

文章编号: 1001-6112(2006)01-0078-05

# 油气成藏动力学模拟现状与展望

李日容<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质大学 资源学院信息所, 武汉 430074; 2. 金策工业综合大学 地质勘探系, 朝鲜 平壤)

**摘要:** 油气成藏是包括油气生成、运移、聚集以及保存和破坏各个环节在内的复杂过程, 受多种地质因素控制, 与生烃中心、古今构造、生储盖组合、沉积相带、储层岩性等要素的演化均有关系。成藏动力学系统是含油气系统理论的新发展, 是一门刚刚起步的新学科。油气成藏动力学研究有强大的计算机工作平台支持, 模型研究与模拟研究结果的迭代反馈降低了地质解释中的多解性, 是新一代的石油地质勘探研究的重要技术支撑系统。该文介绍了油气成藏动力学的产生与技术背景、原理模拟系统。最后对成藏动力学的发展提出展望。

**关键词:** 油气成藏动力学; 油气成藏机理; 油气系统; 油气成藏动力学模拟; 油气系统模拟

**中图分类号:** TE122

**文献标识码:** A

## 1 油气成藏动力学的概念

与成藏动力学有关的研究最早始于地球动力学中的流体动力学研究。1909 年 Munu 提出油气运移的水力学理论, 1954 年 Hubbert 提出流体势的概念, 1983 年 Bahlberg 提出成藏动力学概念<sup>[1]</sup>。20 世纪 80 年代以来, 随着盆地分析定量化研究和盆地模拟技术的发展, 盆地水动力数值模拟成为油气运移聚集的最主要研究手段<sup>[2,3]</sup>, 但正如吴冲龙指出的那样, 地下深处的含烃流体并非达西流体<sup>[21]</sup>, 这种研究和模拟方法一直难以奏效。

在 20 世纪 60—70 年代, 石油生成的化学动力学研究取得了重要成果。到了 20 世纪 80—90 年代, 地下流体动力场(尤其是压力场)研究则成为石油地质学研究的热点。层序地层学和地震岩性预测技术的发展, 给构筑盆地烃源体和流体输导体系格架提供了可能。计算机软、硬件的快速发展, 将实现大数据量的盆地模拟运算提高到油气运移与聚集的模拟阶段。油气系统理论<sup>[4,5]</sup>的兴起, 将石油地质学研究提高到系统论的高度, 并已经出现把含油气系统视为动态的石油生成和聚集的物理、化学系统的概念, 以及试图用化学动力学控制的生烃子系统和受物理动力学控制的运移—捕集子系统来构筑含油气系统的动力学思路。1991 年 Demaison 所阐述的含油气系统概念, 基本上是以动力学为基础、体现石油地质学发展趋势(即集成动力学研究成果)而形成的完整概念体系, 它是把油气自生成至成藏的过程作为一个完整的动力学过程进行研究<sup>[6]</sup>。

油气成藏机理的研究大体上经历了 3 个发展

阶段。

第一阶段是从 19 世纪末至 20 世纪 50 年代初。在亨特(1861)提出的早期背斜学说基础上, 建立了比较完善的油气藏形成背斜学说。在 1917 年委内瑞拉马拉开波湖玻利瓦尔油区许多巨大地层圈闭油气藏和 1930 年美国东得克萨斯大油田地层圈闭油气藏发现之后, 又产生了“非背斜圈闭理论”, 从而丰富了油气成藏理论。此后浮力、水动力和毛细管力被确定为成藏过程中影响油气运移、聚集的主控因素, 油气成藏过程被看作为动力学过程<sup>[7]</sup>。

第二阶段是从 50 年代中期至 70 年代末。在油气藏形成的基本地质条件和形成过程分析的基础上, 全面研究了油气成藏机理。干酪根降解成烃及油气初次运移理论的提出使有机地球化学在烃类生成、成熟和初次运移研究中发挥着极为重要的作用。成藏过程中油气的二次运移和聚集机理, 特别是在油气二次运移的相态、动力、阻力、运移通道、力向、距离以及运移时间和运聚效率方面也取得了很多成果, 并提出油气聚集的渗滤作用机理、排潜作用机理<sup>[1]</sup>。地层流体流动的区域样式被引入运移和聚集的水力学理论, 建立了重力穿层流动的石油运移和聚集理论, 将区域水动力场分布和演化与石油的运移和聚集有机结合起来, 油气成藏的宏观条件也得到系统认识<sup>[1]</sup>。

