

# 中国陆相原油的成因和生物标志物组成特征<sup>①</sup>

傅家谟 盛国英

(中国科学院地球化学研究所广州分部)

**摘要** 本文报道了中国陆相原油的油源、时代和热历史等最新进展。陆相生油岩可以按地质环境条件划分为四个主要类型: A. 中国板内大型湖泊盆地的沉积岩建造; B. 断陷盆地湖相碎屑岩建造; C. 断陷盆地—盐湖相膏盐—碎屑岩建造; D. 山间盆地泻湖—湖泊相火山碎屑岩建造。

研究了一系列代表性原油样。样品采自下列生油岩类型: 1. 淡水—半咸水湖相泥岩; 2. 含盐—膏盐相泥岩; 3. 湖相白云质泥岩; 4. 泻湖相—火山凝灰质泥岩。样品用气相色谱 (GC) 和色谱—质谱 (GC/MS) 分析, 以揭示烷烃馏份中的生物标志化合物特征分布。简要地讨论了正烷烃、异戊二烯类、藿烷类以及其它生物标志化合物的分布。根据脂肪烃馏份生物标志化合物指标探讨了某些来源于膏盐和含盐泥岩的未成熟至准成熟原油的成因。江汉油田浅层产出的未成熟油和准成熟原油含有高含量的硫和含硫化合物, 特别是烷基噻吩和四氢化噻吩, 并呈现明显的偶碳优势。

**关键词** 生物标志物 半咸水 膏盐 未成熟 泻湖相火山凝灰质 陆相原油

**第一作者简介** 傅家谟 男 58岁 研究员 有机地球化学

## 前 言

目前在中国发现的绝大部分原油出于石炭纪至早第三纪的陆相沉积盆地中。不同沉积环境沉积的主要生油岩可以根据它们的地质、地球化学背景进行描述与分类 (Powell 1986; Fu et al., 1988; Fu and Sheng, 1989)。此外, 至今在中国发现的具有工业意义的未成熟原油主要局限于一定的亚环境, 例如含盐和膏盐质的湖相环境。

近年来, 根据生物标志化合物的信息已经成功地应用于区分和确定沉积环境 (Brassell and Eglinton, 1986), 特别是确定和判识一般的古代海相和陆相生油岩沉积环境 (Moldowan et al., 1985; Brassell et al., 1987), 或者还可以进一步详细地确定与划分亚环境, 例如陆相淡水和咸水环境, 或者是海相的碳酸岩和三角洲的沉积 (Palacas et al., 1984; Brassell et al., 1986; Fu et al., 1986; Philp and Gilbert, 1986; Mello et al., 1988)。

本文简要地阐述了中国陆相原油的油源、时代和热历史, 分析研究了一些代表性原油的分子有机地球化学指标, 并试图确定中国陆相原油 (含未成熟原油) 的特征, 及其与生油岩沉积环境间的关系。

<sup>①</sup>有机地球化学国家实验室 (OGL—9001) 和国家自然科学基金 (4880108) 资助项目。

本文曾在 1988 年美国休斯顿召开的纪念 J.Hunt 70 周年会上报道, 该文已收入纪念文集 "Organic Matter: Productivity, Accumulation, and Preservation in recent and ancient sediments."

## 一、中国陆相原油的油源、时代和热历史

### 1. 生油岩有机质类型

根据中国含油气盆地的不同特征划分出四类主要的陆相生油岩类型 (Fu et al., 1988):

**类型 A:** 中国板内大型湖泊盆地沉积建造 属于这类的典型实例是松辽盆地, 在松辽盆地分布与发育着主要属于白垩系的生油岩。

**类型 B:** 断陷盆地湖相碎屑岩建造 在中国东部新生代含油气盆地发育的重要生油岩都属于这一类, 或者属于 C 类。属于这一类的主要是胜利油田、辽河油田以及冀中和苏北盆地的生油岩。

**类型 C:** 断陷盆地盐湖相蒸发岩—碎屑岩建造 典型例子是江汉盆地和泌阳盆地, 两盆地的生油岩都沉积于含盐至膏盐湖相环境。

**类型 D:** 山间盆地的泻湖—湖相碎屑岩建造 属于这一类的唯一实例在中国西部(准噶尔盆地的石炭—二叠系)。这类生油岩是由基性的凝灰岩和凝灰质泥岩和泥岩组成, 它们的矿物组成是十分复杂的, 包括蒙脱石、伊利石、绿泥石和混合层状粘土矿物, 以及少量的方沸石、钠长石、斜长石、石英、白云石、铁白云石、方解石和菱铁矿 (据闵育顺未刊资料)。

