

沉积盆地分析的定量数学模拟：原理与方法

王璞瑛 杜小弟

(长春地质学院能源系)

摘 要 含油气盆地分析的主要内容有四个方面：沉积史、热演化史、烃类产率和油气运移。根据质量守恒原理、应用回剥法 (backstripping) 可定量再造沉积作用过程；用热过程分析法模拟盆地热演化史；用阿仑尼乌斯化学动力学方程定量计算烃类产率；用修正的达西定律模拟油气运移过程。本文介绍用计算机实现上述过程的基本思路和处理方法。

主题词 沉积盆地分析，数学模拟，原理，方法

作者简介 王璞瑛，男，35岁，讲师，博士，沉积学及化学专业，从事过计算机数据处理工作。

1 前 言

定量数学模拟用于沉积盆地分析的研究始于六十年代，近年得到迅速发展并已进入可进行油气预测的实用性阶段。该项研究已引起我国学者的高度重视。在油气盆地评价八五攻关项目中设立了这方面的专项研究课题。有关的科技工作者近年也进行了一些有益的探索。预计定量模拟方法很快就会成为盆地分析工作中不可缺少的研究手段。

沉积盆地分析的定量数学模拟方法发展至今，大体可以分成三个阶段。第一阶段（60年代~70年代中期）主要结合现代沉积环境特点模拟某些沉积作用过程；第二阶段（70年代后期~80年代中期）主要进行沉积层序或盆地充填序列的模拟；第三阶段（80年代中后期至今）为盆地分析综合模拟阶段，即全面考虑各种地质因素及其相互作用关系综合模拟盆地沉积史、热演化史及油气生成和运移过程。今后一段时间内该领域的主要研究方向将是沉积盆地演化的三维、动态、综合模拟。

2 盆地分析定量数学模拟的原理和方法

2.1 再造沉积作用过程

• 收稿日期 1992-11-20

再造沉积作用就是要恢复盆地充填过程中各层序单位沉积时的盆地形态、沉积层序形态、不整合的时空分布和相带展布。上述演化过程主要由盆地的可容纳沉积物空间和沉积物供给两大因素控制。沉积物可容空间受基底沉降（构造作用/重力均衡/热收缩）、沉积物压实和海平面升降等因素控制。碎屑沉积物供给受物源区距离、岩性、地形、构造环境和气候条件等因素控制。碳酸盐沉积物供给受生物有机质条件、水深、盐度、水体浊度、营养供应情况和氧逸度等因素控制。上述诸因素影响的综合结果集中反映在各沉积单元的沉积/剥蚀速率及其空间分布上。所以再造沉积作用的主要任务就是客观地模拟出各沉积层序在沉积过程中空间各点的沉积/剥蚀速率。

模拟沉积作用的方法很多，但多以质量（或物料）守恒原理为基础。即沉积物沉积后直至压实、成岩的整个过程中，除孔隙以外的固体组分的总体积始终保持不变。该原理可用下述方程式定量表示：

$$\int_{Z(t)}^{Z(t)+H(t)} [1 - \Phi(Z)] dZ = \int_{Z(0)}^{Z(0)+H(0)} [1 - \Phi(Z)] dZ \quad (1)$$

(距今 t 时间沉积时的体积) (现在的体积)

式中 t 为时间、 Z 为深度、 H 为计算层厚度、 Φ 为孔隙度函数。

回填法再造某实测剖面或全盆地的沉积史可按以下步骤进行：(1) 按一定规则将已知剖面网格化；(2) 按现今的孔隙度—深度关系（ $\Phi(z) = a \cdot \exp(-b \cdot Z)$ ）计算出各层的沉积速率作为编程的初始赋值（式中 a, b 为常数）；(3) 按沉积的时间先后顺序逐层将各沉积单元“回填”到盆地中，并且每回填一层的同时要重新计算该层对下伏各层的压实作用以及基底的重力均衡响应；(4) 综合压实、沉降和海平面波动等资料模拟出各层沉积时的盆地形态、层序形态、侵蚀界面和相带关系；(5) 最后一层回填后即应为现行沉积剖面。将模拟的（网格）剖面与实测（网格）剖面逐层比较、二者厚度相差大时则调整沉积速率和压实幅度等参数重新计算模拟剖面直至逐层相符为止，此时各层的沉积速率、压实过程及其相应的盆地形态、层序形态、剥蚀界面和相带关系即是所要再造的沉积作用史。

