

# 油气运移聚集定量化模拟

乔永富<sup>1,2</sup>, 毛小平<sup>1</sup>, 辛广柱<sup>3</sup>

1. 中国地质大学能源学院, 北京 100083

2. 辽河油田物探公司, 辽宁盘锦 124010

3. 大庆油田有限责任公司研究院, 黑龙江大庆 163712

**摘要:** 动态再现油气运移聚集过程的难点在于运移聚集模型的建立. 传统的基于达西定律的油气运聚模拟有其局限性, 而采用流线模拟模型, 基于浮力驱动, 跟踪计算油气运移轨迹流线, 并将关于油气运聚的一些公认的地质模型转化成量化的数学模型, 体现在模拟中, 实现了油气在非均匀介质中的充注动态过程模拟. 基于此模拟结果, 可进行区带资源评价, 同时为地质家解释油气运移主通道提供一个可视化的直观的分析工具. 实际模拟计算表明, 该定量化模型合理可靠, 能够满足实际地质分析需要.

**关键词:** 油气运移; 流线模拟; 油气; 盆地模拟; 三维.

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2005)05-0617-06

收稿日期: 2005-03-08

## Quantitative Simulation of Hydrocarbon Migration

QIAO Yong-fu<sup>1,2</sup>, MAO Xiao-ping<sup>1</sup>, XIN Guang-zhu<sup>3</sup>

1. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Geophysical Exploration Research Institute, Liaohe Bureau of Oil Exploration, Panjin 124010, China

3. Institute of Exploration and Development, Daqing Oil Field Corp., Ltd., Daqing 163712, China

**Abstract:** The process of reconstructing the migration and accumulation of hydrocarbon depends on the establishment of an effective dynamic model. There are limitations using the traditional method to simulate hydrocarbon migration and accumulation based on Darcy's Law. This paper adopts the flow path model, based on the buoyancy-drive, follows and calculates the trace of streamline of oil and gas. Generally acknowledged geological models of hydrocarbon movement and accumulation are here represented by new quantitative mathematical models. The dynamic filling process of hydrocarbon in a non-homogeneous layer was then simulated using these models. Based on the results of this modeling, the resources of oil and gas of plays can be evaluated, and a visible and intuitive analysis tool is provided for geologists to explain the main channel of hydrocarbon migration.

**Key words:** hydrocarbon migration; streamline modeling; oil and gas; basin modeling; three dimension.

## 0 引言

油气运移聚集模拟是盆地模拟的一个延伸, 同时也是含油气系统分析与模拟最重要的一部分, 它是评价与分析盆地资源的一个重要的工具. 目前国内外对于运移聚集规律的研究资料不少, 但大多数文献都是基于达西定律来进行油气运移聚集的分析与有限元模拟, 其实用程度有一定的局限性, 且在模

拟中难以表达复杂的、不连续的地质模型. 究其原因主要在于地质构造的复杂性, 很难用一个连续的达西定律的方程去描述一个盆地或坳陷的不连续的地质结构和运动规律. 油气在盆地内的二次运移是一个极不均匀的过程, 即便是在均匀的孔隙介质内, 油气的运移也只沿着通道范围有限的路径发生(罗晓容, 2003).

油气运移聚集的流线法模拟目前是一种新的趋势(吴冲龙等, 2001), 在国际上已经有一些较成熟的

软件,如德国的 IES、BasinMod 等.其特点是强调油气的运移轨迹,但其地质模型简单,且运移过程中对量的考虑较少,对其使用的地质模型介绍资料不多且未见到相关文章.从模拟方式上看,采用基于浮力驱动并结合达西定律的运聚模拟也作了一定的尝试(石广仁和张庆春,2004);也有从热力学角度进行分析,研究热作为油气运移的动力并建立了热力条件下油气运移的能量方程(邱楠生和方家虎,2004).

