

# 盆地模拟原理方法

郭秋麟 米石云 石广仁  
张庆春 杨秋琳 李阿梅 编著



石油工业出版社

# 盆地模拟原理方法

郭秋麟 米石云 石广仁 编著  
张庆春 杨秋琳 李阿梅

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书基于作者多年来在盆地模拟方法研究、软件开发、技术培训、软件推广与应用过程中的工作总结与研究成果,结合近年来国内外最新研究成果与动态,系统地阐述了盆地模拟的基本原理,深入地探讨了盆地数值模拟的各种方法与技术,强调了对新方法、新技术的分析与研究。其特点是以原理方法为基础,以方法实现、模拟过程为目的,将原理方法—方法实现—模拟过程有机地融为一体。本书的出版可推动含油气盆地研究朝着系统化、动态化、量化及综合性方向的进一步发展。

本书适合于从事油气勘探、盆地分析、盆地模拟研究的科研人员以及石油、地质院校相关专业的师生阅读参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

盆地模拟原理方法/郭秋麟等编著.

北京:石油工业出版社,1998.7

ISBN 7-5021-2349-0

I. 盆…

II. 郭…

III. 盆地—数值模拟

IV. P941.75

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 18254 号

石油工业出版社

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

河北省徐水县激光照排厂排版

北京密云华都印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

\*

787×1092 毫米 16 开本 12 印张 270 千字 印 1-1000

1998 年 7 月北京第 1 版 1998 年 7 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-2349-0/TE·1960

定价:26.00 元

# 前 言

盆地模拟是提高油气发现率的一种现代技术，也是拓展油气勘探思维的一种研究方法；它既能快速地验证地质概念和地质观点，也能有效地促进多学科的综合研究。盆地模拟是油气地质工作者对含油气盆地进行系统、定量、动态和综合研究的技术保证。在我国，盆地模拟已被列为油气勘探的三大技术方法之一，也是井位综合论证必须使用的技术之一。可见，盆地模拟在油气勘探中发挥着极为重要的作用。

近年来，随着石油地质理论的不完善，特别是计算机技术的高速发展，盆地模拟在方法研究与技术更新方面有了较大的进展，其软件系统亦得到了广泛的应用。目前，越来越多的石油地质工作者正在从事盆地模拟研究方面的工作，因而急需补充和更新有关这方面的知识。然而，国内有关这方面的专著还很少，而系统地、全面地介绍盆地模拟原理方法的专著就更少。这在一定程度上阻碍了我国油气勘探的进一步发展。本书基于作者多年来在盆地模拟方法研究、软件开发、技术培训、软件推广与应用过程中的工作总结与研究成果，结合近年来国内外最新研究成果与动态，系统地阐述了盆地模拟的基本原理，深入地探讨了盆地数值模拟的各种方法与技术，强调了对新方法、新技术的分析与研究。其特点是以原理方法为基础，以方法实现、模拟过程为目的，将原理方法—方法实现—模拟过程有机地融为一体。因此，本书弥补了以往著作中原理与方法、方法与实现过程之间相互脱节的不足。

本书由绪论和七个章节构成。绪论介绍了盆地模拟的作用、内涵、发展动向，重点介绍研究内容和方法。第一、二章论述了沉降史、埋藏史和构造演化史的研究方法与定量恢复技术，重点介绍分段回剥技术、地壳均衡补偿作用模型、平衡剖面技术方法以及古水深和剥蚀厚度的恢复方法。这些技术方法是全方位地重建地史的技术支持。第三章在系统地介绍地温场特征的基础上，重点论述热史重建的各种技术方法，包括构造热演化法、Easy% R。法、磷灰石裂变径迹法和结合法。它们是正演和反演模拟热史、有机质成熟度史的最重要的技术方法。第四章介绍了多组分初次裂解的化学动力学学生烃模型，论述了应用岩石热解仪评价结果和热压模拟结果计算生烃史的方法与过程。第五章在分析油气初次运移机理的基础上，论述了排烃史的各种计算方法与模型。第六章从流体势分析和数值模拟两方面论述了油气二次运移、聚集的研究方法。在数值模拟方面重点介绍如何建立油气运移通道模型、油气散失模型及其它地质概念模型，并详细地介绍了数值计算模型的建立过程。第七章介绍含油气系统的概念、描述内容、研究方法 & 资源潜量计算过程，强调含油气系统与盆地模拟的结合，提出应按照含油气系统的分析思路对盆地模拟结果进行综合分析 & 评价。

参加本书研究工作的人员有石油勘探开发研究院盆地模拟室的郭秋麟、米石云、石广仁、张庆春、杨秋琳、李阿梅、王晓红、万仑坤和闫印强。本书主要由郭秋麟执笔，米石云、石广仁、张庆春、杨秋琳、李阿梅、王晓红等编写了部分内容，张庆春、米石云负责审阅 & 校对文稿，石广仁校对了部分数学公式，闫印强整理了部分图