如前所述, 类型 A 的生油岩主要由 I 型和 II<sub>A</sub> 型干酪根所组成 (Fu and Sheng, 1986; Fu Sheng and Liu, 1988)。有机质的类型分布受着大型湖泊盆地沉积相的控制, I 型干酪根往往分布在深湖相中。B 类生油岩比较复杂, 多为 II 型干酪根, 有的也由 I 型和 III 型干酪根所组成, 这种复杂的情况是由于沉积环境与断陷盆地构造活动有关, 以及与相邻隆起区的距离有关。例如, 远离隆起区的生油岩发育较好, 较少受到陆源碎屑与高等植物输入的影响。类型 C 的生油岩通常是 II 型干酪根, D 类生油岩有机质通常是 II 型的, 也可以是 I 型的。

### 2. 生油岩的时代

油田的分布明显受到生油岩系发育与分布的控制, 各时代陆相生油建造的分布因而也受地质构造和沉积旋回的控制。中国陆相含油气盆地发育五个主要的生油气期: 晚侏罗世、早、中侏罗世、早白垩世、早第三纪和晚第三纪。根据各成油期气候条件和沉积水介质环境特点, 可以归纳划分出三个主要生油层: (1) 淡水—半咸水泻湖相, 主要与半潮湿气候环境有关, 主要时代是晚三叠世和早白垩世; (2) 与潮湿气候环境有关的淡水湖相, 如晚三叠世和早、中侏罗世; (3) 与半干旱气候有关的各种盐湖相, 如三叠纪 (Huang, et al., 1984)。

### 3. 生油岩有机质的热历史

影响有机质热演化的主要因素是温度和时间。由于在中国东部断陷盆地中沉积物质沉积时沉积速率较快, 地温梯度较高和沉积间断少, 生油门限 (OGT)、时间 (从生油岩沉积结束到开始生油的时间), 以及生油期 (即整个石油窗的时期) 都非常短。中国东部早第三纪断陷盆地包括了盐湖盆地, 沉积速度较快, 高的达到 0.2—0.3mm/a。东部六个主要含油气盆地的平均地热梯度为 3.7°C/100m, 最高可达到 4.78°C/100m (下辽河盆地), 最低的

2.7℃ / 100m (京—津地区)。松辽盆地的平均地热梯度为 4℃ / 100m, 泌阳盆地为 4.2℃ / 100m (据 Huang et al., 1984), 地热梯度在盐湖盆地例如江汉盆地中变化很大, 江汉盆地的平均地热梯度是 3.1℃ / 100m, 从 2.3℃ / 100m (主要在盐层发育地区) 到 3.7℃ / 100m (不含或少含盐层的地区)。OGT 深度在断陷盆地中包括在盐湖盆地中大约是 1700—2700m, OGT 温度 90—95℃。较短的 OGT 时间和生油期分别为 40—50Ma 和 30—45Ma 或更短。目前已知 OGT 时间最短的地区是柴达木盆地的芒崖拗陷 (Q+N), 其沉积速率高达 0.5mm / a, 其 OGT 值是 3300m, 126℃ 和 6.5Ma。中生代和新生代的断陷盆地呈现出一些差异, 例如松辽盆地的 OGT 值只有 1300m, 65℃ 和 25Ma (Huang et al., 1984; Fu and Sheng, 1986)。

中国西部某些中生界的山间盆地沉积建造具有较低的古地温, 例如二叠纪—侏罗纪沉积建造的古地温梯度只有 2.2℃ / 100m (Fu and Sheng, 1986)。

## 二、中国陆相原油的生物标志物特征

### (一) 样品和实验

本报告所分析的原油列于表 1。这些原油的油源类型的确定是根据某些地质解释, 而这

表 1 我国一些陆相原油采样地点及时代

Table 1 Description of selected non-marine crude oils samples.