第三阶段是从 80 年代初至现在。随着先进的油气勘探技术和方法的发展, 以及计算机技术、物理模拟技术在油气成藏中的应用, 各种成藏条件、机制及其之间的有机配合关系得到系统研究。物理模拟和数值模拟研究油气生成化学动力学机制, 并结合

收稿日期: 2005-03-22; 修订日期: 2005-11-24。

作者简介: 李日容(1967—), 男, 朝鲜留学生, 在读博士, 主要从事资源信息系统开发研究。

油气生成和保存条件以及沉积盆地发展演化条件,通过耦合压实史、超压形成史、热史和烃类生成史方程,在重建排烃过程、油气初次运移、二次运移和聚集研究方面取得了长足进展<sup>[1]</sup>。田世澄于1996年提出了“成藏动力学系统”概念<sup>[8,9]</sup>,并根据中国东部多旋回、多油气层、多凹陷、多类型储层和复式油气聚集带的特点,提出了成藏动力学系统分类和研究方法。康永尚等于1997年提出了“油气成藏流体动力学”概念及分类<sup>[10,11]</sup>并进行了深入的理论探讨,对油气成藏机理与定量化模拟进行了探索性研究。油气成藏流体动力学是基于盆地水文地质格架、地层压力流体动力学为基础的盆地流体动力系统。“油气成藏流体动力学”与“成藏动力学系统”在许多方面是相通的,只是前者更多强调了流体动力学的内容。

## 2 油气成藏动力学系统的研究思路

成藏动力学系统是盆地内流体运动的一个客观存在的复杂天然系统,它的研究包括2个最基本部分:一是成藏的最基本条件(如油源输导系统、储层、封盖层、圈闭及成藏的动力学)研究;二是联络这些子系统的连通体系的研究。

### 2.1 康永尚等提出的成藏动力学系统<sup>[10,11]</sup>

1) 动力学系统形成的背景研究:研究盆地形成演化的动力学及运动学特征,地层和层序发育特征及时空展布。

2) 成藏动力学系统的划分研究:分析构造沉积旋回,利用测井、地震和实测压力资料计算地层孔隙流体压力和流体势,编制孔隙流体压力剖面图和流体势平面图,寻找区域分布的致密岩性层和异常高孔隙流体压力界面,从而划分成藏动力学系统;研究断层、不整合和盆地边缘岩性、岩相变化带等联络体系,建立统一的流体动力学系统。

3) 成藏动力学系统的形成条件研究:一切基本要素如源岩、储集层、封闭层等的研究。

4) 成藏动力学系统的形成演化研究:围绕生—运—聚这一线索,研究埋藏史、热史及油气生、排、运、聚史,研究联络体系的开启性和封闭性,油—源对比,分析油气成藏模式,计算聚集量。

5) 成藏作用及油气分布规律研究:动态模拟恢复盆地的演化史和成藏过程,综合各项研究成果,编制生油期、运移期、圈闭形成期配合图及综合评价图,科学地预测勘探有利靶区,优选钻探井位

### 2.2 褚庆忠等提出的成藏动力学系统<sup>[12]</sup>

1) 盆地演化的深部过程的动力学背景分析。

2) 盆地的沉积、构造演化特征和时空展布规律分析。

3) 盆地的生、储、盖、运、圈、保等成藏条件研究。

4) 研究盆地地层孔隙流体压力特征,划分成藏动力学系统,借助于测井、地震和实测压力资料计算盆地的地层孔隙流体压力和流体势,并依此作为划分成藏动力学系统的基础。

5) 进行油源对比,确定各油气层和各源层的关系,结合上述资料分析各个成藏动力学系统的成藏条件和成藏过程。

6) 进行盆地模拟,恢复盆地演化史、构造发育史、沉积史、热史、成烃史、流体压力演化史、排烃史、油气运聚史;分层、分期地研究各个成藏动力学系统的形成演化和油气藏的形成分布规律,从而优选靶区,指明勘探方向。