件。本书在编著与出版过程中得到了中国石油天然气总公司勘探局高瑞祺局长、赵化昆总工程师、郭黔杰处长等领导的指导与支持，还得到了石油勘探开发研究院地质所陈增智博士、计算所岳惠敏高级工程师的帮助。作者在此一并表示衷心的感谢。由于水平有限，时间仓促，不妥之处，敬请指正。

**作者**

1998.05.17

# 目 录

|                       |      |
|-----------------------|------|
| 绪 论                   | (1)  |
| 第一章 埋藏史               | (8)  |
| 第一节 压实作用与孔隙度变化规律      | (8)  |
| 一、压实作用                | (8)  |
| 二、孔隙度变化规律             | (11) |
| 第二节 地层压力              | (16) |
| 一、压力的概念               | (16) |
| 二、异常地层压力              | (17) |
| 第三节 埋藏史恢复             | (19) |
| 一、概述                  | (19) |
| 二、分段回剥技术              | (21) |
| 三、超压技术                | (27) |
| 四、回剥与超压相结合的技术         | (33) |
| 第四节 剥蚀厚度恢复            | (35) |
| 一、大于现今盖层厚度的剥蚀厚度恢复     | (35) |
| 二、剥蚀范围较小的角度不整合        | (36) |
| 第二章 沉降史与构造演化史         | (39) |
| 第一节 沉降史恢复             | (39) |
| 一、Mckenzie 的纯剪切模型     | (39) |
| 二、地壳和岩石圈均衡补偿作用引起的沉降   | (41) |
| 三、主要参数的求取             | (44) |
| 第二节 构造演化史恢复——平衡剖面技术概述 | (48) |
| 一、平衡剖面技术发展及现状         | (48) |
| 二、平衡剖面在地质研究中的作用       | (49) |
| 三、平衡剖面基本原理            | (49) |
| 第三节 挤压地区构造变形复原        | (50) |
| 一、挤压地区构造变形几何模型        | (50) |
| 二、剖面压缩量与滑脱面深度的计算      | (53) |
| 三、挤压地区构造变形复原          | (54) |
| 第四节 伸展地区构造演化史恢复       | (58) |
| 一、铲状正断层构造变形几何模型       | (59) |
| 二、拉张量和滑脱面深度的计算        | (60) |
| 三、构造演化史恢复             | (60) |
| 第三章 地温场与热史            | (66) |

|                                   |              |
|-----------------------------------|--------------|
| 第一节 地温场 .....                     | (66)         |
| 一、地温场热源 .....                     | (66)         |
| 二、地温场的形成机制 .....                  | (67)         |
| 三、地温场 .....                       | (69)         |
| 四、中国地温场特征 .....                   | (74)         |
| 第二节 热史恢复 .....                    | (74)         |
| 一、构造热演化法 .....                    | (75)         |
| 二、古温标法 .....                      | (77)         |
| 三、结合法 .....                       | (88)         |
| <b>第四章 生烃史 .....</b>              | <b>(93)</b>  |
| 第一节 化学动力学法 .....                  | (93)         |
| 一、多组分初次裂解的基本原理 .....              | (94)         |
| 二、多组分初次裂解的生烃模型 .....              | (96)         |
| 第二节 热解模拟法 .....                   | (98)         |
| 一、应用 Rock-Eval 热解仪评价结果计算生烃史 ..... | (98)         |
| 二、应用热压模拟结果计算生烃史 .....             | (102)        |
| 第三节 碳恢复系数与总有机碳的求取方法 .....         | (104)        |
| 一、碳恢复系数的求取 .....                  | (104)        |
| 二、利用测井技术求总有机碳 .....               | (105)        |
| <b>第五章 排烃史 .....</b>              | <b>(110)</b> |
| 第一节 初次运移的机理 .....                 | (110)        |
| 一、石油初次运移的相态 .....                 | (111)        |
| 二、石油初次运移的动力 .....                 | (113)        |
| 第二节 排油史计算 .....                   | (113)        |
| 一、运移临界饱和度 .....                   | (113)        |
| 二、排油史计算 .....                     | (114)        |
| 第三节 排气史计算 .....                   | (119)        |
| 一、天然气物质平衡运移原理 .....               | (119)        |
| 二、排气史计算模型 .....                   | (123)        |
| <b>第六章 油气二次运移聚集史分析 .....</b>      | <b>(126)</b> |
| 第一节 盆地水动力类型与流体势分析 .....           | (126)        |
| 一、盆地水动力类型及其特征 .....               | (126)        |
| 二、盆地水动力类型的演化 .....                | (127)        |
| 三、流体势分析 .....                     | (131)        |
| 第二节 二次运移机理 .....                  | (135)        |
| 一、二次运移的相态 .....                   | (136)        |
| 二、二次运移的动力 .....                   | (136)        |
| 三、二次运移的阻力 .....                   | (138)        |
| 四、二次运移的实验分析 .....                 | (139)        |

