

文章编号: 1000-0550(2012)04-0770-09

## 4-甲基甾烷在油源对比中的应用 ——以渤南洼陷北部陡坡带为例

咎 灵<sup>1</sup> 张枝焕<sup>2</sup> 王顺华<sup>3</sup> 邢 辉<sup>2</sup> 李文浩<sup>2</sup> 刘祎楠<sup>4</sup> 席伟军<sup>5</sup>

(1. 中国石油化工股份有限公司华东分公司石油勘探开发研究院 南京 210011;

2. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室 北京 102249;

3. 中国石油化工股份有限公司华东胜利油田石油开发中心 山东东营 257000;

4. 西北大学地质系 西安 710069; 5. 中国石油化工股份有限公司华东胜利油田新疆勘探开发中心 山东东营 257000)

**摘 要** 同一洼陷不同次洼的烃源岩及生成的原油,由于古气候、古沉积环境较为相似,其常规生物标志化合物和同位素特征差别非常小,给油源分析带来困难。通过 GC-MS 分析提取原油和烃源岩中分子化石信息,主要依据 4-甲基甾烷的相对含量和不同构型的 4-甲基甾烷的分布特征来进行油源对比,为类似地区的油源分析提供了一种新思路。渤南洼陷发育  $E_{s_4}^x$  和  $E_{s_3}^x$  两套主力烃源岩,中部次洼、西部次洼和渤南深洼  $E_{s_3}^x$  烃源岩的 4-甲基甾烷/ $C_{29}$  甾烷值分别为 4.51、2.79、1.27,是由于烃源岩中沟鞭藻有机质占总有机质的比例不同所造成。不同地区原油  $C_{20}$ 、 $C_{21}$ 、 $C_{23}$  三环萜烷和  $\alpha\alpha\alpha$ -20R- $C_{27}$ 、 $C_{28}$ 、 $C_{29}$  规则甾烷等特征非常相似,成熟度相当,中、西、东三个地区原油的 4-甲基甾烷/ $C_{29}$  甾烷值分别为 2.89、2.39 和 2.06,区别明显,各个地区 4-甲基甾烷的构型也不同。对比结果表明,渤南洼陷北部陡坡带  $E_{s_4}^x$  和  $E_{s_3}^x$  油气均为近源成藏,主要来源于其临近次洼的  $E_{s_3}^x$  烃源岩。

**关键词** 4-甲基甾烷 渤南洼陷 北部陡坡带 生物标志化合物 油源分析

**第一作者简介** 咎灵 男 1984 年出生 博士 石油地质学 E-mail: zl442100@163.com

**中图分类号** P593 **文献标识码** A

### 0 引言

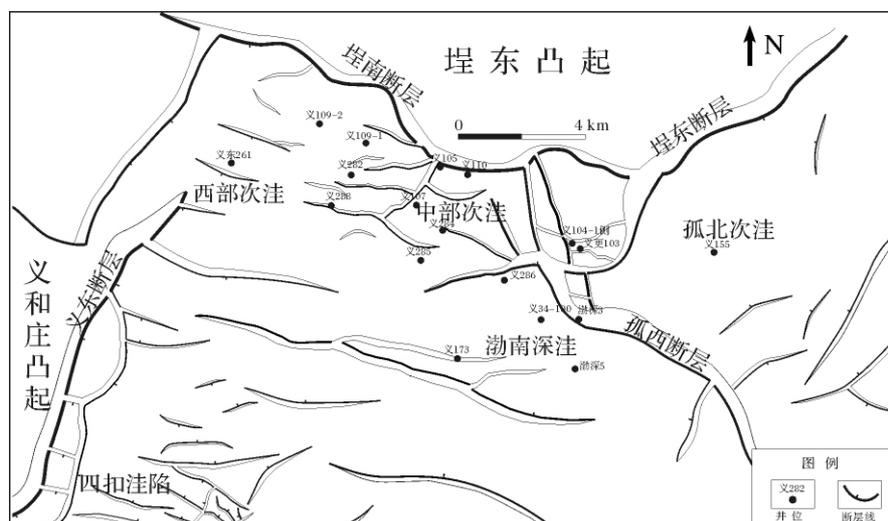
甲基甾烷为甾类化合物的重要组成部分,主要包括 4-甲基甾烷(包括  $C_{28}$  ~  $C_{30}$  甲藻甾烷)、3-甲基甾烷和 2-甲基甾烷<sup>[1]</sup>。4-甲基甾烷既可由甲藻(沟鞭藻)形成,也可由某些细菌产生<sup>[2,3,4]</sup>。淡水湖泊相 4-甲基甾烷主要为沟鞭藻生源<sup>[2,5]</sup>。在海洋和咸化湖泊环境,含 4-甲基甾烷化合物的地层中往往较少发现沟鞭藻化石,其高丰度分布段正好处于微生物活动带,由此有人推测沉积物中存在的甾醇、甾酮等的细菌生物酶的还原产物,成为 4-甲基甾烷的主要来源<sup>[3]</sup>。这两种来源的 4-甲基甾烷一般丰度相对较高,且有沟鞭藻化石或细菌活动的证据。海相和陆相原油中都含有 4-甲基甾烷,超盐度沉积环境下的陆相生油岩形成的原油中 4-甲基甾烷含量低于源自淡水或微咸水环境下沉积的生油岩生成的原油<sup>[6]</sup>。渤海湾盆地  $E_{s_3}^x$  烃源岩为滨浅湖—深湖相沉积,富含沟鞭藻类渤海藻属和副渤海藻属<sup>[7]</sup>,这是使用 4-甲基甾烷进行油源对比的地质依据。应用 4-甲基甾烷

相对含量辅助油源对比的文献较常见<sup>[8-10]</sup>,但依据其不同构型化合物的分布特征进行油源对比的报道鲜有,尝试使用 4-甲基甾烷的相对含量和不同构型 4-甲基甾烷的分布特征来进行油源对比。

### 1 区域地质概况

渤南洼陷位于济阳拗陷沾化凹陷的中部,是沾化凹陷的次一级构造单元,构造上为一北东走向、北陡南缓、东陡西缓的断陷湖盆。北以埕南断层为界与埕东凸起相连,西以义东断层为界与义和庄凸起相邻,南部紧临陈家庄凸起,东部以孤西断层为界,与孤北洼陷相邻。北部陡坡带发育三个次洼(图 1),分别为西部次洼、中部次洼和渤南深洼,三个次洼  $E_{s_3}^x$  底部最大埋深分别为 4 200 m、4 200 m 和 5 000 m,东侧紧临孤北洼陷。义 107 断层与埕南断层交界以西为西部地区,对应洼陷带为西部次洼,义 107 断层以东、孤西断层以西为中部地区,对应洼陷带为中部次洼,埕东断层以南、孤西断层以西为渤南深洼,埕东断层以北、孤西断层以东为东部地区,埕东断层以南、孤西断

