

用剩碳率法探讨东营凹陷有机质演化史

杨 绪 充

(华东石油学院)

众所周知,对于油气资源的预测工作来说,探讨有机质的演化史具有极其重要的意义。近几年来,关于这一问题的定量研究方法在国内外均有所报道。其中较有影响的方法之一是由 Лопатин (1969, 1971) 提出^[1,2]并经 Waples (1980) 充实^[3]的时间-温度指数 (TTI) 法。该方法的优点是考虑了盆地的沉积史和构造史对有机质热演化过程的影响。但 TTI 值计算公式的理论基础比较薄弱,具体计算过程也比较烦琐。

1981年,有人提出了一个以“干酪根剩碳率”为基础的油气定量预测方法^[4]。1982年,这位论文作者又对自己的方法进行了补充^[5]。有关有机质成熟史的计算公式是严格按照化学动力学原理导出的,人们可以对生油岩埋藏温度与埋藏时间呈线性关系的盆地,以及沉积速率不稳定、有时甚至发生沉积作用停顿或地壳抬升的盆地,分别用不同的公式进行计算,同时还能对生油高峰和生油主带进行定量预测。这个方法的核心概念是“干酪根剩碳率”,故可将此法称为“剩碳率法”。就目前情况来看,该法可算是一种较有理论依据、较为切实可行的方法。本文试图应用这一方法对东营凹陷的有机质成熟史作一初步探讨。

一、方法简介

干酪根热降解过程可用下列一级反应方程来描述:

$$V = -\frac{dB}{dt} = KB = Bae^{-\frac{E}{RT}} \quad (1)$$

式中 V 为降解速率, B 为有潜力碳的瞬时剩存量, t 为时间, K 为降解速率因数, a 为表观频率因数 (3.292×10^7 / 百万年), E 为表观活化能 (15950 卡/摩尔), T 为绝对温度, R 为气体常数 (1.9865 卡/摩尔·开)。

由式 (1) 可导出有机质在时刻 t_p 的成熟度为

$$\alpha_p = \frac{B_p}{B_0} = \exp \left\{ - \sum_{i=1}^p \int_{t_{i-1}}^{t_i} K_i dt \right\} = \exp \left\{ - \sum_{i=1}^p S_i \right\} \quad (2)$$

式中 B_p 、 B_0 分别为 t_p 时刻的和原始的有潜力碳数量, K_i 为第 i 个时间间隔的降解速率因数。

对于温度为常数的时间间隔来说,

$$S_i = a \Delta t_i e^{-\frac{E}{RT_i}} \quad (3)$$

当温度不为常数时,

$$S_i = \frac{1.95a \Delta t_i}{\Delta T_i} \left\{ \frac{T_i^2}{E + 3.07T_i} e^{-\frac{E}{RT_i}} - \frac{T_{i-1}^2}{E + 3.07T_{i-1}} e^{-\frac{E}{RT_{i-1}}} \right\}. \quad (4)$$

在干酪根热演化过程中,成熟度 α 值由1逐渐减小。 α 下降到0.94为成熟状态的始点(开始大量生油), α 下降到0.06意味着干酪根的生油气潜力已消耗殆尽。

至于源岩中石油热裂解为天然气和碳质残渣的过程,则用下列一级反应方程表述之:

$$V^* = \frac{dq}{dt} = K^*y = ya^*e^{-\frac{E^*}{RT}}. \quad (5)$$

这里,油中碳原子的瞬时数量为 y ;裂解产物中碳的数量为 q ,碳的生成速率为 V^* ,速率因数为 K^* ;活化能为 E^* (50000卡/摩尔);频率因数为 a^* (8×10^{25} /百万年)。其余符号的意义同式(1)。

