

文章编号: 0253-9985(2007)02-0175-06

# 尺度放大时逾渗模型中的油气运移路径变化规律探讨

周 波<sup>1,3</sup>, 金之钧<sup>1</sup>, 罗晓容<sup>2</sup>, 王 毅<sup>1</sup>, 张发强<sup>1</sup>

(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. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029 3. 中国地质大学, 北京 100083)

**摘要:** 数值模拟获得的油气二次运移路径不受模拟网格大小的影响, 但模拟网格的大小却影响侵入相饱和度值的大小。其中, 运移网格的宽度和侵入相饱和度呈指数关系, 运移网格的长度和侵入相的饱和度无关, 运移网格的尺度和侵入相饱和度呈指数关系。这一规则的发现为逾渗理论从微观放大到盆地尺度提供了理论依据。

**关键词:** 数学模拟; 逾渗模型; 油气运移; 尺度放大; 油气运移路径; 模拟网格

中图分类号: TE112 文献标识码: A

## Changing patterns of hydrocarbon migration pathway in a up-scaling percolation model

Zhou Bo<sup>1,3</sup>, Jin Zhijun<sup>1</sup>, Luo Xiaorong<sup>2</sup>, Wang Yi<sup>1</sup>, Zhang Faqiang<sup>1</sup>(1. Exploration and production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083 China;  
2. Institute of geology and geophysics CAS, Beijing 100029 China;  
3. Resources College, China University of Geosciences Beijing 100083 China)

**Abstract** Under the hypothesis that hydrocarbon migration conforms to the description of percolation theory, the relationship between the saturation of invading fluid (the percentage of the migration pathway to the whole lattice) and the width, length, and dimension of the simulation lattice is studied by means of up-scaling and mathematical simulation. The result indicates that, instead of exerting influence upon the numerically simulated secondary migration pathways of hydrocarbon, the size of the simulation lattice has an impact on the saturation of invading phase, which is found to have an exponential relation with the width of the lattice but no connection with the length of the lattice. The discovery of the rule provides sound theoretical basis for the application of the percolation theory in the study of basins.

**Key words** mathematical simulation; percolation; hydrocarbon migration; scale; hydrocarbon migration pathway; simulation lattice

在研究石油二次运移的过程中, 基本的手段是物理实验和数学模拟<sup>[1~4]</sup>, 物理实验受到实验条件、资金、客观因素等限制。而数学模拟具有模拟时间短、成本低、可考虑多种复杂因素等优点。为此数

学模拟在二次运移研究中起着很重要的作用。

在数值模拟方面, 传统的流体势、有限元法、差分方程仍然在二次运移模拟中被广泛应用<sup>[5~13]</sup>。以流体势概念为基础, Hindle 等人建立

收稿日期: 2007-01-17

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

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (G1999043310)

了一个三维地质模型,并将该模型用于巴黎盆地油气运移通道和聚集特征的预测,取得了比较好的效果,但流体势方法属于粗略定性的判断,难于实现对油气运移路径的进一步描述。Bekele等利用差分方程考虑岩性不均一性对油气运移的影响。但差分法局限于达西的两相流动方程,所得出的结论必然是油气在运移时分布于整个运移通道(这里定义运移通道是指整个疏导空间)。但根据目前的研究发现,油气在通道内的运移是一个极不均一的过程,即便是在均匀的孔隙介质内,油气也是沿着有限的通道运移的<sup>[14 15]</sup>,运移通道的体积只占全部通道的 1% ~ 10%。

很显然,流体势方法只能对油气运移进行定性描述,差分法或者有限元法解两相流动方程虽然精确,但是在很多条件下,流体的运移已经不是达西流,因此,通过求解两相流动方程得出的结论自然就不可靠。近年来,物理学关于两相互不相溶流体驱替的微观模拟实验和数值模拟结果,以及据此提出的侵入逾渗理论被逐渐介绍到油气运移优势通道的研究中<sup>[16~23]</sup>。当流体流动速度较慢,且孔隙介质为随机介质时,介质内的流体流动已经不是达西流,此时的流体流动规律正好符合逾渗模型的范围<sup>[24 25]</sup>,逾渗理论的提出,为研究非达西流状态下的石油二次运移提供了新方法和理论。

