

文章编号: 1001-6112(2008)06-0606-05

# 中国南方海相烃源岩生烃动力学研究

蒋启贵<sup>1,2</sup>, 王延斌<sup>1</sup>, 秦建中<sup>2</sup>, 王勤<sup>2</sup>, 张彩明<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学, 北京 100083; 2. 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院  
无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214151)

**摘要:** 利用 Rock-Eval 6 热解仪和 Optkin 动力学软件对中国南方海相烃源岩 4 种有机质类型样品进行了动力学分析, 研究得出在相近演化阶段样品平均活化能是 III 型 > II<sub>2</sub> 型 > II<sub>1</sub> 型 > I 型, 生烃能力是 I 型 > II<sub>1</sub> 型 > II<sub>2</sub> 型 > III 型, 有效生烃期间(干酪根生烃转化率 10%~90%)活化能跨度  $\Delta E_{\text{I}} < 15 \text{ kJ/mol}$ ,  $15 \text{ kJ/mol} < \Delta E_{\text{II}_1} < 20 \text{ kJ/mol}$ ,  $20 \text{ kJ/mol} < \Delta E_{\text{II}_2} < 30 \text{ kJ/mol}$ ,  $\Delta E_{\text{III}} > 30 \text{ kJ/mol}$ , 有效生烃温度跨度  $\Delta T_{\text{I}} \leq 65 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $65 \text{ }^\circ\text{C} \leq \Delta T_{\text{II}_1} \leq 75 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $75 \text{ }^\circ\text{C} \leq \Delta T_{\text{II}_2} \leq 85 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T_{\text{III}} \geq 110 \text{ }^\circ\text{C}$ 。达到干酪根 10% 转化率的时间顺序是 III 型最早, II<sub>2</sub> 型早于 II<sub>1</sub> 型, I 型最晚。而完成 90% 干酪根转化率时间则是 I 型早于 II<sub>1</sub> 型, II<sub>2</sub> 型次之, III 型最晚。干酪根有机大分子结构特征和元素组成决定了其生烃活化能的频率分布特征, 海相优质烃源岩具有快速生烃的特质。

**关键词:** 海相烃源岩; 生烃动力学; 分子结构; 元素组成; 中国南方

中图分类号: TE122.113

文献标识码: A

## KINETICS OF HYDROCARBON GENERATION OF MARINE SOURCE ROCKS IN SOUTH CHINA

Jiang Qigui<sup>1,2</sup>, Wang Yanbin<sup>1</sup>, Qin Jianzhong<sup>2</sup>, Wang Qin<sup>2</sup>, Zhang Caiming<sup>2</sup>

(1. China University of Mining Technology, Beijing 100083, China;

2. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214151, China)

**Abstract:** With Rock-Eval 6 and Optkin kinetics software, the kinetics analysis on four types of kerogens of marine hydrocarbon source rocks in South China were carried out. The results showed that, in the similar maturity period, the hydrocarbon generation activation energy of kerogen was III > II<sub>2</sub> > II<sub>1</sub> > I; the ability of hydrocarbon generation was I > II<sub>1</sub> > II<sub>2</sub> > III; the span of generating effective hydrocarbon activation energy was  $\Delta E_{\text{I}} < 15 \text{ kJ/mol}$ ,  $15 \text{ kJ/mol} < \Delta E_{\text{II}_1} < 20 \text{ kJ/mol}$ ,  $20 \text{ kJ/mol} < \Delta E_{\text{II}_2} < 30 \text{ kJ/mol}$ ,  $\Delta E_{\text{III}} > 30 \text{ kJ/mol}$ ; the span of generating effective hydrocarbon temperature was  $\Delta T_{\text{I}} \leq 65 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $65 \text{ }^\circ\text{C} \leq \Delta T_{\text{II}_1} \leq 75 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $75 \text{ }^\circ\text{C} \leq \Delta T_{\text{II}_2} \leq 85 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T_{\text{III}} \geq 110 \text{ }^\circ\text{C}$ . The time of hydrocarbon generation conversion rate to reach 10% was III < II<sub>2</sub> < II<sub>1</sub> < I; and the type I kerogen first reached to 90% conversion rate, and then the type II<sub>1</sub>, type II<sub>2</sub> and type III of kerogen. The character of hydrocarbon generation activation energy distribution of kerogen was determined by their element composition and organic high molecular structure. The hydrocarbon generation speed of good marine source rocks was very fast.

