

细沙介质中非湿润相流体剩余饱和度变化规律*

谢小茜¹, 李雁¹, 夏北成², 苏钰³

- (1. 中山大学海洋学院, 广东广州 510275;
2. 中山大学环境科学与工程学院, 广东广州 510275;
3. 广东省环境保护工程研究设计院, 广东广州 510635)

摘要: 通过对气-水两相细沙介质中干燥和湿润交替循环条件下饱和度-毛细压力 ($S-p$) 关系的测定, 研究了不同初始条件下非湿润相流体剩余饱和度的变化规律。实验发现, 在不同湿润过程中, 相同级别初始水饱和度对应的空气剩余饱和度值较为接近; 随着湿润过程中初始水饱和度的逐渐增大, 其空气剩余饱和度呈升高趋势。在连续的干燥-湿润过程条件下, 利用 Land 模型预测的非湿润相流体的剩余饱和度与柱实验实测值之间存在较大的误差。由此表明和干燥-湿润循环次数相比, 初始水饱和度对空气剩余饱和度量级的影响要大, 且后一个循环的空气剩余饱和度总受前一个循环的空气剩余饱和度的影响。

关键词: 非湿润相流体; 初始饱和度; 剩余饱和度

中图分类号: X143 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2011) 05-0142-06

On the Residual Air Saturation of a Fine Sandy Medium under Consecutive Drying-wetting Cycles

XIE Xiaoxi¹, LI Yan¹, XIA Beicheng², SU Yu³

- (1. School of Marine Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
2. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
3. Guangdong Environmental Protection Engineering Research & Institute, Guangzhou 510635, China)

Abstract: The research on the residual saturation of a non-wetting phase fluid is one of the main focuses in the field of multi-porous media and multiphase flow. The saturation-capillary pressure ($S-p$) relationships and the residual air saturations were investigated under consecutive drying-wetting cycles in an air-water two-phase sandy medium. Results showed that, when the initial water saturation in the first imbibition process was close to that in the second imbibition process, the residual air saturation of the first imbibition process was also close to that of the second imbibition process. The residual air saturation increased with the increase of the initial water saturation in all the imbibition processes. The magnitude of the residual air saturation in the current imbibition was obviously affected by its former imbibition process. Large differences were also found between the residual air saturations predicted with the Land model and those measured in the column tests. It indicated that the effect of the initial water saturation on the residual air saturation was more significant than that of the circular number of the drying-wetting cycles.

Key words: non-wetting phase fluid; initial saturation; residual saturation

在石油类制品中, 有一类密度比水小, 与水、(Light Non-aqueous Phase Liquids, LNAPLs), 它们是土壤及地下水中重要的一类有机污染物。LNA-

气难以混溶的有机物, 我们称之为轻质非水相液体

* 收稿日期: 2010-09-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41072182); 广州市科技计划基金资助项目 (2010Z1-E101)

作者简介: 谢小茜 (180年生), 女, 博士; 通讯作者: 李雁; E-mail: eesly@mail.sysu.edu.cn

PLs 在地下系统迁移过程中会受到土体颗粒吸附、解吸、界面张力, 以及毛细压力等作用残留在固体介质孔隙中, 难以被移除, 并通过相间 (inter-phase) 的转移成为地下系统的长期污染源。研究 LNAPLs 剩余饱和度的变化规律, 对地下 NAPLs 类污染进行有效控制与修复具有重要意义^[1-2]。

非湿润相流体的剩余饱和度是准确模拟这些流体在地下迁移分布的重要参数之一^[3-4]。国内外相关研究表明, 多孔介质中流体的剩余饱和度会受到流体本身密度、孔隙大小、形状及排列等的影响^[5-7]。当介质中含有其他流体时, 液体间界面性质、粘滞力、水力梯度等也会影响各流体的剩余饱和度^[8-9]。流体剩余饱和度还受到固体介质干燥和湿润过程历史, 以及初始饱和度大小等多种因素影响^[10-16]。在自然环境中, 地下水位上下波动造成连续交替的、起始位置各个不同的干燥和湿润过程, 剩余饱和度的变化将更为复杂, 用于估算非湿润相流体剩余饱和度的 Land 模型的适应性也因此需要进一步研究。以上有关剩余饱和度与初始饱和度之间关系的研究大多是在单一的干燥或湿润过程中进行的, 还不足以说明野外复杂地下水位波动条件下的剩余饱和度问题。另外, 多孔介质中孔隙流体运动特有的剩余饱和度现象可通过 S - p 曲线获得, 而国内关于多相流动 S - p 关系的实验研究也还比较缺乏^[17-18]。

