

文章编号: 1001-6112(2001)01-0087-06

论低熟油烃产率模型

林玉祥

(北京大学 地质学系, 北京 100871)

摘要: 该文结合低熟油成因研究、模拟实验成果及有机质自然演化剖面, 指出了低熟油实际上是有机质成岩演化的副产物。在成岩作用阶段随成熟度增加, 低熟油的产率及累积产率一般没有先增后减的生烃(或生油)高峰, 这与有机质深成阶段干酪根生烃(油)模式存在根本的区别。低熟油烃产率和累积烃产率主要取决于原始母质中的原生烃类含量、干酪根形成过程中对烃类的捕集作用、部分地质大分子的低温分解以及岩石矿物成分等因素。文中对流行的低熟油生烃(油)模式进行了补充和修改。

关键词: 模型与模式; 烃产率; 低熟油

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

近年来, 低熟油成因研究取得了重要进展^[1-5]。低熟油烃(油)产率模型是准确计算其资源量的关键之一。已发表的文献中有多篇^[1-3, 5-10]提出了低熟油的生成模式和产率曲线, 其共同特点是在低熟阶段有一低熟油生成高峰。本文提出低熟阶段生烃过程有其特殊性, 与干酪根降解生烃具有生烃高峰存在着本质的区别, 并提出了更为符合实际的低熟阶段生烃、生油产率曲线和累积产率曲线模式, 从而为更准确地计算生烃(油)量奠定了理论基础。

1 低熟油生成窗

所谓低熟油是指沉积盆地埋藏过程中, 在进入干酪根生油门限之前, 沉积有机质在外部营力作用下发生生烃行为而形成的石油的总称^[11]。为讨论方便起见, 本文所涉及的范围不包括低熟气和煤成低熟油。从计算资源量的角度来看, 该概念仅限定了低熟油生成门限的下限, 即与常规成熟油气的界限(本文取 R_o 值为 0.60% 为低熟下限)。显然, 低熟油并不是从生物有机质一进入沉积物就可以形成的, 应该有一个上限, 从而构成低熟生油窗。

有些文献^[12-14]提出了一些地化指标的上限值(表 1), 最小值为临清地区(R_o 为 0.21%), 次为黄

骈坳陷(R_o 值为 0.26%)和东营凹陷(R_o 值为 0.3%)。据研究^①, 牛庄洼陷南斜坡沙四上段 1113~1147m 页岩的烃转化率达 54mg/g, 氯仿沥青“A”含量为 0.2743%, 烃含量为 $1.499 \times 10^{-6} \sim 2.097 \times 10^{-6}$, 按常规认识应该认为进入了生油门限。但这种埋藏浅、地温低、粘度大、非烃和沥青质含量很高的“油”是很难运移和聚集的。该区 1147m 源岩中的沥青“A”密度达 1.1369g/cm^3 。考虑到低熟油运移的温度、压力要求, 以 1700m 为该区低熟油运移门限, 约相当于 R_o 等于 0.30%。因此, 将低熟阶段上限定位于 R_o 值为 0.3%、C29 甾烷 $\beta\beta/(\alpha\alpha + \beta\beta)$ 和 C29 甾烷 20S/(20S + 20R) 均为 0.28、可溶有机质(低熟油累积产率)开始随深度增加而减少的深度。本文提出的烃产率和油产率曲线模式在本文提出的低熟生油窗内最为适用。

2 低熟油烃产率曲线模式

自生物体埋藏在沉积物中起, 有机质的成岩作用就开始了。首先是生物有机质(聚合物)逐渐分解, 形成生物单体, 即可溶有机质(本文指溶于非氧化性酸、碱和常用有机溶剂的有机质, 是与干酪根相对的概念)。随埋深加大, 温度、压力增加, 生物单体开始逐渐聚合和缩合, 向不溶有机质(干酪根)转化。

收稿日期: 2000-03-27; 修订日期: 2000-10-25.

作者简介: 林玉祥(1963-), 男(汉族), 山东临清人, 博士后, 主要从事油气地质学方面的研究工作.

① 张大江, 魏辉, 方家虎. 低温、低压条件下未熟-低熟石油生成机制的模拟实验研究. 1997.

