

# 烃源岩原始有机质丰度和类型的恢复方法

王吉茂 李 恋

(华北石油管理局勘探开发研究院,河北任丘 062552)

**提 要** 本文应用源岩中残烃含量及在热解仪-微机联机系统上开发的成熟度新参数,建立了对低成熟—高成熟(任意丰度、类型、岩性等)烃源岩原始有机质丰度和类型的恢复方法(残烃法),并应用热解及有机碳分析结果,依据沉积岩石学、有机岩石学等基本原理、干酪根降解生油理论,以及石油有机地化人员在生产科研过程中常用的三个定义式及一个公认的假设为前提,建立了对低成熟—过成熟(任意成熟度、丰度、类型、岩性等)烃源岩原始有机质丰度的恢复方法(有机无效碳法)。因有机无效碳含量与源岩演化程度无关,因此该方法适用于任意成熟度烃源岩原始有机质丰度的恢复,较好地解决了高成熟过成熟烃源岩原始有机质丰度的恢复问题。

**关键词** 过成熟 烃源岩 原始有机碳 沉积岩石学 有机岩石学

**分类号** P 618.130.1

**第一作者简介** 王吉茂 男 33岁 高级工程师 有机地球化学

## 前 言

在石油地质勘探及有机地化研究中,研究烃源岩中残余有机质及原始有机质类型、原始有机质丰度是必要的,尤其是对高成熟、过成熟烃源岩的研究更是至关重要的。在烃源岩生排烃及资源量研究中都存在着对任意成熟度(低成熟、成熟、高成熟、过成熟)烃源岩原始有机质丰度的恢复问题,特别是高成熟、过成熟烃源岩原始有机质丰度的恢复。但是到目前为止,国内外在高成熟、过成熟特别是过成熟烃源岩原始有机质丰度的恢复方面所做工作较少。

众所周知,随着有机质演化程度的增加,已生成的游离烃从源岩中逐渐排出,烃源岩生烃潜力越来越小,在过成熟阶段,烃源岩中仅残留有机无效碳和少量吸附烃。此时,测定的有机质丰度远不能反映其原始丰度情况,有机质类型特别是原始有机质类型无法用常规测定方法确定。在这种情况下,我们能否对烃源岩原始有机质丰度进行恢复呢?本文着重对这一问题进行了探讨,并建立了两种恢复方法。

## 1 对低成熟—高成熟源岩原始有机质丰度的恢复方法(残烃法)

### 1.1 数学模型

研究发现:随着烃源岩成熟度的增加,热解烃  $S_2$  对成熟度指标  $T_i$ (在热解仪-微机联机系统上开发的新参数)的微商,与热解烃  $S_2$  成正比,即:  $-\frac{dS_2}{dT_i} = K \cdot S_2$

(1) 不定积分结果  $-\ln S_2 = K \cdot T_i + A$

(2) 定积分结果  $\frac{S_2}{S_2} = e^{K(T_i - T_1)}$

式中:  $S_2$  源岩中残余热解烃含量, mg 烃 / g 岩石;

$T_i$  有机质成熟度新参数,  $^{\circ}\text{C}$ ;

A. 积分常数; K. 表观反应速度常数,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;

右上角标 1. 有机质刚开始生烃时的相应值。

### 1.2 热解仪热解模拟实验验证

#### 1.2.1 实验方法

(1) 将用于模拟实验的样品研磨后过 80 目筛备用。

(2) 称取数份样品,分别置于热解仪坩锅中。

(3) 将其中一个盛有样品的坩锅放入热解仪,先在  $300^{\circ}\text{C}$  恒温 3 min, 然后以  $50^{\circ}\text{C} / \text{min}$  的升温速率升温至预定温度,然后将坩锅取出并自然冷却,从而使样品熟化(熟化条件可自定)。

