

谢小茜, 李雁, 徐军, 等. 2009 气-水两相砂介质中饱和度-毛细压力关系与水位波动之间的响应 [J]. 环境科学学报, 29(11): 2331-2338

Xie X X, Li Y, Xu J *et al.* 2009. Response of saturation-capillary pressure relationship to the water table fluctuation in a sandy medium [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 29(11): 2331-2338

气-水两相砂介质中饱和度-毛细压力关系与水位波动之间的响应

谢小茜¹, 李雁^{2*}, 徐军³, 夏北成¹, 苏钰¹

¹ 中山大学环境科学与工程学院, 广州 510275

² 中山大学海洋学院, 广州 510275

³ 河海大学水文水资源学院, 南京 210098

收稿日期: 2009-01-15 修回日期: 2009-04-24 录用日期: 2009-08-18

摘要: 利用时域反射仪 (TDR) 与微型张力计 (T5) 联用装置, 测定气-水两相砂介质中因水位波动产生的连续干燥与湿润循环过程中饱和度-毛细压力 (S_p) 关系曲线。同时, 研究了多重水位波动对 S_p 关系曲线、孔隙流体运移的滞后性及空气剩余饱和度的作用。结果表明, TDR、T5 和数据自动采集器联用装置可较准确测量出气-水两相条件下 S_p 关系的动态变化。同一介质中不同干燥过程的侵入压值比较接近, 与干燥过程的初始水饱和度无关; 而干燥或湿润过程的 S_p 关系曲线和滞后程度则与其初始水饱和度密切相关。在特定的干燥和湿润循环过程中, 初始水饱和度大小对空气剩余饱和度的值影响不大, 用于预测非湿润相流体剩余饱和度的 Land 的假设需要修正。本研究结果对进一步研究水位波动条件下地下有机污染物运移具有借鉴作用, 可为修正 NAPL Simulator 提供实验依据。

关键词: 水位波动; 干燥; 湿润; S_p 关系曲线; 滞后

文章编号: 0253-2468(2009)11-2331-08 中图分类号: X143 文献标识码: A

Response of saturation-capillary pressure relationship to the water table fluctuation in a sandy medium

XIE Xiaoxi¹, LIYan^{2*}, XU Jun³, XIA Beicheng¹, SU Yuyu¹

¹ School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275

² School of Marine Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275

³ College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098

Received 15 January 2009; received in revised form 24 April 2009; accepted 18 August 2009

Abstract A reliable setup for measuring water saturation and capillary pressure was used to obtain saturation-pressure (S_p) relationships of air-water two-phase sandy medium in consecutive cycles of drainage and imbibition resulting from water table fluctuation. The setup composed of a TDR, T5 tension meter and datataker could accurately measure the dynamic S_p relationships in air-water two-phase sandy medium. The effects of consecutive water table fluctuation on the S_p relationship hysteresis and residual air saturation were investigated. The entry pressure was not dependent on the initial water saturation in a drainage process and all the entry pressures of different drainage processes in the sandy medium approached a constant value. However, both the S_p relationship and the hysteresis were dependent on the initial water saturation in drainage or imbibition processes. In our tests, residual air saturation was not dependent on the initial water saturation under specific cycles of drainage and imbibition. Modifications to the generally-accepted Land model are needed to estimate a non-wetting fluid's residual saturation. The research will contribute to both further study on the migration of LNAPLs in the subsurface under water table fluctuation and the modifications of NAPL simulator with experimental data.

Keywords water table fluctuation; drainage; imbibition; saturation-capillary pressure relationship; hysteresis

基金项目: 广东省自然科学基金 (No. 8151027501000008); 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放基金 (No. 2007490511); 中山大学后备重点课题

Supported by the Guangdong Natural Science Foundation (No. 8151027501000008), the Open Foundation of State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering (No. 2007490511) and the Reserve Key Project Supported by Sun Yat-sen University

作者简介: 谢小茜 (1980-), 女, 博士研究生, E-mail: xiexiaoxi507@hotmail.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: eeshy@mail.sysu.edu.cn

Biography: XIE Xiaoxi (1980-), female, Ph.D. candidate, E-mail: xiexiaoxi507@hotmail.com; * **Corresponding author:** E-mail: eeshy@mail.sysu.edu.cn

1 引言 (Introduction)

非水相液体 (non-aqueous phase liquids, NAPLs) 是一类与水不相混溶或微溶于水的石油类有机污染物的统称. NAPLs 通常可划分为两类: 密度小于水的轻质非水相液体 (Light Non-aqueous Phase Liquids, LNAPLs) 和密度大于水的重质非水相液体 (Dense Non-aqueous Phase Liquids, DNAPLs). NAPLs 渗漏进入地下系统后, 很难被完全清除, 其中一部分会被土壤颗粒吸附或被土壤孔隙截留, 成为地下水长期污染源, 并威胁人类健康. 研究 NAPLs 在地下系统的迁移规律, 有利于提高其污染修复效率, 降低其污染危害.