侵入逾渗模型最初用于模拟孔隙尺度的驱替过程,在网格模型中,往往用节点代表孔隙和喉道,键长代表着平均喉道的长度。但到了更大尺度,这种用来描述微观条件下的油气运移的理论是否可以用来描述地质条件下的油气运移模式,或者说怎样将这种油气运移的理论应用到实际地质条件下就变得至关重要。为了将孔隙尺度的模型应用到盆地尺度,研究者(Jackson 2000)<sup>[26]</sup>提出了尺度放大(Up-Scaling)思想,将逾渗模型从微观模型扩展到大尺度地质模型中。尺度放大的过程中,认为在宏观尺度上平均的逾渗分析结果与多相达西流动的结果基本一致。根据地质模型尺度将多个孔隙组成的孔隙簇赋予同一个网格单元,该单元相当于一块或小于一块岩心样品的尺度,在计算时,可利用样品分析的(平均)孔喉半径结果换算出相应的毛管阻力。达西流的流动规则用达西方程来描述,而非达西流是一个众多流体流动规则的集合,本文所用逾渗模型只是针对普通砂岩中的油气二次运移过程中的非达西流进行描述的。

尺度放大只是提供了微观模型到盆地模型转换的思路,至于在微观模型到宏观转换过程中含油饱和度、运移路径等的变化仍不清楚。本文从逾渗模型的实际出发,以数学模拟手段为基础,旨在描述尺度放大过程中油气运移路径的变化。

## 1 数学模型

本文利用一个正方形的网格( $L_x \times L_y$ )进行二维数学模拟试验, $L_y$ 为运移方向。模型中定义驱动压力为:

$$P = P_b - P_c \quad (1)$$

式中: $P$ 为驱动压力, $P_b$ 为浮力, $P_c$ 为毛管力, $P_a$

根据Yong-Laplace方程获得:

$$p_c = \frac{2\gamma}{r} \cos\theta \quad (2)$$

式中: $\gamma$ 为界面张力,N; $r$ 为孔隙介质的吼道半径,m; $\theta$ 为两相之间的接触角,°。

$$P_b = P_0 + \Delta\rho gh_i \quad (3)$$

式中: $h_i$ 表示对应网格点的高度,m; $P_0$ 为在 $h_i = 0$ 处的初始压力(可以理解为初始油柱产生的浮力), $P_a$   $\Delta\rho$ 为两相流体的密度差, $\text{kg/m}^3$ ;  $g$ 为重力加速度, $\text{m/s}^2$ 。其中 $P_0 > P_{\text{thre}}$ , $P_{\text{thre}}$ 是侵入流体能够在网格中形成通路的临界压力。模拟过程遵循逾渗理论的基本原则,在运移的每一步,侵入流体选择前缘阻力最小的喉道突破,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。模拟中,将侵入流体在网格中形成的枝状结构称为侵入流体的运移路径。文中,将运移路径在整个网格上所占的比例称作侵入相的饱和度(侵入相饱和度为相同单位参数的比例,属于无量纲数符号为 $S_o$ )。

