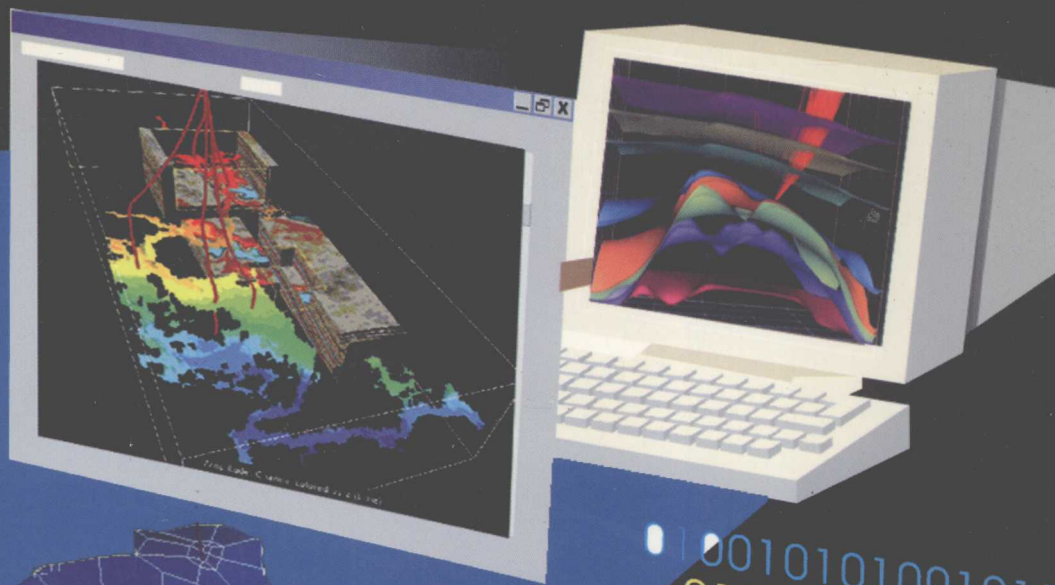




010010101001011
0100101010010
00101010010110

BASIN MODELLING PRACTICE AND PROGRESS

S.J.DUPPENBECKER J.E.ILIFFE

朱建辉 江兴歌 徐旭辉 等译

张宏逵 等校

盆地模拟实践与进展



石油工业出版社
PETROLEUM INDUSTRY PRESS

盆地模拟实践与进展

BASIN MODELLING: PRACTICE AND PROGRESS

S.J. DUPPENBECKER J.E. ILIFFE

朱建辉 江兴歌 徐旭辉 等译
张宏逵 等校

石油工业出版社

内 容 提 要

本书介绍了世界各国在盆地模拟方面的应用及其进展,对不同盆地特定的问题采用不同的分析软件和方法,显示了当前盆地模拟的水平,概述了今后应勇于探索的领域。

本书可作为地质人员和从事油气勘探的工程技术人员及相关院校师生的重要参考书。

图书在版编目(CIP)数据

盆地模拟实践与进展/S.J.DUPPENBECKER J.E.ILIFFE [英] S.J.
杜逢贝克,朱建辉等译. —北京:石油工业出版社,2005.4

书名原文:Basin Modelling: Practice and Progress

ISBN 7-5021-5033-1

I. 盆…

II. 杜…

III. 盆地-数值模拟-研究

IV. P941.75

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 022515 号

Copyright © The Geological Society 1998 This translation of Basin Modelling: Practice and Progress first published in 1998 is published by arrangement with The Geological Society.

本书经 The Geological Society 授权翻译出版,中文版权归石油工业出版社所有,侵权必究。

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.cn

总 机: (010) 64262233 发行部: (010) 64210392

经 销: 全国新华书店

印 刷: 河北天普润印刷厂印刷

2005 年 4 月第 1 版 2005 年 4 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 15.25

字数: 390 千字 印数: 1—1000 册

定价: 45.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

译者的话

自从 20 世纪 70 年代 Ojakangas 首先用计算机实现一维沉积柱的升降模拟以来,盆地数学模拟方法已经广为石油地质工作者熟悉。从以生烃史为目的的一维模拟发展到现今以油气运聚为重点的二维、三维模拟,盆地模拟已经被越来越多的勘探家们运用。

盆地模拟为石油地质家提供了一个快速、定量的综合研究手段。石油地质家们通过地质作用和油气响应各种关系的定量模拟,可以涉及石油地质领域各个方面的研究。盆地模拟结果提供了认识某个盆地(凹陷)油气资源量以及油气勘探目标预测和评价的依据。

无论是一维模型还是二维、三维模型模拟,均可称之为仿真技术。它通过将油气盆地的地质概念模型转换为数学模型,然后运用计算机技术加以实现,再现地质历史演变过程中油气的生成、排出和聚集的过程。然而地质历史的演变过程在某种程度上是无法验证的,因而正确的地质模型建立和相关的物理化学实验结果使盆地模拟结果往合理化方向发展以及为勘探风险的降低提供了有力的保障。同样,由于地质作用风格的千变万化,导致了盆地模拟实现过程中诸多参数选取的不确定性和敏感性,进而影响盆地模拟结果的有效性。本书基于这些方面的考虑收录了十数篇相关论文来阐述模型建立和参数选取方面的问题。

盆地模拟技术的发展应建立在对已有地质概念或数学模型的挑战基础上,本文收录的论文大多是从地质分析或物理化学实验模拟结果分析上对现有的模拟模型提出疑问,并列举实际模拟情况提出了修正模式。这些结果无论对某个模拟模型的阐述,还是对某个参数选取的修正都在盆地模拟的发展中起到了重要作用。

