

文章编号: 0253-9985(2005)04-0512-06

溱潼凹陷低熟油生物标志物特征及成熟度浅析

胡 瑛, 张枝焕, 方朝合

(石油天然气成藏机理教育部重点实验室, 北京 102200)

摘要: 溱潼凹陷低熟油分布于外斜坡的殷庄油田殷 2 井戴南组一段和苏 183 井泰州组一段、坡垒带茅山油田苏 168 井的阜宁组三段、断阶带的角墩子油田苏 228 井的戴南组一段和草舍油田苏 120 井的三垛组一段, 具有高含蜡量、低含硫量、运动粘度和密度变化大的特点。该凹陷低熟油判别指标 $\alpha\alpha\alpha\text{C}_{29}$ 甾烷 $20\text{S}/(20\text{S}+20\text{R})$ 和 C_{29} 甾烷 $\alpha\beta\beta/(\alpha\alpha\alpha+\alpha\beta\beta)$ 值分别为 0.31 和 0.29。生物标志物甾烷异构化参数 $\alpha\alpha\alpha\text{C}_{29}$ 甾烷 $20\text{S}/(20\text{S}+20\text{R})$ 为 0.23~0.29, C_{29} 甾烷 $\alpha\beta\beta/(\alpha\alpha\alpha+\alpha\beta\beta)$ 为 0.24~0.28, 重排甾烷含量很低。同时还检测到多种不稳定的生物标志物, 包括 $5\beta(\text{H})$ -粪甾烷系列, 胡萝卜烷系列、脱羧基维生素 E 系列等。而较低的伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷分布指数、小于 0.5% 的含硫量以及四环三萜烷中 $\text{C}_{30}\sim\text{C}_{31}$ 羊毛甾烷的检出, 充分反映源岩沉积于微咸-半咸水的沉积环境和母岩成熟度较低这一事实。

关键词: 低熟油; 羊毛甾烷; 异构化参数; 溱潼凹陷

中图分类号: TE112.11 **文献标识码:** A

Biomarker features of low-mature oil in Qintong sag and maturity analysis

Hu Ying, Zhang Zhihuan, Fang Chaohe

(Key Laboratory for Hydrocarbon Accumulation, Ministry of Education, Beijing)

Abstract In Qintong sag, low-mature oil occurs in several wells and intervals, including the Ed_1 of Y in 2 well and the Et_1 of Su 168 well in Yinzhuang oilfield located in the outer slope zone, the Ef_3 of Su 168 well in Mao-shan oilfield located in the fault horst zone, and the Ed_1 of Su 228 well in Jiaodunzi oilfield and the Es_1 of Su 120 well in Caoshe oilfield located in the fault bench zone. The low-mature oil is characterized by high wax content, low sulfur content, low kinematic viscosity and large variation of density. The values of $\alpha\alpha\alpha\text{C}_{29}$ sterane's $20\text{S}/(20\text{S}+20\text{R})$ and C_{29} sterane's $\alpha\beta\beta/(\alpha\alpha\alpha+\alpha\beta\beta)$, the diagnostic indexes for low-mature oil in this sag, are 0.31 and 0.29, respectively. The biomarkers sterane isomerization parameters $\alpha\alpha\alpha\text{C}_{29}$ sterane's $20\text{S}/(20\text{S}+20\text{R})$ is in the range of 0.23–0.29 and C_{29} sterane's $\alpha\beta\beta/(\alpha\alpha\alpha+\alpha\beta\beta)$ is in the range of 0.24–0.28, the content of rearranged sterane is very low. At the same time, several unstable biomarkers, including $5\beta(\text{H})$ -coprosterane, carotane I and dehydroxyl vitamin-E families, are also detected. The observations that the source rocks were deposited in mildly brackish to brackish water and the low maturity of source rocks are well evidenced by the relatively low gammacerane/ C_{30} hopane ratio, sulfur content less than 0.5% and the existence of $\text{C}_{30}\sim\text{C}_{31}$ lanostane in tetracyclic triterpane.