与编程计算有关的几点说明：第一，上述模拟计算中隐含的基本假设条件是压实过程的体积变化只是由于孔隙水的排出而固体组分的体积不变并且孔隙度—深度关系不变。第二，计算前要输入有关的区域地质资料；它们主要包括海平面升降曲线、构造沉降曲线和盆地基底的初始形态。在没有本区更详细的研究资料时可选择已发表的资料，如 Haq 等的海平面波动曲线和 Selater 等的基底沉降模式；基底的初始形态可由地震资料获得。第三，沉积速率的初始赋值由现今孔隙度—深度关系求得^[1]；下伏层系的压实幅度可由压实曲线求出；基底对上覆沉积物及水体的重力均衡响应由艾里均衡模式求得^[1]。第四，模拟计算全盆地演化史时，无钻孔或剖面控制那些点的初始沉积速率值可用插值法求得、或由沉积物分布的动力学关系式求得。控制点越多计算精度越高，全盆地至少要有个控制点。

2.2 模拟沉积盆地的热演化史

研究盆地的热演化史就是研究盆地中各沉积层序的地温、地温的空间分布和地温的时间演化过程。在上述“回填”法盆地模拟的模式中，相应热演化史的模拟计算过程为：

每回填(沉积)一层后,计算该层的地温,同时要计算沉积该层所引起下伏各层的地温变化(因沉积物中放射性物质增加,同时因压实或流体流动导致热对流作用)。

现今盆地某些沉积层序的地温可由钻孔测温加以适当校正后求得。研究盆地古地温的方法有多种,但大致可以分为两类,一类是通过研究地温所造成的结果获取古地温资料,另一类是分析影响地温的各种原因,即所谓的热过程分析法。前一类方法已广泛用于盆地热演化史的研究中,它主要包括有机地化指标法(如 R_0 -Profiles、LOM 和 TTI 等)、无机矿物法(混层粘土矿物结构、气液色体等)和 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素法。热过程分析法是研究盆地的各沉积层序在盆地演化的各地史时期内,热量的来源和热量的散失过程;从而计算出总热量变化值、计算古地温。该法易于定量化,所以逐渐显示出巨大的优越性,越加为人们所重视。这里介绍该方法的基本原理和计算方法。盆地演化任一时期某沉积层的温度状态为:总热量变化=输入热量-输出热量。该过程可用下述方程定量表示:

$$\frac{\partial}{\partial t}(R_i \cdot T) = \frac{\text{div}(C_i \cdot \text{grad}T)}{R_i} + Q_r - \frac{\text{div}(R_i \cdot \vec{V}_w \cdot T)}{R_i} - \text{div}[\Phi \cdot R_w \cdot \vec{V}_w \cdot T + (1 - \Phi)R_i \cdot \vec{V}_i \cdot T] \quad (2)$$

式中 t 为时间、 T 为温度; R_i 、 R_r 和 R_w 分别为沉积物、岩石圈和流体的热容; C_i 为岩石圈导热系数、 Φ 为孔隙度、 Q_r 为沉积物中放射性元素产热; \vec{V}_w 和 \vec{V}_i 分别为流体和沉积物流速。

