

# 细菌在板桥凹陷生烃机制中的作用\*

王铁冠

(石油大学地球科学系, 北京 102200)

钟宁宁 侯读杰 黄光辉

于志海 杨池银 廖前进

(江汉石油学院分析测试研究中心, 荆州 434102)

(大港油田地质勘探开发研究院, 天津 300280)

**摘要** 陆源有机质是板桥凹陷下第三系沙河街组油气主要的原始生烃母质, 细菌对沉积有机质的降解改造利于提高其“腐泥化”程度, 早期生成低熟油。细菌成因短链烷烃是形成板桥凝析油和原油轻烃的主要物质基础, 一定的热成熟度和地层温度、压力环境是形成凝析油气的外在条件。

**关键词** 烃类生源构成 微生物生源烃类 富氢显微组分 矿物沥青基质 生烃模式

板桥凹陷位于渤海湾盆地黄骅坳陷中西部, 70年代初发现板桥油气田, 迄今在下第三系沙河街组三段至一段中部( $E_{s3} \sim E_{s1}$ )地层中产凝析油气、原油和天然气等多种烃类流体<sup>[1]</sup>。

对于颇具特色的板桥凹陷油气成因研究, 前人多强调陆源“偏腐殖型”有机质, 特别是树脂体的生烃贡献<sup>[2]</sup>。实际上板桥烃源岩极少含量树脂体, 单纯的“偏腐殖型”母质生烃概念, 不足以阐明板桥产低熟油和富含凝析油气的缘由。因此, 板桥凹陷生烃机制值得重新研究。

## 1 烃类生源构成剖析

文中对面临板桥凹陷的板桥油气田板北断块沙河街组各段7个油样(凝析油、轻质原油与原油)和15个泥岩样的烃类馏分, 进行气相色谱和色谱-质谱分析系统检测, 每个饱和烃馏分约检测110多个化合物, 芳烃馏分320余化合物, 鉴定率达90%以上; 此外还系统鉴定凝析油和原油C<sub>1</sub>-C<sub>8</sub>轻烃馏分52个化合物。

### 1.1 烃类的生源意义

板桥原油及其源岩的烃类馏分中, 大多数化合物都具较明确的生源意义(表1)。作为主要成分, 正烷烃多呈双峰态分布, 显示双重生源输入特征, 前峰以n·C<sub>17</sub>(或n·C<sub>18</sub>)为主峰, 无奇偶优势, 通常属于细菌或藻类微生物生源产物; 后峰见n·C<sub>23</sub>(或n·C<sub>25</sub>)主峰, 具有奇碳数优势, CPI值达3.1, 代表典型高等植物上表皮蜡的贡献; 随成熟度增加, 双峰态及后峰奇碳数优势渐减弱至消失。

这些烃类馏分次要成分的显著特色是含有形形色色的细菌生源标志物, 并且其合计含量

1994-07-19 收稿, 1995-03-01 收修改稿

\* 国家“八五”重点科技攻关项目与中国科学院兰州气体地球化学国家重点实验室资助项目

在微生物生源烃类总量中占有优势。例如，藿烷型三萜类及与之相关的四环萜烷(又称17,21-断藿烷)系列、补身烷系列、苯并藿烷系列和各种芳构化藿烷类等都是公认的典型细菌标志物； $C_{21}^+$ 长链类异戊二烯烷烃及其降解产物则为古细菌或细菌标志物；不具奇碳数优势而又完整分布的异构和反异构烷烃系列均属细菌蜡的成分；单甲基支链烷烃及其同分异构复合物(即X化合物)系蓝细菌等微生物的生源产物；三环萜烷系列与芳构化三环萜烷系列亦列入菌藻类微生物生源范畴。此外，长链烷基萘系列在板桥原油与源岩中发育，生源意义不明，由于分布特点与细菌生源或细菌降解作用标志物密切相关，推论其前身物也归诸于细菌生源之列。

