

地震地质学

第二册

王智诒编写

石油工业部石油勘探开发科学研究院研究生部



200398621



00303576

第四章 应用地震资料预测沉积盆地的生油条件

应用地震地质的方法来预测沉积盆地的生油条件，这是近几年来美国、法国等一些国家的学者正在研究探讨中的问题。这个研究除了地震地质学本身的解释成果之外，它还涉及到当代有机地球化学的一些新理论，所以它是应用了地球物理学、有机地球化学和地质学的综合成果。

第一节 方法的基本原理

1. 方法的理论依据

六十年代中期开始，对有机质的成熟、演化进行了大量的研究，有机质成油学说有了新的进展。目前一般认为有机质向石油转化受化学动力学和热力学所支配。而古地层温度和时间是石油生成、演化和保存的重要条件。当温度太低（低于 50°C ）时，一些重要烃类的生成速度很缓慢，甚至没有实际意义。温度升高时对反应速度的影响则十分强烈。而催化反应产物的数量既取决于反应温度，又取决于反应时间，因此时间也是一个重要因素，较长的地质时间往往可以弥补温度的不足，而获得同样的生油地质效果。因此在某种意义上说这两个因素是可以互相转换的。洛佩廷（Lopatin）假设这个成熟度是依赖于时间的线性关系（Linear doubling），推断这个埋藏的时间是在稳定地温梯度下的成熟度。

地球化学的理论证明，成熟度与温度为指数关系。这是由于内在的地质因素所引起的，于是就用这个关系来划分反应速度和温度的关系，一般地把地层温度划分为每摄氏10度一个等间隔。

根据有机地球化学资料和沉积盆地类型来选择某一地温梯度间隔作为计算成熟度时一温指数(TTI)的上下起始点的间隔位置。文献〔9〕中选择的是100~110℃这个温度间隔位置。而编者根据松辽盆地的镜煤反射率资料与文献〔9〕的镜煤反射率资料对比之后，选择从90~100℃这个温度间隔作为计算成熟度时一温指数(TTI值)。(以下简称TTI值)的上下起始位置(图4~1)。从图中可以明显看出上部的镜煤反射率的数据点，松辽盆地与文献〔9〕的镜煤反射率基本一致，而到了下部松辽盆地的镜煤反射率明显偏小，这说明松辽盆地计算TTI值的开始位置偏低。故把计算TTI值的起始间隔定为90~100℃。在这个温度间隔内的指数值 $n=0$ ，其它间隔的指数值按照向上为负，向下为正的原则，每个间隔增加1的整数，如表4~1所示。假定在热催化反应时，温度每上升10℃，成熟度时一温指数的增加速度是由 r 因素而决定，那么令任何一个温度间隔的成熟度一温指数系数 $r=R^n$ 。

成熟度时一温指数的时间单位规定为百万年，这就是在每个温度间隔里沉积所经历的时间，成熟度时一温指数的增加，在每一个

温度间隔里给出一个成熟度时——温指数值。

根据这个理论认为地层中某一地温间隔内地层的有机质热演化的成熟程度，可以用如下的数学式来描述，公式中表示地层中的有机质的成熟由地温和地质时间两个主要因素来控制，把这两者的综合结果称为成熟度时——温指数（以下简称TTI值）。

$$\Delta T T I_i = \gamma_i (t(T)) \times (\Delta T_i) \dots (4-1)$$

式中： $\gamma_i (t(T))$ 是表示在某一地温间隔内有机质的地球化学的热催化反应中，它是随着地温和地质时间变化的一个函数，函数中的 t 表示地温， T 表示地质时间，这个函数相当复杂，一般不能用一个确切的数学式子表示，文献〔9〕令这个地温间隔内的 $\gamma(t(T)) = R^n$ 。编者把它叫成熟度时——温指数系数（以下简称TTI值系数）。