相对于水来说, LNAPLs 和空气都属于非湿润相流体。因此, 气-水体系和 LNAPLs-水体系中剩余饱和度的变化机制具有一定的近似性, 当然也可能各有特点。本文采用 TDR、T5 和数据采集器联用装置, 通过测定气-水两相系统中因水位波动产生的连续干燥和湿润循环过程中 S - p 曲线的动态变化, 研究在湿润过程中初始水饱和度保持接近或逐渐升高的情况下, 各干燥-湿润循环过程中非湿润相流体剩余饱和度的变化规律, 并考察 Land 模型在水位波动情况下的适用性, 在方法和背景方面为后期的轻质非水相液体 (LNAPLs) 在水位波动下的运移研究提供参照。

1 基本理论

1.1 饱和度

饱和度 (S_i) 为多孔介质中某种流体 α 占整个介质孔隙体积的百分比:

$$S_{\alpha} = \frac{V_{\alpha}}{V_i} \quad (1)$$

式中, V_{α} 为流体 α 在多孔介质孔隙中所占体积;

V_i 为多孔介质中总孔隙的体积。

多孔介质中所有流体的饱和度总和为 1:

$$\sum_{\alpha} S_{\alpha} = 1 \quad (2)$$

1.2 初始饱和度和剩余饱和度

干燥 (或湿润) 过程开始时某流体的饱和度称为初始饱和度。

多孔介质中, 流体的饱和度 (S_{α}) 包含两部分, 一部分可受水力梯度作用, 能进行自由流动 (S_{of}); 另一部分或因吸附在固体表面、或因被其他流体包裹、或因困在介质孔隙死角不能运动, 称为剩余饱和度 (S_{or})。

$$S_{\alpha} = S_{of} + S_{or} \quad (3)$$

2 实验材料与方法

2.1 实验装置与材料

S - p 关系实验测定装置见图 1。有机玻璃柱长 1 m, 外径 8 cm, 内径 7 cm。柱顶安装有防水分挥发装置。距柱顶 3.5 cm 处管侧有一溢出口, 保持沙面以上水位恒定。距柱顶 40 cm 处, 面对面安装一组 TDR (TRIME-IT, 德国 IMKO 公司) 和 T5 微型张力计 (德国 UMS 公司), 分别用于测定沙中的水分和毛细压力。TDR 和 T5 输出的信号由数据采集仪 (DT80, 澳大利亚 Datataker 公司生产) 采集储存。柱底装有 200 目的筛网, 防止细沙流出。此外, 蠕动泵和真空泵各备一个, 分别用于沙介质干燥或湿润过程中孔隙流体的整流和预定水饱和度的获取。

以过 36 目筛网的自然河沙为多孔材料, 粒径级配累积曲线见图 2。实验装填容重为 1.53 g/cm³, 孔隙度为 42.26%。采用脱气后的蒸馏水为孔隙水, 通过一个箱内水面距离沙柱底部 147.3 cm 的水箱给沙柱供水。

2.2 S - p 曲线测试方法

图 3 为 S - p 曲线具体测试路径。每一个循环以一个干燥过程开始和一个湿润过程结束, 由干燥过程经转折点 (reversal point) 转入湿润过程, 转折点处的水饱和度为湿润过程的初始水饱和度 (后面简称为初始水饱和度)。湿润过程结束时获得该循环对应的空气剩余饱和度。在一个干燥-湿润循环过程中, 一个完全干燥和完全湿润过程组成的循环历时约 6~8 d, 一个非完全干燥和非完全湿润过程组成的循环历时约 4~6 d。

