

青海柴达木盆地的计算机三史模拟和第三系沉积岩含油气远景预测*

沈显杰 汪缉安 张菊明 邓孝 杨淑贞 沈继英 张文仁

(中国科学院地质研究所, 北京 100029)

杨绍清

(青海石油管理局勘探开发研究院, 敦煌 736202)

关键词 柴达木盆地、地热、模拟

青海柴达木盆地系统的地热研究,是在 38 年油气勘探和研究过程中所积累的大量石油地质、地球物理勘探、有机地球化学研究和勘探资料及成果的基础上,于 1991—1993 年进行的,它包括:大地热流测量、地温场分析、古地温恢复、油气形成地热条件研究、盆地三史模拟和油气资源远景分区预测等六项内容,为进一步的油气资源评价提供了系统的地热依据,同时取得了用计算机辅助进行分区预测的经验。本文着重报道其中三史模拟和计算机辅助预测方面的新进展。

1 盆地三史模拟方法概述

三史或 B-T-M 模拟是指盆地的沉积埋藏历史(B-Burial history)、地热演化历史(T-Thermal history)和油气成熟历史(M-Maturation history)的计算机模拟,相应的软件也命名为 B-T-M,是油气资源预测中一种有效的辅助手段。现就 B-T-M 模拟方法概述如下:

1.1 三史模拟的物理机制

沉积埋藏、地层受热和油气成熟是油气盆地发育演化中三个同步过程。沉积物堆积之初,受古地理环境和古气候制约,含一定丰度的有机质,决定其日后的生油潜力;随沉积延续,上覆地层压力增大,沉积物经压实成岩后埋藏至更大深度,地层温度也随之增高,其所含有机质经热降解转化为烃,始生成石油。时间越长,温度越高,热解生烃的化学反应就越快,油气成熟度就越高。因此,三史模拟的首要任务是以同步方式处理上述“三位一体”的埋藏-受热-熟化过程,其最终目的是确定油气所处的成熟阶段,或油气成熟度。

1.2 TTI 方法是三史模拟的主体

从众多的指标中选用温度-时间指数(Temperature time index,简称 TTI)作为判别油气成熟度指标是因为:(1)TTI 的物理意义明确,能贴切地体现上述“三位一体”机理;(2)模拟所需的输入数据最少,且均已具备;(3)最易进行计算机量化处理。

1993-07-05 收稿, 1993-11-25 收修改稿。

* 国家自然科学基金资助项目。

TTI 方法最早由 Lopatin^[1] 提出, Waples^[2] 作了改进和完善, 最终形成如下判别油气成熟度的 Lopatin-Waples 方程:

$$TTI = \sum_{i=1}^n \gamma_i \Delta t_i, \quad (1)$$

式(1)中, γ_i 为一无量纲量, 称为温度系数, 它是公比为 2 等比级数中的任意项; 下标 i 是以每 10°C 为间隔的温度段序数, 如对 $0-10^\circ\text{C}$, $i=1$, 对 $100-110^\circ\text{C}$, $i=11$, 而对 $200-210^\circ\text{C}$, $i=21$, 依此类推; Δt_i 是相应温度段所经历的地质时间 (Ma). 研究证实^[3], 有机质热降解生油的最有利温度区间为 $100-110^\circ\text{C}$, 以此为基准, 令 $100-110^\circ\text{C}$ 时温度系数为 $\gamma_{11}=1$ (即 $\gamma_{11}=2^0$), 则 $110-120^\circ\text{C}$ 时 $\gamma_{12}=2$ ($\gamma_{12}=2^1$), $90-100^\circ\text{C}$ 时 $\gamma_{10}=1/2$ ($\gamma_{10}=2^{-1}$), 据此可推得: $0-10^\circ\text{C}$ 时 $\gamma_1=2^{-10}$, $180-190^\circ\text{C}$ 时 $\gamma_{19}=2^8$, 其他温度段可依此类推.