Key words Qintong sag; low-mature oil; lanostane; isomerization parameter

苏北盆地中生代断陷湖盆十分发育, 属低成熟原油, 具有“小而贫”的油气分布特征^[1~3], 这在我国东部第三系断陷盆地中具有普遍意义,

由此也确立了低熟油资源在苏北盆地的重要地位^{*}。溱潼凹陷是一位于苏北盆地东台拗陷中部北东东走向的负向单元, 呈现出南断北超、南陡北

基金项目: 中国石油天然气集团公司“九·五”重点科技攻关项目 (970211)

第一作者简介: 胡瑛, 女, 32 岁, 博士, 有机地球化学

收稿日期: 2005-08-09

缓、南深北浅的典型的箕状凹陷的特征^[4]。该断陷发育在多构造体系的中生界、古生界基底构造层之上,深凹部位受同生断裂带的制约,自南向北划分为断阶带、深凹带、斜坡带 3 个构造带。油气勘探实践证明,断陷深凹为成油中心,深凹带周围则是油气的主要富集区。目前溱潼凹陷所发现的部分原油显示出低熟油特征。

1 样品与实验

分析样品分别取自漆潼凹陷断阶带的祝庄、洲城、陶思庄和储家楼油田以及斜坡带的戴南、边城、茅山和殷庄等油田(图 1); 而烺源岩样品主要取自各油田的阜宁组 and 泰州组。

原油的氯仿抽提物采用常规柱色谱分离,分

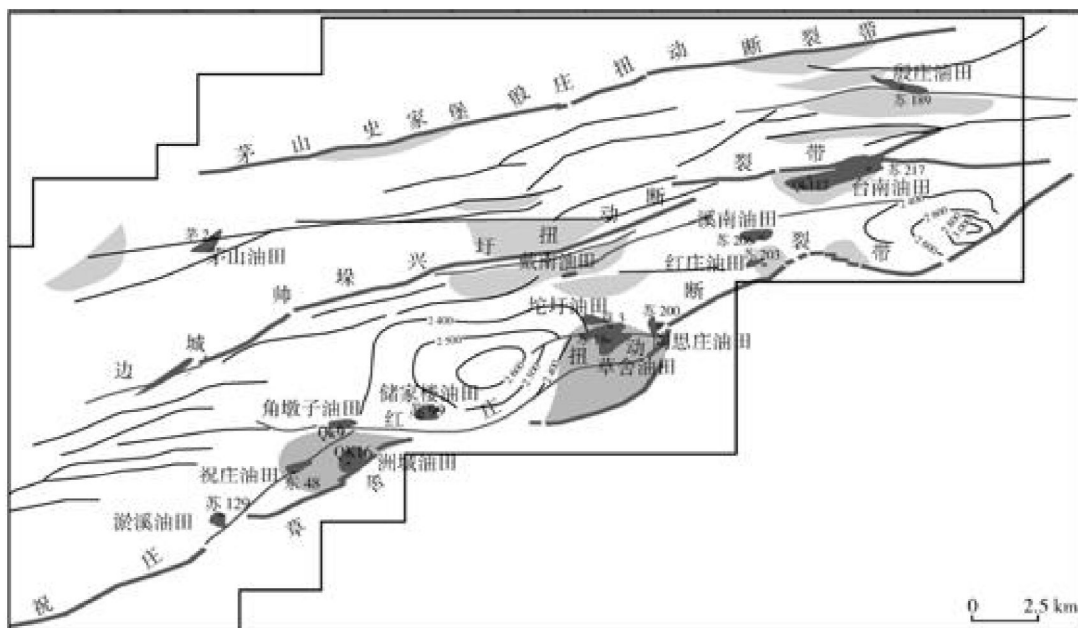


图 1 漆潼凹陷油田分布图

Fig. 1 Locations of oilfields in Qintong sag

烷 20S/(20S + 20R) 比值为 0.25 ~ 0.42^[56];
“九·五”攻关成果所确认的低熟油判别标准
αααC₂₉ 离前加入 D₄-C₂₉ 甾烷、D₈-二苯并噻吩
标样。在岛津 GC-17A 型色谱仪和菲尼根
MATTSQ-45 型 GC/MS 系统上进行饱和烃色谱
及饱和烃、芳烃色谱-质谱绝对定量分析。色谱
条件: SE-54 弹性熔硅毛细管柱 (25 m × 0.25
mm), 以 4 °C /m in 升温速率自 100 °C 升至 300 °C,
载气为氦气。色谱-质谱条件: 采用 SE-54 弹性
熔硅毛细管柱 (25 m × 0.25 mm), 载气为氦气;
升温程序: 以 4 °C /m in 的速率由 100 °C 升至 220
°C; 再从 220 °C 以 2 °C /m in 升温到 300 °C。质谱
电离能量 70 eV。