本文数学模拟中孔喉的设计是依据砂岩的孔喉特征,选择网格的间隔作为砂岩中的运移喉道(相对窄小的孔),网格的节点作为砂岩中的孔(相对较大的孔)。

## 2 模拟结果

### 2.1 增加模拟网格的长度

首先,笔者放大油气运移时有效通道的长度,这样一来油气运移的通道变长,在数学模型中等

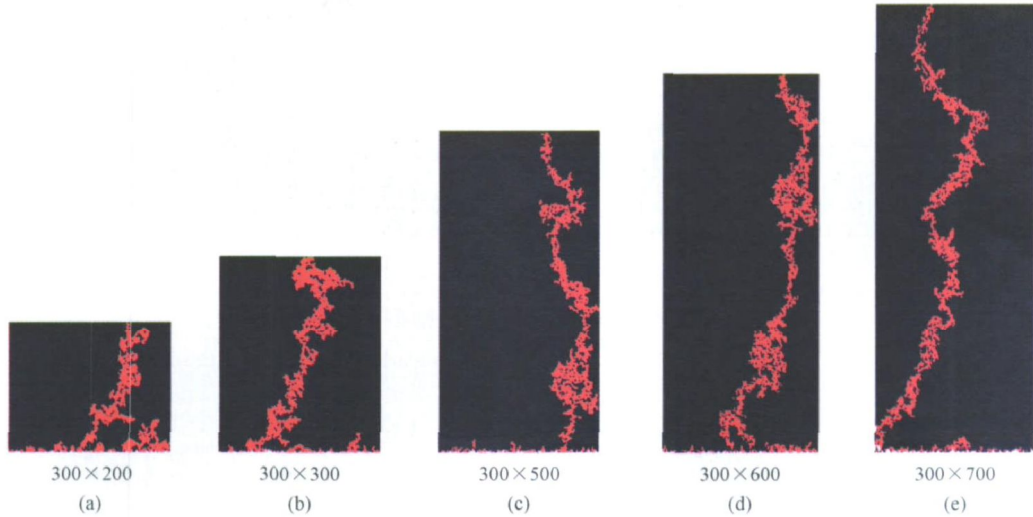


图 1 油气运移路径数值模拟结果图

Fig. 1 Numerical simulation results of hydrocarbon migration pathway

同于模拟网格长度的增加。

通过数学模拟,笔者得到图 1 图中白色部分为油气运移的路径,黑色部分为油气运移的通道。图 1a~图 1e 中 5 个运移模拟结果所选用的模拟网格宽度都为 300 个网格,只增加模拟网格的长度,长度从 200 个网格到 700 个网格。从图 1 的运移模拟结果来看,模拟得到的运移路径随着模拟网格长度的增加而增加,但是,运移路径的宽度基本不发生变化。也就是说,随着模拟网格长度的增加,油运移路径只是随着模拟网格的加长而加长。

为了确定侵入相含油饱和度的变化,笔者以侵入相含油饱和度为纵坐标,网格的长度为横坐标(图 2)。从图 2 可以清晰地看到,随着模拟网格长度的变化,通道上的含油饱和度值在一个直线附近上下浮动,基本不发生变化。说明随着模拟网格的加长,单位长度上的含油饱和度值基本不发生变化,但同时由于孔隙介质的随机性,含油饱和度不可能为一个定值,而是在一个固定值附近波动。

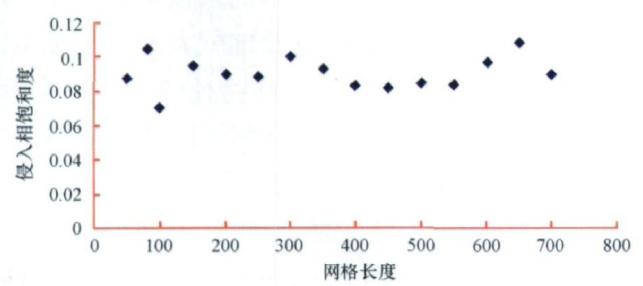


图 2 侵入相饱和度和模拟网格长度关系图

Fig. 2 The relationship between the saturation of invading fluid and the length of simulation lattice

2.2 增加模拟网格的宽度

为了检测运移路径宽度的变化对油运移路径的影响,笔者放大油气运移时有效通道的宽度,在数学模型中等同于模拟网格宽度的变化。

通过数学模拟,笔者得到图 3 图中红色部分为油气运移的路径,蓝色部分为油气运移的通道。图 3a~图 3d 4 个运移模拟结果所选用的模拟网格长度都为 600 个网格,只增加模拟网格的模拟宽度,从 100 个网格到 800 个网格。从运移模拟结果来看,模拟得到的运移路径随着模拟网格长度的变化基本不发生变化。这也就是说,随着模拟网格宽度的增加,油运移路径并不是随着模拟网格的加宽而变宽,仍然基本保持不变。