表 1 不同地区烃源岩低成熟阶段的划分标准

Table 1 Dividing standards of the low mature stage for the source rocks from different areas

盆地或凹陷	$R_o/\%$	C_{29} 甾烷 $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$	C_{29} 甾烷 $20S/(20S+20R)$	资料来源
江汉	< 0.55			傅家谟等, 1985
河套	< 0.6			陈安定, 1982
柴达木	< 0.5~0.6	0.25~0.42	0.25~0.42	黄第藩等, 1989
辽河	< 0.5			李茂芬, 1993
东濮	< 0.5	0.17~0.3	0.23~0.3	朱家蔚等, 1991
东营	0.3~0.5			胜利油田, 1994
苏北	< 0.6~0.65			王文军, 1993
临清	0.21~0.6			王铁冠等, 1992
泌阳	< 0.5			马万怡, 1996
南堡	< 0.55			冀东油田, 1994
黄骅	0.26~0.55		0.25~0.42	廖前进等, 1992
沾化、车镇	< 0.44			周光甲, 1987
加拿大	0.4~0.6			Snowden 等, 1982
库页岛、勘察加半岛	0.4~0.6			Bazhenova 等, 1990

有机成岩作用阶段结束时, 大部分(约 90%) 沉积有机质转化成干酪根, 而可溶有机质占很少一部分。因此, 有机质成岩演化的结果主要是形成干酪根, 而低熟油的形成实际上是有机质成岩演化的一个副产物。从本质上讲, 低熟油根本不是在类似于正常油的生成过程中生成的, 而主要是直接来源于生物原生烃^[4]或由一些生物单体经过简单的化学或生物化学作用改造而来, 所以其形成过程具有特殊性。也有观点认为, 大量具有工业价值的低熟石油有赖于地质大分子在演化初期的降解^[4]。

据研究, 常见的低熟油母质包括藻类脂物、蜡质、树脂体、木栓质体、镜质体、孢子体、角质体、藻类体、细菌改造的 ⊖型有机质、含硫大分子等等^[1]。矿物沥青基质是低熟源岩中常见的有机组分, 也是重要的低熟油母质^[15]。但越来越多的证据表明, 低熟油源岩中的可溶有机质是低熟油的主要来源^[3]。例如, 牛庄洼陷南斜坡沙四上亚段源岩样品在模拟温度 300℃ 条件下生成的低熟油中, 可溶有机质对生烃的贡献占总烃量的 76%, 而“干酪根”仅占 24%^④。如果考虑到模拟实验的温度比低熟阶段的实际地温高得多, “干酪根”对低熟油的实际贡献还要少。因此, 尽管低熟油母质类型较多, 但以可溶

有机质为主要来源。所以, 低熟油烃产率曲线形态主要取决于可溶有机质的生烃情况。

低熟阶段可溶有机质的主要成分是沥青和非烃, 通过缩聚作用向不溶有机质转化是其主要演化趋势^⑤。低熟油中总烃含量的升高, 主要是由于非烃和沥青含量相对降低造成的。烃类的绝对量(初始产率)取决于母质类型、丰度等因素, 而与低熟阶段地温升高的关系并不密切。因此对同一低熟烃源岩来讲, 其在低熟阶段由可溶有机质生成的烃类产率基本上是相对稳定、接近于零的低值(图 1a)。其中的烃产率随温度增加稍有升高, 主要是考虑到脂肪酸脱羧等低温成烃作用, 但其数量上的重要意义还有待进一步研究。同时, 干酪根形成过程中对烃类分子的捕集和包裹作用也会使可动烃类数量减少。综合考虑以上各种因素可以得到, 在低熟阶段随温度增加累积烃产率没有明显的增大, 而基本上是一个相对稳定或稍有减少的数值(接近于初始产率), 累积烃产率曲线是或近似是一直线。累积烃产率迅速增大标志着有机质演化进入了成熟阶段。对低熟油产率而言, 在低熟上限时为最大值(可溶有机质初始产率); 而在整个低熟阶段, 由于可溶有机质中非烃和沥青质通过缩聚反应向不溶有机质(干酪

张大江, 魏辉, 方家虎. 低温、低压条件下未熟-低熟石油生成机制的模拟实验研究. 1997.

④ 洪志华, 张林晔, 张春荣. 济阳坳陷未熟-低熟石油判别标志、成烃特征、成藏条件和资源预测. 1997.