2 结果与讨论

2.1 原油的物理性质

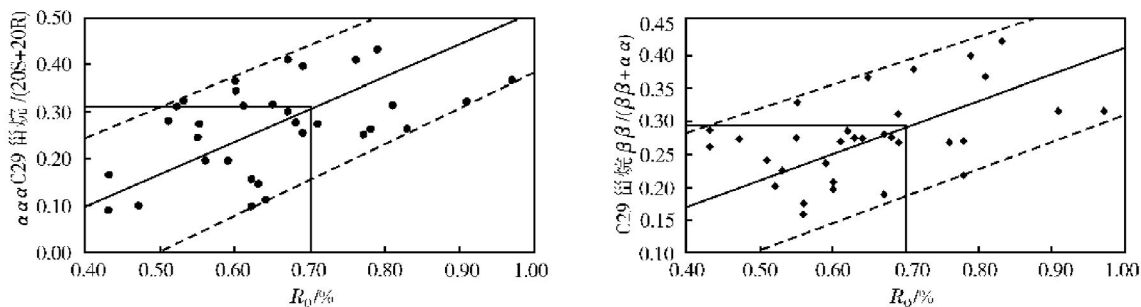
漆潼凹陷原油主要产自下第三系三垛组一段

(E_s^1)、戴南组一段(E_d^1)和阜宁组三段(E_f^3)。不同产层、不同含油构造带的原油均具有高含蜡量(19.0%~39.5%)、低含硫量(小于0.5%)、运动粘度(10.94~769.45 mm²/s)和密度(0.839 4~0.930 8 g/cm³)变化大的特点。从含硫情况来看,反映出源岩沉积于微咸水环境^[6]。

2.2 成熟度界限划分

通常烃源岩中可溶有机质成熟度是以其镜质体反射率 (R_o) 小于 0.7% 来界定的, R_o 时为低熟油。另外, C_{29} 甾烷异构化参数 $\alpha\alpha C_{29}$ 甾烷 $20S/(20S+20R)$ 与 C_{29} 甾烷 $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 是定量判识原油成熟度的有效指标, 但由于不同地区的实际地质条件的不同, 研究者们提出的判识指标及其界限值具有一定的差异。廖前进等通过对 8 个盆地原油的研究认为, 低熟油 $\alpha\alpha C_{29}$ 甾烷 $20S/(20S+20R)$ 比值为 $0.25 \sim 0.42^{[56]}$; “九·五”攻关成果所确认的低熟油判别标准

* 钱基, 刘东鹰, 王文军. 江苏下扬子江地区第二次油气资源评价, 1994

图 2 烃源岩有机质演化化学指标与 R_o 关系图Fig. 2 Geochemical indicators of organic matter evolution in source rocks vs R_o

$\alpha\alpha\alpha C_{29}/(20S+20R)$ 与 $C_{29}/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 的值分别小于 0.3 和 0.32。王铁冠研究^[7]发现低熟油的两项 C_{29} 甾烷参数值均小于 0.4^[7]。针对溱潼凹陷的低熟烃源岩而言,在当 R_o 等于 0.7% 时,所对应的 $\alpha\alpha\alpha C_{29}/(20S+20R)$ 和 $C_{29}/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 值分别为 0.31 和 0.29。由此划分出了该凹陷的低熟油范围分别为:外斜坡的殷庄油田殷 2 井 E_d^1 段和苏 183 井泰川组一段 (E_t^1)、坡垒带茅山油田的苏 168 井的 E_f^3 段,以及断阶带的角墩子油田苏 228 井 E_d^1 段和草舍油田苏 120 井 E_s^1 段(图 2 图 3)。

由于甲基菲指数 MP_{II} 和 MP_{I2} 值为 0.24~0.64 (表 1),按照 Radke 的换算公式^[8],换算的 R_o 为 0.54%~0.65%,因此对于上述所判断出的断阶带和斜坡带的原油来说,充分显示出其低成熟的特征。

2.3 生物标志物

2.3.1 族组成

溱潼凹陷低熟油饱和烃含量偏高 (50%~

65%),极性组分“非烃+沥青质”含量较低 (15%~35%) (表 2)。由于“非烃+沥青质”含量与 C_{29} 甾烷 $20S/(20S+20R)$ 参数之间存在负相关,因而它可作为成熟度的又一判识参数,一般界定低熟