在长期盆地模拟实践中,本书译者充分认识到上述问题的重要性,深知在大多数地质历史的真相已经在盆地动态演化过程消失的今天,要完成地质现象或规律的再现,辩证综合的地质思维和数理逻辑的推理是盆地模拟模型建立的重要基础。同样,符合模型的模拟参数的合理选取是盆地模拟得到合理结果的保障。本书在孔隙度演变模型、泥岩的孔渗模型、压力模拟、复杂构造下的热场模拟以及盆地模拟结果的认识等方面均表现出新的观点和新的内容,这也是我们要将这本书译出与读者共享的理由之一。

本书由八位盆地模拟工作者利用繁忙科研工作的间隙完成了翻译初稿。我们由衷感谢卢书锷、吴心一、蒋洪堪等老专家的细心校对使得译稿得以充实和完善,特别感谢张宏逵教授在百忙之中为全部译文的修改和定稿所付出的辛勤劳动。

我们真诚地希望该书的出版能够对国内从事盆地模拟研究的同行会有所帮助。限于盆地模拟研究的视野,不能深入彻底地表达出原作者的实质内涵,请广大读者批评指正。

前 言

江兴歌 译 蒋洪堪 校

在开发之前的油气勘探是模型推动的，不论这个模型是地球科学家脑海里的想法，还是在研究了几种可能的情况之后的数字模拟的结果。在勘探前景评价中，模拟是一种降低勘探风险的有价值的方法，并且，也给利用新技术或者使用现有技术来降低风险留有一个很大的空间。

盆地模拟对勘探的影响在于风险资源的有效性，并且其可提供确定石油生成、运移和储层/圈闭形成时间的框架。目前有人认为，一个沉积盆地的地质演化过程的重建以及对这些信息的数值量化可增添模拟的价值。透彻地阐述并搞清盆地模拟如何研究一个盆地的演化过程的价值与最终数值结果是相同的。

本文集的目的是首先集中于盆地模拟方法在实际问题中的应用，分享那些已成功的和尚未成功的经验。为了遵循这一理念，不得不舍弃涉及其他主题的一些优秀文稿，对此深表遗憾。我们力求在更好地理解可能影响模拟结果的一些过程和参数与解决不同盆地所提出的特定问题的软件和方法之间保持平衡。虽然本文集的目录未能按我们所希望的那样反映出这一点，但所有的论文都将对盆地模拟的未来做出宝贵的贡献。

成为本文集首篇论文，虽谈不上值得羡慕，但 Waples 仍欣然撰写了奠定基调的“我们怎样做好盆地模拟？”一文。该文深思熟虑的分析显示了我们当今认识水平的基准面，并概述了今后应勇于探索的领域。

在过去的 20 年间，已普遍接受的盆地模拟的一些基本概念在本卷一些论文中却受到根本性的挑战。Giles 等回顾了用于计算压实作用的一些概念，他们将物理、热、化学作用融入现实情况是很有启发的。同样，Okui 等在实验室内把页岩烃源岩的排烃量转化为孔隙度和渗透率的函数，由此，他们得出了一个排烃模型，这个模型对泥质岩石更有代表性，而不是原先从储集岩推导出的通常用于临界饱和度的一些典型的特征。在实际物理作用认识方面的这些根本变化对压力、温度、成熟度及烃源岩产生的烃类相态方面的盆地模拟结果有着重要意义。

Waples 和 Couples 解开了超压形成之谜，清楚地阐明了岩石特性及敏感速率在压实过程中所发生的各种作用。Tokunaga 等将实验室中那些由速率控制的动态页岩的特性予以量化，并通过数值模拟研究了它们对物理作用的影响。有关一维和二维模拟中压力模拟的 (Drby 等) 论文继续了超压这个话题。当问题仅限于一维或二维时，Thronsdon 和 Wangen 也提出了我们对三维体认识水平的质疑，他们的三维模拟模型实例表明，把系统作为整体模拟是重要的。

在 Symington、Ho、Hegre、Schegg 和 Leu 以及 Archard 等编写的应用论文中均论证了体现勘探决策重要技术核心的真正综合多学科的重要性。Archard 等则运用多种技术来评价有着非常复杂盆地演化史背景的隆起。Schegg 和 Leu 指出，该隆起和侵蚀分析的论文对评价在挤压构造状态下的地温梯度和温度史至关重要。Archard 等与 Schegg 和 Leu 都描述了使

用多种数据集来确定相同未知参数的实用方法，并且解决了在他们的数据和技术中的不确定性。Hegre 等提供了一个引人注目的热解数据集，并显示出了一种意想不到的变化。他们的问题是在模拟中出现的典型的问题，对其中的几种可能解释都是成立的，但哪一种解释才是准确无误的呢？Symington 等则介绍了一个迄今为止堪称范例的多学科综合方法，针对来自油灶区圈闭的充填给以量化。他们分析的重要性在于验证了使用大量不同类型数据的二维和三维模拟模型的预测。

Ho 等坚持本论文集的思路，提出钻井前后成熟度预测和结果的对比研究，展示了 20 世纪 80 年代早期他们是如何做好这项研究的，即用地震速度预测他们模型的热导率，这与 20 世纪 90 年代采用更先进的软件所得的结果不相上下。他们的方法说明，模型所基于的实际地震数据内所含的信息是至关重要的。

盆地模拟并非只提供唯一答案，它允许研究一系列的地质模型、假说和最可能的选择。Thomsen 用概率统计法、Gallagher 和 Morrow 用约束热流史的数值反演技术突出了输入数据敏感性分析和不确定性识别的重要性。那么，在大多数时间里我们能做得多好呢？

本论文集清楚地表明，随着数据采集、模型建立和模拟软件等技术的共同进步，加上对岩石和流体特性的热动力学更加严格的量化和认识，模拟将得到持续发展。我们正快速步入真正的三维模型时代，那时，我们可能会发现新的相互依赖的关系、新的未揭示的不确定性——特别是围绕着流体运移以及对我们模型的新的标定。

