

恢复地层剥蚀厚度的最优化方法

郝石生 贺志勇 高耀斌 张有成

(石油大学研究生部)

内容提要 传统的恢复地层剥蚀厚度的方法是利用钻井、声波和地震资料。但限于各种地质条件而不能广泛应用。本文采取最优化方法,在计算成熟度的数学模型基础上,根据剖面上实测 R_0 值实现对热史的反演求得剥蚀厚度。

主题词 剥蚀厚度 最优化 有机质成熟度 镜质体反射率 不整合面

第一作者简介 郝石生 男 56岁 教授 石油地质学

厚度分析是研究构造发育、盆地演化和盆地形成机制等地质问题的重要手段之一。也是进行油气演化史、油气藏形成、流体运移等项研究的基础。由于各种地质作用如压实作用、抬升剥蚀、地层的塑性变形等均可以造成地层的减薄甚至缺失,因此,原始地层厚度的恢复在很大程度上决定着研究古构造、盆地演化等问题时的精度。传统的厚度恢复方法主要是根据地质资料进行推断的,其可靠性不仅取决于地质资料的准确程度,而且在很大程度上还取决于地质学家的个人经验。计算机技术的应用能够对传统的厚度恢复方法做一些改进。本文主要探讨一种用计算机进行剥蚀厚度恢复的数值方法。

一、问题的提出

传统的剥蚀厚度恢复方法之一是利用钻井和地震资料推断邻区的剥蚀量。这种方法在剥蚀面积较大或地层厚度横向变化较大时受到限制。全区都有剥蚀时则无法应用。

利用声波资料恢复剥蚀厚度的方法也受众多因素的影响,如岩性、断层、异常超压,测井曲线的质量等。更重要的是这种方法没有考虑地质时间对声波时差的影响。因为即使某个时期没有接受沉积,压实作用仍在继续。此外,这种方法定量性较差,不易估计准确(李奎文,1982;陈荷立,1980;Magara,1978)。

Dow(1977)提出一种用镜质体反射率估计剥蚀厚度的方法。这种方法有着广泛的应用,但也存在一些问题:在抬升剥蚀后再次沉降时,剥蚀面上下紧临剥蚀面的 R_0 值相差显著,其差别能反映剥蚀量。但在进一步埋深时,剥蚀面以上的镜质体反射率因初值较小而增长较快。而剥蚀面以下的镜质体因曾遭受过较高的温度,不超过这个温度时其增长是缓慢的,二者逐渐趋于接近。因此,从理论上说,这种方法求得的只是最小剥蚀厚度。此外,Dow还提出用 $\log R_0 - H$ (深度) 关系推到地表的值与 0.2% 比较来断判

剥蚀量。然而很多资料表明,有时这条直线在地表的投影值小于0.2%。Dow本人的资料中也有这种情况。小于0.2%的反射率值,在其它文献中也有报道。另外,深浅层的地温梯度不一定相同,而浅层常缺乏实测资料,外推也会造成误差。上述种种原因都可能对恢复的剥蚀厚度造成较大的误差。

二、最优化方法恢复剥蚀厚度的基本原理

如前所述,传统的利用镜质体反射率或声波时差恢复剥蚀厚度的方法一般不考虑地质时间对这些参数的影响,其结果必然导致一定的误差。特别是当新的沉积层厚度大于剥蚀厚度时,这些方法就不适用了。

现代有机质热成熟理论说明,有机质的成熟过程是由其所经历的热史决定的。因为热史(温度和时间)能够决定有机质的成熟度,所以它们之间的这种对应关系不仅能够通过热史推断成熟度,也使有可能根据有机质的成熟度来反推其所经受的热史。

虽然不同的热史可以导致相同的成熟度(时温补偿作用),但在构成热史的诸因素中每个因素都是由另外两个因素决定的(图1)。这三个参数只要知道其中的两个,第三个便可定量求得。例如已知成熟度和地质时间,便可求得古地温。在实际工作中,已知的条件往往还要多。例如笔者在求剥蚀厚度时,要求的只是在某一段时间内埋藏深度,其它时期的埋藏深度则可由其它层段的已知厚度得到。

