

叶城凹陷柯东 1 井凝析油及柯克亚原油的油源分析

王 强¹, 彭平安^{1*}, 曾 建¹, 邹艳荣¹,
于赤灵¹, 张宝收², 肖中尧²

(1. 中国科学院 广州地球化学研究所, 广东 广州 510640; 2. 中国石油 塔里木油田分公司 勘探开发研究院, 新疆 库尔勒 841000)

摘 要: 塔里木盆地叶城凹陷拥有多套烃源岩层, 主要为石炭系卡拉乌依组、二叠系棋盘组与普司格组 2-3 段、侏罗系煤系地层与叶尔羌群等, 这些烃源岩都可能是柯东 1 井凝析油和柯克亚第三系原油的母源。在这一地区, 油源一直是一个很具争议性的问题。选取了叶城凹陷克里阳构造带柯东 1 井 2 个凝析油、柯克亚构造带 7 个第三系原油, 以及叶城凹陷各烃源岩层具有代表性的 17 个烃源岩样品, 对其生物标志物及正构烷烃单体烃稳定碳同位素比值等参数进行了详细的测试分析。油油对比揭示, 柯东 1 井原油与柯克亚第三系原油在正构烷烃组分、成熟度与稳定碳同位素组成等特征上具有明显的相似性, 显示同源的特征。油源对比显示, 普司格组 2-3 段下部是这些原油的源岩。这一烃源岩层具有与柯克亚地区原油一致的成熟度和相似的特征性生物标志物, 即高含量的重排藿烷、Ts 和 C₂₇-C₂₉ 重排甾烷等, 而其他烃源岩层则不具备这类特征。较高成熟阶段形成的原油, 解释了普司格组 2-3 段烃源岩可溶有机质与柯东 1 井等原油在单体烃稳定碳同位素比值上具有 2‰~3‰ 的差别。

关键词: 凝析油; 生物标志物; 稳定碳同位素; 油源对比; 塔里木盆地

中图分类号: P597 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2014)05-0469-08

Oil source of condensates from Well Kedong 1 and crude oil from Kekeya in Yecheng depression

WANG Qiang¹, PENG Ping-an^{1*}, ZENG Jian¹, ZOU Yan-rong¹, YU Chi-ling¹,
ZHANG Bao-shou² and XIAO Zhong-yao²

1. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. Institute of Petroleum Exploration and Development, Tarim Oilfield Company, Korla 841000, China

Abstract: Yecheng depression in Tarim Basin developed several layers of source rocks, including Carboniferous Kalawuyi formation, Permian Qipan formation and Pusige formation 2-3 parts, Jurassic Yarkant formation and coal measure strata. These source rocks may be the origin of condensates from Well Kedong 1 and crude oil from Kekeya Tertiary strata. The origin of crude oil in this area has been controversial for a long time. We selected 2 condensate samples from Well Kedong 1, 7 Tertiary crude oil samples from Keliyang tectonic belt of Yecheng depression, 17 representative source rock samples, and finished a series of measuring-analysis work on geochemistry parameters of these samples, such as biomarkers and individual hydrocarbon isotopic composition ratio. Oil-oil correlation shows that condensates from Well Kedong 1 and Kekeya Tertiary strata have much in common in *n*-alkanes component, maturity and stable carbon isotope, indicating their same-origin characteristics. Oil-source correlation shows that source rocks from underpart of 2-3 sections of Pusige formation may be origin of crude oil in the research area. Pusige formation source rock strata and crude oil from Kekeya area have the same maturity and similar characteristic biomarkers, that is high content of C₃₀ rearrangement hopane, Ts, C₂₇-C₂₉ diasteranes, etc, while other source rocks strata don't have this feature. The crude oil's high maturity may explain

收稿日期(Received): 2013-09-19; 改回日期(Revised): 2013-11-06; 接受日期(Accepted): 2014-01-16

基金项目: 国家“十一五”油气重大专项(2008ZX05008-002); 国家自然科学基金(41073038)

作者简介: 王强(1987-), 男, 博士研究生, 油气地球化学专业。E-mail: 542132218@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author): PENG Ping-an, E-mail: pinganp@gig.ac.cn; Tel: +86-20-85290163

WANG Qiang et al.: Oil source of condensates and crude oil from Yecheng depression

why there is a 2‰–3‰ difference in stable carbon isotope ratio between condensates from Well Kedong 1 and soluble organic matters from Pusige formation 2-3 section's underpart source rocks.

Key words: condensate; biomarkers; stable carbon isotope; oil-source correlation; Tarim Basin

0 引言

塔西南凹陷的构造与沉积均十分复杂,在这样的地区开展油气勘探无疑具有较高的难度与风险。回顾这一地区艰辛的油气勘探历史,大致可分为三个阶段,即以柯克亚第三系凝析气田发现为代表的构造勘探阶段(1974–1983年)、以“柯深”系列油井发现为代表的深层钻探阶段(1991–2009年)和最新的甫沙构造带的油气勘探阶段(2009年)。柯东1井在白垩系地层发现了大型的凝析油气藏,对这一地区油气的进一步勘探具有重要的启示作用。