**Key words:** element composition; molecular structure; hydrocarbon generation kinetics; marine source rocks; South China

中国南方海相主要发育了 4 套区域性主力烃源岩层(下寒武统、下志留统、下二叠统和上二叠统)。烃源岩主要是泥岩、含钙页岩、泥灰岩和灰岩, 有机质母质主要来源于海生浮游生物以及部分搬运来的陆源高等植物。利用生烃动力学方法来

研究烃源岩干酪根生烃机制已是常用的手段, 对干酪根生烃动力学的研究前人已开展了不少工作。对于不同类型干酪根生烃活化能的大小和进入生油门限的早晚, 不同学者根据自己的研究给出了不尽相同的认识, Tissot 等<sup>[1]</sup>认为生烃活化能是

收稿日期: 2008-05-14; 修订日期: 2008-10-06。

作者简介: 蒋启贵(1964—), 男, 高级工程师, 博士生, 主要从事油气地球化学研究工作。E-mail: qigui2004@126.com。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2005CB422102)和中国石化科技开发项目(P06083)。

$E_{II} < E_I < E_{III}$ , 而黄第藩等<sup>[2]</sup>研究认为在热解生油阶段是  $E_I > E_{II} > E_{III}$ ; 有学者认为生烃时间是 I 型早于 II 型, II 型早于 III 型<sup>[3]</sup>, 也有认为平均活化能低者先进入生油门限, 高者后进入生油门限<sup>[4]</sup>。我国南方海相烃源岩由于沉积环境和有机质类型的差异性, 其生烃机制应有自己的特点。本文以一系列平行一级反应模型对我国南方海相不同类型烃源岩进行了生烃动力学研究, 以探讨其生烃能量和有效生烃期生烃过程的差异性。

## 1 研究样品和方法

研究样品采自四川广元上寺磨刀垭剖面 (GY35)、云南禄劝茂山剖面 (MS5, JS1) 和黔东南鱼洞大坡煤矿 (YD4) 的海相烃源岩。样品的基础分析见表 1。除 YD4 煤样成熟度稍高外, 其它样品成熟度都较低, 处于低熟—成熟阶段。利用 Rock-Eval 6 热解仪对上述样品进行动力学研究, 选择 3 种升温模式, 分别以 5, 15, 25 °C/min 的升温速率进行热解分析, 再将分析数据导入法国石油研究院开发的动力学研究软件 Optkin 进行分

析研究。

## 2 结果与讨论

### 2.1 活化能分布特征

有机质类型从 I 型到 III 型样品活化能分布由不对称型逐渐过渡到正态分布, 范围由窄变宽 (图 1)。主频生烃 ( $P_1$ ) 与次频生烃 ( $P_2$ ) 之和逐渐降低 (表 2), 活化能 ( $E$ ) 均逐步增大, 且 III 型  $>$  II 型  $>$  II<sub>1</sub> 型  $>$  I 型, 生烃能力为 I 型  $>$  II<sub>1</sub> 型  $>$  II<sub>2</sub> 型  $>$  III 型。以干酪根生烃转化率 10% 到 90% 为干酪根有效生烃区间, 其生烃能量跨度 ( $\Delta E$ ) 也逐渐增大。I 型干酪根样品主次频生烃比例达到了 80.9%, 而有效生烃能量跨度仅 13 kJ/mol, 充分反映了一个快速生烃过程; II<sub>1</sub> 型干酪根虽然主、次频活化能和 I 型干酪根一样, 但其平均活化能和有效生烃能量跨度都要稍大一些, 并且其主次频生烃比例比 I 型干酪根要小很多 (56.4%), 说明了其生烃过程要长于 I 型干酪根; II<sub>2</sub> 型干酪根主、次频和平均活化能都有了明显的增加, 有效生烃能量跨度增加到 25 kJ/mol, 生烃过程比 II<sub>1</sub> 型干酪根长, 同时主次

