

巴楚—麦盖提地区 主要油气藏原油地球化学特征及油源探讨

丁勇¹, 贾存善², 邵志兵²

(1. 中国石油化工股份有限公司西北油田分公司勘探开发研究院, 乌鲁木齐 830011;

2. 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所, 江苏无锡 214126)

摘要:巴楚—麦盖提地区是重要的油气聚集区。玉北地区玉北 1 井在奥陶系鹰山组测试获 25.2 m³/d 的海相工业油气流。玉北奥陶系油藏与巴什托(普)油气田的原油是否同源是困扰该地区油气勘探并急需解决的问题之一。通过玉北 1 井、巴什托(普)主要油气藏(田)的原油地球化学特征研究、油—油对比、油源对比等综合分析,并类比塔河奥陶系原油进行了巴楚—麦盖提地区主要油气藏原油地球化学特征及油源探讨分析。综合研究认为玉北地区奥陶系的原油地球化学特征与塔河奥陶系原油相近。通过烃源有机相类比,认为玉北地区奥陶系原油可能来自塔西南地区中下寒武统斜坡相烃源岩;巴什托轻质油推测主要来自盆地—陆棚相寒武系烃源岩,部分来源于海陆交互相石炭系。

关键词:原油;烃源岩;油源对比;油气藏;巴楚—麦盖提地区;塔里木盆地

中图分类号:TE122.1⁺1

文献标识码:A

Geochemical features and sources of crude oils in Bachu-Maigaiti area

Ding Yong¹, Jia Cunshan², Shao Zhibing²

(1. Research Institute of Petroleum Exploration & Production, SINOPEC Northwest Oilfield Company, Urumqi, Xinjiang 830011, China; 2. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China)

Abstract: Bachu-Maigaiti area is an important focus area of oil and gas. In the Ordovician Yingshan Formation in well Yubei 1, industrial oil and gas flows of marine facies have been tested for 25.2 m³/d. It is urgent to solve the problem whether the crude oils from Ordovician of Yubei area and Bashituo oil field are of the same sources. Through the geochemical analysis, oil/oil and oil/source correlations of the crude oils from well Yubei 1 and Bashituo oil field, compared with the Ordovician crude oils from Tahe area, the geochemical characteristics of crude oil and oil source of the main oil-and-gas reservoirs in Bachu-Maigaiti area are discussed. The geochemical features of the Ordovician crude oils from Yubei area are similar to those of the Ordovician crude oils from Tahe area. According to the organic analogy of oil source, the Ordovician crude oils from Yubei area may originate from the Middle and Lower Ordovician source rocks of slope facies in the southwestern Tahe area. The light oils from Bashituo area mainly come from the Cambrian source rocks of basin-shelf facies, and partially from the Carboniferous source rocks of marine-terrigenous facies.

Key words: crude oil; source rock; oil/source correlation; oil and gas pool; Bachu-Maigaiti area; Tarim Basin

2010 年 8 月 6 日,塔西南坳陷麦盖提斜坡上的玉北 1 井在奥陶系鹰山组测试获 25.2 m³/d 的工业油气流。从目前的油气勘探成果来看,巴楚—麦盖提地区是重要的油气聚集区(图 1),除玉北奥陶系油气藏之外,早先在巴楚隆起南缘已经发现了和田河气田(奥陶系、石炭系)和乌山气田(奥陶系);麦盖提斜坡区西部发现了巴什托(巴什托普)油气田(泥盆系、石炭系)和亚松迪气藏(石炭

系)^[1]。多年的研究表明^[2-10],塔西南地区发育寒武系、石炭—二叠系 2 套烃源岩,但巴楚—麦盖提地区的油气主要来自寒武系还是石炭系?或者两者都有?玉北 1 井奥陶系海相原油与巴什托油气同源?还是来自其它海相烃源岩等诸多问题都急需回答和解决。