样品	生油岩类型	地点	时代
D <sub>20</sub>	湖相半咸水泥岩	松辽盆地	白垩纪
D <sub>7</sub>			
D <sub>165</sub>			
D <sub>126</sub>			
JZ <sub>16</sub>	湖相淡水水泥岩	冀中凹陷	早第三纪
L <sub>17</sub>	湖相淡水水泥岩	辽河油田	早第三纪
L <sub>1</sub>			
J <sub>4</sub>	湖相膏盐泥岩	江汉油田	早第三纪
J <sub>42</sub>			
J <sub>33</sub>			
J <sub>31</sub>			
J <sub>10</sub>			
S <sub>2</sub>	湖相含盐泥岩	胜利油田	早第三纪
S <sub>4</sub>		苏北盆地	老第三纪
SB <sub>20</sub>		鄂尔多斯盆地	早第三纪
Za <sub>2</sub>	湖相白云质泥岩	泌阳盆地	早第三纪
M <sub>612</sub>			
M <sub>2</sub>			
M <sub>103</sub>			
M <sub>109</sub>			
X <sub>3</sub>	泻湖相凝灰质泥岩	准噶尔盆地	石炭纪—二叠纪
X <sub>114</sub>			二叠纪
X <sub>1</sub>			
X <sub>29</sub>			

些解释已为地球化学对比资料或出版资料所证实。本研究中挑选成熟度通常较低,且尽量没有受到生物降解的原油样,以避免受到生物降解和成熟度的影响。挑选某些未成熟或准成熟原油样,以便用于研究和了解中国陆相未成熟油的成因与特征。

所有的原油样品都用标准的色层法获得脂肪烃和芳烃馏份,然后进行色谱和色谱—质谱分析 (Brassell et al., 1986; Fu et al., 1986)。生物标志化合物的确定是参考了标准化合物谱图或文献资料谱图以及谱图解释。

## (二) 结果和讨论

根据沉积盆地和生油岩的性质,中国陆相原油可以划分为以下主要类型 (Fu et al., 1988; Fu and Sheng, 1989):

### 1. 湖相淡水—半咸水泥岩成因的原油

这类原油来源于湖相的淡水和半咸水泥岩生油岩,是中国的重要原油类型,广泛分布于不同类型的陆相沉积盆地,其时代为侏罗纪至第三纪。典型例子如大庆油田,其主要的亚环境包括半咸水和淡水的湖泊环境。

色谱分析揭示了某些普遍性的特征,例如正烷烃具有微弱的奇碳优势和微弱的高分子量优势,姥/植比为1—2.5。GC—MS法所揭示的特征生物标志化合物主要有甾烷和萜烷。辽河油田原油的甾烷浓度很低,规则甾烷显示出 $C_{29}$ 超过 $C_{27}$ 和 $C_{28}$ 优势。质谱鉴定出大庆油田的甾烷包括规则甾烷( $C_{21}$ ,  $C_{22}$ 和 $C_{27}$ — $C_{29}$ 化合物),以及少量的4-甲基甾烷和重排甾烷。

根据 $m/z$  191质量色谱图鉴定,大庆油田原油中存在一系列的三环( $C_{16}$ — $C_{29}$ )和四环萜烷,但含量较低。藿烷浓度比甾烷高得多, $C_{30}$ 藿烷占优势,升藿烷分布范围在 $C_{27}$ — $C_{35}$ (除了 $C_{28}$ ,偶而可检测到 $C_{37}$ )。