按上述方法分别将称取的样品在热解仪上升温至不同的预定温度,使样品熟化,获得熟化程度由低到高变化的一个系列。

(4) 将熟化后的样品系列,按与分析生产样品相同的过程上机分析。

#### 1.2.2 实验结果

对 20 余个不同丰度、类型、成熟度及岩性的烃源岩进行热解模拟实验,分别将实验结果  $\ln S_2 - T_i$  对应作图皆呈直线关系,进行线性回归,相关系数皆大于 0.99,这表明上述数学关系式有效,可用来恢复烃源岩原始有机质丰度。

利用上述方法可对低成熟—高成熟源岩原始有机质丰度进行恢复。

## 2 对低成熟 - 过成熟源岩有机质丰度的恢复方法 (有机无效碳法)

### 2.1 问题的提出

古老地层中的有机质在漫长的地质演化过程中已达过成熟阶段;在岩浆或热液活动比较活跃的地区,有机质在短时间内快速达到过成熟阶段。这种烃源岩中有机质主要为有机无效碳和极少量的干酪根及游离烃。对残余有机质的测定,已不能反映其原始有机质的丰度和类型。目前人们使用的对烃源岩原始有机质丰度进行恢复的方法已基本无能为力。

### 2.2 解决问题的思路及依据

(1)烃源岩在演化过程中,有机无效碳含量基本保持不变。当原始有机质类型一定时,有机无效碳含量仅与原始有机质丰度有关;当有机无效碳含量一定时,原始有机质丰度仅与原始有机质类型有关。

(2)依沉积岩石学、有机岩石学、地球化学等方法确定源岩原始有机质类型

### 2.3 数学模型

#### 2.3.1 建立数学模型的前提:

##### (1)三个定义式

利用热解、有机碳分析数据,建立的三个定义式如下:

$$CZ = CW + CY$$

$$HI = \frac{S_2}{CZ} \times 100$$

$$CY = (S_1 + S_2) \times 0.083$$

在有机质刚开始生烃时,上述三个式子可写成如下形式:

$$CZ' = CW' + CY'$$

$$HI' = \frac{S_2'}{CZ'} \times 100$$

$$CY' = S_2' \times 0.083 \quad (S_1' = 0)$$

式中: CZ.烃源岩中有机碳总量, %;

CW.烃源岩中有机无效碳含量, %;

CY.烃源岩中对生烃有贡献的有机碳含量, %;

HI.烃源岩中有机质氢指数, mg 烃 /g 有机碳;

S<sub>1</sub>.烃源岩中游离烃含量, mg 烃 /g 岩石;

S<sub>2</sub>.烃源岩中有机质热解烃含量, mg 烃 /g 岩石;

0.083.烃源岩含烃量与含碳百分数的换算系数;

右上角标.有机质刚开始生烃时的相应值。

##### (2)一个假设

石油地化科研人员公认:有机质在演化过程中,有机无效碳含量基本保持不变。

即 
$$CW' = CW$$

##### (3)推导结果

依上述三个定义式及一个假设为前提,可恒等推导出如下关系式:

$$CW' = CZ - (S_1 + S_2) \times 0.083 \quad (1)$$

$$S_2' = \frac{CW' \times HI'}{100 - HI' \times 0.083} \quad (2)$$

$$CZ' = \frac{CW' \times 100}{100 - HI' \times 0.083} \quad (3)$$

$$\frac{CW'}{CZ'} = \frac{100 - HI' \times 0.083}{100} \quad (4)$$

$$\frac{CZ'}{CZ} = \frac{100 - HI' \times 0.083 \times KK}{100 - HI' \times 0.083} \quad (5)$$

$$\frac{S_2'}{S_2} = \frac{HI' \times (100 - HI' \times 0.083 \times KK)}{HI \times (100 - HI' \times 0.083)} \quad (6)$$