生油高峰可由下列各式算出:

$$K_i^* = a^*e^{-\frac{E^*}{RT_i}}, \quad (6)$$

$$V_i^* = \frac{K_i^*(1 - \alpha_i - q_{i-1} - 0.5V_{i-1}^*\Delta t_i)}{1 + 0.5K_i^*\Delta t_i}, \quad (7)$$

$$\Delta q_i = 0.5(V_i^* + V_{i-1}^*)\Delta t_i, \quad (8)$$

$$q_i = q_{i-1} + \Delta q_i, \quad (9)$$

$$y_i = 1 - \alpha_i - q_i. \quad (10)$$

按式(6)至式(10)的顺序计算出各时间间隔的 y_i 值, y_i 极大值所对应的时间、深度和温度即为生油高峰的时间、深度和温度。生油主带的顶界就是成熟带的顶界。在生油主带的底界, y 值已下降到其峰值的1/4。

二、方法应用

东营凹陷发育着巨厚的第三纪沉积,第三系自下而上分为孔店组、沙河街组、东营组、馆陶组和明化镇组。各地质时代的沉积速度相差悬殊,由每年0.01毫米到0.55毫米不等。本区在第三纪经历了两次明显的构造变动。一次是始新世末期的济阳运动形成了凹陷内各级构造的雏型;另一次是渐新世末期的东营运动,使各级构造基本定型。由于东营凹陷第三纪的沉积史和构造史具有一定程度的复杂性,有机质的温度史也相应地呈现出一定程度的复杂性。有鉴于此,本文将有机质的温度史按地层各组段的时间间隔进行分段,首先用式(4)算出各时间间隔的 S_i 值,然后用式(2)求成熟度 α_i 值。

东营凹陷的生油层为下第三系孔二段和沙四、沙三、沙一段等,其中以沙三段中部的暗色泥岩最厚、最好,是公认的主力生油层。在东营凹陷的各次一级洼陷中,渐新统沙三、沙一段等生油层一般厚约千米,其中利津洼陷最厚,可达1900米。

为了突出重点和节约篇幅,本文只讨论东营凹陷的主力生油层沙三段中部的有机质成熟史,并以该凹陷中面积最大、下陷最深、沉积最厚的次一级洼陷利津洼陷为主要研

究对象。

根据古植物及古气候资料,东营凹陷沙三、沙二、沙一段沉积时期的古气温为 15°C 。因地面温度一般比气温高约 $1\text{--}2.5^{\circ}\text{C}$ ^[6],故当时的古地面温度可定为 17°C 。自东营时至今,古气温为 12°C ,故地面温度可定为 14°C 。地温梯度则可统一取本区平均地温梯度值 $3.6^{\circ}\text{C}/100\text{米}$ 。

东营凹陷已经历了二十余年的勘探历程,积累了大量的资料,在生油地球化学研究方面亦取得了相当丰硕的成果。为稳妥起见,本文拟首先利用东营凹陷的地化研究成果检验一下剩碳率法在本区是否适用。为便于对比,选择沙三段中部埋深 2190 米的通 22 井进行验算。根据通 22 井的地层分层数据、各组段的绝对年龄以及前述地面温度和地温梯度值,按式(2)、(4)计算的结果见表 1。由表 1 可知,当沙三段中部埋深达 2190 米 (92.8°C) 时,其有机质成熟度 $\alpha=0.944$,恰为成熟状态的始点,与周光甲等的地化研究成果(2200米, 93°C 进入生油门限)甚符。由此证明剩碳率法在本区可行。

表 1 通22井沙三段中部有机质成熟度计算表*

地质时代	有机质年龄 (百万年)	埋藏深度 (米)	埋 藏 温 度		S_i	ΣS_i	α
			$^{\circ}\text{C}$	K			
渐新世	Es ₃ 中	0	17.0	290.0	0.0000	0.0000	1.000
	Es ₃ 末	2	30.9	303.9	0.0001	0.0001	1.000
	Es ₂ 末	4	35.2	308.2	0.0003	0.0004	1.000
	Es ₁ 末	6	43.0	316.0	0.0004	0.0008	0.999
	Ed末	11	46.7	319.7	0.0018	0.0026	0.997
中、上新世	Ng末	27	60.4	333.4	0.0115	0.0141	0.986
	Nm末	38	82.3	355.3	0.0293	0.0434	0.958
第四纪	Q	40	92.8	365.8	0.0142	0.0576	0.944