在受非水相类 (NAPLs) 污染物污染的地下系统中, 存在气-水、气-NAPL 及 NAPL-水等两相和气-NAPL-水三相体系. 饱和度-毛细压力 (S_p) 关系分析是研究 NAPLs 在地下系统运动规律的一个基本方法, 同时也为数值模拟提供不可或缺的参数. 而剩余饱和度是其中一个非常重要的参数, 忽略它可能引起模拟器高估到达毛细边缘带的有机污染物, 同时, 低估在毛细边缘带上方的非饱和带中残留的有机污染物 (Van Geel *et al.*, 2002). 然而, 由于缺乏对多孔介质中水和 NAPL 污染物饱和度同时测量的技术, 使得气-NAPL-水三相体系中 S_p 关系的测定迄今为止仍然是一个难题 (Miller *et al.*, 1998). 一般通过获得两相系统的 S_p 关系来推导三相体系下的 S_p 关系曲线 (Leverett 1941; Parker *et al.*, 1987). Parker 等 (1988) 为此提出了利用 3 组两相系统中任一组的 S_p 关系换算其它 2 组两相系统过程和非完全过程. 当干燥和湿润过程的开始和结束都只有一种流体流动时称为完全过程, 反之为非完全过程. 在水位的多重波动过程中, 多孔介质的某一点得到的一般是连续交替的非完全干燥和湿润过程. 研究多重水位波动对 S_p 关系、滞后性及流体剩余饱和度的影响, 有利于修正目前广泛使用的用于模拟 NAPL 类污染物在地下运移的 NAPL Simulator (Guamaccia *et al.*, 1997), 有助于更加准确地预测污染物在地下的运移与分布, 并对地下环境污染进行有效修复具有重要意义 (Li 2005; Kamon, 2006).

空气和 NAPL 与水相比, 都属于非湿润相流体, 因此, 气-水体系和 NAPL-水体系中的 S_p 曲线和剩余饱和度现象有一定的相似性, 但也可能有其各自的特点. 鉴于此, 本文采用 TDR、T5 和数据采集器联

用装置测量气-水两相系统中因水位波动产生的连续干燥与湿润循环过程中 S_p 曲线的动态变化, 并分析多重水位波动对 S_p 关系、滞后性及空气剩余饱和度的作用. 同时, 在湿润过程中初始水饱和度在保持相近或者逐渐升高的情况下, 对各循环干燥和湿润过程中 S_p 关系、滞后性及非湿润相剩余饱和度的变化规律进行研究, 以期获得新的剩余饱和度预测模型提供实验依据.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 实验装置与材料

S_p 关系测定的实验装置见图 1. 其中, 有机玻璃柱长 1m, 外径 8cm, 内径 7cm; 柱顶安装有防水分挥发装置; 距柱顶部 3.5cm 处的管侧有一溢出口, 确保水位保持在砂面以上一定高度不变; 距有机玻璃柱顶部 40cm 处, 安装 TRME-II 型 TDR (德国 inko 公司) 和 T5 微型张力计 (德国 UMS 公司), 分别用于测定砂介质中的水分含量和毛细压力. TDR

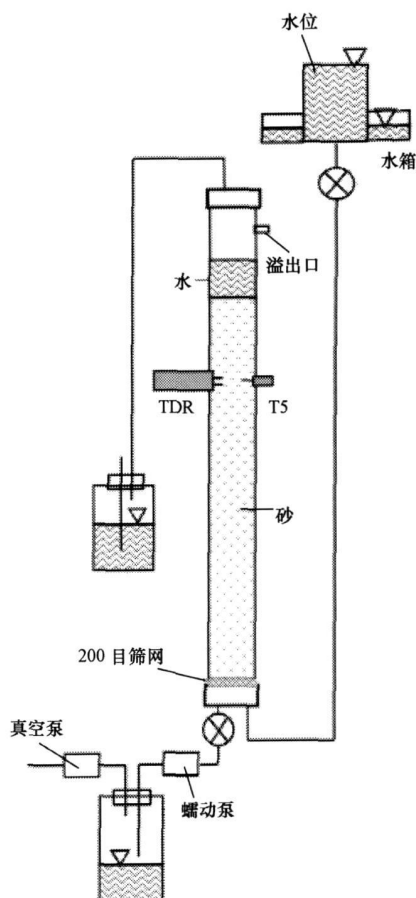


图 1 气-水两相砂介质中 S_p 关系测定的实验装置

Fig. 1 Schematic of the system for measuring S_p relations in a water-air two phase sandy medium

和 T5 输出的信号由 DT80 型智能数据采集仪 (澳大利亚 Datalogger 公司) 同步采集并传输到计算机上记录保存, 采样频率为每 15s 一组饱和度和压力数据. 柱底有一 200 目的筛网防止砂从底部漏出堵塞出水口. 蠕动泵和真空泵各 1 个, 分别用于砂介质干燥或湿润过程中的孔隙流体的整流和获取既定的水饱和度和.

