

文章编号: 1008-0244(2001)01-40-06

镜质体反射率(R_O)推算古地温研究进展

蒋国豪 胡瑞忠 方维萱

(中科院地球化学研究所矿床开放室, 贵阳, 550002)

摘要 沉积盆地形成和演化过程中,盆地的热体制是动态变化的,研究的方法也多种多样。文中较详细地介绍了各种运用有机质成熟度来研究盆地热演化的方法,并对它们的优缺点进行了评价。因此得出适合自己工作区的两种方法:A. Hood图解法和镜质体反射率梯度法。前者是较为成熟的方法,而后者是较新的方法。

关键词 热演化 镜质体反射率 镜质体反射率梯度 古地温

中图分类号: TE12.1+11

文献标识码: A

沉积盆地形成和演化过程中,盆地的热体制是动态变化的,它既受控于盆地的沉积与埋藏、压实、构造运动、吸放热反应以及地下水和火山岩浆活动,也受盆地底部热流变化影响。盆地动态热体制的研究可归结为盆地热历史的重建或恢复,在盆地尺度下,盆地内的沉积地层中有机质、矿物、流体等地质客体可以记录古地温及其演化历史,即利用古温标或古地温计来反演地层的热历史和盆地底部热流。主要利用镜质体反射率(R_O)、镜质体反射率梯度、磷灰石裂变径迹、牙形石色变指数(CAI)、自生矿物组合、流体包裹体测温、氧同位素(^{18}O)和 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 比值进行研究。其中镜质体反射率适用于有机质丰富的沉积盆地,磷灰石裂变径迹对碎屑岩地层古地温的测定较为有效,牙形石色变指数适用于古生物丰富的地层,自生矿物组合适用于较为年轻的盆地,流体包裹体应用较为广泛。

有机质成熟度指标可以用来进行古地温推算,它是有机质热成熟作用程度的衡量标准,是以有机质各组分在热降解作用过程中其化学性质和物理性质发生的变化为基础建立的。各成熟度指标均以特定的化学动力学反应和温度相联系,它们不仅与所经历的最高温度有关,也与生油层的整个受热历史有关。镜质体反射率是一种有效的有机质指标。

镜质体指的是高等植物木质素经生物化学降解凝胶化作用而形成的凝胶体。从泥盆纪以来,地层中或多或少含有镜质体,而镜质体在煤和碳质泥岩中含量最高,镜质体本身属于Ⅲ型干酪根^[1]。镜质体反射率即镜质体表面反射光与人射光的比率,通常用油浸物镜下测得的反射率值,用 R_O 表示。

在五六十年代通过镜质体反射率与温度关系的变化曲线推算古地温,如Karweil图解(图1-1,经Teichmuller, 1971^[2]校正)。在七十年代, Cannan(1974)^[3]和Hood(1975)^[4]等提出的推算古地温的公式应用较多。八十年代主要采用拟合计算方法模拟和重建生油层的受热历史。近年来我国也有不少专家提出了一些自己的计算方法(庞雄奇等 1993^[5], 胡圣标 1995^[6], 卢双舫等 1996^[7], 冉启贵等 1998^[8], 肖贤明等 1998^[9])。

另外,在镜质体缺少的地区,如果有固体沥青,也可以用固体沥青反射率代替镜质体反射率。Jacob(1985,转引自文献[1])对镜质体反射率和沥青反射率的对比研究得出它们的相关关系式:

$$R_O = 0.618R_b + 0.4$$

式中 R_b 为固体沥青反射率。丰国秀和陈盛吉(1988)^[10]也得出相似的经验公式:

$$R_O = 0.3195 + 0.679R_b$$

相关系数 $r = 0.98$ 。

1 镜质体反射率的测定

镜质体反射率的测定是将岩石样品制成光片,抛光(如果岩石样品中有机碳含量低,须将有

收稿日期:2000-04-06; 修回日期:2000-10-20

基金项目:国家“973”项目(批准号G1999043210)

第一作者简介:蒋国豪(1974-) 男 博士研究生 从事矿床地球化学与盆地热演化研究

机质浓缩,制成干酪根,用树胶粘结,再抛光),用显微光度计测定光面的镜质体反射率。镜质体一般呈透镜体状和脉状,平行于层面^[1]。周中毅等(1983)^[11]经研究提出用原岩制备的光片比用干酪根制备的光片测得的镜质体反射率值可靠。