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| 第三节 地质模型及数值模型·····        | (140) |
| 一、二次运移通道模型·····           | (140) |
| 二、二次运移散失量模型·····          | (145) |
| 三、地质概念模型·····             | (148) |
| 四、数值计算模型·····             | (151) |
| 第七章 含油气系统分析·····          | (158) |
| 第一节 含油气系统概述·····          | (158) |
| 一、含油气系统的进展·····           | (158) |
| 二、含油气系统的定义、定位与命名·····     | (159) |
| 三、含油气系统的分类·····           | (160) |
| 第二节 含油气系统的描述内容·····       | (162) |
| 一、静态地质要素的描述·····          | (162) |
| 二、动态地质作用的描述·····          | (163) |
| 三、关键时刻与事件组合图·····         | (164) |
| 第三节 含油气系统的研究方法与技术·····    | (168) |
| 一、与地质要素有关的部分方法与技术·····    | (169) |
| 二、与地质作用有关的部分方法与技术·····    | (169) |
| 第四节 含油气系统资源潜量计算·····      | (170) |
| 一、含油气系统供油气量计算·····        | (170) |
| 二、运载层中的残留油量计算·····        | (171) |
| 三、运载层中吸附气量计算·····         | (172) |
| 四、气在储集层中溶解量计算·····        | (172) |
| 五、储集层中扩散气量计算·····         | (173) |
| 六、利用平衡方程计算含油气系统油气聚集量····· | (173) |
| 参考文献·····                 | (175) |

# 绪 论

盆地是油气形成与赋存的基本地质单元，一切油气事件都发生在盆地发展、演化的历史过程中。油气成藏事件是一种复杂的地质过程，事件的发生依赖于盆地的演化背景，依赖于地质要素、作用及其之间的相互关系。换言之，油气成藏过程遵循盆地演化的动力学规律。由于地质过程的多变性、复杂性，不同盆地的演化过程往往是千差万别的，因而这种成藏规律常常是难以把握的。为了揭示这种规律，认清成藏机理，预测油气分布，盆地研究就必须依从以下四个原则：

(1) 系统原则：盆地内各种控制油气成藏过程的地质要素和作用，都是在盆地这个基本地质单元之内进行的。这些地质要素和作用往往是彼此影响、相互制约，构成一个十分庞大的、具有内在联系的系统。要认清这个系统，只有应用系统工程原理，从盆地的整体出发，研究盆地的全貌，进而研究其局部，才能最终揭示油气赋存与分布规律。

(2) 动态原则：盆地自形成伊始就不断地发展、演化，其中油气从生成到运移、聚集的时空演变过程与盆地的动态演化密切相关。只有用动态的观点去研究盆地的演化史（沉降史、埋藏史、构造发育史、受热史、油气运移和聚集史等），才能正确地认识成藏机理，科学地预测油气分布。

(3) 定量原则：油气成藏过程中有许多事件和参数需要用准确的数值来描述，如：油气生成—运移—聚集的关键时刻、圈闭形成时间、油气生成量、排出量、运移过程中的散失量以及最终的聚集量等，它们都是研究油气成藏过程必不可少的参数。长期以来，由于受测试手段、计算技术和地质理论等条件的限制，盆地研究只能进行定性或半定量的描述，因而大大地影响了对油气成藏机理及油气分布规律的认识。计算机技术、测试技术与地质理论的发展，为盆地定量研究提供了保证。

(4) 综合原则：油气成藏过程是地质要素、作用及其相互关系的综合作用结果，孤立地强调或突出某一方面而忽略任何其它方面，都不能很好地揭示油气成藏与分布的内在规律。地质要素和地质作用只是成藏条件的两个必要方面，是否有效成藏还取决于它们之间的匹配关系。当匹配有效时，就能成藏；反之，匹配不好，则不能形成有效的油气藏。

盆地模拟是按照上述四个原则进行盆地研究的技术保证，离开了盆地模拟技术，盆地研究就无法真正做到综合、系统及动态化、量化。

## 一、盆地模拟的内涵

盆地模拟 (basin modeling)，简言之，就是应用系统工程原理，应用数、理、化定理，定量模拟盆地形成演化及油气事件发生、发展的动态过程。作为解决地质问题的一种手段或工具，盆地模拟是一种技术；作为解决地质问题的一种思维或方式，盆地模拟是一种研究方法。