收稿日期: 2011-08-06; 收修改稿日期: 2011-10-18

图1 渤南洼陷北部陡坡带  $T_0$  构造图Fig.1 Regional  $T_0$  structural map of Northern steep slope zone of Bonan Sag

层以东为孤北次洼。有关渤南洼陷油源分析的研究不少<sup>[11, 12]</sup>, 但都集中在南部缓坡带, 针对北部陡坡带精细油源对比的工作未见。为了明确不同地区原油的油源供给特征, 为下一步勘探提供指导, 共采集了  $E_{s_3}^x$  和  $E_{s_4}^s$  的 6 个原油样品、35 个泥岩岩芯(岩屑)样品和 10 个油砂样品。

## 2 实验方法

先将 200 g 左右泥岩样品粉碎至 100 目, 一小部分进行 Rock-Eval 热解分析和有机碳测定, 剩余样品和油砂使用二氯甲烷通过索氏脂肪抽提器提取 24 h。依据液-固吸附平衡原理对干燥后的抽提物和原油样品进行柱色层分离得到饱和烃、芳烃、非烃与沥青质 4 个族组分, 将饱和烃和芳烃进行 GC-MS 分析。采用 Finnigan 公司 Thermo-Finnigan Trace-DSQ 气相色谱质谱联用仪, 色谱柱为 HP-5MS 弹性石英毛细柱 (60 m × 0.25 mm × 0.25 μm), 色谱-质谱分析条件: 载气为 99.9999% 氦气, 进样口温度为 300℃, 升温程序为初温 50℃ (恒温 1 min), 开始以 20℃/min 升温至 120℃, 以 4℃/min 升温至 250℃, 再以 3℃/min 升温至 310℃, 保持 30min, 载气流速为 1 mL/min, 采用 EI (70eV) 电子轰击方式, 全扫描。使用 MAT251 同位素质谱仪 (IR-MS) 对原油、饱和烃、芳烃、非烃、沥青质的碳同位素分析。

## 3 烃源岩地球化学特征

如表 1 所示, 研究区的三个次洼均具有较强的供

烃能力。西部次洼  $E_{s_3}^x$  暗色泥岩发育, TOC 介于 2.53% ~ 9.18%, 平均值为 4.78%, 有机质类型以  $II_1$  型为主,  $R_o$  在 0.6% 左右, 综合评价为好烃源岩。 $E_{s_4}$  主要为砂砾岩体, 暗色泥岩仅在次洼中央发育, TOC 介于 1.38% ~ 3.08%, 平均值为 2.22%,  $R_o$  在 0.8% 左右。中部次洼与西部次洼类似,  $E_{s_3}^x$  暗色泥岩发育, TOC 介于 2.75% ~ 5.08%, 平均值为 3.84%, 有机质类型以  $II_1$  型为主,  $R_o$  介于 0.71% ~ 0.86%, 综合评价为好烃源岩。 $E_{s_4}$  主要发育砂砾岩体, 暗色泥岩仅在次洼中央发育, TOC 介于 2.81% ~ 3.68%, 平均值为 3.25%,  $R_o$  介于 0.82% ~ 1.18%, 为较好烃源岩。渤南深洼为渤南油田最主要的生油洼陷, 其  $E_{s_3}$  灰色、深灰色泥岩、油页岩组合最大厚度达 1 000 m, TOC 介于 1.28% ~ 5.34%, 平均值为 2.46%,  $R_o$  介于 0.58% ~ 1.21%, 有机质类型以  $II_1$  型为主;  $E_{s_4}$  以暗色泥岩为主的砂泥岩和膏岩沉积, 地层厚度近 1 000 m<sup>[12]</sup>, TOC 介于 0.5% ~ 13.7%, 平均值为 1.64%,  $R_o$  介于 0.74% ~ 2.15%, 有机质类型以  $II_2$  型为主。均为好的生油岩。

如图 2 和图 3 所示, 渤南洼陷  $E_{s_3}^x$  和  $E_{s_4}^s$  烃源岩常规甾萜类化合物分布特征比较相似,  $C_{27}$ 、 $C_{28}$ 、 $C_{29}$  规则甾萜呈“V”或“L”型分布, 说明有机质母源以低等水生生物为主, 但近物源区高等植物输入逐渐增多, 但也存在不同之处, 主要为  $E_{s_4}^s$  烃源岩伽马蜡烷含量较高, 伽马蜡烷指数为 0.05 ~ 0.44, 绝大多数大于 0.1, 沉积水体为半咸水-咸水; 三环萜烷较高, 三环萜烷/五环萜烷为 0.04 ~ 0.98; 4-甲基甾烷/ $C_{29}$  甾烷

介于0.39~3.31,平均值为1.10。 $C_{31}$ 升藿烷22S/(22S+22R)为0.54~0.61, $C_{29}$ 甾烷20S/(20S+20R)为0.19~0.75,平均值为0.43,烃源岩处于中等成熟—高成熟阶段。 $Es_3^x$ 烃源岩伽马蜡烷指数为0.03~0.13,沉积水体为淡水—微咸水;三环萜烷/五环萜烷为0.03~0.2,4-甲基甾烷/ $C_{29}$ 甾烷介于0.51~6.72,平均值为2.24,中部次洼、西部次洼和渤南深洼 $Es_3^x$ 烃源岩的4-甲基甾烷/ $C_{29}$ 甾烷值分别为4.51,2.79,1.27。 $C_{31}$ 升藿烷22S/(22S+22R)为0.53~0.59, $C_{29}$ 甾烷20S/(20S+20R)为0.23~0.61,平均值为0.43,烃源岩处于中等成熟—高成熟阶段。

$Es_4^s$ 比 $Es_3^x$ 烃源岩的成熟度高,但 $Es_3^x$ 烃源岩的4-甲基甾烷含量比 $Es_4^s$ 高,由于4-甲基甾烷可以反映沟鞭藻类低等水生生物的贡献,说明 $Es_3^x$ 烃源岩比 $Es_4^s$ 具有更好的有机质生源。

#### 4 原油地球化学特征

北部陡坡带原油地球化学特征如下:正构烷烃分布较完整,碳数分布范围为 $nC_{11} \sim nC_{34}$ ,呈近似正态型分布,主峰碳数为 $nC_{23}$ , $\sum C_{21}^- / \sum C_{22}^+$ 为1.13~1.56,CPI为1.02~1.07,OEP为1.04~1.09,奇偶

优势不明显;Pr/Ph为1.17~1.55,Pr/ $nC_{17}$ 为0.35~0.62,Ph/ $nC_{18}$ 为0.26~0.48;几乎不含 $\beta$ 胡萝卜素;三环萜烷含量较低,三环萜烷/五环萜烷为0.05~0.17, $C_{20}$ 、 $C_{21}$ 、 $C_{23}$ 三环萜烷分布呈上升型分布;伽马蜡烷指数为0.04~0.07,表明其形成于淡水沉积环

