

有关生油岩定量评价问题的讨论

——与李汶国同志商榷

黄第藩 李晋超

(石油工业部石油勘探开发科学研究院)

六十年代以来,石油有机地球化学的迅速发展,用各种地球化学参数,从比较研究中确立了石油与其源岩之间的可靠的成因联系。生油岩的生油量也就成了石油有机地球化学工作者近几年来着力研究的一个重要课题,也是油气资源评价的基础。并且,当前石油地球化学的发展水平,为这一问题的解决提供了可能。现在,有关生油量定量评价的理论和计算方法,已常见于某些著作之中,也有些专门的论著相继发表,尽管已见诸于文献的种种计算方法大多是以干酪根热解成油和热力学阿仑尼乌斯公式为理论基础,但是所考虑的条件、所选定的参量以及所使用的实验和计算方法以至结果等,都有很大的差别。人们正在努力探求之中。

李汶国同志的《各类干酪根不同成熟阶段生油气量的探讨》一文^[1],是一篇根据干酪根的元素组成并设其演化产物只是油、CO₂和水,来试图探讨生油气量的文章,其中涉及到一些问题,笔者拟在此提出商榷。

一、关于油气产率和生油气量问题

干酪根的生油气量主要取决于其产率的大小,但二者毕竟是不能混同的,因为生油气量还与干酪根的丰度有关。李汶国的文章(下称李文),实际上讨论的是干酪根或有机碳转化为油气的比率问题,最终的计算结果是有机碳的羟转化率(羟/有机碳)。他着重探讨了各演化阶段的累积生油气量或有效累积生油气量,但从计算公式到计算结果都是以原始干酪根(沉积时的干酪根)为起点,分别至各演化阶段的平均羟转化率(算术平均值)。很难说,这就是真正的累积生油气量的概念。干酪根在达到成油门限之前的未成熟阶段是基本上不产油的,李文有3.06—7.40%(见李文表3)或4.70—9.91%(见李文表4)的生油气量,也反映了方法上的问题。同时,在李文的表3至表6这四张累积生油气量表,还有一个明显的矛盾,就是除Ⅱ型干酪根之外,随演化程度的加深,生油气量“累积”不上去(Ⅱ型),甚至越累积越小(Ⅰ型)。这也只能是平均羟转化率的特征。有关这一现象所作的解释(见李文第209页),值得商榷。

李文图1是引用Tissot的一张“不同干酪根的演化对比图”^[2],表现的是三种基本类型的干酪根在热演化中各阶段的和累积的产率。该图是根据不同类型干酪根的化学动力学的数学模拟而取得的下面这张表(表1)中的资料来编制的^[2-4];

表1 主要类型干酪根生油潜力和活化能分布表 (Tissot, 1975)

种 类	活 化 能 (千焦/克分子)	干 酪 根 类 型					
		I 型		II 型		III 型	
		有效浓度	频率因子 (10^6年^{-1})	有效浓度	频率因子 (10^6年^{-1})	有效浓度	频率因子 (10^6年^{-1})
E ₁₁	10	0.024	$4.75 \cdot 10^4$	0.022	$1.27 \cdot 10^5$	0.023	$5.20 \cdot 10^{13}$
E ₁₂	30	0.064	$3.04 \cdot 10^6$	0.034	$7.47 \cdot 10^6$	0.053	$4.20 \cdot 10^{16}$
E ₁₃	50	0.136	$2.28 \cdot 10^{26}$	0.251	$1.48 \cdot 10^{27}$	0.072	$4.33 \cdot 10^{26}$
E ₁₄	80	0.152	$3.98 \cdot 10^{30}$	0.152	$5.52 \cdot 10^{29}$	0.091	$1.97 \cdot 10^{32}$
E ₁₅	70	0.347	$4.47 \cdot 10^{31}$	0.116	$2.04 \cdot 10^{35}$	0.049	$1.20 \cdot 10^{33}$
E ₁₆	80	0.172	$1.10 \cdot 10^{24}$	0.120	$3.80 \cdot 10^{26}$	0.027	$7.56 \cdot 10^{31}$
干酪根的累积生油潜力		0.895		0.695		0.313	

Tissot图和李汶国图(见李文图1和图4), 所采用的坐标相似, 而内容不同。李图忽略了热动力学反应的本质, 只表现了一种烃的平均转化率, 而并非累积产率。这就是李图中I型干酪根的“累积生气量”的极限值仅仅与Tissot III型干酪根相当的原因。我们认为Tissot在其图、表中所表达的才是真正的干酪根累积生油潜力的概念。

