处的气压值大约下降至各点最高气压值的一半,此时气体压缩程度已有很程度的减少。由于此时在土柱底部打开了微量气流计的阀门使一部分气体流出,此时由于气体有通气出口,而气体在流动时总是优先在连续的大的孔隙通道中进行,因此漏气对气压的影响效应比之在底部没有气流时要小。由于此时水的入渗速率也减小到了最大的入渗速率的约 20%,气体的压缩程度也随之减少,虽然总体上气压还是下降,但由于出气速率较小使得气压下降的较为缓慢。

当入渗到第 107 分钟时,调节出气速率为 2.86 ml min^{-1} ,此时气体出流速率有个大的上升,此时可看出各点气压的变化也有较快的下降,此后当出气流量稳定时气压变化就较为平缓。

当入渗到第 275 分钟时,从图 3 中可看到在土面 20 cm 处的传感器的压力开始上升,这是由于此时 20 cm 处的土壤水已达到饱和,此时传感器传导的是水的压力,所以此处的传感器压力开始增大。而在约第 200 分钟时,82 cm 处的压力比 66 cm 处的大,则是由于传感器的精度造成的,因为传感器的精度为正负 0.3 cm,而在 200 分钟时,各点处的气压差值已经很小,所以监测出现上述情况。

2.2 二维二相流实验

在二维有机玻璃箱上布有 4 排 12 个压力传感器,每排 3 个,每两个相距 10 cm,传感器的位置为第一排距土面 9 cm,第二排、第三排距上一排均为 10 cm,第四排距土面为 49 cm,以土

箱的右上角为坐标原点,最右上角的传感器的位置为(10,9)。本实验中控制的气体出流速率、水的入渗速率随时间的变化如图4所示。以入渗开始时刻为零时刻,湿润峰的前进情况以及垂向和纵向的入渗率随时间变化情况如图5。从图5可以看到湿润峰运动的过程与形状,并且在垂向方向上湿润峰的距离比横向方向湿润峰的距离大,这点和 Sawhney 观测的结果类似^[11]。由于二维实验在一个较小的水头下入渗,气体的压缩较小,所以对水的入渗的阻滞作用不很明显,横向和垂向的水入渗率都基本上与用 Philip 公式拟合的结果吻合。

图6是入渗后第1、36、69、102分钟时二维土箱内气压等值线图。从这些图可以看到水入渗过程中气体的运动状况和变化过程。在这些图中,在供水槽和排气孔之间的直线方向上气压梯度最大,这就说明在此过程中,气体在这个方向上的流动为最强烈。

3 结 论

实验采用较为精确的压力传感器(精确度为3 mm),用屏蔽线与A/D转换板连接,通过C程序作为控制界面组成的自动监测系统自动实时监测并记录各监测点的气压值,可以直观地了解实验进程并控制实验,达到较好的效果。

二维二相流实验结果表明,在控制底部排气的情况下,相对于自由排气水的累积入渗量有相当程度的下降(如图2a);在控制排气的实验中,在排气之前和之后的两个时间段分别适合两个不同的吸渗系数的 Philip 公式,这说明在控制排气的条件下,水的入渗与 Philip 公式也较为符合。此外,水的入渗速率基本与气体的出流速率成正相关,当气体出流速率增大时,水的入渗速率也随之增大或基本维持稳定,而当气体出流速率减小时,水的入渗速率也随之减小。

从二维二相流实验湿润峰的前进曲线可以看到,水在垂向的入渗一般都比横向的快,并且垂向和横向的湿润峰位置随时间的变化都和 Philip 经验公式的拟合结果较为吻合。

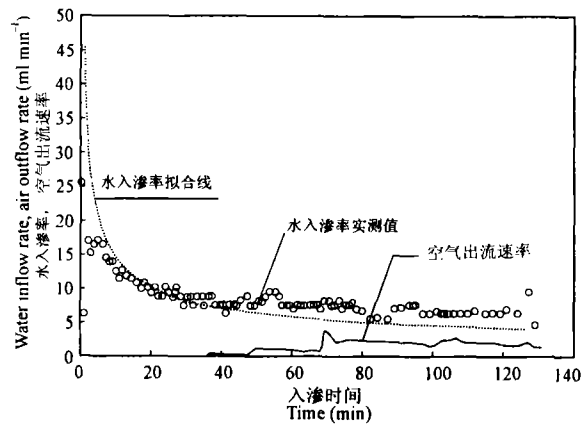


图4 空气出流速率与水入渗速率随时间变化曲线
Fig.4 Curves for air outflow rate and water inflow rate vs time