多孔介质采用过 36 目筛网的自然河砂, 粒径级配累积曲线见图 2 砂柱装填容重为 1.53g cm^{-3} , 孔隙度约为 42.26%. 实验用水为脱气的蒸馏水, 通过一个距离砂柱底部 147.3cm 的水箱给砂柱供水.

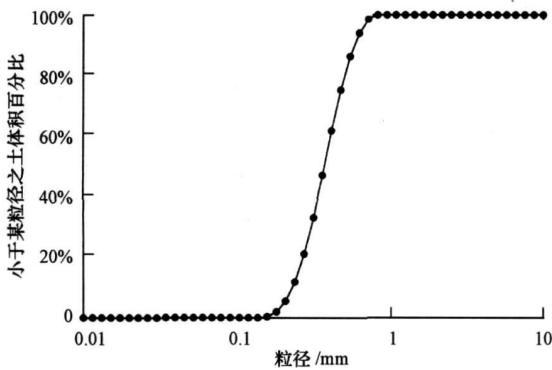


图 2 砂样粒径级配累积曲线

Fig 2 Grain size distribution of the sand sample

2.2 实验方法

装样前由砂柱底部往上慢慢注入脱气水, 然后用漏斗按层均匀将砂填入柱中. 装样过程中脱气水面始终保持在砂面约 5cm 以上, 确保砂样完全被水饱和. 实验过程中, 干燥和湿润过程连续交替进行. 干燥过程进行时, 关闭入水口, 通过蠕动泵以较小流速从柱底放水. 多孔介质中水的饱和度不断降低, 当到达既定的饱和度时, 停止干燥过程, 静置直到达到稳定状态. 然后开始湿润过程, 打开入水口, 控制以较小流速从柱底部进水, 通过砂柱到达溢出口, 保持柱内水流超过 48h 以上, 直到信号值稳定. 孔隙流体流速有可能影响 TDR 和 T5 的测定精度, 因此, 流速通过固定在砂柱入水胶管上的调速夹和砂柱出水管上的蠕动泵等得到精确控制, 使流速尽可能小且稳定.

1 个干燥过程和 1 个湿润过程连接为 1 个循环过程, 实验初期的完全干燥和湿润过程历时 6~8d 左右, 后期的非完全过程历时为 4~6d 左右, 其中, 干燥和湿润过程之间的稳定阶段为 1d 以上, 实验具体流程见图 3. 由干燥过程转入湿润过程的点称为

转折点 (reversal point), 转折点处水的饱和度为湿润过程的初始水饱和度 (以下简称为初始水饱和度). 后一个循环的干燥过程的初始水饱和度以前一个循环的湿润过程结束时的水饱和度作为起始点. 整个实验体系包括 3 个独立的重复模拟实验, 每个模拟实验至少包括 8 个循环. 在转折点处控制的初始水饱和度分 4 个级别, 同一级别的初始水饱和度至少连续重复 2 次. 4 个级别的初始水饱和度分别为水的剩余饱和度 (14%)、25%、44%、65%, 从小到大依次增加.

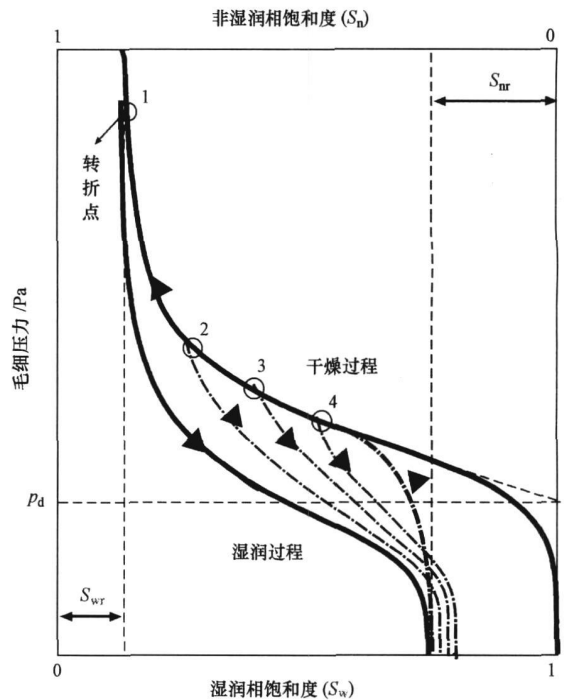


图 3 实验流程图 (数字表示转折点的先后测试顺序; p_d 为侵入压; S_w 为湿润饱和度; S_n 为非湿润饱和度; S_{wr} 为湿润相剩余饱和度; S_{nr} 为非湿润相剩余饱和度)

Fig. 3 Flow chart of the experiment (the arabic numerals stand for the testing order; p_d : entry pressure; S_w : saturation of wetting fluid; S_n : saturation of non-wetting fluid; S_{wr} : residual saturation of wetting fluid; S_{nr} : residual saturation of non-wetting fluid)