* Es 古地面温度取 17°C , Ed—Q 古地面温度取 14°C , 地温梯度均取 $3.6^{\circ}\text{C}/\text{百米}$ 。

利津凹陷中心部分尚无探井,其地层埋深数据是根据地震资料确定的。仍用前述温度数据,按式(2)、(4)计算其成熟度,按式(6)至式(10)计算其生油高峰,并进而确定其生油主带顶底界。计算时第一个时间间隔(t_0 到 t_1)取 $q_0=0$, $V_0^*=0$, 然后一个间隔一个间隔地顺序算下去,便可求得各间隔的 V^* 值和 γ 值,了解到石油数量随时间而变化的规律。表 2 列出了各项计算的结果。

三、结 果 讨 论

计算结果(表 2)表明,利津洼陷中心沙三段中部干酪根在东营时达到成熟状态(α 值已下降到 0.94),开始显著生油。用内插法可知干酪根成熟时的具体年龄约 9 百万年,埋深约 2400 米,温度约 100°C 。在馆陶时末和明化镇时初达到生油高峰(γ 达极大值 0.44)。与此相应的有机质年龄约 27 百万年,埋深约 3100 米,温度约 124°C 。生油主带的顶界即成熟状态的始点。生油主带的底界可定在 γ 值下降到其峰值的 $1/4$ 处,用内

表2 利津洼陷中心沙三段中部有机质演化史计算表**

地质时代	有年百万 机质龄年	埋藏 深度 (米)	埋藏温度		S	ΣS	α	K^*	V^*	Δq	q	γ
			·C	K								
渐新世	Es ₃ 中	0	0	17.0	290.0	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	Es ₃ 末	2	1090	56.2	329.2	0.0005	0.0005	0.9995	0.0000	0.0000	0.0000	0.0005
	Es ₂ 末	4	1652	76.5	349.5	0.0037	0.0042	0.9958	0.0000	0.0000	0.0000	0.0042
	Es ₁ 末	6	2019	89.7	362.7	0.0109	0.0151	0.9850	0.0001	0.0000	0.0000	0.0150
	Ed末	11	2715	111.7	384.7	0.0813	0.0964	0.9081	0.0031	0.0003	0.0008	0.0911
中、上新世	Ng末	27	3068	124.4	397.4	0.6474	0.7438	0.4753	0.0249	0.0108	0.0888	0.4351
	Nm末	38	3920	155.1	428.1	1.3916	2.1354	0.1182	2.3388	0.1236	0.7393	0.8289
第四纪	Q	40	4250	167.0	440.0	0.6158	2.7512	0.0639	11.4703	0.0410	0.1036	0.9325

** 所用古地面温度及地温梯度值同表1, 第四纪演化史是划为3个时间间隔估算的。

插法可知其时代大致为明化镇时晚期。与此相应的有机质具体年龄约37百万年, 埋深约3800米, 温度约150℃。最后, 有机质演化至今, 埋深达4250米, 温度达167℃, 已接近生油阶段的末期($\alpha=0.0639$), 但尚未跨入过成熟阶段(α 值未低于0.06)。

由表2及上述分析, 可进一步讨论如下:

1. 如前所述, 利津洼陷中心沙三段中部有机质进入成熟状态的具体年龄约9百万年, 埋深约2400米, 温度约100℃。与通22井比较, 由于利津洼陷中心沉降速度大, 因而达到成熟状态的时间缩短, 但需要的埋深和温度则相应增大, 这与通常谈到的时间-温度互补关系相一致。

