

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

关于用镜质体反射率恢复地层剥蚀厚度的问题讨论

何 生 王青玲

(中国地质大学, 武汉)



Wallace G. Dow 1977年提出在半对数直角坐标系下, 利用实测的镜质体反射率($R_0\%$)与其对应深度(H)的线性相关关系回归直线即称成熟度剖面估算地层剥蚀厚度的方法。本文根据镜体反射率主要受热力, 其次受有效加热时间的影响且具不可逆性, 对Dow的方法从理论到应用上作了进一步的探讨, 并给出了通过镜质体反射率与深度的线性关系恢复地层剥蚀厚度的三种方法。

镜质体反射率最先应用于煤岩学的研究, 作为确定煤变质作用的重要参数之一。1950年Marlies Teichmüller介绍了测定沉积岩中细粒有机质包体的反射率。六十年代开始引入油气地质研究。通过烃源岩的分散有机质中镜质体反射率的测定, 确定油气母质的热演化强度, 在油气的勘探、预测和评价诸方面取得了卓有成效的应用, 因而, 镜质体反射率测定成为油气地质研究中常规的分析, 积累了大量的资料。

镜质体反射率记载了有机质所经历的整个受热地质历史中最大温度的信息, 在正常的地质背景下, 它主要是最大温度和有效加热时间的函数。换言之, 主要是地温梯度和沉积速度的函数。在半对数直角坐标系下, 与埋深呈良好的线性相关关系。在暂时异常热流作用下, 仅是最大温度的函数。由镜质体反射率主要受温度, 其次受有效加热时间影响且不可逆的这一性质, 在一定条件下, $H-\log R_0\%$ 的关系图象简称成熟度剖面, 可用于地层剥蚀厚度的恢复和平均古地温梯度的求取。

一、问题和原理

1977年, Wallace G. Dow在《干酪根研究及其地质解释》^[1]一文中, 提出了应用不整合面处水平错开的成熟度剖面恢复剥蚀厚度的新方法, 其原文引述如下: “大的不整合经常产生如图6(即本文图1)所示的成熟度剖面, 两个线段的分支表明在第三系与中生界界面间缺失了约500m地层, 而且还表明在第三系沉积开始时的中生界表面的成熟度约为 $0.32R_0\%$ ($0.94-0.62$), 这个概算是由中生界顶面对应于第三系底界的成熟度来确定的。不同的斜率表明对于中生界和第三系具有不同的热演化历史。这一情况很可能反映中生界具有非常缓慢的沉积速率(更长的暴露时间)。现在地表第三系反射率为 $0.2R_0\%$, 说明第三系是一个连续下沉过程中的沉积, 而且目前地表第三系不存在侵蚀现象。”我们认为这段论述在估算剥蚀厚度的原理和方法上都有某些不妥之处, 有必要做进一步讨论。其基本原理如下。

本文于1987年11月在北京由中国地质学会召开的首届全国青年地质科技工作者学术讨论会上被评为大会优秀论文。
本文1988年4月收到, 8月改回, 沈晓毅编辑。

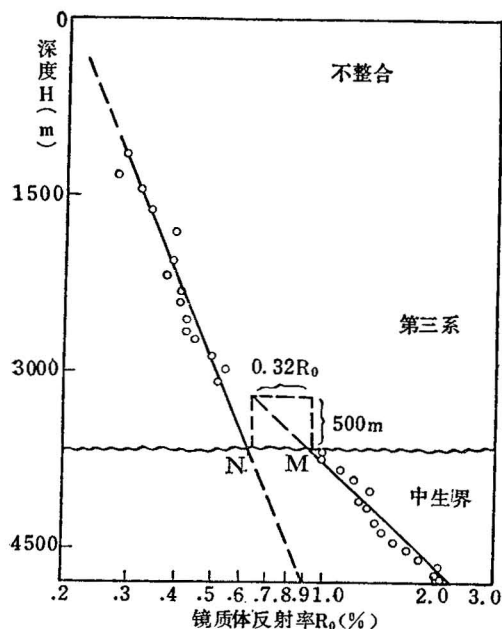


图 1 印度尼西亚一口井的成熟度剖面⁽¹⁾

Fig. 1 Reflectance profile of an Indonesian well showing the effect of a major erosional unconformity on kerogen maturation