表1 渤南洼陷北部陡坡带 $Es_3^x$ 和 $Es_4^s$ 烃源岩地球化学特征

Table 1 The geochemical characteristics of source rocks in the third and the fourth member of the Shahejie Formation in the study area

| 洼陷   | 层位       | TOC /%    | $S_1 + S_2 /$ (mg/g) | 氯仿沥青 "A" /% | $R_o$ /%  |
|------|----------|-----------|----------------------|-------------|-----------|
| 西部次洼 | $Es_3^x$ | 2.53~9.18 | 7.68~62.43           | 0.32~1.04   | 0.57~0.61 |
|      |          | 4.78(5)   | 23.89(5)             | 0.61(5)     | 0.59(3)   |
| 中部次洼 | $Es_3^x$ | 2.75~5.08 | 7.47~13.84           | 0.43~0.59   | 0.71~0.86 |
|      |          | 3.84(3)   | 9.68(3)              | 0.49(3)     | 0.78(3)   |
| 深洼   | $Es_3^x$ | 1.28~5.34 | 1.71~36.13           | 0.10~0.79   | 0.58~1.21 |
|      |          | 2.46(22)  | 11.83(13)            | 0.46(13)    | 0.85(6)   |
| 西部次洼 | $Es_4^s$ | 1.38~3.08 | 2.30~5.69            | 0.15~0.30   | 0.8       |
|      |          | 2.22(3)   | 3.81(3)              | 0.22(3)     | 0.8(1)    |
| 中部次洼 | $Es_4^s$ | 2.81~3.68 | 1.82~5.52            | 0.10~0.30   | 0.82~1.18 |
|      |          | 3.25(2)   | 3.67(2)              | 0.20(2)     | 1.05(3)   |
| 深洼   | $Es_4^s$ | 0.5~13.7  | 0.3~10.42            | 0.05~0.302  | 0.74~2.15 |
|      |          | 1.64(92)  | 1.76(53)             | 0.10(16)    | 1.23(14)  |

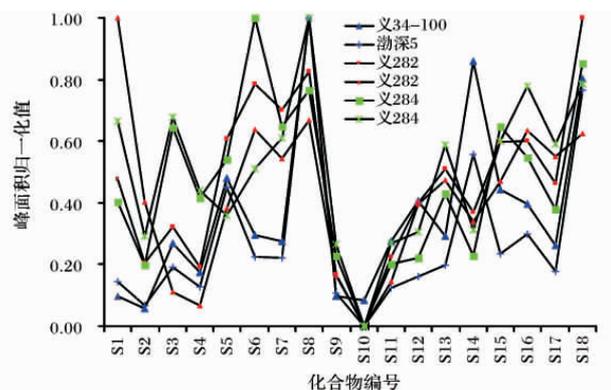
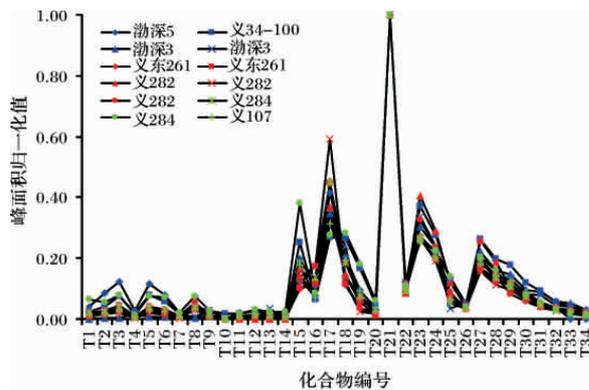


图2 研究区 $Es_3^x$ 烃源岩抽提物甾萜烷烃指纹化合物分布

化合物代号: 萜烷 T1.  $C_{19}$ 三环萜烷; T2.  $C_{20}$ 三环萜烷; T3.  $C_{21}$ 三环萜烷; T4.  $C_{22}$ 三环萜烷; T5.  $C_{23}$ 三环萜烷; T6.  $C_{24}$ 三环萜烷; T7.  $C_{25}$ 三环萜烷; T8.  $C_{24}$ 四环萜烷; T9.  $C_{26}$ 三环萜烷; T10.  $C_{26}$ 三环萜烷; T11.  $C_{28}$ 三环萜烷; T12.  $C_{28}$ 三环萜烷; T13.  $C_{29}$ 三环萜烷; T14.  $C_{29}$ 三环萜烷; T15. Ts; T16. Tm; T17.  $C_{29}$ 降藿烷; T18.  $C_{29}$ Ts; T19. 重排藿烷; T20.  $C_{29}$ 降莫烷; T21.  $C_{30}$ 藿烷; T22.  $C_{30}$ 莫烷; T23.  $C_{31}$ 升藿烷(22S); T24.  $C_{31}$ 升藿烷(22R); T25. 伽马蜡烷; T26. 升莫烷(20R); T27.  $C_{32}$ 升藿烷(22S); T28.  $C_{32}$ 升藿烷(22R); T29.  $C_{33}$ 升藿烷(22S); T30.  $C_{33}$ 升藿烷(22R); T31.  $C_{34}$ 升藿烷(22S); T32.  $C_{34}$ 升藿烷(22R); T33.  $C_{35}$ 升藿烷(22S); T34.  $C_{35}$ 升藿烷(22R). 甾烷 S1. 孕甾烷; S2. 升孕甾烷; S3.  $5\alpha,13\beta,17\alpha$ -重排甾烷(20S); S4.  $5\alpha,13\beta,17\alpha$ -重排甾烷(20R); S5.  $5\alpha,14\alpha,17\alpha$ -甾烷(20S) + 24-M-13 $\alpha,17\beta$ -重排甾烷(20S); S6.  $5\alpha,14\beta,17\beta$ -甾烷(20R) + 24-E-13 $\beta,17\alpha$ -重排甾烷(20S); S7.  $5\alpha,14\beta,17\beta$ -甾烷(20S) + 24-M-13 $\alpha,17\beta$ -重排甾烷(20R); S8.  $5\alpha,14\alpha,17\alpha$ -甾烷(20R); S9. 24-E-13 $\beta,17\alpha$ -重排甾烷(20R); S10. 24-E-13 $\beta,17\beta$ -重排甾烷(20S); S11. 24-M-5 $\alpha,14\alpha,17\alpha$ -甾烷(20S); S12. 24-M-5 $\alpha,14\beta,17\beta$ -甾烷(20R) + 24-E-13 $\alpha,17\beta$ -重排甾烷(20R); S13. 24-M-5 $\alpha,14\beta,17\beta$ -甾烷(20S); S14. 24-M-5 $\alpha,14\alpha,17\alpha$ -甾烷(20R); S15. 24-E-5 $\alpha,14\alpha,17\alpha$ -甾烷(20S); S16. 24-E-5 $\alpha,14\beta,17\beta$ -甾烷(20R); S17. 24-E-5 $\alpha,14\beta,17\beta$ -甾烷(20S); S18. 24-E-5 $\alpha,14\alpha,17\alpha$ -甾烷(20R).