本文通过玉北 1 井、巴什托(普)主要油气藏(田)的原油地球化学特征研究,油—油、油—源对

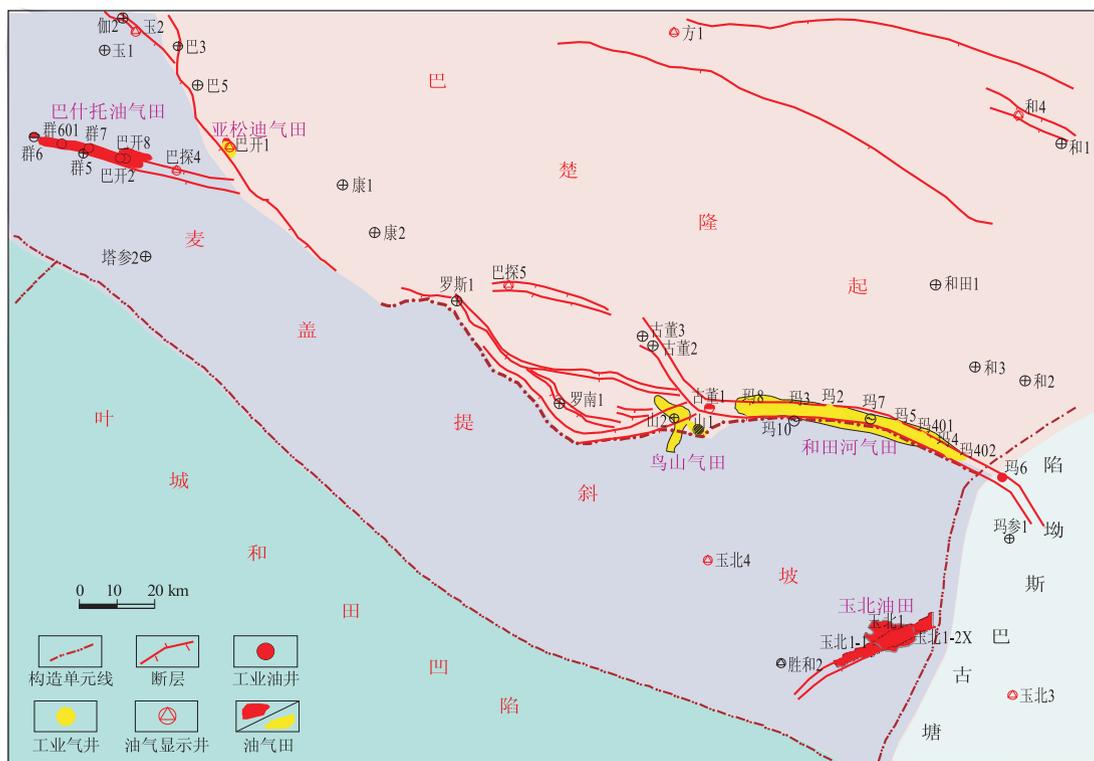


图 1 塔里木盆地巴楚—麦盖提地区主要油气田

Fig.1 Main oil and gas fields in Bachu-Maigaiti area of Tarim Basin

比和类比塔河奥陶系原油,旨在厘清巴楚—麦盖提地区主要油气藏海相原油的油源。

1 原油地球化学特征

从原油物理性质来看,玉北奥陶系油气藏和巴什托(普)油气田的原油物理性质差异较大。玉北 1 井原油为低凝、含硫、高蜡的中质油,密度为 0.916 3 g/cm³,含硫量 0.69%,含蜡量 6.63%,动力黏度为 90.87 mPa·s。巴什托油田原油主要为轻质油,密度分布于 0.789 2~0.830 3 g/cm³,含硫量为 0.08%~0.21%,含蜡量 1.05%~14.20%。这两类原油地球化学特征如下:

1.1 原油轻烃

原油中的轻烃含有丰富的地球化学信息,通过对轻烃组成结构的对比研究,可以很好地反映原油之间的亲缘和母质类型。从巴麦地区原油轻烃 C₇ 化合物组成的三角图来看(图 2),玉北 1 井奥陶系原油落在塔河油田奥陶系原油组群中,表明玉北 1 井原油与塔河原油具有一定相似性。巴什托多数原油正庚烷(nC₇)含量明显要高,相对含量达到 50%以上,反映原油的母质来源主要为陆棚相藻类和细菌。但巴什托地区的麦 3(C_{2x})、曲 1(C_{1b})原油甲基环己烷含量高,表明有机质类型相对较差。