经与有关的有机地球化学指标进行系统的比较, 得出以下四种不同油气成熟度的 TTI 门限指标: (1) $TTI=7$ 为低成熟生油的门限指标, (2) $TTI=75$ 为高成熟生油的门限指标, (3) $TTI=160$ 为过成熟伴生湿气的门限指标, 和 (4) $TTI=1000$ 为湿气保存极限的门限指标. 显然, 当 $TTI>1000$ 时即具备了干气生成的地热条件.

1.3 三史模拟的数理基础

盆地三史模拟的三个数理方程为: 用于恢复沉积埋藏史的 Falvey 和 Deighton 方程^[4], 用于模拟热史的稳态热传导方程^[5], 和用于模拟油气成熟史的上述 Lopatin-Waples 方程 (1). 三个独立的方程通过计算机软件组合, 实现三史演化的同步模拟, 是一种高效实用的盆地模拟简化方案.

1.4 三类输入数据的网点读入法

为排除实际资料西密东疏的影响, 使全盆地用于三史模拟的资料享有同等的权数, 采用网点数据读入法, 即将盆地内的新生界沉积岩分布区用 $10 \times 10 \text{ km}^2$ 的网络覆盖, 共形成 703 个数据读入点 (图 1).

每个网点读入以下三类输入数据: (1) 地层结构: 依次读入 Q , N_3^2 , N_2^2 , N_1^1 , N_1 和 E_3 6 个分层厚度, 记为 M_i ($i=1, \dots, 6$), 数据来源于地震统层资料²⁾, (2) 泥质岩的百分比 (β_i): 先根据岩性统计资料编制 β 值等值线图, 然后按网点逐一读入, 和 (3) 统计热流值 ($\dot{q}_i$): 根据文献^[6] 中的图 6 按网点逐一读入. M_i 和 β_i 用于恢复地层的沉积埋藏史, $\dot{q}_i$ 值用于计算温度场, 两者的模拟计算结果进一步用于计算 TTI 值. M_i , β_i 和 $\dot{q}_i$ 这三类数据都是地震勘探、钻井记录、物性统计和热流测量所取得的实际资料, 在全盆地范围内, 通过 703 个网点的地质结构数据, 客观地记录了自渐新世以来盆地内沉积沉降中心的迁移历史; 虽然柴西地区经历了一定的后期抬升剥蚀的影响, 会使所恢复的热史略显偏低, 但在总体上尚可保证简化的盆地模拟得出相当接近实际的结果.

2 三史模拟结果的计算机成图

盆地三史模拟是以单个网点为单位进行的, 在空间尺度上模拟似乎是一维的; 由于模拟中

1) 沈显杰、张菊明、杨淑贞、沈继英, 沉积埋藏史控制油气成熟史的机理——以青海柴达木盆地为例, 中国科学, B 辑, 1994 (待发表).

2) 秦凤荣、王明儒编写, 青海柴达木盆地地震统层综合研究报告, 青海石油管理局勘探开发研究院, 1987 年 12 月.

考虑了地质时标,因此实质上是时空(t - H)二维的。当 703 个网点的三史模拟全部完成后,模拟结果形成的数据集则在三维空间或时空四维尺度内,记录了盆地中地层的埋藏、受热和有机质熟化同步过程的丰富信息,因此有必要进行多种多维数据处理。

具模块嵌装结构的 B-T-M 软件能对三史模拟结果进行以下三种图形处理:

2.1 单个网点三史演化图

图 1 中以网点 L26 为例给出单个网点的三史演化图,它将三史模拟的结果和数据全部转化为直观的图形显示。

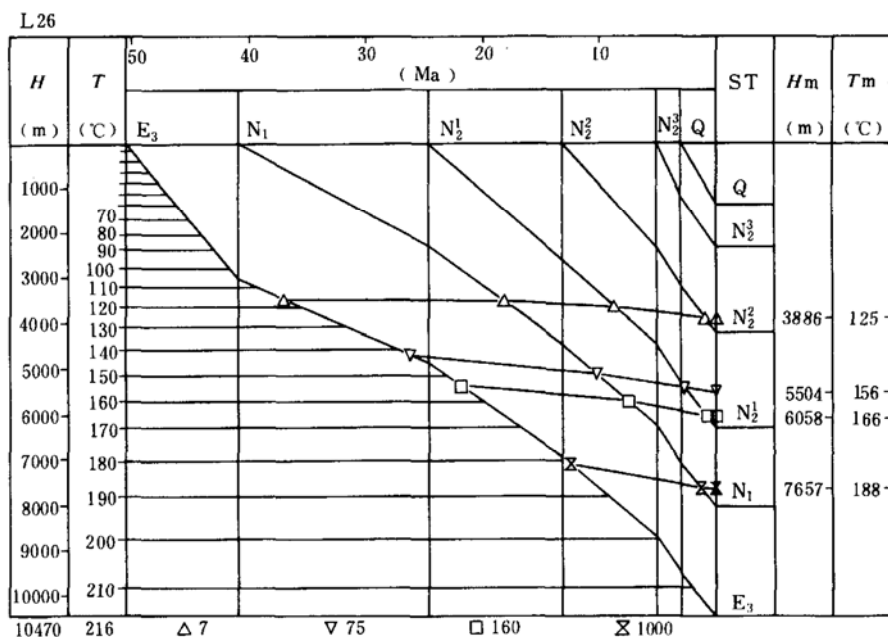


图 1 柴达木盆地红三旱三号构造上网点 L26 的三史演化图

图中 Δ , ∇ , $\square$, $\times$ 4 种符号分别代表油源岩进入低成熟 (TTI=7)、高成熟 (TTI=75)、过成熟 (TTI=160) 和湿气保存极限 (TTI=1000) 的 4 种油气演化阶段

图 1 直观地显示了以下内容: (1) 6 条折线代表 E_3 至 Q 地层在 50.5Ma 时段内的沉积压实埋藏历程; (2) 图的左侧通过深度 (H) 和温度 (T) 两套坐标的叠合, 描绘了温度随深度的递增过程; (3) 每组地层底部用 Δ , ∇ , $\square$ 和 $\times$ 四种符号, 表示该地层先后进入低成熟、高成熟、过成熟和湿气保存极限 4 个油气演化阶段的时序、深度和温度; (4) 相同符号的连线则通过时间、温度和深度三个坐标轴, 勾画出不同成熟度油气的演化趋势; (5) 4 条连线在 $t=0$ Ma 垂线上的交点, 代表该网点处当前的垂向油气成熟度分布及其埋藏状态, 在右侧的 H_m 和 T_m 栏内分别列出各演化阶段的门限深度和门限温度及相应的层位。就网点 L26 而言, 3886m 和 125.3°C 即为可望发现初始成熟油的门限深度和门限温度。

2.2 二维发展剖面图

由于对 703 个网点模拟结果中的所有同类数据 (如某油气成熟阶段的门限深度, 某时段某地层底界的 TTI 指标值等) 进行了三维空间超曲面拟合, 因此, 网点覆盖区内的二维剖面可以取任意走向, 因而这样的二维剖面可以无限多。为节省篇幅, 图 2 中只给出其中较短的 1-1' 剖面为例。