P_d 为侵入压; S_w 为湿润相饱和度; S_n 为非湿润相饱和度; S_{wr} 为湿润相剩余饱和度; S_{nr} 为非湿润相剩余饱和度

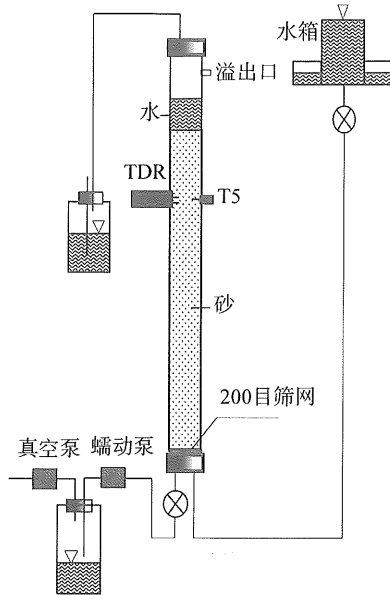


图 1 测定气—水两相 S - p 关系的实验装置示意图
Fig. 1 Schematic of the apparatus for measuring S - p relations in air-water system

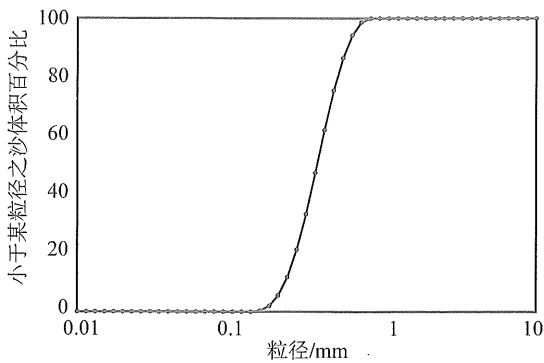


图 2 沙样粒径级配累积曲线
Fig. 2 Particle size distribution of the sand sample

每一个实验包含 4 个不同初始水饱和度等级的干燥—湿润循环过程。转折点处的初始水饱和度从小到大依次分为 0.14 (主要湿润过程的水的剩余饱和度)、0.25、0.44 及 0.65 等 4 个级别。同一初始水饱和度级别的循环连续重复 2 次以上。这一循环中湿润过程结束时的水饱和度就是下一循环中干燥过程的初始水饱和度。单个实验至少包括 8 个干燥—湿润循环过程。实验并行重复 3 次。

装沙之前 TDR 和 T5 已经按照要求安装固定。沙样装填前先由沙柱底部慢慢往上注入脱气水, 然后用漏斗从柱顶按层均匀缓慢将沙填入柱中。装样过程中脱气水面始终保持在沙面以上 5 cm, 确保沙样完全被水饱和。实验中, 干燥过程和湿润过程交替进行。干燥过程进行时, 关闭入水口, 通过蠕

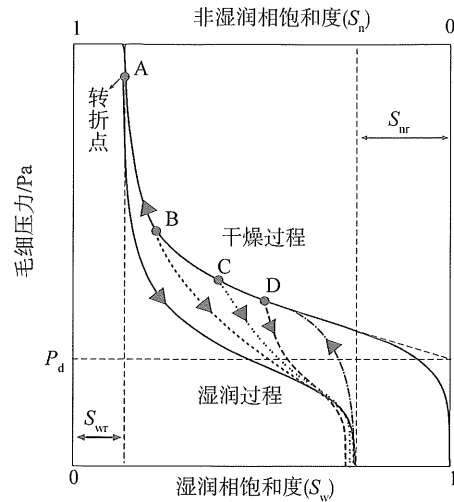


图 3 实验流程图 (转折点处字母表示 S - p 曲线先后测试顺序)

Fig. 3 Flowchart of the experiment (the alphabets of A to D stand for the order of the tests)

动泵以较小流速从柱底放水。当沙达到预定的饱和度时, 排水过程停止, 静置 48 h 以上, 以求获得完全稳定的状态。然后开始湿润过程, 打开底部入水口, 以足够小的流速从柱底进水, 通过沙柱到达溢出口, 保持柱内供水超过 48 h 以上, 以求获得完全稳定的信号。柱内孔隙水流流速有可能影响 TDR 和 T5 的测定精度, 因此, 入水和出水流速得到准确控制, 保证流速尽可能小且稳定。

