

文章编号:0253-9985(2008)04-0527-06

油气二次运移数值模拟分析

周波^{1,2}, 金之钧¹, 王毅¹

(1. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国地质大学, 北京 100083)

摘要:通过分析物理实验和数学模拟认为, 油气运移的模式是多样化的。实际地质条件的油气运移模式有3种: 稳定式、指进式和优势式。不同运移模式的运移规律并不相同, 用任何一种单一的油气运移数值模拟方法来描述所有的油气运移模式是不科学的。不同的运移模式对应着不同的数值模拟方法, 其中逾渗方法适用于描述指进式运移和优势式运移过程, 达西渗流方程适用于描述稳定式运移模式。流体势的方法同时可以用于分析3种模式下的运移, 但其模拟结果只是一种定性结果。此外, 数学模拟必须以详实的地质资料为基础, 结合油气显示和地化资料, 综合分析油气运移过程, 才能确定真正的油气运移过程。

关键词: 运移路径; 运移模式; 数学模拟; 油气二次运移

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

Numerical simulation analysis of secondary hydrocarbon migration

Zhou Bo^{1,2}, Jin Zhijun¹, Wang Yi¹

(1. SINOPEC Exploration and production Research Institute, Beijing 100083, China;

2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The analysis of the physical experiment and numerical simulation results shows various oil migration modes. There are three modes of oil migration under actual geological conditions: stable mode, fingering mode, and spring mode. Different migration modes have different patterns of migration, thus using single numerical simulation method to simulate all the modes is not very scientific. Therefore, different migration modes shall be described with different numerical simulation methods. Invasion percolation method is suitable for the description of the fingering mode and the spring mode, while the Darcy equation is applicable for the stable mode. The fluid potential method can be applied to all the three modes, but its results are qualitative. In order to determine the real oil migration process, the mathematical simulation shall be based on detailed geological data, oil and gas shows and geochemical data.

Key words: migration pathway; migration mode; mathematical simulation; secondary hydrocarbon migration

随着计算机技术的发展, 数学模拟技术成了解决物理模拟局限性的有利工具^[1-3]。早先, 孔隙介质内多相流动的理论被应用于油气运移的分析中^[2,4]。在这种情况下, 油气的运移过程被视为在宏观上均一的多相流动过程^[5-7], 因而可以用多相渗流的扩散方程和多相条件下的达西定律对油、气、水各相流体的流动过程加以描述。为了描述储层非均质性的作用, 前人将渗透率大小代入

达西渗流方程, 通过数学方法解析该方程, 进而使得该方法考虑了岩性对运移的控制作用^[8,9]。此外, 流体势等概念也被用于模拟油气运移^[1,5,7,10]。England等^[7]在Hubbert^[6]流体势概念的基础上考虑了毛细管力, 新的流体势方程中考虑了输导层的非均质特征; 然而直接在流体势方程中加入毛管阻力值大小的方法似乎很难体现储层非均质性对油气运移的影响。通常毛细管力和流体势数量值

收稿日期: 2008-05-04。

第一作者简介: 周波(1976—), 男, 博士, 油气成藏动力学和油气数值模拟。

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(G1999043310)。

相差太远,因而没有多大的实用价值,故未得到推广。目前,利用流体势方法预测油气运移的基本原理仍然是采用 Hubert 的流体势公式^[11]。

前人通过物理实验发现,当两互不相溶的流体发生驱替时,如果驱替速度非常慢,这时流体间的排替表现出极度不均一的性状。传统的描述宏观均匀混相流动的水动力学方程并不适用^[1,3,12~14],这种流动特征需要新的理论模型来解释。研究认为,逾渗模型可以描述这种流动^[13]。

在油气运移的过程中,油气运移的模式是多样化的^[15~19],不同的动力学条件(或者基本物理条件)对应着不同的运移模式;而目前的数学模拟过程都没有依据油气运移的基本条件选择合适的运移模式,而只是随机选择某种运移模型进行模拟。本文针对目前油气运移研究中运移模型选择存在的问题,分析油气运移数值模拟中基本数学模型的选择问题,同时针对数学模型到地质模型的转换过程中存在的问题进行探讨。