对油气运移聚集规律的地质认识或模型研究资料不少.关于成藏过程中油气的二次运移和聚集机理,在油气二次运移的相态、动力、阻力、运移通道、方向、距离以及运移时间和运聚效率等方面进行了大量的研究,取得了许多成果(Schowalter, 1979).吴冲龙等(1998)提出了油气系统动力学的理论与方法,从系统论的角度阐述了油气成藏规律的动态过程;周东延等(1999, 2000)提出了油气动态富集的观点等.本文重点研究如何基于前人这些关于油气运移、聚集和散失的机理,建立油气运移聚集模拟的数学模型,以实现流线模拟,最大限度地地质模型量化并转化成数学模型和计算机模型,尽量包容地质分析结果,直接利用浮力或水流充注模型.在模型中,也考虑了各种地质因素与地质作用:流体势、断裂、不整合面、输导层的不均一性等,以弥补其未采用达西定律的不足,同时也克服常规运聚模拟的一些不能很好地对不连续介质进行描述的缺点.

## 1 原理

为了实现油气运移聚集量化模拟研究,需要根据目前对油气运移、聚集及散失过程的认识和总结,将油气从源到圈闭各地质过程的地质模型进行量化处理,转变成数学模型,并以知识库的形式加以表达,以便在模拟时能根据油气运聚所处的环境,决定油气运移的方向和运移量的大小.再将此数学模型转化成计算机模型并加以实现,便可以模拟油气运聚散的动态过程,在不同的地区对已知情况进行模拟试验,解剖或解释已存在的现象,然后再推广到未知盆地或区带进行油气成藏规律的预测,这就是运聚模拟的主要目的.从源到圈闭主要包含以下几个模型需要进行量化研究.(1)油气初次运移模型;(2)输导层内的侧向运移;(3)在非均匀介质中的运移模型;(4)垂向运移模型;(5)断层运移模型;(6)不整合运移模型;(7)进入圈闭后的油气充注模型;

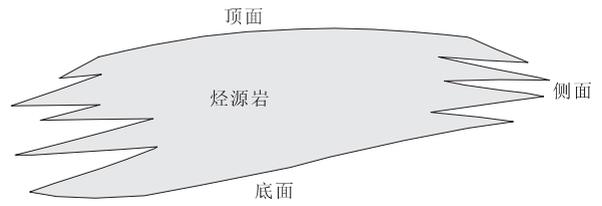


图 1 烃源岩体与围岩的接触关系

Fig. 1 Contacting relation between source rock and adjacent formation

(8)其他影响聚集量的因素.本文将对最重要的几个模型进行分析研究.

### 1.1 油气初次运移模型

从烃源岩到输导层的排烃量,与二者接触关系有关.烃源岩层之上、之下和其侧面所接触的不同性质的地质体,有可能是烃源层,也有可能是输导层,甚至其顶面或底面所接触的不是一种性质的地质体,而是多种性质的地质体,这样不同的接触关系其排出烃的数量是不一样的.针对这样复杂的实际情况,其具体的模拟思路是,通过对各层的相图进行比较,确定同一层位中的烃源层的范围,合并相邻烃源岩体区域,计算烃源岩体区域与输导层顶底接触面积、侧面接触面积.

此处分顶底面与侧面的目的是:底面接触与侧面接触,从烃源岩层向输导层排放的比例是不一样的,侧面接触为指状接触,一般为顶、底面接触时的 3~7 倍.

烃源岩体的顶、底面与输导层接触将会使油气排向上覆与下伏输导层,并在这些层位中产生侧向或垂向运移.烃源岩体的侧面接触输导层,排出烃后在同一层内进行油气的侧向运移(图 1).

### 1.2 输导层内的侧向运移

输导层内的侧向运移主要有 3 个原则(周东延和李洪辉,2000):(1)法线原则.油气在输导层内的侧向运移原则是按最小阻力路径运移.即沿流体势法线方向运移,或称为负梯度方向,如果没有异常压力或其他因素,输导层顶面起伏等值图各点法线常常可以近似作为油气运移的方向(图 2a),矢量  $AA'$  和  $BB'$  为其法线方向.输导层顶面局部某点如果不是圈闭,则按流体势;如果是圈闭,则以顶界形态为准逐步充填油气.(2)物质守恒原则.由于流线模拟的特殊性,根据物质守恒原则,需考虑油气扩散和会聚因素(图 2b).图 2b 显示了运聚量或强度的扩散定量计算过程.在左面源处为 2 个单元,其含有  $A =$