在装砂之前, TDR 和 T5 已经按照要求装柱, 用于测定饱和度和毛细压力的 TDR 和 T5 位置恒定. 在整个实验过程中, 砂介质的结构恒定, 确保整个实验过程中测定精度不受砂质结构和密度变化影响. 其中, 水的饱和度由 TDR 测量, 毛细压力由 T5 微型张力计测量. TDR、T5 和数据采集器联用装置自动记录实验数据, 从实验开始直至结束无间断通过数据采集器同步记录 TDR 和 T5 的读数. TDR 反

应较 T5 慢, 根据仪器公司的建议和反复试验, 本研究中选择每 15s 记录一组饱和度及毛细压力数据, 确保 TDR 和 T5 的数据同步. TDR 和 T5 微型张力计于实验前后都进行了标定. 鉴于 TDR 和 T5 较少用于动态情况下介质的含水率和毛细压力的测定, 因此, 在动态和静态两种情况下都对 TDR 和 T5 进行了稳定性测试.

3 结果 (Results)

3.1 TDR 与 T5 标定结果

3.1.1 实验前标定结果 TDR 和 T5 微型张力计的标定曲线如式 (1) 和式 (2) 所示. TDR 和 T5 的标定结果表明, 输出信号值与饱和度、压力之间具有良好的线性关系.

$$y = 0.011 + 0.982(x/x_0) \quad R^2 = 0.996 \quad (1)$$

$$p = 4.2293 + 1.0017z \quad R^2 = 0.9999 \quad (2)$$

式中, y 为水的饱和度, x 为实测信号 (mV), x_0 为砂介质完全饱和时的输出信号 (mV), p 为压力 (Pa), z 为输出信号值 (mV).

3.1.2 实验后标定结果 为了确定因信号漂移可能引起的误差, 实验后, 对 TDR 和 T5 再次进行了标定. 在实验结束后, 重新取样烘干, TDR 的重标定结果见表 1. 由表 1 可知, 第 1 个点的误差较大, 推测可能是取样不均匀所导致. 实验前后 T5 标定结果比较见表 2. 由表 2 可知, 实验前与实验后 T5 的标定结果的相对误差都小于 6%, 误差可能是由于实验前后的温差所导致. TDR 及 T5 在整个实验过程中的偏移不大, 测量值与真实值的绝对误差及相对误差基本可被接受.

表 1 实验后 TDR 重标定结果

Table 1 Recalibration of the TDR after the experiment

转换点	测量值	实际饱和度	绝对误差	相对误差
1	0.28	0.24	0.04	15.33%
2	0.24	0.23	0.01	0.81%
3	0.17	0.16	0.01	5.92%

表 2 实验前后 T5 标定结果比较

Table 2 Calibration results of the T5 before and after the experiment

实验前 T5 /mV	实验后 T5 /mV	绝对误差 /mV	相对误差
-14.17	-14.95	0.78	5.49%
-24.18	-24.98	0.81	3.35%
-34.13	-34.90	0.78	2.28%
-43.94	-44.82	0.88	2.00%
-53.96	-54.77	0.81	1.51%

3.1.3 TDR 和 T5 的稳定性测试 在砂介质被水完全饱和的情况下, 对 TDR 在介质中有水流动和水静止两种情况进行了输出信号值的比较, 静态与动态时信号值的比较结果见表 3. 由表 3 可知, 动态信号值偏离静态信号值最大不超过 1%, 动态和静态时的信号值相差不大. 因此, 用 TDR 在动态条件下测定水饱和度的误差是可以被接受的.

表 3 静态与动态条件下 TDR 测试差异比较

Table 3 Signals of both water-static condition and water-dynamic condition

试验	静态信号值 /mV	动态信号值 /mV	绝对误差 /mV	相对误差
1	41.02	41.15	0.13	0.32%
2	41.62	41.76	0.14	0.34%
3	41.12	41.06	0.06	0.15%
4	43.05	43.34	0.29	0.67%
5	44.49	44.15	0.34	0.76%
6	43.89	43.82	0.07	0.16%
7	43.18	43.36	0.18	0.42%
8	44.18	44.34	0.16	0.36%

张力计被广泛用于测定多孔介质中孔隙液体的压力, T5 传感器是目前最为准确和快速的压力传感器之一, 对液体和气体压力反应均非常迅速, 当采样周期选为 500ms 以上时即可获得精确稳定的读数 (Kamon *et al.*, 2007). 为了减小实验过程中孔隙流速对 T5 张力计读数可能存在的影响, 本研究通过控制进出水流量对 T5 在介质中随孔隙流速的变化进行了输出信号值的比较 (表 4). 据此, 整个实验的流量均控制在小于 $0.1 \text{ mL} \cdot \text{s}^{-1}$ 的范围内. 选择较小的孔隙流速和较大的采样间隔 (15s), 可确保 T5 在整个动态过程中测试的精确及稳定性.