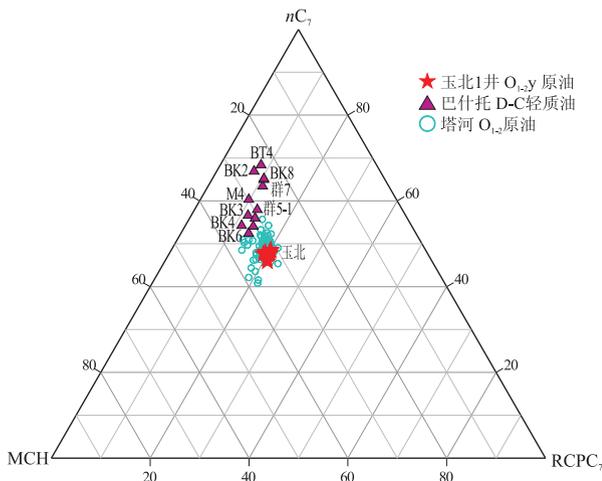


图 2 塔里木盆地塔西南地区原油轻烃 C₇ 组成特征

Fig.2 Light hydrocarbon C₇ composition characteristics of crude oils in southwestern Tarim Basin

1.2 原油饱和烃色谱

玉北 1 井奥陶系原油饱和烃色谱基线抬升明显,UCM“鼓包”明显,表明遭受过后期氧化或生物降解等后生变化;碳数主要分布范围为 nC₁₁~nC₃₇,饱和烃色谱形态分布呈双峰型,前峰主峰碳为 nC₁₈,后峰为 nC₂₉(图 3),且后峰部分具有明显的奇碳优势特征。与玉北 1 井原油遭受生物降解作用的中质油相比,巴什托与和田河原油主要为轻质—凝析油。从巴开 6 井和玛 4 井原油来看,正构

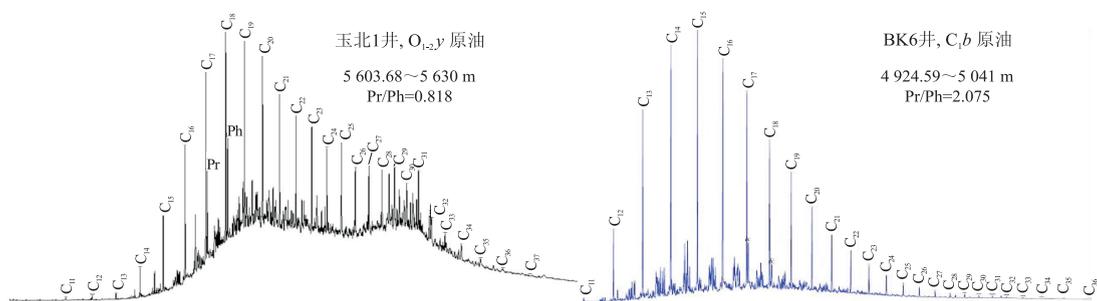


图3 塔里木盆地玉北地区玉北1井和巴开6井原油饱和烃色谱

Fig.3 Saturated hydrocarbon chromatogram of wells Yubei1 and Bakai 6 in Yubei area of Tarim Basin

烷烃主要分布范围为 $nC_{11} - nC_{30}$, 中低碳数正构烷烃优势明显, 饱和烃色谱图分布形态呈前峰型, 主峰碳均为 nC_{15} , 未见反映原油生物降解的 UCM“鼓包”(图3)。

从原油类异戊二烯烃分布来看, 玉北油气藏奥陶系原油具有低姥植比 ($Pr/Ph < 1.0$) 特征, Pr/Ph 值分布于 $0.82 \sim 0.99$, 与塔河油田奥陶系原油非常相近^[11-14]。巴什托油气田原油具有高姥植比 ($Pr/Ph > 1.3$) 特征, Pr/Ph 比值分布于 $1.17 \sim 2.5$, 平均值为 1.91, 反映其母质生源环境不同于塔河油田和玉北1井奥陶系原油。但属于同一构造带上的琼003井、BT4井、曲3井的原油则具有低姥植比的特点, 表明巴什托油气田原油总体为海相原油。

1.3 生物标志化合物反映的生源特征

从巴麦地区原油中 $5\alpha\alpha\alpha C_{27} - C_{28} - C_{29}$ 规则甾烷三角对比图表明(图4), 玉北和巴什托地区的海相原油的油源不同; 玉北1井奥陶系原油中的 $5\alpha\alpha\alpha C_{29}$ 甾烷在 $5\alpha\alpha\alpha C_{27} - C_{28} - C_{29}$ 规则甾烷中丰度最高, 相