为了确定单位长度上的含油饱和度变化,笔者以侵入相含油饱和度为纵坐标,以网格的宽度为横坐标绘制图 4。可以看到,随着模拟网格宽度的变化,通道上的含油饱和度值变小。通过多次模拟发现,侵入相含油饱和度值和模拟网格的宽度成指数关系。为了确定上述指数关系的通用性,笔者改变数学模拟时的重力梯度,发现不同的重力梯度条下的侵入相饱和度不同<sup>[27]</sup>,但是相同的重力梯度条件下的侵入相含油饱和度和模拟网格宽度之间的关系都基本保持指数关系。结合图 3 的模拟图可以看出,导致侵入相含油饱和度变化的原因应该是模拟网格宽度增加产生的模拟网格的总数量增加,而运移路径基本不变化。同样,由于孔隙介质的随机性,含油饱和度值在图 4 中的

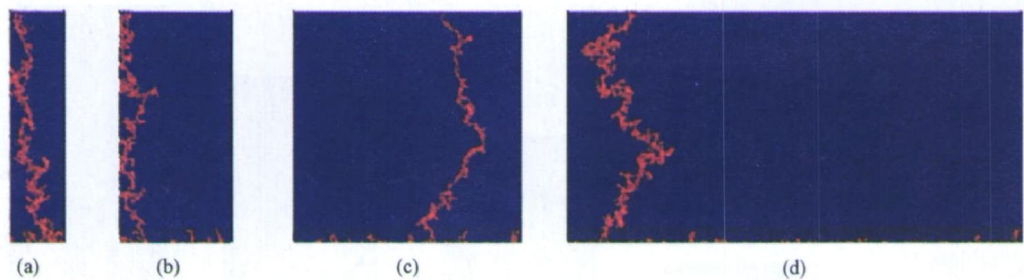


图 3 油运移路径数值模拟结果示意图

Fig. 3 Numerical simulation results of hydrocarbon migration pathway

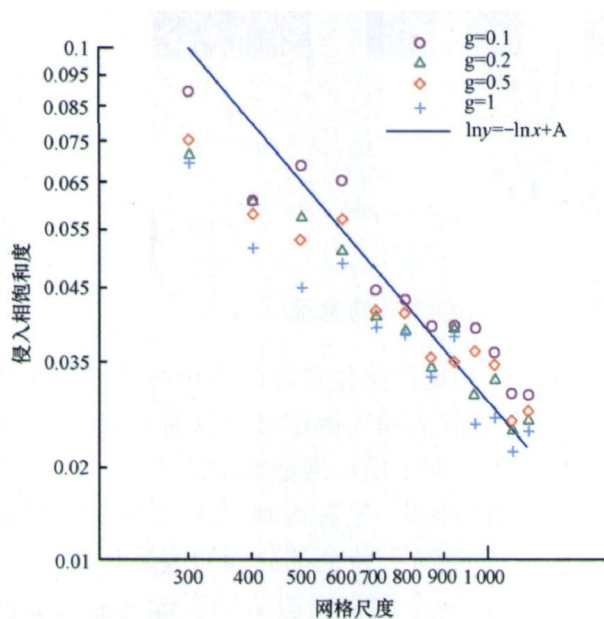


图 4 侵入相饱和度和模拟网格宽度关系图

Fig. 4 The relationship between the saturation of the invading fluid and the width of simulation lattice

直线附近波动, 而不是一个固定值。

### 2.3 增加模拟网格的尺度

前面分别检验了模拟网格宽度和网格长度对油运移路径的影响。为了综合考虑二者的作用, 笔者同时变化网格的宽度和网格的长度 (即模拟的网格尺度) 进行数学模拟, 检验尺度变化对油气运移路径的影响。

通过数学模拟, 笔者得到图 5 图中红色部分为油气运移的路径, 蓝色部分为油气运移的通道。图 5a~图 5f 中 6 个运移模拟结果分别选用不同的模拟网格宽度和长度的示意图, 实际模拟时, 宽度和尺度都从 160 到 1200 变化。从图 5 的运移模拟结果来看, 模拟得到的运移路径随着模拟网格尺度的变化发生变化, 但是由于图形的显示比例不是按原始比例显示, 因此直观的显示结果不足以