Fig. 2 The fingerprint showing the distribution of steranes and terpanes in extracts of mudstones in the third member of Shahejie Formation in the study area

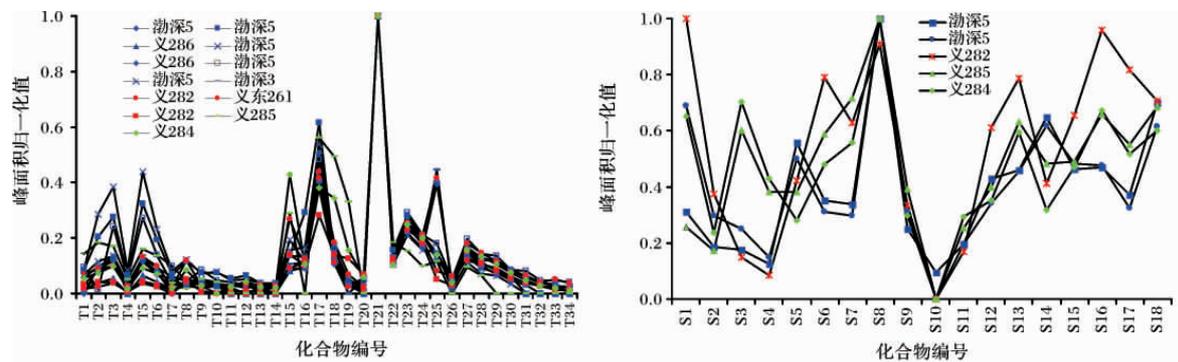


图3 研究区  $E_{s_4}^x$  烃源岩抽提物甾萜烷烃指纹化合物分布

Fig.3 The fingerprint showing the distribution of steranes and terpanes in extracts of mudstones in the fourth member of Shahejie Formation in the study area

境; 规则甾烷中  $\alpha\alpha\alpha 20R_{C_{27}}$ 、 $C_{28}$ 、 $C_{29}$  甾烷呈不对称“V”形分布,  $\alpha\alpha\alpha 20R_{C_{27}}$  相对含量最高,  $\alpha\alpha\alpha 20R$  甾烷  $C_{27}/C_{29}$  为 1.20 ~ 1.48, 说明有机质母源以低等水生生物为主, 同时存在高等植物的贡献; 重排甾烷含量较高, 重排甾烷/规则甾烷为 0.13 ~ 0.23, 其中西部地区原油重排甾烷/规则甾烷为 0.12 ~ 0.13, 中东部地区原油介于 0.20 ~ 0.23; 孕甾烷含量不高, (孕甾烷 + 升孕甾烷)/规则甾烷为 0.07 ~ 0.12; 4-甲基甾烷/ $C_{29}$  甾烷介于 1.89 ~ 3.27, 平均值为 2.45;  $C_{29}$  甾烷  $\alpha\alpha\alpha 20S/(20S + 20R)$  为 0.41 ~ 0.44,  $C_{31}$  升藿烷  $22S/(22S + 22R)$  达 0.57 ~ 0.58,  $Ts/(Ts + Tm)$  为 0.52 ~ 0.66, MPII 为 0.50 ~ 0.80,  $C_{28}$ -三芳甾  $20S/(20S + 20R)$  为 0.54 ~ 0.60, 表明原油处于中等成熟阶段;  $C_{26}$ -三芳甾烷 ( $20S$ )/ $C_{28}$ -三芳甾烷 ( $20S$ ) 为 0.41 ~ 0.52, 说明为淡水沉积环境。

不同地区原油常规甾萜类生物标志物特征非常相似(图4), 成熟度区别也不大。主要区别在于4-甲基甾烷含量的不同, 从北部陡坡带中部、西部到东部

地区, 原油中4-甲基甾烷含量依次降低(图5)。碳同位素特征也有所差别, 北部陡坡带中部原油比东部原油碳同位素组分偏轻(图6), 与4-甲基甾烷含量分布特征正好相反。

### 5 油源分析

#### 5.1 原油与 $E_{s_3}^x$ 、 $E_{s_4}^x$ 烃源岩的对比

油源对比表明, 渤南洼陷北部陡坡带原油与  $E_{s_3}^x$  烃源岩具有相似的饱和烃生物标志物特征, 主要表现为三环萜烷、伽马蜡烷含量较低, 4-甲基甾烷含量较高(图7); 原油成熟度偏低, 这些特征与沙四段烃源岩均存在较大的差别。因此综合分析判断, 渤南洼陷北部陡坡带原油(油砂)来源于  $E_{s_3}^x$  烃源岩。但北部陡坡带不同地区的原油地球化学特征存在一定的差别, 表明其油源不同。

#### 5.2 不同地区原油油源分析

北部陡坡带原油常规饱和烃生物标志物分布特征非常相似, 显示其似乎来源于同一烃源岩。但经过

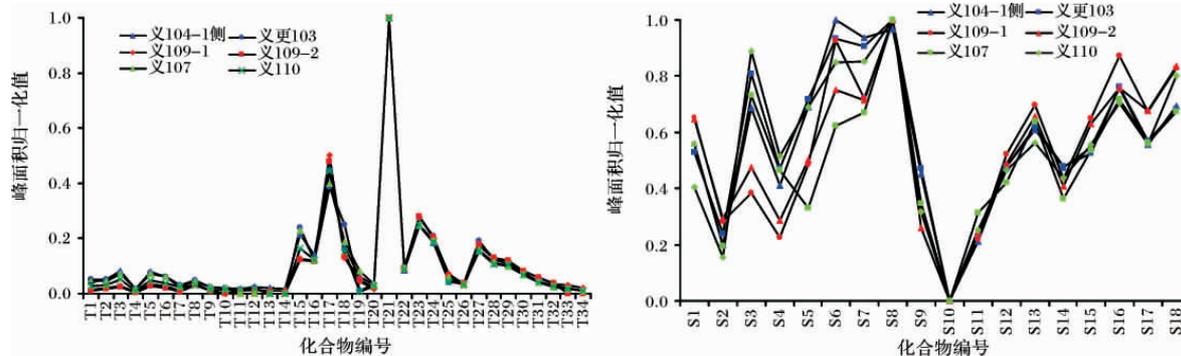


图4 研究区沙三段和沙四段原油分离物甾萜烷烃指纹化合物分布

Fig.4 The fingerprint showing the distribution of steranes and terpanes in crude oils of the fourth member of the Shahejie Formation in the study area

