

各类干酪根不同成熟阶段生油气量的探讨

李汶国*

(地质部第一石油普查勘探指挥部)

一 研究概况

为了正确地评价一个地区的油气远景,需要解决的首要问题之一就是准确地计算该区的生油气量。随着石油地球化学研究工作的进展,近年来探讨生油机理和生油量计算的文章和专著也越来越多。就其内容来看,生油的研究已经进入了地质观测与模拟实验相结合,从定性的讨论转为定量计算的新阶段。有关生油气量的计算方法很多,现将最有代表性的几种方法简述如下:

J.亨特(1961、1979)和大多数石油地质工作者一样,主张用生油岩中的残余烃含量近似地计算生油量^[1,2]。其方法是将单位体积内的残余烃含量乘以生油岩的体积即得生油量。对低成熟或成熟阶段的生油岩而言,用这种方法计算生油气量简易可行。故大多数石油地质工作者常用这种方法计算生油气量。但由于生油岩中的轻质烃类组分难以测定,故对高度成熟的生油岩或者过成熟的生油岩而言,用这种方法计算的生油气量就欠准确。

J.G.埃德曼(1975)在第九届世界石油会议上发表的《沉积盆地中控制油气生成的条件》^[3]一文中提出了如下生油量计算公式:

$$\text{生油量}^* = \text{残余有机质} \times \frac{\text{原始正烷烃}}{\text{原始有机质}} \times \frac{\text{原始OEP值} - 1}{\text{残余OEP值} - 1} \times \frac{100}{\text{残余油中正烷烃}\%}$$

* 生油岩(其中部分原始已运移走)生油量的近似值

据埃德曼,用该公式计算所得生油量也是近似值,故它与用残余烃含量法计算结果应大体相当。在这个计算公式中引入了反映有机质成熟度的参数——正烷烃的OEP值,从方法上讲是个进步。但在计算公式的分母中有一项为“残余OEP值-1”,就使得它在很多情况下不能使用。首先,当残余OEP值趋近于1或等于1时,“残余OEP值-1”将趋近于零或等于零,因而计算所得生油量必将趋近于无限大。生油气量从理论上讲只能小于原始有机质的总量或者为零,无论在什么情况下也不可能趋近于无限大。故上述公式在残余OEP值趋近于1或等于1时都是不能用的。此外,当残余OEP值小于1时,“残余OEP值-1”将为负值,则据该公式计算所得生油量亦将为负值,这也是不合理的。因此,当残余OEP值小于1时,该公式也是不能用的。如所周知,正烷烃的OEP值是随有机质成熟度的增加而减少的。当有机质演化到成熟阶段的成油期时OEP值将逐渐变小

* 在本文编写过程中参与资料整理的还有彭大经和肖明安同志

趋近于1。此外在高盐度强还原条件下生的油还可能出现 OEP 值小于1的情况。也就是说,在成熟和过成熟阶段以及在高盐度、强还原条件下生油时用这个公式计算生油量可能出现不合理的结果。只在 OEP 值大于2时,用这个公式计算的生油量误差才较小。因此可以认为,在生油量计算中这个方法的适用范围大体上与残余烃含量法相似。

为了解决不同阶段的生油气量问题, B.蒂索和 J.埃斯皮塔利埃等(1975)利用数学模拟的方法计算了各种干酪根的生油潜量(即温度较高且地质时间足够长的条件下的最大生油气量)。在他们所发表的《沉积物中有机物的热演化数学模拟的运用,沉积盆地的石油潜量和沉积物热变史的恢复》^[42]一文中,在讨论了各类干酪根的演化途径和活化能分布以后指出,Ⅰ型干酪根的生油潜量为90%;Ⅱ型的为70%;Ⅲ型的为30%。接着他们提出,把岩石的干酪根含量(一般用有机碳的含量来衡量)与干酪根生油潜量的乘积称为岩石的生油潜量。这个量可用无因次量来表示,而为了方便起见,也可用每吨岩石多少公斤(油或气)来表示,比如,干酪根含量为1%的岩石,对含Ⅰ型干酪根的岩石而言,每吨岩石的生油潜量为9公斤;而对含Ⅲ型干酪根的岩石而言,生油潜量则为3公斤(图1)。

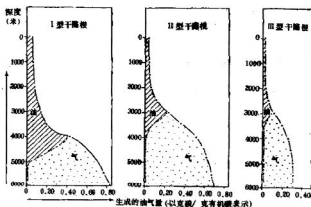


图1 在每100万年期间沉降6000米和地温梯度为35°C/公里的情况下
不同干酪根的演化对比图(据 B.蒂索 1975)