ΔT_i 是在每个地温间隔内地层沉积所经历的地质时间。

TTI值数值的大小它是标志着有机质转化为石油及其它烃类的一个参数，公式（1）是表示某一深度点上一个地温梯度间隔的TTI_i值。如果要预测这一深度点上生油岩的成熟度值，必须要将这一深度点到地面的全部地温间隔内的所有TTI值求代数和，求出的这个值才是这个深度点上的TTI值，这就是TTI值的地质演化数含义，用如下的计算公式表示：

$$TTI = \int_{T_1}^{T_2} \gamma(t(T)) dT = \sum_{i=imin}^{i=imax} (R_i^n) \cdot (\Delta T_i) \dots (4-2)$$

~ 3 ~

式中： T_1 是要计算的某一深度点的地质时间。

不同温度间隔的成熟度时—温指数系数

表 4~1

地温间隔 (°C)	指数系 (n)	成熟度时—温指数系数 (r)
20~30	-7	0.00781
30~40	-6	0.01562
40~50	-5	0.03125
50~60	-4	0.0625
60~70	-3	0.125
70~80	-2	0.25
80~90	-1	0.5
90~100	0	1
100~110	1	2
110~120	2	4
⋮	⋮	⋮

T_2 是目前的地质时间;

R_1^n 是在每个温度间隔内 $T-T_1$ 值系数;

~4~

式中的其它参数与(1)式同一含义。

从公式(2)中看出,严格讲T T I值应该是地层沉积埋藏史对时间的一个连续积分过程,但实际上用这样严格的数学方法实现起来是非常麻烦的,因此改成精度上允许的一个近似等间隔的求和办法,这对于研究生油岩的成熟度精度是可以的。

温度对有机质转化成油气的作用,一般可以用公式来定量表示。近年的研究表明,有机质转化成油气,是有机质热降解的过程。这个过程基本上符合一级反应。因此,在油气成因问题研究中,相当广泛地用阿雷尼厄斯(Arrhenius)方程来描述这个过程,即有机质向油气演化速度只与有机质浓度的一次方成正比。

$$-\frac{dC}{dt} = KC \quad \dots\dots\dots (4\sim3)$$

式中: t ~ 反应时间,

C ~ T时刻的有机质浓度,

K ~ 反应速度常数。

它具体由阿雷尼厄斯方程来体现

$$K = A e^{-\frac{E}{Rt}} \quad \dots\dots\dots (4\sim4)$$

式中: K ~ 温度T时的反应速度常数,

A ~ 频率因子,

E ~ 活化能,

$R \sim$ 气体常数,

$t \sim$ 绝对温度,

$e \sim$ 自然对数的底。

由(4~4)式经推导变为(详细推导过程见文献[9]中的
P 40~43页):

$$L_n \frac{C_0}{R_t} = A \cdot e^{-\frac{E}{Rt}} \cdot T \quad \dots\dots (4\sim5)$$

式中: $C_0 \sim$ 原始有机质浓度,

$C_T \sim$ T 时刻有机质浓度,

$A \sim$ 频率因子, 即碰撞系数,

$E \sim$ 活化能,

$R \sim$ 气体常数,

$t \sim$ 绝对温度,

$T \sim$ 反应时间。

根据公式(4~5)可以写成:

$$TTI = A \cdot e^{-\frac{E}{Rt}} \cdot T \quad \dots\dots (4\sim6)$$

由于时间的作用是累加的, 将(4~6)式对时间积分, 并写成离散求和的形式。这个式子与公式(4~2)是一样的, 只不过表现形式不一样。

$$TTI = \int_{T_1}^{T_2} A \cdot e^{-\frac{E}{Rt}} \cdot dt = \sum_{i=1}^N A \cdot e^{-\frac{E}{Rt}} \cdot (\Delta T_i) \quad \dots\dots (4\sim7)$$

