

文章编号:0253-9985(1999)04-0311-05

# 陆相盆地未成熟石油形成条件

蔡希源,冯子辉

(大庆石油管理局勘探开发研究院,黑龙江大庆 163000)

**摘要:**中国陆相盆地未成熟石油烃源岩主要形成于受海侵影响的大型湖盆、小型断陷湖盆和膏盐湖盆3种沉积环境。与沉积环境相对应,生油母质依次为藻类、与陆源植物有关的基质镜质体和膏盐环境保存的可溶沥青质及非烃类有机质。细菌改造作用有利于有机质向未成熟石油转化,热作用是未成熟石油形成的重要条件。

**关键词:**陆相盆地;未成熟石油;沉积环境;生油母质;形成条件

**第一作者简介:**蔡希源,男,46岁,教授级高级工程师,矿产普查与勘探

**中图分类号:**P618 **文章标识码:**A

未成熟石油系指沉积成岩作用早期,由尚未达到生油门限的烃源岩生成的原油。中国陆相盆地未成熟石油的烃源岩  $R_o$  一般为  $0.3\% \sim 0.65\%$ 。60年代以来,地球化学家们对未熟油的特征和成因做了广泛探讨<sup>[1-5]</sup>。同期笔者在松辽盆地大庆油田及其外围盆地也见到未熟石油。有理由预测,未熟油将是中国东部陆相含油气盆地重要的油气接替资源。

## 1 沉积环境

中国具有商业性未熟油形成和聚集的盆地大约有19个,未熟油的主要产出层位有侏罗系、白垩系和上、下第三系<sup>[6]</sup>,烃源岩主要沉积于3种环境。

### 1.1 受海侵影响的大型湖盆

以松辽盆地为例,上白垩统青山口组一段(相当于赛诺曼期)和嫩江组一段(相当于坎潘期)沉积期,为大型内陆深水湖泊沉积,其沉积速率为  $23.08 \sim 193.58 \text{ m/Ma}$ 。同期由于东亚细亚海西侵的影响<sup>[7]</sup>,有海水注入湖盆。泥岩微量元素指示的古水体盐度为  $0.5\%$  左右,深湖相区为  $0.5\% \sim 1.0\%$ ,海水的注入一方面使湖盆水体扩大(青山口组一段沉积期湖泊最大面积为  $87\,000 \text{ km}^2$ ,嫩江组一段沉积期为  $200\,000 \text{ km}^2$ ),湖盆水体盐度分层,形成大面积还原环境;另一方面也为湖盆带来了新的生物种属和丰富的营养物质。在藻类构成上,烃源岩即有淡水、微咸水藻类,又有反应海侵的半咸水藻类,如拟沟鞭藻(*Dinogymniopsis*)。湖生藻类化石一般占化石总量的  $60\%$  以上,陆生植物化石(孢

粉)占化石总量  $40\%$  以下,反映湖盆中的有机质以湖生生物为主。

这种沉积环境下形成的青山口组一段和嫩江组一段烃源岩,主要为黑色和灰黑色泥岩、页岩夹劣质油页岩,含薄层菱铁矿条带(透镜状)及分散状黄铁矿,为强还原环境标志。源岩有机碳质量分数大于  $3.8\%$ ,氯仿沥青“A”大于  $0.33\%$ ,生烃潜量大于  $19 \text{ mg/g}$ ,总烃质量分数大于  $1\,000 \times 10^{-6}$ ,反映两套源岩具有较高的生烃潜能。氢指数( $I_H$ )均大于  $600 \text{ mg/g}$ ,干酪根元素组成  $H/C$  原子比大于  $1.5$ , $O/C$  原子比一般小于  $0.1$ ,属富氢高类脂亚组干酪根,有机质母质来源包含某些特殊的藻类和细菌。