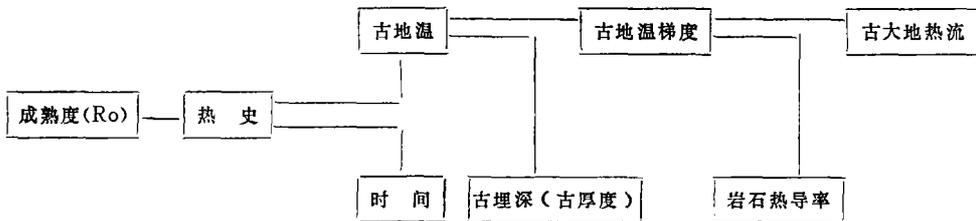


图1 热史的构成

Fig. 1 The thermal history tree diagram.

前人大量的研究表明:有机质的成熟度M可表示为温度T和时间t的函数:

$$M = F(T, t) \quad (1)$$

例如Лопатин(1971)、Waples(1980)、Tissot(1978)等人提出的方法。为了便于与实测成熟度指标进行对比和保证计算的精度,本文选用了Falvey(1982)提出的预测成熟度的模型:

$$R_{oc}^n = A \int_0^t \exp(\alpha, T(t)) dt + R_{to} \quad (2)$$

其中: t——时间(百万年);

T(t)——随时间而变的温度(℃);

n——常数(无量纲);

- A —— 常数 (百万年⁻¹) ；
- α —— 常数 (°C⁻¹) ；
- R_{t0} —— 当 t = 0 时的反射率 (%) ；
- R_{oc} —— 计算的镜质体反射率 (%) ；

知道了有机质的埋藏史和地温梯度，用上式可方便地求出有机质在任何时刻的成熟度。由于Falvey的A、α、n等参数是根据Hood和Shibaoka的诺模图求得，其精度可能有限。为此，笔者根据我国某盆地一口井的系统R_o实测值对上述模型进行了重新标定，用最优化方法求得了这三个参数。新的参数通过数口井的试用被证明是完全可行的：计算结果和实测结果吻合良好。基于上述计算成熟度的数学模型，就可以根据剖面上的实测R_o值实现对热史的反演，求得剥蚀厚度。

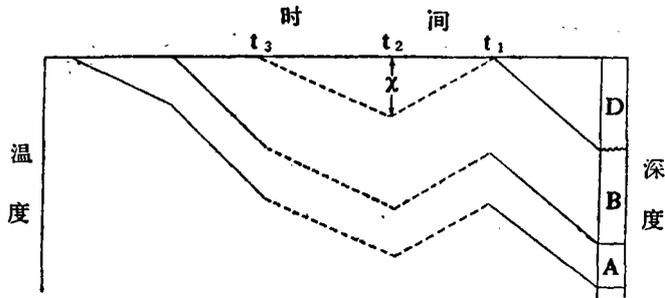


图 2 最优化方法恢复剥蚀厚度原理示意图

Fig. 2 A schematic burial history with erosion where the method can be applied.

在图 2 所示的演化剖面上，已知 A、B、D 层的厚度和年代，因而可以恢复出埋藏史曲线的实线部分。D 层和 B 层之间有不知厚度（设其为 x）的地层被剥蚀。首先根据地质条件分析大致确定出被剥蚀地层的沉积和剥蚀期。显然，如果剥蚀厚度 x 较大，A、B 两层在 t₁—t₃ 时间内所经历的古地温就较高，A、B 层的现今成熟度也就愈高。反之，如果 x 较小，成熟度就较低。这就是说，在一定条件下，现今 A、B 层的成熟度 M 只是剥蚀厚度 x 的单调函数：

$$M = F(T, t) = F(T(x, t), t) \tag{3}$$

于是，知道了 x 就可以计算成熟度。反过来如果成熟度 M 已知，也可以求算 x。

如果剥蚀面以下有 m 个镜质体反射率实测值 R_{oi} (i = 1, 2, …, m)，很显然，用前边的数学模型（(2) 式）根据不同的 x 值计算的镜质体反射率随 x 而变化。但是总可以找到这样一个 x 值，它使得计算得到的反射率值最接近实测值。这个 x 就是所要求的剥蚀厚度。