鸣谢

编者衷心感谢本书审阅者所做的辛勤工作，我们同样想感谢因本论文集问世而使会议获得成功作出贡献的所有论文递交者。对那些为本激励卷付诸时间和精力的人们怀有一份诚挚的谢意。

目 录

我们怎样做好盆地模拟?	D.W.WAPLES	江兴歌 译	蒋洪堪 校	(1)
压实——盆地模拟中的最大未知数	M.R.GILES, S.L.INDRELID, D.M.D.JAMES	朱建辉 译	蒋洪堪 校	(18)
用一维和二维盆地模型模拟石油排驱——烃源岩的临界饱和度和相对渗透率	OKUI, R.M. SIEBRT, H. MATSUBAYASHI	谈彩萍 译	卢书锷 校	(50)
关于孔隙度减小的一些思考——岩石力学、超压和流体流动	D.W.WAPLES, G.D.COUPLES	赵永强 译	卢书锷 校	(80)
泥质岩固有渗透率的估算及其对流体长期运移的影响	T.TOKUNAGA, S.HOSOYA, H.TOSAKA, K.KOJIMA	吕剑虹 译	卢书锷 校	(90)
北海中部超压: 从一维和二维盆地模拟看流体流动	D.DRBY, R.S.HASZELDINE, G.D.COUPLES	朱建辉 译	卢书锷 校	(101)
压实、水流和温度演化的一维、二维和三维盆地模拟对比	T.THRONDSSEN, M.WANGEN	吕剑虹 译	卢书锷 校	(114)
确定北海南部地质史和热史方法的回顾	G.ARCHARD, J.STAFFORD, K.BARDWELL, M.BAGGE	朱建辉 译	吴心一 校	(121)
瑞士北阿尔卑斯前陆盆地的侵蚀事件和古地温梯度分析	R.SCHEGG, W.LEU	赵永强 译	蒋洪堪 校	(138)
一种富含有机质烃源岩的地球化学模拟——Bazhenov 组	J.A.HEGRE, J.L.PITTION, J.P.HERBIN, N.V.LOPATIN	吕剑虹 译	吴心一 校	(160)
模拟二次运移的多学科方法——以北海中部为例	W.A.SYMLINGTON, K.E.GREEN, J.HUANG, R.J.POTTORF, L.L.SUMM	周小进 译	吴心一 校	(171)
钻井前后模拟的热导率、成熟度数据与钻后结果的比较研究对盆地模拟和油气勘探的意义	T.T.Y.HO, R.P.JENSEN, S.K.SAHAI, R.H.LEADHOLM, O.SENNESETH	王宜芳 译	卢书锷 校	(185)
盆地模拟应用中的敏感性分析和科学风险	R.O.THOMSEN	朱建辉 译	蒋洪堪 校	(208)
约束沉积盆地热流史的一种新方法	K.GALLAGHER, D.W.MORROW	徐旭辉 朱建辉 译	蒋洪堪 校	(221)

我们怎样做好盆地模拟？

D.W.WAPLES

江兴歌 译 蒋洪堪 校

摘要 模型开发者们在建立适用、实用和可靠的一维模型并让勘探家们使用这些模型方面是非常成功的。开发方便、通用的软件对接受1-D模拟起到了助推作用。虽然其在技术和培训方面的缺点依然严重，但通过在某些专项领域中的几年深入细致的工作可予以解决。相反，今天，2-D和3-D流体流动模拟则在十多年来被1-D模拟占据的位置中也基本上找到了它自身位置。流体流动模拟的概念还未充分地勘探家们推荐，这主要是因为现有的软件往往不能充分满足勘探人员的实际需求。在流体流动模拟的广泛普及之前可能将不得不先开发出合适的软件。要改进现有的软件必须解决以下两大领域：(1) 让模型更全面地包含所有相关的地质现象。(2) 让软件更易于使用。

盆地模拟的总主题既包括一维模拟（常称为成熟度模拟），也包括二维和三维流体流动模拟（有时自称为盆地模拟）。这两类模拟在某种意义上像神秘的怪物 Hydra（希腊神话中的九头蛇，相传割去九头中的任何一头，立即生出两个头——译注）。在过去十年间里（特别是在过去五年间里），我们已经解决了成熟度和流体流动模拟中的一些重要问题。然而，解决了老问题后却经常冒出另外一些尚未认识但往往是同样重要的问题。本文既要论述那些成功砍掉了的头也要论述那些从老根上生出的新头。

本论述分四个部分，头两部分是论述1-D成熟度模拟的成功之处和遗留问题。其余的两部分则论述以研究压力和流体流动（特别是烃类运移）为目的而进行的2-D或3-D模拟。

成熟度模拟和流体流动模拟有一个共同的基础，即在1-D模拟和2-D模拟中所采用的生烃动力、排烃模型以及大部分地质框架是一样的。而且，除因对流或绕射引起的侧向的热传输之外，1-D和2-D模型中的热体制也是一样的。最后，2-D模拟的最优化程序强烈地依赖于1-D模型的最优化。

出于传统习惯，许多2-D模型中的技术可以用1-D模型中的实例进行充分讨论。因此，将从1-D成熟度模型开始，且只论述在1-D模拟变为多维模型产生差异时在2-D或3-D模型中出现的同样问题。

本文所表达的观点应当作为我个人的看法，而不是作为信条或绝对真理。凡我的看法似乎有正确之处，希望能促进进一步的研究和发展。而凡看来有错误之处，希望能引起讨论，最终使所有人对这些问题更清晰明了。

1 1-D成熟度模拟成果

1.1 成熟度模型的开发

Tissot 的动力学模型（1969）和 Lopatin 的 TTI 模型（1971）的开发以及后者在西方和

勘探家们中的流行 (Waples 1980) 象征着在化学和地球化学技术与地质学融为一体方面开始踏上重要的征程。对成熟度和生烃的预测能力为地质学家进行地质分析提供了新的有力工具。例如, 正确地重建剖面的埋藏史和热史方法的要求迫使地质学家把时间认为是一个动态量, 将地质史表示为从古到今的一系列的事件。