地处塔西南的叶城凹陷是一个晚古生代以来持续发展的凹陷,石炭系、下二叠统克孜里其曼组沉积以前的盆地格局全区基本相似,不同是西部的叶城小区沉积较厚,而东部的和田小区沉积较薄。克孜里其曼沉积之后,和田小区、叶城小区的沉积环境差异巨大,叶城小区延续海相沉积(棋盘组)至290 Ma,之后隆起,沉积了达里约尔组湖相碎屑岩。而和田小区在克孜里其曼沉积之后,进入湖相发展阶段沉积。全区均有侏罗系煤系地层出露。复杂的沉积环境造就了众多的烃源岩层。叶城小区可能的烃源岩层有卡拉乌依组(海相)、棋盘组(海相)以及杨叶组(煤系);和田小区潜在的烃源岩有卡拉乌依组(海相)、普司格组2-3段(湖相)、杨叶组(煤系)。这些烃源岩层都有可能是这一地区产出原油的母源。

柯克亚地区原油的油源,是一个争论已久的问题。前人的观点大致有三种:(1)原油主要来自于侏罗系煤系地层;(2)原油来自于石炭—二叠系,但混入侏罗系来源的原油;(3)原油来自于中、下侏罗统地层,但混入石炭—二叠系地层来源的原油^[1]。显然,梳理这一地区原油的油源对于今后在这一地区进行石油、天然气勘探具有十分重要的指导意义。

本文以柯东1井以及柯克亚第三系原油为研究对象,采用综合油源对比方法探讨其母源问题,以期解决这一争论已久的石油地质学问题。

1 样品与实验

1.1 样品

实验用的烃源岩样品共17个(表1),其中岩芯样品6个,包括阳1井5个、甫沙2井1个;其余11个样取自叶城小区和和田小区的多个露头剖面。这些样品代表了这一地区的主要烃源岩。原油样品共9个(表1),其中2个取自柯克亚东部甫沙构造带上的柯东1井,7个取自柯克亚构造带第三系油层。图1中指出了各样品的采集地点。

1.2 实验

所用的玻璃器皿都经重铬酸钾洗液清洗,用纯水冲净,并在马弗炉中450℃灼烧4h,以达到完全净化的目地。实验用有机试剂和其他材料,如正己烷、二氯甲烷、甲醇、正十六烷、铜片、棉花与滤纸、无水硫酸钠、硅胶、氧化铝等都经严格的纯化处理。

烃源岩用索氏抽提法抽提可溶有机质,铜片脱硫,溶剂为二氯甲烷与甲醇混合液(体积比83:17)。用正己烷进行沥青质沉淀。正己烷可溶物与原油一起进行族组成分离。

用硅胶及中性氧化铝混合柱对样品中的饱和烃、芳烃进行分离,饱和烃部分再用尿素络合的方法分出正构烷烃和异构烷烃。

烷烃、芳烃生物标志物用色谱-质谱方法进行测定。仪器为Finnigan Voyager型气相色谱-质谱联用仪,色谱柱为HP-5MS型毛细管(30 m × 0.32 mm × 0.25 μm),氦气作载气。升温程序:起始温度60℃,恒温2 min,然后以4℃/min升至290℃,恒温15 min。离子源温度为250℃,色谱质谱接口温度为250℃。质谱扫描方式为全扫描(Full Scan)+选择离子扫描(SIM)。用正十六烷进行正构烷烃的相对定量。

用同位素比值质谱仪Agilent 6890-Delta+XL测定正构烷烃单体烃碳同位素比值。色谱条件与上述的色谱-质谱分析仪相同。

表 1 研究区样品一览表
Table 1 A brief view of samples from the research area

编号	井号/剖面	性质	深度 (m)	层位	TOC (%)	T_{\max} (°C)
1	柯 10	油	3872~3934	N ₁		
2	柯深 7009	油	3861~3893	N ₁		
3	柯 20	油	3850~3951	N ₁		
4	柯 35	油	3846~3952	N ₁		
5	柯 2	油	3248~3298	N ₁		
6	柯深 103	油	6333~6339	E		
7	柯深 709	油	3937~3952	N ₁		
8	柯东 1(含水)	油	4268~4331	K ₂		
9	柯东 1(脱水)	油	4268~4331	K ₂		
10	阳 1	烃源岩	1915	P _{2-3p}	5.20	438
11	阳 1	烃源岩	2140	P _{2-3p}	3.94	443
12	阳 1	烃源岩	2546	P _{2-3p}	0.81	440
13	阳 1	烃源岩	2551	P _{2-3p}	0.60	435
14	阳 1	烃源岩	3463	P _{2-3p}	0.76	445
15	甫沙 2	烃源岩	5004	J _{1-2yr}	6.35	434
16	杜瓦	烃源岩	露头	J	0.70	432
17	杜瓦	烃源岩	露头	J	0.97	/
18	霍什拉甫	烃源岩	露头	J _{1-2yr}	0.47	436
19	霍什拉甫	烃源岩	露头	J _{1-2yr}	0.84	/
20	棋盘	烃源岩	露头	P _{1q}	0.84	/
21	棋盘	烃源岩	露头	P _{1q}	1.51	463
22	棋盘	烃源岩	露头	P _{1q}	7.97	531
23	棋盘	烃源岩	露头	P _{1q}	1.57	455
24	棋盘	烃源岩	露头	C _{2k}	1.59	/
25	棋盘	烃源岩	露头	C _{2k}	3.03	/
26	棋盘	烃源岩	露头	C _{2k}	8.43	/

注: “/”表示数据不准, 没有列出。N、E 分别代表上、下第三系; P_{2-3p} 代表二叠系普司格组 2-3 段; J 代表侏罗系煤系地层; J_{1-2yr} 代表侏罗系叶尔羌组 1-2 段; P_{1q} 代表二叠系棋盘组 1 段; C_{2k} 代表石炭系卡拉乌依组 2 段