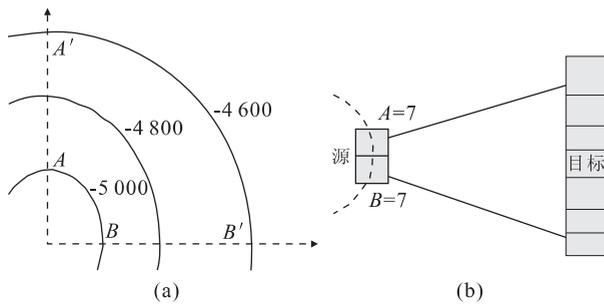


图 2 烃侧向运移模型

Fig. 2 Model of lateral migration of hydrocarbon

a. 构造等高线和流体势的法线; b. 油气运移的扩散效应

7 和  $B=7$  的量,当运移至右边目标区时,将均匀散布在 7 个单元上,则每个单元量为  $2/7$ ,这样,在不考虑中间路过其他单元的损失下,达到了物质守恒。(3)积分原则.沿油气运移路径烃的通过量是一个积分过程,这为通过量的计算提供一个实际的数学模型。

### 1.3 在非均匀介质中的运移模型

为了进行运聚过程的动态模拟,需将输导层在平面上离散化,并以一定间隔的网格为基础,其中任一个网格称为运聚单元.油气的运移就体现在单元与单元之间,由于流体势大小的变化导致油气由一个单元运移至另一个单元.而在非均匀介质中,油气除了受流体势(主要是输导层顶界起伏)影响外,还受到运移介质的非均匀性的影响,包括运聚单元之间的渗透性、孔隙度、砂岩百分比的差异,这些都需要根据公认的地质认识规律进行定量化,并体现在知识库中.以砂岩百分比为例,可以定如下规则:(1)相邻单元中,运移方向选择砂岩大于某个阈值  $\alpha$  如 15% 的构造高点运移;(2)砂岩都大于  $\alpha$ ,运移方向选择构造高点运移,完全依流体势法线向上运移;(3)砂岩都小于  $\alpha$ ,形成聚集;形成聚集后,如果上覆地层的运聚单元内地层砂岩百分比大于某个阈值  $\beta$  如 80%,则该单元的聚集无效,其聚集量全部垂向上运移至上覆地层的相邻运聚单元内。

### 1.4 垂向运移模型

一般说来,没有严格的盖层和绝对的输导层,同一地层不同沉积相带其封盖性也有所差异,即在实际模拟计算时,不能把地层严格地指定为输导层还是盖层,而是指定一个连续的盖层评价指标:垂向运移比率.如果同一地层内某种相带的区域是盖层,则下伏地层流向此区域的垂向运移比率为零,即不流动;如果为输导层,则下伏地层流向此区域的垂向运

表 1 临清坳陷石油垂向运移比率

Table 1 Ratio of oil vertical migration in Linqing depression

砂岩百分比/%	油垂向运移比率
10~20	0
21~30	0.1
31~40	0.3
41~50	0.4
51~60	0.5
61~80	0.8
81~100	1.0

移比率为 100%. 介于二者之间的则为 0~100%,即既非盖层,也非输导层,油气的主要运移通道不仅是开启的断层、不整合面等,也包含这种介于盖层与输导层之间的层位。

这就需要对地层内不同相带的沉积岩进行盖层性质评价,并以此为依据设定垂向运移比率.在没有这些评价参数之前,可以使用砂岩百分比作为一个缺省的评价依据,即当前地层的百分比决定了下伏层位的油源排向本层的百分比,剩余的烃为侧向运移.此比例可通过地质分析根据实际情况采用不同的垂向分配比例表格.如在临清坳陷石油的垂向运移采用如表 1 所示的比例表.天然气的垂向分配原则及分配比例和表 1 类似,只是给定的运移比率不一样.上面直接采用砂岩百分比近似处理有时会产生错误.如在塔里木盆地油气资源评价模拟中,一些区域的某些层位含有厚层砂岩,其砂岩百分比比较大,按表 1 此层应归为输导层,但此层中夹有较薄的泥岩,且具有很好的封盖性,这时就只能把它当成盖层了.所以比较完善的做法,是需要对各地层不同相同区域作一个封盖性评价。