~6~

将公式(4~7)中的 $A \cdot e^{-\frac{E}{Rt}}$ 这一项当成公式(4~1)中的 $Y(t(T)) = R^n$ 项, 即所谓的成熟度时——温指数系数。这就是洛佩廷方法。也有一些外国石油公司把 $A \cdot e^{-\frac{E}{Rt}}$ 这一项不用 R^n 表示, 而用一个地区的经验系数来表示。例如莫比尔石油公司就用 $4.078 \times 10^{10} \cdot e^{-\frac{10074}{0.556t(^{\circ}\text{F})+255.2}}$ 表示 R^n 项, 因此公式变成:

$$TTI = \sum_{i=1}^n 4.078 \times 10^{10} \cdot e^{-\frac{10074}{0.556t(^{\circ}\text{F})+255.2}} \Delta T_i$$

(4~8)

这就是所谓的莫比尔法(或称 E·A 拟合法)。如果将公式(4~8)与公式(4~7)比较, 可以看出:

$A = 4.078 \times 10^{10}$, $E/R = 10074$, 式中 $t(^{\circ}\text{F})$ 为华氏温度。

这种方法的关键是确定 E、A、R 值。外一般是根据 TTI 值与镜煤反射率 R_o 的对应关系, 通过拟合法确定。

也可以用 E/R 、A 值解联立方程的方法求解, 即先由钻井的生油岩的岩心分析的化验资料, 确定出有机质开始成熟和过成熟的深度, 由它们分别所对应的 TTI 值, 以及它们相应的地层温度。例如开始成熟时所对应的 TTI 值是 8, 它的地层温度是华氏 126 度。过成熟时所对应的 TTI 值是 64, 它的地层温度是华氏 216 度。设 $E/R = B$, 将这些数据代入公式中得到:

$$\begin{aligned} 8 &= A \cdot e^{-\frac{B}{0.556 \times 126 + 255.2}} \dots\dots\dots(4 \sim 9) \\ 64 &= A \cdot e^{-\frac{B}{0.556 \times 216 + 255.2}} \end{aligned}$$

解这个联立方程组就可以求出 A、B 值来。

因此不管是洛佩廷，还是莫比尔法其方法原理都是一样，只是求 T T I 值系数具体作法有些不一样，其他的步骤和方法完全是一样。下面主要以洛佩廷法为主来说明其方法和步骤。这两种方法可以根据不同地区的资料情况而选用。

2. T T I 值与其它地域化学资料的对比

文献〔9〕是用了全世界一些有代表性的地质年代和地层岩性计算出来的 T T I 值，用这些 T T I 值建立了同热变指数 (T A I) 镜煤反射率 (R₀)，沥青/有机碳比率 (B I T / *wsg*)，碳优势指数 (C P I)，干酪根氢碳原子比 (H / C) 和膨胀性粘土百分数 (% EXPANDABLE LAYERS) 的关系。因此由这些资料看出，说明 T T I 值对有机物质的成熟度的测量是很有根据的。

(1) 沥青/有机碳比率

一般认为在生油时窗范围之内，沥青和有机碳的比值是增加的，但在实际上这个增加是不明显的，这是因为受到一些变化因素的影响，也许是油母质类型的影响。如果用很多的样品进行统计分析之后，得出一个平均沥青/有机碳比率，这个值它还是能反映生油时窗值的，如图 4~2 所示，它的生油时窗 T T I 值 = 15 - 160

之间。这主要取决于T A I和R₀值而定。

(2) 碳优势指数

一般认为碳优势指数值的减小是成熟度时一温指数的增加，如图4~3所示。这个碳优势指数值可能给出T T I值的减小以至增加，在图4~3中用包络线表示出来。从这些样品分析之后它的生油时窗C P I值是1.75 (T T I=15)和1.2 (T T I=160)。

(3) 干酪根的氢碳原子比

图4~4中表示出平均干酪根氢碳原子比同T T I值的关系。这个关系表明在49号样品点以上所代表的三个点的值基本一样(0.8左右)。这再一次说明T T I值能直接反映生油岩的成熟度。

(4) 膨胀性粘土百分数

因为从蒙脱石转化到伊利石经常是和一定的地下温度相联系。图4~5中看出最大膨胀性粘土百分数与T T I值之间有一个很好的关系。在图中用实线表示出来，样品的数据点基本上是处在这个曲线的左边，这个含大部分膨胀粘土或100%膨胀粘土地段，表示出来成熟区。