2 古地温的推算

2.1 早期推算方法

2.1.1 Karweil 图解 Karweil(1955)^[12]通过对煤的模拟实验得出有机质成熟度、温度和受热时间之间的关系图(图 1),后经 Teichmuller(1971)^[2]用镜质体反射率指标校正后得到广泛的应用。

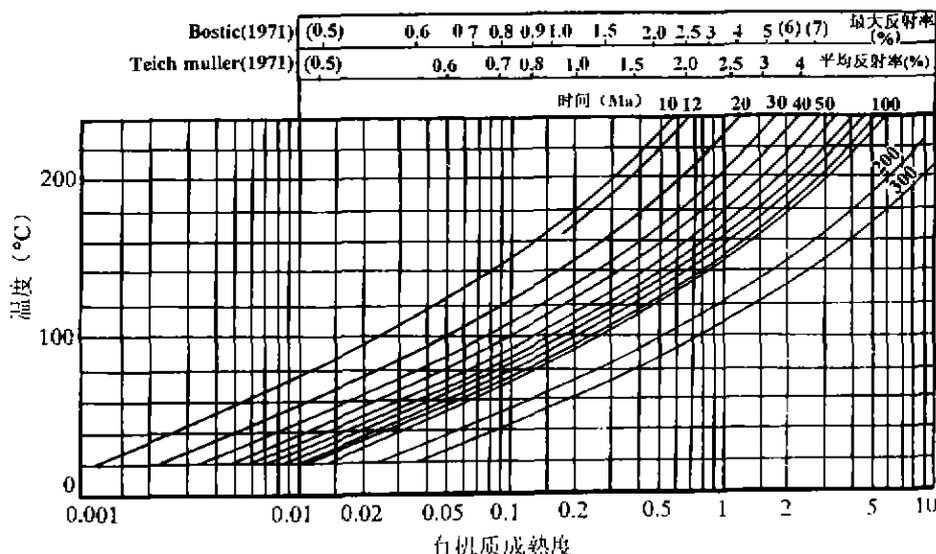


图 1 Karweil 有机质成熟度、温度和受热时间关系图(引自周中毅 1992^[11])

Fig. 1. Relation between organic maturity, temperature and effective heating time.

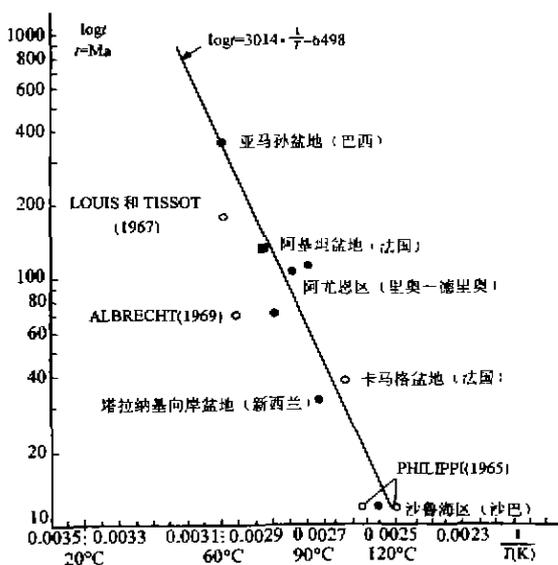


图 2 一些盆地生油临界点温度与地层年龄之间的关系

Fig. 2. $\log t - 1/T$ diagram.

(据 Cannan, 1974^[3])

Hood(1975)^[4]认为该图解的缺点是使用的活化能偏低,夸大了受热时间的作用^[1]。

2.1.2 Cannan 法 Cannan(1974)^[3]根据一些实际资料的统计结果得到生油界点温度与地层年龄之间的关系式:

$$\lg t = 3014/T - 6.490 \quad (1)$$

式中 T 为绝对温度, t 为地层年龄(图 2)。

本方法只适用于连续沉降盆地,而实际连续沉降盆地寥寥无几。而用地层年龄代替受热时间也不太合适,应与有效受热时间相关^[1]。

2.1.3 Hood 法 Hood 等(1975)^[4]提出了一个反映有机变质程度与温度和受热时间的新模式。有机质变质标尺(Lom)与镜质体反射率等成熟度指标关系见图 3。有机质变质标尺(Lom)、最高古地温(T_{max})及有效受热时间(T_{eff})的关系见图 4。