对一个盆地进行模拟时，一般要经过如下过程：首先要进行盆地总体分析，即对一个盆地的地质、地球物理和地球化学过程深入了解；然后根据石油地质的物理化学机理，建立地质模型；在此基础上，根据数、理、化定理建立数值模型；最后编制相应的软件，从而在时空概念下，由计算机定量地模拟盆地的形成和演化，烃类的生成、运移与聚集。

可见，盆地模拟包括盆地分析、地质建模、数学建模、软件研制、目标模拟五个阶段（图 1），各阶段之间顺序不可颠倒，如数学建模不能先于地质建模，也不能晚于软件研制。对于专门从事盆地模拟软件系统研制的系统人员，主要任务是进行数学建模和软件研制，在建模之前要充分了解各式各样的地质模型；对于现场应用人员，主要任务是进行盆地分析、地质建模，然后用软件系统进行目标模拟。从任务上看，系统人员与应用人员似乎毫无关系，其实不然，他们之间是有密切联系的。系统人员要不断地收集应用人员反馈的信息，对软件系统进行修改和校正，使之更趋完善；应用人员通过系统人员的指导，才能最大限度地使用软件功能。所以，他们之间是相辅相承的。

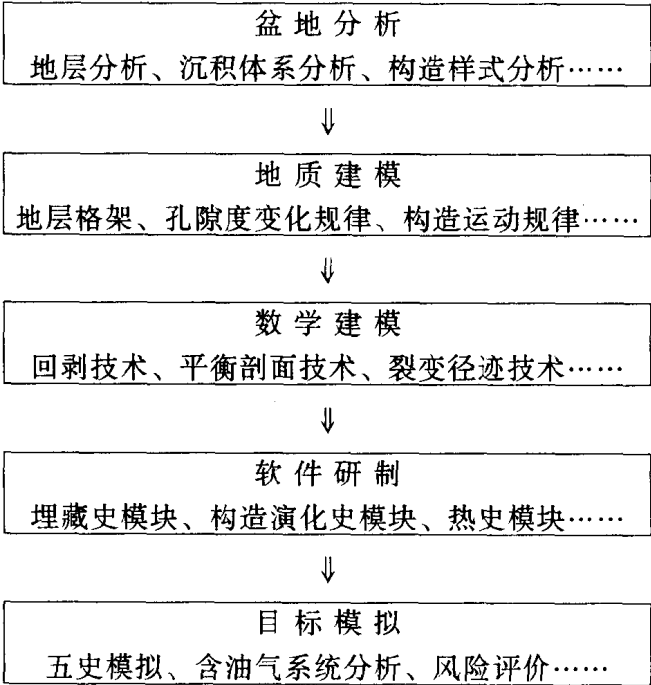


图 1 盆地模拟流程图

**(一) 盆地分析**

盆地分析的任务是对全盆地的所有地质信息进行分析；主要分析对象是构造背景、地层关系、沉积体系、构造样式、水动力类型、热状态、烃源岩特征等；目的是了解全盆地的地质要素和地质作用。

**(二) 地质建模**

地质模型就是在人们脑子中形成的地质概念。地质家通过对盆地大量地质资料进行实际观察、分析、归纳与综合后，对地质问题的认识从描述性提高到规律性，这个

过程就是地质建模，这种地质规律就是地质模型。由于地质过程的复杂性，地质家建立的地质模型与实际地质情况有一定的出入，这种出入的大小与盆地的勘探程度有关，同时也与地质家的理论水平和实际工作经验有关。

### （三）数学建模

将地质模型的物理特征用一系列的数字、符号来表征，并用合理的数学表达式来描述或逼近这些特征之间的定量关系，这个过程叫数学建模，这种合理的表达式就是数值模型。数值模型是对地质模型的高度抽象和概括，如果没有这种抽象和概括，就可能无法找到“合理”的表达式，即无法建立数值模型。但是，这种抽象和概括往往导致一定误差，甚至是无法接受的或致命的误差。所以，在建立数值模型时，一定要作到“心中有数”，即哪些误差是允许的，哪些误差是不允许的。也就是说，只有那些既精通数学又精通地质理论的综合人才，才能建成合理的、可接受的数值模型。

### （四）软件研制

原则上讲，软件研制是计算机软件工程人员的任务。只要数值模型表达得清楚、正确，软件人员就能顺利地完成任务。在软件研制过程中，地质人员要提供地质参数，要帮助测试软件，只有这样，才能高效地、可靠地完成软件系统。

### （五）目标模拟

现场人员应用软件系统对研究区进行实际模拟，并用模拟结果分析盆地、优选区带、确定有利的勘探目标，这就是盆地模拟的最终目的。

综上所述，盆地模拟的五个阶段中，盆地分析是基础，地质建模和数学建模是关键，软件研制是保证，目标模拟是目的。

## 二、盆地模拟的内容和方法

盆地形成、演化和油气事件的发生、发展过程，可归纳为如下五个具有成因联系的过程：地史、热史、生烃史、排烃史和油气二次运聚史。这五种历史构成了盆地模拟的实质内容（表1）。