### 1.5 断层运移模型

断层是油气二次运移的主要通道之一,也是一个比较复杂的问题,有许多关于断裂控油、断层封堵的研究,其中涉及很多相关参数提取与计算,甚至包含地震资料的处理.出于实用考虑,在本文中不作重复研究,而是由地质家或用户通过地质分析或其他途径手段取得的断层属性作为输入,包括断层活动起止时期、顺断层运移比率与储层分流作用大小。

将所提供的断层封堵性分析结果体现在模拟过程中,使模拟具有真实性与可靠性,同时也具有可调节性.因为地质家对盆地的认识有一个深化过程,判断不一定很准确,需要多次按不同的断层参数加入流线模拟中进行试算,并与已知情况对比,只能在已

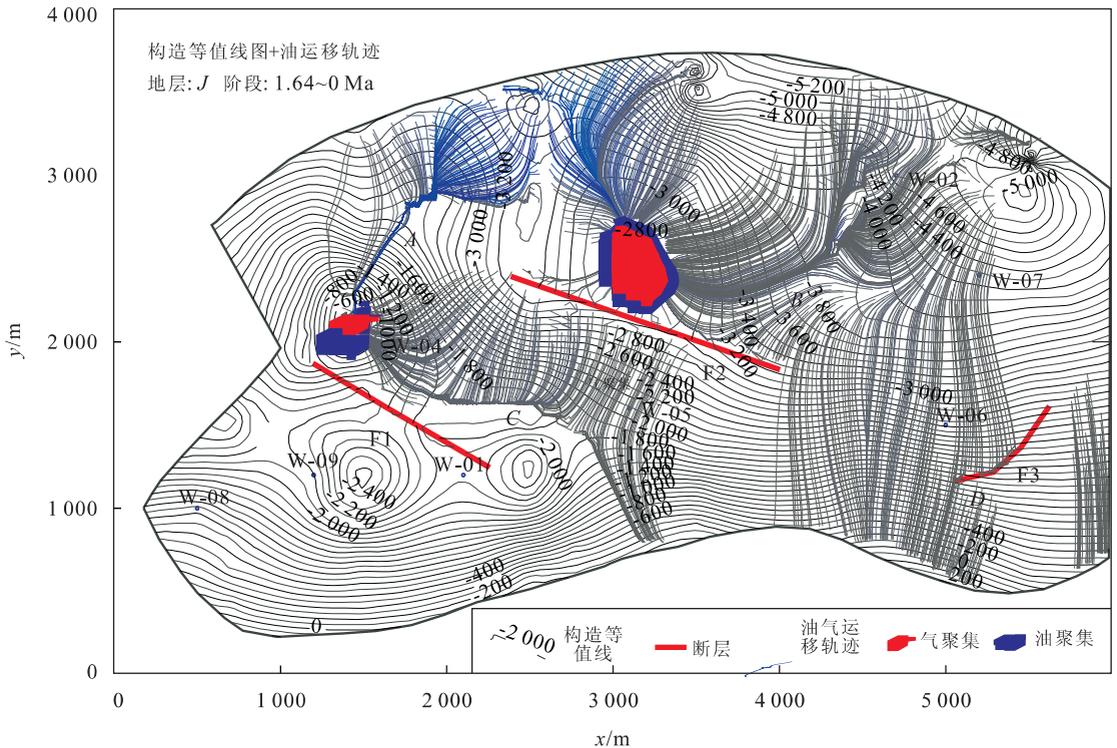


图 3 侏罗系顶界在 1.64~0 Ma 期间油气运转移迹示意平面

Fig. 3 Flow path of hydrocarbon migration during 1.64~0 Ma at the top of Jurassic