由图1可以看出,到干气阶段的生气量逐渐趋近于生油气潜量的最大值,即Ⅰ型的干酪根接近0.9,Ⅱ型的接近0.7和Ⅲ型的接近0.3。

J.G.埃德曼在讨论了硬脂酸、丙氨酸和葡萄糖的还原降解作用以后指出,作为天然产物类脂化合物代表的硬脂酸生成甲烷(石油)的潜力最大,产生甲烷的最大量按重量计算为34%^[8]。

Ⅰ型干酪根中富含脂族化合物是广大石油地化工作者所公认的。若把它们的组成成分加以对比,则不难看出,在硬脂酸的组成中氢的含量更高,而氧的含量则较低。故从理论上讲,硬脂酸的生油潜量应比Ⅰ型干酪根还大。但就以上所列举的生成甲烷的潜量来看,J.G.埃德曼与 B.蒂索所得出的数据差异很大。而且, B.蒂索计算所得Ⅰ型干酪

根生成甲烷的潜量比 J.G. 埃德曼得到的硬脂酸生成甲烷的数量还大一倍多, 这显然是不合理的。因此, 各种类型的干酪根在不同演化阶段的生油气量究竟有多少, 是很值得研究和亟待解决的问题。这个问题的解决, 不仅具有重大的理论价值, 对广大石油地质工作者而言, 还具有重要的现实意义。本文所讨论的就是根据各类干酪根成熟过程中元素组成的比例变化计算不同阶段生油气量的新方法。

二 油气形成机理和生油气量的计算方法

由干酪根演化而形成油气的成油气说, 目前已被广大石油地质工作者所接受, 也为许多干酪根的热解实验所证实。这种成油说是根据范克雷费伦图提出的。B. 蒂索和 J. 埃斯塔利埃 (1974, 1975, 1977, 1978) 等人在研究了尤英他 (Uinta) 盆地、巴黎盆地、杜阿拉盆地、西德、阿尔及利亚和利比亚等地生油岩的干酪根元素组成的变化以后, 仿效 D.W. 范克雷费伦 (Van Krevelen 1955, 1963)^[5] 的煤素质变化图 (图2) 编绘了各类干酪根的演化曲线图, 并建议称这种图为范克雷费伦图 (图3)^[6]。

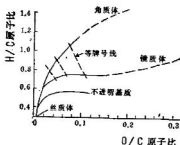


图2 煤素质变化图
(据 D.W. 范克雷费伦 1955, 1963)

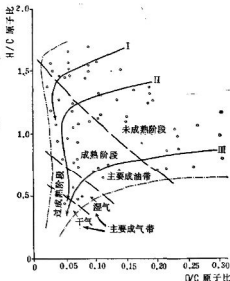


图3 范克雷费伦图

—— 主要类型干酪根的演化曲线
--- 成熟阶段的分界线
... 干酪根的分布范围

由范克雷费伦图 (图3) 可以看出, 干酪根的变化可以分为三个阶段。第一个阶段 H/C 变化较小, 而 O/C 的变化则很大。O/C 比值急剧下降反映了干酪根的变化是以脱出含氧化合物为主。通常把这一阶段称之为未成熟阶段。这一阶段的主要产物是二氧化碳和水, 除此以外, 还有少量的甲烷气。第二阶段干酪根变化的特点是 H/C 急速下降, 而 O/C 则变化很小。它反映了干酪根的变化是以脱出烃类为主, 与生油阶段相当。通常把这一阶段称之为成熟阶段。第三阶段干酪根的变化仍以 H/C 急速下降和 O/C 变化较小

为特点,但在这一阶段不同类型的干酪根演化曲线已趋于靠拢。一般把这一阶段称之为过成熟阶段。这一阶段的产物主要是气,特别是过成熟阶段的后期产物则完全是以甲烷为主的干气,这一阶段所形成的气,一部分是由干酪根直接裂解而来,而另一部分则是由成油阶段形成的油裂解而来。据成熟和过成熟阶段干酪根的 O/C 仍有所下降可以设想,在生油和生气阶段仍有少量的水和二氧化碳形成。J.埃斯皮塔利埃在1977年发表的《确定生油岩的生油潜力及其演化程度的快速分析方法》一文中曾经谈到,干酪根热解产物的质谱分析表明,在高温热解阶段除大量形成烃类以外,还有二氧化碳和水,而且所形成的水比二氧化碳的量还略多一些。在这两个阶段形成的水虽然很少,但对油气的运移和富集而言却有重要意义。