对比例达到 70% 左右; 巴什托油气田的原油次之, 相对比例达到 50% ~ 65%, 其中 BK2、BK8、BK10、BT4 等井产自泥盆系的原油中 $5\alpha\alpha\alpha C_{29}$ 甾烷含量与塔河油田相近, 高含量的 C_{29} 甾醇可能归因于海相浮游植物藻类以及 $5\alpha\alpha\alpha C_{27} - C_{28} - C_{29}$ 规则甾烷系列相对丰度变化。从规则甾烷分布图上也可以看出玉北与塔河原油有一定的差别。曲1井 (C_{1b}) 和麦3井 (C_{2x}) 规则甾烷呈反“L”型分布, 五环萜烷以藿烷为主, 反映海陆交互特征。

1.4 芳烃反映的生源沉积环境

从反映原油生烃母质沉积环境的三芴系列化合物三角图(图5)可以看出, 玉北1井、塔河油田奥陶系原油与巴什托原油均以高硫芴、低氧芴为特点^[15-20], 反映生烃母质主要为强还原沉积环境, 有机质类型以腐泥型(I型)为主。玉北1井奥陶系原油具有低萘(4.1%)、低联苯(0.27%)、低氧芴(0.4%)、高三芳甾烷(2.7%)特征, 与之相比巴什托原油中萘(9.6%)、联苯(2.83%)、氧芴(1.56%)

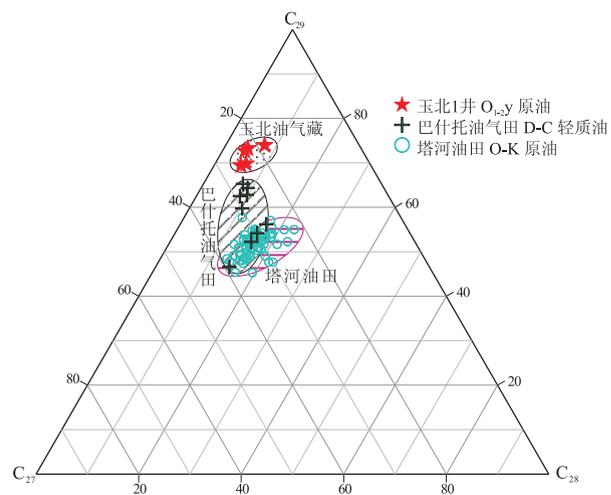


图4 塔里木盆地塔西南玉北1井、巴什托、和田河原油 $5\alpha\alpha\alpha C_{27} - C_{28} - C_{29}$ 甾烷分布

Fig.4 $5\alpha\alpha\alpha C_{27} - C_{28} - C_{29}$ distribution of crude oils from well Yubei 1, Bashituo and Hetianhe area in southwestern Tarim Basin

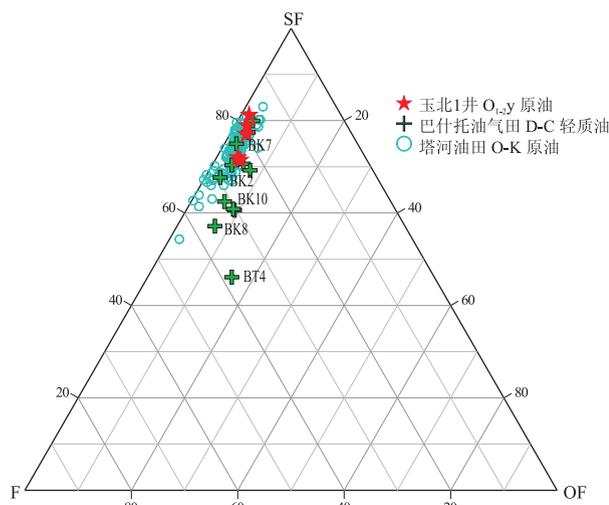


图5 塔里木盆地玉北地区玉北1井与巴什托油田原油芳烃中三芴系列化合物组成

Fig.5 Three fluorene series compounds in aromatic of well Yubei 1 and Bashituo in Yubei area of Tarim Basin