2 结果与讨论

2.1 柯东 1 井原油的地球化学特征

柯东 1 井 2 个原油样品饱和烃正构烷烃的分布基本相似, 碳数分布相对较宽(图 2), 主要在 nC_6 和 nC_{24} 之间, 奇偶优势不明显, 为单峰型, 主峰为 nC_{12} 或 nC_{13} , 属典型的轻质原油。原油中 $Pr/Ph > 1.3$, $Ph/nC_{18} - Pr/nC_{17} = -0.026$, 小于 -0.025 , 根据王培荣等^[2]的图表判断, 这 2 个原油为陆相成因。

2 个原油样品的生物标志物含量较低, 经尿素络合分离出异构组分后, 才能用 GC-MS 分析出甾萜类化合物, 这可能是由于原油热成熟度高的原因^[3], 同时也表明原油未受到其他低成熟原油混染的影响。不同批次的分析数据有很好的一致性。

从表 2 可以看出, 柯东 1 井未脱水和脱水样品 T_s/T_m 值分别为 3.14 和 2.17, 属高成熟度原油^[4]或源于特殊的沉积环境^[5]。C₃₁ 藿烷 22S/(22S+22R) 值为 0.63 和 0.66, 均大于 0.62, 表明其源岩已经过了主要生油阶段^[6], 这也与柯东 1 井凝析油成熟度极高的性质吻合。柯东 1 井 2 个凝析油还具有很高的 C₃₀ 重排藿烷/C₃₀αβ 藿烷比值, 分别为 0.85 和 0.72, 伽马蜡烷/C₃₀ 藿烷比值也达 0.08 和 0.13, 反映源岩可能为富含黏土矿物或具有氧化性质的陆相淡水沉积^[7]。

图 2 显示, 柯东 1 井原油 C₂₇-C₂₉ 规则甾烷中 αβ 构型含量较高, 且 C₂₇ 甾烷占了很高的比例, 而 C₂₇ 甾烷一般来源于藻类和低等水生生物^[8]。同时, 重排甾烷占有相当大的比例, 在淡水湖盆地中水体盐度较低和酸性环境利于发生重排作用^[9]。规则甾烷和重排甾烷的特点进一步指示了原油源岩来自于

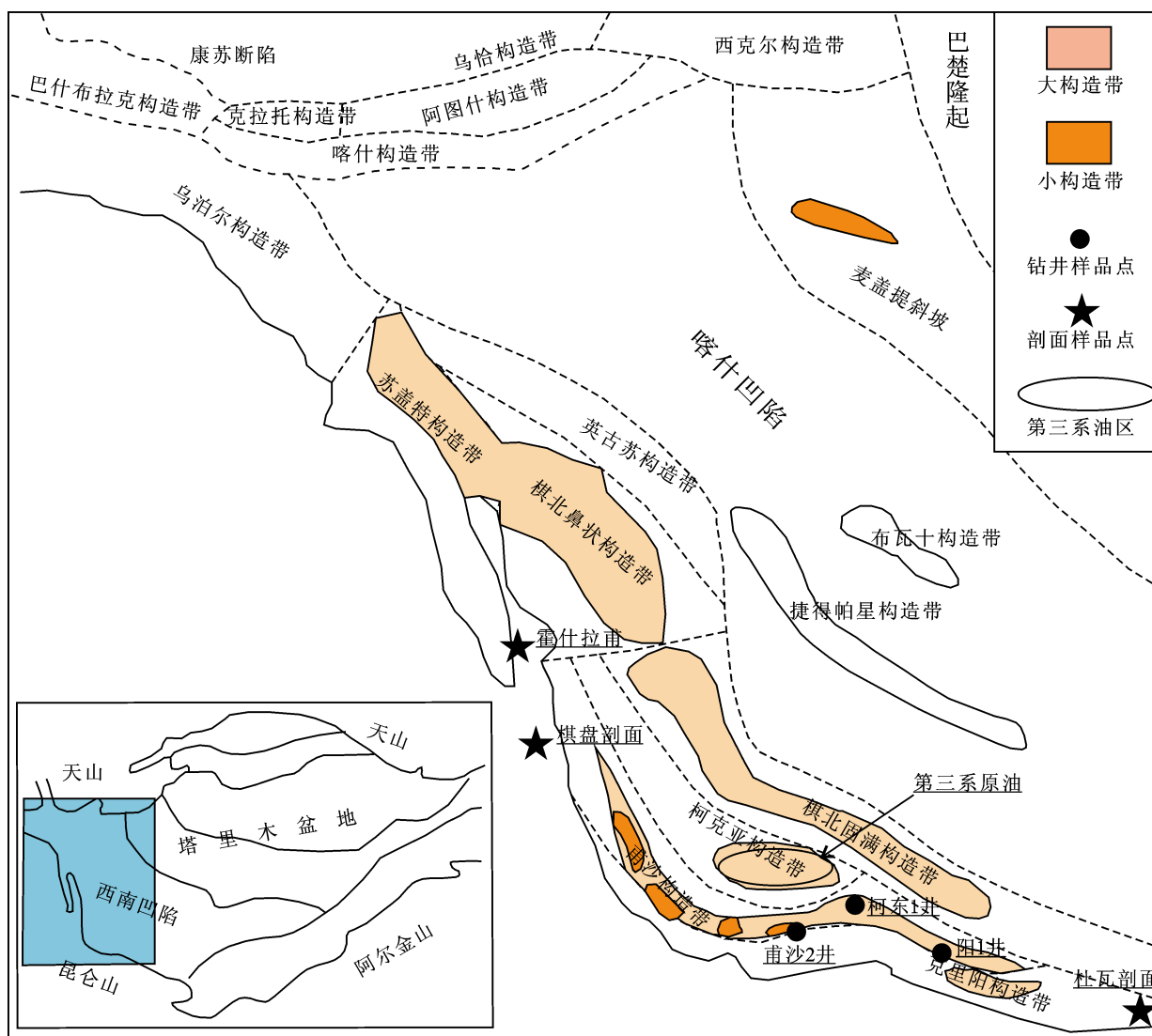


图1 研究区样品位置

Fig.1 The sample locations in the research area

表2 研究区原油饱和烃生物标志物与芳烃特征

Table 2 The characteristics of saturated hydrocarbons' biomarkers and aromatics in crude oil from the research area