综上所述可以认为,油气形成过程实质上是在自然地质条件下发生的元素转化作用过程。构成原始干酪根的各种元素(主要是碳、氢、氧还有少量的氮和硫)在转化作用过程中不断重新组合而形成油、气、水和二氧化碳等。大量分析资料统计结果表明,在一般原油的组成中烃的含量平均在90—95%以上,在天然气的组成中一般也是以烃类为主,绝大多数也在90—95%以上。为了便于问题的讨论,下面我们就把各阶段生成的烃类总量当作生气量看待。

基于油气是由于干酪根在演化过程中形成的基本原理,则可以根据干酪根在各个阶段元素组成的变化计算各阶段的生气量。

各类干酪根元素组成在成熟过程中的变化如表1所列。

表1 各类干酪根成熟过程中元素的变化

原子比 干酪根类型		H/C			O/C		
		I	II	III	I	II	III
生油气阶段	未成熟阶段	1.67	1.42	1.00	0.130	0.190	0.306
		1.42	1.24	0.78	0.036	0.075	0.175
成熟阶段	成油中期	1.42	1.24	0.78	0.036	0.075	0.175
		1.10	1.06	0.74	0.035	0.060	0.149
	成油末期	1.10	1.00	0.74	0.035	0.060	0.140
		0.78	0.74	0.68	0.030	0.038	0.090
过成熟阶段	湿气末期	0.78	0.74	0.68	0.030	0.038	0.090
		0.52	0.49	0.45	0.030	0.038	0.070
	平气中后期	0.52	0.49	0.45	0.030	0.038	0.070
		0.43	0.42	0.40	0.028	0.038	0.050

据B.蒂索(1975, 1978), J.埃斯皮塔利埃(1977), B.蒂索, J.埃斯皮塔利埃等(1974)^[1], B.蒂索, D.韦尔特(1978)等资料综合归纳而成。

在计算生油量时,我们令 X、Y、Z 分别代表干酪根元素组成中的碳、氢、氧的原子数(在这里以氧近似地代表氧、氮、硫的总合),则不同阶段的干酪根元素组成可以表示如下:

未成熟阶段开始时为 $C_{x_0}H_{y_0}O_{z_0}$

成油阶段开始时为 $C_{x_1}H_{y_1}O_{z_1}$

.....

干气阶段开始时为 $C_{x_4}H_{y_4}O_{z_4}$ 干气阶段中后期为 $C_{x_5}H_{y_5}O_{z_5}$

以 I 型干酪根为例, 据表 1 所列数据则变量 X、Y、Z 之间具有下列关系:

$$Y_0/X_0=1.67 \quad Z_0/X_0=0.13 \quad Y_1/X_1=1.42 \quad Z_1/X_1=0.036$$

.....

$$Y_4/X_4=0.52 \quad Z_4/X_4=0.03 \quad Y_5/X_5=0.43 \quad Z_5/X_5=0.029$$

设干酪根元素组成的变化完全是由于成熟过程中的枝化作用造成的, 则根据前面讨论的生油机理则应有:

$$X_0 - X_1 = X_1^* \quad \text{为未成熟阶段减少的碳原子数;}$$

$$Y_0 - Y_1 = Y_1^* \quad \text{为未成熟阶段减少的氢原子数;}$$

$$Z_0 - Z_1 = Z_1^* \quad \text{为未成熟阶段减少的氧原子数。}$$

$$X_1 - X_2 = X_2^* \quad \text{为成油中期减少的碳原子数;}$$

$$Y_1 - Y_2 = Y_2^* \quad \text{为成油中期减少的氢原子数;}$$

$$Z_1 - Z_2 = Z_2^* \quad \text{为成油中期减少的氧原子数。}$$

.....