表1 板桥原油和源岩中检测的各种生物标志物的生源涵义

| 生 源 类 型            | 饱 和 烃 馏 分 | 芳 烃 馏 分  |
|--------------------|-----------|--|
| 高等植物生源             | 未经微生物改造   | 1. C <sub>22</sub> <sup>+</sup> 正烷烃<br>2. C <sub>29</sub> 甾烷(?)<br>3. 奥利烷(三萜类)   |
|                    | 经微生物改造    | 4. 芳构化脱-A-三萜类<br>5. 芳构化8, 14-断三萜烷(奥利烷型、乌散烷型、羽扇烷型)  |
|                    | 藻类        | 1. 孕甾烷<br>2. C <sub>27</sub> -C <sub>29</sub> 甾烷、粪甾烷, C <sub>29</sub> 甾烷(?)<br>3. 4-甲基甾烷   |
|                    | 细菌、藻类     | 4. 三环萜烷系列<br>5. C <sub>21</sub> <sup>+</sup> 正烷烃   |
|                    | 细菌类       | 6. 异构烷烃系列<br>7. 反异构烷烃系列<br>8. 单甲基中间支链烷烃、X化合物<br>9. C <sub>14</sub> -C <sub>16</sub> 补身烷系列(含重排补身烷)<br>10. 四环萜烷系列<br>11. 藿烷型三萜烷类(藿烷、莫烷、新藿烷、重排藿烷系列) |
|                    | 古细菌或细菌类   | 12. C <sub>21</sub> <sup>+</sup> 长链类异戊二烯烷烃系列及其降解产物   |
| 高等植物 - 光合细菌叶绿素色素生源 | 原生动物类     | 13. 伽马蜡烷   |
|                    |           | 1. C <sub>15</sub> -C <sub>20</sub> 植烷系列规则类异戊二烯烷烃系列<br>2. 胡萝卜烷   |
| 未知生源               |           | 1. 烷基环己烷类<br>2. 烷基苯类   |
|                    |           | 1. 脱羟基维生素E<br>2. 烷基苯类<br>3. 绝大多数萘、菲、芘等常规多环芳烃类  |

高等植物生源环状萜类主要见于芳烃馏分(如卡达烯、薏烯、海松烯和各种芳构化的奥利烷、乌散烷和羽扇烷)。特别值得注意的是，相当数量的被子植物生源三萜类前身物，经细菌光化学作用，改造成芳构化脱-A-三萜烷和芳构化8, 14-断三萜烷，可作为生烃过程中，细菌改造作用的直接证据<sup>[3, 4]</sup>。

## 1.2 总烃馏分生源构成

图 1 以一个沙一段中部泥岩为例, 展示其饱和烃和芳烃馏分的主要化合物组成与生源构成, 依据其氯仿沥青族组成饱芳比 1.9, 可计算出该泥岩总烃馏分的生源构成<sup>[5]</sup>, 即高等植物生源烃类占 38.5%, 微生物(主要是细菌)生源产物可达 43.5%, “微生物生源总量/高等植物生源总量”值达 1.1(表 2)。