式中:  $KK = (S_1 + S_2) / S_2$

##### (4)说明:

有机质类型既可用 HI 表征,亦可用 D 表征,二者关系为:

$$D = 0.083 \times HI \times KK \quad (7)$$

$$D' = 0.083 \times HI' \quad (8)$$

式中: D - 有机质降解潜率, %

将 (7) (8) 式代入 (2) - (6) 式,可得到另外一套用降解潜率计算的关系式,不再罗列。

#### 2.3.2 结果讨论

(1)由 (1) (3) 式及图 1 图 2 可以看出:若烃源岩原始有机质类型 (即 HI') 一定,则源岩原始生烃潜量 S<sub>2</sub>'、原始总有机碳含量 CZ' 与无效碳含量 CW' 呈正比;若 CW' 一定,则

表 1 模拟回归式与推算式比较表

Table 1 Comparison of the simulation regression and calculation

样品号	1 号 样	2 号 样	3 号 样	
模拟点数	10	8	6	
原样氢指数	487	600	442	
KC-HI 关系式	回归式	KC= 1.680- 0.001395× HI r= 0.9999	KC= 1.975- 0.001625× HI	KC= 1.582- 0.001256× HI r= 0.9862
	推算式	KC= 1.687- 0.001393× HI	KC= 1.992- 0.001653× HI	KC= 1.5794- 0.00131× HI
KS-HI 关系式	回归式	KS= 825.4/HI- 0.834	KS= 1192.8/HI- 0.988	
	推算式	KS= 820.2/HI- 0.681	KS= 1195.2/HI- 0.992	KS= 698/HI- 0.5794
注: KC= (CW' + CY') / (CW + CY)      KS= (S <sub>1</sub> ' + S <sub>2</sub> ') / (S <sub>1</sub> + S <sub>2</sub> ) ≈ S <sub>2</sub> ' / S <sub>2</sub>				

$S_2'$  及  $CZ'$  与  $HI'$  呈递增关系。因此在  $CW'$  含量越高  $HI'$  越大, 则  $S_2'$ 、 $CZ'$  越高。

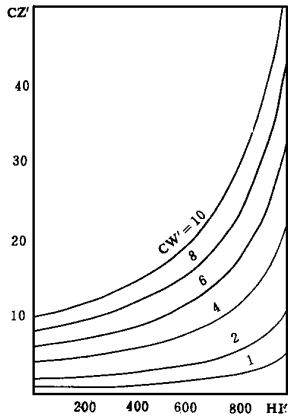
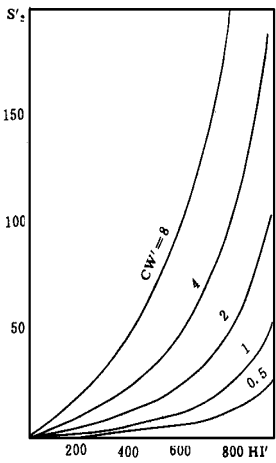


图 1  $S_2'$ - $HI'$ - $CW'$  关系图 图 2  $CZ'$ - $HI'$ - $CW'$  关系图

Fig. 1 Relationship among  $S_2'$ ,  $HI'$  and  $CW'$  Fig. 2 Relationship among  $CZ'$ ,  $HI'$  and  $WC'$

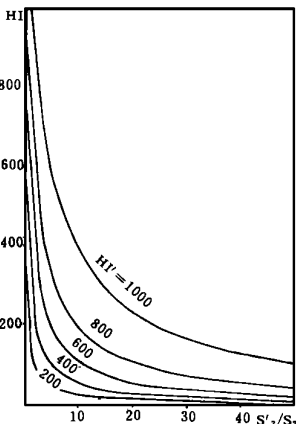
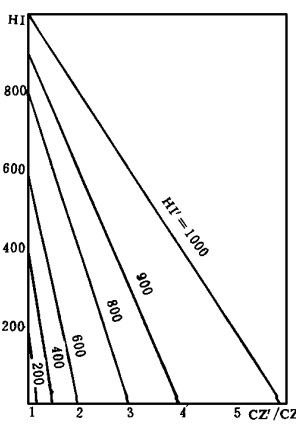