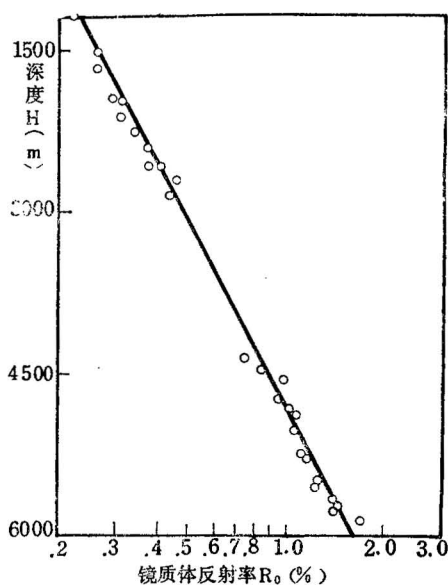


图 2 路易斯安那湾岸基准井的干酪根成熟度剖面⁽¹⁾

Fig. 2 Vitrinite reflectance maturation profile of the kerogen in the base well of the Louisiana Gulf Coast

(一) 建立成熟度剖面可按沉积地层剖面中是否存在侵蚀不整合面大体分为两大类型

1. 不存在侵蚀不整合面的沉积地层剖面, 且又无异常热流层 (如火成岩侵入体) 和低热导率高地温梯度的欠压实带 (即高孔隙流体压力带) 时, 成熟度剖面为简单的一条回归直线 (图2)。若存在欠压实带, 且该层的地温梯度基本不变或地温随深度呈线性增加时, 则成熟度剖面为两段相连的斜率不同的回归直线 (图3)。图中高压带的地温梯度明显大于上部的地温梯度。通常对于不同的成熟度剖面, 若有效加热时间相同, 直线较陡则反映地温梯度较低, 反之, 则反映地温梯度较高。

2. 存在侵蚀不整合面的沉积地层剖面, 从开始侵蚀抬升至再次埋深不整合面处开始达到等效深度 (如图4中, H所表示的M点的埋深) 为止, 这段地史时期内, 温度和时间作用对不整合面下的地层基本无效或有限, 因此, $R_0\%$ 无明显递进。该等效埋深的大小与不整合面以上新的地温场的地温梯度, 有效受热时间, 常年平均地表温度和恒温层的厚度有关。它可以是在不整合面处即上下地层界面间, 也可以是在不整合面以下, 由新的地温场作用而使得成熟度效果相同的深度, 本质上体现了温度和有效加热时间互补作用的结果, 同样在等效深度上能用等 $R_0\%$ 和等 TTI 值表示, 可广义的称等效值, 该值又可在单因素的动态条件下达到。如不整合面上覆地层在一定的温度下, 仅延长有效加热时间达到 (图4) 或在某个较短时间内, 仅有温度的线性增加达到, 但在地质上, 一方面如果这两种情况出现, 会增加处理问题的复杂性; 而另一方面, 这两种情况几乎不可能出现。因而, 可以说当再次埋深未开始达到等效值时, 则不整合面上下两分支成熟度剖面将水平错开。而当再次埋深开始达到等效值时, 水平断开的两分支成熟度剖面开始相连, 此时可按不整合面上下两套地层的 $\text{Log} R_0\%$ 的垂直梯度, 即随深度的变化率相近或大小与否细分为三种情况。

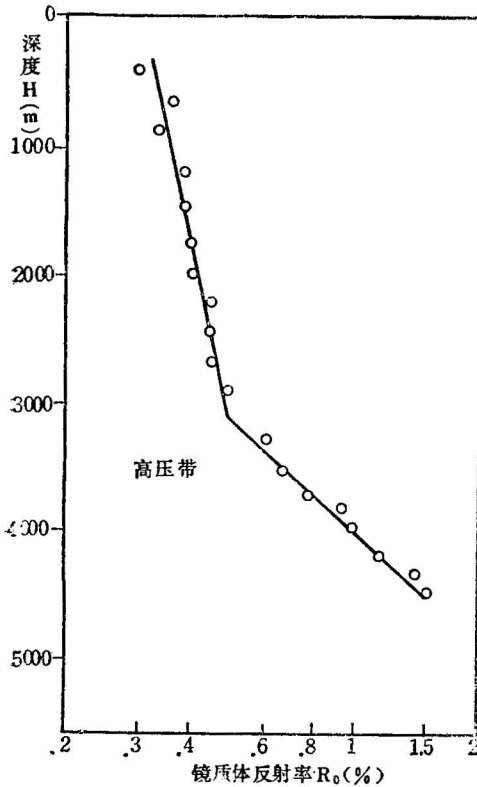
图 3 怀俄明州鲍德河盆地单井成熟度剖面⁽²⁾

Fig. 3 Vitrinite reflectance maturation profile showing effect of change in geothermal gradient in high-pressure zone of well in Powder River Basin, Wyoming