$$X_4 - X_5 = X_5^* \quad \text{为干气阶段减少的碳原子数;}$$

$$Y_4 - Y_5 = Y_5^* \quad \text{为干气阶段减少的氢原子数;}$$

$$Z_4 - Z_5 = Z_5^* \quad \text{为干气阶段减少的氧原子数。}$$

据前面讨论的干酪根生油机理, 则各阶段的生油气量可按各阶段碳、氢、氧减少的数量计算得出。其具体算法就是将各阶段减少的碳和氢的数量减去该阶段以水和二氧化碳形式脱出氧而消耗的碳和氧的数量就等于相应的生油气量。当干酪根中的氧以水和二氧化碳形式脱出时, 在两种途径中自由能量的变化是大体相等的, 故可认为以水或以二氧化碳的形式脱出氧的机率是大体相等的。R. 伊舒瓦塔里 (Ishiwatari), B. G. 罗巴克, I. R. 卡普兰 (1978) 在《不同沉积物中的干酪根由热转化而生成的烃类》一文中所列的分析资料表明, 在干酪根热解产物中水和二氧化碳的量 (按重量计算) 基本相等⁸⁾。J. 埃斯塔利埃 (1977) 的实验资料也表明, 在烃类大量形成的阶段以水和二氧化碳形式脱出氧的机率也大体相等, 在后期以水的形式脱出的氧略多于二氧化碳⁹⁾。在干酪根的元素组成中, 氧原子数所占的比例较小, 特别是在成油和成气阶段, 所占比例更小, 故近似地把脱水和脱二氧化碳两种脱氧途径同等考虑对生油气量的计算不会造成大的误差, 尤其是在生油和成气阶段, 干酪根中的氧含量低, 其变化也就更小, 则可能引起的误差会更小, 据此可以设想, 每当干酪根中脱出 1 个氧原子时, 则将相应地脱出 $\frac{1}{2}H_2O$ 和 $\frac{1}{2}CO_2$, 也就是说, 将有 1 个氢原子和 1 个碳原子由于脱出水和二氧化碳而被消耗, 其相应的分子量为:

$$1H + \frac{1}{2}C \quad \text{即} \quad 1 \times 1 + 12 \times \frac{1}{2} = 4$$

令Q表示生油气量, 则各阶段的生油气量可以表示如下(以原始干酪根为100%计算):

$$\text{未成熟阶段的生油气量: } Q_1^0 = \frac{12X_1^0 + 1Y_1^0 - 4Z_1^0}{12X_0 + 1Y_0 + 16Z_0}$$

$$\text{成油中期的生油气量为: } Q_2^0 = \frac{12X_2^0 + 1Y_2^0 - 4Z_2^0}{12X_0 + 1Y_0 + 16Z_0}$$

在地质上观测到的都是到一定阶段的累积生油气量, 故对我们来说最重要的是计算累积生油气量, 演化到各阶段的累积生油气量可按下式计算:

$$\text{未成熟阶段的累积生油气量为: } Q_1^0 = \frac{12X_1^0 + 1Y_1^0 - 4Z_1^0}{12X_0 + 1Y_0 + 16Z_0}$$

$$\text{到成油中期的累积生油气量为: } Q_2^0 = \frac{12X_2^0 + 1Y_2^0 - 4Z_2^0}{12X_0 + 1Y_0 + 16Z_0}$$

$$\text{到成油末期的累积生油气量为: } Q_3^0 = \frac{12X_3^0 + 1Y_3^0 - 4Z_3^0}{12X_0 + 1Y_0 + 16Z_0}$$

.....

$$\text{到干气阶段的累积生油气量为: } Q_4^0 = \frac{12X_4^0 + 1Y_4^0 - 4Z_4^0}{12X_0 + 1Y_0 + 16Z_0}$$

三 各类干酪根演化到不同阶段的累积生油气量

利用上述方法, 以未成熟阶段的原始干酪根为100%, 根据表1所列比值我们计算了各类干酪根组成的原子个数的变化, 并在此基础上计算了它们演化到不同阶段时的累积生油气量。如以I型干酪根为例, 可设其原始组成中有100个碳原子, 据表1所列数据, 则相应的氢原子数为167, 氧原子数为13。通过计算即可求出它们在演化过程中的具体变化量。现将计算所得I型干酪根在演化过程中元素组成原子个数的变化列于表2(设原始碳原子数为100)。

若以原始干酪根为100%, 据它们在演化过程中减少的碳、氢、氧的原子个数, 则很容易求出相应的生油气量。如以I型干酪根为例, 就可利用这些中间性数据按上一节提出的生油气量计算公式求出任一阶段的生油气量, 或到某一阶段为止的累积生油气量(以下简称累积生油气量)。如:

表2 I型干酪根在演化过程中到不同成熟阶段时元素组成的变化简表

生油气阶段		原 子 数		
		H	C	O
未成熟阶段		167	100	13
		126.24	90.31	3.26
成熟阶段	成油中期	81.93	54.31	1.97
	成油末期	60.13	34.29	1.93
过成熟阶段	生气末期	33.98	25.33	1.93
阶段	干气中后期	28.07	25.27	1.89

I型干酪根未成熟阶段的生气量为:

$$I Q_1^0 = \frac{12 \times (100 - 90.31) + 1 \times (167 - 128.24) - 4 \times (13 - 3.25)}{12 \times 100 + 1 \times 167 + 16 \times 13} = \frac{118.04}{1575} = 7.40\%$$

I型干酪根演化到成油中期末时的累积生油气量为:

$$I Q_2^0 = \frac{12 \times (100 - 56.31) + 1 \times (167 - 61.93) - 4 \times (13 - 1.97)}{12 \times 100 + 1 \times 167 + 16 \times 13} \\ = \frac{585.83}{1575} = 37.20\%$$