表 1 研究样品基础分析数据

Table 1 Basic analytical data of the samples

样品	岩性	层位	$S_2/(mg \cdot g^{-1})$	$T_{max}/^{\circ}C$	$I_H/(mg \cdot g^{-1})$	$I_O/(mg \cdot g^{-1})$	$R_o, \%$	TOC, %	类型
MS5	黄褐色泥岩	D <sub>2</sub>	6.54	440	532	48	0.53	1.23	I
JS1	黑色泥灰岩	D <sub>2</sub>	3.40	438	425	45	0.59	0.85	II <sub>1</sub>
GY35	黑色页岩	P <sub>2</sub>	45.15	437	365	6	0.56	11.74	II <sub>2</sub>
YD4	煤	P <sub>2</sub>	142.20	439	233	4	0.71	60.94	III

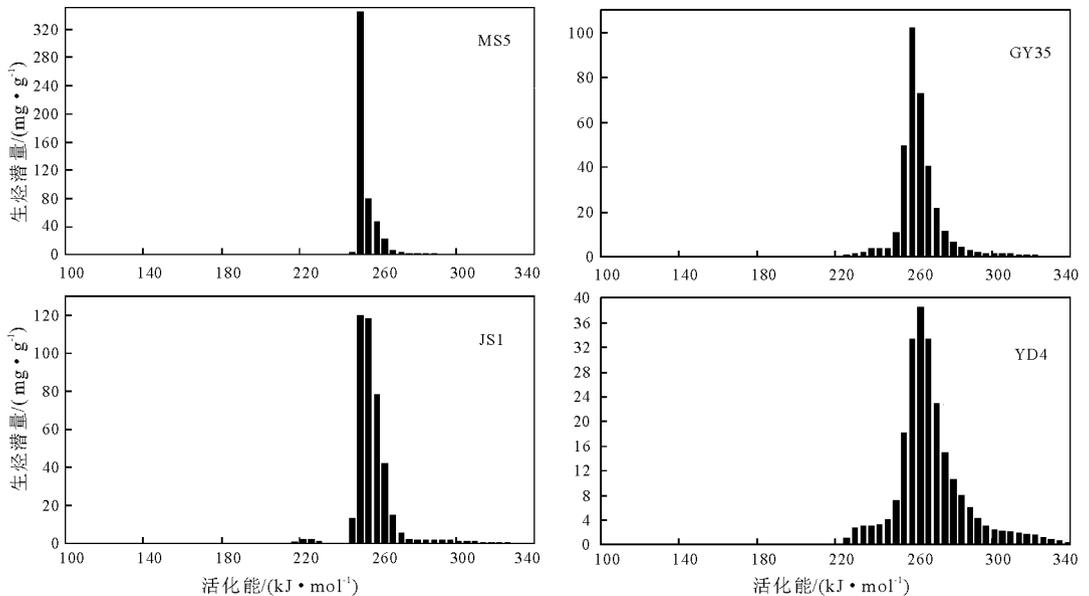


图 1 样品活化能频率分布特征

Fig. 1 The distribution of hydrocarbon generation activation energy of the samples

表 2 动力学分析参数

Table 2 The parameters of kinetics

样品	主频活化能/ (kJ·mol <sup>-1</sup> )	主频生烃, %	次频活化能/ (kJ·mol <sup>-1</sup> )	次频生烃, %	平均活化能/ (kJ·mol <sup>-1</sup> )	ΔE/ (kJ·mol <sup>-1</sup> )	频率因子/ (s <sup>-1</sup> )	生烃潜量/ (mg·g <sup>-1</sup> )
MS5	251	65.6	255	15.3	253.66	13	1.91E+16	525.7
JS1	251	28.4	255	28.0	257.65	17	3.33E+16	424.3
GY35	259	28.6	264	20.5	263.62	25	1.02E+17	357.0
YD4	264	16.3	268	14.2	268.78	42	1.45E+17	236.0