根据所选的数学模型，对应于第 i 个实测值的计算值为：

$$R_{oci} = \sqrt[n]{R_{t0}^n + A \int_0^{t_i} \exp(\alpha, T_i(x, T)) dt} \tag{4}$$

其中，t_i 为第 i 个实测值处的岩石年龄，T_i(x, t) 是由 x 决定的该点有机质所经历的热史函数，x 为剥蚀厚度（未知）。

于是可选最优化的目标函数为：

$$F(x) = \sum_{i=1}^m \left[\sqrt{\int_0^n \left(R + A \int_0^i \exp^T(\alpha, T_i(x, t)) dt - R_{o_i} \right)^2} \right] \quad (5)$$

上式中的 $F(x)$ 是根据某个 x 预测的 m 个反射率与实测的 m 个值之差的平方总和。它反映计算值与实测值的接近程度。显然使上式取得极小值 x 即是要求的剥蚀厚度。

本文选用最优化方法中的0.618法(黄金分割法)进行一维寻优求解,来寻找使 $F(x)$ 取得最小值 x ,效果良好。自变量 x 的初值范围可以根据实际地质情况选定。由于这种方法收敛很快, x 的范围可选得较大。如取0—5000米,一般的微机只需几分钟就可以使计算误差缩小到1米以内。

理论上,这种方法只要求在不整合面以下至少有一个实测值 R_o ,在有多个不整合面时,只要每两个不整合面之间有实测值,就可逐层恢复剥蚀量。但是由于测量精度及其它因素的影响,笔者建议恢复一层的剥蚀厚度至少要有三个以上的实测 R_o 数据。

三、计算实例

本文利用上述方法进行了几口井的试算,现举两例予以说明:

1. 安46井剥蚀厚度的恢复

安46井位于廊固凹陷中岔口地区,该井揭示的地层缺失馆陶组——沙三中、上段地层,上新统明化镇组以角度不整合覆盖于渐新统下部的 E_{s3}^{4-2} 地层上(相差约25百万年)。前人根据地震和钻井资料推断该井附近剥蚀约1800米。由于该凹陷属第三纪以来形成的年轻盆地,其大地热流值变化不会很大,所以笔者暂用根据实测静温资料编制的地温梯度等值线图插值求得其现今地温梯度来近似代替其第三纪以来的古地温梯度。本文用最优化方法求得的剥蚀厚度为2040米。

