

中国东部某些盆地下第三系 生油岩演化的数学模拟

罗 秋 霞

(地质部石油局石油地质中心实验室)

中国东部某些含油气盆地大部是以下第三系始—渐新统为生油层系，它们的地质条件和沉积环境有利于有机物的保存和向石油转化。根据干酪根热解生油理论所导出的生油模拟数学公式，编制了ALGOL—60语言的计算机程序，并对上述各盆地进行了计算。根据电算结果对这些盆地下第三系生油岩的演化进行了概略的分析和探讨，初步归纳了第三系生油岩具有成熟早、门限值高、烃类形成快等特点以及它们演化的一般模式，为今后定量研究打下了一定基础。

一、中国东部含油气盆地下

第三系生油岩的特征

我国东部广泛发育了不同类型的陆相中新世代含油气盆地，其中以新生代含油气盆地为主。本文所涉及到的华北济阳和冀中拗陷、邻近地区的泌阳和东明凹陷以及苏北高邮凹陷等含油气地区，均以下第三系始—渐新统为生油岩。我们选择了其中最有利生油层段作为数学模拟的对象。这些生油层系主要的地质和地球化学特征如下：

1. 有机质丰度高，母质类型大部属腐泥腐植过渡型。这些生油岩都是淡水—半咸水

的湖相沉积，有的地区局部层段可能有短暂海水注入的影响。在较深—深湖相范围内生油条件良好，都是大套的深灰—灰黑色泥岩、油页岩。有机物丰度一般高达1~2%。古湖盆里不仅有丰富的水生生物，而且掺入的陆源有机质比例较大，所以母质类型一般多属于腐泥与腐植的过渡型。我国陆相原油高蜡低硫的特征是与该类母质性质即陆植有机碎片的掺入密切相关。

2. 生油岩具有长期发育的沉积埋藏史。我国东部的这些古湖盆具有发育时间长—湖盆中良好的生油岩形成于盆地成生发展的特定阶段，即长期持续沉降的发育阶段；沉积物堆积速度快—一般为100~270米/百万年；以及地温梯度较高—一般为3.1~3.9℃/100米，因而形成了早第三纪巨厚的沉积岩和生油层系（表1）。

3. 随埋深增加，有机质向石油转化的数量有规律增长。可溶有机物的地球化学资料表明，随着埋藏深度的增加，氯仿抽提物中烃类含量有规律增长。当埋藏到一定深度后，生油岩中有机质大量向烃类转化。如图1济阳东营凹陷下第三系沙河街组第三段生油层，埋深在2200米左右时，烃含量在500PPM左右，烃/有机碳约2%左右；当埋深在2700

表1

我国东部某些盆地地下第三系生油岩沉积史况

含油拗陷 (凹陷) 名称	沉积岩 最大埋藏深度 (米)	生油岩 最大厚度 (米)	生油岩 发育时间 (百万年)	生油有利层段 最大埋藏速度 (米/百万年)	地温梯度 (°C/100米)	地表温度 (°C)
济阳拗陷	7000~12000	1200~1900	35	160~210	3.5	14
冀中拗陷	7900~8950	2900~3800	37±2	150~200	3.5	14.3
东明凹陷	7700	1300	31~37	150~250	3.2	14
泌阳凹陷	8300	800	31~37	239	3.7	14.9
高邮凹陷	~7000	>650	58	~120	3.11	14.4