⑤ 江汉石油学院测试研究中心. 低温低压下未熟石油的形成机理——膏盐盆地烃源岩低温加水模拟实验. 1997.

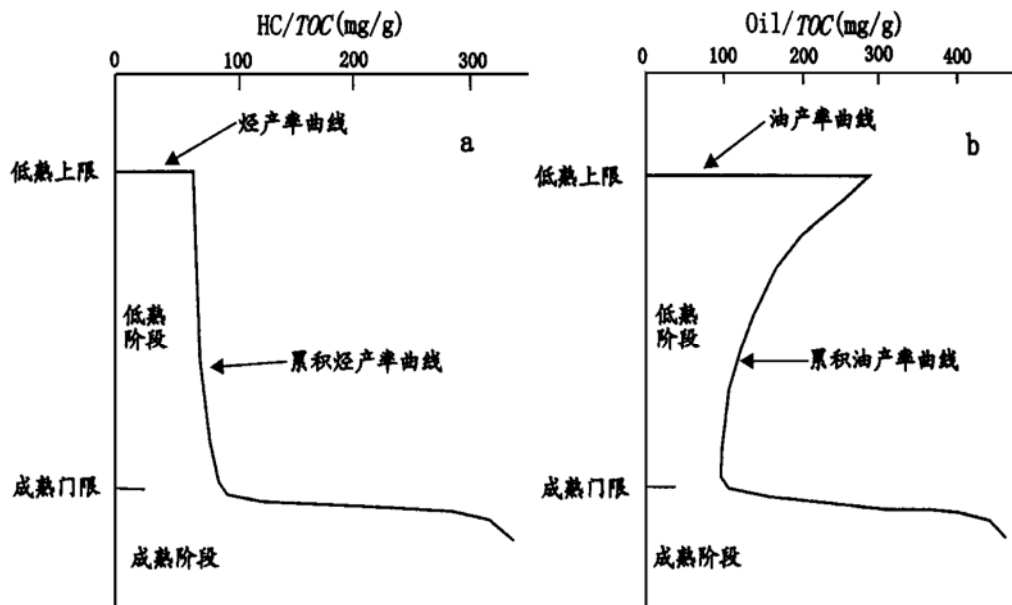


图 1 低熟阶段烃、油产率曲线模式示意图

Fig. 1 Schematic map showing the patterns of hydrocarbon and oil production rate curves in the low-mature stage

根) 转化, 使其产率为负值或接近于零. 累积产率曲线是逐渐减少或接近直线(图 1b)。下面, 从低熟油源岩热模拟生烃实验和低熟阶段有机质自然演化剖面两方面来证实这一认识。

3 模拟实验的证据

3.1 牛庄洼陷沙四上亚段页岩

样品采自牛庄洼陷沙四上亚段, 井深 1 136.73 ~ 1 145.8m, 为灰色灰质页岩, 其实测 R_o 值为 0.28%, T_{max} 为 377°C, TOC (残余总有机碳) 为 4.41%, 沥青“A”含量为 1.238 9%, H/C 原子比是 1.76, 为 iv 型干酪根。沥青“A”中非烃和沥青质含量分别为 34.65% 和 24.08%, 饱和烃和芳烃仅 3.47% 和 13.19%。模拟装置为密闭不锈钢缸体, 样品与水按 5:1 比例装入, 模拟温度为 100~400°C, 间隔 50°C, 每个模拟温度点均加热 48h, 压力为 28MPa。模拟结果 见图 2。

从图 2 可见, 源岩与干酪根热解油产率曲线有明显差异。源岩热解油产率在模拟温度 100°C 出现第一个高峰, 这可能是由于样品受到热力作用后源岩中的束缚(或吸附)沥青释放出来造成的。随温度继续升高, 这种重质、非烃和沥青质含量很高的“油”

(实际上是类似沥青“A”的可溶有机质) 发生歧化反应, 大部分通过缩聚反应向类“干酪根”转化, 一小部分转化为烃类或较小的非烃分子, 导致热解油产率减小。而“干酪根”(不溶有机质) 生成的热解油产率随温度增加而增加, 但绝对量较小。如果考虑到地下实际的温度很低, 则其贡献就更小。特别是模拟温度 250°C 的点, 对应的 R_o 值为 0.45%, “干酪根”的产率接近甚至比成熟阶段生油高峰的产率还要高, 这显然是不符合实际的。因此在低熟阶段, 低熟油的总累积产率(与岩样热解相似) 应该是逐渐减小的。可溶有机质向“干酪根”(不溶有机质) 转化的部分主要是非烃和沥青质, 有时一部分烃类分子被捕获在干酪根的三维网络中。如果同时考虑到脂肪酸等低温反应生成少量烃类, 则低熟阶段烃类的累积产率曲线基本上保持不变或略有增加。