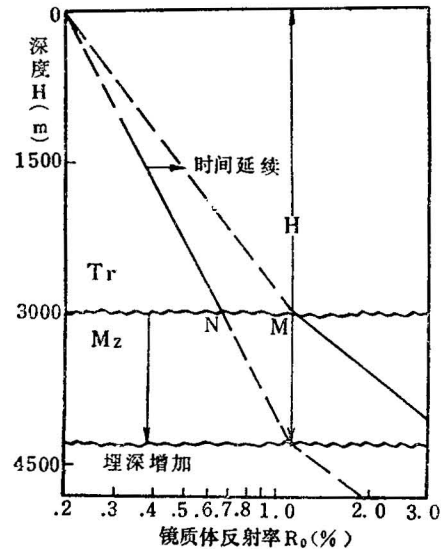


图 4 等效深度 (H) 示意图

Fig. 4 Schematic diagram showing equivalent depth

(1) 不整合面上下两套地层 $\text{Log}R_0\%$ 的垂直梯度近似, 即两分支成熟度剖面的直线斜率基本相同, 就是说不整合面上下不同时代的最大地温和有效加热时间的互补作用是等效应的。或者理想的认为地温梯度和有效作用时间基本一致, 那么水平错开的两分支成熟度剖面将直接连为一条回归直线。

(2) 不整合面上覆 (如第三纪) $\text{Log}R_0\%$ 的垂直梯度大于下伏 (如中生代) $\text{Log}R_0\%$ 的垂直梯度时, 水平错开的两分支成熟度剖面将会连接, 并使不整合面以下中生界超过等效值, 此刻, 不整合面下分支成熟度剖面的斜率将被改变。若不整合面以上 (如第三纪) 的地温梯度较大, 不但使中生界的 $\text{Log}R_0\%$ 垂直梯度变大, 而且有较快促成两分支成熟度剖面完全拟合为一条回归直线的趋势 (图5)。

(3) 不整合面以上 (如第三纪) $\text{Log}R_0\%$ 的垂直梯度小于不整合面以下 (如中生代) $\text{Log}R_0\%$ 的垂直梯度时, 水平错开的两分支成熟度剖面开始连接并随着埋深 (即温度和有效受热时间) 的不断增加, 下伏分支成熟度剖面上的各深度点才能依次达到等效值, 与上覆的分支成熟度剖面将最终逐渐完全趋向拟合为一条回归直线 (图6)。

当不整合面上下两段成熟度剖面完全拟合为一条回归直线后, 此时的成熟度剖面则全部掩盖了不整合面以下 (如中生代) 的地温场特征, 而只能反映不整合面以上 (如第三纪) 的地温场特征, 这种剖面不能用来恢复剥蚀厚度和平均古地温梯度。当不整合面下的分支成熟度剖面的斜率被新的地温场改造后, 原则上也不能用于恢复剥蚀厚度和平均古地温梯度。