对式(2)进行时间积分后加上 T_0 (初始温度)即为某沉积层序在给定地史时期的古地温。用回填模式模拟计算相应的地热演化史时,每回填(沉积)一新的层序因放射性物质总量和上覆重荷均有增加,所以会引起先前已沉积的下伏各层的 Q_r 及 $\text{grad}T$ 、 \vec{V}_w 和 \vec{V}_i 的变化。故在每回填一层之后要重新计算下伏各层的地温变化。(2)式右端的放射性热产量(Q_r)与沉积物中放射性元素铀(U)、钍(Th)和钾(K)的含量成正比。其它天然放射性元素含量均很低,所以一般可乎略不计。在沉积岩类中通常蒸发岩和碳酸盐岩 Q_r 最低,砂岩类低~中等、页岩和粉砂岩较高、黑色页岩最高。当已知沉积岩中放射性元素(U、Th和K)含量时,放射性产热量可由下面经验公式求得:

$$Q_r(\mu\text{w}/\text{m}^3) = 10^{-5} \cdot \rho \cdot [9.52 \cdot C \cdot (U - \text{ppm}) + 2.56 \cdot C \cdot (\text{Th} - \text{ppm}) + 3.48 \cdot C \cdot (K - \%)]$$

其中 ρ 为沉积岩(物)密度(kg/m^3)。在有钻孔区, Q_r 亦可由 $Gama$ 测井数据 G_r (以 API 为单位)求得,即 $Q_r(\mu\text{w}/\text{m}^3) = 0.0145(G_r - 0.5)$ 。

与编程计算有关的几点说明:(1)规定温度函数(T)在传导方程中的侧向分量为零或为常量、在平流方程中垂向分量为零;(2)流速函数(V_w 、 V_i)在对流方程中的侧向分量为零、在平流方程中垂向分量为零($\partial V/\partial z = 0$);(3)岩石圈底部温度不变,为 1330°C ;(4) Φ 可由现今孔隙度~深度关系求得(同前);流速分布函数(\vec{V}_w 、 \vec{V}_i)是与上覆压力有关的函数(详见后);温度分布函数(T)可根据研究区特点引用相应的模型^[2],热容和导热系数可根据各层系岩性特点引用相应常数。

2.3 计算烃类产率

自 Tissot 和 Espitalie (1975) 用阿仑尼乌斯化学动力学方程成功地描述了烃类形态过程以来, 人们一直引用该模式计算烃类产率, 并对其参数的求算方法不断加以校正, 已使其日臻完善. 烃类产率是温度 (T)、时间 (t) 和有机质种类的函数. 成烃反应通过 n 个平行的一级动力化学反应实现, 可用下式表示:

$$\frac{dX_i}{dt} = A_i \exp(-E_i/RT) \cdot X_i \quad (3)$$

其中, E_i 是第 i 个反应的活化能, 数值约 $40 \sim 80 \text{ kcal/mole}$, 以 $50 \sim 60 \text{ kcal/mol}$ 为主; A_i 为阿仑尼乌斯常数 (y^{-1}); $R = 2 \text{ cal/mol} \cdot \text{K}$; T 为绝对温度; X_i 为对于第 i 个反应剩余成烃潜率 ($\text{mg/g org} \cdot \text{C}$); X_{i0} 是对于第 i 个反应的原始成烃潜率 ($\text{mg/g org} \cdot \text{C}$); t 为时间 (a).

已经形成的烃类的产率 (X) 为:

$$X = \sum_{i=1}^n (X_{i0} - X_i) \quad (4)$$

式 (3) 和式 (4) 中的 A_i 、 X_i 和 X_{i0} 可由生油岩的高温裂解实验数据并加以适当校正后获得. 式 (3) 为变量可分离型一阶常微分方程, 将各参数代入后对 t 积分即可求解. 对盆地中的某一生油层系而言, 求解出式 (4) 中成烃率 X 后, 乘上总有机碳含量即得该层系的总成烃量. 将所有生油层系的成烃量求和即为整个盆地的产烃总量.