表 4 孔隙流体流速对 T5 信号值的影响

Table 4 Effects of fluid velocity in sandy medium on the reading of the T5 tension meter

流量 / $(\text{mL} \cdot \text{s}^{-1})$	流速 / $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	信号值 / mV	绝对误差 /mV	相对误差
0	0	-39.70	0	0
0.05	1.3×10^{-5}	-40.30	0.60	1.5%
0.12	3.1×10^{-5}	-41.10	1.40	3.5%
0.25	6.5×10^{-5}	-42.42	2.72	6.9%

3.2 水位波动条件下气-水两相系统中饱和度、毛细压力对应变化

总共进行了 3 个独立模拟实验, 3 个实验得出几乎一致的结果. 图 4 为第 1 个模拟实验过程中水

饱和度和毛细压力的对应变化. 在测试干燥过程的水的剩余饱和度时使用了真空泵, 图中已删除受真空泵影响的那部分信号值. 图 4a 为水饱和度的变化曲线, 曲线下端标出了湿润过程的初始水饱和度, 而其紧接着的曲线上端所示的饱和度则为湿润过程最后获得的水的饱和度. 在气-水两相体系中水和空气的饱和度和为 1.0 因此, 1 减去湿润过程最后的水饱和度便为空气的剩余饱和度. 模拟实验干燥过程从砂介质完全被水饱和 (水饱和度为 1) 开始到转换点停止, 静置稳定 48h 以上, 然后以转换点处水的饱和度为初始饱和度开始湿润过程, 当水由砂柱底部运动至溢出口后, 继续保持进水状态 48h 以上, 确保获得准确稳定的空气剩余饱和度, 由此得到该初始水饱和度对应的空气剩余饱和度. 由于空气剩余饱和度的存在, 下一个循环干燥过程的初始水饱和度总是小于 1. 图 4b 为毛细压力变化曲线, 水的饱和度减少和毛细压力升高阶段为干燥过程; 水的饱和度增加和毛细压力下降阶段为湿润过程; 饱和度和毛细压力保持大致恒定的部分为砂柱的水保持在溢出口位置持续流动或静止稳定过程.

毛细压力可以定义为非湿润相流体的压力与湿润相流体的压力之差, 本实验的非湿润相流体为

空气, 湿润相流体为水. 从图 4 可以明显看出, 当多孔介质处于非饱和状态, 饱和度和毛细压力呈相反方向变化, 随着饱和度的降低毛细压力升高, 随着饱和度的增加毛细压力下降. 当多孔介质处于饱和状态时, 毛细压力不存在, 只存在水的压力; 砂柱的水保持在溢出口位置持续流动时 T5 测出的压力值约为 -40.0cm, 正好为 T5 传感器上方的水柱高度. 实验结果表明, 实验很好地反映了饱和度和毛细压力之间存在的对应关系; TDR 和 T5 联用装置可以快速准确测定多孔介质中水饱和度和毛细压力的动态变化.

3.3 水位波动下气-水两相系统的 S-p 关系及滞后的变化特征

3个重复模拟实验的结果比较接近, 图 5 只列出第 1 个模拟实验的 S-p 关系曲线. 从图 5 可以看出, 循环 1 和 2 为完全干燥及湿润过程, 其余的为非完全过程. 图 6 为第 1 和第 2 个独立模拟实验的结果, 为了方便比较和分析, 将两个模拟实验中不同级别的初始饱和度下获得的 S-p 关系曲线安排在一起.

在实验的干燥过程中, 毛细压力处于一定范围内时, 饱和度几乎不变; 只有当毛细压力超过 1 个临界值压力 p_d 后, 水饱和度才随着毛细压力的升高迅速下降, 这个临界值压力 p_d 称为侵入压 (图 6). 当毛细压力超过侵入压时, 非湿润相流体才能驱赶和取代多孔介质中的湿润相流体. 侵入压的大小与多孔介质及流体的性质有关. 实验结果表明, 所有循环的干燥过程均存在侵入压现象, 同一介质中不同循环的侵入压值比较接近, 和干燥过程的初始水饱和度无关, 大约都在毛细压力 2157.32Pa 左右.

在多孔介质结构不改变的情况下, 不同循环的干燥过程的初始水饱和度接近时, 得到的 S-p 曲线基本一致 (图 5). 模拟实验第 1 个循环的干燥过程的初始水饱和度为 1. 由于介质孔隙中有一部分空气不能被水驱替, 湿润过程结束后, 水的饱和度不再为 1. 由于各循环的湿润过程得到的空气剩余饱和度很接近, 因此, 其后相应的各循环的干燥过程的初始水饱和度也很接近. 除了第 1 个循环中的干燥过程的 S-p 曲线不同, 其它循环中的干燥过程得到的 S-p 曲线重合很好, 路径一致, 只是转换点不同. 同样, 如果湿润过程的初始水饱和度相近, 得到 S-p 曲线也是一致; 当湿润过程的初始饱和度不同, 得到的 S-p 曲线则不再重合, 并随着初始水饱和度