表示路径的变化。

为了考虑尺度变化对含油饱和度的影响, 笔者以侵入相的含油饱和度为纵坐标, 网格的尺度为横坐标绘制图 6。根据前面的认识, 运移网格的长度不影响侵入相饱和度, 而宽度和侵入相饱和度呈指数关系, 而尺度的变化是宽度和长度同时增加的结果, 故推理得出尺度和侵入相饱和度应该呈指数关系。从图 6 可以清晰地看到, 随着模拟网格尺度的变化, 通道上的含油饱和度值变小。通过多次模拟发现, 单位长度上的含油饱和度值和模拟网格的宽度成指数关系。和图 4 相似, 为了确定上述指数关系的通用性, 笔者改变数学模拟时的重力梯度值, 发现不同的重力梯度条件下的数学模拟得到的侵入相饱和度不同<sup>[23]</sup>, 但是相同的重力梯度条件下的侵入相含油饱和度和模拟网格宽度之间的关系都基本保持指数关系。和前面的结果一样, 由于孔隙介质的随机性, 侵入相含油饱和度值在图 6 中的直线附近波动, 而不是一个固定值。

## 3 讨论和结论

通过上述研究, 笔者发现, 运移网格的宽度和侵入相饱和度呈指数关系; 运移网格的长度和侵入相的饱和度无关; 运移网格的尺度和侵入相饱和度呈指数关系。然而, 改变油气运移数学模拟网格的大小并不改变油气运移路径的宽度。前面所显示的侵入相饱和度变化的原因是数学模拟网格数量的变化造成的。因此尺度变化并没有影响油气运移的路径。也正是基于此, 在进行数学模拟时, 必须考虑这个因素, 才能正确估计油气运移路径在宏观上占据的范围。