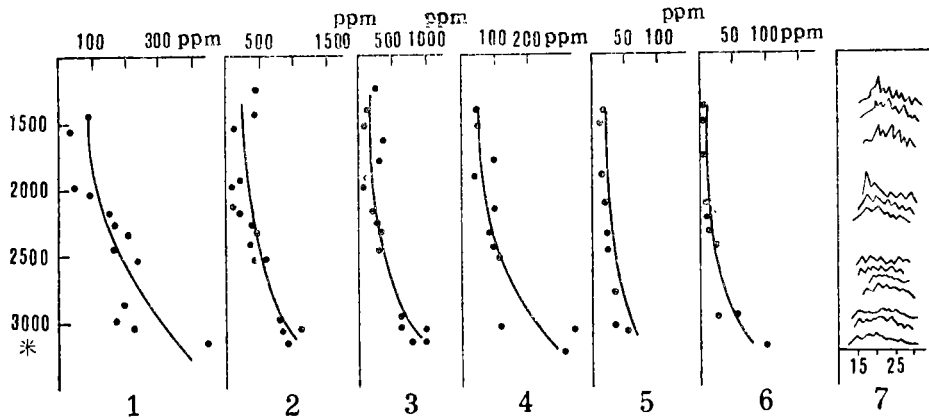


图1 东营凹陷下第三系沙河街组第三段生油岩烃类与深度关系

1. 氯仿抽提物 2. 总烃 3. 饱和烃 4. 氯仿抽提物/有机碳 5. 总烃/有机碳 6. 饱和烃/有机碳
7. 岩石氯仿抽提正构烷烃色谱曲线

米左右时, 烃含量在500PPM以上, 烃/有机碳达5%左右; 当埋深大于3000米时, 烃含量在1000PPM以上, 烃/有机碳近于10%。其它拗陷也都具有随埋深增加, 有机物向烃类转化增大的趋势, 如图2为冀中饶阳凹陷的演化情况。

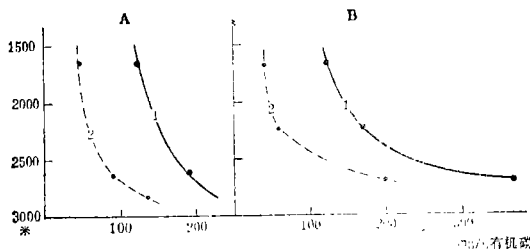


图2 饶阳凹陷沙一段氯仿抽提物和烃类与深度的关系

A 深灰色泥岩 B 油页岩 1. 氯仿抽提物 2. 烃含量

二、干酪根热演化和计算机模拟

根据有机物热解生油的理论, 石油主要是有机物沉积后干酪根在热力作用下化学变化的产物。不同沉积环境和物源所形成的不同类型的干酪根, 由于结构组成上的差异, 它们的生油潜量是很不相同, 一般在0.3—0.9之间连续变化(图3)。

这种干酪根热解生油的化学变化可视为一级化学反应。由此理论建立了热解生油的数学模拟, 其基本公式是:

$$\begin{cases} \frac{dC_A}{dt} = -K \cdot C_A \\ K = A \cdot e^{-\frac{E}{RT}} \end{cases}$$

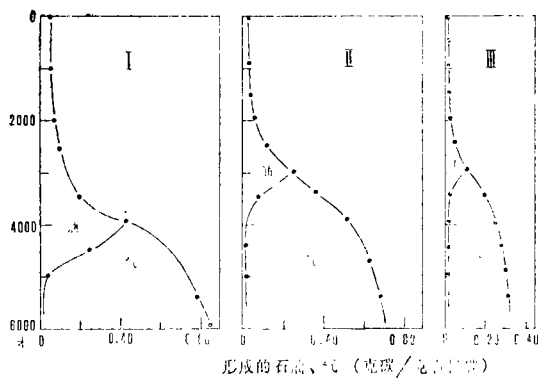


图3 在每100百万年规则沉降6000米以及35℃/公里地温梯度情况下对比不同干酪根的演化

式中 C_A 为参与反应的干酪根数量， K 为速度因子，通过阿累尼厄斯公式， K 取决于活化能 E 、绝对温度 T 和频率因子 A 。 R 是气体常数。因此，该化学反应的速度与母质类型有关，还与盆地的埋藏历史和地温梯度等因素有关。由此基本公式可导出一组生油模拟的变系数微分方程组。在有关的地质埋藏史和干酪根类型及活化能分布等参数满足的情况下，求解方程组就能得出某盆地干酪根的演化规律和相应的定量结果。我们求解方程组的数值积分采用了朗格—库塔法，通过逐步缩小数值积分步长，使近似解逐步逼近理论解。把上述计算方法编制成了ALGOL—60语言的计算机程序，原始数据一次输入，自动计算，最后打印计算结果。

根据上述各盆地的地质情况及母质类型的特特点，我们将干酪根生油潜量暂定在0.7左右，同时采用了巴黎盆地所提供的关于干酪根类型及活化能分布的参数，利用上述计算机程序进行了计算。计算工作是在上海交通大学计算中心DJS—6机上完成的。