知情况有较好吻合度的情况下,才能将系统推广到未知区域进行预测模拟。

具体方法是,在油气运转移迹追踪过程中,如果遇到断层单元,则需读取断层信息,取得断层的属性信息,这是在模拟之前预先给定的。主要包括断层的开启性,如果是开启的,则需要取得顺断层向上的运移比率,按此比例将当前的源顺断层向上分配,余下的作为新的源,继续按流体势的等值线法线方向,在输导层内侧向前追踪油气运转移迹。该比率在 0~1 之间,0 表示断层封闭,1 表示断层完全开启,在 0~1 之间的数值,则表示断层为半开启,一部分顺断层向上运移,一部分侧向运移。顺断层向上运移的条件是,上伏地层如果有此断层,即在上覆地层中找到最近的与此断层号相同的断层单元,将源按比例分配到此上伏地层的单元中,作为新的源继续分配。

在油气充注模拟实现中,当流线遇到断层后判定此时的时代并取出断层的开合属性、是否为活动的断裂等信息。如果断层闭合则断层起遮挡作用,否则起输导作用。如果是完全封堵的断层,则油气将在断层附近形成圈闭,而不会顺断层向上运移,即与其覆盖层位无关,侧向运移至断层处形成圈闭(图 3)。图 3 中显示了封堵断层对油气运转移迹(流线)的影响。

其中,黑色等值线代表地层 J 顶界的起伏,而油气流线颜色由黑色至蓝色代表运移量由小至大,红色填充块为气聚集,蓝色填充块为油聚集。油气通过构造脊(A、B 和 C 附近)和封堵断层的影响(断层 F<sub>3</sub> 的 D 点附近),导致局部位置形成油气运转移迹的主通道。

运转移迹模型中也包含不整合运转移迹模型,进入圈闭后的油气充注模型、油气散失模型及其他影响聚集量的因素,只需要将这些地质模型定量化,并转化成数学模型,模拟结果就能够较为符合地质家想象,且能真实反映实际的油气运转移迹、聚集和散失的规律性。

## 2 实现方法及实际模拟结果

在实际模拟中,需要根据盆地模拟的生排烃模拟结果及盆地的一些已知资料,结合前述关于油气运转移迹规律的定量化模型,在构造史、沉积史、热史、生烃史和排烃史的基础上,由底到顶不同层位从古至今进行油气运转移迹跟踪,得到不同期不同层位的油气富集规律,从而实现了油气运转移迹过程的定量模拟。根据模拟结果能进行油气资源量评价、聚集量评价和可视化显示。其输入资料为盆地模拟结果、构造及生排烃强度及其他相关参数;输出得到不