### 2. 膏盐泥岩成因的原油

这类原油被认为来源于含膏盐的泥岩生油岩,分布于中国东部的一些第三纪断陷盆地。属于这一类的典型实例是江汉盆地的原油 (Fu and Sheng, 1986)。

这类原油的烷烃组成在大多数情况下具有高植烷优势较高或高的 $\gamma$ -蜡烷丰度,偶而显示出正烷烃偶碳优势(OEP值 $<1$ )。 $C_{27}$ 规则甾烷超过 $C_{29}$ 而占优势。同时还具有浓度较低的可能来源于甲藻的 $C_{28}$ — $C_{30}$  4-甲基甾烷,以及孕甾烷和高孕甾烷。在有些情况下, $m/z$  191质量色谱图具有非常特征的异常分布,表现在升藿烷的相对强度往往呈 $C_{35} > C_{32} > C_{34} > C_{33}$ 的分布并具有非常丰富的 $\gamma$ -蜡烷。这种明显的特征实际上和它的生油岩特征是相类似的 (Brassell et al., 1988; Fu et al., 1988)。

### 3. 湖相白云质泥岩成因的原油

最近发现这类原油产于泌阳盆地的一些局部地区。地质和地球化学证据表明,这种原油来源于特殊的生油岩类型,即湖相白云质泥岩生油岩 (Fu and Sheng, 1986)。

与膏盐泥岩成因的类型相似,这种原油也在烷烃GC图上显示出非常高的植烷优势和微弱的正烷烃奇碳优势。然而在 $m/z$  191质量色谱图上其萜烷的分布呈现明显不同于前一类原油的特征,特别含有较多的三环和四环萜烷,以及 $\beta$ -胡萝卜烷,升藿烷含量非常低( $C_{31}$ 升藿烷除外)。这种非常特征的升藿烷分布可能是由于特殊微生物的输入或者是成岩环境影响所造成的。

### 4. 泻湖相凝灰质泥岩成因的原油

这类原油被认为是来源于一种十分特殊的生油岩，即石炭纪—二叠纪泻湖相凝灰质泥岩生油岩。这种原油被认为是新疆克拉玛依油田最重要原油类型之一。这类原油的正烷烃呈现出藻或细菌成因的分布特征，低分子量占优势以及微弱奇碳优势。

原油中丰富的细菌或藻类输入也进一步解释了它们异戊二烯类同系物典型分布的特征。脂肪烃馏份的色谱图显示出丰富的无环类异戊二烯化合物，包括高分子量化合物，直至 C<sub>40</sub> (番茄红烷)。另外一个明显的特征是高含量胡萝卜烷的产出，包括 β-和 γ-胡萝卜烷 (Fu and Sheng, 1989)。

**5.未成熟和准成熟原油**

在中国发现了未成熟和准成熟原油，它们很可能局限于来源于湖相膏盐环境泥岩生油岩，以及白云质泥岩生油岩 (Shi et al., 1982; Fu et al., 1986; Zhou et al., 1987)。这些原油主要产出于中国第三纪断陷盆地中。

典型实例资料列于表 2，表中列出了这些产自江汉油田和胜利油田的未成熟或准成熟原油饱和烃馏份的生物标志化合物参数。

**表 2 江汉油田和胜利油田一些未成熟原油的分子参数**

Table 2 Molecular parameters for immature crude oils from Jianghan oilfield and Shengli oilfield.

样 品	藿 烷 (%)			甾 烷 (%)				
	A	B	C	D	E	F	G	
江 汉 油 田	J <sub>33</sub>	50	9.30	59	24	20	44	83
	J <sub>1</sub>	62	10.02	85	27	20		
	J <sub>134</sub>	58	9.60	73	33	28		
	J <sub>42</sub>	61	6.3	57	48	52		
胜 利 油 田	Yi <sub>18</sub> *	47			17	10		71
	S <sub>4</sub> **		14	33	26	19		
	S <sub>5</sub> **		15	49	32	21		
	S <sub>32</sub> **		14	57	24	10		

注: A:  $C_{32}\alpha\beta \frac{22S}{(22S+22R)}$  B:  $C_{30} \frac{\alpha\beta}{(\alpha\beta+\beta\alpha)}$  C:  $\frac{\text{伽玛-蜡烷}}{\gamma\text{-蜡烷} + C_{30}\alpha\beta}$  D:  $C_{29} \frac{20S}{(20S+20R)}$