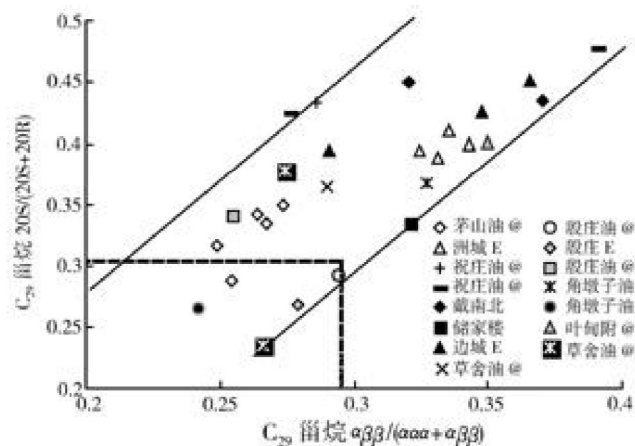


图 3 原油 (油砂) 成熟度判识

Fig. 3 Discrimination of maturity of crude oil and/or oil sand

表 1 溱潼凹陷部分原油基本地球化学参数

Table 1 Basic geochemical parameters of some crude oil samples in Qintong sag

油田	井号	层位	$\alpha\alpha\alpha C_{29}$ S/(S+R)	$C_{29}\beta\beta /$ ($\alpha\alpha + \beta\beta$)	C_{31} / S (S+R)	伽马蜡 烷 / C_{30} 藿烷	$\alpha\alpha\alpha 20$ RC_{28} / C_{29}	$\alpha\alpha\alpha 20$ RC_{27} / C_{29}	$C_{19} + C_{20}$ 三环藿烷 / CPI	OEP	Pr/Ph	MP_I	MP_{II}	
角墩子	苏 228	Ed^1	0.26	0.24	0.56	0.37	0.77	0.84	0.02	1.13	1.10	0.47	0.33	0.37
草舍	苏 120	Es^1	0.23	0.26	0.54	0.51	0.79	0.83	0.05	1.12	1.09	0.77	0.24	0.28
祝庄	祝 2	Ef^3	0.48	0.39	0.59	0.27	0.68	0.70	0.08	1.06	0.97	0.61	0.87	0.95
草舍侧	苏 130	Ed^1 2	0.46	0.41	0.59	0.18	0.78	0.57	0.07	1.05	1.00	0.74	0.36	0.38
洲城	溱开 5	Es^1 4, 2-7	0.39	0.33	0.59	0.43	0.69	0.73	0.11	1.06	0.94	0.50	0.61	0.67
戴南	北	Ef^3	0.44	0.37	0.59	0.23	0.64	0.59	0.06	1.06	0.97	0.68	1.06	1.09
边城	北 2	Ef^3	0.43	0.35	0.59	0.24	0.67	0.67	0.07	1.08	0.96	0.64	1.07	1.08
茅山	苏 168	Ef^3	0.29	0.25	0.56	0.48	0.75	0.79	0.22	1.17	1.06	0.44	0.38	0.43
殷庄	殷 2	Ed^1	0.27	0.28	0.56	0.26	0.70	0.79	0.05	1.03	1.07	0.71	0.22	0.26

注: CPI —碳优势指数; OEP —奇偶指数; MP_{II} —甲基菲指数; MP_{I2} —甲基菲指数; Pr/Ph —姥/植

表 2 溱潼凹陷低熟油族组成

Table 2 Group composition of low-mature oil in Qintong sag

油田	井号 (层位)	族组成 /%				饱和烃 / 芳烃	非烃 / 沥青质	非烃 + 沥青质
		饱和烃	芳烃	非烃	沥青质			
角墩子	苏 228 (Ed ¹)	64.06	15.36	18.49	1.82	4.27	10.30	20.11
草舍	苏 120 (Es ¹)	51.13	10.53	29.32	5.26	4.86	5.53	34.50
茅墩子	苏 168 (Ef ³)	41.38	10.34	37.93	8.63	4.10	4.40	46.55
殷庄	殷 2 (Ed ¹)	66.26	12.20	14.23	1.63	5.50	8.81	15.86