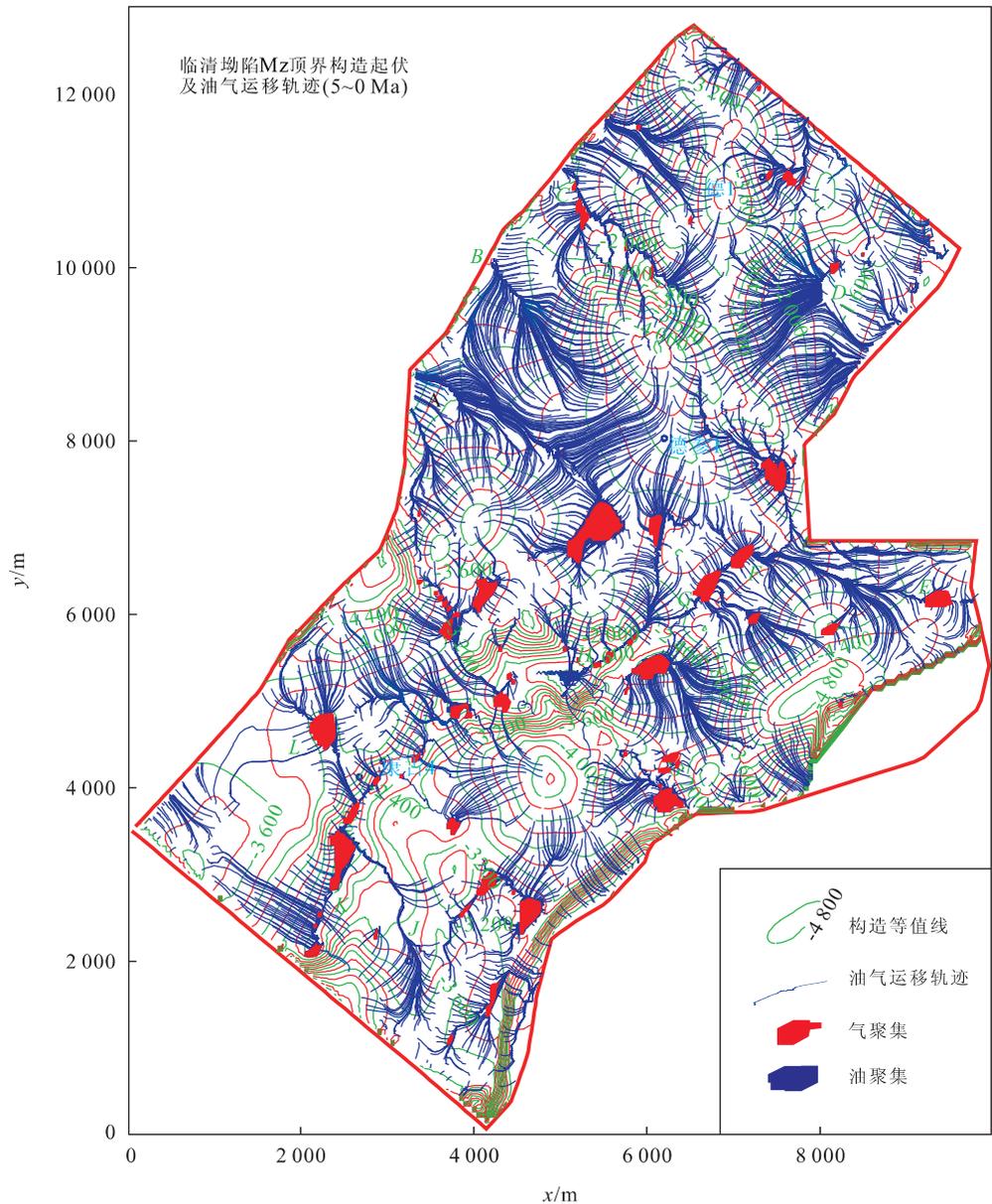


图 4 临清坳陷 Mz 顶界构造起伏和油气运移轨迹与聚集平面图

Fig. 4 Structure at the top of Mz, the flow path of hydrocarbon migration and the location of accumulations in Lin-qing depression

同阶段各层的油气运移量与聚集量分布图、油气运移的径迹。可以按阶段分地层显示区带及得到圈闭聚集量信息。它是一个模拟软件也是地质家的一个分析工具(图 4)。可以明显地看到,图中 A, B, C, D 点附近,油气运移汇聚在构造脊并在构造脊上形成主运移通道,且流向坳陷边界散失;从东部 E 点,经 F 点, G 点直至中央隆起带 H 点附近,显示了在不同高点的同一构造脊上多次成藏的特点,形成多个油气聚集点。西南角同样,南部坳陷区 J 附近,北部 L 和西部 K 局部形成主运移通道,在唐古 1 井汇聚。

可以看出,模拟结果中油气流线性地反映了油气运移聚集规律,油气运移不是“满盆”运移,而是沿着少数几个构造脊即主运移通道运移。基于此油气流线跟踪可以作定量区带甚至圈闭评价,得到各区带的油气通过量和聚集量,模拟结果是符合地质概念的。该模拟系统既是一个盆地模拟工具,同时也是地质家的一个分析研究工具,可以定性和半定量地研究盆地或区块内的油气聚集量,定性模拟和确定油气运移的主通道,为指导油气勘探提供支持。

### 3 结论

本文实现了油气运移聚集的流线模拟方法。在模拟中,充分结合了目前对油气运移、聚集和散失规律的公认的认识和理解,包括众多地质专家的理解,将这些概念模型转化成地质模型或数学模型作为知识库加入到流线模拟中,使模拟在一定条件下真实、可靠、直观。随着勘探程度的加大,新的地质情况或新认识出现,就需要对这些知识库或模型加以补充完善,并对原知识库进行更新,以符合新的情况,即为动态的模型。