3.2 其它样品

图 3a 是江汉盆地潜江凹陷王场油田王四 8-2 井潜二段深灰色泥岩的热模拟结果^④。该样品井深 1 235m, TOC 为 3.02%, 氯仿沥青“A”含量为 0.376 2%, H/C 原子比为 1.31, R_o 值为 0.25%。可见在模拟温度 225°C 以前, 液态烃产率和总烃产率只是稍有增加, 根本不存在生烃高峰。

图 3b 是辽河坳陷西部凹陷高升油田高 88 井沙

洪志华, 张林晔, 张春荣. 济阳坳陷未熟-低熟石油判别标志、成烃特征、成藏条件和资源预测. 1997.

④ 李菡, 熊传武, 黄第藩, 等. 未熟-低熟石油形成条件、判别标准及分布规律. 1997.

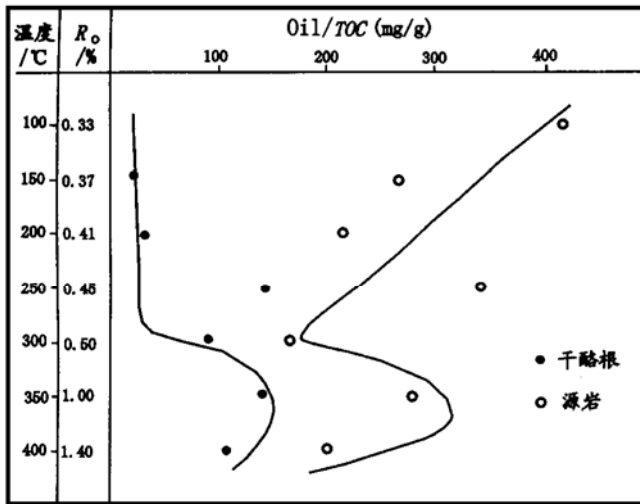


图 2 模拟实验中可溶与不溶有机质的热演化
Fig. 2 Thermal evolution of soluble and insoluble organic matter in simulation experiments

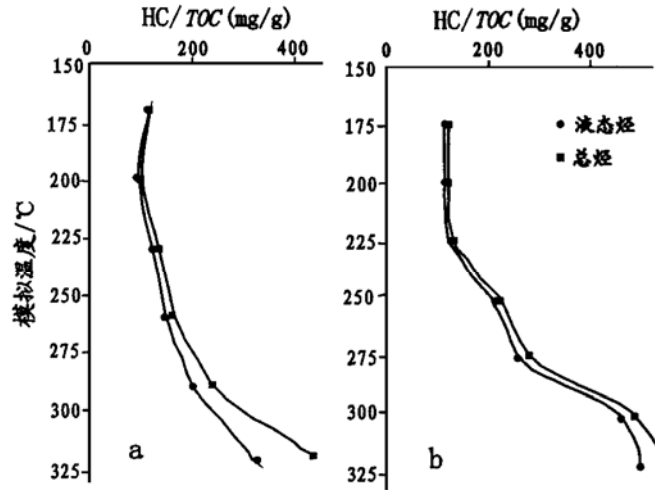


图 3 烃源岩热模拟产率曲线
a. 潜江凹陷王四 8-2 井潜二段泥岩;
b. 辽河西部凹陷高 88 井沙四段泥岩
Fig. 3 Production rate curves of hydrocarbon source rocks in thermal simulation

四段灰色泥岩的热模拟结果^①。该样品井深 1 776m, TOC 为 3.28%, 氯仿沥青“A”含量为 0.233 6%, H/C 原子比为 1.26, R_o 值为 0.35%。模拟结果表明, 在模拟温度 225 °C 以前, 液态烃产率和总烃产率只是稍有增加, 也没有出现生烃高峰。