I型干酪根演化到成油末期结束时的累积生油气量为:

$$I Q_3^0 = \frac{12 \times (100 - 64.29) + 1 \times (167 - 50.13) - 4 \times (13 - 1.93)}{12 \times 100 + 1 \times 167 + 16 \times 13} \\ = \frac{501.11}{1575} = 31.82\%$$

I型干酪根演化到湿气阶段末时的累积生油气量为:

$$I Q_4^0 = \frac{12 \times (100 - 65.38) + 1 \times (167 - 33.98) - 4 \times (13 - 1.93)}{12 \times 100 + 1 \times 167 + 16 \times 13} \\ = \frac{504.18}{1575} = 32.01\%$$

I型干酪根演化到干气阶段中后期时的累积生油气量为:

$$I Q_5^0 = \frac{12 \times (100 - 65.27) + 1 \times (167 - 28.07) - (4 \times 13 - 1.89)}{12 \times 100 + 1 \times 167 + 16 \times 13} \\ = \frac{511.25}{1575} = 32.4\%$$

按上述方法我们计算了各类干酪根演化到不同成熟阶段时的累积生油气量(图4)。计算结果列于表3。

表3 各类干酪根演化到不同成熟阶段末时的累积生油气量

生 油 气 阶 段		干 酪 根 类 型			主 要 产 物
		I 型	II 型	III 型	
		%	%	%	
未 成 熟 阶 段		0	0	0	甲 烷 气
		7.40	3.42	3.06	
成 熟 阶 段	成 油 中 期	37.20	22.75	4.65	第 一 质 油
	成 油 末 期	31.82	21.24	4.59	轻 质 油
过 成 熟 阶 段	湿 气 末 期	32.01	22.85	8.90	湿 气
	干 气 中 后 期	32.46	23.21	9.18	干 气

(以原始干酪根的质量为100%计算)

以上生油气量是按原始干酪根为100%计算的, 除非在年轻的, 还未生油的岩石中

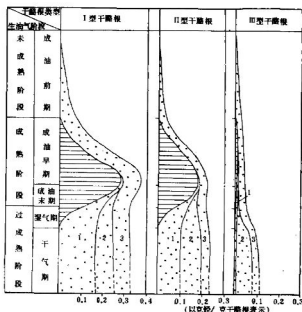


图4 各类干酪根成熟过程中累积生气量对比示意图

(以原始干酪根为100%计算)

1. 油裂解气 2. 干酪根裂解气 3. 未成熟阶段的甲烷气

这个含量是无法直接测定的，一般原始干酪根含量只有通过有机碳含量来推算。为了便于地质上应用，我们把各类干酪根到不同成熟阶段的累积生气量换算成了该量与相应阶段的有机碳含量的比值。换算的基本方法如下：

现在，国内外所采用的岩石有机碳含量的测定方法是，先用盐酸处理岩样以除掉碳酸盐岩所含二氧化碳，然后用干烧法或湿烧法使岩石中所含有机碳都转化成二氧化碳，再把这部分二氧化碳收集起来进行定量测定，最后根据这部分二氧化碳的量就可推算出岩石中的有机碳含量来。根据这个道理很清楚，所测有机碳含量既包含了干酪根在成熟过程中变化的残余有机质中的碳含量，同时也包括了已经转化成油气的那部分碳含量，但它不包括在成熟过程中转化成二氧化碳的那部分碳含量，所以有人把它称之为残余有机碳，也有人把它简称为有机碳。由此可以看出，有机碳与原始干酪根中的碳含量之差就是在成熟过程中以二氧化碳形式脱出氧时而损失的那部分碳，而损失的这部分碳则很容易根据脱出的氧原子数计算出来。如前所述，每脱出4个氧原子时，将相应地脱出2个分子的水和1个分子的二氧化碳。换言之，每脱出1个氧原子时，将相应地减少半个有机碳原子。据此很容易按氧原子减少的量计算出有机碳原子在各个阶段的数量。如以表2所列I型干酪根的数据为例，设其原始干酪根的有机碳原子数为100，则可以求出其

任一变化阶段的有机碳原子数。如:

未成熟阶段末期的有机碳原子数为: $Cx_1 = 100 - \frac{1}{4} \times (13 - 3.25) = 97.5625$

成油中期末时的有机碳原子数为: $Cx_2 = 100 - \frac{1}{4} \times (13 - 1.97) = 97.2425$

成油末期结束时的有机碳原子数为: $Cx_3 = 100 - \frac{1}{4} \times (13 - 1.93) = 97.2325$

湿气末期时的有机碳原子数为: $Cx_4 = 100 - \frac{1}{4} \times (13 - 1.93) = 97.2325$

干气中后期时的有机碳原子数为: $Cx_5 = 100 - \frac{1}{4} \times (13 - 1.89) = 97.2225$

据有机碳及相应阶段的生油气量很容易求出干酪根演化到任一阶段生油气量与相应的有机碳含量的比值。这里也以表2所列I型干酪根的数据为例计算一下生油气量与有机碳的相应比值。