2. 时至今日, 利津洼陷中心沙三段中部有机质的演化程度已接近生油阶段的尾声, 但尚未进入过成熟阶段。因受井深限制, 目前还缺乏3300米以下的沙三段深部地化资料, 故沙三段深部的实际演化状况仍属未知。但本区地化资料初步表明沙四段过成熟门限深度约为4050米(相应温度约为160℃)。沙三段比沙四段年轻, 这一门限深度理应较沙四段更深, 因此按剩碳率法预测的沙三段深部演化状况(过成熟门限深度在4250米以下)基本上是可以接受的。

3. 据剩碳率法计算的结果, 本区沙三段中部有机质目前已进入生油末期, 即已跨过了生油高峰, 生油潜力基本上已全部发挥。除其它有利条件外, 这也是本区含油特别丰富的重要原因之一。

4. 众所周知, 圈闭形成时间与生油时间之间的配合关系对油气的运移和聚集具有十分重要的意义。前已述及, 本区在第三纪经历过两次明显的构造变动。其中渐新世末期的东营运动使本区具备了今构造的基本面貌, 导致了各类圈闭的大量形成。如果与前述沙三段中部有机质成熟史对照起来看便会发现, 这些圈闭均属“同期圈闭”或“早期圈闭”, 对石油的运移、聚集和油藏的形成十分有利。圈闭形成时间与生油时间的配置相当理想, 这是东营凹陷尤其是利津洼陷周围含油特别丰富的又一重要原因。迄今的勘探实践业已证明, 利津洼陷周缘环状地区油田相当多而且密集, 构成了整个济阳拗陷最为典型的油气富集区。

5. 按剩碳率法预测, 本区沙三段中部有机质在最深的利津洼陷中心目前尚未进入过成熟阶段, 而其余各洼陷有机质的演化程度还不及利津洼陷, 可见东营凹陷沙三段中部主力生油层总的说来演化程度并不很高。本区所探得的石油多为比重、粘度较大的重质油, 只有少量轻质油和凝析油, 这一事实与上述判断是一致的。

综上所述, 可以认为无论是已知地化研究成果还是实际的石油富集状况以及油性特征等都证明用剩碳率法研究东营凹陷的有机质成熟史基本上是行之有效的, 因而也是可取的。另外, 还可利用此法进一步估算油气生成量和初次运移量(本文未涉及)。总之, 可将此法作为油气资源定量评价的又一手段。

(收稿日期 1983年7月1日)

参 考 文 献

- [1] Лопатин, Н. В., 1969, О роли геологического времени в процессах карбонизации каменных углей. Вестник Московского Университета, «Геология», №1, с.95-98.
- [2] Лопатин, Н. В., 1971, Температура и геологическое время как факторы углефикации. Известия Академии Наук СССР сер. геол., №3, с.95-106.
- [3] Waples, D. W., 1980, Time and temperature in petroleum formation, Application of Lopatin's method to petroleum exploration. AAPG Bull., Vol.64, No.6.
- [4] 杨文宽, 1981, 油气定量预测方法的探讨. 石油与天然气地质, 第2卷, 第2期.
- [5] 杨文宽, 1982, 一级反应方程的近似解及其在油气定量预测中的应用. 石油与天然气地质, 第3卷, 第2期.

ON THE MATURE PROCESS OF ORGANIC MATTERS IN DONGYING DEPRESSION IN TERMS OF RESIDUAL CARBON

Yang Xuchong

(Huadong College of Petroleum)

Abstract

The mature process of organic matters in the middle part of the 3rd member of Shahejie Formation (E_3^3), the major source rock in Dongying depression, is described in terms of residual carbon. The threshold of maturity (ca. 2,400m in depth and 100°C), climax of oil generation (ca. 3,100m in depth and 124°C) and the limits of major oil generation zone (the depth for the upper limit is equal to the threshold of maturity, the lower limit being about 3,700m, with temperature 147°C) are confirmed by calculation at the centre of Lijin seg in Dongying depression. At present, this centric part has entered into the end stage of oil generation, and it seems there is no more potential for petroleum generation.

The result of calculation fits well with geochemical study, and the enrichment and properties of oil and gas, thus proved that this method works effectively in the area studied, and that it could be another manner in quantitative assessment of oil and gas resources.