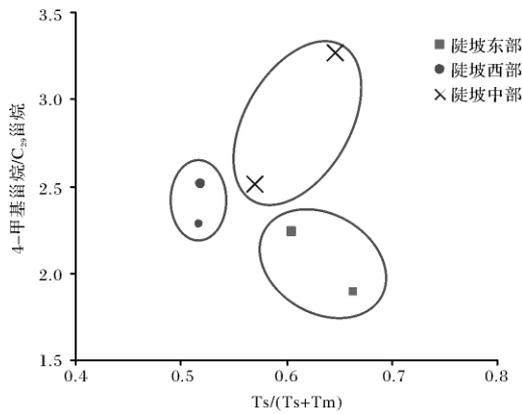


图5 北部陡坡带不同地区原油4-甲基甾烷分布特征  
Fig.5 4-methyl steranes distribution characteristics of crude oils in different area

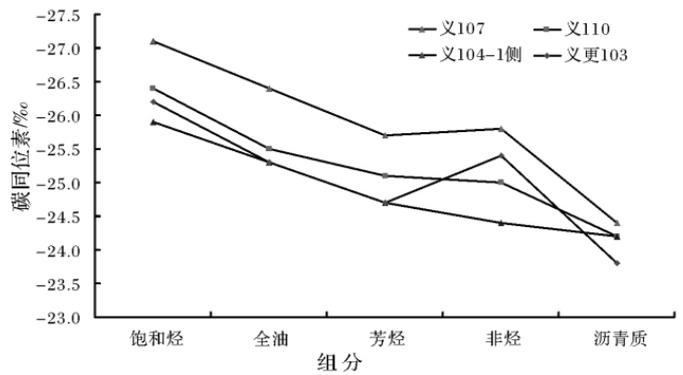


图6 北部陡坡带不同地区原油碳同位素分布特征  
Fig.6 Carbon isotope distribution characteristics of crude oils in different area

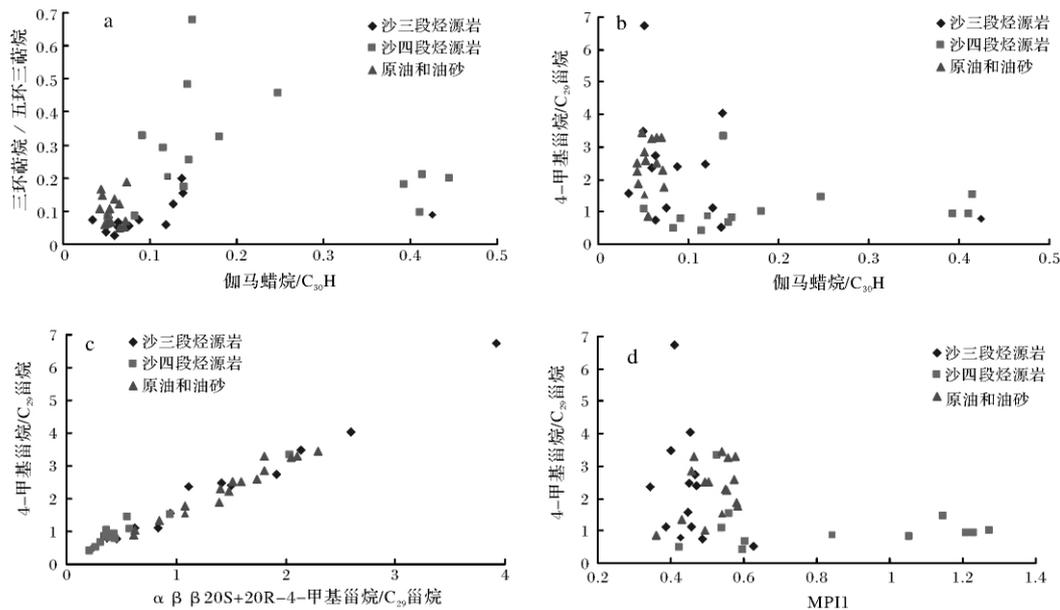


图7 渤南洼陷北部陡坡带原油与 Es<sub>3</sub><sup>x</sup> 和 Es<sub>4</sub><sup>s</sup> 烃源岩部分生物标志物参数分布特征对比  
Fig.7 Partial biomarker parameters comparison between crude oils and Es<sub>3</sub><sup>x</sup> and Es<sub>4</sub><sup>s</sup> source rocks in Northern steep slope zone of Bonan sag

4-甲基甾烷精细对比后发现,三个地区的原油存在一定差别,同时三个次洼的烃源岩也存在类似的区别,但不同地区原油与对应次洼的烃源岩特征非常相似(图8~图11)。陡坡带西部原油的 $\alpha\beta\beta 20S$ -4-甲基甾烷相对含量最高, $\alpha\alpha\alpha 20R$ -4-甲基甾烷相对含量最低,西部次洼沙三段烃源岩也具有这一特征。陡坡带中部原油 $\alpha\beta\beta 20R$ -4-甲基甾烷相对含量最高, $\alpha\alpha\alpha 20R$ -4-甲基甾烷相对含量最低,中部次洼的烃源岩具有相似特征。陡坡带东部原油不同构型甲基甾烷分布特征与中部原油类似,区别在于其 $\alpha\beta\beta 20R$ -4-

甲基甾烷相对含量较中部高,与渤南深洼烃源岩特征相似。孤北洼陷义155井的4-甲基甾烷中 $\alpha\beta\beta 20S$ -甲基甾烷相对含量最高, $\alpha\beta\beta 20R$ -4-甲基甾烷相对含量最低,与义更103井和义104-1侧原油4-甲基甾烷分布特征差别明显,即排除了孤北洼陷对陡坡带东部的油源贡献。

不同地区原油(油砂)的4-甲基甾烷除了构型有差别外,其含量也不同。中部地区原油(油砂)的4-甲基甾烷/ $C_{29}$ 甾烷值最高,介于1.77~2.46,平均值为2.81;中部次洼Es<sub>3</sub><sup>x</sup>烃源岩也具有类似特征,4-甲

基甾烷/ $C_{29}$ 甾烷介于 2.75 ~ 6.72, 平均值为 4.51。东部地区原油(油砂)的 4-甲基甾烷/ $C_{29}$ 甾烷值最低, 介于 1.33 ~ 2.23, 平均值为 1.75; 渤南深洼  $E_{s_3^x}$  烃源岩也具有相似特征 4-甲基甾烷/ $C_{29}$ 甾烷介于 0.51 ~ 2.38, 平均值为 1.27。西部地区原油(油砂)的 4-甲基甾烷/ $C_{29}$ 甾烷值介于前两者之间, 为 0.88 ~ 3.3, 平均值为 2.14, 西部次洼的烃源岩与其特征相似 4-甲基甾烷/ $C_{29}$ 甾烷介于 0.76 ~ 3.48, 平均值为 2.79。