图 4 中的样品是取自江汉盆地潜江凹陷王场油田王 11-3 井 857m 处的深灰色泥岩, 其 R_o 值为 0.33%, 氯仿沥青“A”含量为 0.361 0%^②。其中的抽提物模拟样品是抽提物和经过高温灼烧后的矿物的混合物; 反射率测定使用了内标法, 即在模拟样品中加入少量 R_o 为 0.34% 的百色褐煤。图 4a 是岩样模拟的结果, 从中可见抽提物及非烃+ 沥青质累积产率在模拟温度 225 °C 前随温度升高是逐渐减少

的, 但烃类产率有所增加。在抽提物模拟实验中(图 4b), 随模拟温度升高, 抽提物和非烃+ 沥青质累积产率明显减小, 直至 300 °C 都是如此, 即可溶有机质经过缩聚反应向不溶有机物的转化是主导趋势; 烃类累积产率基本上没有变化, 说明在低熟阶段, 由可溶有机质热演化生成的烃类产率为零或极小。干酪根模拟结果(图 4c)为, 在模拟温度 225 °C 前抽提物和非烃+ 沥青质累积产率稍有减少, 之后随温度升高明显增加; 烃类产率直到 260 °C 以后才稍有增加。

通过前述几组模拟实验能够得到以下认识, 即在低温(< 225 °C)下随模拟温度升高, 烃类产率接近于零, 累积产率基本不变, 只相当于低熟阶段上限处烃类的产率; 低熟油(或抽提物、或非烃+ 沥青质)产

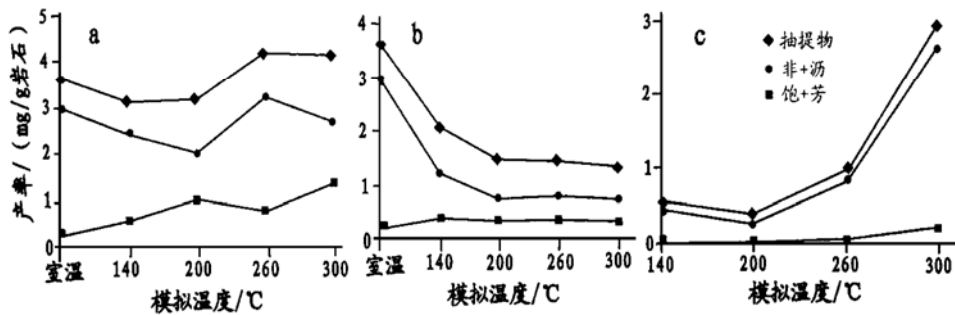


图 4 潜江凹陷王 11-3 井泥岩热模拟实验产率曲线
a. 岩样模拟; b. 抽提物模拟; c. 干酪根模拟

Fig. 4 Production rate curves of mudstone from well Wang 11-3 in the Qianjiang depression in thermal simulation experiments

① 李菡, 熊传武, 黄第藩, 等. 未熟- 低熟石油形成条件、判识标准及分布规律. 1997.

② 江汉石油学院测试研究中心. 江汉盆地第三系盐湖相未成熟油研究. 1997.

率为负值或接近零, 累积产率逐渐减小至变化不明显; 干酪根生成的可溶有机质和烃类较少, 是低熟油生成的次要来源, 它改变不了低熟油和烃类由可溶有机质决定的产率曲线形态。

多高的模拟温度对应着实际演化的低熟阶段下限呢? 若以 R_o 值 0.55% 为低熟下限的话, 图 4 中模拟温度和 R_o 的对应关系分别为 140 °C, 0.49%; 200 °C, 0.55%; 260 °C, 0.67%; 300 °C, 0.78% (模拟时间均为 120h)。由于该模拟实验是使用低成熟褐煤 (R_o 值为 0.32%) 作为内标的, 与泥岩样品经历的热演化过程相似, 而同时煤的 R_o 测定又较可靠, 所以据其实验结果划分成熟阶段比较可靠。可见低熟阶段对应的模拟温度范围(室温~ 225 °C)内, 本文前面所提出的烃类、低熟油产率曲线和累积产率曲线模式是成立的。

4 自然演化剖面的证据

东营凹陷牛庄洼陷南斜坡沙四上亚段是该区低熟油的烃源岩, 页岩与泥岩间互沉积, 但有机质丰度是页岩高、泥岩低。从有机质演化剖面(图 5a)上看, 泥岩的烃类产率较低, 且随深度增加变化缓慢。东营凹陷 2 200m 是泥岩的生油门限, 此深度处 HC/TOC 仅 30mg/g, 且在 2 200~ 2 600m 之间增