同样是利用干酪根的元素组成计算累积烃转化率(生油潜力), 由于方法比较合理, 结果也就较为接近实际。如Dow (1977)的计算结果是: 对I、II、III型干酪根分别为66%、40%和16%^[5]。Saxby (1977)的计算, 如图1所示, 其结果是: 对I型干酪根(H/C原子比为1.5左右)为64.8—68.8%; 对II型的(H/C原子比为1.3)为45.8%; 对III型的(H/C原子比为0.76—0.99%)为5.9—26.5%^[6]。这两种计算方法所获得的各种相应干酪根的累积产率是基本一致的。李文的是平均烃转化率, 自然偏低。

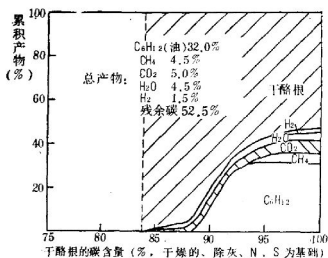


图1 从具有H/C=1.07, O/C=0.078的干酪根推算的成岩作用产物图
C=83.8%, H=7.47%, O=8.72%

二、关于累积生油潜力的极限值问题

所谓累积生油潜力的极限值是指干酪根的最大生油能力(Maximum oil source capacity), 即干酪根彻底降解的油气产率。李文中谈到“从理论上讲, 硬脂酸的生油潜力应比I型干酪根还大。但就以上所列举的生成甲烷的潜力来看, Erdman与Tissot所得出的数据差异很大, 而且, Tissot计算得I型干酪根生成甲烷的潜力比Erdman得到的硬脂酸生成甲烷的数量还大一倍多(分别为90%和34%——笔者), 这显然是不合理的”。在我们看来, 由于实验条件和方法不同, 这两个数字是不能一般地比较的, 也许Tissot的数字更接近于干酪根成油演化极限的实际。Erdman的34%这一数字是从硬脂酸无生物氧

化作用的计算中获得的^[7]。随着 O_2 的克分子数的增加,这一终极收率还将进一步下降为零甚至负值。同时也根本没有考虑硬脂酸所处的地质环境以及与其它生油物质共存的整体体系。生油作用本质上是还原(加氢)而不是氧化。即便是硬脂酸可以代表最佳的干酪根,当有自然加氢作用存在时(在成油环境中无疑是存在的),则其终极收率必然大大提高。而Tissot的数字^[2-4],是结合实际的地质情况(沉积史、地热史和干酪根类型等),经过较为严格的数学模拟而得出的,后来又为秋久国男的实验模拟所证实^[8]。应认为这一数字更接近于实际情况。Tissot和Welte在《石油的形成和产出》一书中^[9],曾汇编了一张世界许多地区油页岩及其页岩油的特征表(参见原书第232—233页)。其中的实际资料表明:油页岩干酪根的H/C原子比多在1.5—1.6的范围之内,其实测的有机质的转化率(最大生油潜力)达60—80%的情况,也是相当普遍的(占所举实例的一半以上)。这就进一步证明了Tissot所得出的干酪根累积生油潜力的极限值可达90%这个数字,是符合最佳I型干酪根实际的。看来,I型干酪根的累积产烃率应在60—90%之间。

三、关于计算方法上的一些问题

关于计算方法,李文中写道:“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氢的数量就等于相应的生油气量”。同时提出了脱除氧的近似计算方法(第203页)。尽管这一计算反映了生油作用的主要方面,可以求得一种平均产率,但把复杂的油气生成的化学反应动力学作用处理得过于简单化了。把李汶国的方法与杨文宽的碳原子分配法^[10]和Saxby的方法^[11]进行比较,也不难看出李汶国的成油作用中C、H、O元素的重新分配欠妥。 H_2S 的出现,干酪根及其烃类产物中元素组成的递变、可溶重杂原子组成的存在等因素,是应考虑的。同时,生油量(率)的计算,看来也不是用一种简单的元素组成差减法所能解决的。

在具体的算法上,看来李汶国的算法明显受到了Erdman计算式^[7]的影响。因此,他把沉积时原始干酪根的元素组成作为计算的起点100%来探求、反推那种早已消失了的、无法直接测定的原始干酪根的元素组成。因而,当这个问题得不到解决时,就提出了一个有效生油气量问题,得出了以门限值为起点的计算值(见李文表5、6)。我们认为,以门限值为计算的起点,是符合干酪根热解成油学说原理的^[11]。但如果未成熟阶段从干酪根的降解中有百分之几的生油量(见李文表3、4),不论其产物是什么,都不好说是无效的。我们认为^[12],在未成熟阶段,沉积物中有少量生物残余烃和生物化学转化烃,当干酪根本身的生油能力较差时,这部分烃类也还是值得考虑的。另外,Waples提出了一种求取原始干酪根H/C和O/C原子比的图解插入法^[13],值得参考。