研究区油样中富含 4-甲基甾烷是判识其源自

$E_{s_3^x}$  烃源岩的重要指标, 不同次洼  $E_{s_3^x}$  烃源岩中 4-甲基甾烷的丰度含量不同, 是由于烃源岩中沟鞭藻有机质占总有机质的比例不同所造成。依据 4-甲基甾烷含量和不同构型化合物的分布特征分析表明, 北部陡坡带油气均为近源成藏, 主要来源于其临近次洼的  $E_{s_3^x}$  烃源岩, 即陡坡带西部原油主要来源于西部次洼  $E_{s_3^x}$  烃源岩; 陡坡带中部原油主要来源于中部次洼  $E_{s_3^x}$  烃源岩; 陡坡带东部原油主要来源于渤南深洼带  $E_{s_3^x}$  烃源岩, 孤北次洼对其没有油源贡献。

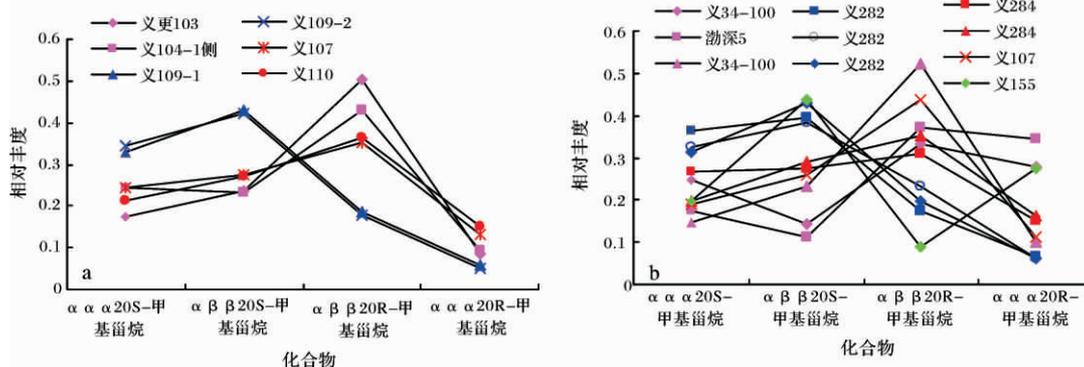


图8 原油(a)与  $E_{s_3^x}$  烃源岩(b)不同构型 4-甲基甾烷分布特征

Fig. 8 Distribution characteristics of 4-methyl steranes isomers in crude oils (a) and  $E_{s_3^x}$  source rocks (b)

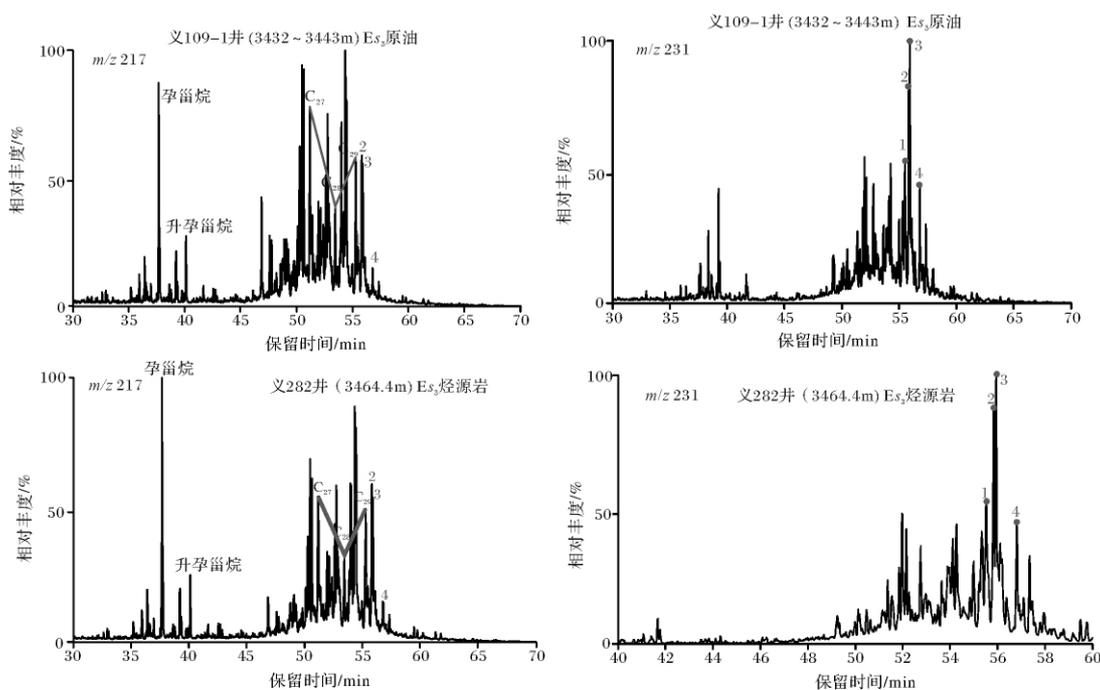


图9 西部地区原油与西部次洼沙三段烃源岩 4-甲基甾烷对比图

注: 1.  $\alpha\alpha\alpha$ (20S)  $C_{30}$ -4-甲基甾烷; 2.  $\alpha\beta\beta$ (20S)  $C_{30}$ -4-甲基甾烷; 3.  $\alpha\beta\beta$ (20R)  $C_{30}$ -4-甲基甾烷; 4.  $\alpha\alpha\alpha$ (20R)  $C_{30}$ -4-甲基甾烷。

Fig. 9 Correlation of 4-methyl steranes between crude oils from western zone and source rocks in the third member of Shahejie Formation from the west sag