### 1.2 小型断陷湖盆

这种沉积在中国第三系断陷盆地中比较普遍。以汤原断陷下第三系为例,沉积受裂陷的控制,呈长条状展布,面积约为  $3\,320 \text{ km}^2$ 。烃源岩发育期在下第三系新安村期和达连河期,淡水半深湖相和局部深湖相区范围小,湖沼相和河流相发育。烃源岩沉积期,气候温暖湿润,陆地植物繁盛,烃源岩中主要见孢粉(如栎粉 *Quercoidites*)和植物化石(如木兰属 *Magnolia*、榆属 *Ulmus*),有少量藻类、介形类等其它化石,表明烃源岩有机质主要来源于陆地植物。烃源岩发育于盆地的强烈断陷期和持续断陷期,新安村组和达连河组平均沉降速率分别达到  $943 \text{ m/Ma}$  和  $306 \text{ m/Ma}$ ,在裂陷两侧经强烈剥蚀作用提供的充足物源伴随陆源有机质,由河流短距离搬运快速沉积,从而使陆源有机质中部分化学活性

大而又不稳定的富氢有机质迅速脱离氧化环境得以保存,为未熟油的生成准备了必要的物质基础。

烃源岩以深灰和灰黑色泥岩、炭质泥岩和煤层为主,与灰白色砂砾岩不等厚互层分布,属煤系地层沉积特征。泥质烃源岩有机碳质量分数一般大于 1.0%,但氯仿“A”、生烃潜量和总烃含量相对较小,氢指数低、H/C 原子比低,反映源岩生油潜能不大;炭质泥岩和煤层有机碳大于 19%,氯仿“A”大于 0.39%,生油潜量大于 140 mg/g,具有较高的生油潜能。

1.3 膏盐湖盆

此类典型地区如江汉盆地,该盆地是白垩—第三纪的拉张断陷盆地,面积约 28 000 km<sup>2</sup>,其中下第三系潜江组一、二段是主要的未熟油烃源层。烃源岩主要沉积于咸水半深湖—深湖相,平均沉积速度最大可达 320 m/Ma,沉积物有陆源碎屑岩及蒸发岩。在化石构成上,烃源岩中富含藻类体,如轮藻、硅藻等,植物化石较少,反映源岩有较好的生油性。另外,根据植物化石,潜江组烃源岩沉积过程中,古气候具有干旱与温湿交替的特征,即见有代表干燥气候的麻黄属,又见有温带木本植物榆科、栎粉和热带常绿植物无患子科、桑科以及喜热分子漆树粉属等。沉积体表现为泥质岩、泥膏盐、油浸泥岩、岩盐、泥灰岩呈韵律性分布。由于湖盆的咸水环境与蒸发岩的沉积,沉积体中富含 H<sub>2</sub>S。岩盐的存在对生物甲烷菌的生存与繁衍有抑制作用<sup>[8]</sup>,有利于生物体中不稳定成分的保存并向未熟油转化。同时这种环境由于有利于硫酸盐还原菌的发育,对生物体的改造并最终形成富硫有机质或干酪根参与油气的生成过程有重要意义<sup>[3]</sup>。

这种环境沉积的烃源岩主要为泥灰岩、泥岩和油页岩。有机碳质量分数平均值在 1.0%左右,但氯仿“A”和总烃相对较高,平均值分别为 0.35%和 800×10<sup>-6</sup>,反映有机质在未成熟阶段具有较高的烃转化率。

2 生成母质

2.1 受海侵影响的某些特殊藻类

中国渤海湾盆地地下第三系烃源岩,未成熟石油的形成与岩石中富含颗石藻(Cocolich)有关<sup>[9]</sup>。我们最近的研究结论是,松辽盆地青山口组一段和嫩江组一段烃源岩未熟油的生成与岩石中富含布朗葡萄藻(Botryococcus braunii kutzing)有成因联系。首先从生物构成看,青山口组一段泥岩布朗葡萄藻占藻类化石的 40%~60%,嫩江组一段泥岩的占 60%~65%,表明松辽盆地烃源岩中布朗葡萄藻是主要的藻类生源物质。松辽盆地未熟烃源岩中,腐泥组和壳质组是主要的显微组分,镜质组和惰质组质量分数一般小于 1%(表 1)。壳质组中以孢子体、壳屑体为主,模拟实验证实这些物质对未熟油生成的贡献不大<sup>[10]</sup>。腐泥组中部分以无结构藻类体为主,质量分数最高达 8%,平均值在 2.0%以上,标志丰富的藻类可能是未熟油生成的主要母质。另一部分,矿物沥青基质较高,最高达 79.6%,平均值在 58%以上,是有机质被矿物颗粒混杂吸附或有机质浸染矿物,使其发荧光的结果,这些有机质数量大,并且易于生油<sup>[11]</sup>,显然对未熟油的生成亦有重要意义。从松辽盆地烃源岩的生源构成推测,矿物沥青基质中的有机质主要与藻类体有关。