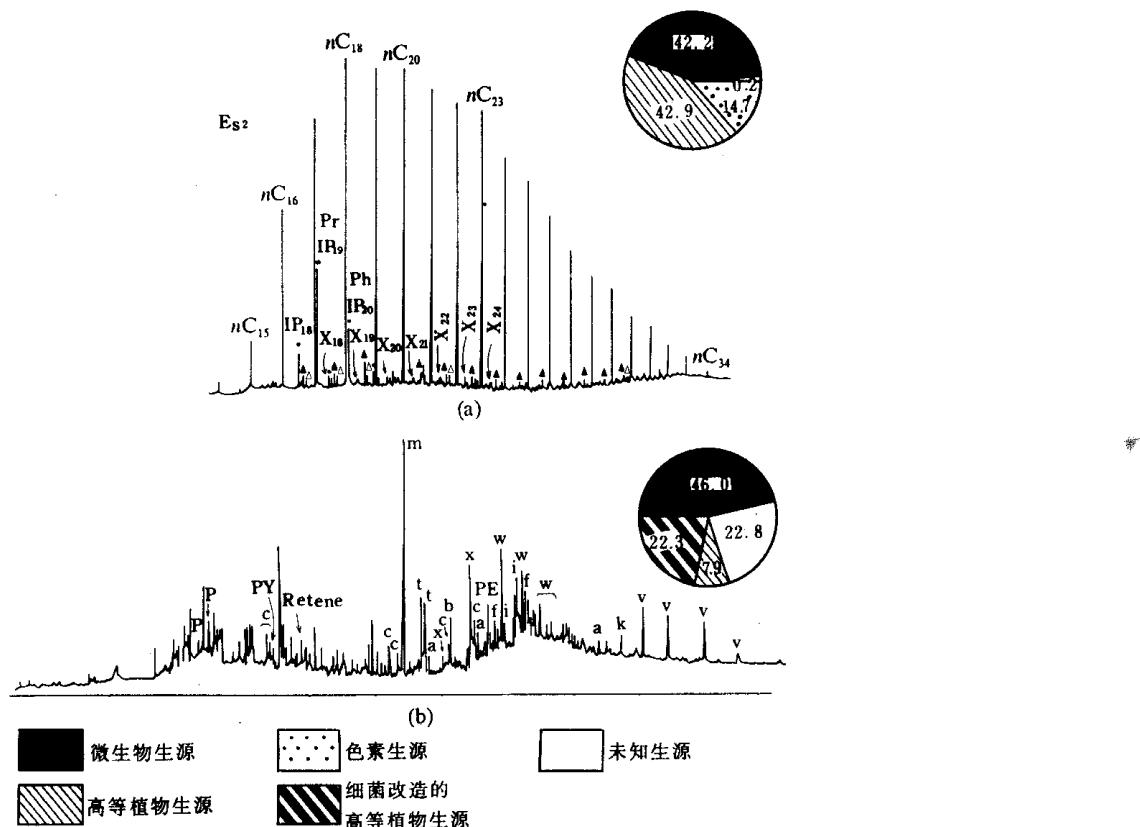


图 1 板 22 井  $E_{s1}$  中泥岩(井深 2651m)饱和烃(a)与芳烃馏分(b)气相色谱图与生源构成百分比  
饱和烃:  $n \cdot C_i$ —正烷烃,  $IP_i$ —类异戊二烯烷烃; Pr—姥鲛烷; Ph—植烷,  $X_i$ —X 化合物系列,  
i—碳数; ▲—异构烷烃系列, △—反异构烷烃系列; 芳烃: P—菲, PY—芘, a—烷基苯,  
b—芳构化倍半萜类, c—长链烷基苯, f—芳构化三环萜烷, i, k—芳构化三萜烷类; m, t—芳  
构化脱-A-三萜烷, v—苯并萜烷, x—脱羟基维生素 E, Retene—蒈烯

表 2 中原油与源岩总烃馏分的生源构成定量数据, 充分证明高等植物与微生物是板桥凹陷最主要的生烃母质。高等植物生源烃类约占总烃馏分 26%~56%; 微生物占生源构成百分比则因层位而异, 唯沙一段中部和沙三段地层相对富集, 达 33.6%~43.5%, “微生物生源总量/高等植物生源总量”值可达 0.7~1.6, 其中尤以沙一段中部泥岩为最, 微生物生源的贡献超过高等植物生源输入, 因此对板桥凹陷微生物(细菌)的生烃意义绝不可低估。