图 3  $CZ'/CZ$ - $HI'$ - $HI$  (KK=1) 关系图 图 4  $S_2'/S_2$ - $HI'$ - $HI$  (KK=1) 关系图

Fig. 3 Relationship among  $CZ'/CZ$ ,  $HI'$  and  $HI$  Fig. 4 Relationship among  $S_2'/S_2$ ,  $HI'$  and  $HI$

由 (5) 式及图 3 可以看出: 烃源岩有机碳恢复系数  $CZ'/CZ$  与有机质演化过程中的  $HI$  呈正比递减关系, 对不同类型的有机质, 当演化到  $HI$  相等时,  $HI'$  越大,  $CZ'/CZ$  越大。  $HI'$  为 600 时, 有机碳最大恢复系数约为 2  $HI'$  为 800 时, 恢复系数约为 3

由 (6) 式及图 4 可以看出: 烃源岩烃恢复系数  $S_2'/S_2$  与  $HI$  呈曲线递减关系。 对不同类型有机质, 当演化到  $HI$  相等时,  $HI'$  越大,  $S_2'/S_2$  亦越大。

(2) 由 (4) 式可以看出: 烃源岩中有机无效碳含量与总有机碳含量之比  $CW'/CZ'$  与  $HI'$  呈直线递减关系, 原始有机质

类型由好到差,  $HI'$  由大变小,  $CW'/CZ'$  相应由小变大,  $HI'=400$  时,  $CW'/CZ'=2/3$ ;  $HI'=602.4$  时,  $CW'/CZ'=1/2$   $HI'=800$  时,  $CW'/CZ'=1/3$  随有机质演化程度的增大,  $S_2$ 、 $CY$  减小, 当达过成熟时,  $S_2$ 、 $CY$  趋于零, 热解分析相对误差 (允许) 增大。 由 (1) 式及有机碳分析可知,  $CW'$  测定结果相对误差较小, 并且原始有机质类型越差, 原始有机质丰度越高,  $CW'$  值越大, 故在过成熟阶段, 测定结果  $CW'$  比  $S_2$  或  $CY$  相对误差小。

到目前为止, 我们测定的烃源岩, 无论其丰度、类型、成熟度、岩性如何, 绝大多数样品氢指数小于 800 我们假设烃源岩原始  $HI'$  为 1000, 当其达变质阶段时, 由 (4) 式可知, 可测定的有机无效碳含量仍占原始总有机碳的 17%, 很显然, 生烃潜力将近于零。 由测定允许误差及结果可知,  $CW'$  误差主要取决于有机碳测定误差, 比热解测定结果误差小。 若  $HI'$  变小如为 100, 占  $CZ'$  的 91.7%,  $CW'$  的误差将更小。 基于相同的原因, 依 (5)、(6) 式恢复系数法进行恢复时, 误差也将较大。 因此, 在达变质阶段时, 依有机无效碳法关系式 (2)、(3) 直接恢复烃源岩原始有机质丰度是比较准确的。

因有机无效碳含量基本不随成熟度而变, 因此, 推导结果适用于任意成熟度烃源岩有机质丰度的恢复。 该方法较好地解决了过成熟烃源岩原始有机质丰度的恢复问题。

### 2.4 推导结果与模拟结果对比

对烃源岩原始有机质丰度的恢复, 人们多是通过模拟实验的办法进行。 一般先选取成熟门限附近的烃源岩在高压釜内或专门的模拟装置中或岩石热解仪上进行烃源岩生油热解模拟实验, 建立有机质生油数学模型或图版, 然后选取原始有机质类型与待恢复烃源岩原始有机质类型相近的模拟结果进行恢复。

表 1 列出了刘宝泉等利用高压釜模拟实验结果, 通过回归给出的  $KC-HI$  及  $KS-HI$  回归式, 同时也列出了利用同一原始样品分析结果及本文推导式给出的推算式, 对比可以看出, 二者对比效果很好。 这表明新建烃源岩原始有机质丰度恢复模型是有效的。