油的比值范围为 15% ~ 30%^[9], 由此进一步验证了对上述的判识。此外, 与成熟原油相比, 饱和烃/芳烃稍高 (2.69~ 5.50), 非烃含量较高, 非烃/沥青质 (大于 4.4) 也相对较高, 这是其低演化的重要标志, 因为在成熟原油中该比值通常小于 3^[7], 造成这一差异的主要原因和低熟油的形成与生物类脂物的早期转化成烃有关^[6]。

2.3.2 饱和烃

2.3.2.1 正烷烃

溱潼凹陷低熟油生物标志物特征比较复杂 (表 1), 而低熟油饱和烃馏分的烃类组成与成熟原油并没有本质区别, 主要由各种链烷烃 (正烷烃、支链烷烃和类异戊二烯烷烃) 和各种环状烷烃 (甾烷和萜烷) 组成。总体看来, 正构烷烃 CPI 小于 1.2 OEP 不明显。

2.3.2.2 类异戊二烯烷烃

类异戊二烯烷烃中植烷优势较强, 这是我国低熟油的一个明显特征, 尤其在强还原、高盐度的环境下。不同成因造成低熟油 Pr/Ph 值不尽相同, 因为该值与源岩生源构成和沉积环境双重因素密切相关。研究表明^[7], 不同成因的低熟油具有明显不同的 Pr/Ph 值, 半咸水-咸水环境的 Pr/Ph 小于 0.5, 淡水-微咸水湖相环境为 0.5~ 2.0, 异常高的比值则与煤系地层形成的低熟油密切相关。对于溱潼凹陷的低熟油来说, Pr/Ph 为 0.44~ 0.77, 体现了微咸水-半咸水的沉积环境。

2.3.2.3 单甲基支链烷烃

溱潼凹陷低熟油中单甲基支链烷烃包括异构 (2-甲基)、反异构 (3-甲基) 和中间取代 (X₁₉化合物) 的支链烷烃, 其丰度具有异构大于反异构大于 X 化合物的特点。该特点与我国大部分地区低熟油分布特征一致。单甲基支链烷烃主要存在于细菌和高等植物中, 不具有奇偶碳数优势, 一般应属于细菌蜡生源产物。

2.3.2.4 胡萝卜烷系列

溱潼凹陷低熟油中类胡萝卜烷系列及 β-胡萝卜烷丰度不高 (图 4), 类胡萝卜素稳定性较低, 在沉积过程中极易遭到氧化破坏。该化合物的存在, 表明烃源岩有机质输入与色素生源有关, 沉积保存条件偏还原。

2.3.2.5 环状萜烷类

在溱潼凹陷低熟油中, 普遍检测到有细菌生源意义的倍半萜烷类——补身烷系列, 这类化合物一般用于说明有机质的来源或原油的成因类型。早期报道存在于源自高等植物的树脂和香精油中, 认为是陆源植物的生物标志物, 如桉叶油烷, 碳数为 C₁₅, 后来发现分子结构与 8,14-断藿烷相似, 因此, C₁₄~ C₁₆补身烷系列又被认为是具有细菌生源意义的生物标志物。近期研究表明, 8α(H)升补身烷与 8β(H)升补身烷比值与烃源岩埋深和 R_o 之间的关系存在良好的负相关, 反映该比值在未熟-低成熟阶段是好的成熟度指标^[10]。由于未检测到桉叶油烷, 因此认为, 生烃母质中细菌生源具有较大的贡献或存在细菌对有机质的改

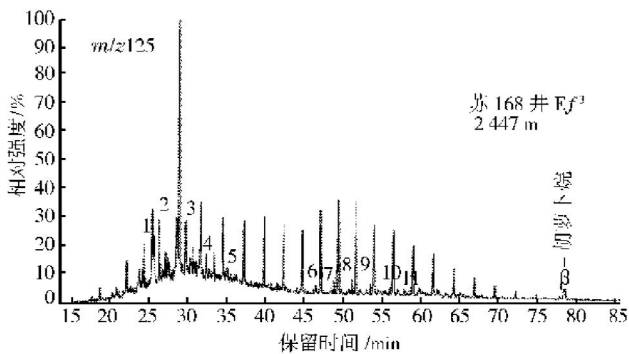


图 4 低熟油的类胡萝卜烷及 β-胡萝卜烷 (m/z 125) 质量色谱图 (1~ 5 为 C₁₈~ C₂₂类胡萝卜烷; 6~ 11 为 C₂₄~ C₂₉类胡萝卜烷)

