

文章编号: 0253-9985(2009)01-0001-10

油气运聚定量模拟技术现状、问题及设想

石广仁

(中国石油天然气股份有限公司 石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要: 对于定量模拟技术的研发及应用, 首先简要讨论初次运移(排烃), 然后主要重点放在二次运移(烃类运移聚集)。关于初次运移, 建议采用简单但争议少的方法计算排烃, 其正确性由二次运移的模拟结果是否接近勘探实际来判别。关于二次运移, 目前有4种运聚定量模拟技术: 多相达西流法、流径法、混合法(多相达西流法+流径法)和侵入逾渗法。然而, 这4个技术近10年来虽然各自有了较大的改进, 但在克服各自的最大缺点问题上基本上没有突破: ①多相达西流法虽有完整的时间模拟功能, 但因受计算机资源所限而实用价值较差; ②流径法和侵入逾渗法基本上没有时间模拟功能, 即模拟对象通常仅是现今(0 Ma)的地质体, 而能在关键时间($\neq 0$ Ma)进行模拟尚在探索中; ③由于混合法的实用价值主要来源于流径法, 故严格来说混合法也基本上没有时间模拟功能。对于每一技术, 概要介绍其技术背景、技术方法和应用效果; 通过对比, 指出各自的优缺点和适用条件, 为未来研发提出改进方案。通过上述分析研究, 提出了一个具有时间模拟功能的运聚定量模拟技术方案: 在全时空的三维网格上, 采用单相(水)达西流法技术计算超压, 在数据稀少时采用流径法, 在数据密集时采用侵入逾渗法。

关键词: 达西流法; 流径法; 混合法; 侵入逾渗法; 初次运移; 二次运移; 盆地模拟

中图分类号: TE121.1 **文献标识码:** A

Status, problems and proposals of the quantitative modeling techniques for hydrocarbon migration and accumulation

Shi Guangren

(PetroChina Exploration and Development Research Institute, Beijing 100083, China)

Abstract: After a brief discussion of the development and application of quantitative modeling techniques for primary migration (hydrocarbon expulsion), and this paper focuses on the study of modeling techniques in secondary migration (hydrocarbon migration and accumulation). For primary migration, it is proposed to adopt simplified but less-debated methods for hydrocarbon expulsion calculation and verify their validity through comparing modeling results of secondary migration with real exploration data. As for secondary migration, at present there are four quantitative modeling techniques available: multi-phase Darcy flow, flowpath, hybrid method (multi-phase Darcy flow + flowpath), and invasion percolation. Though great improvements have been made in these four techniques in the past 10 years, their particular disadvantages have not been by and large overcome. Their disadvantages include (1) though the multi-phase Darcy flow has excellent ability to model various times, it cannot generally be effectively applied due to limited computer resources; (2) both flowpath and invasion percolation are basically unable to model different geologic times, i. e., usually the modeled object is only the present-day (0 Ma) geologic body, while the modeling of other geologic times ($\neq 0$ Ma) is still under research; (3) since the practical value of the hybrid method results mostly from the flowpath method, strictly speaking the hybrid method also basically has no ability to model different geologic times. Herein summarizes the background, method and application of each technique, expounds the advantages, disadvantages, and applicability of each method, and proposes a plan for their future modification and development. The paper recommends a comprehensive

收稿日期: 2008-08-31。

作者简介: 石广仁(1940—), 男, 教授级高级工程师、博士生导师, 地学定量。

hensive scheme utilizing quantitative modeling techniques with the ability to model various geologic times. It uses single-phase (water) Darcy flow for calculating overpressure in full space-time. The flowpath modeling is adopted when the data is sparse and invasion percolation is employed when the data is dense.

Key words: Darcy flow; flowpath; hybrid method; invasion percolation; primary migration; secondary migration; basin modeling

油气运聚模拟系统(也可称之为盆地模拟系统)自1978年世界上第一个一维盆地模拟系统^[1]建立以来取得了很大进展,20世纪80年代先后出现了二维盆地模拟系统^[2,3],20世纪90年代开始了三维盆地模拟系统的研发。目前作为一个完整的油气运聚模拟系统是由如下5个模型有机组成:地史模型、热史模型(含成岩史)、生烃史模型、排烃史模型(初次运移)和烃类运移聚集史模型(二次运移)。烃类运移聚集史是盆地模拟系统中最重要的一部分,也是迄今为止技术上最薄弱的环节。2000年Welte等^[4]评述了当时世界上4种运聚定量模拟技术:多相达西流法(multi-phase Darcy flow)、流径法[国外不同研发者赋予不同的称呼:flowpath或pathway或ray-tracing;本文取flowpath,译为流径法,以示与油藏模拟的类似技术streamline(译为流线法)之区别]、混合法(hybrid method)及侵入逾渗法(invasion percolation)。2009年Hantschel和Kauerauf^[5]对上述4种技术进行了详细的介绍。笔者试图通过本文进行新的评述,并对运移聚集史模型的目标进行定位,提出未来研发及应用的设想。

在油气初次运移的研究中,排烃史模型是盆地模拟和油气资源评价的非常重要的部分,其精度又直接影响后面的运移聚集史模型的精度。很多学者就此问题进行了研究,提出了不少方法,如烃类成熟度(R_o)法、降解率法、生烃量门限法、饱和度门限法及扩散法。由于难于采用试验手段来弄清复杂的排烃机理问题,上述的5类方法至今备受争议,所以有的盆模软件干脆跳过排烃计算直接由生烃量进行二次运移的模拟。笔者也认为,既然排烃量的正确性无法检验,可采用简单但争议少的方法计算排烃^[6,7],其正确性由二次运移的模拟结果是否接近勘探实际来判别^[8]。因此,本文主要研究二次运移的地质模型及技术方法。