1 目前主要的数值模拟方法

目前,用来描述油气二次运移过程的方法基本上分为3类。

第一类,基于流体势原理^[5~7,11],利用构造等高线法线的汇聚程度,对油气运移过程进行定性分析,公式如下:

$$\Phi = gZ + \int_0^p dp/\rho + q^2/2 \quad (1)$$

式中: Φ 为流体势, m^2/s^2 ; Z 为高程, m ; g 为重力加速度, s/m^2 ; p 为压力, Pa ; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; q 为流体流速, m/s 。

第二类,基于达西渗流方程的数值模拟方法^[11,12],主要是利用达西渗流方程和流体流动的连续性方程,结合物质守恒定律,通过数学方法解析渗流方程,获取流体流动时油相的饱和度、压力等数据^[8,9]。

第三类,基于流体非均一流动的逾渗数值模拟方法^[12~14,20~24]。侵入逾渗理论中运移过程的基本原则是,在运移的每一步,侵入流体选择前缘阻力最小的吼道突破。当流体进入一个新的孔隙后,流体不会沿着原来的毛细管回流。阻力的大小主要是依据毛管力、浮力、粘滞力以及外来驱替力来综合判断。

2 油气运移的基本模式

根据前人的研究,在油气运移的过程中油相基本上是以游离相为主。因而,本文的所有探讨都是以油的游离相运移为前提的。

2.1 路径和优势路径

当油气发生运移时,即使在某个优势通道内,油气也并不是占据了整个运移通道。有些情况下,油气沿着优势通道的一部分发生运移(图1)。这里,首先对油气运移的路径作一个定义。顾名思义,运移路径实际上就是油气实际走过的通道部分。

图1和图2为笔者进行的一个二维玻璃珠实验的结果。图中红色部分为注入的染色煤油,浅绿色部分为玻璃珠,玻璃珠粒径为0.8~0.9 mm,模型大小为300 mm×180 mm。实验中,玻璃珠被均匀地填入二维模型中。很显然,该模型可以看作是一个均匀的运移通道。如果给该通道注入油,这个通道就可以被看作是优势通道。当油气在该介质中发生运移的时候,油只沿着介质中间的一部分范围发生运移,其他地方仍然为饱和水的玻璃珠介质(图1)。也就是说,油气运移的路