未成熟阶段生油气量与有机碳的比值为:

$$I'Q_1 = \frac{12 \times (100 - 90.31) + 1 \times (167 - 128.24) - 4 \times (13 - 3.25)}{12 \times 97.5625} = 9.91\%$$

成油中期末时累积生油气量与有机碳的比值为:

$$I'Q_2 = \frac{12 \times (100 - 56.31) + 1 \times (167 - 61.93) - 4 \times (13 - 1.97)}{12 \times 97.2425} = 50.20\%$$

成油末期时累积生油气量与有机碳的比值为:

$$I'Q_3 = \frac{12 \times (100 - 64.29) + 1 \times (167 - 50.13) - 4 \times (13 - 1.93)}{12 \times 97.2325} = 42.95\%$$

湿气阶段末时累积生油气量与有机碳的比值为:

$$I'Q_4 = \frac{12 \times (100 - 65.38) + 1 \times (167 - 33.98) - 4 \times (13 - 1.93)}{12 \times 97.2325} = 43.21\%$$

干气阶段中后期时累积生油气量与有机碳的比值为:

$$I'Q_5 = \frac{12 \times (100 - 65.27) + 1 \times (167 - 28.07) - 4 \times (13 - 1.89)}{12 \times 97.2225} = 43.84\%$$

利用上述方法我们计算了各类干酪根演化到不同成熟阶段时的累积生油气量与相应的有机碳含量的比值。计算结果列于表4。

表4 各类干酪根演化到不同成熟阶段时的累积生油气量与有机碳比值

干酪根类型		I 型	I 型	I 型
生油气阶段		(%)	(%)	(%)
未成熟阶段		9.91	4.84	4.70
成熟阶段	成油中期	50.20	32.40	7.20
	成油末期	42.95	30.37	7.20
过成熟	湿气末期	43.21	32.68	14.05
阶段	干气中后期	43.84	33.18	14.55

(按有机碳重量比)

干酪根未成熟阶段的变化一般是在埋藏较浅, 地温较低的自然地质条件下发生的,

其主要产物是水、二氧化碳和甲烷气。这一阶段所形成的甲烷气,除在个别情况下可能富集成气藏外,一般很难被保存下来,故对油气藏的形成而言,实际意义不大。干酪根在成熟和过成熟阶段的变化都是在埋藏较深、地温较高的地质条件下发生的。所形成的那部分油气容易保存下来,故对油气藏的形成而言才具有真正的现实意义。为了突出这点,我们把生油阶段开始以后的累积生气量称之为“有效”生气量。其基本算法就是不考虑未成熟阶段所形成的甲烷气,而是以成油阶段开始时的干酪根为基础,计算出它演化到不同成熟阶段的生气量。计算方法同前,现将计算结果列于表5。

表5 各类干酪根演化到不同阶段的一般有效累积生气量

干酪根类型		I 型	II 型	III 型
生气阶段		%	%	%
成熟阶段	成油中期	17.18	23.25	1.91
	成油末期	30.48	21.68	1.67
过成熟阶段	湿气末期	30.77	23.65	7.16
	干气中后期	31.27	24.13	9.80

(以成油阶段开始时的干酪根为100%计算)

如前所述,干酪根的成分在成熟过程中是不断变化的,所以在生油研究中也难以确定生油阶段开始时的干酪根含量,而生油岩到现阶段的有机碳含量则很容易测定。为了便于地质上应用,我们利用前面讨论过的方法,把到各阶段的一般有效生气量换算成与它相应阶段的有机碳含量的比值。计算结果列于表6。

表6 各类干酪根演化到不同成熟阶段的一般有效生气量

干酪根类型		I 型	II 型	III 型
生气阶段		%	%	%
成熟阶段	成油中期	43.50	28.29	2.59
	成油末期	35.08	28.40	2.48
过成熟阶段	湿气末期	36.02	28.79	9.57
	干气中后期	36.91	29.37	13.15

(烃/有机碳重量比)