2.4 模拟油气运移过程

烃类的形成主要与温度有关, 而烃类的运移和聚集则主要受压力条件控制. 地层压力由两部分组成, 一是有效应力 (固体岩石所承受的压力)、另一是流体压力. 地静压力 (总压力) 等于这两部分压力之和. 生油岩中烃类的形成会使流体压力增加. 当生油岩中烃类饱和度增加、致使流体力足够大时, 烃类便克服毛细管压力从生油岩中排出、即出现烃类的运移. 当烃类运移到渗透性好的岩层中后, 浮力便成为主要驱动力. 当烃类在浮力作用下向上运移至低渗透性的盖层圈闭处便形成油气藏. 上述烃运移过程可由修正的达西定律加以定量表示:

$$\vec{V}_h = \frac{K_{rh} \bar{K} \cdot \rho_h \cdot g}{\mu_h} \text{grad} \left(\frac{P_h}{\rho_h \cdot g} - Z \right) \quad (\text{烃类运移方程}) \quad (5)$$

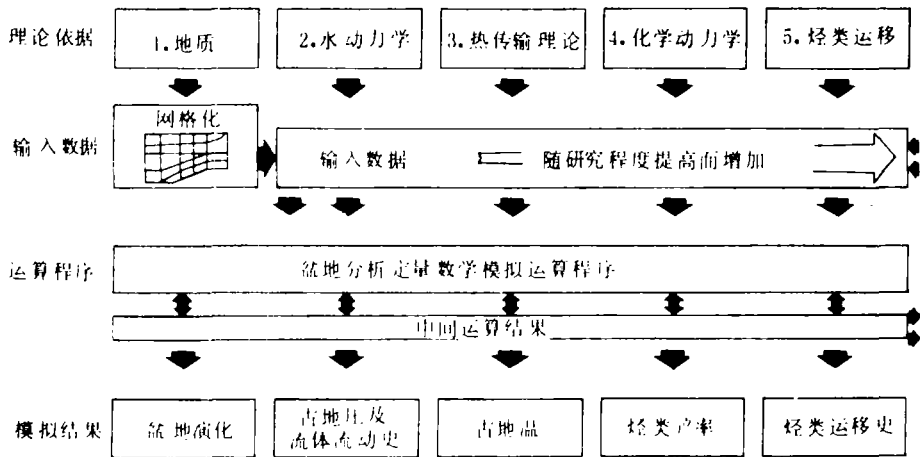
$$\vec{V}_w = \frac{K_{rw} \cdot \bar{K} \cdot \rho_w \cdot g}{\mu_w} \text{grad} \left(\frac{P_w}{\rho_w} - Z \right) \quad (\text{水体运移方程}) \quad (6)$$

式中 \vec{V}_h 、 \vec{V}_w 为烃类和水流动速度; K_{rh} 、 K_{rw} 为烃类和水相对渗透率; \bar{K} 为渗透率张量; ρ_h 、 ρ_w 为烃类和水密度; μ_h 、 μ_w 为烃类和水动力粘度; P_h 和 P_w 是烃类和水流体分压; g 是重力加速度常数; Z 为埋深; grad 为梯度.

在回填法模拟盆地演化的模式中, 每回填 (沉积) 一新层序都要重新计算下伏各层的烃类和水流速向量函数; 因此时下伏各层的埋深 (Z)、流体分压 (P_h 、 P_w) 以及动力粘度 (μ_h 、 μ_w) 等参数均有改变.

在实际模拟计算中, 式 (5) 和式 (6) 右端各项参数可做如下处理: (1) 相对渗透率 (K_{rh} 、 K_{rw}) 与水体饱和度有关, 水体饱和度小于 50% 时 K_{rh} 约为 100%, 水体饱和度大于 90% 时 K_{rw} 约为 100% ($K_{rh} + K_{rw} = 100\%$), 计算中可输入有关曲线; (2) 渗透率张量 \bar{K}

$= 0$,是针对沉积岩层渗透性的各向异性特点而引入的量,在非渗透性岩层中 K^* 在渗透性岩层中 $K = \theta \cdot \Phi^3 / (1 - \Phi^2) \cdot S_0$ (θ 为各向异性系数、 Φ 为孔隙度、 S_0 为岩石比表面积); (3) 动力粘度 (μ_h, μ_w) 与温度有关,符合宾汉方程,即 $\mu_h = a \cdot \exp(-b/T)$ 、 $\mu_w = a/[b(T - c)(d + (T - c)^2)^{1/2} - e]$,其中,常数 a, b, c, d 和 e 可由实验求得或根据研究区特点引用适当常数; (4) 流体分压 (P_h, P_w) 符合毛细管压力方程,计算时可据沉积层的组构特点求得。