应当说,以上2种研究思路大同小异。油气成藏机理研究既是石油地质理论的核心问题,又是提高对油气分布预测和油气勘探部署有效性的关键所在。成藏机理研究要确定油气藏形成的时间(定时)、形成的地区(定位)和规模大小(定量)<sup>[13]</sup>。而油气分布预测要确定大规模油气运移方向(定向)、边界(定界)和勘探目标前景大小(定级)等问题<sup>[14]</sup>,但由于这些问题的复杂性和影响因素很多,研究难度大,致使油气成藏机理与油气分布预测仍为石油地质学中最为薄弱的环节,许多重大理论和实际问题尚待解决,因此严重影响了认识油气资源分布规律和预测油气藏的准确性,制约了许多盆地(或区带)的油气勘探开发进程。石油工业自产生以来,油气成藏机理研究一直是石油地质学家极为关注的课题,成藏动力学系统作为一门新学科,已在石油地质界引起广泛关注并在油气勘探中得到应用。

## 3 模拟软件和成藏模拟的发展

油气成藏动力学研究应当是定量化的,需要有信息技术的支持。油气成藏动力学模拟在欧美各国也称为油气系统模拟,它与盆地模拟的差别在于前者需要进行油气运移和聚集模拟,而后者仅进行油气生成和排放模拟<sup>[15]</sup>。早期由于缺乏专用的油气成藏动力学模拟软件,基本上是借鉴和应用盆地模拟的成果。盆地模拟是通过计算机技术把地质、地球物理、地球化学、地球热力学等学科的概念、知识和方法结合进来。首先在盆地分析的基础上建立描述和表征盆地内与油气生成、排放、运移、聚集有关的各基本地质过程的概念模型(地质模型);然后,根据概念模型的特点,用适当的物理、化学和动力学等

方程来描述相关的地质过程,即建立相应的数学模型;最后,根据盆地类型及地质特征选择合理的数值解法,确定定解条件,输入恰当的模拟参数,从时间—空间上对盆地的沉降史、有机质热演化以及油气的生成、排驱、运移、聚集过程进行历史分析和定量描述。

1978年,原西德尤利希核能研究有限公司石油与有机地球化学研究所(以下简称“德国尤利希公司”),建立了世界上第一个一维盆地模拟系统<sup>[16]</sup>。其主要内容是:通过去压实作用恢复盆地的沉积历史(埋藏史),在欠压实带通过超压方程求流体速度,为后面的热流方程的对流项计算提供参数;通过热传导和对流的热流方程求地温史,为使计算结果与实际资料符合而反复调整计算,得到最终计算结果(其中包括埋藏史);把沉积史与古温度史结合起来求 TTI 和  $R_0$ ,在  $R_0$  的基础上,用烃产率曲线求生烃量,然后进行排烃量的计算。一维模型没有涉及二次运移和聚集的模拟内容。

1984年,法国石油研究院建立了一个较完整的二维盆地模拟系统<sup>[17]</sup>。其主要内容是:输入经地质解释的测井资料和地震剖面,通过回剥技术求出埋藏史;输入地震折射数据和现今热流实测值,通过地球动力学法求出热流史;输入岩性资料和岩石热导率,通过地球热力学法和烃类成熟法求出地温史和烃类成熟度史;输入烃源岩石油潜量和岩性资料,通过两相运移法求出流体压力史和油聚集史;输入烃类各组分数据,通过地球热力学法求出沿着通道运移的含溶解气的油量。

1984年,美国南卡罗拉那大学地质科学系提出了用镜质组反射率确定古热流的方法,打破了以前单纯使用地球热力学法的传统,被认为是“最精确、最好的方法”。1988年又提出了用其它几种地化资料确定古热流的方法,扩大了该法的应用范围。1987年英国不列颠石油公司(英国 BP 公司),提出了一个关于油气二次运移聚集的二维模型<sup>[18]</sup>。其主要内容是:烃类划分为二相,即含饱和水的“石油液”和含饱和水的“石油气”,“石油气”又含不同的组分,地下的相态作为运移的重要因素;水流力和浮力的合成作为运移的驱动力;渗流机理基于达西定律;运移损失与通道的孔隙体积有关。该模型是当时公开发表的论述油气二次运移与圈闭问题的较好模型,油气运移聚集的模拟由此开始发展。