1 油气二次运移的地质模型

关于油气二次运移的过程仍在讨论中,了解

也尚不够。但通过物理模型试验的地质研究,20多年来逐渐形成了如下7点认识:①烃源岩在盆地内的分布是较大范围的,生烃时间持续几十甚至几百个百万年;②排烃后的运移通道的分布是聚焦式的,油气沿着通道运移在时间上是脉搏式的^[9-14],导致最大烃类运移速率在局部可能是很高的;③油气运移聚集在时空上是非常小的;④借助浮力,油气在运载层和储集层内的运移总体上是沿着垂直方向^[15];⑤低渗高毛细管力的构造在足够的油气压力下可被侵入^[9,11,12];⑥随压力变化的油气密度是一个重要因素^[9];⑦扩散作用可以忽略^[9]。

上述油气二次运移的地质认识是侵入逾渗法的主要理论基础,也是流径法的部分理论基础,但不是多相达西流法的理论基础。从物理意义来看,侵入逾渗法与流径法没有明显的区别,都是认为油气二次运移是微观的、不连续的油气线串沿着优势通道的非均一的运动,且可瞬时完成,故可不考虑时间模拟功能,虽然两者技术方法的计算实现完全不同。多相达西流法是由油藏模拟技术移植改造而来,虽然其物理模型完整,但其数值解法确定了其固有特点:考虑时间模拟功能,在时间上平缓连续运行、宏观空间上网格内取近似平均值。故其地质模型是与上述的油气二次运移的地质模型不相容的。

上述认识表明,当前的油气二次运移的地质模型还存在以下几个问题尚不清楚:①假设油气是在间断的“线串”(stringer)或称“灯丝”(filament)里流动的^[14,16-18](以下取用stringer的译名“线串”),那么这些线串的形状是什么?尺寸有多大?它们能否覆盖许多微观孔隙?②脉搏式的油气流动是发生在空间的微观尺度还是宏观尺度?这种脉搏运移持续多长时间?一个线串的移动速率有多大?③油气在空间的流动模式是否都属同一类型?或者说它在宏观尺度上是否自相似(分形)?④从室内实验、岩心分析和逾渗模型所得到的观察结果支持这个分形观点,那么这样的分形行为是否也发生在宏观大尺度的岩石性质变化

上? 或者说它是否由于孔隙尺寸的随机变化通过自相似分形结构的尺度放大(upscaling) 进行演化? 这 4 个问题在侵入逾渗法的技术实践中也没有完全给予回答。

2 油气二次运移的技术方法

运移聚集史模型建立在地史、热史、生烃史和排烃史等 4 个模型的计算结果的基础上。它是盆地模拟的最重要部分, 也是油气资源评价的最重要部分, 因此石油地质家虽然关心前 4 个史, 但更注意运移聚集史的结果, 以便确定油气聚集的位置及数量, 进而预测有利勘探地带(初级目标) 和

有利钻探位置(高级目标) 。然而, 运移聚集史模拟迄今仍是技术上最薄弱的环节。在盆地模拟 30 年的发展史中, 总体上来说取得了长足的进步, 形成了上述 4 种运聚定量模拟技术, 但这 4 个技术基本上没有新的重大突破, 没有能克服各自的最大缺点。例如: ①多相达西流法虽有完整的时间模拟功能, 但因受计算机资源所限而实用价值较差; ②流径法和侵入逾渗法基本上没有时间模拟功能, 即模拟对象通常仅是现今(0 Ma) 的地质体, 而能在关键时间(某些重要地质年代, $\neq 0$ Ma) 进行模拟尚在探索中; ③混合法主要来源于流径法, 故严格来说混合法也基本上没有时间模拟功能。表 1 列出了各技术的主要功能。

表 1 4 种运聚技术的比较
Table 1 Comparisons among four migration accumulation modeling techniques

运聚技术	多相达西流法	流径法	混合法 (多相达西流法+ 流径法)	侵入逾渗法
适用条件	中等勘探程度阶段(对于二维剖面模拟); 高勘探程度阶段(对于三维模拟)	中、高勘探程度阶段; 地层几何形状不复杂; 数据可稀少	见多相达西流法与流径法的适用条件	高勘探程度阶段; 地层几何形状可复杂; 数据密集
模拟方法	油藏模拟(黑油模型或组分模型): 考虑各种力(浮力、毛细管力和粘滞力) 的总和与平衡, 描述油、气、水的“烃源—圈闭”的运动	油藏分析: 以浮力为主要驱动力, 描述油、气沿着深度等值线的法线方向进行“烃源—圈闭”的运动; 因为这是一个几何学计算, 故又称为“图基”(map based) 法	油藏模拟+ 油藏分析	线串运动: 考虑浮力与毛细管力之间的平衡, 根据侵入逾渗的物理法则, 描述油、气线串的“烃源—圈闭”的运动
解法	近似解	分析解	近似解+ 分析解	分析解
网格内的内插法	无	有	无+ 有	无
解法的收敛性及稳定性问题	有	无	有+ 无	无
模拟空间	全空间(真三维网格)	高渗空间(假三维网格)	低渗空间(真三维网格) + 高渗空间(假三维网格)	全空间(真三维网格)
区域分解	无	必需	必需	无
空间网格步长/ m	几百(粗网格, 对于三维模拟)	几—几十(细网格)	粗网格+ 细网格	几—几十(细网格)
模拟时间/ Ma	几十—几百(全时间)	现今+ 关键时间	几十—几百(全时间) + 现今+ 关键时间	现今+ 关键时间
计算时间步长/ Ma	几	几	几	几
计算机耗时量	几小时—几天(对于三维模拟)	几小时	几小时—几天(对于多相达西流法的三维模拟)	几小时
数据不确定性的交互风险分析	不能	能	不能	能
模拟结果	含烃饱和度	含烃饱和度	含烃饱和度	含烃饱和度
应用效果	实用价值较差(模型太复杂、计算太低效)	比混合法和侵入逾渗法高效; 尤其是地层几何遵循层状块体拓扑时应用效果好	比流径法和侵入逾渗法精确、应用效果好; 尤其是地层几何遵循层状块体拓扑时应用效果好	当地层几何形状复杂但高精度地震资料直接介入时比流径法和混合法应用效果好