应用上述尺度放大中油气运移路径变化规律必须基于一个前提, 即油气运移过程必须符合逾

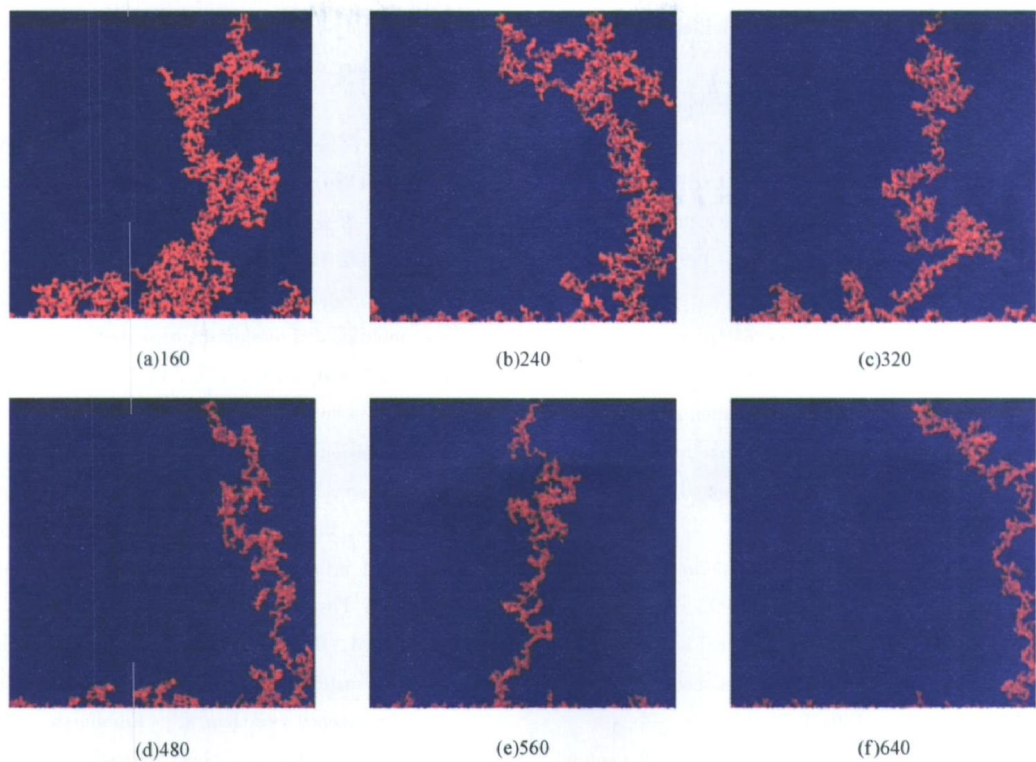


图 5 油运移路径数值模拟结果示意图

Fig. 5 Numerical simulation results of hydrocarbon migration path

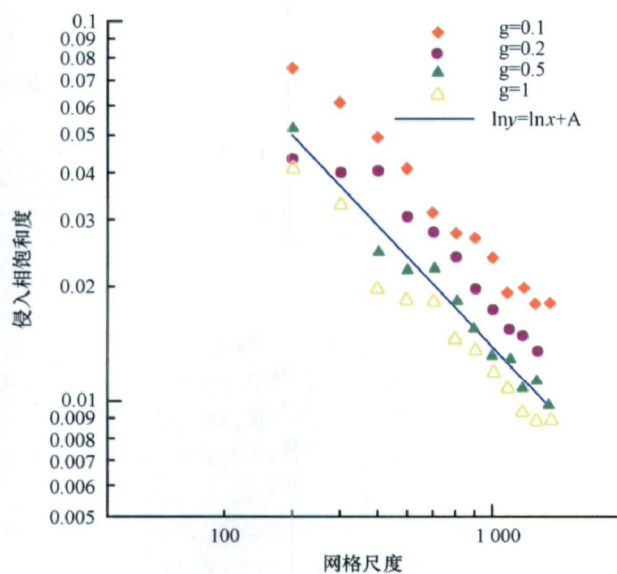


图 6 侵入相饱和度和模拟网格尺度关系图

Fig. 6 The relationship between the saturation of the invading fluid and the scale of the lattice

渗理论。

此外, 本文的数学模拟只是针对单个运移源条件下油气运移路径变化, 而实际条件下的油气运移是多个原油溢出点同时运移的结果, 上述原则不能盲目套用, 但是有一个原则是可以确定的, 不管多少个油源, 运移路径的宽度不随模拟网格

的尺度发生变化。

总之, 本文从尺度变化的角度讨论了油气运移路径的变化规律, 为逾渗理论从微观到宏观的转换提供理论依据。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 宋国奇. 济阳凹陷中浅层天然气运聚模拟试验 [J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(1): 30~34
- 3 朱玉双, 曲志浩, 孔令荣, 等. 砂岩模型两相驱替实验中油层润湿性的判断 [J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(3): 220~223
- 4 王志欣, 张一伟. 含油(气)饱和度和油(气)运移的关系 [J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(3): 197~213
- 5 Hubbert M K. Entrapment of petroleum under hydrodynamic conditions [J]. AAPG Bulletin, 1953, 37: 1954~2026
- 6 Schowalter T T. Mechanics of secondary hydrocarbon migration and entrapment [J]. AAPG Bulletin, 1979, 63(5): 723~760
- 7 England D A, Mackenzie A S, Mann D M. The movement entrapment of petroleum fluid in the subsurface [J]. Journal of Geological Society, London, 1987, 114: 327~347
- 8 贝尔 J. 多孔介质流体力学 [M]. 李竞生, 陈崇希, 译. 北京: 建筑工业出版社, 1983
- 9 石广仁, 张庆春, 等. 三维三相烃类二次运移模型 [J]. 石油学报, 2003, 24(3): 38~42
- 10 Hindle A D. Petroleum migration pathways and charge concentra-