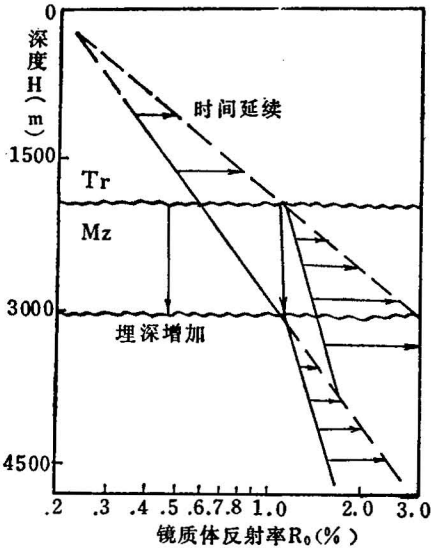


图 5 第二种情况拟合过程示意图

Fig. 5 Schematic diagram showing fitting process in the second condition

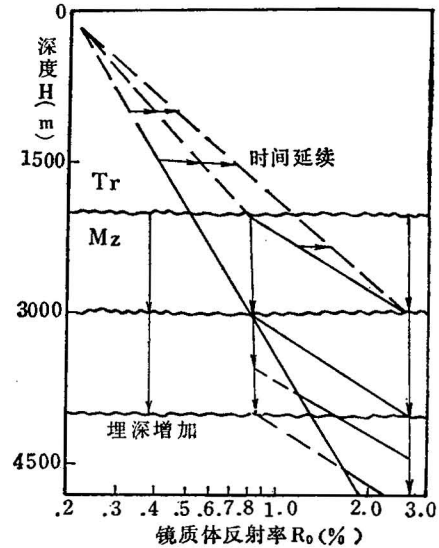


图 6 第三种情况的等效值变化轨迹示意图

Fig. 6 Schematic diagram showing the change locus of the equivalent value in the third condition

若再次埋深未开始达到等效值或未达到等效值时, 则说明不整合面上下水平错开或相连 (斜率未被改变和未被全部改变) 的两分支成熟度剖面, 可较真实地再现各自所经历的地质时代埋藏过程中的受热历史和地温场特征, 两分支回归直线的斜率仍主要受各自时代的地温梯度和经历的有效加热时间的控制, 这种保留下来的各自地史中 H - $\text{Log} R_0\%$ 的线性相关关系就是有可能用以恢复剥蚀厚度和平均古地温梯度的依据。

(二) Dow恢复方法的不足之处

1. 由上述原理和镜质体反射率的不可逆性可知, 图 1 给出的成熟度剖面属第二大类型, 图 1 中第三系开始沉积时, 中生界顶面 M 点 $R_0\%$ 值应为或接近 0.94%, 而不是 0.32%, 0.32% 只不过是 M、N 点间暂存的差值, 这一差值只表明 M、N 点间由于侵蚀不整合面的存在而造成变质程度的差异, 目前的差异减小到 0.32%。因此, 用 0.32% 恢复的剥蚀厚度 500m 仅是实际剥蚀厚度的一小部分。而 0.94% 才较真实地代表了中生界沉积期 M 点所达到的最大变质程度。当中生代末抬升后直至第三纪再次沉积达等效厚度这段时间内, 中生界的变质作用趋于停止, M 点的 $R_0\%$ 值无明显增进, 只有第三纪的沉积作用使其底面 N 点和中生界顶面 M 点的成熟度相等 (即开始达等效值) 时, 中生界才能由顶部至底部逐渐在第三纪地温场作用下继续热变质。

2. 在上述过程中, 随埋深的增加, 在第三纪地温梯度作用下, N 点的 $R_0\%$ 值不断增加, 而 M 点的 $R_0\%$ 值则基本不变, 所以其差值, $\Delta R_0\%$ 值不断减小, 至等效深度处等于零, 其变化规律如图 7 所示。

二、提出三种恢复剥蚀厚度的方法

(一) 外推法

利用不整合面上下水平错开的成熟度剖面或不整合面下斜率未改变的分支成熟度剖面直接上

延到地表附近的 $R_0\%$ 最低值，便可得剥蚀厚度。据Dow的研究⁽¹⁾地表附近 $R_0\%$ 最低值为 0.18—0.2%，如图 8 所示，可由中生界成熟度剖面上延至 $R_0\%$ 为 0.2%处，得剥蚀厚度 H' ，显然比Dow恢复方法给出的结果大得多。

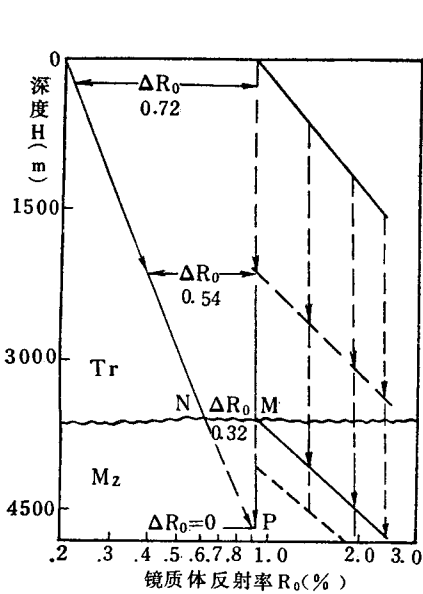


图 7 $\Delta R_0\%$ 值变化规律示意图
Fig. 7 Schematic diagram illustrating the change in $\Delta R_0\%$ Value