三、电 算 结 果

文中所述深度和温度均指该地层的最大埋深和地温梯度，干酪根降解率系指已转化

的干酪根数量与干酪根生油潜量的比值。

各成熟度界限的划分，由于目前没有一个统一的定量标准，我们仅根据图形并参考有关资料，暂定为以干酪根降解率达1.5%左右作为进入生油低成熟阶段的界限（即门限值），以干酪根降解率5%左右作为进入主要生油阶段的界限。恰当与否，今后将结合其它标志加以修正。

1. 济阳拗陷

济阳拗陷主要生油层是渐新统沙河街组，我们对其中的东营、惠民、沾化三个凹陷进行了计算。由电算结果可以看出（图4），随着埋深的增加，干酪根逐渐降解生成的石油烃类，约在2100~2200米左右，温度88℃~91℃时，转化速度逐渐加快，因此，大致可以把这个深度和温度作为济阳拗陷的生油门限深度和门限温度，开始进入了生油的低成熟阶段。这时干酪根降解率约接近1.5%，时间约在沉积后10~13百万年。

当生油岩沉积后13~16百万年，深度达到2600~2700米，温度108℃左右，干酪根大量生成烃类，石油数量迅速增加，从而进入了主要生油阶段，此时干酪根降解率约大于5%。并在3200米附近，温度125℃左右，生油达到高潮，这时干酪根降解率一般在25%左右。

在3200米以下，随着埋深的继续增加，温度越来越高，热降解作用同时，出现了热裂解作用，不仅消耗干酪根，也开始破坏已生成的石油烃类而向更轻的气体烃类转化，生油阶段也就逐渐向成气阶段过渡。约在3400米深度以下，温度135℃以上，进入了以热裂解作用为主的成气阶段，这时干酪根降解率约大于43%。