随后的成熟度模拟的应用强调了用实测数据的必要性, 如用温度和成熟度值 (例如 R_o) 来校准热演化史以提高模型预测的质量。我们第一次对热和侵蚀史的推测很可能非常不可靠 (甚至有时相当谬误), 但它是学会如何可靠地重建地质史的重要的一步。这也让我们清醒地认识到在大多数情况下我们的知识水平非常低下。

1.2 先进软件的开发

1-D 成熟度模拟中最重要的进展之一是 20 世纪 80 年代晚期开发了基于 PC 的优秀软件产品, 它可以进行快速简便的模拟, 甚至可由非专业人员操作。特别是计算机模拟允许软件很容易地执行多种方案, 这促进了敏感性分析和正确最优化地应用。基于计算机的模拟允许使用先进的算法, 而没有计算机这种算法就无法做到, 比如镜质组反射率或烃类生成的动力学模型或用热流 (热) 导率方法取代地温梯度。利用计算机及其驱动软件进行 1-D 成熟度模拟的重要性怎么估计也不算高估。

1.3 用动力学模型替代 TTI 模型

多年来, 在勘探家们中间, TTI 模型 (Lopatin, 1971; Waples, 1980) 比动力学模型更加流行, 这可能是由于以下一些因素。

- (1) TTI 方法在勘探环境中较早的推广。
- (2) 在不能用计算机和软件进行那些计算的年代里可用手工进行 TTI 模拟。
- (3) 早期 TTI 模型的输入输出越来越图形化的特点使地质学家们较易于形成概念。

然而, 尽管地质学家们因学会了将 1-D 成熟度模型用作地质评价的一个常规工具而获益匪浅, 但 TTI 方法的技术细节是不翔实的, TTI 模型使用的动力学函数的确不如动力学模型使用的函数。此外, 随着个人计算机和优秀的成熟度模拟软件的出现, 大多数使用 TTI 方法的公司不再具有任何优势。近年来, 镜质组反射率变化和烃类生成的标准动力学模型 (例如, Tissot 等, 1987; Burnham, 1989; Burnham 和 Braun, 1990; Sweeney 和 Burnham, 1990 公布的模型) 取代了 TTI 方法, 增强了我们模拟 R_o 变化和生烃的能力。当前, 强调“个性化的动力学” (稍后讨论) 有希望使动力学模型更得力更准确。

1.4 在热流 (热) 导率方法的普及中发展

随着 1-D 成熟度模拟显得越来越寻常, 从 TTI 模拟继承下来的地温梯度方法的缺点就日益凸现。在计算机化之前, 地温梯度法是必须用的, 但是, 一旦用计算机投入计算, 地温梯度法的优势几乎不存在了。实际的地温梯度通常是非线性的, 其特征不能轻而易举地用地温梯度方法获取。今天, 大多数人使用热流和热导率, 这将更逼真地模拟地质事件 (例如, 沉积、剥蚀、构造) 和温度之间实际的因果关系。

热流的使用已允许我们想方设法把热演化史和构造事件联系起来, 这是因为许多这样的事件和热流的变化相关。因而, 热流的运用是建立仿真性模型的基础, 并且, 它还具有最大限度的预测性。相反, 地温梯度不过是热流、热导率和热容之间复杂的互相作用的结果, 所

以，决不能在我们模型中作为地下温度的基本依据。

1.5 烃类的组成

迄今为止，干酪根分解的产物被简单地分为油和气，而没有清楚地说明油和气这些术语是指分子大小还是指相态（如果指相态，在什么条件下？）。最近的研究已导致了动力学机制原型模型的发展，该机制将生成物分离并裂解为几类物质。这些最常见的“组分动力学”模型是根据分子大小把烃类产物划分为四或五个组分。大多数研究者同意用几个烃类组分（尤其是按照分子大小和化合物类型来划分它们，如饱和烃对芳香烃）表示出为了预测烃类在地下的成分和相态所需要知道的组分和基于我们对干酪根及其反应的了解所希望知道的组分。

进行较复杂烃组分计算的基本数学结构已经开发出来，几类干酪根的组分动力学数据已被日常应用。详细的烃组分预测应能提供有关评价地下烃类相态的有用信息。

1.6 排烃计算的内涵

直到最近，1-D成熟度模型在计算生烃后就中止了，这样，它就没有包括排烃。然而，最近几年，大多数这样的模型开始计算排烃。这个发展是合乎逻辑的，因为成熟度模型主要描述烃源岩的特性，而排烃是发生在烃源岩中的最后阶段。包含排烃和生烃的单一模型使得生烃模拟更加方便和更加切合实际，因为对我们来说排烃量通常比生烃量更重要。

1.7 对系统最优化重要性的认识

现在，有经验的建模者认识到实测数据（例如孔隙度、地下温度、页岩的声波速度、热“指标”（比如，镜质组反射率）以及压力）在模型模拟的输入数据约束中所起的重要作用。用实测数据改进我们地质模型的过程称为“最优化”或“校准”。然而，最优化可能是缓慢而又困难的。为了使最优化尽可能地快、简易和有效，建模者遵循一定的逻辑顺序以及坚持某些准则是很重要的。

我们先用实测孔隙度数据校准孔隙度衰减函数，并用该函数建立一个合理的压实史来开始最优化的过程。然后，用实测温度和热导率（或来自于我们的样品或来自数据库）来校准基岩热导率和现今热流。接着，用实测的热“指示器”（例如镜质组反射率和（或）磷灰石裂变径迹数据）加上声波速度来校准侵蚀史（如果改变侵蚀量估计，可能需修改预先优化的孔隙度衰减函数、热导率和现今热流）。最后，我们用热“指示器”（例如镜质组反射率、磷灰石裂变径迹数据和（或）流体包裹体温度）来校准古热流。