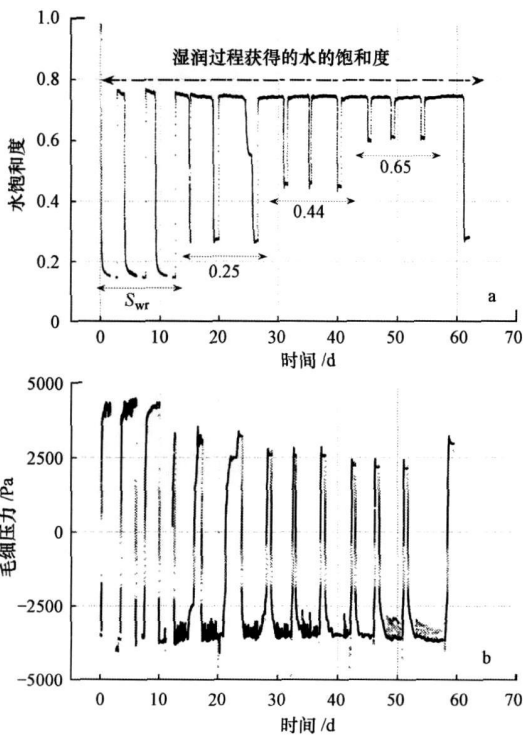


图 4 第 1 个模拟实验饱和度 (a) 和毛细压力 (b) 对应变化

Fig 4 Water saturation (a) and capillary pressure (b) with time in the first column test

的逐渐增大, 初始水饱和度大的 S_p 曲线被初始水饱和度小的所包裹 (图 6). 实验的前 2 个循环的湿润过程因入渗速度没有控制好, 重合性较差. 这是因为砂柱内部和外界通气的塑管被水珠堵塞 (当时没有及时发现, 但很快就改正了), 在湿润过程中砂样内外空气不能自由流通, 导致砂柱内空气压力异常, 影响了 T5 张力计的读数, 导致第 4 个循环的非完全湿润过程的 S_p 曲线部分超出了完全过程的 S_p 曲线 (图 5). 因此, 可以认为, 干燥或湿润过程的 S_p 关系曲线与其初始水饱和度密切相关, 也就是与孔隙流体运动的历史和路径有关.

图 5 和图 6 也表明, 同一循环的主干燥曲线 (Primary drainage curve) 与主湿润曲线 (Main

imbibition curve) 不重合, 扫描干燥曲线 (Scanning drainage curve) 与扫描湿润曲线 (Scanning imbibition curve) 也不重合, 这被称为多孔介质中孔隙流体运动的滞后现象. 在同一循环的一对干燥和湿润过程中饱和度相同的情况下, 干燥过程的毛细压力比湿润过程大. 当各循环的干燥过程的初始水饱和度相近且湿润过程的初始水饱和度也相近时, 增加循环次数不改变滞后程度, 这与 sham a (2003) 研究得到的滞后性会随循环过程次数改变而改变的结果不相符, 而他也没有具体讨论不同循环下的干燥过程和湿润过程的初始水饱和度如何控制. 在多孔介质结构恒定不变的情况下, 各循环的干燥过程如果起始于相近的初始水饱和度, 逐渐增大湿润过程初始

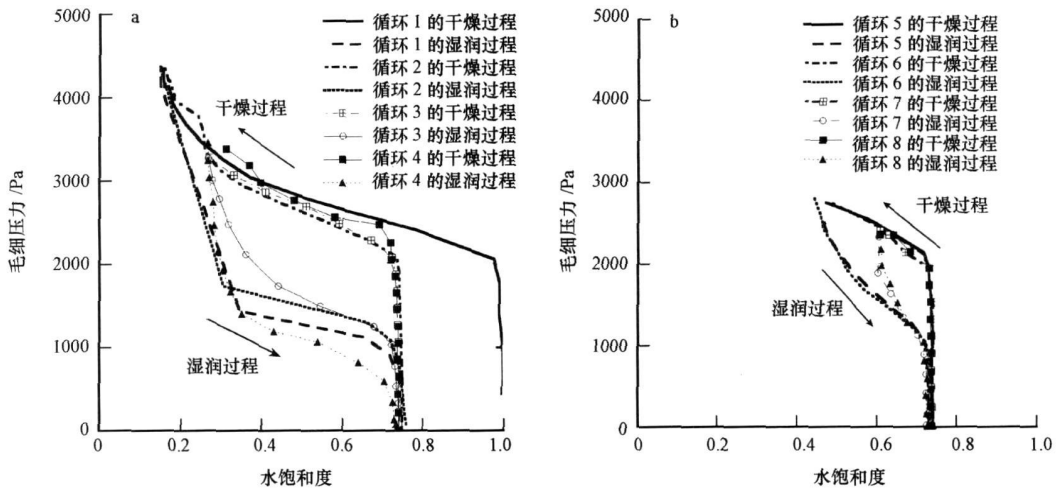


图 5 第 1 个模拟实验的各个级别初始湿润水饱和度情况下的 $S-p$ 曲线 (a. 水的剩余饱和度, 25%, b. 44% 和 65%)