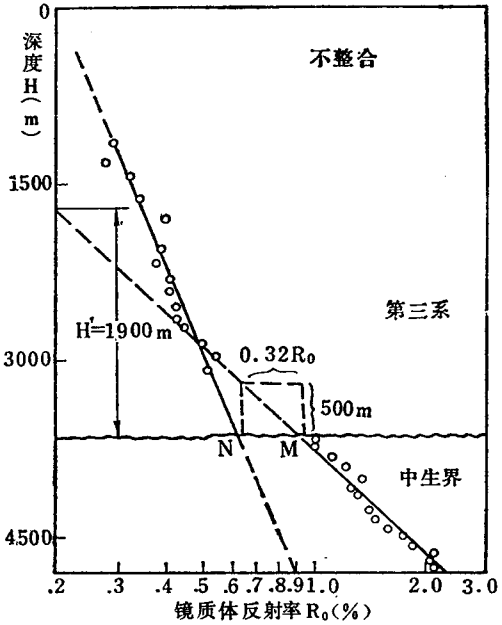


图 8 用成熟度剖面恢复剥蚀厚度方法的原理图
Fig. 8 Diagram showing the method for the reconstruction of the eroded thickness with a maturation profile

前述成熟度剖面的第二大类型中，第一种情况基本不能用于恢复剥蚀厚度，仅可在某些条件下，估算剥蚀厚度的上限值；第二种情况由于不整合面下分支成熟度剖面的建立可能误差较大，用此恢复剥蚀厚度将偏小；第三种情况当两分支成熟度剖面相连后，无论是不整合面下斜率未改变的分枝成熟度剖面仍保留全部还是部分，理论上均可用于恢复剥蚀厚度，方法与水平断开的相同，但后者需减去两剖面连接点至不整合面的残留地层厚度，此种情况若考虑时温因素的影响，可能给出的结果小于实际的剥蚀厚度，因而其结果可作为剥蚀厚度的下限值。

对一个地区可利用多口单井的分支成熟度剖面进行地层剥蚀厚度的恢复，从而得出该区剥蚀厚度的变化趋势，资料如允许可进一步绘出该区剥蚀厚度等值线图。

(二) 古地温梯度法

由恢复平均古地温梯度换算剥蚀厚度。严格地讲，古地温梯度是指地史中某时某空间位置地温在铅垂方向上深度每增加 100m 时的平均增量，实际上它是在垂直地层方向，当理想的认为岩石热导率匀一不变的条件下的地史中某时刻某空间位置的匀变温梯度。由于地质问题的复杂性，在考虑解决具体问题时，通常所采用的方法，多半只能获得一种现今以前的某地质时期，某空间位置垂向等效果的匀变温梯度，称为平均古地温梯度。前人已提出多种用 $R_0\%$ 值恢复平均古地温梯度的方法，如温度(T)-时间(t)- $R_0\%$ 量板法，TTI拟合法，公式法等^[3]。这里只简要说明该方法的具体步骤：由图 9 所示，首先在不整合面下（如中生界）分支成熟度剖面上求出任意两点在

中生代所经历的最大温度，用其差值(ΔT)除以两点间的深度差(Δh)，便得两深度点之间的平均古地温梯度(G)，并把它作为中生代的平均古地温梯度。然后再除以该分支成熟度剖面中某点 A 减去中生代常年地表平均温度的最大温度(T_A)，再加上古恒温层深度，则可得该点在中生代末抬升前的最大埋深(H_A)，尚需减去该点到不整合面残留的地层厚度(h_A)，即可得剥蚀厚度(h)。在此必须强调两点：一是尤其要注意现今实测的 $R_0\%$ 值或侵蚀不整合面下分支成熟度剖面是否代表了被剥蚀地层沉积时期的地温场特征；二是如何科学合理地选取有效加热时间的界限。