图3、图4是用计算机恢复剥蚀量后的埋藏史曲线及相应的计算结果与实测 R_o 的

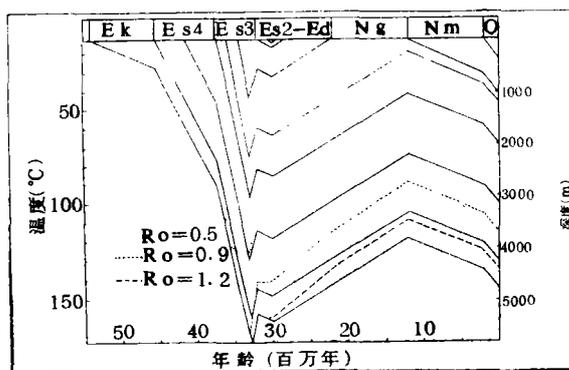


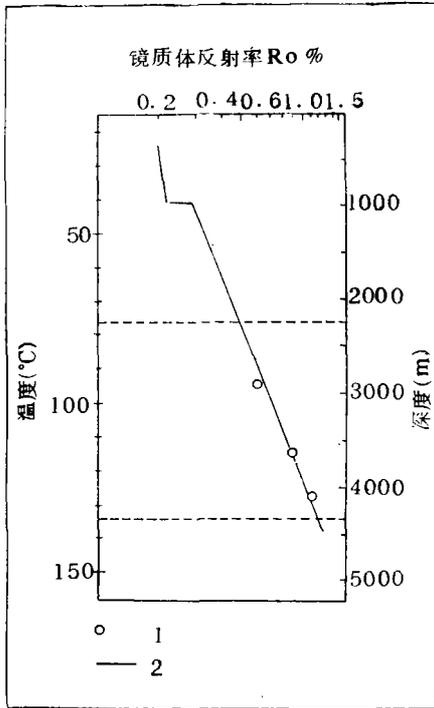
图3 用计算机恢复的安46井成熟史曲线。
计算的生油门限与地化资料吻合

Fig. 3 Burial history of An-46 Well after restoration of the eroded thickness. The calculated maturity coincides with geochemical data as shown in fig. 4.

比较。经过地层厚度恢复的计算结果从实测结果呈最佳拟合（均方差 $F(x)$ 最小）。本方法所求得的剥蚀厚度略大于传统方法恢复的结果是很容易解释的：因为在中新世末全区普遍遭受剥蚀，这段的时间的剥蚀量是无法用外推的方法得到的。

2. 固 5 井剥蚀厚度的恢复

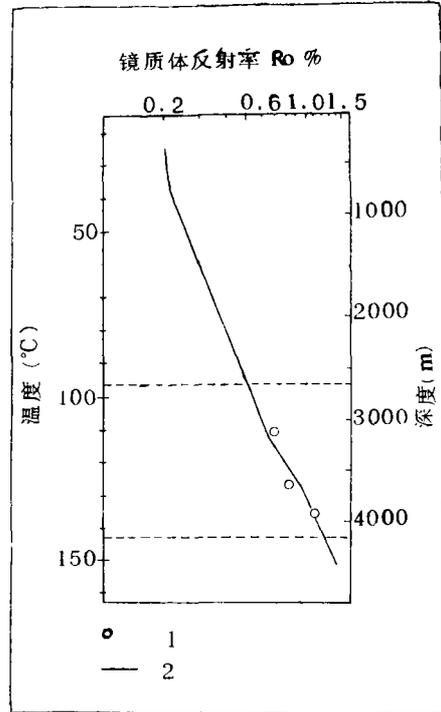
固 5 井也是廊固凹陷的一口井。在将断层的影响输入计算机后，用本文方法恢复的剥蚀厚度为 540 米。与笔者用其它地质资料推断的剥蚀量 450 米也是相近的。图 5 是恢复后的计算 R_o 曲线与实测数据的比较。



注：1、实测 R_o 2、计算 R_o 曲线

图 4 用计算机恢复剥蚀后输出的安 46 井成熟度面。计算的 R_o 和实测的 R_o 达到最吻合。

Fig. 4 Calculated vitrinite R_o after restoration of paleothickness v.s.measured data for Well An-46.



注：1 实测 R_o 2、计算 R_o 曲线

图 5 用计算机恢复剥蚀厚度后输出的固 5 井计算 R_o 与曲线实测数据的比较曲线

Fig. 5 Comparison of calculated vitrinite R_o with measured for Well Gu-5 after thickness restoration.