加较慢, 至 2 600m 开始迅速增加, 3 600m 烃产率达到峰值 222mg/g, 其后开始减小。

页岩的产率曲线有较大的不同(图 5b)。埋深 1 100m 左右的页岩, HC/TOC 可达 48mg/g, 此时 R_o 值为 0.28% 左右, 地温 60 °C。2 200m 以上产率变化不大, 自 2 200m 向深处明显增加, 至 2 800m 左右达到峰值, 在 3 600m 处收敛。可见, 在低熟阶段页岩也没有生烃高峰。与泥岩相比, 页岩生油高峰出现的深度较小, 且收敛的深度也较小。

晋县凹陷中北部沙四段+ 孔一段含膏泥岩处于低熟阶段^[7], 埋深一般小于 3 000m (R_o 值为 0.3% ~ 0.6%), 但有机质烃产率很高, HC/TOC 达到 100~ 450mg/g, 氯仿沥青“A”/ TOC 达到 200~ 800mg/g 以上(图 5c)。从其演化剖面可见, 在低熟阶段 HC/TOC 和沥青“A”/ TOC 随深度增加基本上没有明显的增减, 反映出低熟阶段烃及低熟油产率与演化程度无关, 而主要取决于有机质的生源构成。

5 结论

低熟油是有机质成岩演化的一种副产物, 包括原生烃类、部分新生烃类和非烃、沥青质等其它可溶有机质。其中非烃和沥青质在低熟阶段随温度、压

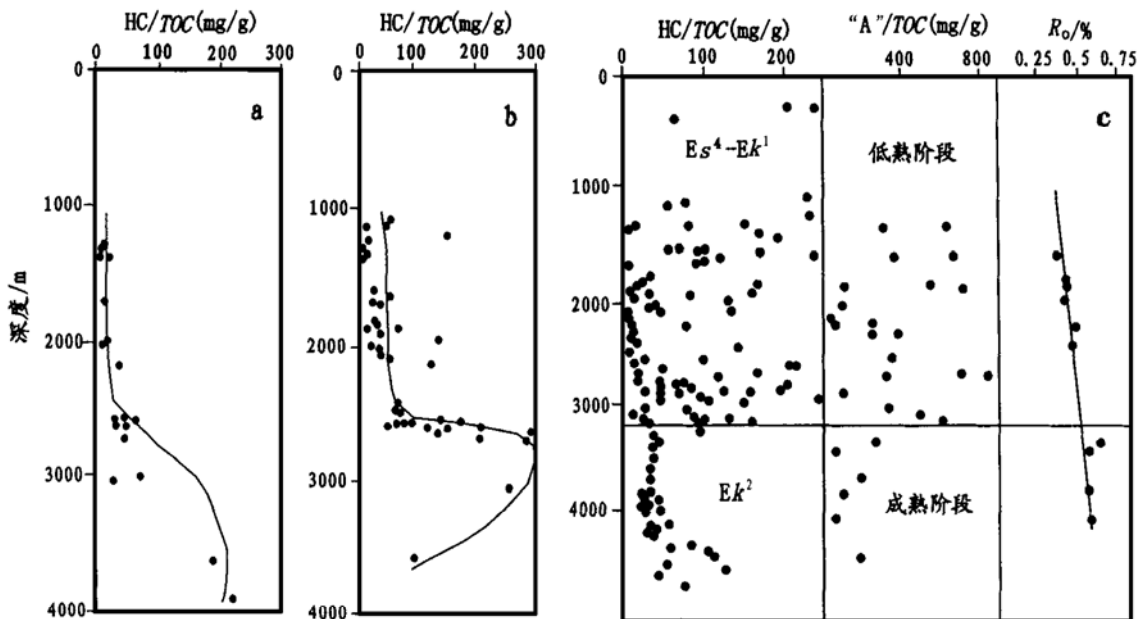


图 5 牛庄洼陷与晋县凹陷低熟源岩演化剖面
a. 牛庄洼陷泥岩; b. 牛庄洼陷页岩; c. 晋县凹陷泥岩

Fig. 5 Evolution sections of low-mature source rocks in the Niuzhuang sag and the Jinxian depression