在开发先进、可靠的模型时，认识到需要良好的最优化过程是非常重要的。如上所述，它有一个附带好处，那就是鼓励思考和理解每个模型的地质史，从而使地质学家们的经验得以丰富。

1.8 对实测校准（最优化）数据重要性的认识

如上所述，我们逐渐意识到我们对地质演化史的了解（尤其是热演化史以及侵蚀量及其时间的确定）通常相当肤浅。了解我们在这些重要领域的知识局限性的本身就是一大进步。另外，现在，我们认识到几种常见数据可用于约束或检验我们设想的地质模型。这些数据包括地表和近地表温度、从井下测井和流体测试得出的井下温度、整个热演化史的“指示器”（如镜质组反射率）、最大埋深“指示器”（如镜质组反射率、磷灰石裂变径迹数据、流体包

裹体温度和声波速度)以及瞬时温度“指示器”(如磷灰石裂变径迹数据和流体包裹体)。目前,付诸相当精力和费用来从事校准数据的积累和使用可相应提高最优化和模拟的质量,增进全面理解。

认识校准数据的必要性可激发采集这些数据的兴趣。因此,它可使校准数据质量得以改善、新数据源得以发现(例如裂变径迹数据、FAMM、声波速度)。深入细致地运用校准数据去约束模型反过来也促进了我们的地质思考,这是因为在最优化的过程中需要去查明一个与实测数据相匹配的地质历史。

1.9 增进对热“指标”的长处和缺点的了解

多年来,虽然专家们已经认识到了各种热“指标”的大部分缺点和不确定性,但以往勘探家们对待实测数据往往相当刻板,并且不加鉴别地予以使用。然而,今天,我们知道,模拟过程不仅是将计算的 R_0 值拟合实测 R_0 值,而且,还试图在拟合之前来鉴别实测 R_0 值。已认识到,如果实测值和计算值不一致,部分或全部的误差可能取决于实测数据而不是地质模型。

对所有热“指标”缺点的总的认识,加上需要可靠的热“指示器”约束热演化史进行模拟,这就导致了两方面的发展。一方面是使用多种热“指标”的趋势增强,其原因是这种方法提供了内部的检验和比较,能有助于识别有问题的数据。另一方面是近来实测数据质量有很大改进,包括诸如 FAMM(多重煤显微组分的荧光改变,例如 Wilkins 等,1992、1995)新技术的发展。虽然远谈不上完美,但今天热“指示器”比以往任何时候都更可靠。这样的进展,加上对误差可能性的意识增强,使模拟质量得以提高。

1.10 敏感性分析

模拟者们已经充分意识到有些不确定性比另外一些不确定性更重要。敏感性分析已经发展到了一定的先进程度,可以探讨一个给定模拟中哪一些不确定性最为关键。认识最大不确定源有两个好处:一是模拟者可将他或她的注意力集中于采集有助于减小最大不确定性的一些额外数据,二是模拟者可更清楚地认识模拟结果中的不确定性的大小。

1.11 向勘探家推荐 1-D 成熟度模拟

虽然,在 20 世纪 60 年代晚期(Tissot 1969),1-D 成熟度模拟的基本概念就有了,但在 70 年代,在勘探界内很少应用成熟度模拟。事后看来,Waples 1980 年发表的 TTI 方法的文章似乎象征着成熟度模拟普及的一个关键时刻。不过,80 年代早期是成熟度模拟在勘探家中缓慢成长的时期,该项技术的应用明显受到以下几个因素的限制。

(1) 缺乏对其在勘探中重要性的认识。

(2) 缺乏软件,需要手工计算。

(3) 缺乏应用该技术的勘探家“核心群体”,因而使它降为一个配角而不是成为一个主角。

(2) 和 (3) 两个因素相伴出现,许多新技术开发时就经常出现此类情况。如果大多数人拥有传真机,那令人惊叹,但如果只有少数人用,它的价值就有限了。同样,若认为每一转租价或包含 1-D 成熟度模拟输出的面积评估是正常的话,地质学家就会开展更多的成熟度模拟。

直到 80 年代中晚期, 1-D 成熟度模拟才在勘探家中普及。今天, 它是一个标准化技术并在现代勘探中扮演着一个重要角色。

毫无疑问, 1-D 成熟度模拟现在已成功地推荐给勘探家。在推荐成熟度模拟过程中, 模型开发者起了重要作用, 因为如果没有满足勘探家需要的好软件, 今天该技术将不会达到受人们青睐而且乐于日常使用它的程度。建模者在很大程度上是被动的, 但却是十分成功的推销员。他们在一个鼠标遍布的世界上建立了公认的“良性鼠标陷阱”, 而且, 这个世界已经开辟出了一条通向他们的入门之路。这些经验对于其他技术(如 2-D 流体流动模拟)的开发和推荐是重要的。

2 1-D 成熟度模拟未解决的问题

今天, 1-D 成熟度模拟已非常普及并且在勘探应用中取得很大成功。然而, 尽管近几年在技术改进以及使其更易懂实用方面取得了巨大进展, 但仍有许多重要的问题有待解决。下面将简要讨论某些最重要的问题。

2.1 实测地下温度数据的质量

Hermanrud 等 (1990、1991), 尤其是 Waples 和 Mahadir Ramly (文章正在印刷中) 曾指出, 实测地下温度数据的质量非常多变, 大多数实测值甚至在作了标准化校正之后仍颇为不适当地低估了真实(原始)地下温度。然而, 许多模拟者并没有认识到这个问题, 因此, 在重建现今温度、热演化史和成熟度时产生了较大误差。即使模拟者认识到了这些问题, 由于缺乏数据, 也常常感到正确的校正相当棘手, 甚至是不可能的。