### （一）地史

地史包括沉降史、埋藏史和构造演化史三大部分，它是整个盆地模拟的基础，其精度直接影响到后面四史的精度。在建立地质模型时应尽可能多地考虑各种地质事件的影响，这些事件包括：构造沉降、负荷沉降、沉积压实、异常压力、剥蚀事件、断裂活动、沉积间断、海平面及古水深变化等。

地壳均衡法和 Mckenzie 的纯剪切模型法是沉降史恢复中最常用的方法，其中前者包括 Airy 均衡和挠曲均衡两种方法。回剥技术和超压技术是埋藏史恢复的两种技术，其中前者恢复的结果精度较高，但缺少地层压力史；后者是恢复压力史的主要方法，但其恢复的古厚度史误差较大。所以，埋藏史恢复中常采用以上两种技术相结合的方法。平衡剖面技术是构造变形恢复的主要技术方法，包括层长守恒、垂直剪切、斜向剪切、滑移距不变、面积守恒等多种方法。

剥蚀厚度恢复和古水深恢复是地史参数研究中最困难、也是最重要的两个方面。

### （二）热史

热史包括热流史、地温史和有机质热演化史（成熟史）。热史一方面依赖于地史，

另一方面又影响着生烃史以及之后的油气运聚史。热史研究方法有构造热演化法和古温标法等。构造热演化法的研究对象是岩石圈；原理是在盆地形成、演化中热效应与岩石圈构造变形（盆地成因）有关，因而可按盆地成因分门别类地研究热演化史；典型代表是 Mckenzie 的热沉降模型；模拟结果是半定量的。古温标法：研究对象是盆地；原理是用古温度计（ $R_o$ 、裂变径迹、粘土矿物、包裹体等）反推古地温场；典型代表有 Easy %  $R_o$  法和磷灰石裂变径迹法；模拟结果是定量的。可直接用于盆地数值模拟的古温标主要有  $R_o$ 、磷灰石裂变径迹和粘土矿物三种。以上两种热史研究方法结合使用，就叫结合法。

古温标  $R_o$  是有机质成熟度最重要的指标。 $R_o$  的计算模型主要有：最大温度模型（Barker, 1983）； $R_o$ — $TTI$  关系模型（Waples, 1980）；化学动力学模型（Sweeney, 1990）。由化学动力学模型计算出的降解率，本身也是一种重要的成熟度指标。

表 1 五史模拟内容与方法

| 模 型         | 模拟内容                        | 模 拟 方 法                                                                                                       | 考 虑 因 素                                                      |
|-------------|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 地<br>史      | 沉降史<br>埋藏史<br>构造演化史         | Mckenzie 的纯剪切法<br>Airy 地壳均衡法<br>挠曲均衡法<br>回剥技术<br>超压技术<br>回剥与超压结合技术<br>平衡剖面技术                                  | 构造与负荷沉降<br>沉积压实<br>异常压力<br>剥蚀事件<br>断裂活动<br>沉积间断<br>海平面变化与古水深 |
| 热<br>史      | 热流史<br>地温史<br>有机质热<br>演化史   | 构造热演化法<br>古温标法： $R_o$ 指标法<br>裂变径迹法<br>粘土矿物法<br>结合法<br>$R_o$ 计算方法：最大温度法<br>$R_o$ — $TTI$ 关系法<br>Easy % $R_o$ 法 | 盆地成因类型<br>地温场热源<br>地温场热成因机制<br>地温场特征：热导率<br>地温梯度<br>大地热流值    |
| 生<br>烃<br>史 | 生烃量<br>生烃时间                 | 化学动力学法：单组分<br>多组分<br>图版法：降解率曲线<br>产烃率曲线                                                                       | 有机质类型、丰度<br>有机质演化程度<br>生烃潜力                                  |
| 排<br>烃<br>史 | 排烃量<br>排烃时间                 | 压实排油法<br>压差排油法<br>物质平衡排气法                                                                                     | 初次运移相态、动力<br>排油临界饱和度                                         |
| 运<br>聚<br>史 | 运移方向<br>运移时间<br>聚集强度<br>聚集区 | 流体势分析<br>运移散失量计算<br>数值模拟法                                                                                     | 水动力类型<br>地层压力<br>运移通道<br>排烃方向                                |

(三) 生烃史

生烃史的研究重点是生烃量、生烃时间（开始、高峰和结束）。生烃量的计算方

法主要有化学动力学法和热解模拟法（图版法）。化学动力学法有单组分和多组分两种计算方法，后者近年来发展较快，现已成为计算生烃量的主要方法之一。图版法的发展与热解模拟技术的发展有关，岩石热解评价结果—降解率图版和热压模拟结果—产烃率图版，是目前用于生烃量计算的主要图版。生烃史的恢复是建立在有机质成熟度史基础上的，根据  $R_o$  史，结合以上两种图版，就能求出各历史时期的生烃量—生烃史。