## 1.3 原油 $C_4$ — $C_8$ 轻烃馏分组成特征

板桥凹陷原油、轻质原油和凝析油的  $C_4$ — $C_8$  轻烃馏分中以异常高的链烷烃含量(64.3%~94.1%)和支链烷烃/正烷烃值(0.7~1.6)为特征(表 3)。若引用王庭栋等根据国内

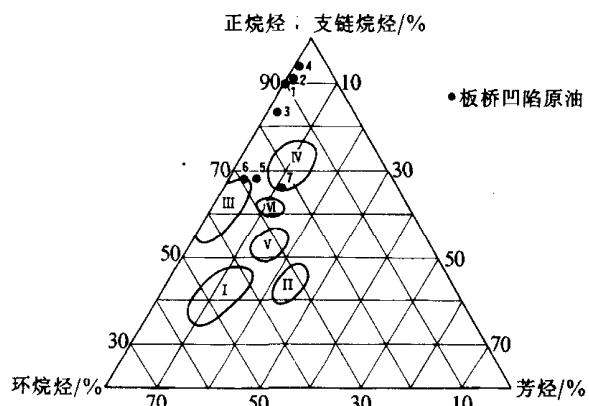
表2 板桥凹陷原油与泥岩总烃馏分生源构成

| 样品类型 | 井号    | 层位             | 井深/m               | 生源构成/% |                    |       |      | 微生物生源总量 / 高等植物生源总量 |     |
|------|-------|----------------|--------------------|--------|--------------------|-------|------|--------------------|-----|
|      |       |                |                    | 高等植物生源 |                    | 微生物生源 | 色素生源 |                    |     |
|      |       |                |                    | 未改造    | 细菌改造               |       |      |                    |     |
| 泥岩   | 板 22  | $E_{s1}^{\pm}$ | 2 282              | 55.7   |                    | 23.3  | 5.5  | 15.5               | 0.4 |
|      |       |                | 2 651              | 49.4   | 6.3                |       |      |                    |     |
|      |       | $E_{s1}^{\pm}$ | 30.8               | 38.5   | 7.7                | 43.5  | 9.8  | 8.3                | 1.1 |
|      | 泥岩    | $E_{s1}^{\pm}$ | 2 845              | 47.1   | 50.5               | 19.2  | 12.8 | 17.5               | 0.4 |
|      | 板深 16 | $E_{s2}$       | 4 041              | 21.4   | 22.0 <sup>a)</sup> | 18.7  | 1.8  | 57.5 <sup>a)</sup> | 0.9 |
| 原油   | 板深 2  | $E_{s3}$       | 3 610.9            | 39.1   | 39.3               | 35.6  | 2.1  | 22.3               | 0.9 |
|      | 板 821 |                | 2 699.8 ~ 27 808.4 | 45.7   | 46.3               | 37.1  | 2.9  | 12.6               | 0.8 |
|      | 板 822 |                | 2 952 ~ 2 957      | 42.1   | 42.5               | 38.1  | 2.2  | 17.3               | 0.9 |
|      | 新 828 | $E_{s1}^{\pm}$ | 2 828.2 ~ 2 899.4  | 49.6   | 50.2               | 33.6  | 2.1  | 14.4               | 0.7 |
|      | 板深 56 |                | 2 986.1 ~ 3 005.9  | 26.0   | 26.2               | 42.2  | 8.3  | 23.3               | 1.6 |
|      | 板深 25 | $E_{s3}$       | 3 851.3 ~ 3 870.4  | 48.7   | 48.9               | 35.1  | 2.8  | 13.2               | 0.7 |

a) 泥岩样品实测  $R_o$  值达 1.07%，环烷烃大都芳构化成为常规多环芳烃，生源意义难以判别，数据仅供参考

17个典型凝析油气藏轻烃数据建立的成因分类三角图<sup>1)</sup>作比较，板桥凹陷  $E_{s1}^{\pm}$  凝析油、 $E_{s2}$  轻质原油和  $E_{s3}$  原油均分布于 III~IV 区，呈现出腐泥型生源的轻烃组成特征（图 2），其链烷烃占  $C_4$ — $C_8$  轻烃馏分的相对含量为 64.3%~67.5%，大体上与湖相和海相腐泥母质生源的凝析油轻烃组成相当，而  $E_{s1}^{\pm}$  3 个原油的轻烃馏分链烷烃相对含量则更甚之，高达 83.7%~94.1%，堪为全国之最（表 3）。