注: 全空间——整个模拟域; 高渗空间——运载层和储集层; 低渗空间——全空间- 高渗空间; 全时间——计算是在每个时间步长进行。

2.1 多相达西流法

2.1.1 技术背景

多相达西流法(multiphase Darcy flow)的引入背景是:①单相(水)达西流法比较成功地描述了盆地内的水流动史及其相关的压实史;②油藏模拟技术(多相达西流法)比较成功地模拟了油田开发过程中油、气、水的压力史和饱和度史。由此启发了采用油藏模拟技术进行二次运移模拟的想法,并付诸于实践。

2.1.2 技术方法

多相达西流法在上述4种技术中是技术最复杂也是采用最早的方法^[2,3,5,19~26],被称之为“全物理方法”,因为它考虑了各种力(浮力、毛细管力和粘滞力)的总和与平衡,描述油、气、水的“烃源一圈闭”的运动;它又曾被誉“主力技术”^[4]。它采用的模拟器与油藏模拟完全相同(多数为黑油模型,个别甚至为组分模型),只是两者的模拟条件不同。这些模型都是偏微分方程组,可借助近似解法求出油、气、水的压力史和饱和度史(对于黑油模型),并根据时间步长,考虑生烃、排烃在各个地质时间间隔的量,进行各个地质时间间隔内的运聚模拟,故是全时间模拟。模拟在全时空(全空间+全时间)及粗网格上运行,计算机耗时量巨大。近似解法的复杂性不仅体现在数学问题上,而且还存在计算中必须解决的收敛性及稳定性问题。故采用多相达西流法和混合法要比采用流径法和侵入逾渗法复杂得多。

2.1.3 应用效果

从理论上来看,三维技术能够在全时空管理二次运移的各种所需过程。但是,即使在引入并行算法的条件下,如果像在油藏模拟常用的细网格(几至几十米)上运行三维技术,估计将耗费巨大机时(几至几十天);这是估计时间,实际上由于计算机资源有限而不能运行。所以,三维技术只能在粗网格上运行(表1),这导致不可能获得像油藏模拟要求的拟合率(一般为80%),所以实用价值较差(模型太复杂,计算太低效)。

2.1.4 改进意见

油藏模拟在储集层内进行,而二次运移在运

载层和储集层内进行,这是两者在模拟空间尺寸上的显著区别。储集层只占盆地的很小部分;运载层占盆地的一部分,而运载层中二次运移有效通道只占很小部分(例如,歧口凹陷为0.12%~12.57%^[27])。所以,盆地流体运动的主要形式是水的流动。据此,改进的方案是:整个盆地内采用单相(水)达西流法,而只在运载层和储集层内采用多相达西流法。这样,计算机的开销(容量和机时)可降低到原来的几分之一。

2.2 流径法

2.2.1 技术背景

流径法(flow path)的引入背景是:①多相达西流法的实用价值较差,致使寻求另一种模拟技术;②为了解决多相达西流法耗时量大的问题,采用耗时量小的类似于流线法的流径法;③可借鉴油藏模拟及油藏描述较成功的地质建模技术(比盆地模拟精细得多),可为流径法进行二次运移模拟建立地质数据环境,所以流径法又称为油藏分析;④上述物理模型(7点认识)为建立流径法提供了油气运移的部分理论基础。

2.2.2 技术方法

流径法是继多相达西流法之后的第二个方法^[5,14,15,23,28~33],实际应用较广。该技术类似于油藏模拟的流线法,但两者的模拟条件不同。它与多相达西流法不同的是:其基本模拟器以浮力为主要驱动力,并假设毛细管力已超过门限;采用的几个方程(含达西公式)都借助分析解法计算;在高渗空间、现今、关键时间及细网格上运行,计算机耗时量小。它与油藏模拟的流线法也不同:油藏模拟的流线是根据流体势变化梯度画出,即油、气沿着流体势等值线的法线方向;而流径是根据深度变化梯度画出,即油、气沿着深度等值线的法线方向,进行“烃源一圈闭”的运动。故流径法又称为“图基”(map-based)法,并认为油、气分别具有各自的运移路径,不相互作用。流径法分如下3步进行:流径分析、流域(drainage area)分析和聚集分析。

1) 流径分析

由烃源层进入运载层的烃类向上流动直至到达盖层,然后在盖层下沿着最大的正倾角

($> 0^\circ$) 方向继续流动时, 则可画出紧靠盖层的流径; 当某点无正倾角 ($\leq 0^\circ$) 时, 则流动停止。几个不同的流径经过长距离后终止在一个圈闭内, 其烃量要累加。计算每一圈闭内烃类的高度和体积, 这时可画出圈闭与盖层的界面。在有烃类进入的网格内, 根据深度变化梯度, 使用平滑的内插法画出相邻网格烃类进入该网格后的内部流径。故即使在网格较粗的情况下, 也能表达复杂的运移模式。

2) 流域分析

运载层可分成若干个流域, 一个圈闭仅属于一个流域。关于流域、溢出点和闭合体积的实际计算也是复杂的, 这都归因于图基的复杂几何学计算。

3) 聚集分析

当烃柱压力(浮力)不超过盖层岩石的毛细管压力(即两者压差 ≤ 0) 时, 圈闭聚集量的保存没有破坏; 否则(即两者压差 > 0), 烃类就突破(break through)盖层溢出圈闭。若有几个方向(垂向、侧向)可突破时, 只选压差最大的方向进行突破。不同的封盖岩性具有不同的毛细管压力, 故这种突破与封盖岩性密切相关。