1981年,日本石油勘探有限公司勘探部(以下简称“日本石油勘探公司”),建立了一个简化的二维盆地模拟系统<sup>[19]</sup>。其主要内容是:在地质剖面上划

分出许多小矩形单元;在每个单元上恢复原始厚度,并放入沉积物;对于每个单元,随着埋藏时间和深度的增加而计算压实量、生烃量和排烃量;采用浮力法研究二次运移,估算每个单元附近存在断层和地层圈闭的可能性。日本石油勘探公司于 1987 年建立了一个改进的一维排烃模型,它完善了 1981 年盆地模拟系统的排烃部分,不仅能较好地算出排烃量,而且还可作为用尝试法重建盆地、研究重要参数的手段。该模型是当时公开发表的论述排烃数值模拟的较好模型。随后,日本石油勘探公司与美国南卡大学合作,在 1988 年又建立了一个较完整的二维盆地模拟系统。这个二维盆地模拟系统是日本石油勘探公司先前的简化二维模型和一维排烃模型的发展,其中引入并改进了德国尤利希公司的一维模型。其主要内容包括:流体运动、传热(传导和对流)、烃类生成和运移。虽然该系统的烃类生成和运移模型有一定的特色,如考虑了独立的油相或气相运移、热膨胀力、毛细管力、胶结(或溶解)的裂缝以及断层等,但在系统的全面性和实用性上仍比不上法国石油研究院的二维盆地模拟系统。

盆地模拟技术和油气成藏模拟技术的兴起,既是油气勘探、评价的需要,也是盆地分析自身由定性向定量发展的需要。随着这种仿真技术的发展,它在理论上与实践上的作用将越来越大。目前,盆地模拟所存在的问题,可归纳为<sup>[20]</sup>:缺乏盆地分析的系统观念和工作基础,对盆地地质作用系统及其各子系统的反馈控制机制重视不够,概念模型过于简化而与实际过程差别太大,数学模型单一且偏于定性等 4 个方面。解决这些问题的途径在于:引入盆地系统的概念,应用系统论、信息论和控制论(包括灰色系统控制论),具体地对模拟对象进行系统分析,建立合乎实际的各种盆地地质作用概念模型,进而转化为数学模型。在构筑数学模型时,应当按照选择论的基本原理将确定性模型与随机模型结合起来,并且在处理模糊现象和灰色系统时,尽量采用模糊数学模型和灰色系统数学模型。在这样的基础上,才有可能对盆地演化(包括构造演化、沉积演化、地热演化、流体演化、有机质演化和油气运移、聚集)及其相应的岩石圈动力学过程,有一个正确的定量认识和描述,同时也才有可能实现对盆地内的石油、天然气资源进行可靠的定量预测。

#### 4 油气成藏动力学综合模拟技术

吴冲龙等基于对盆地模拟的系统观和方法论的理解,研发出了一套三维可视化的油气成藏动力学

综合模拟系统,在基础理论和技术上都取得了许多新进展<sup>[15~17]</sup>。

该系统包括模型研究和模拟试验2部分。模型研究的任务有:根据所获得的地质资料,建立数字化的盆地构造—沉积格架,为建立三维可视化的数字盆地提供结构化模型;在数字盆地的基础上追溯油气生、排、运、聚过程,为模拟研究提供油气成藏机理和油气运移路径等控制模型。模拟试验是采用所研发的油气成藏动力学模拟系统,通过多种方法的综合运用和可视化手段,逐步逼近并再造油气生、排、运、聚的实际过程,最终得到量化的结果。