编号	井号	Ts/Tm	Pr/Ph	C ₃₀ 重排藿烷/ C ₃₀ αβ藿烷	伽马蜡烷/ C ₃₀ αβ藿烷	甲基菲/菲	甲基菲 指数 MPI ₁	C ₃₁ 22S/(22S+22R)	C ₂₉ αα20S/ (20S+20R)
1	柯10	0.82	3.67	0.10	0.18	2.40	0.69	0.57	0.43
2	柯深7009	1.71	2.74	0.23	0.24	1.94	0.67	0.60	0.30
3	柯20	2.07	3.05	0.54	0.25	1.31	0.55	0.54	0.38
4	柯35	1.09	3.69	0.11	0.17	1.53	0.60	0.62	0.37
5	柯2	3.06	2.75	1.61	0.21	1.58	0.58	0.62	0.50
6	柯深103	2.99	2.83	0.93	0.13	2.26	0.58	0.61	0.49
7	柯深709	2.61	2.70	0.90	0.20	1.49	0.60	0.67	0.42
8	柯东1	3.14	2.54	0.85	0.08	1.60	0.69	0.63	0.47
9	柯东1	2.17	2.85	0.72	0.13	1.60	0.71	0.66	0.45

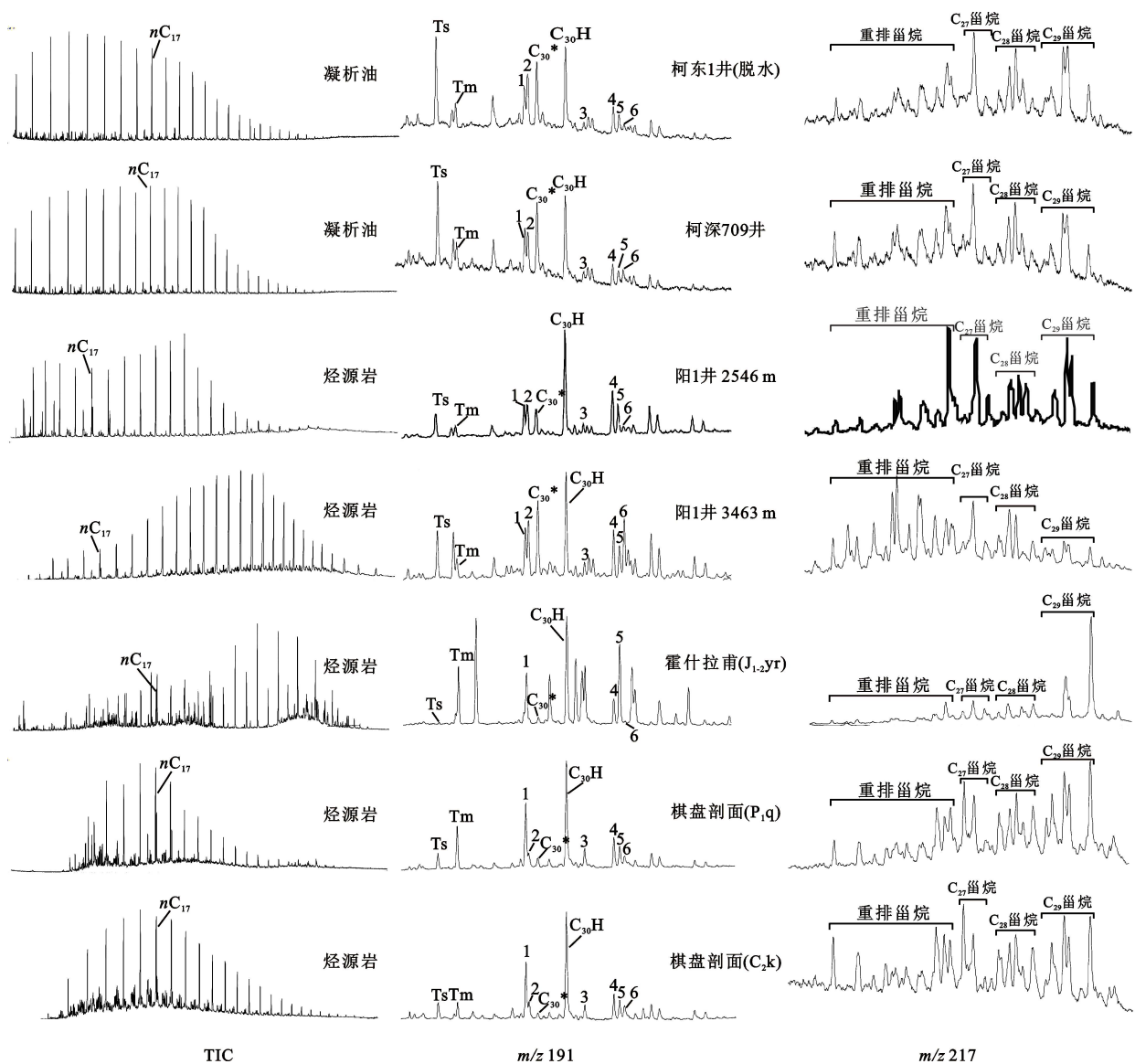


图 2 典型烃源岩与凝析油的甾萜类生物标志物对比

Fig.2 The comparison of sterane-terpene biomarkers in typical source rocks and condensates