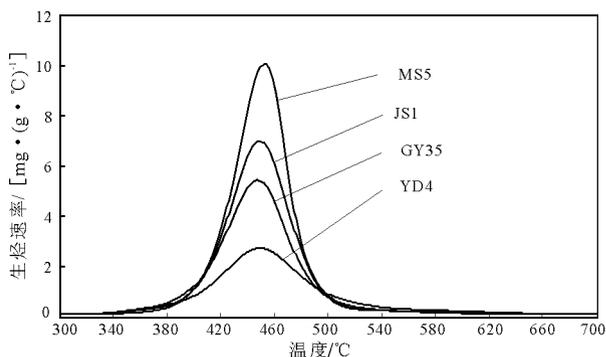


图 2 生烃速率特征

Fig. 2 The velocity of hydrocarbon generation

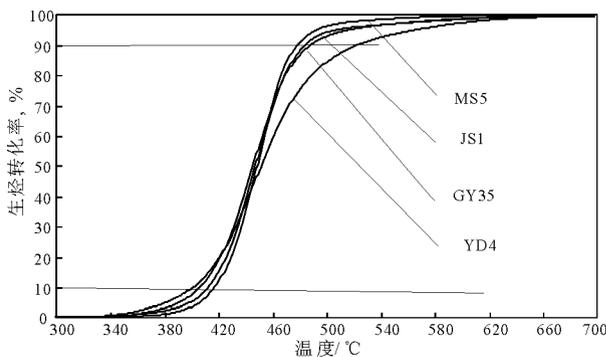


图 3 生烃转化率特征

Fig. 3 The kerogen transformation ratio of the samples

表 3 最大生烃速率与有效生烃温度跨度

Table 3 The maximum hydrocarbon generation velocity and the span of effective hydrocarbon generation temperature

样品	V/[mg·(g·°C) <sup>-1</sup> ]	T <sub>1</sub> /°C	T <sub>2</sub> /°C	ΔT/°C
MS5	9.98	419.3	479.4	60.1
JS1	6.89	414.3	485.5	71.2
GY35	5.34	408.3	490.5	82.2
YD4	2.63	402.3	524.6	122.3

注: V 为最高生烃速率; T<sub>1</sub> 为生烃转化率达 10% 时的温度; T<sub>2</sub> 为生烃转化率达 90% 时的温度。

有效生烃能量跨度达到了 42 kJ/mol, 生烃过程要缓慢得多。

### 2.2 生烃转化率特征

不同类型有机质除生烃潜力有明显差别外, 其生烃速率也差异明显, 从速率曲线(图 2)和转化率曲线(图 3)可看出, 达到开始有效生烃 10% 时的温度是 I 型 > II<sub>1</sub> 型 > II<sub>2</sub> 型 > III 型, 而达到 90% 生烃时的温度则是 III 型 > II<sub>2</sub> 型 > II<sub>1</sub> 型 > I 型。III 型干酪根最先达到有效生烃 10%, 其温度最低, 而完成 90% 生烃率时温度最高; I 型干酪根刚好相反, 其最后开始生烃而最先达到高转化率。II<sub>1</sub> 型和 II<sub>2</sub> 型介于它们之间。以 ΔT 表示有效生烃温度跨度, 则有明显的规律性: III 型 > II<sub>2</sub> 型 > II<sub>1</sub> 型 > I 型(表 3)。杨国华等<sup>[5]</sup>研究认为 I 型干酪根 ΔT ≤ 80 °C, II 型干酪根 80 °C ≤ ΔT ≤ 110 °C, III 型干酪根 ΔT ≥ 110 °C, 这和我们的结果一致。结合本次研究可得出 I 型干酪根 ΔT ≤ 65 °C, II<sub>1</sub> 型干酪根 65 °C ≤ ΔT ≤ 75 °C, II<sub>2</sub> 型干酪根 75 °C ≤ ΔT ≤ 85 °C, III 型干酪根 ΔT ≥ 110 °C。不同地区样品可能有所出入, 但规律性是存在的。最高生烃速率(V)是 I 型 > II<sub>1</sub> 型 > II<sub>2</sub> 型 > III 型。结合有效生烃活化能跨度区间, 可以充分说明有机质类型好的生油岩不仅生烃能力强而且具有较快的生烃速率, 一旦开始生烃就会在一个很窄的温度区间很快达到高的转化率, 这对于油气藏的形成具有重要的意义。