#### （四）排烃史

排烃史也叫初次运移史，其研究重点是排烃效率、排烃量和排烃时间（开始、高峰、结束）。由于初次运移机理相当复杂，目前存在的争论还较多，因而利用现有的机理很难建立一套完善的排烃量模型。常用的计算方法有压实排油法、压差排油法和物质平衡排气法等。

#### （五）油气二次运聚史

油气二次运聚史是盆地模拟的重点。由于油气运聚的地质环境及其影响因素十分复杂，建立确定性的地质模型和数值模型均很困难，因此运聚史模拟至今仍是盆地模拟中最薄弱的环节。

目前研究运聚史的方法可概括为两大类：一是流体势分析法，即从盆地的水动力类型（场）出发，研究分析水动力类型的演化规律及流体势分布特征，进而指出油气可能的运移方向和聚集区，这是一种半定量的分析法；二是数值模拟法，即从油气二次运移机理出发，建立地质模型和数值计算模型，利用计算机技术动态追踪、模拟油气二次运移过程，并最终计算出油气聚集强度和聚集区，这是一种定量的分析法。

#### 6. 综合评价—含油气系统分析

综合评价的任务是对以上五史模拟结果的分析、综合与评价。一般可结合含油气系统的研究思路进行分析，即按地质要素、地质作用与组合关系进行描述分析，最后用风险评价法评估盆地、评价含油气系统、优选有利勘探区带。

### 三、盆地模拟的发展与动向

理论方法与软件系统的发展是盆地模拟发展的两条主线。

#### （一）理论方法的发展

含油气盆地勘探和研究已有上百年的历史，而盆地综合分析主要是近二三十年的事。“盆地分析”的概念是 Pettijohn 在本世纪 40 年代提出的，他主张将盆地作为一个整体对其中之沉积物进行研究。70 年代，Potter 和 Pettijohn (1977) 在《古流和盆地分析》一书中，强调了古流体在盆地分析中的作用；Mckenzie (1978) 从理论地球科学的角度考虑，从盆地的地球物理模式开始，研究盆地的形成机制，并提出了拉伸盆地的形成模式，即纯剪切模式。在其模式中定量地探讨了盆地沉降、岩石圈减薄、软流圈上隆以及相应的热体制之间的定量动力学关系。80 年代后期，Miall (1984, 1990) 以沉积盆地地质研究为主，对盆地的充填和构造背景进行了系统的研究，并先后两次出版了《盆地分析原理》一书。90 年代，Allen (1990) 在《盆地分析：原理与应用》一书中，以盆地定量动力学模型为核心，通过一系列典型实例探讨了盆地的形成机制；Lerche (1990) 在《盆地分析的定量方法》中，重点论述了盆地热研究的

定量方法。1997 年, Welte 等主编的《石油与盆地评价》一书的出版, 表明盆地定量研究和综合分析进入了成熟发展阶段。

在国内, 从 80 年代后期以来, 已出版了不少有关盆地定量分析与综合评价方面的论著, 主要论著的作者有: 李明诚 (1987, 1994)、李泰明 (1989)、庞雄奇 (1993、1995)、石广仁 (1994)、郝石生等 (1994)、田在艺等 (1996)、张渝昌等 (1997)、查明 (1997)。总之, 在我国开展的盆地定量分析工作已卓有成效。

## (二) 软件系统的发展

盆地模拟软件系统的发展可从 60 年代末算起, Tissot 等 (1969) 根据化学动力学定律提出了计算生油气量的数学模型, 该模型是盆地模拟软件编程的基础。70 年代后期, 诞生了第一套一维盆地模拟系统, 该系统是由原西德尤利希核能研究有限公司 Yukler 等人于 1978 年合作开发出来的。80 年代, 盆地模拟系统的发展进入了新阶段, 软件系统从一维发展到二维。在这个时期, 比较有代表的机构为: 法国石油研究院 (1984)、美国南卡罗那大学地质科学系 (1984)、英国不列颠石油公司 (1981) 和日本的石油勘探有限公司。进入 90 年代, 软件系统的发展开始从剖面二维转向平面二维和三维。除此之外, 软件系统还增加了盆地参数研究模块、模拟结果综合评价模块等功能。目前, 国际上代表性的软件系统有: 法国石油研究院研制的 TEMIS-PACK、前西德石油研究院研制的 PetroMod、美国 Platte River 公司研制的 BasinMod 和中国石油天然气总公司石油勘探开发科学研究院研制的 BASIMS。