- tion: a three-dimensional model [J]. AAPG Bulletin, 1997, 81 (9): 1 451– 1 481
- 11 Bekele E, Person M, de Marsily G. Petroleum migration pathways and charge concentration: a three-dimensional model discussion [J]. AAPG Bulletin, 1999, 83(6): 1 015– 1 019
  - 12 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
  - 13 Lerche I, Thomsen R O. Hydrodynamics of oil and gas [M]. Hingham: Kluwer Academic Publishers, 1994
  - 14 Dembicki H J, Anderson M J. Secondary migration of oil: experiments supporting efficient movement of separate buoyancy oil phase along limited conduits [J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(8): 1 018– 1 021
  - 15 Catalan L, Xiaowen F, Chatzis I, et al. An experimental study of secondary oil migration [J]. AAPG Bulletin, 1992, 76: 638– 640
  - 16 Lenormand R, Touboul E, Zarcone C. Numerical models and experiments on immiscible displacements in porous media [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1988, 189: 165– 187
  - 17 Meakin P, Wagner G, Veldvik A, et al. Invasion percolation and secondary migration: experiments and simulations [J]. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17: 777– 795
  - 18 Wilkinson D. Percolation model of immiscible displacement in the presence of buoyancy forces [J]. Physical Review A, 1984, 30: 520– 531
  - 19 Wilkinson D. Percolation effects in immiscible displacement [J]. Physical Review A, 1986, 34: 1 380– 1 391
  - 20 Hirsch L M, Thompson A H. Minimum saturations and buoyancy in secondary migration [J]. AAPG Bulletin, 1995, 79: 696– 710
  - 21 张发强, 苗盛, 王为民, 等. 石油二次运移优势路径形成过程实验及机理分析 [J]. 石油实验地质, 2003, 25(1): 69~ 75
  - 22 张发强, 苗盛, 王为民, 等. 石油二次运移优势路径形成过程实验及其影响因素 [J]. 地质科学, 2004, 39(2): 159~ 167
  - 23 Luo X R, Zhang F Q, Miao S, et al. Experimental verification of oil saturation and loss during secondary migration [J]. Journal of Petroleum Geology, 2004, 27(3): 241~ 251
  - 24 Yu Z, Lerche I. Three-phase fluid migration with solubilities in a two-dimensional basin simulation model [J]. Marine and Petroleum Geology, 1995, 12: 3– 16
  - 25 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
  - 26 Jackson M, Blunt M. Dynamic up-scaling from the pore to the reservoir scale [A]. In: Proceedings of the 21st annual international energy agency workshop [C]. Edinburgh, UK, 2001, 29– 42
  - 27 Zhou Bq, Didier Loggia, Luo Xiaorong, et al. Numerical studies of gravity destabilized percolation in 2D porous media [J]. The European Physical Journal B-Condensed Matter and complex Systems, 2006, 50(4): 631– 637

(编辑 高 岩)

(上接第 142 页)

- 58 曾溅辉, 郑和荣, 王宁. 东营凹陷岩性油气藏成藏动力学特征 [J]. 石油与天然气地质, 1998, 19(4): 326~ 329
- 59 叶加仁, 王连进, 邵荣. 油气成藏动力学中的流体动力场 [J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(2): 182~ 185
- 60 姚光庆. 成油体系与成藏动力学研究的层次分析 [J]. 勘探家, 1999, 4(2): 12~ 14
- 61 龚再升, 杨甲明. 油气成藏动力学及油气运移模型 [J]. 中国海上油气(地质), 1999, 13(4): 235~ 239
- 62 郝芳, 邹华耀, 姜建群. 油气成藏动力学及其研究进展 [J]. 地质前缘, 2000, 7(3): 11~ 21
- 63 杨甲明, 龚再升, 吴景富, 等. 油气成藏动力学研究系统概要 (上) [J]. 中国海上油气(地质), 2002, 16(2): 92~ 97
- 64 张厚福, 方朝亮. 盆地油气成藏动力学初探——21世纪油气地质勘探新理论探索 [J]. 石油学报, 2002, 23(4): 7~ 12
- 65 褚庆忠, 张树林. 含油气盆地成藏动力学研究综述 [J]. 世界地质, 2002, 21(2): 24~ 29
- 66 赵靖舟, 罗继红, 吴少波, 等. 成藏动力系统的内涵及其勘探意义 [J]. 中国石油勘探, 2002, 7(4): 15~ 17, 45
- 67 赵靖舟, 时保宏, 罗继红. 论成藏动力系统划分方法 [J]. 天然气地球科学, 2002, 14(6): 429~ 435

(编辑 陈喜禄)