### 2.3 动力学影响因素

干酪根生烃动力学的不同特征反映了成烃母质有机质组分和分子结构的差异。研究表明壳质体与平均活化能有负相关关系<sup>[6,7]</sup>, 并且某些壳质组分如树脂体、木栓子体、角质体等具有很低的活化能, 是未熟—低熟油的重要烃源; 镜质体和惰质体与平均活化能有正相关性, 而藻类体一般与平均活化能存在负相关性。4 个样品的显微组分特征见表 4, MS5 样品腐泥组和壳质组占到近 90%, JS1 样品也达 77%, 并且组分单一, 所以其活化能频率分布窄且平均活化能较低, 而 YD4 样品主要

频生烃比例也减少到 49.1%; III 型干酪根活化能分布宽, 生烃能量最高, 主次频生烃比例为 30.5%, 且

表 4 样品显微组分和元素组成特征

Table 4 The maceral and element composition of the samples

样品	腐泥组, %	壳质组, %	镜质组, %	惰性组, %	次生组分, %
MS5	62.7	27.4	7.3	2.0	0.6
JS1	77.0	0	1.5	2.0	19.5
GY35	4.5	0	0	4.0	91.5
YD4	0.5	9.0	56.0	34.5	0

是镜质组和惰质组,平均活化能最高。这充分证实了上述认识的正确性,也说明了不同有机显微组分有机大分子结构和元素组成存在差异性。

干酪根元素组成主要有 C, H, O, N 和 S 等,由于分子结构组成的不同其发生化学键断裂所需的能量就不同。表 5 提供的部分化学键的键能反映了一般化学键键能的大小规律,和有机大分子实际有一定差距。从中可以看出,杂原子 C—S、C—N 键键能较低;脂基中 C=O 键很稳定不易分解,但在  $\alpha$  位的 C—O 键和  $\beta$  位 R—O 键都很弱,易发生脱 CO<sub>2</sub> 反应;在芳脂醚(Ar—O—C)结构中的 C—O 键能也很弱,如甲氧基与乙氧基,其离解能为 260~280 kJ/mol,脂族结构中的 C—S 比芳族结构中的离解能要低很多。因此,富含 S, O, N 杂原子会使有机大分子整体生烃活化能降低<sup>[8~11]</sup>,生烃过程提前。由于空间构型和化学键所处位置的不同,同一化学键的键离解能会有较大的区别,如表 6 所示。在脂链结构中,长链烷烃越靠近中间处, C—C 键能越小;碳链越长, C—C, C—H 键能越小;异构烷烃 C—C, C—H 键能小于相应的正构烷烃,烷烃中 C—H 键能是伯位大于仲位大于叔位。因此对脂链烷烃的裂解是先断长链再断短链,先断 C—C 键再断 C—H 键,先断异构烷烃后断正构烷烃;环烷烃侧链上的 C—C 键断裂后可以使侧链变短甚至脱出侧链,同时生成较小分子的烃类,其断链和长链烷烃遵循同样的规律。三元和四元环由于 C—C 化学键夹角不够,内能大所以稳定性差;五元环以上环烷烃上的 C—C—C 键夹角接近 109°28', 所以其热稳定性高,但其在高温时也能发生断链,生成小分子的烷烃、烯烃和二烯烃;芳香环对热非常稳定,一般不会断链,其主要发生的是侧链的断链和脱烷基化反应,受苯环共轭双键的影响,具有正构烷烃取代基的芳环侧链上不同位置的 C—C 键能相差很大,  $\alpha$  位受影响使键能增大,  $\beta$  位受影响使键能大为削弱,  $\gamma$  位由于距离较远受此影响较少。