表 1 中国陆相盆地未成熟烃源岩有机质显微组成

| Table 1 Organic matter maceral of immature source rocks in continental basins of China |        |           |      |      |      |      |      |      |       |            |       | %     |
|----------------------------------------------------------------------------------------|--------|-----------|------|------|------|------|------|------|-------|------------|-------|-------|
| 地区                                                                                     | 层位     | 镜质组       |      |      | 惰质组  | 壳质组  |      |      | 腐泥组   |            |       | 矿物质   |
|                                                                                        |        | 基质<br>镜质体 | 镜屑体  | 合计   |      | 孢子体  | 壳屑体  | 合计   | 藻类体 B | 矿物沥青<br>基质 | 合计    |       |
| 汤原<br>断陷                                                                               | 达连河组   | 4.20      | 1.53 | 5.73 | 0.03 | 0.10 | 0.13 | 0.27 | 0.20  | 3.56       | 3.76  | 90.21 |
|                                                                                        | 新安村组   | 0.53      | 0.56 | 1.10 | 0.10 | 0.03 | 0.03 | 0.07 | 0.00  | 6.00       | 6.00  | 92.77 |
| 松辽<br>盆地                                                                               | 嫩江组一段  | 0.31      | 0.50 | 0.81 | 0.10 | 1.96 | 0.98 | 2.95 | 2.26  | 58.98      | 89.80 | 32.94 |
|                                                                                        | 青山口组一段 | 0.17      | 0.26 | 0.46 | 0.06 | 3.15 | 1.02 | 4.27 | 4.12  | 66.51      | 70.63 | 24.58 |
| 江汉<br>盆地                                                                               | 潜江组一段  | 未测        | 未测   | 0.40 | 0.02 | 未测   | 未测   | 0.33 | 0.60  | 41.20      | 41.80 | 57.40 |
|                                                                                        | 潜江组一段  | 未测        | 未测   | 0.30 | 0.02 | 未测   | 未测   | 0.34 | 0.81  | 49.20      | 50.01 | 49.30 |

葡萄藻可以生活在淡水、微咸水、半咸水和咸水环境,其细胞内含有大量的类脂物。现代葡萄藻的热解实验证实,这种藻类在未成熟阶段对石油的生成有重要意义<sup>[12]</sup>。松辽盆地烃源岩中藻类体及

其与之相关的矿物沥青基质,热解实验结果均反映其参与了未熟油的生成过程。以松辽盆地朝长地区青山口组一段烃源岩为例,藻类体及其矿物沥青基质含量在未成熟烃源岩中有随成熟度增加而降

低(图1),反映它们参与了未熟油的生成,而其它组分(如壳质体含量)则未见上述变化。另外未成熟干酪根显微组分菌解无定形体 A(主要是藻类菌解产物)和粒状无定形体(源于矿物沥青基质)低温热解实验结果(图2)表明,这两种物质在未成熟阶段( $R_o < 0.65\%$ ),不同程度地转化为未熟油,尤其是菌解无定形体 A 见明显成油高峰。

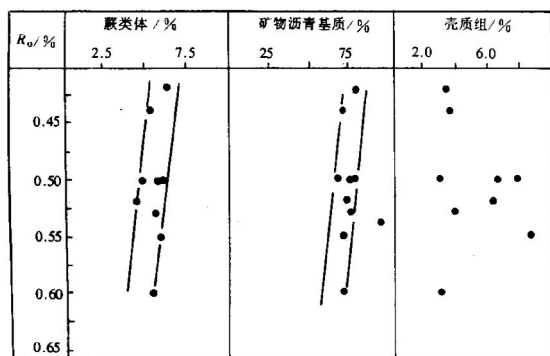


图1 松辽盆地烃源岩显微组分含量变化图

Fig.1 Variation of maceral contents of hydrocarbon source rocks in Shongliao Basin