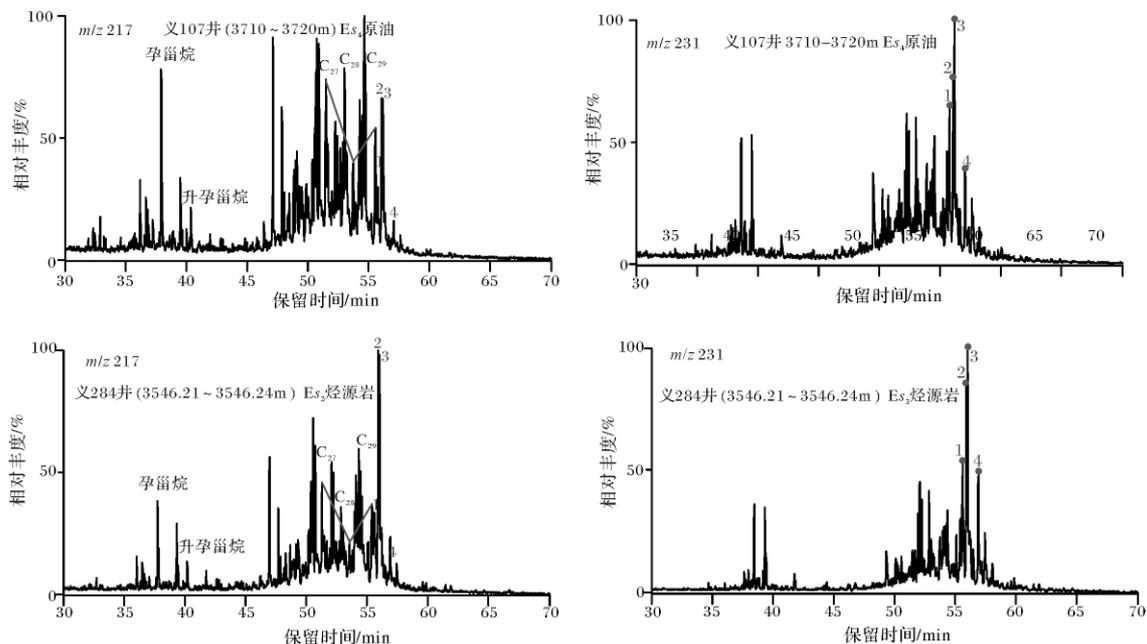


图10 中部地区原油与中部次洼沙三段烃源岩4-甲基甾烷对比图

Fig. 10 Correlation of 4-methyl steranes between crude oils from the middle zone and source rocks in the third member of Shahejie Formation from the middle sag

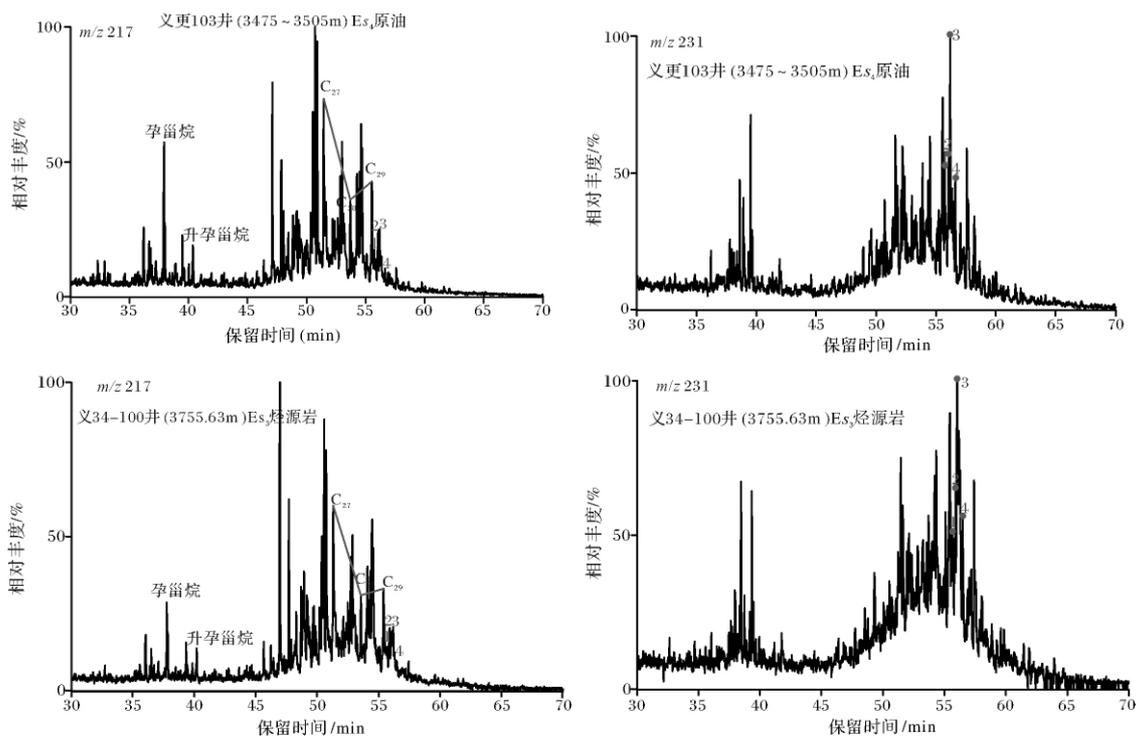


图11 东部地区原油与渤南深洼沙三段烃源岩4-甲基甾烷对比图

Fig. 11 Correlation of 4-methyl steranes between crude oils from the eastern zone and source rocks in the third member of Shahejie Formation from the Bonan deep sag

## 6 结论

(1) 渤南洼陷发育  $E_{s_4}^s$  和  $E_{s_3}^x$  两套主力烃源岩,  $E_{s_4}^s$  有机质形成于半咸水—咸水还原环境,  $E_{s_3}^x$  烃源岩有机质形成于淡水—微咸水还原环境, 有机质母源都以低等水生生物为主, 但近物源区高等植物输入逐渐增多。  $E_{s_3}^x$  烃源岩 4-甲基甾烷含量比  $E_{s_4}^s$  要高, 说明  $E_{s_3}^x$  烃源岩比  $E_{s_4}^s$  具有更好的有机质生源。中部次洼、西部次洼和渤南深洼  $E_{s_3}^x$  烃源岩的 4-甲基甾烷/ $C_{29}$  甾烷值分别为 4.51、2.79、1.27, 是由烃源岩中沟鞭藻有机质占总有机质的比例不同所造成。

(2) 不同地区原油  $C_{20}$ 、 $C_{21}$ 、 $C_{23}$  三环萜烷和  $\alpha\alpha\alpha$ -20RC<sub>27</sub>、 $C_{28}$ 、 $C_{29}$  规则甾烷等特征非常相似, 成熟度相当, 中、西、东三个地区原油的 4-甲基甾烷/ $C_{29}$  甾烷值分别为 2.89、2.39 和 2.06, 依次降低, 原油的碳同位素特征与之相反, 4-甲基甾烷的构型也不同。

(3) 依据烃源岩和原油中 4-甲基甾烷含量和不同构型 4-甲基甾烷的分布特征进行油源对比, 为类似地区的油源分析提供了一种新思路。研究结果表明, 北部陡坡带  $E_{s_3}^x$  和  $E_{s_4}^s$  油气均为近源成藏, 主要来源于其临近次洼的  $E_{s_3}^x$  烃源岩。