TDR 和 T5 张力计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, TDR 和 T5 的稳定性在动态和静态两种情况下都进行了测试。在整个实验过程中沙介质结构和密度恒定, 确保整个实验过程中测试精度不受介质本身特性影响。饱和度和毛细压力信号由数据采集器以每 15 s 一组的采样频率, 不间断同步采集并传送至计算机后处理。为了检验探头信号在长时间内是否存在漂移, TDR 和 T5 微型张力计于实验前后都进行了标定。

2.3 水剩余饱和度及空气剩余饱和度的获取

2.3.1 水剩余饱和度。多孔介质干燥过程中当毛细压力达到极高时的水的饱和度称为干燥过程水的剩余饱和度。本实验中, 在干燥过程结束时, 用无油真空泵从柱底往外缓缓抽水。当看不到孔隙水外排, 并且 TDR 的信号值恒定超过 24 h 以上时, 此时得到的水饱和度即为剩余水饱和度。

2.3.2 空气剩余饱和度。在湿润过程中毛细压力为 0 时的非湿润相流体的饱和度称为非湿润相流体的剩余饱和度。本实验中, 非湿润相流体为空气。

为了获得稳定和准确的空气剩余饱和度，在湿润过程中水位升至溢出口后仍保持进水，至 TDR 信号值稳定 48 h 后，此时的空气的饱和度为空气的剩余饱和度。

3 结果与讨论

实验 1、实验 2 和实验 3 等 3 次平行实验的结果相近。各个实验中，循环 1 和 2 分别为完全干燥和湿润过程，其余各循环为非完全过程。实验 1 的水饱和度变化曲线如图 4 所示，曲线下端是各循环中湿润过程的初始水饱和度，上端是湿润过程最后获得的水饱和度。实验 2 的 $S-p$ 关系曲线如图 5 所示。

图 4 中，水饱和度随时间减少的为干燥过程，即水位下降过程；水饱和度随时间增加的为湿润过程，即水位上升过程。水饱和度大致恒定时，即沙柱中的水位保持在溢出口位置持续流动或静止稳定的过程。

气—水两相体系中水和空气的饱和度之和为 1.0，因此空气的饱和度为 1.0 减去湿润过程得到的水饱和度。由于空气剩余饱和度的存在，非完全过程中干燥过程的初始水饱和度总是小于 1.0。试验结果表明，在同一介质中，逐渐增加各循环中湿润过程的初始水饱和度，得到的各湿润过程之间空气剩余饱和度的差别不明显（见图 4）。表 1 列出了 3 个试验各个循环不同湿润过程的初始水饱和度及其对应的空气剩余饱和度，随着初始水饱和度的增加，其对应的空气剩余饱和度之间的差别均小于 0.04。

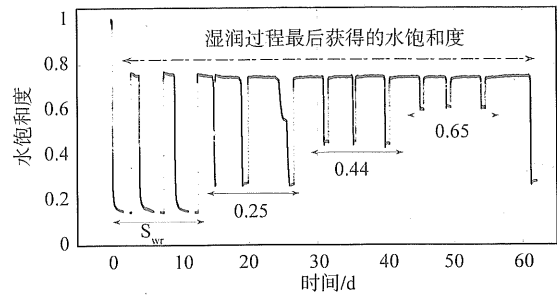


图 4 实验 1 水饱和度随时间变化曲线

Fig. 4 Variety of water saturation with time in Test 1
 S_{wr} 为水剩余饱和度

在系列实验中，循环 1 的干燥过程从沙介质完全被水饱和开始，到获得剩余水饱和度为止，得到基本干燥曲线（Primary Drainage Curve, PDC），其后紧接的湿润过程从剩余水饱和度开始，到获得空气剩余饱和度为止，得到主湿润曲线（Main Imbibition Curve, MIC）。虽然和循环 1 一样都是完全干燥和完全湿润过程，由于介质中已经存在水剩余饱和度和空气剩余饱和度，循环 2 和 3 获得的是主干燥曲线（Main Drainage Curve, MDC）和主湿润曲线（Main Imbibition Curve, MIC）。此后的各个循环均为非完全干燥和非完全湿润过程，获得扫描干燥曲线（Scanning Drainage Curve, SDC）和扫描湿润曲线（Scanning Imbibition Curve, SIC）。前 3 个循环的空气剩余饱和度由主湿润过程获得，此后的各个循环的空气剩余饱和度由扫描湿润过程获得（见图 5）。