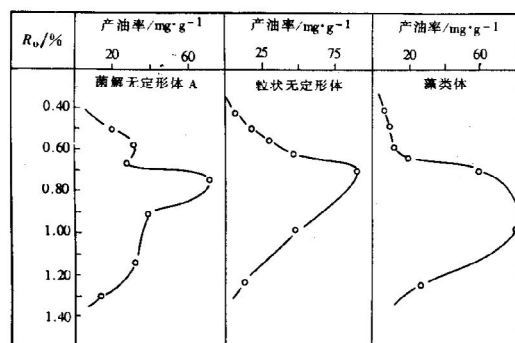


图2 松辽盆地烃源岩显微组分生烃率曲线

Fig.1 Curves of hydrocarbon-generation ratio of source rock maceral in Shongliao Basin

## 2.2 快速沉降环境中沉积的基质镜质体

快速沉降环境保存的陆源不稳定有机质如树脂体、木栓质体等,是未熟油生成的重要物质。但根据中国陆相沉积盆地烃源岩的有机岩石学研究结果,树脂体和木栓质体在岩石中的相对质量分数一般较低,平均小于1%,不足以形成具有商业性价值的未熟油藏。中国西北部中生界烃源岩木栓质体一般在2%以下,平均不到1%,但木栓质体若包括木栓化细胞壁和细胞腔中基质镜质体,则最高可达20%<sup>[11]</sup>。因此具有商业性生油意义的是基质镜质体而不是木栓质体。

汤原断陷烃源岩中,壳质组质量分数小于0.6%,藻类体小于0.3%。因此这两种组分不可能作为未熟油的生成母质。镜质组是源岩中的主要显微组分,反映有机质主要来源于陆相有机质的特征,其中基质镜质组相对较高,最大值达11.8%,平均值最高达4.2%,为未熟油的生成提供了重要的母质。另外源岩中的矿物沥青基质平均质量分数在10%以上,最大值达15.7%,也可能是未熟油的生成母质。这些矿物沥青基质的来源与松辽盆地不同,大部分可能与陆源有机质有关,如木栓质体可以被机械降解而形成大量无定形有机质,并以分散状形式存在于基质镜质体中<sup>[14]</sup>。

已有热解实验证实,陆相沉积烃源岩的基质镜质体和矿物沥青基质可以生成未成熟石油,生油主峰  $R_o$  位置大约为0.55%~0.6%<sup>[10]</sup>。汤原断陷汤参2井烃源岩中基质镜质体与矿物沥青基质的质量分数与成熟度关系表明,当  $R_o$  在0.35%时,源岩基质镜质体和矿物沥青基质质量分数较高,分别为1.8%和16%左右(图3)。随成熟度增加,两种显微组分逐渐减少,至  $R_o$  为0.6%时,烃源岩基质镜质体和矿物沥青基质分别为0.4%和3%。反映这两种物质在未成熟阶段参与了油气的生成。

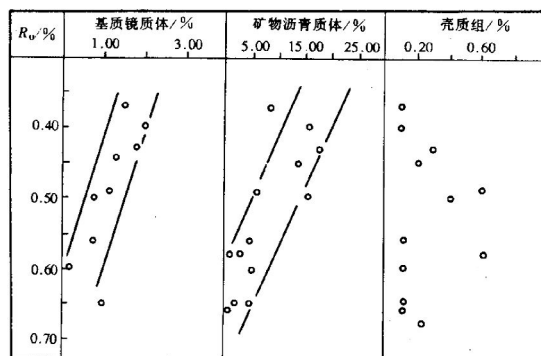


图3 汤原断陷烃源岩显微组分演化特征

Fig.3 Evolution characteristics of hydrocarbon source rock maceral in Tangyuan Fault-subsidence

## 2.3 膏盐沉积环境的富硫有机质

膏盐沉积环境中的富硫干酪根作为未熟油的生油母质,已得到部分专家的认同。其理由是地质体中硫的赋存形式主要有硫醇、硫化物、二硫化物、噻吩等,其中脂族 C-S 键的分解能在300 kJ/mol左右,低于直链脂碳的 C-C 键的分解能330~350 kJ/mol,因此高硫大分子中的 C-S 弱键在早期低温作用下优先断裂,形成未熟油<sup>[12]</sup>。