Fig. 4 Mass chromatograms of carotenoid and β-carotene (m/z 125) in low-mature oil

造作用。

二萜类是可靠的高等植物(树脂)生源标志物。在漆潼凹陷,只检测到的海松烷和松香烷化合物,但含量极低,表明该类高等植物对低熟油形成贡献不大。

三环萜烷在样品中普遍存在,含量也较为丰富,认为来自菌、藻类。碳数范围为 $C_{19} \sim C_{26}$ 以 $13\beta(H) 14\alpha(H)$ -构型为主,而 $13\alpha(H) 14\alpha(H)$ -构型的丰度较低,在 $C_{19} \sim C_{24}$ 之间略有双峰出现,由此指示样品的成熟度不高。检出的四环萜烷主要有 C_{24} , C_{25} -17, 21 断藿烷, C_{27} -8 和 14 断藿烷,同为细菌生源。

检测到的三萜类几乎全部由藿烷系列和伽马蜡烷组成,奥利烷含量较低,表明细菌生物生源产物对原油的重要贡献。伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷比值范围为 0.26~0.51, 较低的伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷比值是微咸-半咸水环境烃源岩的重要标志^[11]。

2.3.2.6 甾烷类

漆潼凹陷低熟油中检出的甾类化合物主要包括 $C_{27} \sim C_{30}$ 规则甾烷、 $C_{28} \sim C_{30}$ 4-甲基甾烷、甲藻甾烷和羊毛甾烷(图 5), 其中 4-甲基甾烷、甲藻甾烷主要与浮游藻类有关,指示着沟鞭藻生源输入的贡献;重排甾烷的丰度很低,以“生物构型”的 C_{27} , C_{28} 和 C_{29} $\alpha\alpha\alpha 20R$ 构型为主要化合物,每个样品的 C_{27} , C_{28} , C_{29} $5\alpha(H)$, $14\alpha(H)$, $17\alpha(H)$ 特征均呈“V”字型的分布,表明陆源有机质输入以及藻类对生烃的贡献。同时在少量油样中还检出了四环三萜烷中的 $C_{30} \sim C_{31}$ 羊毛甾烷(图 4)。一般认为,羊毛甾烷是生物体中羊毛甾醇的成岩作用产物,存在于被子植物(单子叶和双子叶)、裸子植物、鞭毛藻类、硅藻类、真菌和原生动物;但也可能来自成岩过程中角鲨烯环化形成甾醇的中间产物^[12~14]。羊毛甾烷的存在,还表明了漆潼凹陷原油的母岩成熟度较低这一事实,因为当 R_o 大于或等于 0.63% 时,羊毛甾烷就基本消失了。

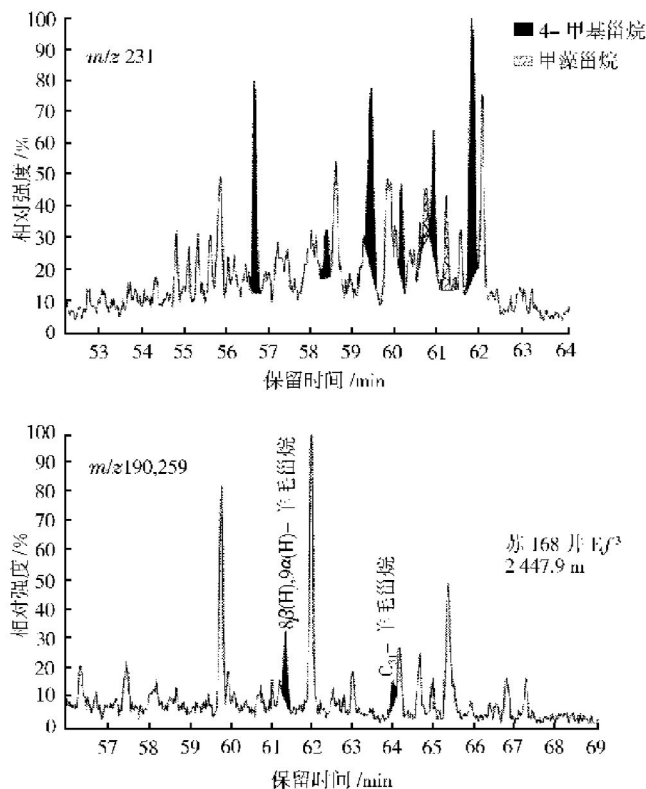


图 5 苏 168 井原油羊毛甾烷 (m/z 190, 259)、4-甲基甾烷、甲藻甾烷 (m/z 231) 质量色谱图

Fig. 5 Mass chromatograms of lanostane (m/z 190, 259), tetramethylsterane and dinosterane (m/z 231) of crude oil in S168 well