除沙三段以外，板桥凹陷各层段原油、轻质轻油和凝析油轻烃馏分均相对富集具有 1~2 个甲基的  $C_4$ — $C_8$  支链烷烃（表 3）。细菌生源的异构与反异构烷烃系列、单甲基中间

图 2 原油  $C_4$ — $C_8$  轻烃成因分类

分类范围据王庭栋等简化<sup>1)</sup>。成因分类：I——成熟陆源母质生源；II——高成熟陆源母质生源，III——成熟湖相腐泥母质生源，IV——成熟腐泥母质生源，V——成熟混合母质生源，VI——高成熟混合母质生源。油样编号同表 3 序号

1) 王庭栋, 李绍基, 韩跃文等. 我国典型凝析气藏形成机制及分布特征: 国家“七五”重点科技攻关项目成果报告. 西南石油学院, 1989

表 3 板桥凹陷原油  $C_4-C_8$  轻烃馏分组成

| 序号 | 层位         | 井号    | 井深/m                 | 样品   | $C_4-C_8$<br>含量 <sup>a)</sup> /% | $C_4-C_8$ 馏分组成 <sup>b)/%</sup> |      |      | 支链烷烃<br>/正烷烃 |     |
|----|------------|-------|----------------------|------|----------------------------------|--------------------------------|------|------|--------------|-----|
|    |            |       |                      |      |                                  | 链烷烃                            |      | 环烷烃  |              |     |
|    |            |       |                      |      |                                  | 正烷烃                            | 支链烷烃 |      |              |     |
| 1  |            | 板 821 | 2 699.8 ~<br>2 708.4 | 原油   | 28.6                             | 90.2<br>47.3<br>42.9           |      | 9.0  | 0.9          | 0.9 |
| 2  | $E_{s1}^+$ | 板 822 | 2 925 ~<br>2 927     | 原油   | 35.6                             | 91.1<br>47.7<br>43.4           |      | 8.0  | 0.8          | 0.9 |
| 3  |            | 新 828 | 2 828.4 ~<br>2 899.4 | 原油   | 24.5                             | 83.7<br>43.6<br>40.1           |      | 14.5 | 1.7          | 0.9 |
| 4  |            | 板深 56 | 2 986.1 ~<br>3 005.9 | 原油   | —                                | 94.1<br>41.2<br>52.9           |      | 5.2  | 0.2          | 1.3 |
| 5  | $E_{s1}^-$ | 板中 14 | 2 758.6 ~<br>2 787.4 | 凝析油  | 45.5                             | 67.5<br>35.5<br>32.0           |      | 26.9 | 5.6          | 0.9 |
| 6  | $E_{s2}$   | 板深 20 | 3 870.4              | 轻质原油 | 53.0                             | 67.5<br>26.2<br>41.3           |      | 29.4 | 3.1          | 1.6 |
| 7  | $E_{s3}$   | 板深 25 | 3 815.3 ~<br>3 870.4 | 原油   | 2.2                              | 64.3<br>38.9<br>25.4           |      | 23.4 | 12.4         | 0.7 |

a) 据全油气相色谱分析数据

b) 据油顶气及凝析油、轻质原油气相色谱分析数据

支链烷烃(X 化合物)以及各种类异戊二烯烷烃系列, 最有可能成为这类  $C_4-C_8$  支链烷烃的前身物, 而板桥凹陷源岩恰好富含这类长链的支链烷烃(表 1 和图 1(a)), 饱和烃馏分中其含量最高可达 22.1%, 具备形成这类  $C_4-C_8$  支链烷烃的物质基础。但是, 上述凝析油气的形成, 不仅需要这类低分子量正烷烃与支链烷烃的富集, 而且还需要适当的热历史条件, 一定的油气比率以及储层温度、压力等成藏环境条件。