Hermanrud 等 (1990) 试图用有关测量条件的附加信息找到一些校正方法。相反, Waples 和 Mahadir Ramly (文章正在印刷中) 则在 Malay 盆地的研究基础上提出了统计校正法。初步调研认为, 他们的统计校正法在其他地区也适用, 但还需进一步研究。

尽管误差确实存在, 中途测试和生产测试仍是最可靠的地下温度测量方法 (Hermanrud 等, 1991)。相反, 测井得出的温度是非常差的 (Hermanrud 等, 1990; Waples 和 Mahadir Ramly, 正在印刷中)。直到我们能将大多数地下温度估算建立在中途测试和生产测试基础之上, 或者直到研制出可靠方法去校正测井得出(有疑问)的温度, 目前, 大多数模拟研究中的现今地下温度将仍然不可靠。由于古温度环境的重建依赖于现今温度的正确评估, 所以, 除非准确知道现今的地下温度, 否则我们的整个热体系(对成熟度模拟至关重要)将建立在不稳定的基础上的。

2.2 地表温度

大多数工作者认为, 现今和古地表温度两者都要充分约束。平均来说, 现今空气温度的时高时低通常不超过几度, 如果知道了空气温度, 就有一些标准方法来估算水下和陆上的岩石表面的温度。

然而, 最近 Muller 等 (1998) 认为, 近表面温度可能比据平均真表面温度预期的要高得多。他们将此归结为以下两大因素的综合影响: 一是现在软件无法将近地表岩层(这里的孔隙度和热导率随深度地变化非常快)细分为可准确模拟孔隙度的足够薄的层段, 二是大多数成熟度模型没有考虑到近地表是以对流热传输过程为主的。他们相信, 用地下温度趋势外

推到地表得出的拟地表温度会更好，而不用实际的地表温度。

因这是新的想法，因而难以判断其正确性、普遍性或重要性。据我个人的经验，特别是在 Malay 盆地还没有看到这样一个结果，虽然我们所用的近表面温度数据库比 Muller 等人的要小。这个话题将在今后的研究中予以关注。

2.3 热导率

一些带有热导率的问题仍有待解决。一是准确估算孔隙度的问题，因为岩石总热导率是矿物颗粒和孔隙流体热导率的加权平均值。估算孔隙度的方法仍有点原始，尤其是在超压（欠压实）状态下。

第二个问题是如何计算平均热导率，即使准确知道了矿物（或岩性）和流体的组成。算术、几何和调和平均值都在一定条件下才适用，但许多软件的程序在所有情况下并没有使用最合适的平均方法。例如，互层岩性的平均应当不同于以均匀方式混合的同一岩性。Luo 等（1994）提出了一个令人关注的使用组构理论的方法。

第三个问题是标定。如果有取自一个地层单个样品的热导率数据，那么，用该热导率作为整个地层的热导率正确吗？怎样能将所测样品的大小按比例放大到模拟网格上？这个棘手问题今天在很大程度上还没有予以探讨。

第四个问题是缺乏一个大的、准确的和公用的不同岩性的热导率数据库。现有数据库不全而且经常自相矛盾。需要开发一个纯岩性和其他常见混合岩性的综合可靠的热导率数据库。

温度数据的质量越好，热导率数据库就越不重要，因为，如果温度已知，通常就能够作出热流和热导率的合理估算。然而，在许多模拟研究中，凡温度数据不全或不可靠的，准确预测热导率的能力就至关重要。

2.4 古热流的概念模型

今天，古热流的概念模型颇有缺陷，对裂谷盆地和夭折裂谷盆地已作了广泛研究。然而，最近新的把热流增量和地壳减薄程度联系起来的地壳变薄的概念模型（如包括脆性上部和塑性下部的双层模型）已使一些研究者假设 β 因子比先前认为的要低，因而，热流的增加要比先前认为的要少。

因为裂谷以外的盆地类型很少受到关注，它们热流史的概念模型（性能）更差。所幸的是，大多数其他型式的盆地与传导热流的大小变化无关，因而，不确定性通常也不是很大。

最后，盆地开发之前的热流模型是较差的，因为不同年代和组成的克拉通热流有很多的自然变化。似乎陆壳的年龄起着重要作用（越年轻的地壳，热流越高），但是，在任何给定的年代都可以看到热流有一个很宽的变化范围（Cull & Denham, 1979; Cull & Conley, 1983）。来自洋壳的辐射热似乎总是很小（Sclater 等 1980），相反，陆壳内产生的辐射热变化却很大，其低值与少数地区洋壳的值不相上下，但比其他地区却要高得多（Sclater 等，1980）。若不知道盆地形成事件之前的热流就难以估算任何构造引起的热流变化的大小。

2.5 对流热流

1-D 模型不能直接处理对流传热，因为许多对流运动是非垂向的。这种限制是固有的，用更好的软件也无法克服，我们只得承认。

此外,我们越来越意识到流体流动以及随之发生的对流传热在盆地热演化史中能起到重要的作用(如 Burrus 等, 1994; Deming, 1994; Hulen 等, 1994)。对流传热既能提高温度也能降低温度,这取决于运动流体的来源和温度。如果能以某种方式估算对流热通量的大小,也许就能通过把对流热流当作传热流在 1-D 模型中粗略地建立这些效应。

2.6 热“指标”

热“指标”在估计侵蚀量和优化古热流方面起关键作用,其本质是使这些“指标”准确。镜质组反射率(R_o)在以往是最重要的热“指标”,虽然,其弱点已被认识了(且很大程度上被轻视了)多年。然而,在最近压制 R_o 问题上引起了相当大的注意,原因是终于提出了一个解决办法。现在,用 FAMM 技术测量等效 R_o 值就可以纠正 R_o 的压制甚至直接取代 R_o 的测量(如 L_o , 1993; Wilkins 等, 1992、1995)。FAMM 显得实用、有效,但只有时间将告诉我们对 R_o 测量是否是一个重大改进。