TEMISPACK 是回剥技术的代表, 最新的系统是剖面二维油气运聚模拟系统; PetroMod 是超压技术的代表, 最新的系统也是剖面二维油气运移聚集模拟系统, 该系统采用了 Landmark 地震解释系统平台; BasinMod 是一套功能较全面的系统, 其中最有特色的模块是 BasinSeis 和 BasinFlow, 前者侧重于层序地层学研究, 后者侧重于平面油气运聚模拟; BASIMS 是一套平面二维综合模拟系统, 特色模块是平衡剖面模块、综合评价模块和平面油气运聚模块。以上软件有一个共同的特点: 界面友好、商品化程度高; 但也有一个共同的缺点: 运移聚集模块不够完善。

## (三) 盆地模拟发展动向

盆地模拟技术的发展受制于地质家对盆地成因机制、石油地质机理的认识程度, 也受制于计算机技术的发展水平。近年来, 计算机技术的高速发展, 以及石油地质理论的不完善, 为今后盆地模拟的发展创造了有利的条件。本世纪末至下世纪初, 盆地模拟可能的发展方向为:

(1) 三维动态模拟系统。油气运移、聚集过程是在三维空间上而不是在二维剖面或平面上进行的, 要想真实地模拟油气动态过程, 就必须建立三维动态模拟系统。三维图形显示技术和计算机容量及运算速度的大幅度提高, 为建立这样一套系统提供了硬件的保证。现有的三维模拟系统均存在模型过于简单的缺点, 如不考虑断层、不整合等地质因素, 不考虑油、气、水三相之间相互溶解现象。建立三维动态模拟系统的关键是三维地质建模和三维数学建模。如果地质模型不合理或误差太大, 模拟结果就可能是一种加了包装的“垃圾”; 同样, 如果数学模型过于简化或失真过大, 模拟模拟结果就可能是一种毫无意义的“假货”。只有组织多学科的专家进行地质建模与数学建模攻关, 加大研究力度, 才能在较短的时间内建立起一套既能投入实际应用, 又

能成为商品的三维动态模拟系统。

(2) 综合评价系统。由于石油地质过程的多变性、复杂性，盆地模拟系统只能考虑一些相对稳定且容易把握的地质因素。要准确地模拟和描述盆地的各种地质过程，就必须尽可能地考虑多种地质因素，这就要求盆地的数值模拟与常规地质分析密切结合。目前的综合评价系统主要局限于盆地模拟内部结果的简单综合，而很少考虑盆地模拟以外的资料，所以没有达到真正的综合之目的。只有按照含油气系统的分析思路对盆地模拟结果与常规地质分析结果进行分析、归纳与综合，才能最有效地评价一个探区。

(3) 目标评价系统。为了节省开支、降低勘探风险，勘探领域正朝着目标评价、项目承包方向发展。盆地模拟也应该适应这种潮流，向更细小的模拟目标（含油气系统、区带、圈闭）方向发展，从而达到直接评价目标的目的。这种目标评价系统有别于以往的单目标评价软件（如圈闭评价软件），它是建立在盆地模拟大背景下的一种评价系统，其基础数据主要来自于盆地模拟结果，评价技术又不限于盆地模拟技术。它结合了盆地模拟技术和单项目评价技术的优势，因而将更可靠、更实用。

# 第一章 埋 藏 史

埋藏史是指盆地的某一沉积单元或一系列单元（层序或地层）自沉积开始至现今或某一地质时期的埋藏深度变化情况，其中包括沉积间断、剥蚀和断层等地质事件。埋藏史是盆地分析、模拟的基础，其研究内容主要有：①压实作用与孔隙度变化规律；②地层压力；③埋藏史恢复；④剥蚀厚度恢复。

以上前两项内容是本章的基础，也是盆地模拟的基础；埋藏史恢复则是本章的核心；剥蚀厚度恢复是埋藏史恢复中最重要的一环之一。

## 第一节 压实作用与孔隙度变化规律

沉积物在埋藏过程中发生着多种作用，包括压实、排水、孔隙度变化、矿物转化、原有矿物的溶蚀等。压实排水、孔隙度变化和压实作用的不可逆性等特征能帮助我们定量恢复剥蚀厚度、重建埋藏史及计算排烃量。

### 一、压 实 作 用

上覆沉积物和水体的静水压力使刚刚沉积下来的、疏松的沉积物固结成岩的过程称为压实作用，这是一种最常见的地质现象和地质作用。

压实作用不仅可以排除沉积物中的水，缩小体积，降低孔隙度，而且伴有结构、构造或新生矿物的形成，促进沉积物固结硬化。其作用效果随沉积物性质而异，对泥质沉积物的作用最大，对砂质沉积物作用较小，对蒸发岩作用则更小。压实作用的特征可从泥岩压实脱水过程中体现出来。