### 参考文献 (References)

- Dahl J, Moldovan J M, Summons R G, *et al.* Extended 3 $\beta$ -alkyl steranes and 3-alkyl triaromatic steroids in crude oils and rock extracts[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(18): 3717-3729
- 傅家谟, 徐芬芳, 陈德玉, 等. 茂名油页岩中生物输入的生物标志化合物[J]. *地球化学*, 1985, 14(2): 99-114 [Fu Jiamo, Xu Fenfang, Chen Deyu, *et al.* Biomarker compounds of biological inputs in Maoming oil shale[J]. *Geochimica*, 1985, 14(2): 99-114]
- 黄第藩, 张大江, 李晋超. 论 4-甲基甾烷和孕甾烷的成因[J]. *石油勘探与开发*, 1989, 16(3): 8-15 [Huang Difan, Zhang Dajiang, Li Jinchao. On origin of 4-methylsterane and pregnane[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1989, 16(3): 8-15]
- Boon J J, Rijipstra W I C, Lange F, *et al.* Black Sea sterol: A molecular fossil for dinoflagellate blooms[J]. *Nature*, 1979, 277: 125-127
- Brassell S C, Eglinton G, Mo F J. Biological marker compounds as indicators of depositional history of the Maoming oil shale[J]. *Organic Geochemistry*, 1986, 10: 927-941
- Fu Jiamo, Sheng Guoying, Xu Jiayou, *et al.* Application of biological markers in the assessment of paleoenvironments of Chinese non-marine sediments[J]. *Organic Geochemistry*, 1990, 16: 769-779
- 姚益民, 梁鸿德, 蔡治国, 等. 中国油气区第三纪(IV)—渤海湾盆地油气区分册[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994 [Yao Yimin, Liang Hongde, Cai Ziguang, *et al.* Tertiary of China Oil and Gas Region (IV)—Fascicule of Bohai Bay Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994]
- 梅玲, 张枝焕, 王旭东, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷原油地球化学特征及油源对比[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2008, 32(6): 40-46 [Meiling, Zhang zhi-huan, and Wang xu-dong *et al.* Geochemical characteristics of crude oil and oil-source correlation in Nanpu sag, Bohai Bay Basin[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2008, 32(6): 40-46]
- 杨子成, 张金亮. 东营凹陷南斜坡原油生物标志物特征和油源对比[J]. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2008, 38(3): 453-460 [Yang Zicheng, Zhang Jinliang. Biomarkers of crude oils and oil-source correlation in the south slope of the Dongying Depression[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2008, 38(3): 453-460]
- 任拥军, 卢宁宁, 邱隆伟. 大王北洼陷精细油源对比[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2010, 40(4): 921-931 [Ren Yongjun, Lu Ningning, Qiu Longwei. Oil-source rock correlation in Dawangbei Sag[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2010, 40(4): 921-931]
- 刘士林, 李原, 郭利果, 等. 渤南洼陷沙三段原油地球化学特征及油源对比[J]. *大庆石油地质与开发*, 2006, 25(4): 1-3 [Liu Shilin, Li Yuan, Guo Liguang, *et al.* Geochemical feature and oil source correlation of Sha3 Member in Bonan Sag[J]. *Petroleum Geology & Development in Daqing*, 2006, 25(4): 1-3]
- 张枝焕, 曾艳涛, 张学才. 山东沾化凹陷渤南洼陷沙四段原油的地球化学特征及油源分析[J]. *现代地质*, 2004, 18(4): 578-585 [Zhang Zhihuan, Zeng Yantao, Zhang Xuecai. The geochemical characteristics and source analysis of crude oil from the fourth member of Shahejie Formation in Bonan sub-sag, Zhanhua sag[J]. *Geoscience*, 2004, 18(4): 578-585]

## Application of 4-Methyl Steranes in Oil-Source Correlation:

A case study from northern steep slope zone of Bonan Sag

ZAN Ling<sup>1</sup> ZHANG Zhi-huan<sup>2</sup> WANG Shun-hua<sup>3</sup> XING Hui<sup>2</sup>  
LI Wen-hao<sup>2</sup> LIU Yi-nan<sup>4</sup> XI Wei-jun<sup>5</sup>

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development of East China Company of Sinopec, Nanjing 210011;

2. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249;

3. Petroleum Development Center of Shengli Oilfield, Sinopec, Dongyin, Shandong 257000;

4. Geology Department of Northwestern University, Xi'an 710049;

5. Xinjiang Exploration & Development Center of Shengli Oilfield Sinopec, Dongyin Shandong 257000)

**Abstract:** Because of the similar paleoclimate and palosedimentary environment, regular biomarkers and isotope distinction of the source rocks and generated petroleum in the sub-sag belong to the same sag is tiny, which bring difficulties to oil-source correlation. By extracting molecular fossils information using GC-MS technology, according to the relative content of 4-methyl steranes and distribution characteristics of 4-methyl steranes isomers, oil-source correlation work are performed, which provides a new method for oil-source correlation in similar area.  $Es_4^s$  and  $Es_3^x$  two sets of source rocks are developed in the study area, they are characterized by high organic matter abundance, mature to over mature thermal evolution degrees. Organic matter of  $Es_4^s$  are formed in brackish-saline water with reductive environment, organic matter of  $Es_3^x$  are formed in fresh-saline water with reductive environment, organic matter input of both source rocks are dominated by lower aquatic organisms and terrigenous higher plants, while terrigenous higher plants are more abundant near provenance. Relative content of 4-methyl steranes of  $Es_3^x$  source rocks is higher than that of  $Es_4^s$  source rocks, indicating the better organic matter input of  $Es_3^x$  source rocks. The value of 4-methyl steranes/ $C_{29}$  steranes of  $Es_3^x$  source rocks in the middle, west and deep sub-sag is 4.51, 2.79 and 1.27, respectively, which is caused by the different proportion of dinophyceae in total organic matter. The distribution characteristics of  $C_{20}$ ,  $C_{21}$ ,  $C_{23}$  tricyclic terpanes and  $\alpha\alpha\alpha 20RC_{27}$ ,  $C_{28}$ ,  $C_{29}$  regular steranes of oils with alike maturity in different region is quite similar, 4-methyl steranes/ $C_{29}$  steranes value of crude oils in the middle, west and east region is 2.89, 2.39, 2.06, respectively, which make a big difference, while the carbon isotope characteristics of crude oils are opposite, distribution characteristics of 4-methyl steranes isomers of each region is also different. Oil-source correlation demonstrate that  $Es_4^s$  and  $Es_3^x$  crude oils of northern steep slope zone mainly originate from  $Es_3^x$  source rocks in nearby sag, crude oils of the western zone are provided by  $Es_3^x$  source rocks of the western sag, crude oils of the middle zone are provided by  $Es_3^x$  source rocks of the middle sag, crude oils of the eastern zone are provided by  $Es_3^x$  source rocks of deep sag in the eastern zone, and no contribution from source rocks of the Gubei Sag.

Key words: 4-methyl sterane; Bonan sag; northern steep slope zone; biomarker; oil-source correlation