本模型中有待于改进的地方是流体势的求取,需要流体势才能综合体现构造起伏和输导层内不同位置的渗透率、孔隙度以及砂泥百分比的差异。对于输导体系为非均质的情况,在构造起伏与渗透率相互“矛盾”的情况下,在沿构造脊向上的方向不是渗透率最大的方向,而其他方向才是渗透率最大的方向时油气运移方向该优先考虑哪个因素等问题还存在,这些问题都可以通过比较可靠的流体势的求取来解决,有了准确的流体势,则能正确地引导油气运移轨迹的跟踪模拟。

### References

- Luo, X. R., 2003. Review of hydrocarbon migration and accumulation dynamics. *Natural Gas Geoscience*, 14 (5): 337—346 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, N. S., Fang, J. H., 2004. Energy formula for oil migration in thermodynamic system. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29 (4): 427—432 (in Chinese with English abstract).
- Schowalter, T. T., 1979. Mechanics of secondary hydrocarbon migration and entrapment. *AAPG Bulletin*, 63(5): 723—760.
- Shi, G. R., Zhang, Q. C., 2004. Quantitative simulation of hydrocarbon migration in Kuqa depression. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(4): 391—396 (in Chinese with English abstract).
- Wu, C. L., Liu, H. B., Mao, X. P., et al., 2001. Artificial neural network simulation on hydrocarbon migration and accumulation. *Petroleum Geology Experiment*,

- 23(2): 203—212 (in Chinese with English abstract).
- Wu, C. L., Wang, X. P., He, G. Y., et al., 2000. Petroleum system and petroleum system dynamics. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 25(6): 604—611 (in Chinese with English abstract).
- Wu, C. L., Wang, X. P., Zhou, J. Y., 1997. Concepts and methods of petroleum system. *Geological Science and Technology Information*, 116(12): 43—50 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, D. Y., Li, H. H., 2000. The concept of “petroleum migration and dynamic accumulation” and its application in petroleum exploration in cratonic area. *Petroleum Exploration and Development*, 27(1): 2—12 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, D. Y., Zhou, X. X., Gu, J. Y., 1999. Reservoir forming mechanism of karst system in Ordovician weathering crust in Lunnan area. *Xinjiang Petroleum Geology*, 20(3): 199—203 (in Chinese with English abstract).

### 附中文参考文献

- 罗晓容, 2003. 油气运聚动力学研究进展及存在问题. *天然气地球科学*, 14(5): 337—346.
- 邱楠生, 方家虎, 2004. 热力作用下石油流体运移的能量方程. *地球科学——中国地质大学学报*, 29(4): 427—432.
- 石广仁, 张庆春, 2004. 库车坳陷的油气运移全定量模拟. *地球科学——中国地质大学学报*, 29(4): 391—396.
- 吴冲龙, 刘海滨, 毛小平, 等, 2001. 油气运移和聚集的人工神经网络模拟. *石油实验地质*, 23(2): 203—212.
- 吴冲龙, 王燮培, 何光玉, 等, 2000. 论油气系统与油气系统动力学. *地球科学——中国地质大学学报*, 25(6): 604—611.
- 吴冲龙, 王燮培, 毛小平, 等, 1998. 油气系统动力学的概念模型与方法原理——盆地模拟和油气成藏动力学模拟的新思路、新方法. *石油实验地质*, 20(4): 320—327.
- 吴冲龙, 王燮培, 周江羽, 1997. 含油气系统概念与研究方法. *地质科技情报*, 116(2): 43—50.
- 周东延, 李洪辉, 2000. “油气运移动态富集”概念及其在塔里木台盆区油气勘探中的应用. *石油勘探与开发*, 27(1): 2—12.
- 周东延, 周兴熙, 顾家裕, 1999. 轮南地区奥陶系风化壳岩溶系统油气成藏机制. *新疆石油地质*, 20(3): 199—203.