近年来中国学者对富硫干酪根是否能作为未熟油的主要生油母质提出了质疑。傅家谟等<sup>[3]</sup>对江汉盆地未熟生油岩研究后认为,源岩中可抽提有机质的转化率较高,可能是强还原环境和沉积水体底部为  $H_2S$  充溢等因素所致,原始类脂物(或生物聚合物)较少进入干酪根,而较多以可溶或低分子有机物的形式保存下来并生成未熟油。同时他们对富硫干酪根的热解模拟实验也证实,热解产物和未熟油的烃类构成差异较大。

王培荣教授<sup>[19]</sup>选取江汉盆地高盐沉积环境沉积的泥质烃源岩,对其干酪根(有矿物基质存在)和可抽提有机质(氯仿抽提物+苯/乙醇抽提物)分别进行低温热模拟实验,结果表明:(1)模拟温度小于  $200^{\circ}C$  的低演化阶段( $R_o \leq 0.55\%$ ),可抽提有机质是未熟油的主要贡献者,干酪根的贡献小于 20%。(2)低演化阶段,可抽提有机质的非烃和沥青质,一方面发生“缩聚”形成分子量更大的不可溶有机质干酪根,可抽提物产率降低;另一方面又发生脱杂原子官能团的作用,产生分子量较小的烃类,饱和烃和非烃产率增加。

### 3 形成条件及模式

目前对细菌在未熟油生成过程中所扮演的角色还没有形成统一的认识。我们认为细菌的作用会改变陆相沉积的原始有机质组成结构,增加岩石中矿物沥青基质的含量,这些被降解的有机质在向干酪根的转化过程中有利于生成未熟油,菌解无定形体 A 和藻类体在未成熟阶段生油特征的差异就反映了这一现象(图 3)。细菌本身对有机质降解作用产生未熟油的可能性不大。温度使有机质熟化对未熟油的生成起着至关重要的作用。章冰等<sup>[13]</sup>对细菌降解前后小球菌(*Chlorella protothecoides*)的生油现象的研究,证实了上述认识。细菌降解前后藻类的烷烃/藻重量均为 0.02%,反映细菌作用对烷烃生成的意义不大。细菌降解前后,样品的氯仿抽提物质量分数分别为 2.92% 和 5.42%,细菌降解前后的样品热解模拟(模拟温度  $300^{\circ}C$ ),氯仿“A”质量分数分别为 31.00% 和 34.58%,氯仿“A”族组成烷烃质量分数分别为 0.96% 和 1.58%,一方面反映细菌降解后的有机质易于生烃,另一方面反映熟化作用可以使可抽提有机质的数量增加。

根据地体中有机质的演化结果,中国陆相盆

地烃源岩的生油特征可以建立三种模式。第一种是有海侵影响的深湖相烃源岩生油模式,以松辽盆地为例,未熟油生油阶段的  $R_o$  值大约为 0.3% ~ 0.6%,生油主峰  $R_o$  大约为 0.45%,最大烃转化率达 30%,成熟油生油主峰对应  $R_o$  大约为 1.0% 左右,最大烃转化率为 60%;第二种是陆相断陷快速沉积烃源岩生油模式,以汤原断陷为例,未熟油的生油阶段  $R_o$  大约为 0.2% ~ 0.5%,生油主峰  $R_o$  大约为 0.4%,最大烃转化率为 20%,成熟油生油主峰  $R_o$  在 0.8% 左右,烃转化率最大达 30%;第三种是膏盐环境沉积烃源岩生油模式,未熟油生成阶段  $R_o$  为 0.4% ~ 0.65%,生油主峰  $R_o$  为 0.55%,对应的烃转化率最大达 40% 以上。未熟油的生成与成熟油一样,尽管各模式在生成阶段,最大烃转化率上存在一定差异,但均经历了一定的熟化过程,地温大约在  $30 \sim 65^{\circ}C$  之间,部分地区最高温度可达  $85^{\circ}C$  (如江汉盆地),表明热作用是未熟油生成的必要条件。