在进行成藏动力学模型研究时,首先要分析盆地演化的深部动力学条件,建立基础成藏动力学背景;分析盆地形成的动力学与运动学特征、地层层序发育及时空展布规律,了解大的动力学环境;详细解剖含油气盆地的生烃、储集、运移、聚集、保存等基本成藏地质条件,以及彼此间的配置关系,研究断层、不整合面、岩性岩相变化带等连通体系,从时空上把握油气输导体系、储集体系和封盖体系。在此基础上,详细研究地层孔隙流体压力分布及其演化规律,特别是异常压力的形成机制及其对成藏产生的动力学意义,借助于测井、地震和生产测压资料,建立流体势场;研究盆地热场及其多热源叠加演化史、有机质在多热源叠加条件下的热演化史、构造应力场和孔隙流体压力的演化史,从温度场、应力场等动力学要素的角度深入研究成藏的动力学机制和过程;通过油源对比,确定油气产层与源岩层的关系,分析成藏动力学系统的成藏过程;通过盆地模拟恢复盆地构造史、沉积史、成烃史、流体压力史、生烃史、排烃史、运聚烃史,分阶段、分层次研究各个成藏动力学系统的演化史和油气藏的形成分布规律,强调系统、整体及动态研究。

吴冲龙等<sup>[21~23]</sup>认为,由于盆地构造—沉积格架的形成演化过程和油气成藏过程充满了非线性特征,因此不可能完全依赖于经典的动力学方程,必须采用全新的思路与方法:将动力学模拟与非动力学模拟结合起来,用非动力学模拟再造油气生排运聚散过程的物质空间;将常规动力学模拟与系统动力学模拟结合起来,用系统动力学模拟描述系统整体的非线性过程;将数值模拟与人工智能模拟结合起来,用人工智能模拟解决油气运聚等局部过程的非线性问题。同时,还需要解决一系列关键技术,例如三维数字地质体的空间插值与矢量剪切技术,盆地构造史、沉降史的三维回剥与平衡技术,盆地构造应力场的动态模拟技术,多热源多阶段叠加变质作用

模拟技术,真三维的常规油气生成、排放动力学模拟技术,油气运移和聚集的人工智能模拟技术,油气成藏的系统动力学模拟技术,以及系统动态连接与集成化技术。

这些理论难题和关键技术上的突破,不仅形成了可供油气系统评价实际应用的方法体系和技术体系,而且为油气成藏动力学研究提供了一种定量化和可视化的途径。随着勘探难度的加大,特别是海上和陆内复杂区域油气勘探成本较高,迫使我们不得不对诸如油气成藏机理研究、油气系统资源潜力评价和目标评价等给予更多的关注。当然,对油气系统进行系统动力学综合是一件复杂而艰巨的工作,这方面的研究刚刚开始,还需要有更多的人去从事探索性研究。

## 5 结语

尽管成藏动力学系统作为一门日益受到人们重视的新学科已具雏形,但在该学科领域的研究中仍有许多重要议题需要进一步工作。油气成藏动力学过程与动力学机制的研究,必须在盆地演化背景下、不断变化的流体动力能量场中进行,其研究的深入有赖于对流体动力学行为及其主控因素认识的深化。目前对于达西定律能否在泥质烃源岩和致密输导层中应用,多相渗流的临界运移饱和度和有效渗透率及其测定,碳酸盐岩烃源岩的排烃机制,异常高压幕式混相排烃的定量模拟,断层开启、封闭的机制以及流体通过的定量计算,二次运移有效通道空间的确定和聚量模拟,油气运移动力学中计算构造应力,三相流体在不同介质中的运移机理及相互作用反应动力学机制等方面的讨论仍然十分热烈,许多问题还没有定论,对油气成藏动力学系统的认识还不统一,油气成藏动力学模拟技术和模拟软件也还在继续完善之中。可以预见,随着研究的深入,油气成藏动力学及其模拟技术,有可能成为盆地、凹陷和区带油气资源一体化评价的一项必备的重要技术。

### 参考文献:

- 1 刘新月,赵德力,郑 斌等. 油气成藏研究历史、现状及发展趋势[J]. 河南石油,2001,15(3):10~14
- 2 Bethke C M. American model of compaction driven ground water flow and heat transfer and its application to the paleohydrology of intracratonic sedimentary basins[J]. Journal of Geophysical Research,1985,90:6 817~6 828
- 3 Garven G. A hydrogeologic model for the formation of the giant oil sands deposits of the Western Canada sedimentary basin[J]. American Journal of Science,1989,289:105~166