#### （一）压实脱水过程

美国学者从 50 年代至 70 年代初就对墨西哥湾沿岸产油区泥岩中粘土矿物的脱水机制作了广泛而深入的研究。Powers (1967)、Burst (1969)、Perry 和 Hower (1972) 先后提出了各自的脱水机制。他们的主要观点如下：

##### 1. Powers 的两个脱水阶段

孔隙水脱水阶段：主要发生在埋深小于 3000ft（约 915m）以内。在埋深为 3000ft 时，泥岩的有效孔隙度和渗透率几乎为 0（图 1—1a）。此时，所有空间均被粘土层和结合牢固的层间水所占据，粘土和层间水在砂泥颗粒上形成包裹结构，使孔隙度和渗透率大大降低。

层间水脱水阶段：一般发生在埋深 6000ft（约 1830m）至 10000ft（约 3050m）之间（图 1—1a）。从 6000ft 起，蒙脱石开始向伊利石转化，随埋深的增大和地温的增高，转化速率加快，至埋深 9000~10000ft（1ft=0.3048m）时，蒙脱石基本消失。在这种矿物相转化过程中，蒙脱石中的层间水逐渐变成粒间水，这时泥岩的有效孔隙度和渗透率也随之加大。由于层间水密度大于粒间水密度，使水的体积增大，从而产

生异常流体压力。

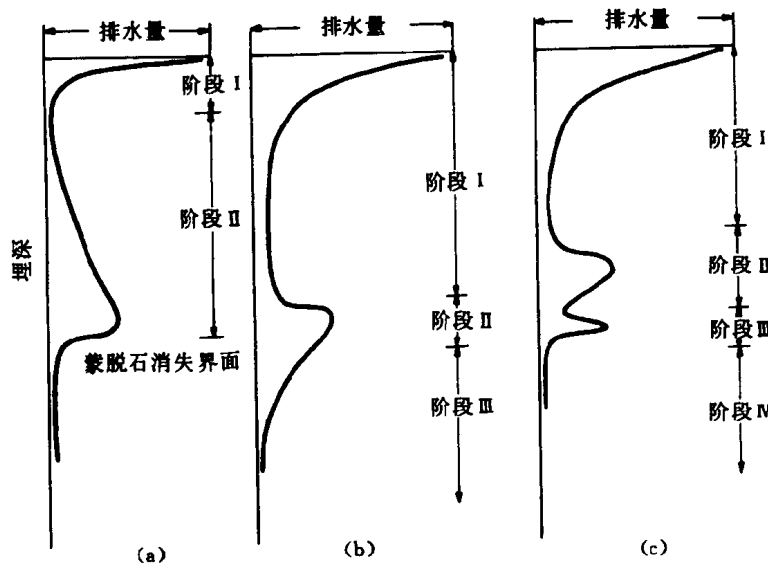


图 1—1 不同学者提出的蒙脱石质沉积物埋藏深度与脱水阶段关系的对比  
(a) 据 Powers (1967); (b) 据 Burst (1969); (c) 据 Perry 和 Hower (1972)

2. Burst 的脱水三阶段

第一阶段：孔隙水和过剩层间水脱水阶段，此阶段使泥岩原始含水量从 70% ~ 80% 降至 30% 左右，其中 20% ~ 25% 为层间水，另外的 5% ~ 10% 为粒间水（孔隙水），发生深度在 3000m 以内（图 1—1b）。

第二阶段：蒙脱石最后第二层层间水（共有 4 层，此时仅剩两层）脱水阶段（图 1—1b）。此时地静压力对粘土矿物的脱水不起明显的作用，因层间水的密度已大到足以平衡掉所受的压力。当温度升高到能够使层间水运动时，剩下的两层层间水中就会有一层先释放出来加入孔隙水。该阶段又脱去泥岩 15% 左右的水，使泥岩含水量降至 15% 左右。

第三阶段：最后一层层间水的脱水阶段（图 1—1b）。进入此阶段后脱水过程非常缓慢，要延续几千万年甚至几亿年。在此阶段泥岩不发生明显的压实和流体运移作用，在泥岩总含水量降至 10% 以下时，渗透率大大降低，水排出困难。

3. Perry 和 Hower 的脱水四阶段

第一阶段：孔隙水和过剩层间水（2 层之外的层间水）的脱水阶段，称为早期压实阶段，此阶段使泥岩含水量从 80% 降至 30%（图 1—1c）。

第二阶段：第一次层间水脱水高峰阶段，该阶段 65% 的蒙脱石已转化成伊利石，层间水降低至 10%（图 1—1c）。

第三阶段：第二次层间水脱水高峰阶段，该阶段约有 80% 的蒙脱石已转化成伊利石，层间水降低至 5%（图 1—1c）。

第四阶段：脱去最后 5% 层间水阶段，此阶段混合层中所有蒙脱石都已转变为伊