力升高以向不溶有机质(干酪根)转化为主。因此,低熟阶段低熟油累积产率是不断减小的,而烃累积产率由于部分新生烃类的加入和“干酪根”三维网络结构对烃类分子的捕获等作用,将保持不变或稍有增加。低熟阶段“干酪根”对生油的贡献较小,且其不同类型有机组分(微成分)产率曲线形态及生油窗均有所不同,基本上不会改变低熟油累积产率减小、烃累积产率基本不变的产率曲线形态,因而也就不存在低熟阶段具有生油高峰和生烃高峰的产率曲线。

参考文献:

- [1] 王铁冠,钟宁宁,候读杰,等. 低熟油气形成机理与分布[M]. 北京:石油工业出版社,1995. 6.
- [2] 黄汝昌. 中国低熟油及凝析气藏形成与分布规律[M]. 北京:石油工业出版社,1997. 10.
- [3] 黄第藩. 成烃理论的发展——(iv)未熟油及有机质成烃演化模式[J]. 地球科学进展,1996,11(4):327-335.
- [4] 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.
- [5] 洪志华,周光甲. 中国低熟原油的分布及其地球化学特征[J]. 复式油气田,1997,(2):33-36.
- [6] 李佩珍,张学军,黄蓉,等. 东营凹陷南斜坡低熟烃源岩的有机岩石学研究[J]. 复式油气田,1997,(3):38-41.
- [7] 秦建中,王静,郭爱明. 冀中坳陷未熟-低熟油研究及勘探前景[J]. 古潜山,1996,(1):61-70.
- [8] 王铁冠,钟宁宁,候读杰,等. 细菌在板桥凹陷生油机制中的作用[J]. 中国科学(B辑),1995,25(8):882-889.
- [9] 候读杰,王铁冠,钟宁宁,等. 低熟油的富硫大分子早期降解生烃机制——以临清坳陷德南洼陷低熟油和低熟源岩为例[J]. 江汉石油学院学报,1996,18(1):30-35.
- [10] 王铁冠,钟宁宁,候读杰,等. 陆相湖盆生物类脂物早期生烃机制研究[J]. 中国科学(D辑),1996,26(6):518-524.
- [11] 沈忠民. 低熟石油概念厘定及其多元复合连续成油特征[J]. 地质论评,1997,43(6):577-584.
- [12] 廖前进,于俊利,刘雨金,等. 黄骅坳陷未成熟油、低成熟油的成因机理研究及定量评价[A]. “七五”地质科技重要成果学术交流会议论文集[C]. 北京:科学技术出版社,1992. 626-630.
- [13] Snowden L R, Powell T G. Immature oil and condensate——modification of hydrocarbon generation model for terrestrial organic matter[J]. AAPG Bull, 1982, 66(6):775-788.
- [14] Bazhenova O K, Arefiev O A. Immature oils as the products of early catagenetic transformation of bacterial-algal organic matter[J]. Ore Geochem, 1990, 16(1-3):307-311.
- [15] 李贤庆,熊波,黄光辉,等. 低熟源岩中矿物沥青基质的特征与成因[J]. 江汉石油学院学报,1997,19(2):29-35.

STUDY ON THE HYDROCARBON PRODUCTION RATE MODEL OF LOW-MATURE OIL

LIN Yur xiang

(Department of Geology, Beijing University, Beijing 100871, China)

Abstract: Based on the genetic study of low-mature oil, the results of simulation experiments and the natural evolutionary profiles of organic matter, it is pointed out that low-mature oil is in fact a by-product during the diagenetic evolution of organic matter. In the diagenetic stage, the production rate and cumulative production rate of low-mature oil generally have on hydrocarbon-generating (or oil-generating) peaks with the increase of maturity. This is distinct from the hydrocarbon-generating (oil-generating) pattern of kerogen in the plutonic stage of organic matter. The hydrocarbon production rate and cumulative production rate of low-mature oil mainly depend on the original hydrocarbon content in primary mother material, the hydrocarbon trapping during the formation of kerogen, the low-temperature decomposition of part large geologic moleculars, the components of rock mineral and other factors. In this paper, the popular hydrocarbon-generating (oil-generating) patterns of low-mature oil are supplemented and modified.

Key words: models and patterns; hydrocarbon generation rate; low-mature oil