## 2 源岩显微组分特征

### 2.1 富氢组分剖析

板桥凹陷源岩显微组分以镜质组(占 30% ~ 50%)和壳质组(10% ~ 40%)为主, 含相当数量腐泥组(5% ~ 20%)与少量惰性组(<10%); 其中“壳质组 + 腐泥组”富氢组分相对含量大都接近或超过 50%, 主要由壳屑体、孢子体和藻类体组成, 显示陆生高等植物生源输入占优势的特征, 数量上并未体现细菌的生源贡献, 事实上光学显微镜下不可能直观分辨细菌及其活动产物。

板桥源岩富氢组分的产状特征间接反映了细菌改造作用的影响。孢子体与藻类体均有明显的降解现象, 导致壳屑体的相对富集。如藻类体 B 因降解丧失细胞结构, 并且产生壳屑体(图版 I-1)。孢子体显示出从较完整的孢子体(图版 I-2)、孢子体碎片(图版 I-3)、不同粒级的壳屑体(图版 I-4), 直到矿物沥青基质中隐约可见的粒状有机碎屑(图版 I-5)和干酪根中的粒状无定形有机物(图版 I-6), 构成一个完整的壳质组降解系列。由于腐泥组与壳质组相对含量与烃类馏份中微生物生源总量间, 呈现出一定的相关性(图 3(a),(b)), 表明富氢组分中含量最丰富的壳屑体, 实际上主要是细菌降解改造作用的产物。