2.3.3 脱羟基维生素 E

漆潼凹陷低熟油中检测到的脱羟基维生素 E 有 4 种异构体,即 δ -脱羟基维生素 E、 β -脱羟基维生素 E、 γ -脱羟基维生素 E 和 α -脱羟基维生素 E。在几个低熟油样中, C_{29} 脱羟基维生素 E 丰度较高,分布形式主要为 $\alpha > \delta > \beta > \gamma$ 呈不对称“V”型分布(图 6)。Sinninghe Damste 等认为^[15], 脱羟基维生素 E 的 α/δ 比值能反映沉积时期的古盐度, α/δ 比值越高则盐度越低。因此,苏 168 井低熟油的脱羟基维生素 E 分布形式将体现出更为偏淡水的沉积环境。总的看来,该凹陷低熟油应来自微咸水-半咸水的沉积环境。

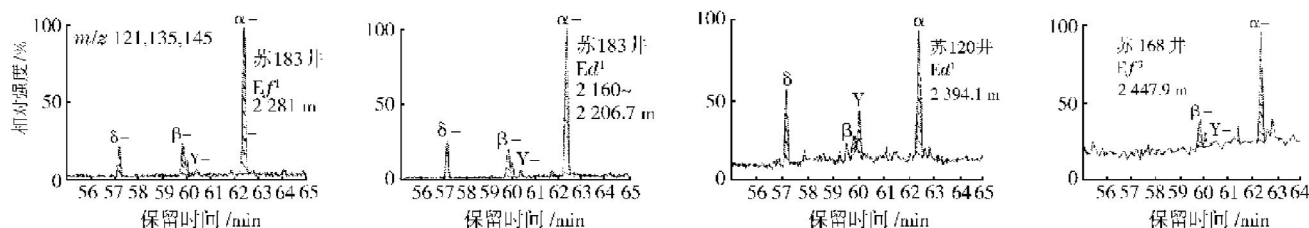


图 6 苏 168 井原油脱羟基维生素 E 的分布形式

Fig. 6 Distribution pattern of dehydroxyl vitamin E in S168 well's crude oil

3 结论

漆潼凹陷低熟油甾烷异构化参数普遍较低, 通过与烃源岩镜质组反射率 R_o 的相关关系, 指出了凹陷内低熟油的范围, 界定低熟油判识指标 $\alpha\alpha\alpha C_{29}$ 甾烷 $20S/(20S+20R)$ 和 C_{29} 甾烷 $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 值分别为 0.31 和 0.29。经过生物标志物的综合对比, 进一步确认了几个典型原油的低成熟性。

原油的伽马蜡烷的丰度、脱羟基维生素 E 的分布特征以及含硫量 (小于 0.5%) 和检测出的具有较强环境指示意义的生物标志物—羊毛甾烷, 说明漆潼凹陷源岩沉积于微咸—半咸水环境, 同时反映了低熟烃源岩的成烃贡献。