### 4 结论

(1) 中国陆相沉积盆地未熟油烃源岩主要形成于受海侵影响的大型湖盆、小型断陷湖盆和膏盐湖盆。

(2) 受海侵影响的大型湖盆深湖相沉积的未熟油烃源岩,主要生油母质是某些特殊的藻类,显微组成上表现为藻质体及其矿物沥青基质生油。小型断陷湖盆快速沉积的未熟油烃源岩,主要生油母质与陆源植物有关,显微组成上表现为基质镜质体及其矿物沥青基质生油。膏盐湖盆沉积环境形成的未熟油烃源岩,主要成油母质是可溶沥青质及非烃类有机质。

(3) 细菌对有机质的改造,使其有利于向未熟油转化,热作用是未熟油生成的必要条件。

### 参 考 文 献

- 1 Snowdon 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
- 2 Petron M J, Mahabooob A. Bicinanes and other terrestrial terpenoids in immature Oligocene sedimentary rocks and a related oil from the Surma Basin, N. E. Bangladesh[J]. Org Geochem, 1993, 20(5): 539 ~ 544
- 3 傅家谟,盛国英,江继纲. 膏盐沉积盆地形成的未成熟石油[J]. 石油与天然气地质, 1985, 6(2): 150 ~ 158
- 4 史继扬,麦坎任 A S,埃格林顿 G,等. 胜利油田原油和生油岩中

- 的生物标志化合物及其应用[J]. 地球化学, 1982, 11(1): 4~19
- 5 黄第藩, 李晋超. 陆相沉积中的未熟石油及其意义[J]. 石油学报, 1987, 8(1): 1~9
- 6 沈忠民. 低成熟石油概念厘定及其多元多源复合连续成油特征[J]. 地质论评, 1997, 43(6): 577~585
- 7 高瑞祺, 张莹, 崔同翠. 松辽盆地白垩纪石油地层[J]. 北京: 石油工业出版社, 1994
- 8 关德师. 控制生物气富集成藏的基本地质因素[J]. 天然气工业, 1997, 17(5): 8~12
- 9 周光甲, 陈致林, 李经荣, 等. 成油藻对油气生成贡献的研究. 见: 中国地质学会, 中国石油学会, 中国矿物地球化学学会. 第四届全国有机地球化学会议论文集[J]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1990. 25~37
- 10 赵长毅, 程克明. 吐哈盆地煤及显微组分生烃模式[J]. 科学通报, 1997, 42(19): 2 102~2 105
- 11 何萍, 王飞宇. 西北中生界烃源中木栓质体特征、演化与烃类生成[J]. 石油勘探与开发, 1996, 23(1): 7~11
- 12 秦匡宗, 郭绍辉, 李树原. 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): 1~5
- 13 章冰, 吴庆余. 细菌降解前后小球藻热模拟生成的气、油和类干酪根[J]. 地球化学, 1996, 25(2): 105~111

## FORMATION CONDITIONS OF IMMATURE OIL IN CONTINENTAL BASINS

Cai Xiuyan Feng Zihui

(Research Institute of Exploration and Development, Daqing Petroleum Administration, Daqing, Helongjiang)

**Abstract:** The immature source rocks of oil in China's continental basins mainly formed in big lake basins influenced by transgression, small fault-subsided lake and gypsum lake basins. Corresponding source materials were algae, desmonollinite related to terrigenous plant, the soluble asphaltene and non-hydrocarbon organic matter preserved in gypsolyte environment. Bacterial action was favourable for organic matter to be inverted into immature oil, and thermal effect was an important condition for the formation of immature oil.

**Key words:** continental basin; immature oil; sedimentary environment; kerogen; formation condition

(上接第 304 页)

marginal reserves has become more and more important. Based on the study of the characteristics of marginal reserves and problems encountered in evaluation by conventional criteria, new evaluation criteria are discussed. A new evaluation idea including the basis, the unit, the parameter and methods of evaluation are proposed. According to commercial oil-flow standard, a new concept of productivity ratio (DBD) is also proposed. This thus solves the problems of comparability of productivity between wells and of single well that puzzled people for a long time in the marginal reserves evaluation, and could realize the transformation from qualitative to quantitative evaluations.

**Key words:** marginal reserves; evaluation criteria; DBD; example