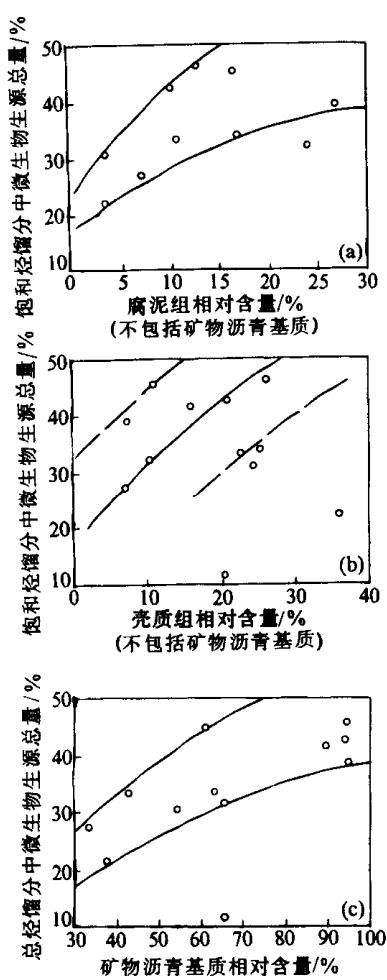


图3 源岩富氢组分与微生物生源总量的相关性

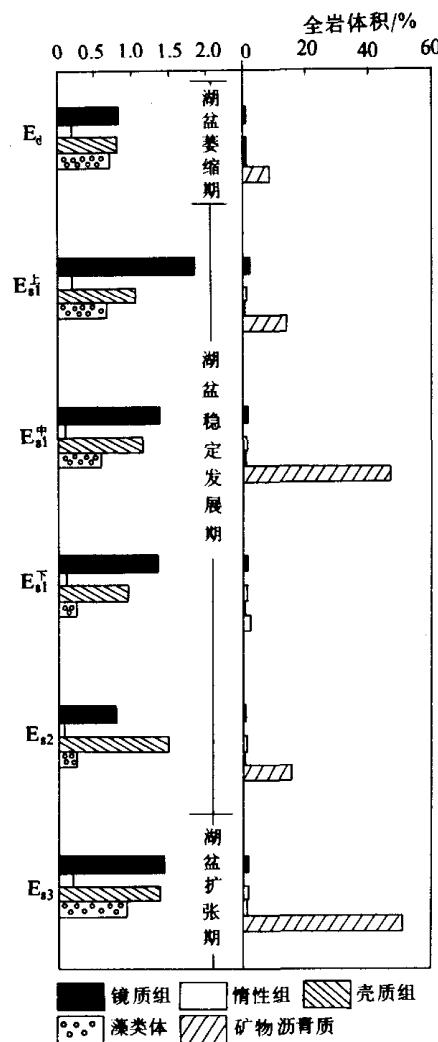


图4 板桥凹陷源岩显微组分含量分布

## 2.2 矿物沥青基质的意义

矿物沥青基质是亚微观尺度的分散有机物与矿物基质的混合物，并非具有一定形态特征的有机颗粒，从严格意义上讲，不属经典的显微组分；但是从数量上看，却又是泥质源岩中值得注意的一种有机质赋存形式。

板桥源岩中，矿物沥青基质具如下特征：

- (1) 源岩中矿物沥青基质含量与有机碳含量之间无相关性，即矿物沥青基质与沉积有机质没有直接联系，显示其不具原生性；
- (2) 矿物沥青基质含量与源岩总烃馏分微生物生源烃类总量相关（图3(c)），反映矿物沥青基质与微生物（主要是细菌）繁衍及其代谢产物有成因联系；
- (3) 矿物沥青基质中隐含的有机物与干酪根中粒状无定形有机物，乃至壳屑体构成一个连续的次生降解粒级变化序列（图版I-3~6）；
- (4) 非烃源岩和差烃源岩中，显微组分“形态分子”总量一般小于2%，相应的矿物沥青基质含量小于6%，其实际隐含的有机质数量微不足道，而好烃源岩中显微组分“形态分子”总量

大于 3%，矿物沥青基质含量则接近或超过 50% 以上；

(5) 从层位分布上看，沙一段中部与沙三段泥岩富含微生物生源产物（表 2），其矿物沥青基质平均含量分别达到 46% 和 50%，突出高于其他层段（图 4）。

因此，板桥凹陷矿物沥青基质的成因关系、产状特征与分布规律等均证明其与微生物（细菌）的降解改造作用关系密切。凡是细菌降解改造作用明显，微生物生源烃类含量高，有机质类型好、丰度高的烃源岩，均具有含量异乎寻常的矿物沥青基质。所以，板桥凹陷源岩中，矿物沥青基质含量高低，可以作为细菌对生烃原始母质改造程度的标志。换言之，在沉积作用和早成岩作用早期阶段，只要具备适宜的环境条件，富含高等植物生源输入的沉积物为细菌大量繁衍提供充足的碳源和能源，细菌活动势必导致沉积有机显微组分的降解，加速其原始细胞结构与形态的破坏，形成大量壳屑体和镜屑体，出现连续粒级的有机物降解序列，产生丰富的矿物沥青基质。同时，微生物的代谢产物也必然掺入矿物沥青基，并且作为微生物生源输入产物参与生烃过程，从而引起烃类生源构成的变异。从某种意义上讲，它将会“改良”生烃母质有机质类型，提高源岩的“腐泥化”程度和生烃潜力，甚至降低有机质生烃的活化能，使之早期生烃，形成低熟油气。这就是板桥凹陷陆源母质占优势的源岩，何以产生具“腐泥型”特征的凝析油与原油轻烃馏分的缘由呢，也是处于低熟阶段的沙一段中部泥岩 ( $R_o$  值为 0.45% ~ 0.6%) 可以早期生烃，形成的原油自成一种成因类型，不同于下伏层位原油的内在原因。