E:  $C_{29} \frac{\beta\beta}{(\beta\beta+\alpha\alpha)}$  F:  $C_{29} \frac{\text{三芳甾}}{(\text{三芳甾} + \text{单芳甾})}$  G:  $\frac{DPEP}{(DPEP+ET10)}$

\* 据 Shi et al., 1982 \*\* 据周光甲, 1987

未成熟和准成熟原油往往是高硫原油。随埋藏深度或成熟度增加导致了硫含量的明显减少。同时，生物标志物的变化不仅出现在饱和烃馏份中，也在芳烃馏份中出现。例如浅层产出的成熟度极低的原油含有丰富的噻吩和四氢噻吩同系物，并具有偶碳优势 (OEP 值为

0.66; Fu and Sheng, 1989), 而成熟度较低(即准成熟原油)的芳烃馏份则仅含少量的硫和含硫化合物。

### 三、结 论

概述了中国陆相原油的油源、时代、热历史和生物标志化合物组成基本特征之后, 可以获得以下初步结论:

1. 根据含油气盆地的类型和性质, 可以划分出四个主要的陆相生油岩建造类型: A 中国板内大型湖泊盆地的沉积建造; B 断陷盆地湖相碎屑岩建造; C 断陷盆地盐湖相蒸发岩-碎屑岩建造和 D 山间盆地泻湖-湖相火山-碎屑岩建造。

2. 中国不同时代陆相含油建造的分布是受构造旋回和沉积旋回所控制的。可以划分出五个成油期: 晚侏罗世, 早、中侏罗世, 早白垩世, 早第三纪和晚第三纪。

3. 有机质的类型和丰度与生油岩建造类型有关, 同时也和湖盆中沉积相, 特别是一个凹陷和隆起区的距离以及生油岩在特定的凹陷位置中产出有关。控制有机质热演化的主要因素是古地温梯度和沉积间断。

4. 简要探讨了四种重要原油类型饱和烃馏份的主要生物标志物组成特征。(A) 来源于湖相淡水-半咸水泥岩生油岩的原油含有含量非常低的  $\gamma$ -蜡烷, 但常常含有丰富的 4-甲基甾烷; (B) 来源于盐湖相泥岩生油岩的原油具有较高含量的植烷和一系列有机含硫化合物, 并呈现较高的植/姥比和  $\gamma$ -蜡烷/ $C_{30}\alpha\beta$  藿烷比, 有时还有较高的正烷烃偶碳优势; (C) 来源于湖相白云质泥岩生油岩的原油含有一系列三环和四环萜烷和  $\gamma$ -蜡烷, 而升藿烷含量非常低; (D) 泻湖相凝灰质泥岩生油岩成因的原油, 含有丰富的异戊二烯类烷烃和胡萝卜烷 ( $\beta$ -和  $\gamma$ -胡萝卜烷)。

5. 在中国至今所发现的未成熟至准成熟原油似乎主要来源于盐湖相膏泥岩生油岩和白云质泥岩生油岩。这些原油常有高含量的硫和有机含硫化合物, 特别是丰富的具有明显偶碳优势的噻吩和四氢化噻吩同系物。

感谢 G. Eglinton, S.C. Brassell, A.P. Gowar, 许家友、彭平安和 E.W. Della 在我们实验研究和论文准备过程中给予的帮助。感谢 J.W. Whelan 审阅本文并提出修改意见。