- 4 Magoon L B, Dow W G. Petroleum System from source to trap [M]. Tulsa: AAPG, 1994. 655
- 5 Perrodon A. Petroleum systems models and applications [J]. Journal of Petroleum Geology, 1992, 15: 319 ~ 326
- 6 Demaison G, Huizinga B J. Genetic classification and petroleum systems [J]. AAPG Bulletin, 1991, 75: 1 626 ~ 1 643
- 7 Hubbert M K. Entrapment of petroleum under hydrodynamic condition [J]. AAPG Bulletin, 1953, 37: 1 954 ~ 2 026
- 8 田世澄. 论成藏动力学系统的划分和类型 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1997
- 9 田世澄, 毕研鹏. 论成藏动力学系统 [M]. 北京: 地震出版社, 2000. 3 ~ 9
- 10 康永尚, 郭黔杰. 论油气成藏流体动力系统 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1998, 23(3): 281 ~ 284
- 11 康永尚, 郭黔杰. 盆地流体动力系统研究——指导油气勘探的一条有效途径 [A]. 见: 中国科协第 21 次“青年科学家论坛”报告文集 [C]. 北京: 石油工业出版社, 1997. 230 ~ 235
- 12 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
- 13 傅承德. 科学技术对石油工业的作用及发展对策 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1999: 73 ~ 75
- 14 赵文智, 何登发. 中国复合含油气系统的概念及其意义 [J]. 勘探家, 2000, 5(3): 1 ~ 11
- 15 Waples D W. The Modeling of sedimentary basin and petroleum system [A]. In: Magoon L B, Dow W G, eds. The petroleum system from source to trap [M]. Tulsa: AAPG, 1994. 307 ~ 322
- 16 Yukler M A, Cornford C, Welte D H. One-dimensional model to simulate geologic, hydrodynamic and thermodynamic development of a sedimentary basin [J]. Geol Rundschau, 1978, 67: 960 ~ 979
- 17 Ungerer P, Burrus J, Doligez B. Basin evaluation by integrated two-dimensional modeling of heat transfer, fluid flow, hydrocarbon generation, and migration [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74: 309 ~ 335
- 18 England W A, Mackenzie A S, Mann D M, et al. The movement and entrapment of petroleum fluids in the subsurface [J]. Journal of the Geological Society, 1987, 144: 327 ~ 347
- 19 Nakayama K D, Siclen C V. Simulation model for petroleum exploration [J]. AAPG Bulletin, 1981, 65: 1 230 ~ 1 255
- 20 吴冲龙, 张洪年, 周江羽. 盆地模拟的系统观和方法论 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1993, 18(6): 741 ~ 747
- 21 吴冲龙, 毛小平, 王燮培等. 三维油气成藏动力学建模与软件开发 [J]. 石油实验地质, 2001, 23(3): 301 ~ 311
- 22 吴冲龙, 王燮培, 毛小平等. 油气系统动力学的概念模型与方法原理 [J]. 石油实验地质, 1998, 20(4): 319 ~ 327
- 23 吴景富, 何大伟, 吴冲龙等. 含油气盆地成藏动力学系统模拟评价方法 [J]. 中国海上油气(地质), 1999, 13(4): 240 ~ 247

## THE DEVELOPMENT AND PROSPECT IN THE SIMULATION OF PETROLEUM POOL-FORMING DYNAMICS

Li Rirong<sup>1,2</sup>

(1. Faculty of Earth Resource, China university of geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China;

2. Faculty of geological prospecting, Kimchaek university of industry, Pyongyang, D. P. R. K)

**Abstract:** Petroleum pool-forming is complicated processes that includes generating, transportation, accumulation, storage and breaking of petroleum. It is under the control of many geological factors, thus that has relation with center of hydrocarbon-generating, ancient-modern structure, petroleum bearing assemblage, belt of sedimentary facies, property of reservoir rock and its variation. The system of petroleum pool-forming dynamics is the new development of theory of petroleum system and new underway subject. The study of petroleum pool-forming dynamics is based on the support of computer workstation, alternative feedback in study of model and result of simulation reduces fuzzy property of geological interpretation. Thus it is the new supporting system of main technology in geological survey of petroleum. This paper has introduced the development, technological background, principle and simulation system of petroleum pool-forming dynamics. Lastly the prospect for the progress of petroleum accumulation dynamics is put forward.

**Key words:** pool-forming dynamics; pool-forming mechanism; petroleum system; simulation of pool-forming dynamics; simulation of petroleum system