从上述分析，大体可以得出济阳拗陷干酪根向石油演化各成熟阶段的时间、深度和温度界限。虽然在其中的不同凹陷中，由于

地质情况的差异, 所得结果有所不同, 但总的看来是大体相似的。

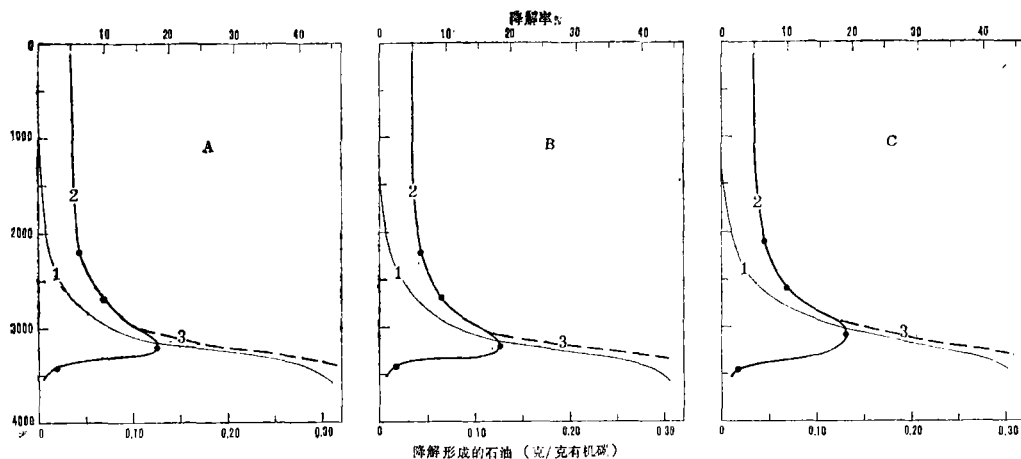


图4 济阳拗陷干酪根演化的电算结果

A 东营凹陷 B 惠民凹陷 C 沾化凹陷 1.降解曲线 2.油 3.气

2. 冀中拗陷

冀中拗陷的地质历史和地温梯度与济阳拗陷相似, 也是以沙河街组为主要生油层。我们对其中的饶阳和坝县二个凹陷进行了计算。结果与济阳拗陷颇为相似, 详见图5和表2。

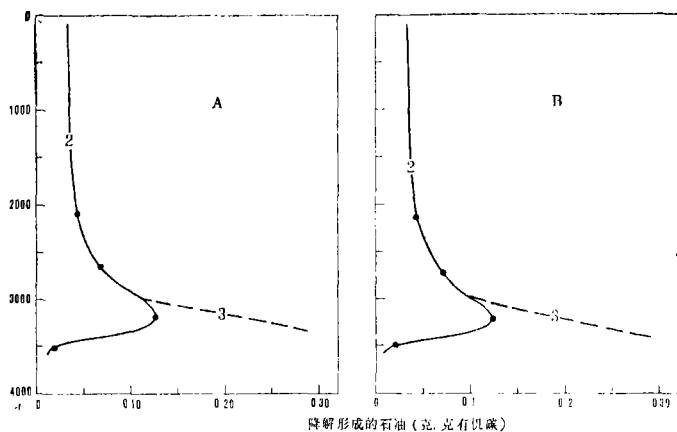


图5 冀中拗陷干酪根演化的电算结果

A 饶阳凹陷 B 坝县凹陷

3. 东明拗陷

东明拗陷也是以沙河街组为主要生油层。我们仅对其中脑里集、葛岗集、前梨园等三个次拗陷进行了计算, 结果见图6与表2。

4. 泌阳拗陷

泌阳拗陷的沉降速度和地温梯度在本文所述的几个拗陷中是最高的, 渐新统核桃园组为主要生油层, 有机炭含量亦较高, 因此它的生油条件比较好, 在埋藏不到10百万年, 深度已达2200米, 其时温度已高达93℃,

进入了生油的低成熟阶段(图7)。当深度达到2600米以下, 地温超过109℃时, 进入了主要生油阶段。在埋深2870米时, 生油阶段达到了顶峰, 这时的温度约在118℃左右, 干酪根降解率在26%左右。

当埋深达到3200米左右, 成气阶段即可完全取代生油阶段, 这时温度高达130℃, 干酪根降解率大于44%。

5. 高邮拗陷

高邮拗陷的沉降速度和地温梯度都偏低, 始新统阜宁组是主要生油层。它的门限深度约在2100米左右, 门限温度80℃(图8), 其时大约经历了17~18百万年左右。在埋深2800米以后进入了主要