由图 2 可见, 同一网点上 4 个不同地质时代的剖面可组合成发展剖面, 它直观地显示柴西

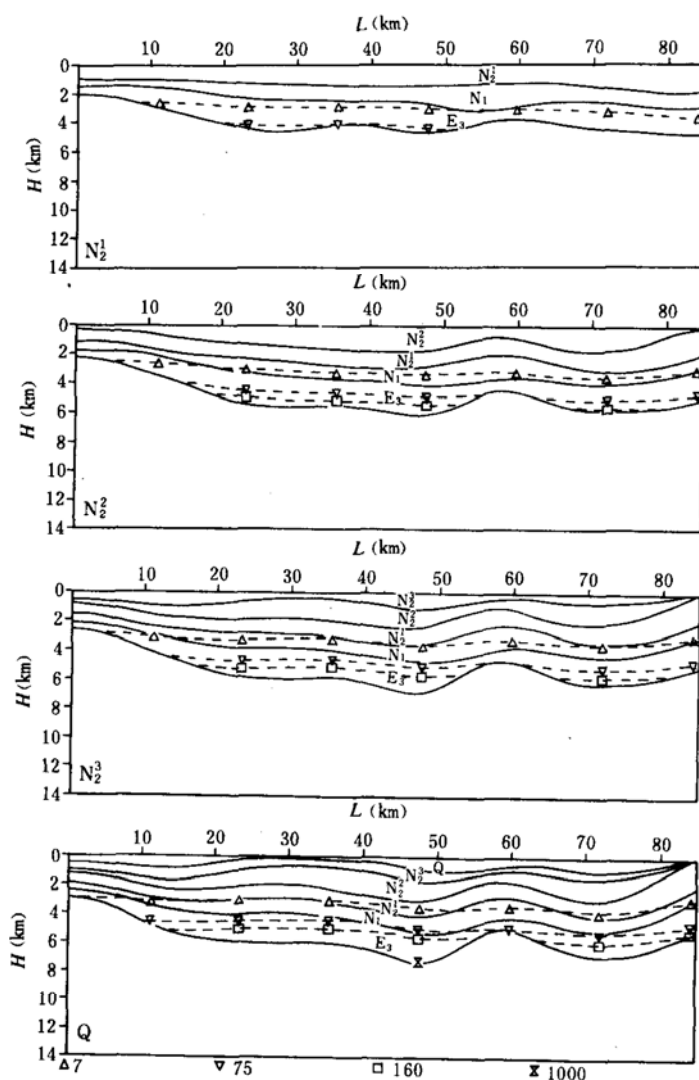


图2 柴达木盆地柴西地区 1-1'号沉积埋藏与油气成熟发展剖面图

图中 Δ , ∇ , $\square$, $\times$ 4 种符号同图 1; N_1^1 , N_2^1 , N_3^1 和 Q 分别代表 4 个地质时期的油气成熟发展状态;
 H 为垂直深度 (km); L 为离剖面起始点的水平距离 (km)

地区的盆地发展伴随油气成熟演化的进程。

2.3 二维平面图

就 703 个网点模拟结果形成的数据集性质而言,由计算机能直接生成的二维平面图可以包括各个地史时期各组地层的埋深(或厚度)图系列,温度等值线图系列,以及 TTI 等值线图系列等;然而,这些系列图都是中间性基础图件,难于直接用于油气资源远景预测。实际上,通过软件开发,可基于同一个数据集生成一批能直接有助于油气资源远景预测的分析性二维平面图,例如:(1)油气成熟演化阶段分区图,(2)初始成熟门限深度(或温度)图,(3)液态窗厚度图,(4)干气垫层厚度图等。作为例子,图 3 中给出油气成熟演化阶段分区图,图中 1, 2, 3, 4 标出的圈闭线分别代表当今时刻该处第三系油源岩达到最高油气成熟阶段的平面分布范围。

图 3 实质上是一种油气成熟地热条件分区图,它勾画出全盆地范围的油气成熟的地热背景;若在图 3 的基础上配以生油岩系的有机质丰度资料,可对全盆地进行综合的地热-丰度分