### 3 生烃模式及其地质意义

根据实测的源岩有机质转化率（氯仿沥青 / 有机碳）数据，随源岩埋藏深度的变化规律，建立板桥凹陷沙河街组源岩的生烃模式（图 5）。

板桥凹陷沙河街组源岩大体上构成两个生烃高峰带：

(1) 低熟油生烃高峰带。表 3 所列的沙一段中部 ( $E_{sl}^+$ ) 4 个原油样，均属低熟油范畴，其生油高峰大致包含  $R_o$  值从小于 0.45% 至 0.60% 的区间，主要代表沙一段中部泥岩所生成的原油。该段泥岩富含陆源有机质，又经细菌强烈改造，提高其微生物生源构成比率，可能是其早期低温生油的原因。然而沙一段中部泥岩埋藏较浅，成熟度低，地层温度、压力也低，不具备形成大量天然气和凝析油的基本条件，因此只产原油。

(2) 成熟原油与凝析油气生烃高峰。该演化阶段划分，主要基于镜质体与孢子体的演化参数， $R_o$  值为 0.53% 是常规油气生烃门限， $R_o$  值为 0.75% ~ 0.85% 区间为生烃高峰，相应地

$R_o$  值大约在 0.70% 时开始生成凝析油气。这个常规油气生成带大体上代表了板桥凹陷以沙三段为主要油源（沙二段也可能有所贡献）的成熟原油——凝析油气——天然气的生成范围。

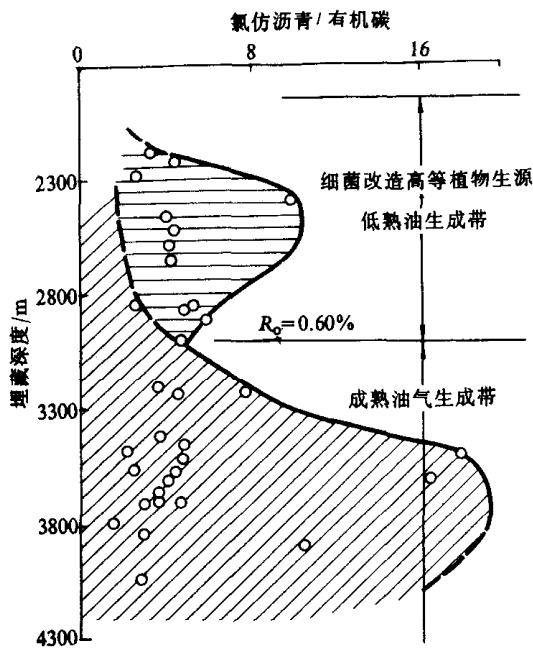


图 5 板桥凹陷沙河街组生烃模式

板桥油气田虽已经历 20 年勘探开发, 但是从图 5 生烃模式分析, 其浅层和深层油气勘探尚有潜力可挖, 浅层低熟油值待进一步研究与勘探, 深部成熟油气生成带也尚未完全揭开, 油气勘探仍留有余地。

### 参 考 文 献

- 1 李绍光, 吴 涛. 中国石油地质志(卷四): 大港油田. 北京: 石油工业出版社, 1991
- 2 陈建渝. 凝析油的多种成因概述. 武汉地质学院地质科技情报, 1987, 6(3): 95~100
- 3 Corbet B, Albrecht P, Ourisson G. Photochemical and Photomimetic fossil triterpenoids in sediments and petroleum. *J Am Chem Soc*, 1980, 101: 1171~1173
- 4 Trendel J M, Lohmann F, Kintzinger J P et al. Identification of des-A-triterpenoid hydrocarbons occurring in surface sediments. *Tetrahedron*, 1989, 45: 4457~4470
- 5 王铁冠. 生物标志物组合与生源构成在天然气源岩研究中的应用. 见: 石宝珩主编, “七五”重大石油科技成果: 天然气地质研究. 北京: 石油工业出版社, 1992. 130~137