2.2 拟合计算法

目前常用的时间-温度指数(TTI)模型有以下几种:

2.2.1 Lerche 时间-温度指数 (TTI) 模型

Lerche 等 (1984)^[13] 直接从镜质体反射率的热演化动力学推导出一系列数学公式, 通过计算镜质体反射率的演变过程, 并结合实测的镜质体反射率, 拟合计算盆地的热演化史。其模型如下:

LOM #	煤		孢粉碳化 作用 ²⁾	热变指数 ³⁾	镜质体 反射率 ⁴⁾
	煤阶 ¹⁾	BTU [*] ×10 ⁴			
2	I	8		1-无变化 (黄色)	
4				2-轻微变化 (橙黄色)	
6	II	9			
8		10			
10	III	11	(45)	黄色	0.5
12		12	(40)		
14	IV	13			
16		14			
18	V	15	(35)	黄色-深棕色	1.0
		20			
		25		3-中等变化 (棕色)	1.5
		30			
		35			
		40			
		45			
		50		4-强烈变化 (黑色)	2.0
		55			
		60			
		65			
		70			
		75			
		80			
		85			
		90			
		95			
		100			
		105			
		110			
		115			
		120			
		125			
		130			
		135			
		140			
		145			
		150			
		155			
		160			
		165			
		170			
		175			
		180			
		185			
		190			
		195			
		200			
		205			
		210			
		215			
		220			
		225			
		230			
		235			
		240			
		245			
		250			

图3 有机质标尺 (LOM) 与其他有机质成熟度指标的关系

Fig. 3. Some scales of organic metamorphism. (据 Hood 等, 1975)

I, 褐煤; II, 次烟煤; II₁, 高挥发性烟煤; II₂, 中挥发性烟煤; II₄, 低挥发性烟煤; III, 半无烟煤; III₁, 无烟煤; * BTU 是英制热单位。

$$TTI = \int_0^t \exp[(T(t) - T_c)/T_d] dt \quad (2)$$

式中 TTI 为时间温度指数; T_c 为临界温度, 一般取地表温度值, °C; T_d 为与反应速度有关的待定指数, t_i 为样品所经历的时间。

据实测 R₀ 值, 计算时间温度综合指数 VTTI:

$$VTTI_j = (R_j^{1/2} - R_s^{1/2}) / (R_m^{1/2} - R_s^{1/2}) \quad (3)$$

式中 R_j 为 j 测点的 R₀ 值, %; R_s 为地表 R₀ 值, 一般取 0.2%; R_m 为实测剖面中测得的最大 R₀ 值 (%)。

古地温 T(t):

$$T(t) = T_0 + q(t) \int_0^t dt / k(z, R_n) \quad (4)$$

$$k(z, R_n) = k_m^{1-\varphi(z, R_n)} \cdot k_f^{\varphi(z, R_n)}$$

式中 T(t) 为随时间、埋深而变的温度; z 为埋深 (m); t 为时间 (10⁶a); q(t) 为古热流值; T₀ 为地表温度 (°C); k(z) 是热导率; k_m 是岩层骨架热导

率; k_f 为岩层中孔隙流体热导率; φ(z, R_n) 为地层随埋深 (z) 和岩性 (R_n) 变化的孔隙度。

由 (2) 式导出一个理论推算的时间-温度综合指数 CTTI:

$$CTTI_j = VTTI_j / TTI_m = \int_0^t \exp[(T(t) - T_c) / T_d] dt / \int_0^t \exp[(T(t) - T_c) / T_d] dt \quad (5)$$

$$\epsilon_{min} = \sum_{i=1}^n [(VTTI_i - CTTI_i) q(t) T_c T_d]^2 \quad (6)$$

$$q(t) = q_0(1 + \beta t)$$

式中 ε 是 VTTI 与 CTTI 的偏差; β 是表征沉积盆地在地史中热流变化的特征参数 (变化率); q₀ 为现今沉积盆地大地热流值; t_m 为剖面中最深样品所经历的时间 (10⁶a)。因为本模型适用于地史中古热流呈线性变化的盆地, 庞雄奇等 (1993)^[5] 提出了非线性变化的模拟计算。VTI_{jk} 和 TTI_{jk} 分别表示第 j 层第 k 个 R% 样品测值点的实测时间指数和理论计算的时间指数相对值:

$$VTI_{jk} = (R_{jk}^{1/2} - R_s^{1/2}) / (R_{jm}^{1/2} - R_s^{1/2}) \quad (7)$$

jk 为 j 层中第 k 个样品, VTI_{jk} 由第 j 层第 k 个样品的 R% 计算出的时间温度指数; R_{jk} 乃第 j 层第 k 个样本点实测的镜质体反射率 (%); R_{jm} 为第 j 层埋深最大点实测的镜质体反射率 (%)。

$$TTI_{jk} = \int_0^t \exp[(T_{jk}(t) - T_c) / T_d] dt + \int_0^t \exp[(T_{jk}(t) - T_c) / T_d] dt / \int_0^t \exp[(T_{jk}(t) - T_c) / T_d] dt \quad (8)$$

式中 TTI_{jk} 为第 j 层第 k 个样本点理论计算出的时间温度指数; T_{jk}(t) 为第 j 层发育期的下

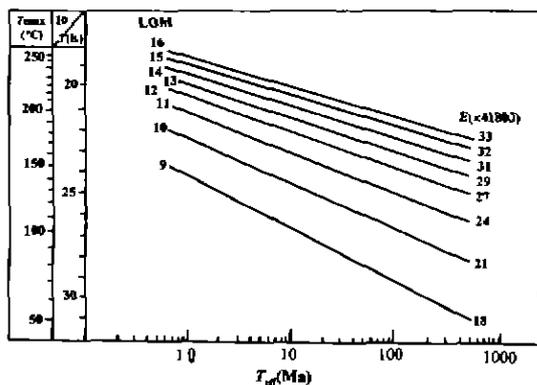


图4 有机质变质标尺 (LOM)、最高古地温 (T_{max}) 和有效受热时间 (T_{eff}) 之间的关系

(据 Hood 等, 1975^[4])

Fig. 4. Relation of LOM to maximum temperature and effective heating time.

伏第 j 层中第 k 点的古地温; $T_{jk}(t)$ 是第 j 层沉积发育期第 j 层内第 k 点的古地温; t_i 为第 i 层沉积发育经历的地史时间; t_{jk} 为第 j 层沉积发育期该层层内第 k 点经历的地史时间。
古地温 $T_{ijk}(t)$:

$$T_{ijk}(t) = T_{i0} + GT(i)Z_{ijk}(t) \quad (9)$$

式中 $GT(i)$ 第 i 层沉积地层剖面中的古地温; $Z_{ijk}(t)$ 为第 i 层沉积发育期的下伏的第 j 层中第 k 点的古埋深; k 是第 j 层中 $R\%$ 测值样本序号; T_{i0} 为第 i 层沉积期地表的温度(20℃)。

表 1 其它模型表
Table 1. The other models

(1) Lopatin-waples 模型	$TTI = \int_0^{t_i} 2^{T(t)-1051/10} dt$	(11)
	$R_0 = A + B \ln TTI$	
(2) Royden 模型	$TTI = \int_0^{t_i} 2^{T(t)/40} dt$	(12)
	$\ln R_0 = A + B \ln TTI$	
(3) middleton-Falvey 模型	$TTI = \int_0^{t_i} \exp[CT(t)] dt$	(13)
	$R_0 = 0.2^a + b TTI$	
(4) EASY 模型	$F = f(T, t)$	(14)
	$R_0 = \exp(A + BF)$	
(5) 冉启贵等(1998)多阶段连续反演模拟	$TTI(I, j) = TTI(I, j) = \sum_{k=1}^{j-1} \int_{t_{k-1}}^{t_k} f(T, t) dt + \int_{t_{j-1}}^{t_j} f(T, t) dt$	(15)