其他热“指标”则令人失望得多。 T_{max} 受其干酪根类型依赖的困扰,如果这个障碍被克服,它可能很有用。生物标记最近几年声誉颇差,因为我们已经认识到妨碍作出简单解释的相效应和复杂反应的路径。裂变径迹数据难以解释而且多少有争议。从来没用得如此多的流体包裹体也许是有理的。

要有足够可靠的热“指标”放心用于模拟,将需要进行大量的研究。这个重要领域是成熟度模拟今后几年面临的主要挑战之一。

2.7 个性化的动力学

在过去几年里,出现了一种旨在获得各干酪根动力学参数供成熟度模拟之用的强劲趋势。提出基于个性化动力学的理论是因为干酪根类型多,用 I、II 和 III 型干酪根的标准动力学不能充分描述所有干酪根,特别是那些具有诸如高含硫的异乎寻常特性的干酪根。因此,通过直接测量任何理想干酪根的动力学参数应该能改进生烃模拟。

本文的篇幅不允许详细分析所有与个性化动力学有关的问题。虽然大多数实验分析似乎非常可靠,但测量本身就有一些潜在分析误差。其主要问题出在推导动力学参数的原始热解数据的数学简化上。这样得到的动力学参数与热解数据数学拟合极好,但往往在物理上是不合理的,因为这样得到的活化能和频率因子的各种组合违反了化学反应中所用的热动力学定律(Waples, 1996; 未发表的资料)。使用这些不正确的个性化动力学数据会在生烃模拟中产生较大误差(Waples & Mahadir Ramly in)。所以,今天常用的个性化动力学是后退一步,而不是向前一步。正确应用个性化动力学其前景看好,但为了用好,数据数学简化过程就必须与反应热动力学紧密联系起来。

2.8 烃类成分

如前所述,尽管出现了组分动力学原型模型,但大多数模拟者仍使用简单动力学模型,它将成熟产物分成三类:油、气和残余物。因此,为改进烃类组分的预测,需要在正确运用组分动力学方面对模拟者提供更多培训。此外,软件程序需要成为成分网络中的组成部分,因为对大多数模拟者来说,用组分动力学建立复杂反应网络的任务令人生畏且耗时。

此外,如前所述,今天,有关组分动力学的现有数据非常少,即使在有了一系列干酪根类型更多的数据时,组分动力学的价值也将是有限的。最后,为了使组分动力学体现出在简

单的油—气—残余物体系方面的明显进步，必须拥有更好的地下的排烃模型和相态模型。只有那时才能在模拟排烃中运用由组分动力学提供的详细的组分资料。

2.9 裂解动力学

多年来，烃类裂解动力学很少受到关注，因此，它应当被认为是成熟度模拟中一个薄弱领域。大多数软件编程仍使用非常简单的模型，在模型中油按某一比例（通常约 50%）裂解为气和残余物。所运用的动力学一般非常简单，经常由单一活化能组成。在我看来，在考虑热动力学约束条件时，一些常用的频率因子和活化能太低了。在许多情况下，对所有类型的油都使用了相同的动力学。

组分动力学（见上述）有望为石油裂解提供更真实的动力学参数。有些研究认为，对不同类型油的动力学裂解参数应该是不同的（Behar 等，1988）。然而，对一个油样的多次分析之间的差异可大于多个油样之间的分析差异（Behar 等，1988；Ungerer 等，1988）。最近，Kuo 和 Michael（1994）提出一个石油裂解的动力学图解，但是，看上去他们的动力学参数违反了热动力学定律，其原因或许不同于个性化干酪根动力学的情况（Waples，1996）。

最后，一些研究者（如 Price，1993）对已经认可的裂解的各种概念表示异议。他们通常认为，液态烃比已认可的动力学指出的要稳定得多，其裂解更不如大多数研究者普遍认为的重要。为解决这种争议并为烃裂解提供可靠的动力学，在该领域需要进行包括实验和理论两者在内的进一步的研究。

2.10 排烃模型

在我看来，今天，在软件中的排烃模型比目前我们知识水平所能提供的模型更不成熟。排烃模型通常可以分成五类。

（1）一些排烃模型是成熟度（如镜质组反射率）的直接函数，而与实际生烃没有任何关系。

（2）一些排烃模型是部分生烃（如转化率）的直接函数，而与生烃量无关。

（3）溢流模型（例如生烃量达到一定的极限值才发生排烃，且达到那个极限值之后所有额外的烃都被排出）。

（4）饱和模型。在该模型中，排烃量是决定烃源岩孔隙空间中烃饱和度以及烃的相对渗透率的许多因素的函数。

（5）扩散模型。在该模型中，烃通过一连续的有机网络扩散离开烃源岩。

在这些模型中，除了饱和模型和扩散模型之外都太不成熟，不被认为是机理模型，因此应尽快废弃。它们虽然能用，但总是需要用数据进行经验校准，而这种数据却往往没有。现今饱和模型在概念上似乎还算完整，但许多定量的细节仍知道得很少。目前的饱和模型存在的主要问题是：

（1）在大多数模型中只考虑两个流体相，而不是三个流体相（虽然许多研究者认为烃源岩中未必存在单独的气相）。

（2）对烃源岩的孔隙度通常知之甚少，这就给孔隙体积的计算进而给饱和度的计算带来了高度不确定性。

（3）干酪根上的烃吸附未必予以考虑。

（4）用于烃源岩的相对渗透率曲线也知之甚少，而且在许多模型中可能是不正确的。

干酪根上的烃吸附看来非常重要（如 Sandvik 和 Mercer, 1990; Sandvik 等, 1992）。需要进一步研究来解决这类问题，如：

- (1) 不同类型和不同成熟度水平的干酪根的总吸附能力。
- (2) 不同油气分子吸附能力的差异（包括分子大小和极性的影响）。

在大多数模型中，烃源岩的相对渗透率曲线是建立在与储集岩的类比之上的。然而，这些概念可能不适合于孔隙空间更小的岩石，这可能大大高估了开始排烃所需要的门限饱和度（Okui 和 Waples, 1993; Corvi, 1995）。标定问题也应该考虑：我们在模拟中必须用有机质丰度的平均值，而最有效的烃源岩的丰度可能比平均值要大，其特性可能与具有有机质丰度平均值的烃源岩明显不同。