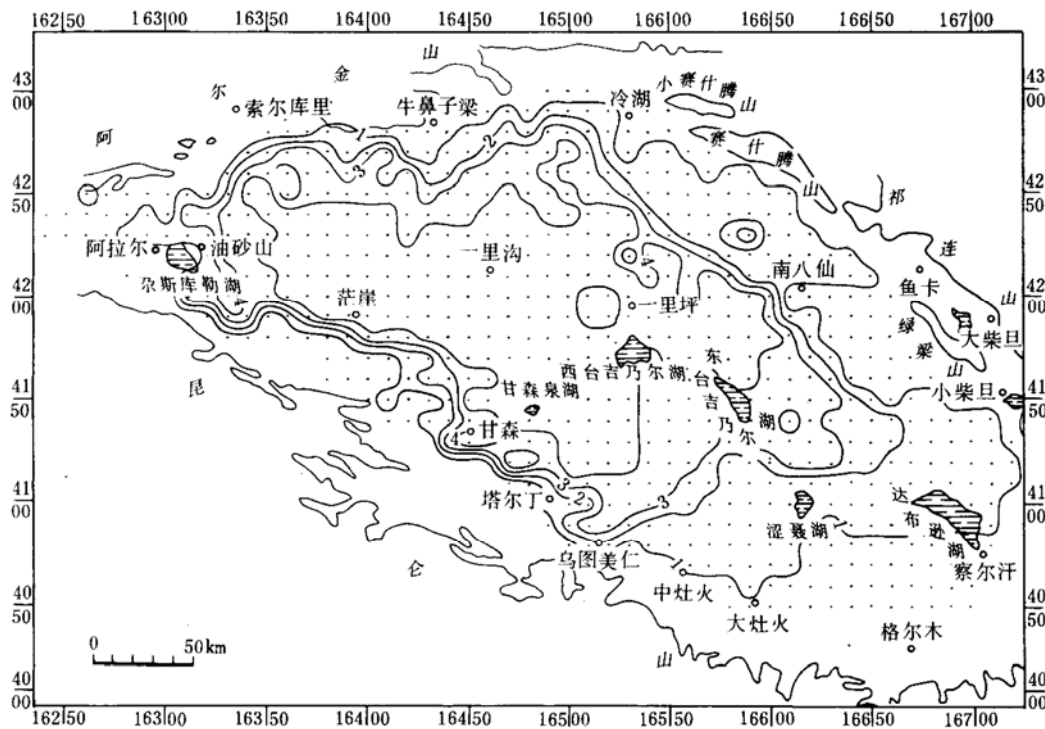


图3 柴达木盆地第三系沉积岩油气成熟演化阶段分区图

图中用1, 2, 3, 4标出的圈闭线分别代表当今时刻达到最高油气成熟阶段的范围, 其中1——低成熟, 2——高成熟, 3——过成熟, 4——湿气保存极限

区, 采用以下的地热-丰度指标作为三级分区的原则: (1) 根据油源岩有机质丰度与油气成熟地热条件的匹配程度划分大区: 油气远景区, 可能的油气远景区和非油气远景区; (2) 根据远景区内生油岩系的组合(多层生油或单层生油)及有机质丰度高低或排烃强度大小, 划分数个具不同生油潜力的亚区; (3) 在每个远景亚区内, 再根据油气成熟度、油气窗厚度及初始成熟门限深度等综合指标, 划分数个具不同勘探开发条件的油气资源远景小区。作者在另文¹⁾中对此作了详尽的讨论。

致谢 本文为青海石油管理局勘探开发研究院与中国科学院地质研究所合作项目的研究成果。后者为前者在资料、人员、交通等方面提供了许多方便, 特致谢忱。

参 考 文 献

- [1] Lopatin, N. V., *Ser. Geology*, Acad. Sciences Press, USSR, 1971, 3: 95.
- [2] Waples, D. W., *Bull. AAPG*, 1980, 64: 884.
- [3] Tissot, B. P., Welte, D. H., *Petroleum Formation and Occurrence: A New Approach to Oil and Gas Exploration*, Springer-Verlag, Berlin, 1978, 178.
- [4] Falvey, D. A., Deighton, T., *APEA*, 1982, 22: 65.
- [5] 陈墨香主编, 华北地热, 科学出版社, 北京, 1988.
- [6] 沈显杰等, 地球物理学报, 1994, 37: 89.

1) 沈显杰等, 青海柴达木盆地地热演化及油气形成的地热条件研究“课题研究报告”, 1993.