生油阶段，这时温度约为102℃。并在3500米附近，温度123℃左右生油达到最大值。

估计该凹陷在接近4000米时进入成气阶段。

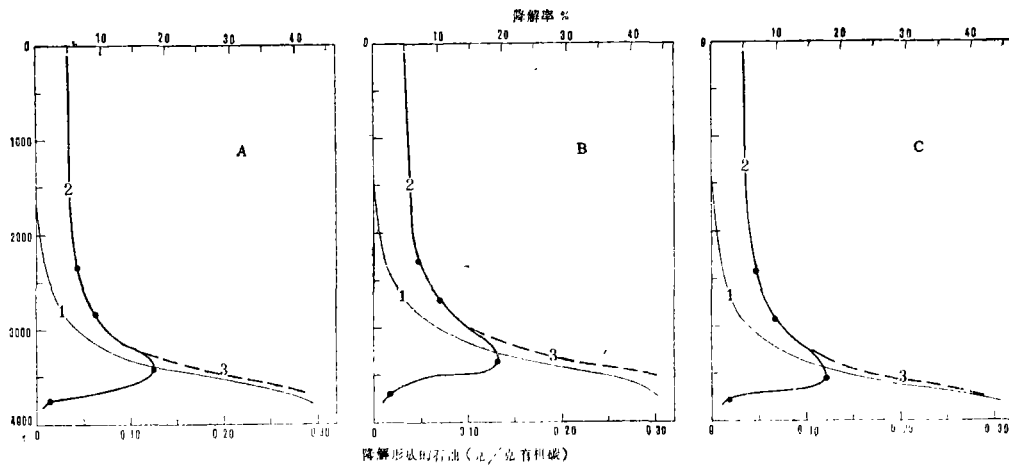


图6 东明凹陷干酪根演化的电算结果

A 脑里集 B 葛岗集 C 前梨园 1. 降解曲线 2. 油 3. 气

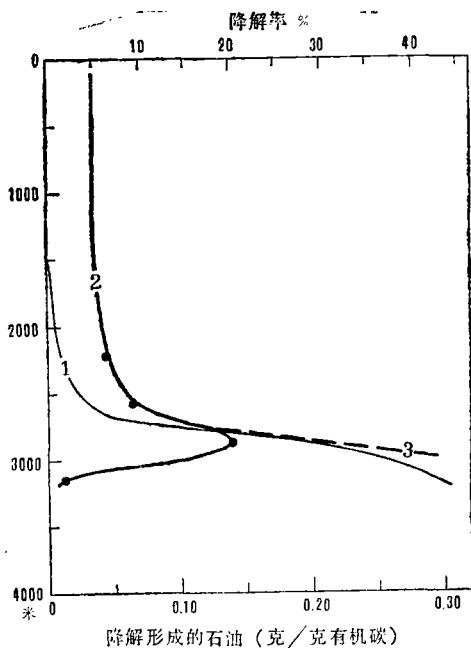


图7 泌阳凹陷干酪根演化的电算结果

1. 降解曲线 2. 油 3. 气

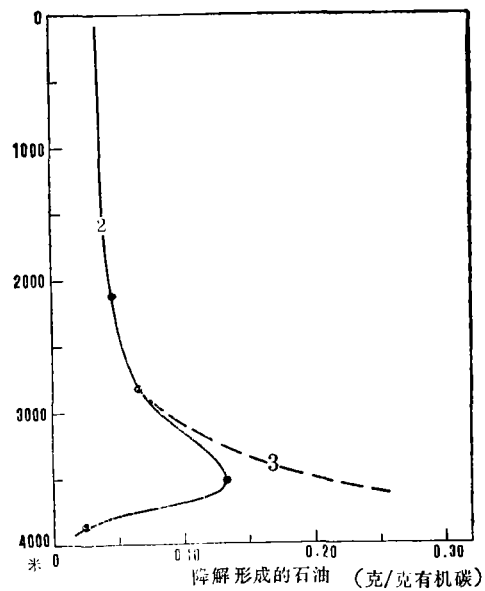


图8 高邮凹陷干酪根演化的电算结果

2. 油 3. 气

四、下第三系生油岩演化的初步探讨

我国东部某些盆地地下第三系生油岩有机

物一般比较丰富，母质类型大致相似，地温梯度都较高，因此各凹陷干酪根演化有其相似的一面。但由于各自又有其特定的环境和条件，使各凹陷在共性之中各具特性。

干酪根向石油转化的成熟度是与时代、埋深、温度和母质类型等因素有关。一般生油岩越年轻，其成油门限值越高。年轻的下第三系生油岩，由于它们埋藏速度快，地温梯度高，从而使这些年轻地层的有机质能较早向油气转化，形成了下第三系丰富的油气藏。因此生油岩成熟早，其门限温度和门限深度一般均较大，烃类形成较快是下第三系生油岩成油的一个显著特点。

从电算结果看(表2)，生油岩一般是在埋藏后9~14百万年就由未成熟陆续进入生油的低成熟阶段，门限深度一般是在2100—2400米，相应的门限温度约为86℃~93℃，干酪根降解率接近1.5%。而高邮凹陷生油岩时代相对较老(始新统)，埋藏速度和地温梯度又相对偏低，所以进入低成熟阶段的

时间也略长些(约在17~18百万年)，相应的门限温度也略低些(温度80℃左右，深度则在2100米)。大致在埋藏12~19百万年各凹陷相继进入主要生油阶段，这时深度一般为2600~2900米，温度为107℃左右。在此成熟度下约300~700米处，先后达到了生油的最大值。在主要生油阶段，干酪根降解率大于5%，最大可达到25%左右。