RIC 为 GC-MS 总离子流图。m/z 191 图中: 1 表示 C₂₉-17(α),21(β)-藿烷; 2 表示 C₂₉Ts; C₃₀*表示 C₃₀ 重排藿烷; C₃₀H 表示 C₃₀-17(α),21(β)-藿烷; 3 表示 C₃₁ 重排藿烷; 4 表示 C₃₁-20S-17(α),21(β)-藿烷; 5 表示 C₃₁-20R-17(α),21(β)-藿烷; 6 表示伽马蜡烷

陆地淡水湖泥质沉积环境。Marzi *et al.*^[10]认为在高成熟度状态下甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20S/(20S+20R)$ 值可能会变小。2 个原油样品中 C₂₉ 甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20S/(20S+20R)$ 值分别为 0.48 和 0.47(表 2), 比甾烷异构化平衡值 (0.52~0.55)^[6] 略低。考虑到 C₃₁ 藿烷 $22S/(22S+22R)$ 值已经指示了原油的高成熟度, $\alpha\alpha\alpha 20S/(20S+20R)$ 值比平衡值略微偏低, 也能从另一个角度反映了柯东 1 井 2 个原油的高成熟度特性。

此外, 原油中还含有少量的金刚烷类化合物, 甲基菲指数为 1.6(表 2), 同样表明原油的成熟度较高^[11]。样品中不同碳数单体烃稳定碳同位素比值 ($\delta^{13}C$) 范围在 -31.5‰ ~ -28.6‰ 之间。由图 3 可以看

出, nC₂₁ 之前的正构烷烃 $\delta^{13}C$ 值(约 -30.5‰ ~ -28.6‰) 明显比 nC₂₁ 之后部分的 $\delta^{13}C$ 值(约 -31.5‰ ~ -30.5‰) 重, 且碳数越低 $\delta^{13}C$ 值增加的程度越大。可见柯东 1 井凝析油经历过碳同位素分馏作用, 其真实 $\delta^{13}C$ 值应为 -31.5‰ ~ -30.5‰ (nC₂₁ 后的值), 也表明柯东 1 井凝析油的母质为藻类等低等水生生物形成的有机质。

2.2 油-油地球化学特征对比

柯东 1 井原油样品取自甫沙构造带 4268~4331 m 白垩系油层。为了与柯克亚油田的原油样品对比, 我们分析了柯 2、柯 10、柯 20、柯 35、柯深 103、

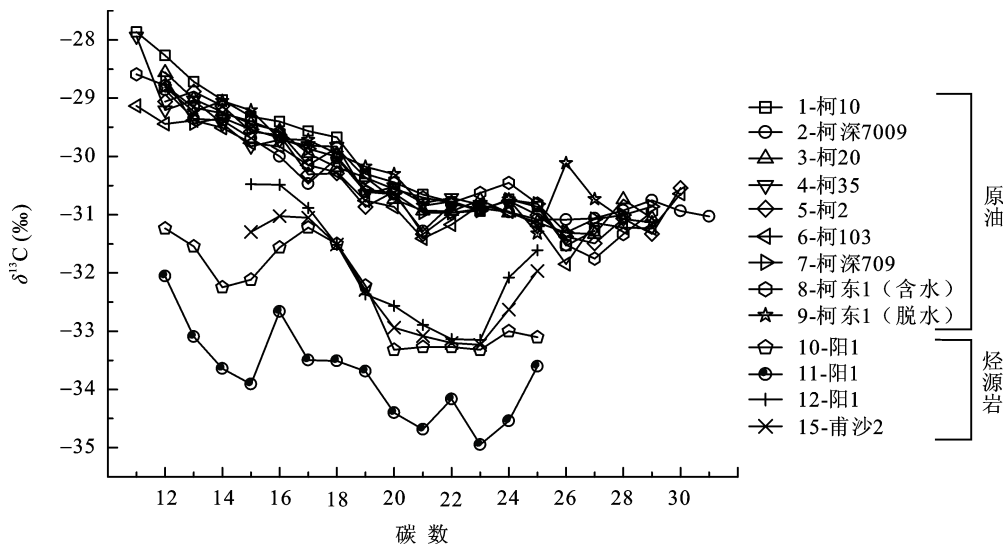


图3 原油与典型烃源岩单体烃 $\delta^{13}\text{C}$ 值对比图

Fig.3 The comparison of crude oil and typical source rocks' $\delta^{13}\text{C}$ values

柯深 709 和柯深 7009 共 7 个第三系原油样品。

从已有的数据来看, 尽管 9 个原油样品在颜色、粘度、含蜡质和含沥青质等物理性质上不尽相同, 但第三系原油饱和烃都由 $n\text{C}_{24}$ 以下的正构烷烃构成(图 2), 且主峰在 $n\text{C}_{12}$ 与 $n\text{C}_{17}$ 之间变动, 与柯东 1 井一样属于轻质原油。

表 2 显示, 第三系原油甲基菲指数(MPI)值在 0.55~0.69 间, 甲基菲/菲值在 1.49~2.40 之间; T_s/T_m 值普遍很高, 平均为 2.05; C_{31} 藿烷 $22\text{S}/(22\text{S}+22\text{R})$ 值大于 0.58, 平均为 0.6, C_{29} 甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20\text{S}/(20\text{S}+20\text{R})$ 值在 0.37 以上, 平均为 0.46(表 2), 这些参数均表示其同样属于高成熟度原油。