四 结果讨论

上述计算结果表明,本文所提出的生气量计算方法,不仅适用于不成熟或低成熟阶段生气量的计算,而且也可用于高成熟或过成熟阶段的生气量计算。由计算所得数据可以看出, I 型干酪根的生气量最大, III 型的最小, II 型的介乎两者之间,但接近于 I 型的生气量。故对找油找气而言, I 型和 II 型干酪根发育的地区最有远景。III 型干酪根在成油阶段的生油量很少,但在生气阶段的生气量却也有一定数量。因此,在 III 型干酪根发育的地区找到的油较少,而找到一定量的气是完全可能的。

由各种干酪根不同成熟阶段的累积生油气量的变化可以看出, 三种不同类型的干酪根各有各的特点。I 型干酪根演化到成油中期时的累积生油气量达到最大值, 而在生油末期却有所减少。到湿气或干气阶段的生油气量虽有所增加, 但仍达不到生油中期的最大值, 这种变化反映了生油中期时的生油量达到了最大值(图 4), 而当这部分油转化成气时由于它们的元素组成不同和有一部分多余的碳析出引起了累积生油气量的减少。到成气阶段由于干酪根中直接裂解出来的气较多, 所以累积生油气量又有所增加。II 型干酪根的变化与此不同, 由于它在成油期间生成的油不同, 所以由于油转化成气而造成的累积生油气量的减少也很不明显, 加之成气阶段由于干酪根中直接分离出来的甲烷气较多, 所以它到干气阶段的累积生油气量达到最大值。这点清楚地反映了 II 型干酪根是以生气为主的特性。I 型干酪根在成油和成气过程中的变化, 具有 I 型和 II 型干酪根的双重特性, 故它的累积生油气量在成油中期和干气阶段分别出两个高值阶段, 但总的来说在生油高潮阶段以后累积生油气量变化不大。

计算所得生油气量较实测的生油岩中的残余烃含量略大一些。例如, I 型干酪根的生油量在成油中期(即生油高峰阶段)计算结果为 43.50% (烃/有机碳), 而据 B. 蒂索 (1978)^[8] 的资料, 具 I 型干酪根的尤英他盆地的生油岩中实测的残余烃含量为 30% ± (烃/有机碳)。但他们所测定的烃含量只包括了 C_{14-32} 的正烷烃、异构烷烃、芳烃和环烷烃。也就是说, 所测定的残余烃含量未包括那部分分子小于 C_{14} 的轻组分以及在地史发展过程中已运移走的那部分烃类, 故理论计算值与实测值之差, 有可能与未检测到的那部分轻组分以及在地史发展过程中从生油层中运移出去的那部分烃类之和相当。若能精确地检测出生油岩中的残留的轻质烃的含量, 则有可能利用理论计算值与实测值之差较为准确地确定生油岩的排油气量, 即运移量。

结 论

综上所述可以做出如下结论: 基于油气是由干酪根在演化过程中形成的, 故可根据干酪根在演化过程中元素组成的比例变化, 利用物质平衡法计算出它们演化各个阶段的生油气量。理论计算值与实测值比较相近, 但略大一些, 它们之间的差有可能与未检测出的轻组分以及从生油岩中已经运移走的那部分烃类相当。本文所提出的累积生油气量乃是理论计算值, 是否完全符合实际, 尚待进一步通过实践或模拟实验加以证实。

(收稿日期 1981年4月18日)

主要参考文献

- [1] Hunt, J.M., 1961. Distribution of hydrocarbon in sedimentary rocks, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, Vol. 22, No. 1, P 37-49.
- [2] ———, 1979. *Petrochem geochemistry and geology*, W.H. Freeman & Co, San Francisco.
- [3] Erdman, J.G., 1975. Relation controlling oil and gas generation in sedimentary basins, *Proceeding of the Ninth World Petroleum Congress*, Panel discussion 3(1).
- [4] Tissot, B. P., Espitalie, J., 1975. L'évolution thermique de la matière organique des sédiments: applications d'une simulation mathématique. *Potential pétrolier des bassins sédimentaires et reconstitution de l'histoire thermique des sédiments*, *Rev. Inst. Français Pétrol*, Vol. XXX, No. 5,

- P. 743-778.
- [5] Van Krevelen, D.W., 1963. *Geochemistry of Coal*. Organic Geochemistry.
- [6] Tissot, B.P. and Welte, D.H. 1978. *Petroleum formation and occurrence*. Springer-Verlag, Heidelberg.
- [7] Tissot, B.P. et al., 1974. Influence of nature and diagenesis of organic matter in formation of petroleum. *Bull. AAPG*, Vol. 58, P.499-506
- [8] Ishiwatari, R., Rohrbach, B. G. and Kaplan, I. R., 1978. Hydrocarbon generation by thermal alteration of kerogen from different sediments. *Bull. AAPG*, Vol. 62, 4 No., P.678-682.
- [9] Espitalie, J. et al. 1977. Methode rapide de caracterisation des roches meres de leur potentiel petrolier et de leur degre d'evolution. *Rev. Inst. Francais Petrol.* Vol. XXXI. No.1. P. 23-42.