采用 I. Lerche 等(1984)^[13] 提出的网格寻找法确定符合条件(10)式的最佳 T_c 、 T_d 值和 $GT(i)$ 值。

$$\min(E_j) = \{VTI_{jk} - [TTI_{ijk}(T_c, T_d, GT(i)) + TTI_{ijk}(T_c, T_d, GT(i))]\}^2 \quad (10)$$

式中 n_j 为第 j 层中 $R\%$ 测值样本总数; E_j 为第 j 层时间温度指数理论计算值(TTI_{jk})与 $R\%$ 计算值(VTI_{jk})的偏差平方和; $\min(E_j)$ 是对 E_j 取极小值; i 为第 j 层上覆各地层序号, $i = 1, 2, \dots, j-1$ 。

2.2.2 其它模型^[7] 表内(13)式中 C 为可调参数, Minddleton 取 0.068; F 为镜质组反应程度; $T(t)$ 为随时间变化的温度(℃); t 为时间($10^6 a$); $A = -2.275, B = 0.177$ (Falvey 和 Middleton, 1981^[14]); (15)式中等号的右边第一项代表样品在 0 到 $k-1$ 阶段所增加的 TTI 值, 用前面所述的相应模型计算出的 β 值($\beta_1, \dots, \beta_{j-1}$)求取, 第二项则用待调的 β_k 计算。

TTI 法模拟计算出的古地温梯度是预先设置的, 当镜质体反射率数据不充分时, 具有多解性, 不适用于沉积—构造史较复杂的盆地^[8]。且各种拟合计算法的计算量大误差也大, 因而不常用。

2.3 镜质组反射率梯度法

肖贤明等(1998)^[9]以 Arrhenius 方法为理论

基础, 应用 Karweil 图解法, 对不同古地温梯度条件下有机质热成熟作用进行了模拟计算。研究之后提出了镜质组反射率梯度法确定古地温梯度的方法: 据反射率实测结果, 按下式计算出某一成熟度的 ΔVR_0 值:

$$\Delta VR_0 = (R_{H_2} - R_{H_1}) / (H_2 - H_1) \quad (16)$$

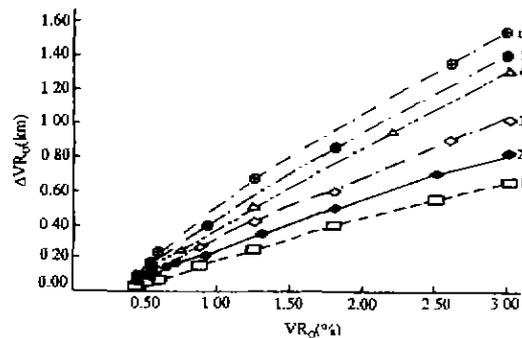


图 5 不同地温梯度下镜质组 $\Delta VR_0 - R_0$ 相关形式 (受热时间 30Ma, 据肖贤明, 1998)

Fig. 5. The relation between vitrinite reflectance and paleotemperature.

图中 1.2.3.4.5.6 分别表示 15.25.30.40.50.60℃/km

式中 ΔVR_0 为镜质体反射率梯度; H_1, H_2 分别为样品埋深($H_1 < H_2$), R_{H_2} 和 R_{H_1} 分别为处在埋深

H_2 和 H_1 的样品镜质组反射率实测值。根据 ΔVR_0 , 应用图 5 可推算出古地温梯度, 再由埋深得出古地温。

应用本方法时须注意以下问题: 计算 ΔVR_0 需采用可靠的反射率数据; 应结合盆地沉积构造发展史对反射率梯度与古地温梯度之间的对应关系进行综合解释; 考虑古地温梯度演变。另外还有 Barker 等人 (1986)^[15] 建立的古地温计算公式: $\ln[R_m^0] = 0.0078[T_{\text{comp}}] - 1.2$ 式中 R_m^0 是有机质的平均反射率, T_{comp} 是最大埋藏温度。本计算式的优点在于不用考虑时间因素。

3 讨论

镜质体反射率用于推算盆地古地温以来, 出现了多种多样的方法, 包括图解法、直接计算法、*TTI* 模拟计算法, 而 *TTI* 模拟计算法又有不同的模型。这些计算方法、计算模型各有优缺点。