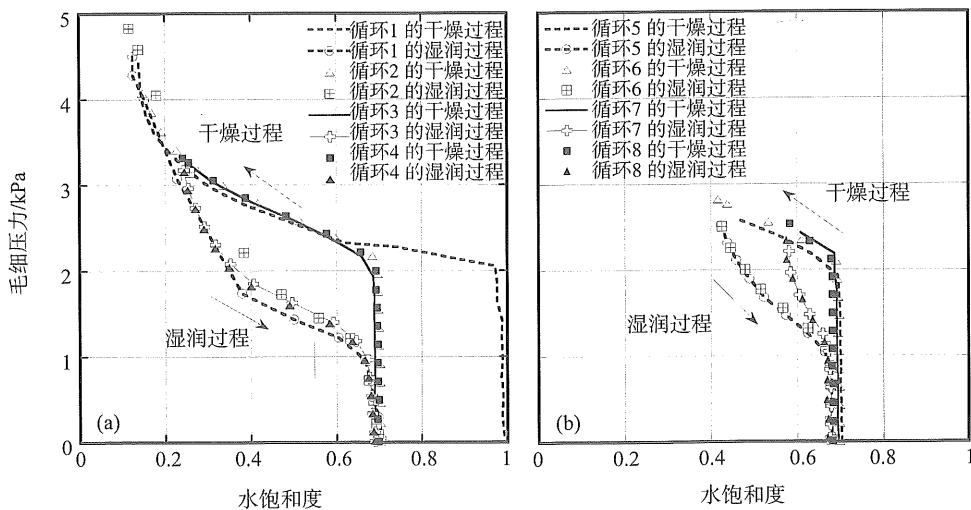


图 5 实验 2 不同干燥—湿润循环过程的 $S-p$ 关系曲线

Fig. 5 $S-p$ relation curves resulting from consecutive drying-wetting cycles in Test 2

3 个并行试验不同循环过程中初始水饱和度和与之对应的空气剩余饱和度的关系见图 6。显然, 主湿润过程获得的空气剩余饱和度明显比扫描湿润过程获得的空气剩余饱和度要小。其中, 由 PDC 和 MIC 组成的第一个循环获得的空气剩余饱和度最小。从实验开始到结束, 在经过了至少 9 个循环后, 最后获得的空气剩余饱和度比第一个循环的空气剩余饱和度增大了 10% 以上。总的来说, 相同级别初始水饱和度对应的空气剩余饱和度较为接近。随着湿润过程中初始水饱和度的逐渐增大, 与之对应的空气剩余饱和度整体上呈升高趋势。

实验还表明, 和初始水饱和度相比, 干燥—湿润循环次数对空气剩余饱和度值的影响不明显。

表 1 湿润过程中不同初始水饱和度条件下的空气剩余饱和度

Table 1 Residual air saturations resulting from different initial water saturations in imbibition processes

试验 1			试验 2			试验 3		
IWS ¹⁾	RAS ²⁾	RAS-L ³⁾	IWS	RAS	RAS-L	IWS	RAS	RAS-L
0.147	0.248	0.242	0.146	0.219	0.228	0.127	0.295	0.283
0.147	0.243	0.242	0.137	0.222	0.228	0.117	0.293	0.284
0.146	0.252	0.242	0.140	0.237	0.228	0.122	0.294	0.283
0.268	0.260	0.231	0.218	0.236	0.222	0.245	0.306	0.269
0.275	0.266	0.230	0.214	0.242	0.222	0.246	0.308	0.269
0.269	0.270	0.231						
0.457	0.269	0.208	0.441	0.241	0.200	0.426	0.316	0.242
0.461	0.269	0.207	0.446	0.241	0.199	0.424	0.322	0.242
0.449	0.272	0.209						
0.599	0.273	0.183	0.618	0.247	0.171	0.578	0.322	0.210
0.610	0.275	0.181	0.623	0.250	0.170	0.576	0.330	0.211
0.607	0.274	0.181						