沉积盆地分析定量数学模拟的计算机程序框图^[3]

3 结束语

①沉积盆地分析的定量数学模拟方法,可以根据研究需要进行单项模拟(如充填序列或热演化史等),亦可进行盆地演化过程的综合模拟。尽管盆地演化模拟的方法很多,对具体过程的处理更是千差万别,但模拟计算的程序结构多可用图1所示的编程思路概括。

②盆地分析的定量数学模拟研究本是涉及到许多学科的系统工程,也是盆地分析领域的前沿课题。作者本着复杂问题简单处理的原则将自己对近年国内外主要研究成果的粗浅认识介绍给读者,以期起到抛砖引玉的作用;并希望此文有助于非专门从事该项研究的有关专业人员、了解和掌握该项研究的思想方法,以迎接盆地分析定量化研究时代的到来。

致谢: 本文在王东坡教授支持和指导下完成,特致谢。

参 考 文 献

- 1 杜小弟、王璞瑜,沉积速率的定量计算,长春地质学院学报 1992 22(1):67—70
- 2 Cermak L Bodri L., Temperature structure of the lithosphere based on 2-D temperature modelling applied to Central and Eastern Europe. In: Thermal Modelling in Sedimentary Basins (Ed. by J. Burrus), P. 7—32, Editions Technip (Paris), 600P.

- 3 Doligez B. , et al. Integrated numerical simulation of the sedimentation, heat transfer, hydrocarbon formation and fluid migration in a sedimentary 1986, basin; the THEMIS model. In: Thermal Modelling in Sedimentary 1986, Basins (Ed. by J. Burrus), P. 173 — 198, Editions Technip (Paris), 600P.

Principles and Methods of Quantitative Mathematical Simulation of Sedimentary Basin Analysis

Wang Pujun Du Xiaodi

(Energy Sources Dept. Changchun University of Earth Sciences)

Abstract: An overview of mathematical modelling of sedimentary basin analysis is presented here. In addition to the recent development, the basic principles and modelling procedures are provided, which include stratigraphic simulation by backstripping geothermal reconstruction based on the geothermal input and output analysis, quantitative calculation of hydrocarbon output according to Arrhenius law and hydrocarbon migration modelling by modified Darcy's law. The ways of obtaining the parameters for the above simulation are discussed in detail. The fundamental considerations for realizing the above procedures by computer are also dealt with.

Subject terms: analysis of sedimentary basin, mathematical simulation, principle, method

套管井有壳弹高能气体压裂应用 研究通过陕西省教委鉴定

高能气体压裂是国际上的一项新的油藏增产技术,由西安石油学院石油工程系高能气体压裂研究室承担的中国石油天然气总公司重点科研项目;套管井有壳弹高能气体压裂应用研究,通过了陕西省教委的鉴定。此项成果是该研究室承担的总公司一类科研项目;高能气体压裂应用研究一个阶段成果。

该项成果是由李瑛副院长、周春虎教授、张廷汉教授、秦发动副教授等十二位教师经过年三年的艰苦努力完成的。

该成果经油田、陕西省石化厅、军工研究所及高等院校的有关专家与教授的严格考核、评审认为:套管井有壳弹高能气体压裂技术,整体达到了国内领先水平,在试验井深及压力一时间测试方面达到了国际先进水平,有着良好的社会和经济效益,具有极强的应用和推广价值。

西安石油学院研制的电缆式活塞泄气的有壳弹气体压裂技术,从1989年开始,经过了12口井17井次的套管井的压裂试验,取得了百分之百的成功,其中6口油层好的井增产百分之三十以上。该技术具有设备简单、施工方便、成本低、有利于保护油层的优点。

今后有待于继续扩大试验应用规模,特别是加强在生产井和注水井上进行高能气体压裂,制订操作规程,做到工具系列化、工艺规范化、安全制度化、在推广过程中,完善工具、改进工艺、使操作更方便、施工更安全,效果更显著。

●李文魁