而笔者认为 A. Hood 图解法和镜质体反射率梯度法比较好, 它们计算简单且该考虑的主要因素都包括在内。如 A. Hood 图解法只需将测得的镜质体反射率值换算成有机质成熟度 (LOM), 或者根据两者的关系直接将有机质成熟度 (LOM) 与活化能 (E)、温度 (T) 图转为镜质体反射率 (R_0) 与活化能 (E)、温度 (T) 图。从而依靠镜质体反射率值直接从图中获得地层古温度。同样, 镜质体反射率梯度法根据不同埋深的镜质体反射率求得其反射率梯度 (公式 16), 再由反射率梯度与古地温梯度的关系, 求出古地温梯度, 然后获得地层古地温。据肖贤明 (1998) 研究得出地层古地温梯度与镜质体反射率梯度关系密切, 而有效受热时间影响较小。所以笔者拟定用上述两种方法来研究贵州地区区域热演化, 将这一用于油气研究的方法来探讨本区的大面积低温成矿域的成热机制。

参 考 文 献

- [1] 周中毅、潘长春等, 沉积盆地古地温测定方法及其应用。广州: 广东科技出版社, 1992, 1~114.
- [2] Teichmüller M., Anwendung kohlenpetrographischer methoden bei der erdöl-underdgasprospektion. *Erdöl und Kohle*, 1971, 24:69~76 (in German).
- [3] Cannan J., Time-temperature relation in oil genesis. *Bull AAPG*, 1974, 58:2516~2521.
- [4] Hood D., Gutjahr C. C. M., Heacock R. L., Organic metamorphism and the generation of petroleum. *Bull AAPG*, 1975, 59:986~996.
- [5] 庞雄奇、陈章明、陈发景, 含油气盆地地史、热史、生排烃史数值模拟研究与烃源岩定量评价。北京: 地质出版社, 1993, 23~36
- [6] 胡圣标、汪集, 沉积盆地热体制研究的基本原理和进展。地学前缘, 1995, 2(3~4):171~180.
- [7] 卢双舫、王子文、付晓泰、王振平, 镜质体成烃反应动力学模型的标定及其在热史恢复中的应用。沉积学报, 1996, 14(4):24~29.
- [8] 冉启贵、胡国艺、陈景发, 镜质体反射率的热史反演。石油勘探与开发, 1998, 25(6):29~32.
- [9] 肖贤明、刘祖发、申家贵、刘德汉, 确定含油气盆地古地温梯度的一种新方法—镜质组反射率梯度法。科学通报, 1998, 43(21):2340~2343.
- [10] 丰国秀、陈盛吉, 岩石中沥青反射率与镜质体反射率的关系。天然气工业, 1988, 8(3):20~25.
- [11] 周中毅、刘德汉、盛国英, 新疆某地区古地温模式与生油期推断。沉积学报, 1983, 1(2):143~151.
- [12] Karweil J., Die Metamorphose der Kohlen vom Standpunkt der physikalischen Chemie. *Z. Deutsch. Geol. Ges.*, 1955, 107:132~139.
- [13] Lerche I., Yazab. R. F., Kendall. C. G. St. C., Determination of Paleoseat Flux from vitrinite reflectance. data. *Bull. AAPG*, 1984, 68:1704~1717.
- [14] Falvey D. A., Middleton M. F., Passive continental margins: Evidence for pre-break up deep crustal metamorphic subsidence mechanism. *Oceanologica Acta*, 1981, 4:103~114.
- [15] Barker C. E., Pawlewicz M. J., The correlation of vitrinite reflectance with maximum temperature in humic organic matter. *Palaeogeothermics. Lecture Notes in Earth Sciences*, Berlin: Springer-Verlag, 1986, 5:79~93.

PROGRESS IN DEDUCTION OF PALEOTEMPERATURE FROM VITRINITE REFLECTANCE DATA

Jiang Guohao Hu Ruizhong Fang Weixuan

(Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002)

Abstract

In the process of sedimentary basin formation and evolution, the basin's thermal regime is variable and there are many kinds of methods to study it. This paper introduces in detail the methods to study thermal evolution of the basins on the basis of maturity of organic matter and also points out their advantages and disadvantages. And then two best methods have been chosen for our purpose, which are the A. Hood graphical treatment and vitrinite reflectance grade.

Key words: thermal evolution; vitrinite reflectance; vitrinite reflectance grade; paleotemperature