## 3 烃源岩原始有机质类型的划分

在利用上述关系式对烃源岩原始有机质丰度进行恢复时, 必须知道烃源岩原始有机质类型或有机质刚开始生烃时的成熟度, 并用  $Ti$ 、 $HI'$  或  $D'$  量化表征, 获得方法如下:

### 3.1 周边未熟或低熟同一地层岩样直接测定法

选靠近待恢复样品且同一地层中未成熟或低成熟样品即邻近同层未排烃样品, 直接测定。 因是未排烃的邻近同层样品, 故测定值可作为待恢复样品的原始有机质类型值。 若在周边采集不到同一地层未熟或低熟岩样, 也可用沉积岩特征及沉积环境相同或相近 (保证烃源岩有机质类型相同或相近) 的不同地层的岩样代替, 测得烃源岩原始有机质类型值。 然后用上述关系式恢复烃源岩的原始有机质丰度。

上述方法是目前为恢复烃源岩原始有机质丰度所进行

的模拟实验中,普遍采用的选样方法。

### 3.2 $\text{LnS}_2$ -Ti 残烃射线斜率法

前面已述及  $\text{LnS}_2$ -Ti 呈直线关系,并且有机质类型不同,直线斜率  $K$  不同,类型由好至差, $K$  值相应由大变小。对给定类型的样品而言,用于实验的样品,丰度差异仅使射线沿  $\text{LnS}_2$  轴方向平移,成熟度的差异仅使射线沿 Ti 轴方向平移,而射线斜率保持不变。在给定实验条件下斜率仅与烃源岩原始有机质类型有关。因此,可用  $K$  表征烃源岩原始有机质类型。烃源岩原始有机质类型亦可用  $H_I'$  或  $D'$  等表征,因此我们可建立起  $K$  与  $H_I'$  (或  $D'$ ) 的关系,然后利用上述关系式可完成对烃源岩原始有机质丰度的恢复。

由于上述两种有机地化方法比较简单,只要取到样品,

通过直接测定或热解仪快速模拟实验测定,就可获得烃源岩原始有机质类型值  $H_I'$  或  $D'$ ,进而恢复出烃源岩原始有机质的丰度。至于利用沉积岩石学法、有机岩石学法和其它石油地质或地球化学方法,研究确定烃源岩有机质类型,进而恢复出烃源岩有机质丰度的方法就不在此论述了。

### 参 考 文 献

- [1] 沉积岩石学. 华东石油学院岩矿教研室主编. 北京: 石油工业出版社, 54-55.
- [2] 邬立言等编著. 生油岩热解快速定量评价. 北京: 科学出版社, 1986.

## Recovery Method and Application for Primary State of Source Rock Richness and Type

*Wang Jimao and Li Lian*

(Research Institute of Petroleum Exploration and Development, North China Bureau of petroleum Administration, Renqiu 062552)

### Abstract

Based on the residual hydrocarbon content in source rocks and the developed new parameters of maturity in the rock-eval computer system, this paper presented a recovery method for the abundance of primary organic matter in low to high-mature source rocks (any abundance, type and lithology). It is known as the residual hydrocarbon method. Based on the data from rock pyrolytic and organic carbon analyses with the basic principles in sedimentology and organic petrology, on the theory of oil generation of kerogen decomposition, and on three definitions and an acknowledged hypothesis which researchers often use, this paper presented a recovery method of the abundance of primary organic matter for low to over-mature source rocks (any maturity, abundance, type and lithology). It is known as the organic ineffective carbon method. because the content of the organic ineffective carbon has nothing to do with the evolutionary degree of source rocks, this method is applicable to the recovery of the abundance of the primary organic matter for source rocks with any maturity, especially to solve the recovery of the abundance of the primary organic matter for high or over-mature source rocks.

**Key Words** over-mature source rock primary organic matter sedimentology organic geochemistry