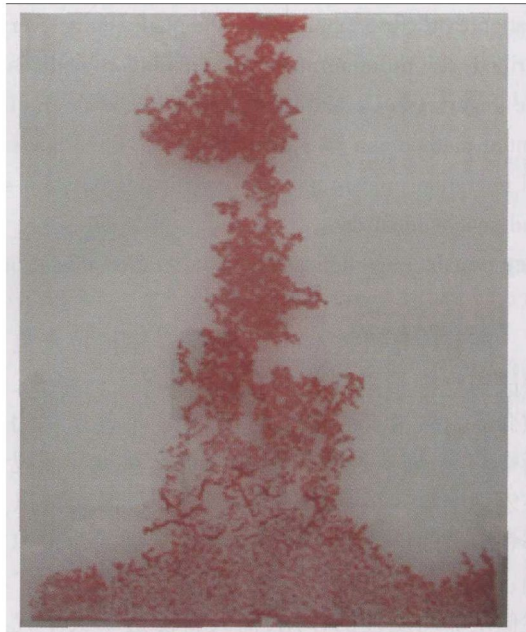


图1 油气运移路径示意图

Fig. 1 The schematic diagram of hydrocarbon migration pathway

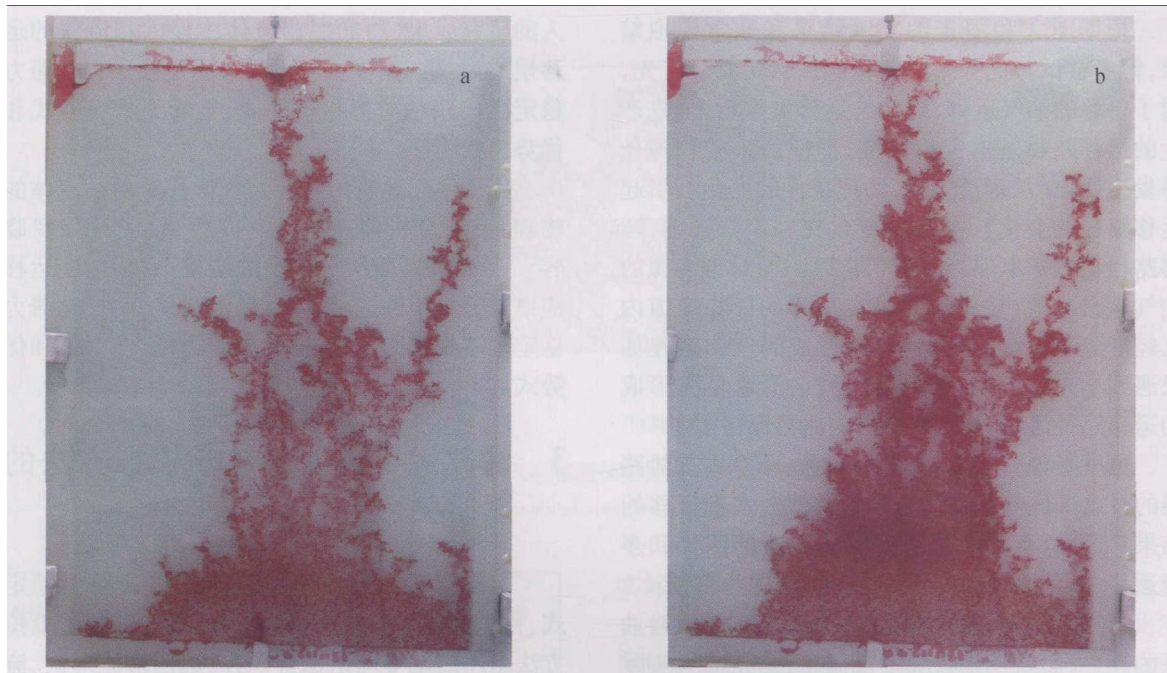


图2 油气再注入时运移路径变化示意图

Fig. 2 The schematic diagram showing changes of migration pathways during recharging of hydrocarbons

a. 注入速率 0.3 mL/min; b. 注入速率 0.6 mL/min

径和优势通道不是一个概念。即使在优势通道内,油气也不一定占据整个通道,而是沿着优势通道的全部或者一部分范围发生运移。

图2a为当注入油速度为0.3 mL/min时的油气运移实验结果图。当油气运移到顶部时,不改变其他因素,直接将注入速度增加为0.6 mL/min,当油再次运移到顶部时,获得图2b。从图2的运移结果来看,首先当油注入速度为0.3 mL/min时,油沿着运移通道的一部分发生运移,运移路径呈枝杈状。当提高注入速度时,油运移的路径基本不发生变化,油仍然沿着上次运移的路径发生运移。也就是说,当油注入速度发生变化时(在一定范围内变化),油运移的路径并没有发生变化,仍然沿着原来的路径发生运移。

图3为多个运移点时的油气运移数学模拟图。模拟的基本数学模型采用逾渗模型^[28]。图中,A和B为油气运移的两个源,C为运移的终点。油气首先从A点出发,沿着红色部分运移,最终到达C点。然后,油气又从B点出发,沿着蓝色的路径发生运移。当运移到达A点时,运移不再产生新的运移路径,而是沿着原来的路径AC发生运移,最后到达C点。

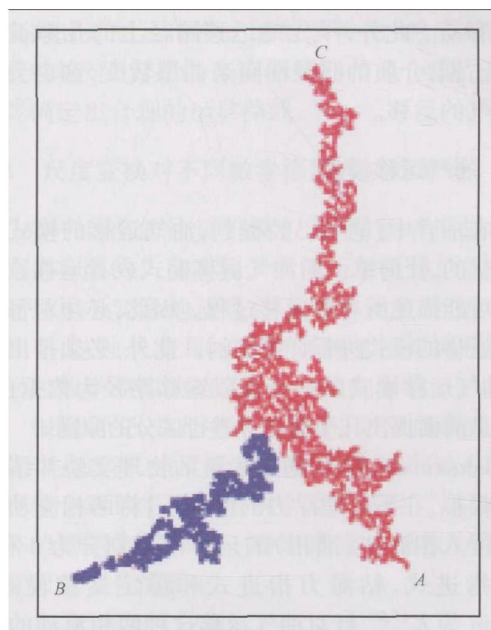


图3 油气运移优势路径示意图

Fig. 3 The schematic diagram showing the predominant oil migration pathway

红色部分为从A点出发的油的运移路径,蓝色部分为从B点出发的油的运移路径。其中为了描述的方便,假定A点出发的油的运移路径形成后,B点的油才开始运移。

根据图2和图3的实验结果和数学模拟结果,笔者尝试对优势路径的概念进行定义。首先,对于单源的油气运移,当油气运移发生后,早先产生的运移路径基本保持不变,即使后来的物理条件发生变化(从理论上讲,物理条件的变化会引起运移路径的变化),如果该变化在一定范围内,运移路径仍然基本保持不变(图2)。而对于多源的油气运移过程(图3),如果在运移的优势通道内已经形成了一个运移路径,新形成的运移路径如果遇到早先形成的运移路径,就会沿着早先形成的运移路径运移,并且会合后的路径保持不变。