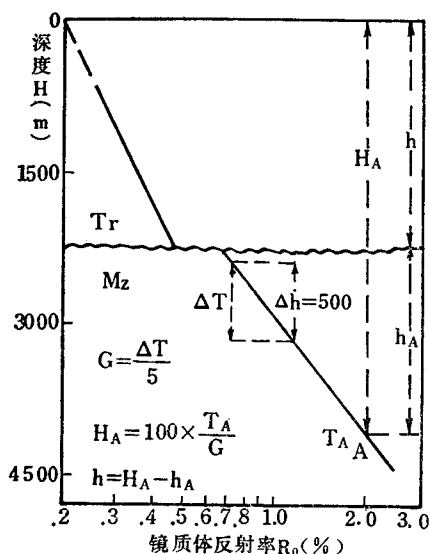


图 9 用求取平均古地温梯度恢复剥蚀厚度方法的原理图

Fig. 9 Diagram showing the method of obtaining the eroded thickness through the computation of palaeogeothermal gradient

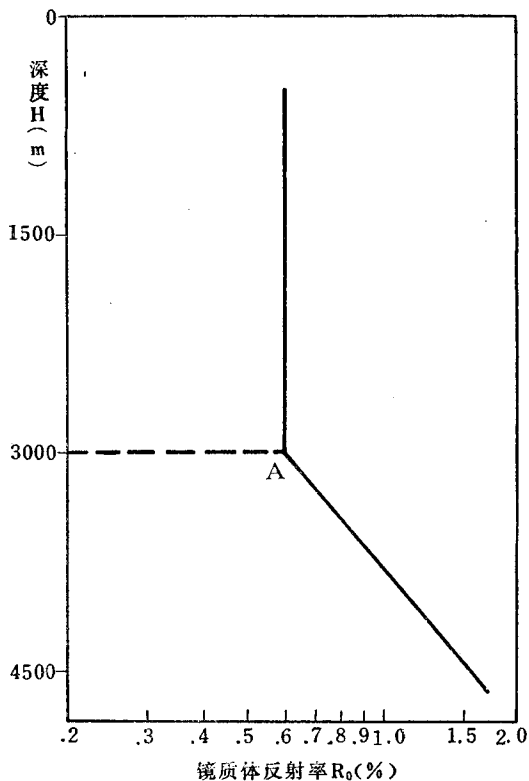


图 10 用同一层面 H - $\text{Log}R_0\%$ 的线性相关关系线恢复剥蚀厚度方法的原理图

Fig. 10 Diagram showing the method of estimating the eroded thickness with a correlative linear graph of depth versus vitrinite reflectance in the same bedded plane

(三) 等效深度法

在无完好的单井成熟度剖面时，可在横向上可对比的范围内对不整合面下（如中生界）某一套地层的同一层面，假设抬升前埋深或上覆地层厚度变化不大的条件下（此时其成熟度基本相同），如果由于后期构造运动，沉积作用使该层面现处于不同的埋深，那么我们可在半对数直角坐标系下做该层面不同埋深所测 $R_0\%$ 值的对数座标与其对应深度的算术座标的线性相关关系图，如图10。图中A点以上 H - $\text{Log}R_0\%$ 的线性关系为一垂线即 $R_0\%$ 值基本不随深度变化，而A点以下 $R_0\%$ 值随埋深增加而增大，这种现象说明A点的深度相当于该层面或该套地层在剥蚀前的平均最大视埋深，若超过A点的埋深，可粗略的认为即超过了等效深度，当然所采用层面或地层的 $R_0\%$ 值则按新的地温和有效加热时间互补关系的规律增进。参考A点的深度，并首先由不整合面上下地

层各自时代的古地温和有效加热时间的互补作用体现的 $R_0\%$ 值的等效应的深度关系（这一关系可通过研究区的 $H-R_0\%$ 的相关关系曲线求出），以及新老恒温层的深度等关系进行校正，方可得到剥蚀之前的较确切的埋深，然后减去不同位置上被剥蚀地层的残余厚度，便可得到剥蚀厚度，进而可绘出剥蚀厚度等值线图。应指出的是，若中生界抬升前该层面起伏较大，此方法不适用。

三、可行性讨论

1. 地质问题是复杂多变的，并有各自的特殊性，用 $H-\text{Log}R_0\%$ 的线性相关关系图恢复地层剥蚀厚度和平均古地温梯度的可靠程度，同样取决于对区域构造史，沉积史，热事件史以及有机质的热演化史等地质问题正确地，全面地了解，认识其规律性。