2.2.3 应用效果

该技术适用于中、高勘探程度阶段。其优点是: ①能有效地确定流域, 减少了其他模拟技术在确定边界条件时所出现的问题; ②能详细地处理复杂的充注及溢流史、弯月形高度和油藏内流体的混合, 这是其他模拟技术所不能做到的; ③在数据稀少的情况下, 可采用较粗网格; ④计算速度快, 故可进行数据不确定性的交互风险分析。其缺点是: ①物理模型不完整, 没有使用体积系统; ②因图基法的缘故, 几乎是二维概念, 不适用于地层几何形状复杂的条件(如连接几个油藏的垂向砂岩通道、可渗透断层等)。

2.2.4 改进意见

针对流径法存在的上述缺点, 改进的方案是: 在全时空的三维网格上运行, 除了考虑浮力驱动外, 还要考虑毛细管力的阻尼作用, 并借助达西公式计算运移损失量、充注量、溢流量及聚集量。此改进方案已有部分实施^[5,8]或提出^[30]。

2.3 混合法

2.3.1 技术背景

混合法(hybrid method)是指上述的多相达西流法与流径法的混合使用。其引入背景容易理解, 即克服这两种模拟技术各自的缺点, 并保持各自的优点。

2.3.2 技术方法

混合法是第三个方法^[5,23], 实际应用稍晚, 迄今只有德国 IES 公司(已属 Schlumberger 公司)研发了该技术。其思路十分清晰: 在高渗空间、现今、关键时间及细网格上运行时采用流径法; 而在低渗空间、全时间及粗网格上运行时采用多相达西流法, 这增加了在区域分解条件下的数学求解和并行计算等的难度。

2.3.3 应用效果

该技术适用于中、高勘探程度阶段。一般来说, 其应用效果比单独使用多相达西流法或流径法好些, 而且计算机耗时量比多相达西流法有所下降。其缺点是: ①计算机耗时量仍很大; ②继续保留了流径法因几何学计算引起的固有缺点(见 2.2.3)。

2.3.4 改进意见

综合上述对多相达西流法的改进意见(见 2.1.4)及对流径法的改进意见(见 2.2.4), 改进的方案是: 在全时空的三维网格上采用单相(水)达西流法技术计算超压^[34], 在此基础上进行流径法计算。该方法既克服了多相达西流法和混合法共有的致命缺点(计算机耗时量大), 又能使流径法保持原有的特点。此改进方案已有部分实施^[8]。

2.4 侵入逾渗法

2.4.1 技术背景

前述物理模型(7点认识)是侵入逾渗法(invasion percolation)引入的主要背景。而侵入逾渗法引入的次要背景是: ①多相达西流法的实用价

值较差;②流径法的应用仅限于高渗空间,且不适用于地层几何形状复杂的条件;③可借鉴油藏模拟及油藏描述较成功的地质建模技术(比盆地模拟精细得多),可为侵入逾渗法进行二次运移模拟建立地质数据环境。

2.4.2 技术方法

侵入逾渗法是第四个方法^[5, 11~13, 35~47],实际应用较晚。由于二次运移是低流速,可忽略粘滞力,这样基本模拟器就是基于考虑浮力与毛细管力之间平衡的几个方程,根据侵入逾渗的物理法则,描述油、气线串的“烃源—圈闭”的运动。侵入逾渗法与流径法一样:①是在油气互不混溶的近似假设下,认为油、气分别具有各自的运移路径,不相互作用;②可借助分析解法计算;③在现今、关键时间及细网格上运行;④考虑烃类对盖层可能发生的突破作用;⑤计算机耗时量小(但比流径法大),故可进行数据不确定性的交互风险分析。所不同的是:①流径法只在高渗空间运行,而侵入逾渗法在全空间运行,故不需要区域分解;②也包括烃类在低渗空间可能发生的突破作用。侵入逾渗法中的突破算法^[13, 35, 36, 40]与流径法中所述的一样,但使用比流径法频繁。

解决好微观实验的数据和模型与宏观盆地的数据和模型之间的等价问题,是盆地模拟的关键,也是侵入逾渗法与其他3种运聚技术的明显区别。通过侵入逾渗的宏观过程与微观方法之间的各种比较,证明尺度放大(upscaling)的效果是:①在宏观尺度上,运移可处理为线串的随机行走,运移过程中各线串之间互不连接;②在没有浮力但优势垂向运移方向有偏差(bias)^[5]时,侵入逾渗的宏观图像等价于微观图像;③在回注过程中,线串因压力而连接,在有浮力时侵入逾渗的宏观图像也等价于微观图像。

侵入逾渗法分如下4步进行:门限压力赋值、侵入、回注和停止。

1) 门限压力赋值

根据各流动单元^[48]内各向异性引起的毛细管力变化和水相超压的分布,随机地确定每个网格(以下有时将网格称为“点”)的门限压力(threshold pressure),它是有偏差的注入压力(biased entry pressure)^[5]。

2) 侵入

烃类沿着毛细管力下降的优势路径向上运移。当一个点首次被注入烃类,称该点被侵入;其中第一个侵入点就是这根线串的头。

3) 回注

若找不到毛细管力下降或相等的路径,就开始回注,回注后的烃柱压力(浮力)增大,就要检查是否产生突破。若找到一个突破点(线串加长),运移从该点按2)继续进行;若找不到一个突破点,就按侵入次序观察其最后一个突破点(当前线串的尾),检查它周围是否存在门限压力下降的点。若存在,运移就在该方向继续进行;若不存在,这个突破点就被回注,按3)继续进行。