李文在计算中,提出了一个把干酪根换算为有机碳的办法,其原理是:“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。”这是值得商榷的。李文实际运算的结果,从未成熟阶段末期直至气阶段的中后期,有机碳原子数只减少了0.34%,基本上并没有变化,这点变幅也不足以成油。值得注意的是,尽管在这阶段中,干酪根的O/C原子比虽变化不大,但其元素的重量百分组成

仍在变化着,烃在产生,氧在减少,只是速率较慢而已。

四、关于资料引用的若干问题

李文表1 各类干酪根成熟过程中元素的变化,看来主要是根据Tissot的干酪根演化Van Krevelen图解得出的(参见文献[5]第149页)。李文图3就是这张图,但引用不准确,如少了许多点子,未成熟的H/C原子比的变幅比一般模式大了一倍,镜质体反射率等值线也有所挪动等。

李文表2 I型干酪根元素组成变化简表,是根据表1所列H/C、O/C原子比并设碳原子数为100而换算出来的,并非该图3上点群的实测值。李汶国用此数据运算,求出了I、II、III型干酪根的累积生气量。我们认为,H/C原子比和O/C原子比是根据干酪根元素组成的重量百分比计算出来的。如果连一项元素组成的原始数据都没有,只知道两个比值,那是无法反算回去的。因此,李文的计算结果,不能反映原始数据面貌,意义不大。

首先,李文表2中的碳原子数,随演化程度的加深而降低,从开始直到干气阶段反而下降了34.73个原子数,这是违反热演化规律的。许多资料都证明了随着热演化程度的加深和镜质体反射率的提高,有机质必然发生挥发分减少而碳质富集的过程,即最终表现出石墨化的趋向(见图2)^[14]。

笔者还认为^[11],H含量也并不一定是在沉积初期的年青干酪根中最高,这个高值带也有可能出现在成油门限附近那种刚刚成熟而又尚未发生热解的干酪根中。这一点,从Laplante(1974)的工作结果(图3)中,也可以清楚地看到^[15]。笔者曾提出计算生油量的选值原则之一——必须以门限值作为计算的

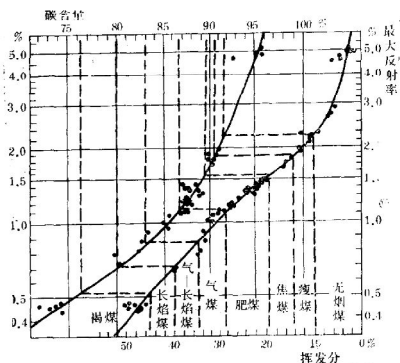


图2 镜质体最大反射率、挥发分与有机碳含量关系图
(据克特, 1960)

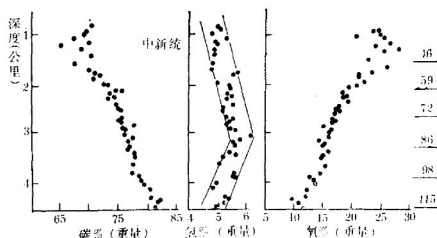


图3 干酪根随深度的碳化作用(拉普兰特, 1974)
(路易斯安那州喀麦朗教区南帕肯油田)

起点。显然,在未成熟阶段的成岩作用中,随着氧等杂原子的大量脱除,导致了干酪根中氢的逐渐富集。这就是年青干酪根熟化、定型的过程,直至成油门限,变成成熟的化石干酪根。

尽管某些干酪根热降解的实验模拟资料表明,干酪根的氢含量总是随热解增温而下降^[16],但我们认为这种孤立体系的实验,与地质环境中非闭合体系的干酪根自然演化过程是不能完全同等看待的。特别是成熟门限以前的低温演化阶段,过程的实质是复杂的生物化学作用而不是热降解。

李文表1、2的资料是根据Tissot的干酪根演化的Van Krevelen图解得来的,与此图有关的资料见表2。可以看出,Tissot表(表2)所列的数据与李文的表2面目迥异,特别是碳原子数的演变整个颠倒了。此外,1977年,C.Barker在AAPG进修教科丛书第