Fig. 5 $S-p$ relationships resulting from different levels of initial water saturation in 1st test (a. a water residual saturation and 25%, b. 44% and 65%)

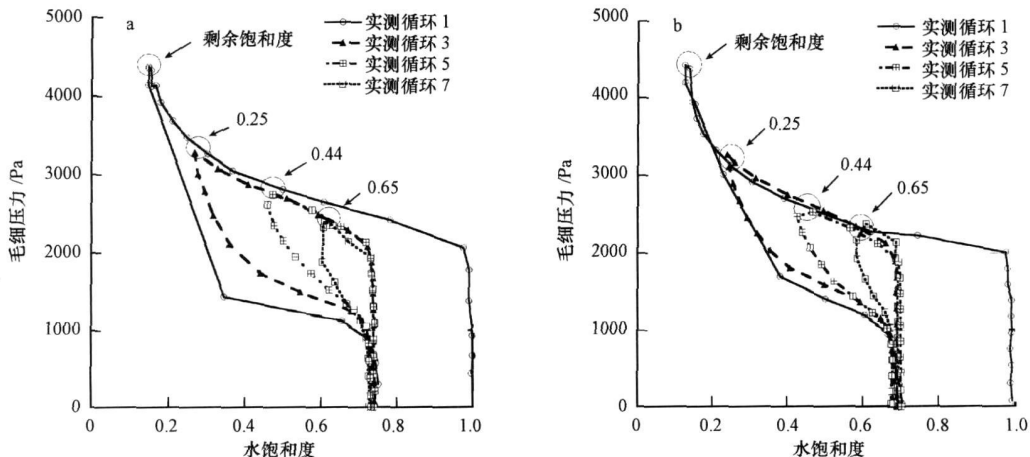


图 6 两个模拟实验各自的不同初始水饱和度情况下的 $S-p$ 曲线 (a. 第 1 个模拟实验, b. 第 2 个模拟实验)

Fig. 6 $S-p$ relationships resulting from different reversal saturations in two tests (a. the first column test, b. the second column test)

水饱和度,得到的 S_p 曲线是由外到里层层逐渐被包裹的,即如果改变干燥或湿润的初始条件,增加循环次数,滞后程度是逐渐减少的,表明滞后性与流体路径及运动历史有关。

3.4 湿润过程中初始水饱和度对空气剩余饱和度的影响

Land(1968)通过前人的实验数据推出一个估算气-水两相系统的非湿润相流体(气相)剩余饱和度的经验公式,认为气体的初始饱和度及剩余饱和度的倒数差接近于常数,即气体的剩余饱和度随着转换点处的初始水饱和度增加而减小。然而,3个独立模拟实验的结果表明(表5),在同一多孔介质中,增加湿润过程中的初始水饱和度,最后得到的空气剩余饱和度对初始水饱和度变化不明显,这与Land发现的规律不相符。这是由于Land的经验公式是通过多个研究者对单一湿润过程的研究结果推导而出,每个研究者采用的材料和方法不尽相同,且忽略了水位波动下多重循环之间的相互影响,因而Land模型的准确性及适用性受到影响。为了获得准确的非湿润相流体的剩余饱和度预测模型,必须在同一介质且结构保持恒定不变的情况下,准确测试各种路径下不同初始水饱和度及与之对应的空气剩余饱和度,从而才有可能找出它们的影响因素和因果关系。

表5 初始水饱和度与空气剩余饱和度关系

Table 5 Initial water saturations and their resulting residual air saturation in three column tests

实验 1		实验 2		实验 3	
WS	RAS	WS	RAS	WS	RAS
0.147	0.246	0.144	0.223	0.134	0.249
0.148	0.243	0.135	0.229	0.124	0.262
0.268	0.254	0.215	0.253	0.258	0.258
0.276	0.256	0.211	0.250	0.260	0.251
0.458	0.256	0.434	0.247	0.450	0.252
0.461	0.255	0.439	0.251	0.448	0.259
0.599	0.257	0.608	0.245	0.610	0.268
0.610	0.256	0.613	0.247	0.608	0.270

注:WS为初始水饱和度;RAS为空气剩余饱和度。

4 结论 (Conclusions)

1) TDR、T5微型张力计和数据自动采集器联用装置可较准确地测量出气-水两相系统中 S_p 曲线的动态变化。

2) 同一介质中不同干燥过程的侵入压值比较接近,且和干燥过程的初始饱和度无关。

3) 在相同的初始水饱和度的情况下,可以获得相同的 S_p 关系曲线,增加循环次数不改变滞后程度;如果改变干燥或湿润的初始条件,会得到不同的 S_p 关系曲线,且滞后程度会随循环过程次数改变而改变,干燥或湿润过程的 S_p 关系曲线和滞后程度与其初始水饱和度密切相关。