1) 为初始水饱和度; 2) 为实测的空气剩余饱和度; 3) 为通过 Land 模型估算的空气剩余饱和度

4 Land 模型验证

4.1 Land 假设

有空气剩余饱和度的研究表明, 在所有湿润过程中, 主要湿润过程 (MIP) 获得的空气剩余饱和度最大, 大于其它所有湿润过程的空气剩余饱和度。Land 模型 (1968) 认为, 沙质介质的湿润过程中孔隙流体初始饱和度和湿润饱和度的倒数差是一个常数。具体表示如下:

$$\frac{1}{S_{gr}^*} - \frac{1}{S_{gi}^*} = \frac{1}{(S_{gr}^*)_{max}} - 1 \quad (4)$$

由式 (4) 可得任一湿润过程的剩余饱和度为:

$$S_{gr}^* = \frac{S_{gi}^*}{1 + CS_{gi}^*} \quad (5)$$

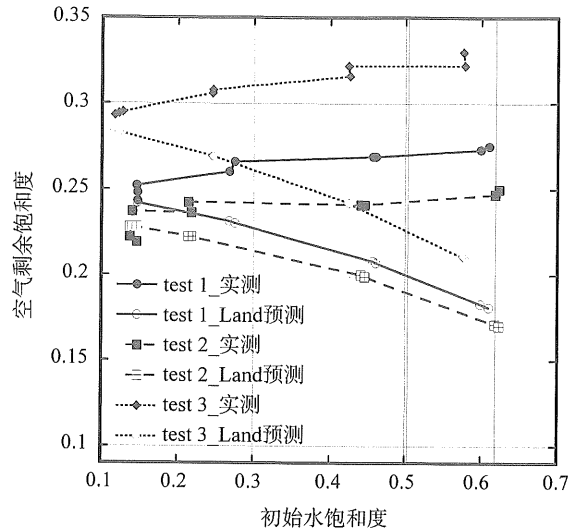


图 6 初始水饱和度和对应的空气剩余饱和度的实测值及 Land 模型预测值

Fig. 6 The residual air saturation measured in the column tests and estimated with the Land model and their corresponding initial water saturations

其中,

$$C = \frac{1}{(S_{gr}^*)_{max}} - 1 \quad (6)$$

S_{gi}^* 为转折点 A 处的气体初始饱和度, S_{gr}^* 为转折点 A 对应的气体剩余饱和度, $(S_{gr}^*)_{max}$ 为基本干燥过程后紧接的主要湿润过程获得的非湿润相孔隙流体的剩余饱和度 (具体见图 7)。

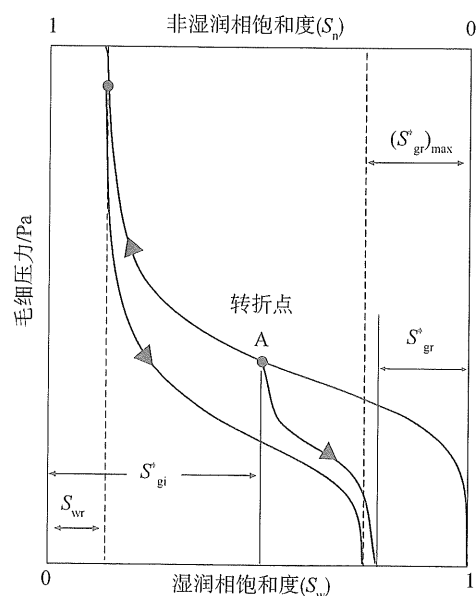


图 7 Land 模型公式参数示意图

Fig. 7 Parameters used in the Land model^[3]

4.2 实测结果和 Land 模型预测值的比较

空气剩余饱和度的实测值与 Land 模型的预测值的比较见表 1 和图 6。由图 6 可见, 水位波动情况下, 实测值和 Land 模型的预测值之间存在明显差距。随着初始水饱和度的增大, 根据 Land 模型得到的预测值逐渐减小, 而实验得到的实测值则逐渐增大, 也就是预测值与实测值之间的差异随初始饱和度的增加不断增大。Land 模型在水位波动条件下预测空气剩余饱和度会产生较大的误差。原因可能在于, Land 模型是基于不同研究者对相互独立的单个湿润条件下的研究成果建立起来的, 而本实验的初始水饱和度和空气剩余饱和度的实测结果是在连续的干燥与湿润交替多重循环下获得的。水位波动导致的多重干燥和湿润交替过程中, 各个循环之间存在着必然的联系, 空气剩余饱和度除了受到本循环的初始水饱和度的影响, 可能还受前一个循环的影响。因此, 水位波动情况下, 用于预测非湿润相孔隙流体剩余饱和度的 Land 模型需要修正。