3. T T I值的地质解释

石油的生成和演化过程中不同的阶段有着不同的T T I值，这是对T T I值地质解释的依据。这个关系是文献〔9〕中根据全世界31口井420块样品的分析化验结果。如表(4~2)所示。

松辽盆地的有机地球化学分析资料，在1300米深度以上镜煤反射率 R_m 小于0.5（图4~1）。根据各种有机地球化学资料的分析结果，确定是属于未成熟度阶段，因此它的成熟度的深度应大于1300米，镜煤反射率应大于0.5。图4~1中相当于生油时窗上限的TTI值为15时，它的镜煤反射率值是0.65，而松辽盆地的镜煤反射率是0.60—0.55之间。确定为生油时窗的上限。它与图4~1中文献〔9〕的镜煤反射率资料相比，生油时窗上限值的TTI值应小于15，初步确定大约相当于9左右。

表4~3中表示出TAI值在几个石油生成和保存的重要阶段的界线。这个生油时窗的界线很类似于由蒂握（DCW 1977年）和其它很多研究者提出的界线。这些界线主要是取自Crewson先生的资料。根据我国陆相湖盆沉积的特点及松辽盆地、东营凹陷等多种有机地球化学分析资料，确定我国中新生代陆相湖盆石油开始生成的TTI值是9左右，到160左右是石油生成尾声。这个界限的确定可能不同地质年代应有所区别，编者认为一般地质年代老的地层，这个TTI值可能偏小。一般地质年代新的地层可能应偏大，中新生代使用一个起始生油门限TTI值不一定合适。最好是在地震剖面上有一口井的地球化学分析资料，作为检验这个生油门限TTI值的证据。这样确定出的TTI值更准确一些。从表4~3中看到保存比重为0.8521到0.7796的石油液化状态，
~10~

TTI值与镜煤反射率的关系

表4~2

R _o	TTI	R _o	TTI
0.30	<1	1.36	180
0.40	<1	1.39	200
0.50	3	1.46	260
0.55	7	1.50	300
0.60	10	1.62	370
0.65	15	1.75	500
0.70	20	1.87	650
0.77	30	2.00	900
0.85	40	2.25	1800
0.93	56	2.50	2700
1.00	75	2.75	4000
1.07	92	3.00	6000
1.15	110	3.25	9000
1.19	120	3.50	12000
1.22	130	4.00	23000
1.26	140	4.50	42000
1.30	160	5.00	85000

(引自文献〔9〕)

碳氢化合物生成和保存的不同阶段同 T T I 值的关系

表 4~3

阶 段	T T I 值	R ₀	T A I
开始生成石油	9	0.58	2.84
石油生成最高峰	75	1.00	2.9
石油生成尾声	160	1.30	3.2
石油比重 0.8251 时, T T I 的上限界线	~500	1.75	3.6
石油比重 0.7796 时, T T I 的上限界线	~1000	2.00	3.7
湿气状态存在下的 T T I 上限界线	~1500	2.20	3.75
干气状态存在下的 T T I 上限界线	65000	4.80	>4.0
甲烷存在状态下 T T I 界线	972000	>5.00	>4.0

引自文献〔9〕, 编者稍有修改

它的TTI值大致分别是500、1000。湿气保存状态的最高TTI值是1500。其它如表4~3所示。

第二节 参数的确定

参数的选取和确定是这个计算方法很重要的内容。如果参数确定不准确，计算出来的TTI值误差很大，下面主要从几个方面说明确定参数的方法。

1. 地层埋藏史时间参数的确定

地层埋藏史时间的确定精度，主要取决于对地震剖面地震地质的解释，及如何全面正确地运用区域地质资料的综合分析，特别是在盆地勘探初期无参数井的情况下，地震剖面地层时代的解释特别重要。