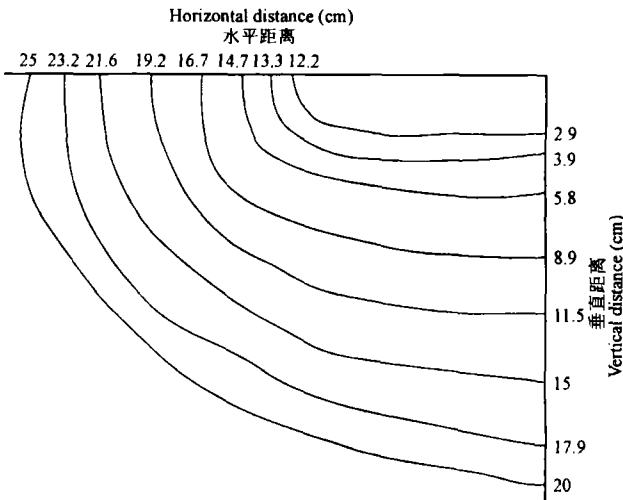


图5 湿润峰运动过程
Fig.5 Wet front movement

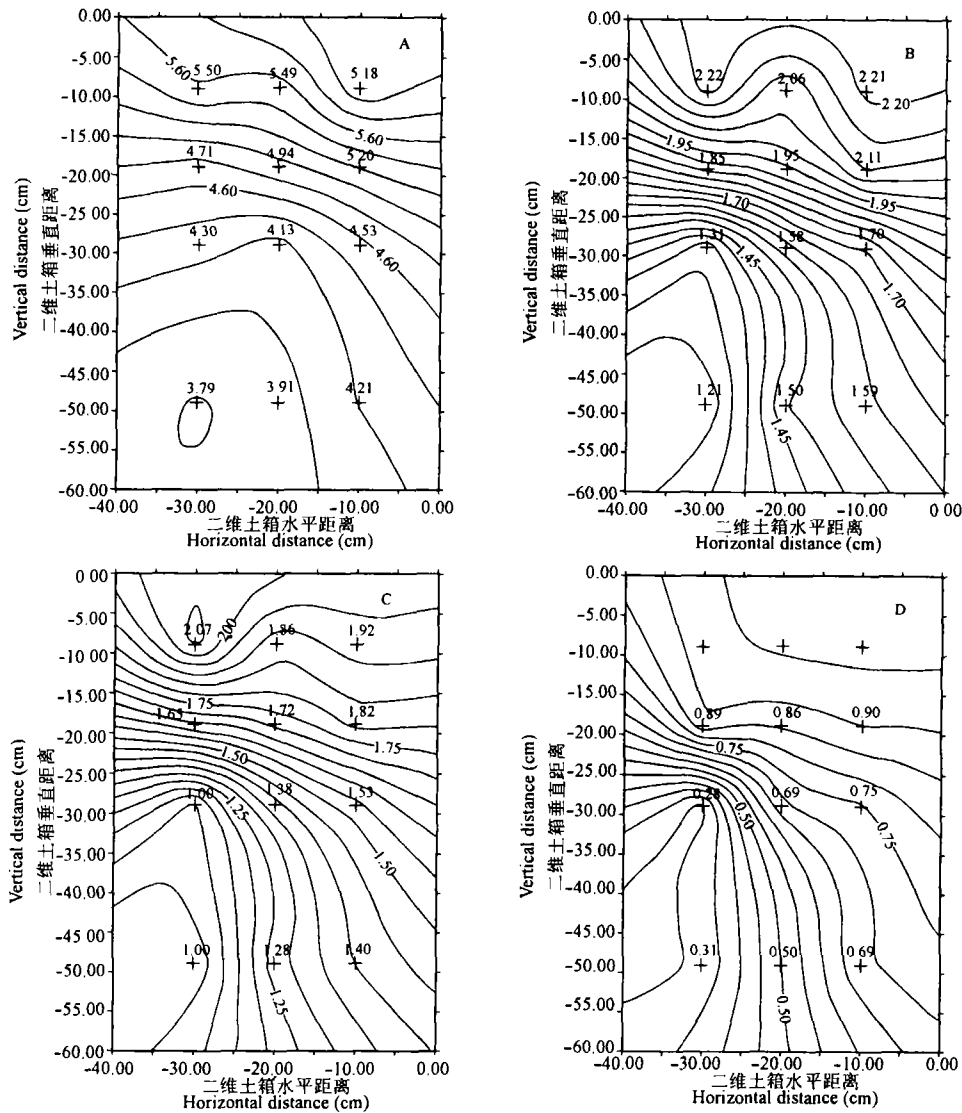


图6 入渗后第1(A)、36(B)、49(C)、102(D)分钟时二维流场中气压等值线图

Fig.6 Air pressure isolines at the 2-dimension flow field at 1(A), 36(B), 49(C) and 102(D) minutes after water flows in