5 结 论

综上所述, 在干燥—湿润循环交替进行过程中, 随着其中的湿润过程中的初始水饱和度的逐渐增大, 与之对应的空气剩余饱和度整体上呈升高趋势; 相同级别初始水饱和度对应的空气剩余饱和度较为接近, 和初始水饱和度相比, 干燥—湿润循环次数对空气剩余饱和度值的影响不明显; 在自然界多重水位波动条件下, 空气剩余饱和度的变化规律比单循环下的空气剩余饱和度的变化规律要复杂, 用于预测空气剩余饱和度的 Land 模型需要修正。

参考文献:

- [1] LI Yan. Mechanism of LNAPL migration in conjunction with groundwater fluctuation[D]. Japan: Kyoto University, 2005.
- [2] KAMON M, ENDO K, KATSUMI T. Measuring the k-S-p relations on DNAPLs migration[J]. Engineering Geology, 2003, 70(3/4): 351 - 363.
- [3] Van GEEL P J, SYKES J F. 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, 1997, 25(3/4): 249 - 270.
- [4] Van GEEL P J, ROY S D. A proposed model to include a residual NAPL saturation in a hysteretic capillary pressure-saturation relationship[J]. J Contam Hydrol, 2002, 58(1/2): 79 - 110.
- [5] Von ENGLAHARDT W. Interstitial water of oil bearing sands and sandstones[C]//Proc World Petroleum Congress, Rome, Italy, 1955: 399 - 416.
- [6] MORROW N R. Irreducible wetting-phase saturation in porous media[J]. Chem Eng Sci, 1970, 25: 1799 - 1815.
- [7] KIA S F. Modeling of the retention of organic contaminants in porous media of spherical particles[J]. Water Res Res, 1988, 22(10): 1301 - 1309.
- [8] STEGEMEIER E A. Mechanisms of entrapment and mobilization of oil in porous media[C]//Improved Oil Recovery by Surfactant and Polymer Flooding. New York: Academic Press, 1977: 55 - 91.
- [9] MERCER J W, COHEN R M. A review of immiscible fluids in the subsurface properties, models, characterization and remediation[J]. J Contam Hydrol, 1990(6): 107 - 163.
- [10] LAND C S. Calculation of imbibition relative permeability for two-and three-phase flow from rock properties [J]. Trans Am Inst Min Metall Pet Eng, 1968, 8(2): 149 - 156.
- [11] GUARNACCIA J, PINDER G, FISHMAN M. NAPL: Simulator Documentation[Z]. National Risk Management Research Laboratory, United States Environmental Protection Agency, 1997.
- [12] 王东海, 李广贺, 贾道昌. 河滩包气带油污土层残留油释放实验研究[J]. 环境化学, 1998, 17(6): 558 - 563.
- [13] 王东海, 李广贺. 河滩包气带中残留油静态释放模型研究[J]. 环境化学, 1999, 18(4): 294 - 301.
- [14] 王东海, 李广贺. 包气带中残留油动态释放实验研究[J]. 环境科学学报, 2000, 20(2): 145 - 150.
- [15] ZALIDIS G C, WALLACE R B, VOICE T C. Influence of initial water saturation on the residual saturation of an organic liquid in the vadose zone[J]. Water Resource Management, 1998, 12(2): 81 - 93.
- [16] 武晓峰, 唐杰, 藤间幸久. 地下水饱和区中油—水两相流饱和度的试验研究[J]. 水利学报, 2000(10): 12 - 15.
- [17] 郑冰, 陈家军, 李玮, 等. 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, 2005, 20(5): 665 - 672.
- [18] 支银芳, 陈家军, 郑冰, 等. 多孔介质两相系统毛细压力与饱和度关系试验研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(2): 151 - 157.