A PRELIMINARY STUDY OF HYDROCARBON PRODUCTION FROM VARIOUS TYPES OF KEROGEN AT DIFFERENT MATURE STAGES

Li Wenguo

(Headquarters of the 1st Petroleum Prospecting and Exploration, Ministry of Geology)

Abstract

After reviewing a few main available methods of calculation for hydrocarbon production, the writer, based on the mechanism of hydrocarbon formation through the evolution of kerogen, suggests a new method of calculating hydrocarbon production according to the variation in elemental proportion during the evolution of kerogen, and using this method, calculates the amount of hydrocarbon produced by individual types of kerogen at different mature stages. The results are shown in the following table (primary kerogen considered as 100%).

Type of kerogens		I	I	II	Main products
Oil & gas producing stages		(%)	(%)	(%)	
Undermatured stage		7.40	3.42	3.10	Methane
Matured stage	Middle oil-forming period	37.28	22.49	4.79	Heavy oil and common crude oil
	Latest oil-forming period	31.89	21.21	4.62	Light oil and condensing oil
Overmatured stage	Latest wet-gas-forming period	32.13	22.81	8.94	Wet gas
	Middle-late dry-gas-forming period	32.53	23.21	11.09	Dry gas

(Percentage in gram of hydrocarbon/gram of kerogen)

The calculated data indicate that Type I of kerogen produces the maximum amount of hydrocarbon and Type III produces the minimum, whereas Type II is between the two but close to that from Type I. Therefore, with exploring of oil and gas, the areas where Type I and II of kerogen are developed are the most promising. The oil production from Type III is very low at oil-forming stage but cumulative gas production is increased during gas-forming stage. Thus, in the area where Type III of kerogen is developed, we can only find a little oil but finding out a considerable amount of gas is possible.

For the convenience of applying this method to geology, the hydrocarbon production at various stages has been converted to a ratio of this production to the residual organic carbon, thus, greatly simplifies the procedure and enlarges the application extent.

It is a new attempt to calculate the hydrocarbon production in terms of the proportional variation of kerogen elemental components. In this discussion, we have theoretically demonstrated the correctness of this method and, unite the theory with practice to explain its practical value.

读《大油田地质学》

科学出版社 周明奎

哈尔布特等著、中国科学院兰州地质研究所译、甘肃人民出版社1979年出版的《大油田地质学》，对石油地质工作者来说是一本好读物。全书包括十二篇论文，其中六篇选自《Geology of Giant Petroleum Fields》一书。这本书是1988年4月在俄克拉荷马城召开的国际石油地质学家协会第53周年会上有关大油田的论文汇编；另外六篇选自其它杂志和书籍。这十二篇论文中有五篇是综述性的，论述了世界的、北美的和美国的大油田的分布规律；另外七篇论述了北海油气区、格鲁宁根气田、巴西雷奥卡伏盆地等典型大油田的地质特征。

关于“大油田”的定义，各个学者的看法并不一致。穆迪等^[1] (1972) 将原油最终可采储量超过5亿桶的称为大油田；哈尔布特在写《美国大油田》(1970)时采用的标准是：原油可采储量超过1亿桶（天然气超过1兆立方英尺），在写《世界大油田》(1970)一文中，则以原油可采储量超过5亿桶（天然气3.5兆立方英尺）为准；而涅斯捷罗夫等 (1975) 的定义是：大型油（气）田原油地质储量2—15亿吨（天然气1000—7500亿立方米），特大型油（气）田为15—100亿吨（7500—50000亿立方米），超大型油（气）田为>100亿吨（>50000亿立方米），还有一些作者提出，在不同地区可以采用不同的界线，这些界线都是人为划定的，目的都是为了反映油气分布的相对集中程度，所以对数字本身不必过于拘谨。

自六十年代末期以来，伯克和加德纳 (1969)、涅斯捷罗夫等 (1975)，以及许多其他作者，都论述过世界大油田的分布规律。这个问题为什么这样引人注意呢？这是因为，石油和天然气在世界范围内的分布是很不均匀的，据伯克和加德纳 (1969) 统计，除中国、朝鲜、越南、苏联和东欧各国以外，世界其他各国的油田约三万余个，其中71个大油田（占0.2%）的储量竟占了总储量的80%以上，而其中最大的8个油田（占0.03%）的储量就占了总储量的56%。其他学者对全世界的、北

[1] 凡未注明出处的，均引自《大油田地质学》。