参 考 文 献

- 钱基. 苏北盆地油气田的形成与分布特征 [J]. 石油大学学报 (自然科学版), 2000, 24(4): 21~25
Qian Ji. Formation and distribution of oil and gas fields in Subei basin [J]. Journal of the University of Petroleum, China 2000, 24(4): 21~25
- 邱旭明. 苏北盆地断块圈闭分类及油气成藏特征 [J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(4): 371~374
Qiu Xuming. Classification of fault-block traps and characteristics of petroleum reservoir in Subei basin [J]. Oil & Gas Geology 2003, 24(4): 371~374
- 刘玉瑞, 刘启东, 杨小兰. 苏北盆地走滑断层特征与油气聚集关系 [J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(3): 279~283
Liu Yurui, Liu Qidong, Yang Xiaolan. Relation between features of strike slip faults and hydrocarbon accumulation in Subei basin [J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(3): 279~283
- 刘德良, 谈迎, 杨晓勇, 等. 漆潼油气区带评价中的 R 型因子分析 [J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(4): 283~289
Liu Deliang, Tan Ying, Yang Xiaoyong et al. R-factor analysis in assessment of oil gas zone in Qintong [J]. Oil & Gas Geology 1999, 20(4): 283~289
- 廖前进, 黄第藩, 徐永昌. 我国陆相地层中未熟—低熟油的地球化学特征研究 [A]. 见: 杨世伟. 中国科学院兰州地质研究所生物、气体地球化学开放实验室研究年报 1986 [C]. 兰州: 甘肃科学出版社, 1987, 34~61
Liao Qianjin, Huang Difan, Xu Yongchang. The research on geochemical characteristics of immature oil of continental strata in China [A]. In: Yang Shizhuo. Annual report of opening lab in Lanzhou Geological Institute, China Academy of Sciences 1986 [C]. Lanzhou: Science and Technology Press, 1987, 34~61
- 黄第藩, 廖前进, 徐永昌. 未成熟石油成因的初步研究 [A]. 见: 杨世华. 中国科学院兰州地质研究所生物、气体地球化学开放实验室研究年报 1987 [C]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1988, 1~19
Huang Difan, Liao Qianjin, Xu Yongchang. The research on genetic mechanism of immature oil [A]. In: Yang Shizhuo. Annual report of opening lab in Lanzhou Geological Institute, China Academy of Sciences 1987 [C]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1988, 1~19
- 王铁冠, 钟宁宁, 侯读杰, 等. 低熟油气形成机理与分布 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1995, 130~133
Wang Tieguan, Zhong Ningning, Hou Dujie et al. Formation mechanism and distribution of immature oil and gas [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995, 130~133
- Radke M, Welte D H. The methylphenanthrene index (MPI): a maturity parameter based on aromatic hydrocarbon [A]. In: Bjoroy M. Advances in organic geochemistry [C]. Wiley: Chichester, 1993, 504~512
- 黄第藩, 张大江, 王培荣, 等. 中国未成熟石油成因机制和成藏条件 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003, 169~176
Huang Difan, Zhang Dajiang, Wang Peirong et al. Genetic mechanism and accumulation condition of immature oil in China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003, 169~176
- 汪立群, 包建平, 马达德, 等. 倍半萜类分布和组成与低熟烃源岩有机质热演化研究 [J]. 地球化学, 2005, 34(2): 173~179
Wang Liqun, Bao Jianping, Ma Dade et al. Distribution and compositions of sesquiterpanoids and thermal maturation of organic matter in the low mature source rock [J]. Geochimica 2005, 34(2): 173~179
- 宋一涛, 吴庆余, 周文. 未熟—低熟油的形成与成因机制 [M]. 山东出版: 石油大学出版社, 2004, 171~182
Song Yitao, Wu Qingyu, Zhou Wen. Formation and genetic mechanism of immature oil [M]. Dongying: Shandong China University of Petroleum Press, 2004, 171~182
- Chen JH, Philp R P, Fu JM, et al. The occurrence and identification of C_{30} - C_{32} lanostanes: a novel series of tetracyclic triterpenoids hydrocarbons [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta 1989, 53: 2775~2779
- 陈军红, 傅家谟, 盛国英, 等. 泌阳凹陷第三系湖相泥质白云岩中特殊甾烷化合物分布特征及地球化学意义 [J]. 地球化学, 1995, 24(4): 379~386
Chen Junhong, Fu Jiamq, Sheng Guoying et al. Distribution and geochemical implications of non-ordinary steranes from Tertiary lacustrine clayey dolomite in Biyang depression [J]. Geochimica 1995, 24(4): 379~386
- 傅家谟, 盛国英. 分子有机地球化学进展 [J]. 自然科学进展——国家重点实验室通讯, 1995, 2(2): 139~146
Fu Jiamq, Sheng Guoying. Developments in molecule organic geochemistry [J]. Advanced in Natural Science—Message from China's key lab, 1995, 2(2): 139~146
- Sinninghe Damste J S, Dalen A C, de Leeuw JW, et al. The identification of mono-, di- and triethyl 2-methyl-2-(4,8,12-trimethyltridecyl) chmanes and their occurrence in the geosphere [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta 1987, 51(2): 2393~2400

(编辑 高 岩)