同时, 第三系原油也有很高的重排藿烷、重排甾烷和 C_{27} 甾烷(图 2), 其 C_{30} 重排藿烷/ $\text{C}_{30}\alpha\beta$ 藿烷值从 0.10 到 1.61 不等, 平均可达 0.63。从图 3 还能看出, 其不同碳数单体烃 $\delta^{13}\text{C}$ 值约在 -32‰ ~ -28‰ 之间浮动, $n\text{C}_{21}$ 之前有碳数越小 $\delta^{13}\text{C}$ 值越重的现象, 与柯东 1 井凝析油 $\delta^{13}\text{C}$ 值的分布情况非常一致, 说明第三系原油同样经历过碳同位素分馏作用, 其真实 $\delta^{13}\text{C}$ 值应为 -32‰ ~ -30.5‰ 。

第三系原油如柯东 1 井凝析油一样, 还含有一定量的伽马蜡烷。一般认为, 伽马蜡烷可由陆地湖泊中的低等藻类生物的某些化学成分演化而来^[12], 而高等陆生生物不大可能为伽马蜡烷提供物源。第三系原油和柯东 1 井凝析油伽马蜡烷/ $\text{C}_{30}\alpha\beta$ 藿烷值平均约为 0.20 和 0.10, 表明其源岩有机质来源均有藻类等低等水生生物, 进一步表明研究区原油为陆

地淡水湖相源岩形成。

总体上看, 尽管柯东 1 井原油与柯克亚第三系原油物理性质有所差异, 但其地球化学特征非常一致, 它们应是来自相同源岩的原油。

值得注意的是, 柯东 1 井凝析油与柯克亚第三系原油都含有较高的重排藿烷和 T_s (表 2), 同时重排甾烷、 C_{27} 甾烷和 $\alpha\beta$ 型甾烷含量也很高(图 2), 这是这一地区原油中特征性的生物标志物, 具有重要的油源对比意义。

2.3 油-源对比

依据柯东 1 井的地理位置以及所处构造带, 本文选取了不同深度和层位、有机碳含量(TOC) 0.5% 以上、具有较高生烃潜力的叶城凹陷叶城-和田小区阳 1 井普司格组 2-3 段岩芯、甫沙 2 井叶尔羌群岩芯以及临近地区不同地层的地表剖面样品(表 1)进行油源对比。

表 2 显示, 17 个烃源岩样品的 Pr/Ph 值变动很大, 介于 0.92~5.87 之间。其中霍什拉甫侏罗系叶尔羌群烃源岩该值高达 5.8 以上, 反映其形成于氧化环境。阳 1 井 5 个样品 Pr/Ph 值较低, 集中分布在 0.92~1.67 之间, 平均为 1.22, 应形成于半深水的弱氧化-还原环境。其余烃源岩 Pr/Ph 值零乱分布在 1.11~2.17 之间, 难以判定其沉积环境。

棋盘剖面的石炭系卡拉乌依组和二叠系棋盘组烃源岩甾萜类生物标志物总体含量很低, 如表 2 及图 2 显示, C_{31} 藿烷 $22\text{S}/(22\text{S}+22\text{R})$ 值介于 0.55~0.64

之间, 平均约 0.60, C_{29} 甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20S/(20S+20R)$ 值均在 0.40 以上, 平均为 0.45, 显示高成熟的特征。但是 m/z 217 选择离子图反映, 卡拉乌依组和棋盘组烃源岩重排甾烷相对含量明显比柯东 1 井凝析油低, 且 Ts/Tm 值几乎都在 1.00 以下, 平均值仅为 0.67, 远低于研究区原油。同时, 也没有发现高含量的 C_{30} 重排藿烷, 不可能是其源岩。

5 块侏罗系烃源岩也未检出高含量的 C_{30} 重排藿烷, 还显示出成熟度较低的特征, 很难形成轻质油, 不可能是研究区原油的源岩。取自霍什拉甫叶尔羌组的烃源岩 C_{31} 藿烷 $22S/(22S+22R)$ 值平均只有 0.30, Ts 含量极少, Ts/Tm 值仅 0.04, 而且几乎没有 $C_{29}\alpha\alpha\alpha 20S$ 甾烷(表 2, 图 2), 其 C_{29} 甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20S/(20S+20R)$ 值接近于 0。同属侏罗系的甫沙 2 井叶尔羌群下段和杜瓦煤系烃源岩 C_{31} 藿烷 $22S/(22S+22R)$ 值都在 0.53 以上, 平均值为 0.56, 接近均衡状态, 但同时其 C_{29} 甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20S/(20S+20R)$ 值均在 0.30 以下, 平均只有 0.24, 显示较低成熟度的特征。一些学者认为, 岩性和 C_{31} 升藿烷在烃源岩中的吸附介质等因素可能导致其异构化速度加快^[10], 这可以解释甫沙 2 井叶尔羌群下段和杜瓦煤系烃源岩成熟度较低, 而 C_{31} 藿烷 $22S/(22S+22R)$ 值却已经接近平衡。