4) 停止

当该排烃点的排烃量全部分布在这根线串上时,运移停止。必须指出,两根不同的线串出发于两个不同的排烃点,在运移中如果某一点都被它们侵入,则两根线串合一,这时合成的线串就有两个排烃点的供烃。

由于该技术不存在流径法因几何学计算引起的固有缺点(见2.2.3),因此烃柱高度和烃类运移损失的计算比流径法容易且精度高。

2.4.3 应用效果

该技术适用于高勘探程度阶段,使用像油藏模拟及油藏描述那样的较精细的地质建模技术,模拟二次运移的过程。其优点是:①在尺度上没有像流径法和混合法所受的限制,可像多相达西流法那样在全空间运行;②能满足从岩心尺度至盆地尺度范围内力平衡和流动均衡的条件。其缺点是:由于该技术研发较晚,在功能上极大多数侵入逾渗软件尚不能进行关键时间模拟。

2.4.4 改进意见

针对侵入逾渗法存在的上述缺点,改进的方案是:在高精度地震资料直接介入下有效提高地史、热史、生烃史和排烃史的恢复精度,使侵入逾渗法能进行关键时间模拟。此改进方案已有部分实施^[5]。

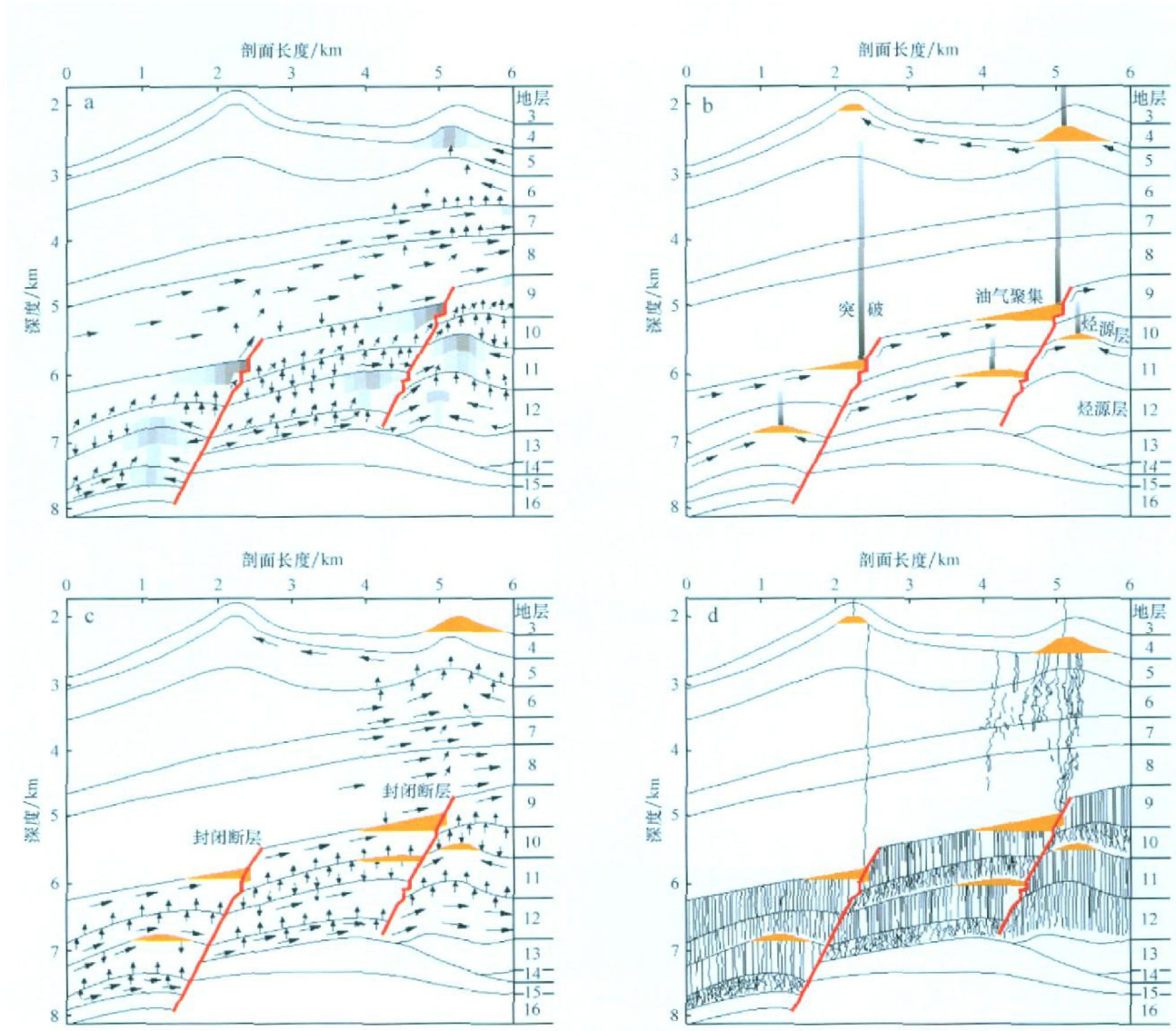
2.5 小结

在上述的4种运聚定量模拟技术中,就比较

而言,多相达西流法是最综合、最复杂及采用最早的技术,但实用价值最低;流径法是之后研发的最高效技术,当数据稀少时应用效果最好;混合法是前两个方法的混合使用,是最精确的技术,应用效果好;侵入逾渗法是最晚研发的技术,当地层几何形状复杂但高精度地震资料直接介入时,应用效果最好。

图 1 是北海油田的一个二维剖面实例(现今,即 0 Ma),展示了 4 种技术的模拟结果。虽说该图是精心计算的结果,但在一定程度上说明了上面的评述。图中地层 10 和 12 是烃源层,油气聚集主要在地层 5、9 和 11 内。通过分析发现:①流径