也就是说,仅就单个运移过程,不存在优势路径的概念。优势路径是多次运移或者多源运移的结果。通常,将多次运移时保持不变的路径和多源运移、多条路径合并后的路径称作优势路径。

事实上,通道是宏观概念,代表了一种运输油气的能力;而路径是微观定量概念,是指油气实际的运移轨迹。

造成图2和图3两种运移结果的主要原因可

人的研究成果,两非混相流体中侵入相流体的运移模式为:稳定模式(包含浮力稳定模式和粘滞力稳定模式)、粘滞力指进模式、毛管力指进模式和优势模式。

根据实际地质条件下油气运移时两相流体的物理状态,分析前人成果^[12~14,20],认为正如罗晓容^[17]等物理实验所观察到的结果一样,油气运移应该被分为3种运移模式:稳定运移模式(粘滞力稳定运移模式)、指进模式(毛管力指进模式)和优势式。

3 油气运移模式和数学模拟方法的对应关系

根据前文分析,油气运移的模式被分为稳定式、指进式和优势式;而目前的油气运移数值模拟方法采用的基本理论也有3种:达西渗流理论、流体势理论和逾渗理论。达西渗流理论本身就是对孔隙介质内流体的宏观均一性流动进行描述的,

这也是前面提出几个概念并进行区分的原因。

Lenormand等^[12]通过大量的物理实验并结合数学模拟,在不考虑浮力的情况下,将两相流动过程中侵入相流体(油相)的运移模式划分为3种:毛管指进式、粘滞力指进式和稳定运移模式。Meakin等人^[3,20]针对油气运移这种两相流动的过程,认为油气运移过程应该分为毛管指进模式和优势式运移模式。Tukunaga^[15]根据物理实验,利用两个无量纲数,Bond数和Ca数,将油气运移模式划分为稳定运移模式和非稳定运移模式。罗晓容等^[17]根据物理实验获得了3种油气运移模式:稳定模式、指进模式和优势式运移模式。综合前

文上论述,目前采用的3种数值模拟方法和油气运移模式的对应关系如图5所示。达西渗流理论适用于描述稳定模式下的油气运移过程,而逾渗理论适用于指进式和优势式运移模式下的油气运移过程描述。而流体势理论本身的依据是流体的势能,其原理是物理学的基本原理,因此无论是什么模式的油气运移,都可以用流体势理论来描述。但是流体势的原理本身并不能描述油气运移的具体过程,只能对流体流动的趋势作出定性的判断。因此和前面两种方法相对比,前两种方法虽然描述对象有限,但都属于定量描述方法;而流体势方法只是一种定性讨论方法。

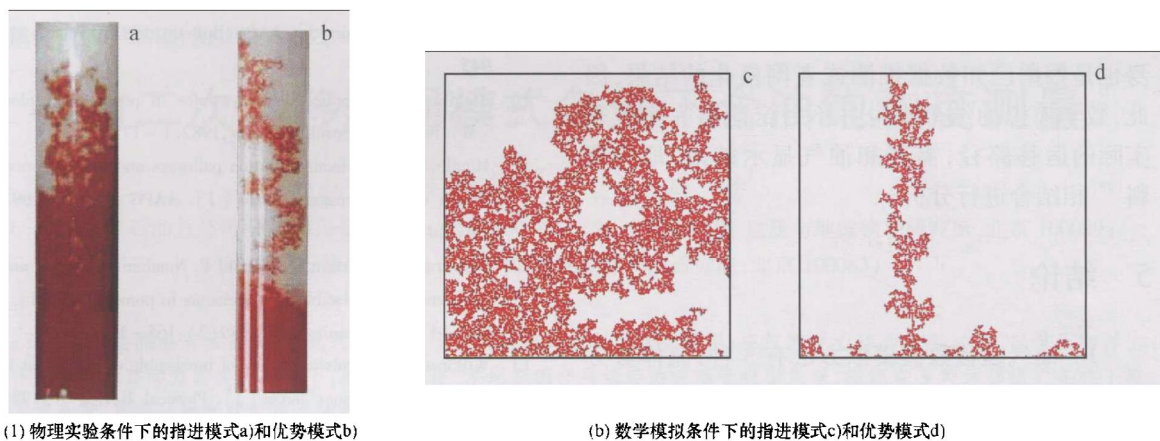


图4 指进模式和优势模式油气运移路径物理实验结果和数学模拟结果对比

Fig. 4 Comparison of lab experiment and mathematical simulation results of fingering and spring migration modes