下第三系生油岩生油阶段的下限深度，根据计算，一般是在3400米以下到4000米处，温度一般不超过140℃，干酪根降解率不大于45%。

以上就是各凹陷在上述地质条件下经过计算得到的下第三系生油岩演化的一般模式。

表2 下第三系生油岩成熟阶段综合参数表

拗陷名称	拗陷名称	次拗陷名称	成熟阶段			综合参数						成气阶段				
			生油低成熟阶段			主要生油阶段						成气阶段				
			(门限)			成熟			最大值			(生油结束)				
深度(米)	温度(℃)	时(百万年)	干酪根降解率(%)	深度(米)	温度(℃)	时(百万年)	干酪根降解率(%)	深度(米)	温度(℃)	干酪根降解率(%)	深度(米)	温度(℃)	干酪根降解率(%)			
济阳	东营		2200	91	10.5	~1.5	2700	108	12.8	~5	3200	126	>24	3400	134	>43
		惠民	2200	91	10.7	~1.5	2700	108	13	~5	3200	126	>26	3400	133	>43
	沾化	2100	88	12.8	~1.5	2600	105	16	>5	3100	124	>24	3450	135	>43	
冀中	坝县		2100	88	11.0		2700	109	14		3200	126		3450	135	
	饶阳		2100	88	12.5		2650	107	16		3200	126		3500	137	
	东明	前梨园	2400	91	9.8	~1.5	2950	109	21.1	~5	3550	128	~24	3750	134	~43
		脑里集	2400	91	11.6	>1.5	2900	107	14	~5	3450	124	~25	3750	134	~43
		葛岗集	2250	86	14.5	>1.5	2700	101	19.5	>5	3350	121	~25	3700	133	>43
	泌阳		2200	93	9.2	~1.5	2630	109	11	~5	2870	118	>26	3150	129	>44
	高邮		2100	80	17.5		2800	102	23.5		3500	123		~4000		

五、问题讨论

1. 原始数据的选取

在计算中，有机物类型是根据有关特征以及生油阶段峰值的氯仿抽提物/有机碳比值大致推算得出，活化能分布采用了巴黎盆

地的数据(Ⅱ型);地表温度采用了当地年平均温度;由于这些下第三系生油层沉积后基本上无剧烈的构造变动和岩浆活动,因此古地温与今地温尚可类比,所以地温梯度是由井温资料取平均值而得;埋藏速度则是由生油岩发育时间及其最大埋藏深度计算得来(表1)。

参数的正确性直接关系到结果的可靠性。由于上述参数的选取受到现有资料 and 目前工作程度的限制,因此比较粗糙,故只能对各凹陷作概略的定性分析。有关定量分析和计算生油量等还有待进一步的工作。

2. 结果比较

从其它方面的研究成果看,东营凹陷门限值在2200米左右,从2200~2800米是成熟阶段;冀中拗陷门限深度在1500米深度以下,2700~3200米是其成油主带,其时温度大于108℃;而东明凹陷则以2400米深度和92℃温度为其门限值。这里,除冀中凹陷门限值偏低外,其它结论与电算结果基本是一致的。

泌阳凹陷是例外。实测结果在1300米和60℃以后进入门限值,在2000米处、90℃时生油量达到高峰,而在2300米以下、105℃以上生油数量明显下降,这与电算结果相差

甚远。是否由于凹陷后期有局部抬升现象,还是由于计算中原始数据选用不合适,有待进一步研究与探讨。

高邮凹陷的干酪根类型定为Ⅱ型,可能偏高。目前因资料不全,难以定论,结果仅作参考。

3. 干酪根降解率偏低

计算结果表明,在生油高峰阶段,干酪根降解率一般为25%左右,转化成石油的数量为0.12~0.13克/克(有机碳),见图4~图8。这不仅与图3中Ⅱ型干酪根相比偏低,且与实测生油岩的氯仿抽提物/有机碳比值相比亦偏低(如图1与图2)。干酪根降解率偏低可能与母质类型以及活化能数据的选取有关。按理干酪根类型以及它热解形成石油和原油裂化为气的反应活化能的选取,应根据适当的观察和实验,并经过调整后得到。而本计算是暂选用了巴黎盆地的数据,看来它与我国陆相生油岩的实际情况可能有所差别。今后要通过自己的实践,探寻符合我国地质条件的数据。

本文在编写过程得到各有关单位和同志的大力支持和指导,特别是参阅和引用了很多内刊资料,在此深表谢意。

征 订 启 事

《石油实验地质》原在北京由地质出版社出版,北京新华书店发行。从一九八〇年起转江苏出版,南京市邮局发行,全国各地邮局(所)订阅。漏订者可直接向本刊编辑部办理补订。

本刊为季刊,每年四期,季末月出版,每期定价0.30元,全年1.20元。