法、混合法和侵入逾渗法模拟的油气聚集结果相当类似,惟有多相达西流法与它们有较大区别;②流径法和侵入逾渗法的结果几乎相同,但多相达西流法和混合法没有在地层 5 的左边构造内进行油气充注,这是由于后两种技术没有模拟出可以通往该构造的油气突破通道的缘故;③在地层 5—地层 8 的右边,混合法和侵入逾渗法模拟出大范围的运移活动,但流径法却忽略了;④虽然多相达西流法模拟的油气聚集位置与其他 3 种模拟技术十分类似,但它模拟的油气聚集范围过大、饱和度过低(从不超过 40%),这是由于粗网格计算及毛细管力过大造成的。



3 油气运聚定量模拟技术的定位及改进

由图1和表1可以看出这4种技术的优缺点,从实用价值角度衡量,都基本上缺乏时间模拟功能。这表明,目前在盆地模拟系统中尚没有一个模拟功能较齐全、实用价值较好的运移聚集史模拟器。

由于每个模拟技术自身的诸多简化假设及输入数据的不确定性,二次运移模拟:①在低勘探程度阶段(即仅有很少的井),不能进行;②在中等勘探程度阶段(即有较少的井和地震覆盖),起到区带评价的作用;③在高勘探程度阶段(即有较多的井和地震覆盖),基本上还是起到区带评价的作用,只在局部可能起到圈闭评价的作用。由此可见,盆地模拟中的油气运聚定量模拟技术真正成为油气系统^[49~52]或油气成藏动力学^[53~56](烃源—圈闭)的定量手段尚需相当长时间的努力。这是笔者对运移聚集史模型的目标定位。

这里还要进一步指出4种模拟技术不同的“时间模拟”概念:①多相达西流法根据时间步长,考虑生烃、排烃在各个地质时间间隔的量,进行各个地质时间间隔内的运聚模拟,故是全时间模拟;②流径法和侵入逾渗法与多相达西流法完全不同,只考虑某一关键时间生烃、排烃的累积总量,运聚处理为在该关键时间瞬时完成的。目前的流径法尤其是侵入逾渗法的模拟器绝大多数只能计算现今,运聚技术完全没有时间模拟功能;只有极个别模拟器能在关键时间计算,运聚技术有点时间模拟功能。实际上,这两个方法能否在关键时间计算取决于该时间地史、热史、生烃史和排烃史的恢复精度。鉴于中国盆地形成演化历史及结构特征的复杂性和多变性,可将沉积盆地划分为单一型与叠合型两大类^[57,58]。对于单一型盆地,关键时间计算的难度相对小些;对于叠合型盆地,这是“多期成盆、多期改造、多套烃源岩、多次生排烃、多期运聚散”^[59],关键时间计算的难度相对较大。为了提高叠合型盆地的恢复精度,鉴于中国油气地质条件的特殊性和复杂性^[60~62],我国现有的盆地模拟系统应吸收波动分析^[59]及TSM(环境—作用—响应)系统模拟^[63]的思路和方法。

综合上述方法的优缺点,笔者提出一个具有时间模拟功能的模拟技术方案(图2)。该方案能有效提高地史、热史、生烃史和排烃史的恢复精度,能在全时空的三维网格上采用单相(水)达西流法技术计算超压、运行流径法或侵入逾渗法。其优点是:①避免使用多相达西流法和混合法,不仅计算速度快,也不受计算机资源的限制;②在数据稀少时采用流径法,在数据密集时采用侵入逾渗法。该方案具有以下6个特点(图2)。

1) 精细模拟

层序划分单元由地层(formation)改为小层(layer),且小层内的输入数据具有非均质性。

2) 全时间模拟

地质年代 t 除了包括 t_0 (盆地年龄), $t_0 - \Delta t$

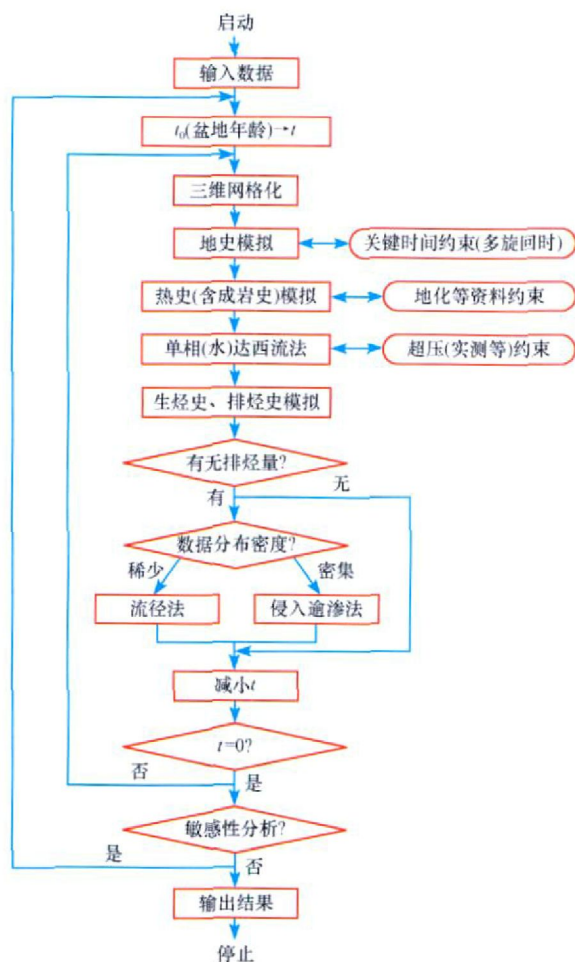


图2 一个具有时间模拟功能的油气运聚模拟系统流程图

Fig. 2 Flowchart of a hydrocarbon migration accumulation modeling system with the ability to model various geologic times