阳 1 井普司格组 2-3 段样品的生物标志物显示出高成熟度特征, 其 $C_{29}\alpha\alpha\alpha 20S/(20S+20R)$ 值和 $C_{31}22S/(22S+22R)$ 值都已达到或接近平衡, 平均分别为 0.60 和 0.43, 这与柯东 1 井(0.65 和 0.46)非常一致。表 3 和图 2 还显示, 阳 1 井深度 2546 m 以下 3 个烃源岩 Ts/Tm 值比其他烃源岩高很多, 而且数值相差很小, 分别为 2.01、2.05 和 2.06, 这与柯东 1 井该值(平均约 2.66)很接近。这 3 个烃源岩还含有很高的重排甾烷、 C_{27} 甾烷、 $\alpha\beta$ 型甾烷和 C_{30} 重排藿烷, 其 C_{30} 重排藿烷/ $C_{30}\alpha\beta$ 藿烷值平均为 0.42, 这与研究区原油高重排、 C_{27} 、 $\alpha\beta$ 型甾烷和 C_{30} 重排藿烷的特征非常类似, 很有可能是其烃源岩。

从原油和烃源岩的正构烷烃单体烃稳定碳同位素比值看(图 3), 阳 1 井普司格组 2-3 段烃源岩(12-阳 1 井), $\delta^{13}C$ 值分布范围为 $-33.15\text{‰} \sim -30.48\text{‰}$, 平均约 -31.92‰ , 11-阳 1 井 $\delta^{13}C$ 值介于 $-33.63\text{‰} \sim -30.80\text{‰}$ 之间, 平均约为 -32.34‰ , 10-阳 1 井 $\delta^{13}C$ 值为 $-33.32\text{‰} \sim -31.22\text{‰}$, 平均为 -32.39‰ 。与柯东 1 井凝析油 $\delta^{13}C$ 值($-31.5\text{‰} \sim -30.5\text{‰}$)相比, 该段烃源岩的单体烃稳定碳同位素比值偏轻约 $1\text{‰} \sim 2\text{‰}$ 。实验证明, 在轻质油形成阶段排出的原油, 其稳定碳同位素值要比正常原油形成阶段排出的可溶有机质

表 3 烃源岩样品甾萜类生物标志物特征

Table 3 The characteristics of sterane-terpene biomarkers in source rocks

编号	井号	深度(m)	层位	Ts/Tm	Pr/Ph	C_{30} 重排藿烷/ $C_{30}\alpha\beta$ 藿烷	伽马蜡烷/ $C_{30}\alpha\beta$ 藿烷	$C_{31}22S/$ $(22S+22R)$	$C_{29}\alpha\alpha\alpha 20S/$ $(20S+20R)$
10	阳 1	1915	P ₂₋₃ p	0.57	1.67	0.09	0.03	0.61	0.36
11	阳 1	2140	P ₂₋₃ p	0.84	0.92	0.08	0.06	0.6	0.44
12	阳 1	2546	P ₂₋₃ p	2.01	1.21	0.32	0.05	0.59	0.45
13	阳 1	2551	P ₂₋₃ p	2.05	1.31	0.18	0.05	0.59	0.47
14	阳 1	3463	P ₂₋₃ p	2.06	0.99	0.77	0.46	0.62	0.45
15	甫沙 2	5004	J ₁₋₂ yr	0.01	1.78	0.01	0	0.57	0.22
16	杜瓦剖面	剖面	J	0.04	2.17	0.03	0.03	0.59	0.29
17	杜瓦剖面	剖面	J	0.07	1.51	0.03	0.04	0.53	0.22
18	霍什拉甫	剖面	J ₁₋₂ yr	0.02	5.85	0.06	0	0.34	0.04
19	霍什拉甫	剖面	J ₁₋₂ yr	0.05	5.87	0.06	0.02	0.25	0.03
20	棋盘剖面	剖面	P ₁ q	0.08	1.9	0.04	0.05	0.61	0.4
21	棋盘剖面	剖面	P ₁ q	0.36	1.39	0.11	0.08	0.64	0.44
22	棋盘剖面	剖面	P ₁ q	0.38	1.35	0.08	0.09	0.61	0.42
23	棋盘剖面	剖面	P ₁ q	1.01	1.11	0.04	0.14	0.55	0.46
24	棋盘剖面	剖面	C ₂ k	0.89	1.37	0.09	0.12	0.58	0.46
25	棋盘剖面	剖面	C ₂ k	0.97	1.82	0.06	0.15	0.57	0.49
26	棋盘剖面	剖面	C ₂ k	1.02	1.28	0.07	0.13	0.63	0.46

注: P₂₋₃p 代表二叠系普司格组 2-3 段; J 代表侏罗系煤系地层; J₁₋₂yr 代表侏罗系叶尔羌组 1-2 段; P₁q 表示二叠系棋盘组 1 段; C₂k 代表石炭系卡拉乌依组 2 段

$\delta^{13}\text{C}$ 值重 2‰~3‰(贾望鲁等, 2011, 未发表数据)。因此, 柯东 1 井凝析油和普司格组 2-3 段烃源岩同源, 但分别属于不同演化阶段排出的原油和可溶有机质的观点可以解释这一同位素的差距。甫沙 2 井侏罗系叶尔羌组煤系地层的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-34.26‰~-31.36‰, 平均约-32.98‰, 比柯东 1 井凝析油的 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏轻, 不可能是该区原油源岩。

综合上述结果, 笔者认为二叠系普司格组 2-3 段下部是本区原油的主要烃源岩。

3 结 论

(1) 柯东 1 井凝析油与柯克亚第三系原油类似, 基本未受生物降解影响, 饱和烃部分主要由 $n\text{C}_{22}$ 以下低碳数的正构烷烃组成, 属于轻质油, 各项生物标志物指标均显示其热成熟度较高的特征。