藻类物质是海相优质烃源岩的主要母质,富含杂原子元素,尤其是硫元素,形成的化学键能较低,

表 5 部分化学键键能表<sup>[12]</sup>

Table 5 Some parts of chemical bond energy

化学键	键能/ (kJ·mol <sup>-1</sup> )	化学键	键能/ (kJ·mol <sup>-1</sup> )
C—C	346	N—H	391
C—O	359	C—N	305
C=C	610	C—S	272
C=O 醛	736	C—H(平均)	415
C=O 酮	749	N—O	201
S—H	347	S—O	498

表 6 不同分子结构的化学键离解能<sup>[12,13]</sup>

Table 6 The chemical bond dissociation energy

化学键	键能/(kJ·mol <sup>-1</sup> )
CH <sub>3</sub> —CH <sub>3</sub>	360
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> —C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	335
nC <sub>3</sub> H <sub>7</sub> —nC <sub>3</sub> H <sub>7</sub>	318
nC <sub>4</sub> H <sub>9</sub> —nC <sub>4</sub> H <sub>9</sub>	310
(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> C—C(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	285
CH <sub>3</sub> CO—C(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	297
CH <sub>3</sub> CO—C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	322
CH <sub>3</sub> CO—CH <sub>3</sub>	339
ArO—CH <sub>2</sub> R	270
ArCH <sub>2</sub> —Ar	368
ArCH <sub>2</sub> —CH <sub>2</sub> R	271
Ar—CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> R	375
Ar—CH <sub>3</sub>	427
Ar—C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	414
Ar—C(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	385

表 7 样品元素特征

Table 7 The element character of the samples

样品	H/C	O/C	S/C	N/C	I <sub>o</sub> /(mg·g <sup>-1</sup> )
MS5	1.345	0.213	0.004	0.022	48
JS1	1.086	0.098	0.086	0.014	45
GY35	0.829	0.055	0.039	0.022	6
YD4	0.855	0.112	0.025	0.010	4

因此生烃活化能较小,具有形成未熟—低熟油的特质,在演化早期就有大量的非烃和沥青质排出<sup>[14]</sup>。MS5 样品中 S/C 原子比在 4 样品中最低(表 7),其成烃母质可能并非发育在碱性高盐环境,较好的水体分层也有利于特殊藻类的发育和保存,低的 S/C 原子比可能是其最晚开始有效生烃的原因之一;JS1 和 GY35 样品中 S/C 原子比较高, YD4 煤样 H/C 比偏高是样品未进行抽提处理的原因,其也有较高的 S/C 原子比,所以他们开始生烃要早。同时考虑到杂原子在有机质结构中的键合位置,由于分子结构的差异性,其断链所需能量也不同,从而生烃能力也表现出很大的差异性,如 YD4 样品

中 O/C 比较高,但热解脱羧量( $I_0$ )最低,说明氧主要存在于芳杂环结构中,而 MS5 样品则有本质的不同,氧主要存在于脂链上,有很强的脱羧能力。总之,有机质生烃能量是其分子组成结构(长链、短链、环、芳环和交联缩聚程度)和杂原子键合形式的综合反映。

在研究中发现实测干酪根生烃活化能要比原子键能低,这除了有机大分子空间结构的不同影响外,不同热解反应的相互影响以及矿物催化作用都是重要的影响因素。在不同族的混合反应中,本身难热解的组分对易热解组分的反应有抑制作用,而本身易热解的组分对较难热解组分的反应起促进作用,协同效应使整体活化能降低,同时有机质的演化都是在矿物介质的参与下进行的,很多研究已证实粘土矿物、碳酸盐等都能使干酪根生烃活化能降低<sup>[15]</sup>。

### 3 结论

1)海相烃源岩动力学分析表明不同类型干酪根生烃平均活化能是  $E_{III} > E_{II_2} > E_{II_1} > E_I$ , I 型干酪根分布最窄,主频优势显著,主频生烃比例达 60% 以上; II<sub>1</sub> 型干酪根分布也较窄,呈不对称分布,主频、次频生烃优势相当,都在 30% 左右; II<sub>2</sub> 型干酪根活化能分布趋于正态分布,范围较宽,主频有一定生烃优势,生烃比例在 30% 左右; III 型干酪根活化能呈正态分布,范围最宽,主频优势不明显,主频生烃比例小于 20%。