(时间步长), $t_0 - 2\Delta t, \dots, 0 \text{ Ma}$ 等外, 还包括各小层地质年龄、剥蚀及断层发生年代。对于叠合型盆地, t 又包括表示各旋回的关键时间。一般来说, Δt 可取为 1 Ma 。由于采用了单相(水)达西流, 计算速度很快, Δt 可取为小于 1 Ma (若需要的话)。

3) 三维细网格

空间网格步长可取为几至几十米, 与油藏模拟网格步长接近。由于盆地模拟的模拟空间往往不是整个盆地, 可以是坳陷、凹陷、洼陷, 甚至更小, 故此细网格化所占容量约为油藏模拟的几至几十倍, 不会超过计算机的极限。

4) 关键时间约束

多旋回时给出关键时间构造沉积的地质幕(scenarios)作为输入数据, 并作为约束条件修正地史模拟计算结果。

5) 单相(水)达西流

运行时间只有多相达西流法和混合法的百分之几, 算出的超压供流径法或侵入逾渗法使用。

6) 敏感性分析

选择那些不确定性大、又对模拟结果影响大的输入数据作为敏感性参数, 进行风险分析, 使盆地模拟由传统的确定性模型变为先进的风险性模型。

参 考 文 献

- 1 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(3): 960– 979
- 2 Nakayama K, Van Sielen D C. Simulation model for petroleum exploration[J]. *AAPG Bulletin*, 1981, 65(7): 1 230– 1 255
- 3 Ungerer P, Bessis F, Chenet P 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 35, 1984. 53– 77
- 4 Welte D H, Hantschel T, Wygrala B, et al. Aspects of petroleum migration modelling[J]. *J Geochem Expl*, 2000, 69– 70: 711– 714
- 5 Hantschel T, Kauerauf A I. *Fundamentals of basin modeling* [M]. New York: Springer-Verlag, 2009
- 6 石广仁, 张庆春. 烃源岩压实渗流排油模型[J]. *石油学报*, 2004, 25(5): 34– 37
- 7 米石云, 石广仁, 李阿梅. 有机质成气膨胀运移模型研究[J]. *石油勘探与开发*, 1994, 21(6): 35– 39
- 8 石广仁, 张庆春. 库车坳陷的油气运移全定量模拟[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2004, 29(4): 391– 396
- 9 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 of London*, 1987, 144: 327– 347
- 10 Wilkinson D. Percolation model of immiscible displacement in the presence of buoyancy forces[J]. *Physical Review A*, 1984, 30: 520– 531
- 11 Dembicki H Jr, Anderson M J. Secondary migration of oil: experiments supporting efficient movement of separate, buoyant oil phase along limited conduits[J]. *AAPG Bulletin*, 1989, 73(8): 1 018– 1 021
- 12 Catalan L, Xiaowen F, Chatzis I, et al. An experimental study of secondary oil migration[J]. *AAPG Bulletin*, 1992, 76: 638– 650
- 13 Carruthers D, Ringrose P. Secondary oil migration: oil-rock contact volumes, flow behaviour and rates[A]. In: Parnell J, ed. *Dating and duration of fluid flow and fluid-rock interaction* [C]. London: Geol Soc Spec Pub No 144, 1998. 205– 220
- 14 Sylta Ø. Hydrocarbon migration modelling and exploration risk[D]. Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology, 2004
- 15 Sylta Ø. New techniques and their application in the analysis of secondary migration[A]. In: Doré A G, ed. *Basin modelling: advances and applications*[C]. Amsterdam, Holland: NPF Spec Publ, 1993. 385– 398
- 16 Tissot B P, Welte D H. *Petroleum formation and occurrence* (2nd edition) [M]. New York: Springer-Verlag, 1984
- 17 Berg R R. Hydrocarbon leakage-fill-spill patterns in the Herimdal area[J]. *AAPG Bulletin*, 1975, 59(6): 939– 956
- 18 Schowalter T T. Mechanics of secondary hydrocarbon migration and entrapment[J]. *AAPG Bulletin*, 1979, 63(5): 723– 760
- 19 石广仁, 郭宗汾. 沉积盆地综合动态模拟系统(一)[J]. *石油物探*, 1988, 27(3): 1– 15
- 20 石广仁, 郭宗汾. 沉积盆地综合动态模拟系统(二)[J]. *石油物探*, 1988, 27(4): 29– 46, 95
- 21 Ungerer P, Burrus J, Doligez B, et al. Basin evaluation by integrated two-dimensional modeling of heat transfer, fluid flow, hydrocarbon generation, and migration[J]. *AAPG Bulletin*, 1990, 74(3): 309– 335
- 22 袁益让, 赵卫东, 程爱杰, 等. 油水运移聚集数值模拟和分析[J]. *应用数学和力学*, 1999, 20(4): 386– 392
- 23 Hantschel T, Kauerauf A I, Wygrala B. Finite element analysis and ray tracing modeling of petroleum migration[J]. *Marine & Petro Geol*, 2000, 17(7): 815– 820
- 24 袁益让, 赵卫东, 程爱杰, 等. 多层油资源运移聚集的数值模拟和实际应用[J]. *应用数学和力学*, 2002, 23(8): 827– 836
- 25 石广仁, 张庆春, 马进山, 等. 三维三相烃类二次运移模型[J]. *石油学报*, 2003, 24(2): 38– 42
- 26 李长峰, 袁益让. 三维两相渗流驱动问题迎风区域分裂显隐差分法[J]. *计算数学*, 2007, 29(2): 113– 136
- 27 李大伟, 李明诚, 王晓莲. 歧口凹陷油气聚集量模拟[J]. *石油勘探与开发*, 2006, 33(2): 167– 171