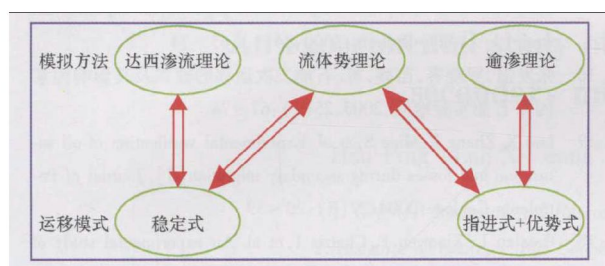


图5 油气运移数值模拟方法和运移模式的对应关系

Fig. 5 The corresponding relationship between migration modes and simulation methods

实际地质中有些参数是很难确定的,比如地质历史上油气运移的速度是很难精确估计的。因此实际模拟时,应该结合油气勘探成果及地质、地化资料,总结油气运移的规律,判断油气运移的特点,进而选择模拟方案,建立地质模拟,开展数学模拟。

在无法确定油气运移具体模式的情况下,也可以同时开展几种模式的数学模拟,然后和已知的资料相对比,并结合流体势的信息,相互印证,最终确定出合理的运移路线。

4 实际地质条件下油气运移数值模拟需要注意的几个问题

上文主要针对油气运移数值模拟时的基础理论问题进行探讨。然而,实际地质条件下的油气运移并不是简单的数学理论就可以计算或者描述的。下文就目前地质条件下油气运移中的几个主要问题进行讨论。

4.1 油气运移模式的确定

油气运移的模式是多样化的,不同的运移模式必须采用不同的理论方法来开展数学模拟。那么在实际地质条件下,如何判断某个疏导层内的油气运移属于哪种运移模式呢?

根据前人的研究,可以依据两个无量纲数(Bond数和Ca数)绘制油气运移的模式图,然后根据模式图确定实际地质条件下的运移参数在模式图所处的位置,从而判断运移的模式。但是,

4.2 尺度变换对不同数学模拟方法的影响

鉴于目前的计算机模拟水平,数学模拟的计算力是有限的。目前数学模拟所能提供的网格数目远远小于实际地质条件下的单元数目,在这种条件下,这种从宏观地质体到数学模拟网格的转变会对数学模拟的结果产生一定的影响。

根据研究,其他条件不变时,对于指进式运移和优势式运移,当尺度发生变化时,油气运移路径占据整个运移空间的比例会发生变化^[26]。此外,流体势模拟方法作为一种宏观定性模拟方法,并不受尺度变化的影响。

4.3 数学模拟方法的局限性

数学模拟方法提供了定量模拟油气运移的工具。但是,任何数学模拟都是建立在实际的地质资料之上的。高品质和详细的地质资料是油气运移模拟可靠性的基本前提。

由于在勘探的不同阶段,地质资料的掌握程

度并不相同,进行模拟时的孔渗和构造等资料本身也是根据已知数据推测或者网格化的结果,因此,数学模拟的结果本身并不一定能够完全代表实际的运移路径,需要和油气显示结果、地化资料^[27]相结合进行分析。

5 结论

1) 油气运移数值模拟方法有3种:流体势方法、逾渗方法和达西渗流方法。每个方法的原理各不相同,所描述的油气运移规律也不相同。

2) 油气运移模式包括:稳定式、指进式和优势式。其中,逾渗方法适用于描述指进式运移和优势式运移过程,达西渗流方程适用于描述稳定式运移模式,二者都属于定量描述方法。而流体势方法虽然同时适用于3种模式下的运移,但其模拟结果只是一种定性结果。