### 参 考 文 献

- (1) Brassell S.C. and Eglinton G. 1986. Molecular. In *Organic Marine Geochemistry* (Sohn M.ed.), p.10-32. American Chemical Society. Washington D.C.
- (2) Brassell S.C., Eglinton G. and Fu Jiamo. 1986. In *Advances in Organic Geochemistry 1985* (Leythaeuser D. and Rullkotter J.eds) *Org. Geochem.* V.10. p.927-942. Pergamon press. Oxford.
- (3) Brassell S.C., Eglinton G. and Howell V.J.. 1987. In *marine Petroleum Source Rocks* (Brooks J. and Fleet A.J. ed). p.79-98. Blackwell Scientific Publications.
- (4) Brassell S.C., Sheng Guoying, Fu Jiamo and Eglinton G.1988. *Lacustrine Petroleum Source Rocks* (Kelts K., Fleet A. and Talbot M.eds). p.299-308. Blackwell Scientific Publications.
- (5) Fu Jiamo and Sheng Guoying, 1986. In *Advances in Science of China-Earth Sciences 1* (Tu Guangzhi ed.)

- p.251-286. Science Press, Beijing, China, 1986; John Wiley & Sons, New York.
- (6) Fu Jiamo and Sheng Guoying, 1989, Applied Geochemistry, V.4, p.13-32.
- (7) Fu Jiamo, Sheng Guoyang, Peng Pingan, Brassell, S.C., Eglinton, G. and Jiang Jigang, 1986, In Advances in Organic Geochemistry (Leythaeuser D. and Rullkotter M. eds), p.119-127, Pergamon Press, Oxford.
- (8) Fu Jiamo, Sheng Guoying and Liu Dehan, 1989, In Lacustrine Petroleum Source rocks (Kelts K., Fleet A. and Talbot M.eds), p.279-289. Blackwell Scientific Publications.
- (9) Huang Difang, Shang Huiyun and Li Jinchao, 1984, Advances in theoretical research on continental oil generation in China. Beijing Petroleum Symposium, Beijing, September.
- (10) Mello M.R., Gaglianone P.C., Brassell S.C. and Maxwell J.R., 1988, Marine and Petroleum Geology V.5, p.205-223.
- (11) Moldowan J.M., Seifert W.K. and Gallegos E.J., 1985, AAPG Bull. v.69, p.1255-1268.
- (12) Palacas J.G., Anders D.E. and King J.d., 1984, AAPG studies in Geology 18 (Palacas J.G. eds), p.71-96.
- (13) Powell T.G., 1986, Marine Pet. Geol. v.3, p.200-219.
- (14) Shi Jiyang, Mackenzie A.S., Alexander R., Eglinton G., Gowar A.P., Wolf G.A. and Maxwell J.R., 1982, Chem. Geol. v.35, p.1-31.
- (15) 周光甲, 1987, 陆相块断盆地中的低成熟原油, 有机地球化学论文集地质出版社, 中国地质学会石油地质专业委员会编, 27-37页。

## Source and Biomarker Composition Characteristics of Chinese Non-marine Crude Oils

Fu Jiamo      Sheng Guoying

(Guangzhou Branch of Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences)

### Abstract

This paper presents an overview on current thinking about sources, ages, and thermal histories of Chinese non-marine crude oils.

Terrestrial source rocks, deposited under non-marine conditions in continental environments, have been divided into four major groups: Group A, sedimentary formations of big lake basins in the interior of the Chinese plate; Group B, lacustrine clastic formations in fault-bounded basins; Group C, salt lake evaporite-clastic formations in fault-bounded basins; and Group D, lagoonal-lacustrine volcano-clastic formations of intermontane basins.

A number of representative crude oil samples were collected from the following four type of source rocks: (1) Lacustrine fresh-brackish water mudstones; (2) Saline to hypersaline mudstones; (3) Lacustrine dolomitic mudstones; (4) Lagoonal tuffaceous mudstones. The samples were analysed by GC and GC-MS to reveal the characteristic distributions of biological markers in their aliphatic fractions. The distribution of n-alkanes, isoprenoids, steranes and hopanoids as well as other biological marker compounds are discussed briefly. In terms of biological marker parameters of their aliphatic fractions, some immature to marginal mature oil samples sourced from hypersaline and saline mudstones are described. Immature or marginal mature crude oils occurred in shallow depth in Jiangnan basin contain high amount of sulphur and organic sulphur compounds, especially abundant thiophene and thiolane homologues with remarkable even carbon number predominance.