- 28 Sylta Ø Modelling of secondary migration and entrapment of a multicomponent hydrocarbon mixture using equation of state and ray-tracing modelling techniques[J]. Spec Publ Geol Soc Lon, 1991, 59: 111– 122
- 29 Ritter U, Zwach C, Sylta Ø Hydrocarbon leakage-fill-spill patterns in the Heimdal area, Viking Graben[J]. J Geochem Expl, 2000, 69– 70: 679– 683
- 30 Sylta Ø Quantifying secondary migration efficiencies[J]. Geofluids, 2002, 2: 285– 298
- 31 Sylta Ø A probabilistic approach to improved geological knowledge and reduced exploration risks using hydrocarbon migration modeling[J]. Petrol Geosc, 2004, 10: 187– 198
- 32 乔永富, 毛小平, 辛广柱. 油气运移聚集定量化模拟[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2005, 30(5): 617~ 622
- 33 石广仁, 李阿梅, 张庆春. 盆地模拟技术新进展(二)——油气运移平面分层模拟方法[J]. 石油勘探与开发, 1997, 24(4): 33~ 37
- 34 Shi Guangren. Basin modeling in the Kuqa Depression of the Tarim Basin(western China): a fully temperature-dependent model of overpressure history[J]. Mathematical Geosciences, 2008, 40(1): 47– 62
- 35 Wilkinson D, Willemsen J F. Invasion percolation: a new form of percolation theory[J]. J Phys A, 1983, 16: 3 365– 3 376
- 36 Meakin P. Invasion percolation on substrates with correlated disorder[J]. Physica A, 1991, 173(3): 305– 324
- 37 Hirsch L M, Thompson A H. Size-dependent scaling of capillary invasion including buoyancy and pore size distribution effects[J]. Phys Rev E, 1994, 50: 2 069– 2 086
- 38 Hirsch L M, Thompson A H. Minimum saturations and buoyancy in secondary migration[J]. AAPG Bulletin, 1995, 79: 696– 710
- 39 Wagner G, Birovljev A, Meakin P, et al. Fragmentation and migration of invasion percolation cluster: experiments and simulations[J]. Phys Rev E, 1997, 55: 7 015– 7 029
- 40 Carruthers D. Transport modeling of secondary oil migration using gradient-driven, invasion percolation techniques[D]. Edinburgh, UK: Heriot-Watt University, 1998
- 41 Carruthers D, de Lind van Wijngaarden M. Modelling viscous-dominated fluid transport using modified invasion percolation techniques[J]. J Geochem Expl, 2000, 69– 70: 669– 672
- 42 Meakin P, Wagner G, Vedvik A, et al. Invasion percolation and secondary migration: experiments and simulations[J]. Marine & Petro Geol, 2000, 17(7): 777– 795
- 43 Carruthers D. Modeling of secondary petroleum migration using invasion percolation techniques[A]. In: Düppenbecker S, Marzi R, eds. Multidimensional basin modeling[C]. AAPG Datapages Discovery Series, 2003, 7: 21– 37
- 44 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
- 45 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, 215
- 46 罗晓容, 喻建, 张发强, 等. 二次运移数学模型及其在鄂尔多斯盆地陇东地区长8段石油运移研究中的应用[J]. 中国科学(D辑), 2007, 37(A01): 73~ 82
- 47 周波, 金之钧, 罗晓容, 等. 油气二次运移过程中的运移效率探讨[J]. 石油学报, 2008, 29(4): 522~ 526
- 48 Stolz A K, Graves R M. Choosing the best integrated model for reservoir simulation[Z]. Paris, France: AAPG International Conference and Exhibition Extended Abstract No 99042, 2005
- 49 Magoon L B, Dow W G. The petroleum system: from source to trap[A]. AAPG Memoir 60, 1994
- 50 宋建国, 窦立荣. 中国东北区晚中生代盆地构造与含油气系统[J]. 石油学报, 1996, 17(4): 1~ 7
- 51 宋建国, 张光亚. 中国油气系统分类与勘探方向[A]. 见: 胡见义, 编. 中国含油气系统的应用与进展[C]. 北京: 石油工业出版社, 1997. 25~ 32
- 52 赵宗举. 油气系统成因分类及其勘探思路[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(1): 1~ 10
- 53 田世澄, 孙自明, 傅金华, 等. 论成藏动力学与成藏动力系统[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(2): 129~ 138
- 54 李明诚, 单秀琴, 马成华, 等. 砂岩透镜体成藏的动力学机制[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(2): 209~ 215
- 55 庞雄奇, 陈冬霞, 姜振学, 等. 隐伏砂岩透镜体成藏动力学机制与基本模式[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(2): 216~ 228
- 56 罗晓容. 油气成藏动力学研究之我见[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(2): 149~ 156
- 57 金之钧. 中国典型叠合盆地及其油气成藏研究新进展(之一)——叠合盆地划分与研究方法[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(5): 553~ 562
- 58 金之钧. 中国典型叠合盆地油气成藏研究新进展(之二)——以塔里木盆地为例[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(3): 281~ 288, 294
- 59 金之钧, 王清晨. 中国典型叠合盆地与油气成藏研究新进展——以塔里木盆地为例[J]. 中国科学(D辑), 2004, 34(A01): 1~ 12
- 60 罗志立. 试论中国油气地质条件的特殊性[J]. 勘探家, 1999, 4(2): 1~ 7
- 61 王庭斌. 天然气运移理论对我国天然气地质学建立的重要贡献[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2000, 24(4): 4~ 10
- 62 王庭斌. 天然气与石油成藏条件差异及中国气田成藏模式[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(2): 79~ 86
- 63 张渝昌, 徐旭辉, 江兴歌, 等. 展望盆地模拟[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(1): 29~ 36

(编辑 李 军)