3) 数学模拟方法是建立在基本的地质资料基础上的,因此必须以详实的地质资料为基础,结合油气显示和地化资料,综合分析油气运移过程,才能确定真正的油气运移过程。

参 考 文 献

- Hirsch L M, Thompson A H. Minimum saturations and buoyancy in secondary migration[J]. AAPG Bulletin, 1995, 79(5): 696 - 710
- Ungerer P. Basin evaluation by integrator two-dimensional modeling of heat transfer, fluid flow, hydrocarbon generation and migration[J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(3): 1 221 - 1 230
- Meakin P, Wagner G, Vedvik A. Invasion percolation and secondary migration: experiments and simulations[J]. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17(7): 777 - 795
- Ungerer P, Bessis F, Chenet Y, et al. Geological and geochemical models in oil exploration: principles and practical examples[A]. In: Demaison G, ed. Petroleum geochemistry and basin evaluation [C]. AAPG Memoir, 1984, 35: 53 - 57
- Schwartz T T. Mechanics of secondary hydrocarbon migration and entrapment[J]. AAPG Bulletin, 1979, 63(5): 723 - 760
- Hubbert M K. Entrapment of petroleum under hydrodynamic conditions[J]. AAPG Bulletin, 1953, 37(8): 1 954 - 2 026
- England D A. The movement entrapment of petroleum fluid in the subsurface[J]. Journal of Geological Society, 1987, 144(2): 327 - 347
- Rhea L, Person M, Marsily G D, et al. Geostatistical models of secondary oil migration within heterogeneous carrier beds: a theoretical example[J]. AAPG Bulletin, 1994, 78(11): 1 679 - 1 691
- Bethke C M, Reed J D, Oltz D F. Long-range petroleum migration in the Illinois Basin[J]. AAPG Bulletin, 1991, 75(50): 925 - 945
- Dahlberg E C. Applied hydrodynamics in petroleum exploration [M]. New York: Springer-Verlag, 1982. 1 - 171
- Hindle A D. Petroleum migration pathways and charge concentration: a three-dimensional model[J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(9): 141 - 148
- Lenormand R, Zarcone R, Touboul E. Numerical models and experiments on immiscible displacements in porous media[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1987, 189(2): 165 - 187
- Wilkinson D. Percolation model of immiscible displacement in the presence of buoyancy forces[J]. Physical Review A, 1984, 30(1): 520 - 531
- Wilkinson D. Percolation effects in immiscible displacement[J]. Physical Review A, 1986, 34(2): 1 380 - 1 391
- Tukunaga T, Mogi K, Matsubara O, et al. Buoyancy and interfacial force effects on two-phase displacement patterns: an experimental study[J]. AAPG Bulletin, 2000, 84(1): 65 - 74
- 张发强, 罗晓容, 苗盛, 等. 石油二次运移的模式及其影响因素[J]. 石油实验地质, 2003, 25(1): 67 - 74
- Luo X, Zhang F, Miao S, et al. Experimental verification of oil saturation and losses during secondary migration[J]. Journal of Petroleum Geology, 2004, 27(3): 29 - 39
- Catalan L, Xiaowen F, Chatzis I, et al. An experimental study of secondary oil migration[J]. AAPG Bulletin, 1992, 76(5): 638 - 640
- 侯平. 石油二次运移路径的模式分析[J]. 中国科学(D辑), 2004, 34(增刊 I): 162 - 168
- Meakin P. Invasion percolation in a destabilizing gradient[J]. Physical Review A, 1991, 46(6): 3 357 - 3 368
- Meheust Y, Løvoll G, Maløy K J, et al. Interface scaling in a two-dimensional porous media under combined viscous, gravity and capillary effects[J]. Physical Review E, 2002, 66(5): 051603
- Wagner G, Birovljev A, Meakin P, et al. Fragmentation and migration of invasion percolation cluster: experiments and simulations [J]. Physical Review E, 1997, 55(6): 7 015 - 7 029
- 金之钧, 张发强. 油气运移研究现状及主要进展[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(3): 263 - 270
- 罗晓容, 张立宽, 廖前进, 等. 埕北断阶带沙河街组油气运移动力学过程模拟分析[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(2): 191 - 197
- 周波, 金之钧, 罗晓容, 等. 尺度放大时逾渗模型中的油气运移路径变化规律探讨[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(2): 175 - 180
- Zhou Bo, Didier Loggia, Luo Xiaorong, et al. Numerical studies of gravity destabilized percolation in 2D porous media[J]. The European Physical Journal B, 2006, 50(4): 631 - 637
- 李素梅. 八面河地区原油、烃源岩中甾类化合物的分布特征及其应用[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2002, 27(6): 711 - 717

(编辑 李 军)