(1) 无钻井资料参考

在没有钻井的地区确定地层时代的办法有两种：

A. 是利用地震剖面上反射层的结构特点，根据区域地质资料与邻近已知盆地和地区来类比。

B. 如果是海上大陆架地区，可以根据海岸地震剖面作出这个地区的海平面相对升降变化关系曲线，用这条曲线与全球的海平面相对升降变化关系曲线进行对比，确定出地震剖面上地层的地质时代。具体方法见本讲义第六章。

(2) 有钻井资料参考

应根据钻井地层剖面的古生物资料，岩性资料确定地震剖面上各层的地质时代。在有条件时最好根据古生物资料和放射性绝对年令的

测定资料，把地震剖面上各层的地层年代划得更细一些，这有助于TTI值计算精度的提高。

确定出地震剖面上各层的地层年代之后，查地层年代表，查出距今的地质年令，本讲义是采用文献〔12〕的数据。

2 地温梯度的确定

地温梯度是计算TTI值的很重要的参数，按理应是古地温梯度，这个古地温可以用仪器测得，也可以根据古地温与自生矿物、镜煤反射率、油母质的颜色的关系，求得古地温，换算成古地温梯度，但求起来十分复杂，有时资料也不全，因此一般就用今地温梯度代替，在系数(K)求取中校正掉误差。如果它取得不准确就会直接影响计算成果精度，一般有三种办法求取地温梯度。

(1) 温度测井资料中求取

在有地温测井资料的地区就直接利用测井的地温梯度数据，计算一个平均地温梯度。如果大段层位的地温梯度相差很大，可以分段进行地温梯度计算，在作地层沉积史埋深曲线时可以分段标度。

(2) 区域地温梯度关系类比求取

如果在没有地温测井的地区，可以根据临近地区的资料来推算地温梯度值，确定出工区的一个恰当的数值。例如我国东部地区与西部地区的地温梯度是有规律性的，这是与地球的莫霍面埋藏深度有关系的，东部地区的莫霍面埋藏浅，西部地区莫霍面埋藏深，因此东部地区的地温梯度一般高于西部地区，如表4~4所示。

(3)利用地震资料和地面热流值资料求取

这是一种重要的办法，它是根据该地区的地面热流值资料，运用地震剖面计算的均方根速度，经过大量的实际资料的分析统计，得出一个经验关系公式。这个方法的理论依据认为地球是一个降温场，它是时间、空间的函数，可以用一个简单的函数关系式表示：

$$T = f(X, Y, Z, L) \dots\dots\dots (4\sim10)$$

式中：X、Y、Z是三度空间坐标。

L是时间。

而这个函数关系又与不同的岩性，不同的构造单元有关，它又可以用地面所测得的热流值来体现，其数学表达式如下：

$$Q = -K \cdot \frac{\Delta T}{\Delta Z} \dots\dots\dots (4\sim12)$$

式中：Q是地面测得的热流值；

K是地层热导系数；

T是地层温度；

Z是地层的深度。

由公式(4~12)可得：

$$\Delta T = \frac{\Delta Z \cdot Q}{K} \dots\dots\dots (4\sim13)$$

$$T = T_s + \frac{Q}{K} \cdot Z \dots\dots\dots (4\sim14)$$

由公式(4~14)可以计算出地下任一个深度中的地层温度。

式中：T₀为地面起始温度。

但在使用这个公式时，有几个方面的影响应该注意，

①区域性的影响

1. 区域性温度；
2. 地表温度。

②地质体的影响

1. 各种岩性的热传导率；
2. 地层的因素
 - A. 地层沉积史；
 - B. 地热辐射的发生程度；
 - C. 盐丘、侵入体；
 - D. 断层；
 - E. 地层中的压力；
 - F. 地层中包含的流体；
 - G. 地层的沉降率。

但我们计算T_{TI}值，一般要求地温梯度的精度不是十分高。

因此有些影响因素可以忽略不计。

另外区域性的热流值还可以用地下地层年令推算出来，这纯粹是经验公式，具有地区性，使用时应注意。

①第三系以前地层的热流值：

$$Q(t) = 11.3 / t \quad \dots\dots\dots (4-15)$$

~ 16 ~