表2 某些典型干酪根的元素组成表

类型	盆地或国家	地层或年代	演化阶段	重 量 %						原 子 %					
				C	H	O	N	S		C	H	O	N	S	
I	Piceance盆地	绿河页岩始新世	D	76.5	10.0	10.3	0.6	2.6		37.2	58.3	3.7	0.3	0.5	
	尤英他盆地	绿河页岩始新世	D	75.9	9.1	8.4	3.9	2.6		38.7	55.9	3.2	1.7	0.5	
			C	80.9	8.6	4.4	3.8	2.3		42.4	54.0	1.8	1.0	0.8	
			C	82.7	4.1	8.3	1.7	3.2		58.8	34.9	4.4	1.0	0.9	
	澳大利亚	Coorongite,Q	D	77.5	10.8	9.3	0.4	2.0		35.9	60.4	3.2	0.2	0.3	
		Tasmanite,P	D	75.9	9.4	8.8	2.1	3.8		38.4	56.7	3.3	0.9	0.7	
	法国	Autunboghead,P	C	82.2	9.9	4.1	1.3	2.5		39.8	57.7	1.5	0.5	0.5	
II	巴黎盆地	下托尔阶	D	72.6	7.9	12.4	2.1	4.9		40.3	52.5	5.2	1.0	1.0	
			C	85.4	7.1	5.0	2.3	0.2		48.4	48.4	2.1	1.1	0.0	
	北萨哈拉盆地	志留纪	C	80.6	5.9	6.4	3.4	3.8		50.3	44.1	3.0	0.9	1.8	
			M	85.4	3.5	5.6	2.1	3.3		63.6	31.0	3.1	0.9	1.4	
	Esthonia(苏联)	Kukersite,O	D	73.5	8.3	15.6	0.4	2.2		39.5	53.6	6.3	0.2	0.4	
	莱茵地堑	梅塞尔页岩始新世	D	69.3	8.3	18.0	2.6	1.8		37.4	53.7	7.3	1.2	0.4	
III	杜阿拉盆地	晚白垩世	D	72.7	6.0	19.0	2.3	0.0		45.2	44.8	8.8	1.2	0.0	
			C	83.3	4.6	9.5	2.1	0.2		55.1	38.9	4.7	1.2	0.0	
			M	91.6	3.2	2.9	2.0	0.3		68.1	29.0	1.6	1.3	0.0	
煤	南斯拉夫	褐煤,上新世 Rm=0.43%	D	68.6	5.1	21.2	2.6	2.5		46.0	41.2	10.7	1.5	0.6	
	德国	煤,石炭纪 Rm=1.22%	C	88.3	5.0	3.9	2.0	0.8		67.6	39.3	1.9	1.1	0.2	
		无烟煤,石炭纪 Rm=2.75%	M	91.3	3.2	3.2	1.8	0.5		68.0	28.9	1.8	1.1	0.2	

演化阶段: D 成岩阶段; C 深成阶段; M 变质阶段
Rm为 镜质体反射率

10分册上,曾利用 Tissot 的 Van Krevelen 图解,保留 I、II 型干酪根演化的轨迹,外加上 3 个有代表性的干酪根元素组成(重量百分含量)的点,如图 4 所示,更形象地表明了干酪根在自然演化中其元素组成与原子比之间的关系^[17]。因此,李文计算的基础资料是不尽可靠的。

以上是笔者就李文所涉及到的有关生油岩定量评价的一些问题所提出的见解,以促进资源评价中对这一重要课题的深入探讨和研究。当前,应用热解色谱或热解色谱—质谱联用技术所取得的资料,直接进行生油量的定量评价,看来是一种快速、经济和有效的方法^[18],并且在油气勘探中得到了日益广泛的应用,是一个值得注意的发展趋向。

(收稿日期 1981年10月17日)

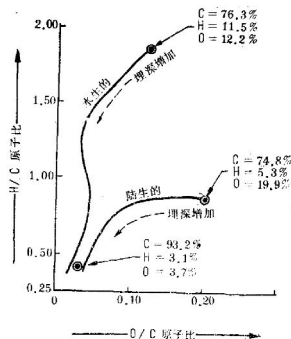


图 4 干酪根在一般成岩作用中的轨迹

表示 I 型木生的(主要是藻)和 II 型陆生的(主要是木质)有机质的 O/C 和 H/C 原子比随埋深增加的变化,为了便于和本文图 3 对比,图中标出了三个点的元素重量百分比。