从各个时刻二维土柱中的空气压力梯度曲线可以看出,一般在进水槽的斜下方的压力梯度最大,说明二维入渗实验中,气体主要是沿进水槽与排气口间的直线方向运动。

参 考 文 献

1. Wang Z, Feyen J, Nielsen D R, Van Genuchten M T. Two-phase flow infiltration equations accounting for air entrapment effects. *Water Resour. Res.*, 1997, 33:2759 ~ 2767
2. Grismer M E, Orang M N, Clausitzer V, Kinney K. Effects of air compression and counterflow on infiltration into soils. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 1994, 120:775 ~ 795
3. Wang Z, Feyen J, Nielsen D R, Van Genuchten M T. Air entrapment effects on infiltration rate and flow instability. *Water Re-*

- sour. Res. , 1998, 34:213 ~ 222
4. Peck A J. Moisture profile development and air compression during water uptake by bounded porous bodies: 2. Horizontal columns. Soil Sci. , 1965, 100:333 ~ 340
 5. Peck A J. Moisture profile development and air compression during water uptake by bounded porous bodies: 3. Vertical Columns. Soil Sci, 1965, 100:44 ~ 51
 6. Touma J, Vauclin M. Experimental and numerical analysis of two-phase infiltration in a partially saturated soil. Transport in Porous Media, 1986, 1:27 ~ 55
 7. Le Van Phuc, Morel-Seytoux. Effect of soil air movement and compressibility on infiltration rates. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. , 1972, 36:237 ~ 241
 8. Touma J, Vachaud G, Parlange J Y. Air and water flow in a sealed, ponded vertical soil column: Experiment and model. Soil Sci. , 1984, 137:181 ~ 187
 9. Weir G J, Kissling W M. The influence of airflow on the vertical infiltration of water into soil. Water Resour. Res. , 1992, 28: 2765 ~ 2772
 10. Morel-Seytoux H J, Khanji J. Derivation of equation of infiltration. Water Resour. Res. , 1974, 10:795 ~ 800
 11. Sawhney B L, Parlange J Y. Two-dimensional water infiltration from a trench in unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. , 1974, 38:867 ~ 871

TWO-PHASE FLOW IN SOIL VADOSE ZONE

Peng Sheng¹ Chen Jia-jun¹ Wang Jin-sheng¹ Li Shu-shen² Wang Zhi-ming²

(1 *Institute of Environmental Sciences, Beijing Normal University, State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Beijing 100875; 2 China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030006*)

Summary

When water flows through the vadose zone, there is not only water inflow but also air inflow. In this study, a one-dimension infiltration and two-dimension infiltration experimental apparatus was designed and built up. We got the two-phase flow field by driving the airflow with water infiltration and recorded and monitored the water accumulative infiltration volume, wetting front and the air pressure within the two-phase flow field to study the two-phase flow. One-dimension and two-dimension two-phase flow experiments were conducted to determine effect of air compression on the infiltration of water under different air outflow rates, the change in air pressure and the air movement. The pressure sensors connected with the automatic pressure monitor system were used to monitor and record the change in air pressure in 1-D and 2-D soil column. The micro gas flowmeter with valves was connected with the soil column at its bottom to control and regulate the air outflow rate. In 1-D experiment, we found that without controlling the air outflow the water inflow rate was reduced compared with the water inflow rate under the condition, as observed by other researchers. When the air outflow rate varied, the water inflow rate changed accordingly, but always remained bigger than the former. In 2-D experiment, it is found that the water inflow-rate in vertical direction was bigger than that in horizontal direction. Finally, we got air pressure contour figures at different times. From these figures, it is discovered that the airflow was most vehement along the line between the water trench and the air vent in the bottom of the soil box.

Key words Two-phase flow, 1-D infiltration, 2-D infiltration, Air compression, Air pressure