近来，Vernik 和 Landis (1996) 的研究间接地促进了排烃扩散模型的发展，他们用测量的声波速度及其各向异性推断出干酪根网络在水平和垂直两个方向上都是连续的。如果这个结论正确，它就解决了扩散模型中的一大困难，因为许多研究者曾怀疑过在许多中等丰度的岩石中的干酪根是连续的。但是，关于这类模型还需进一步的工作。

2.11 最优化

今天，所有严肃的模拟者都意识到为完成最终模拟需要进行良好的最优化作为准备步骤。大多数模拟者都同意 1-D 最优化的基本逻辑方案：孔隙度（有时是压力）、现今温度、侵蚀、热演化史和最终压力最优化。剩余的主要问题是要确保最优化在实际上得到正确执行，因为甚至是有经验的模拟者也有可能出错或忘记某些步骤。正确设计的软件能够在最优化中给模拟者以宝贵的帮助，但是，迄今为止，软件开发并不关心在优化他们的输入数据方面给模拟者以积极帮助。

若只有一口井，最优化就相对简单；模拟者只需找到一组与可靠的实测数据尽可能一致的计算出的输入数据。其要面临的主要问题是：

- (1) 在实测数据内决定什么是真值或是目标值。
- (2) 保证所有输入值在地质、地球物理和地球化学上是合理的。

计算曲线与实测数据拟合决不当一味盲目地曲线拟合。

然而，在有多口井时，必须探讨另外一个问题。最优化必须从一口井到另一口井地协调地进行，仅仅孤立地拟合每口井是不够的；最优化中使用的输入数据必须从一口井到另一口井以地质上合理方式变化。有时候，为了使输入数据（例如穿过一个盆地的热流趋势）得到充分全面协调，不得不在某种程度上宁愿牺牲一口井的拟合质量。这种折中办法通常是有理由的，因为我们实测数据的质量经常是一般到差。然而，模拟者应当小心不要殃及他们确实相信的数据。

本人希望在不久的将来软件设计者将更加重视最优化。最优化的辅助手段可以以下列的一种或多种形式包含在软件中。

- (1) 提供一个清单，使模拟者不会因疏忽而忘记一个最优化步骤或脱离正确指令执行这些步骤。

- (2) 提供半自动最优化，以此在模拟者预选的一系列似乎可信的数值内为某一参数找到一个最佳值。

- (3) 进行全自动最优化。

就我个人而言，本人推荐选项（2）。选项（1）对软件开发来说非常容易将其列入，

但其价值有限。选项(3)很吸引人,不会得出数学上正确但科学上不合理的解,即使模拟者在这里提供一些准则。然而,选项(3)可能会使模拟者失去亲自执行最优化时所得到的许多无形的好处。选项(2)将减轻模拟者在优化每一个参数中数字捣弄的负担,而且,允许他们在每一个变量优化之后进行干预。因此,它们将保留手工优化过程的大部分优点。

2.12 模型的结构:耦合还是模块化?

某一些1-D成熟度模型用完全耦合模式进行计算,而其他模型则用模块化结构。全耦合模型依据的理论实际上是所有过程都是耦合的,必须将所有可能的反馈关系在每一步计算中予以考虑以得到最准确的答案。相反,模块化模型依据的哲理是这些反馈关系的大部分并非很重要,实际上可以忽略。这样的简化使模拟过程快多了。

耦合模型还是模块化模型的问题大大超出纯理论范畴,包括2-D模拟的许多细节问题。模块化系统更适合于最优化,这是因为模拟比较快(最优化需要用试错法多次运行),也因为在一个设计良好的模块化系统中,任何未受到输入参数(如在最优化期间)特殊变化所影响的模块不进行重新计算,这使得时间进一步节省。

这两种模型都不是完美的,因而对于业界而言,不需要对1-D模拟最终确定这一种还是那一种模型,不过,每一种模型的长处是否值得牺牲倒是值得三思而行的。对2-D模拟中的这些问题的细节将在下面讨论。

2.13 模拟者的培训

利用现代软件进行1-D成熟度模拟是容易的,但把它执行好却非常困难。模拟者必须掌握最优化的艺术,最优化本身需要其懂得地下温度、孔隙度减小、热“指标”、岩石物性,尤其是热流的理论模型。也必须熟悉与干酪根类型、烃类生成和破坏有关的动力学以及排烃等有关的各种问题。掌握这些不同学科不是轻而易举的,如果他正想自学,更是如此。

因此,为模拟者制订良好的培训计划很重要,这将给他们指出在模拟中,尤其是在最优化中的正确途径和方法。这样的课程必须包括理论以及动手实践。此外,这样的培训还应对候选模拟者的考查。虽然这个想法可能看起来有些自命不凡,但我相信这种模拟者的证书考试将大大改善模拟质量,也将使这项技术免于滥用。

2.14 敏感性分析

虽然,敏感性分析的基本原理对于有经验的模拟者来说是众所周知的,但许多临时用户对其概念并不熟悉。况且,即使有经验的模拟者也常常不进行透彻的敏感性分析。今后,在进行常规敏感性分析上需要下更大功夫。

3 流体流动模拟成果

技术成果包括:

- (1) 建立2-D和3-D模型,显示出一相、二相甚至三相的流体流动。
- (2) 在某些模型中应包含通过用户指定断层的流体流动。
- (3) 通过运动流体或热导率变化显示非垂向热传输的能力。
- (4) 构造和地层两种圈闭捕获流体的能力。