参 考 文 献

- [1] 李汶国, 1981, 各类干酪根不同成熟阶段生油气量的探讨, 石油与天然气地质, 第 2 卷, 第 3 期, pp.199—211.
- [2] Tissot, B. et Espitalié, J., 1975, L'évolution thermique de la matière organique des sédiments. Applications d'une simulation mathématique, potentiel pétrolier des bassins sédimentaires et reconstitution de l'histoire thermique des sédiments. Revue de l'institut français du pétrole, Vol. XXX, No. 5, pp. 743—777.
- [3] Tissot, B., 1969, Premières données sur les mécanismes et la cinétique de la formation du pétrole dans les sédiments, simulation d'un schéma réactionnel sur ordinateur. Revue de l'institut français du pétrole, Vol. XXIV, No. 4, pp. 470—501.
- [4] Tissot, B., Deroo, G. et Espitalié, J., 1975, Etude comparée de l'époque de formation et d'expulsion du pétrole dans diverses provinces géologiques. Proceedings of 9th world petroleum congress, Vol. 2, PD.3(3), pp. 159—169.
- [5] Dow, W. G., 1977, Kerogen studies and geological interpretations. Journal of geochemical exploration, Vol. 7, No. 2, pp. 79—99.
- [6] Saxby, J. D., 1977, Oil-generation potential of organic matter in sediments under natural conditions. Journal of geochemical exploration, Vol. 7, No. 3, pp. 373—382.
- [7] Erdman, J. G., 1975, Relations controlling oil and gas generation in sedimentary basins. Proceedings of 9th world petroleum congress, Vol. 2, PD.3(1), pp. 139—148.
- [8] 秋久国男等, 1977, 1978, 石油根源岩石油根源岩に関する反応熱力学的研究, 石油技術協会誌. Vol. 42, No. 3, pp. 179—188; Vol. 42, No. 6, pp. 363—369; Vol. 43, No. 1, pp. 1—8.
- [9] Tissot, B. and Welte, D. H., 1978, Petroleum formation and occurrence - A new approach to oil and gas exploration, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York.
- [10] 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, pp. 104—113.
- [11] 黄第藩, 李晋超等, 1981, 柴达木盆地第四系至上新统六千米深并陆相生油研究简报, 石油勘探与开发, 1981 年, 第 5 期.
- [12] 黄第藩, 1981, 现代湖泊沉积物中有机质的特征及其地质意义, 地质地球化学, 1981 年, 第 5 期, pp. 25—36.

- [13] Waples, D.W., 1979, Simple method for oil source bed evaluation. AAPG Bull., Vol. 83, No.2, pp.239—245.
- [14] 杨起, 李思田等, 1979, 煤田地质学. 地质出版社.
- [15] Laplante, R.E., 1974, Hydrocarbon generation in Gulf coast tertiary sediments. AAPG Bull. Vol. 58, pp.1281—1289.
- [16] Ishiwatari R. et al., 1978, Hydrocarbon generation by thermal alteration of kerogen from different sediments. AAPG Bull., Vol. 62, No.4, pp.687—692.
- [17] Barker, C., 1979, Organic geochemistry in petroleum exploration. AAPG Continuing education course note series 10, AAPG education department.
- [18] Espitalié J et al., 1977, Méthode rapide de caractérisation des roches Mères, de leur potentiel pétrolier et de leur degré d'évolution. Revue de l'institut français du pétrole, Vol. XXXII, No. 1, pp.23—42.

ON THE PROBLEMS OF QUANTITATIVE EVALUATION OF SOURCE ROCKS

—OPEN TO DISCUSSION WITH COMRADE LI

Huang Difan Li Jinchao

(Scientific Research Institute of Petroleum Exploration and Development,
Ministry of Petroleum Industry, Beijing)

Abstract

Objection is lodged against the method used for calculating hydrocarbon production proposed in comrade Li's paper "A preliminary study of hydrocarbon production from various types of kerogen at different mature stage" (refer to "Oil & Gas Geology", Vol.2, No.3.). In this paper, a brief discussion is given on hydrocarbon productivity, its quantity from source rocks, its limit of cumulative hydrocarbon potential, as well as calculating method and related data etc. It is pointed out that not only Li's calculating method and result obtained are questionable, but also his basic data used for calculation are unreliable. The hydrocarbon productivity suggested in the paper is only the ratio of average hydrocarbon obtained from kerogen elemental components. The author has suggested that calculating hydrocarbon must be based on its threshold. In addition, some concept has accordingly proposed for solving this important object in this study.