四、讨 论

从上面的恢复计算实例可见，本文所介绍的方法是可行的。计算结果与其它地质资料反映的剥蚀厚度相近。理论上说，本方法的精度是很高的。但要求有准确可信的 R_o 实测数据和可靠的古地温梯度等资料。这些数据的质量较差时，恢复结果也较差。

这种方法的最大优点是它可以用来恢复全区遭受剥蚀时和古埋深小于今埋深时的剥

蚀厚度。另外,由图1和式(1)可见,这种方法不但可以用来求古埋深,在地层没有缺失或缺失厚度已知时则可以用来求古地温或古地温梯度及其随时间的演化。当岩石热导率已知时,又可以用于求古大地热流及其随时间的变化。Lerche(1984)曾用相似的方法求算了北海盆地古大地热流的演化。可见该方法在油气演化史研究,古地温分析及构造演化研究中是有广泛应用前景的。

收稿日期1986年9月27日

参 考 文 献

- 范玉鸣等著,1982,最优化技术基础,清华大学出版社。
 Dow W.G., 1977, *Journal Petroleum Exploration*, No.7, p.79-99.
 Falvey D.A.et., 1982, *The APEA Journal*, Vol.22, Part 1.
 Lerche I.et., 1984, *Determination of Paleoheat Flux from Vitrinite Reflectance Data*, AAPG Bull., Vol.68, No.11.p
 Price L.C., 1983, *Journal of Petroleum Geology*, Vol.6, No.1, p.5-38.
 Tissot B.P.and D.H.Welte, 1978, *Petroleum Formation and Occurrence*, Springer-Verlag.
 Waples D.W., 1983, *Physical-Chemical Models for Oil Generation*, Colorado School of Mine, Quarterly, Vol.78, No.4.
 Лопатин Н.В., 1971, *Температура и Геологическое Время фактори Углефикации*, Известия Академии Наук СССР Серия Геологическая, №.3

AN OPTIMIZATION METHOD FOR RESTORATION OF ERODED FORMATION THICKNESS

Hao Shisheng He Zhiyong
 Gao Yaobin Zhang Youcheng

(Graduate School of China Petroleum university)

Abstract

Based on modern organic metamorphism theories, maturity of organic matter (often expressed as vitrinite reflectance R_o) can be modelled as a function of geologic time and paleogeotemperatures (i.e., the thermal history):

$$M = F(t, T). \quad (1)$$

When the paleogeothermal gradient is estimated, the thermal history varies with the eroded thickness X :

$$T = f(X, t) \quad (2)$$

Thus the model predicted maturity M is a function of the eroded thickness. If

a series of vitrinhte reflectance data below the unconformity are available in a well eg. (Roi, i= 1, 2, …, m), an object function can be setablished as:

$$I = \sum_{i=1}^m [Rc(Mi) - Roi]^2 \quad (3)$$

where Rc(Mi) is the calculated vitrinite reflectance from predicted maturity corresponding to each measured ROi. Therefore I is obviously a function of the eroded thickness. The computer program is deaigned to search for an optimal X which gives the smallest value of I, ie., the best fit of the calculated maturity to the measured.

Application of the method in two actuat wells is given to show the validity of the method.

国际矿床沉积学学术讨论会首次在我国举行

在我国首次召开的国际矿床沉积学学术讨论会于7月31日—8月4日在北京举行。来自26个国家和地区的493名学者和研究人员(包括88名外国学者, 305名中国代表)出席了会议。

中国科学院部委员、地学部常务副主任叶连俊教授作为大会主席主持了会议。出席此会议的还有许多国内外知名学者和科学家。

此次学术讨论会有三个主要内容: 与矿产有关的沉积学、锰矿沉积、湖泊沉积及其矿产。会上发表科研论文279篇。会议除报告和讨论外, 还组织了对瓦房子锰矿、长江三峡地质、胜利油田和山东湖泊沉积、四川峨嵋地质和自贡湖泊沉积、湖南锰矿、西藏地质等野外考察。

学术讨论内容和矿产资源与能源的形成、散化机制紧密结合, 与其它地质学科相互渗透以及重视新技术、新方法在该领域的应用是此次会议的特点。

此次会议对于我国沉积学界具有重要意义。它标志着中国沉积学研究受到国际学术界的高度评价都是在西半球召开, 在地球东端的中国召开尚属首次。