(2) 9 个原油甾萜类生物标志物中具有很高含量的 T_8 和 C_{30} 重排藿烷, C_{27} - C_{29} 重排甾烷和 C_{27} 规则甾烷也相对较高, 还有一定的伽马蜡烷, 表明其源岩可能为富含黏土矿物或具有弱氧化-还原性质的陆地淡水湖相沉积。

(3) 原油单体烃稳定碳同位素值偏重, 具有轻质油稳定碳同位素的特征。

(4) 对比柯克亚附近地区柯东 1 井凝析油及第三系原油的可能烃源岩, 即普司格组 2-3 下段、卡拉乌依组、棋盘组、侏罗系煤系以及叶尔羌群烃源岩的成熟度、生物标志物与碳同位素组成等特征, 发现这一地区的主要油源为普司格组 2-3 段下部。本次工作第一次明确这一地区的油源, 为原油的进一步勘探提供了科学依据。

参考文献(References):

[1] 陈瑞银, 徐思煌, 杜晓峰. 柯克亚油气田烃源岩特征与油源对比[J]. 新疆石油学院学报, 2002, 14(2): 1-5.
Chen Rui-yin, Xu Si-huang, Du Xiao-feng. The comparison between reservoir rock characteristics and petroleum source in the Keyeya oil field[J]. J Xinjiang Pet Inst, 2002, 14(2): 1-5 (in Chinese with English abstract).

[2] 王培荣, 朱俊章, 方孝林, 赵红, 朱翠山. 一种新的原油轻烃分类法——塔里木盆地原油分类及其地化特征[J]. 石油学报, 1998, 19(1): 24-28.
Wang Pei-rong, Zhu Jun-zhang, Fang Xiao-lin, Zhao Hong, Zhu Cui-shan. A new classification of crude oils on light hydrocarbons — The classification and geochemical feature of crude oils from Tarim basin[J]. Acta Petroli Sinica, 1998, 19(1): 24-28 (in Chinese with English abstract).

[3] 陈世加, 张宇, 路俊刚, 吴恩伟, 冉乙灼. 生物标志化合物在油源对比中的局限性[J]. 西南石油学院学报, 2006, 28(5): 11-14.
Chen Shi-jia, Zhang Yu, Lu Jun-gang, Wu En-wei, Ran Yi-jun. Limitation of biomarkers in the oil-source correlation[J]. J Southwest Pet Inst, 2006, 28(5): 11-14 (in Chinese with English abstract).

[4] 王铁冠, 钟宁宁, 侯读杰, 黄光辉, 包建平, 李贤庆. 低熟油气形成机理与分布[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995: 235p.
Wang Tie-guan, Zhong Ning-ning, Hou Du-jie, Huang Guang-hui, Bao Jian-ping, Li Xian-qing. Genetic Mechanism and Occurrence of Immature Hydrocarbon[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995: 235p (in Chinese).

[5] 张文正, 杨华, 杨奕华, 孔庆芬, 吴凯. 鄂尔多斯盆地长 7 优质烃源岩的岩石学、元素地球化学特征及发育环境[J]. 地球化学, 2008, 37(1): 59-64.
Zhang Wen-zheng, Yang Hua, Yang Yi-hua, Kong Qing-fen, Wu Kai. Petrology and element geochemistry and development environment of Yanchang Formation Chang-7 high quality source rocks in Ordos Basin[J]. Geochimica, 2008, 37(1): 59-64 (in Chinese with English abstract).

[6] Seifert W K, Moldowan J M. Use of biological markers in petroleum exploration[M]//Johns R B. Methods in Geochemistry and Geophysics (Vol.24). Amsterdam: Elsevier, 1986: 261-290.

[7] Li Sumei, Pang Xiongqi, Li Maowen, Jin Zhijun. Geochemistry of petroleum systems in the Niuzhuang South Slope of Bohai Bay Basin — Part 1: Source rock characterization[J]. Org Geochem, 2003, 34(3): 389-412.

[8] 黄第藩, 张大江, 李晋超, 黄晓明, 周翥虹. 柴达木盆地第三系油源对比[J]. 沉积学报, 1989, 7(2): 1-14.
Huang Di-fan, Zhang Da-jiang, Li Jin-chao, Huang Xiao-ming, Zhou Zhu-hong. The Tertiary oil source correlation in Qaidam Basin[J]. Acta Sedimentol Sinica, 1989, 7(2): 1-14 (in Chinese with English abstract).

[9] Rubinstein I, Sieskind O, Albrecht P. Rearranged sterenes in a shale: Occurrence and simulated formation[J]. J Chem Soc Perkin Trans I, 1975: 1833-1836.

[10] Marzi R, Rullkötter J. Qualitative and quantitative evolution and kinetics of biological markers transformation — Laboratory experiments and application to the Michigan basin [M]//Moldowan J M, Albrecht P, Philip R P. Biological Markers in Sediments and Petroleum. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1992: 18-41.

[11] Radke M, Welte D H. The methylphenanthrene index (MPI): A maturity parameter based on aromatic hydrocarbons [M]//Bjoroy M. Advances in Organic Geochemistry. Chichester: Wiley, 1983: 504-512.

[12] 李任伟, 李哲, 王志珍, 林大兴. 分子化石指标在中国东部盆地古环境分析中的应用[J]. 沉积学报, 1988, 6(4): 108-119.
Li Ren-wei, Li Zhe, Wang Zhi-zhen, Lin Da-xing. Using molecular fossil indicators for analysis of paleoenvironments of a sedimentary basin, in eastern China[J]. Acta Sedimentol Sinica, 1988, 6(4): 108-119 (in Chinese with English abstract).