2. 镜质体反射率能否正确地反映地质事件，除去测定的仪器和技术条件以外，还依赖于对镜质体反射率与地层中不同地质时期的最大温度，有效加热时间，地温场的稳定性和地层压力，镜质体本身及其周围富氢组份的含量与抑制作用^[4]和有机质类型诸影响因素之间的相互关系以及所遵从的热力学，化学动力学机理和其统计规律性的认识和理解。区别、筛选出那些曾经遭受过风氧化的，再循环的，经历异常热流的，欠压实带的以及构造作用影响的和具有正常地质意义的测定值。客观地建立 $H-\text{Log}R_0\%$ 的线性相关关系回归直线图，乃是解决问题的关键，在研究过程中最好能结合其它恢复方法综合分析，互相加以验证。

3. 目前认为地表附近 $R_0\%$ 最低值在0.18—0.2%之间，虽有一定的合理性，但对其稳定分布的深度范围仍需研究。有关估算地史中常年平均地表温度和恒温层深度的方法已有许多定量的研究。多用类比的方法，对结果的精度常带来一定的误差。

4. 在上述一些恢复方法中，我们将开始侵蚀抬升至再次埋深开始达到等效值或逐渐达到等效值的这段时间作为侵蚀不整合面下覆地层的无效加热时间考虑，且有效加热时限的确定目前多半是经验性的，大概的。这些做法都可能引起一定的误差。

本文在研究写作过程中，一直得到陈荣书副教授的热心指导，谨在此致谢！

参 考 文 献

- [1] Wallace G. Dow, 1977, Kerogen Studies and Geological Interpretation. Journal of Geochemical Exploration, Vol. 7, No. 2, pp. 79-99.
- [2] John M. Hunt, 1979, Petroleum Geochemistry and Geology. pp. 328-339.
- [3] 汪安, 熊亮萍, 杨淑贞, 1985, 地热与石油. 科学出版社.
- [4] 朱抱荃, 1987, 异常低的镜质体反射率（抑制作用）——生油岩研究的一个重要问题. 石油勘探与开发, 第14卷, 第2期, 第40—45页.

THE ERODED THICKNESS RECONSTRUCTED BY VITRINITE REFLECTANCE

He Sheng and Wang Qingling

(China University of Geoscience, Wuhan)

Abstract

In the evaluation of oil and gas resources, it is extremely important in the study of the history of hydrogen source rock burial and thermometamorphic pro-

cess to reconstruct the eroded thickness of a stratigraphic section with a big erosional hiatus.

The sudden change in the value of vitrinite reflectance ($R_0\%$) at an unconformity surface indicates the existence of a stratigraphic erosional hiatus under the normal geologic condition. The eroded thickness may be evaluated by measuring the vitrinite reflectance maturation section, that is, a regressive linear graph expressing a good linear correlation between the arithmetic coordinate of depth (H) for a drill hole and a logarithmic one of vitrinite reflectance ($R_0\%$).

It has been reported that the eroded thickness is reconstructed by the section of vitrinite reflectance maturity disrupted horizontally at the unconformity surface (Wallace G. Dow, 1977). In this paper, the method is further studied in terms of the theory and application according to the unreversible character of the vitrinite reflectance due to the influence of thermodynamics and effective heating time. Then, three methods for the construction of the eroded thickness are given: (1) the eroded thickness is directly obtained by direct extrapolation of $R_0\%$ to the lowest value at the ground surface using the horizontally disrupted unconformity surface or the slope below the unconformity surface without changing the branch maturation section; (2) the eroded thickness may be indirectly obtained by calculating the average palaeogeothermal gradient at the maturation section below the unconformity; (3) the eroded thickness may be also reconstructed by the correlative linear graph ($H-\text{Log}R_0\%$) on the same bedding plane.

There may be some errors in measuring vitrinite reflectance, establishing the regression line ($H-\text{Log}R_0\%$) and reconstructing the eroded thickness and finding average palaeogeothermal gradient.

作 者 简 介

何生, 1956年元月生。1982年毕业于武汉地质学院石油专业, 现为中国地质大学(武汉)石油系石油教研室助教, 通讯地址为: 武汉市武昌区喻家山。