2)成熟阶段不同类型干酪根开始有效生烃时间是 III 型早于 II<sub>2</sub> 型, II<sub>1</sub> 型次之, I 型最晚。结束生烃时间是 I 型早于 II<sub>1</sub> 型, II<sub>1</sub> 型早于 II<sub>2</sub> 型, III 型最晚。有效生烃区间活化能跨度为  $\Delta E_I < 15 \text{ kJ/mol}$ ,  $15 \text{ kJ/mol} < \Delta E_{II_1} < 20 \text{ kJ/mol}$ ,  $20 \text{ kJ/mol} < \Delta E_{II_2} < 30 \text{ kJ/mol}$ ,  $\Delta E_{III} > 30 \text{ kJ/mol}$ ;有效生烃温度跨度  $\Delta T_I \leq 65 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $65 \text{ }^\circ\text{C} \leq \Delta T_{II_1} \leq 75 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $75 \text{ }^\circ\text{C} \leq \Delta T_{II_2} \leq 85 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T_{III} \geq 110 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

3)干酪根有机大分子结构和元素组成决定了其生烃能力和生烃活化能的频率分布特征,富含硫、氧、氮杂原子可使化学键的离解能降低从而加快反应速率,海相优质烃源岩具有快速生烃的特质。

#### 参考文献:

- 1 Tissot B P, Pelet R, Ungerer P. Thermal history of sedimentary basins, maturation indices, and kinetics of oil and gas generation[J]. AAPG Bulletin, 1987, 71(12): 1445~1466
- 2 黄第藩,李晋超,周翥红等. 陆相有机质的演化与成烃机理[M]. 北京:石油工业出版社,1984. 171~179
- 3 傅家谟,史继扬. 石油演化理论与实践(I):石油演化的机理与石油演化的阶段[J]. 地球化学,1975,(2): 87~110
- 4 裴存民,周中毅. 干酪根性质对油气形成影响的研究[J]. 地球化学,1989,(4): 322~333
- 5 杨国华,吴肇亮,刘庆豪等. 不同类型干酪根热解生烃动力学研究(一)[J]. 石油大学学报,1990,14(1): 72~79
- 6 沈忠民 陈义才. 源岩平均活化能影响因素浅析[J]. 成都理工学院学报,2002,29(6): 600~604
- 7 蒋启贵,王 勤,承秋泉等. 不同组分烃源岩生烃动力学特征浅析[J]. 石油实验地质,2005,27(5): 512~518
- 8 秦匡宗,郭绍辉,李术元. 有机地质大分子结构与未熟油生成[J]. 石油勘探与开发,1997,24(5): 1~6
- 9 Hunt J M, Lewan M D, Hennen R J. Modelling oil generation with time-temperature index graphs based on the Arrhenius equation[J]. AAPG Bulletin, 1991, 75(4): 795~807
- 10 沈忠民,周光甲,洪志华. 陆相低成熟烃源岩有机硫与热解成烃动力学关系初探[J]. 沉积学报,1998,16(4): 133~139
- 11 卢双舫,刘晓艳,付晓泰等. 未熟-低熟油生成机理的化学动力学研究及其初步应用[J]. 沉积学报,2001,19(1): 130~135
- 12 张 黠. 立体化学和有机反应历程概要[M]. 北京:人民教育出版社,1985. 252
- 13 黄福堂,阎卫东,李振广等. 石油化学[M]. 北京:石油工业出版社,2000. 233~235
- 14 秦建中,李志明,刘宝泉等. 海相烃源岩形成重质油和固体沥青潜力分析[J]. 石油实验地质,2007,29(3): 280~291
- 15 林世静,葛明兰,李术元等. 松辽盆地干酪根在矿物基质作用下的热解生烃特征和动力学的研究[J]. 北京石油化工学院学报,2001,9(1): 19~22

(编辑 叶德燎)