4) 在特定的干燥和湿润循环过程中,初始水饱和度大小对最后获取的空气剩余饱和度的值影响不大,它们之间的关系还有待进一步研究,但Land的假设需要被修正。

责任作者简介:李雁(1967—),博士,硕士生导师,主要从事非水相液体(NAPL)类污染物在地下的运移机制及有关预测模型、地下环境污染治理与修复技术等研究。

参考文献 (References):

Guarnaccia J, Pinder G, Fishman M. 1997. NAPL: Simulator documentation [R]. EPA/600/R-97/102. Washington DC: National Risk Management Research Laboratory, USEPA, 1-221.

Hostmadsen J, Jensen K H. 1992. Laboratory and numerical investigations of immiscible multiphase flow in soil[J]. Journal of Hydrology, 135: 13-52.

Kan on M, Endo K, Katsum i T. 2003. Measuring the k-S-p relations on DNAPLs migration[J]. Engineering Geology, 70: 351-363.

Kan on M, Li Y, Endo K, et al. 2007. Experimental study on the measurement of S-p relations of LNAPL in a porous medium [J]. Soils and Foundations, 47(1): 33-45.

Land C S. 1968. Calculation of imbibition relative permeability for two- and three-phase flow from rock properties[J]. Trans Am Inst M in Metall Pet Eng, 243: 149-156.

Lenhard R J, Parker J C. 1988. Experimental validation of the theory of extending two-phase saturation-pressure relations to three-fluid phase systems for monotonic drainage paths [J]. Water Resources Research, 24: 373-380.

Lenhard R J, Parker J C, Kariarachi J J. 1991. Comparing simulated and experimental hysteretic two-phase transient fluid flow phenomena [J]. Water Resources Research, 27(8): 2113-2124.

Leverett M C. 1941. Capillary behaviour in porous solids[J]. Soc Pet Eng A M E, 142: 152-169.

Li Y. 2005. Mechanism of LNAPL migration in conjunction with groundwater fluctuation[D]. Japan: Kyoto University, 1-167.

Miller C T, Christakos G, Imhoff P T. 1998. Multiphase flow and transport modeling in heterogeneous porous media: Challenges and approaches[J]. Adv Water Resour, 21(2): 77-120.

欧国隆. 2000. 迟滞效应及尺度原则对 NAPLs 于孔隙介质中传输模拟之影响 [D]. 台湾: 台湾国立交通大学土木工程研究所, 1-84.

Ou G L. 2000. Role of hysteresis and scaling rule in simulating the transport of NAPLs [D]. Taiwan: Department of Civil Engineering

- in National Chiao Tung University. 1—84 (in Chinese)
- Parker J C, Lenhard R J. 1987. A model of hysteretic constitutive relations governing multiphase flow: 1. Saturation pressure relations [J]. *Water Resources*, 23: 2187—2196
- Parker J C, Lenhard R J, Koppesamy T. 1988. A parametric model for constitutive properties governing multiphase flow in porous media [J]. *Water Research*, 23: 618—624
- Shama R S, Mohamed H A. 2003. An experimental investigation of LNAPL migration in an unsaturated or saturated sand [J]. *Engineering Geology*, 70: 305—313
- Seffy D A, Johnston C D, Bary D A. 1998. Numerical simulations and long-column tests of LNAPL displacement and trapping by a fluctuating water table [J]. *J Soil Contam*, 7: 325—356
- Van Geel P J, Sykes J F. 1994. Laboratory and model simulations of a LNAPL spill in a variably-saturated sand: 1. laboratory experiment and image analysis techniques [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 17: 1—25
- Van Geel P J, Sykes J F. 1997. The importance of fluid entrapment, saturation hysteresis and residual saturations on the distribution of a lighter-than-water non-aqueous phase liquid in a variably saturated sand medium [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 25: 249—270
- Van Geel P J, Roy S D. 2002. A proposed model to include a residual NAPL saturation in a hysteretic capillary pressure-saturation relationship [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 58(1-2): 79—110
- 郑冰, 陈家军, 尉斌, 等. 2005. 多孔介质不溶混流体毛细压力与饱和度关系实验研究 [J]. *水动力学研究与进展*, 20(5): 665—672
- Zheng B, Chen J J, Wei B, *et al*. 2005. Experimental study of capillary pressure-saturation relationships for immiscible liquids in porous media [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 20(5): 665—672 (in Chinese)
- 支银芳, 陈家军, 杨周喜, 等. 2007. 多孔介质两相系统毛细压力与饱和度关系实验研究 [J]. *水科学进展*, 18(2): 151—157
- Zhi Y F, Chen J J, Yang Z X, *et al*. 2007. Experimental study of relationship between capillary pressure and saturation in two phase system in porous media [J]. *Advances in Water Science*, 18(2): 151—157 (in Chinese)