较高、三芳甾烷痕量或未检测到,反映巴什托原油与玉北1井奥陶系原油的生源存在差异。

2 油源对比

2.1 原油族群划分

采用原油碳同位素与姥植烷比值划分了巴楚—麦盖提地区原油族群。巴什托原油碳同位素是塔里木盆地海相原油中最轻的, $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-33.42\text{‰} \sim -34.7\text{‰}$,平均值为 -34.30‰ 。相比之下玉北地区奥陶系原油碳同位素较重, $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-32.29\text{‰} \sim -32.9\text{‰}$,平均值为 -32.65‰ 。根据原油碳同位素和 Pr/Ph 比值关系(图6),可以很好地区分巴什托油气田和玉北油藏原油。玉北油藏与塔河油田的原油落在同一区域,表明玉北油气藏和巴什托油气田的原油生烃母质不同,而与塔河油田的原油生烃母质有相似性^[21]。

2.2 烃源岩

从巴楚—麦盖提地区及周缘烃源岩发育情况来看,钻井揭示主要发育寒武系和石炭系烃源岩,奥陶系烃源岩不发育,在柯坪野外露头区发育寒武系和奥陶系海相烃源岩^[22-24]。

2.2.1 寒武系

巴楚—麦盖提地区钻遇寒武系的钻井集中于巴楚隆起,包括方1、和4、和田1、同1、巴探5、玛北1等井,除方1、和4井之外,其它钻井的寒武系绝大多数烃源岩样品的有机碳含量均小于0.2%,烃源岩不发育,而方1、和4井的中、下寒武统揭示了一套代表局限台地—潟湖相的较高丰度烃源岩。

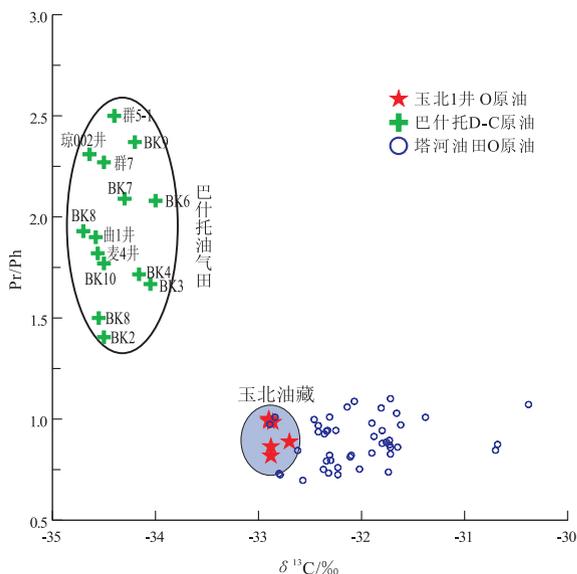


图6 塔里木盆地中西部地区原油族群划分

Fig.6 Ethnic division of crude oils in central and western Tarim Basin

其中和4井样品中发现丰富的球状甲藻,烃源岩 $w(\text{TOC})$ 为0.44%~1.54%, $w(\text{TOC}) > 1.0\%$ 的烃源岩厚度为108.5 m;方1井烃源岩 $w(\text{TOC})$ 值为0.49%~2.43%,平均值为0.91%,有机质类型以腐泥型(I型)为主。而邻近的巴探5井中下寒武统潟湖相烃源岩不发育,表明巴楚隆起寒武系局限台地—潟湖相烃源岩分布局限。

野外露头区寒武系烃源岩主要发育于柯坪隆起肖尔布拉克剖面,下寒武统玉尔吐斯组(ϵ_{1Y})实测地层厚度为9.2 m,岩性为黑色页岩或称碳质页岩。下部含磷未经风化的黑色碳质页岩具非常高的有机质丰度, $w(\text{TOC})$ 值达到13.89%~22.39%,平均值高达17.99%;上部黑色碳质页岩普遍含粉砂,其有机质含量比下部要低, $w(\text{TOC})$ 为1.87%~3.12%,平均值为2.42%,表明玉尔吐斯组为优质海相烃源岩。这套烃源岩在沙雅隆起沙西凸起星火1井钻遇,黑色碳质页岩有机质丰度高, $w(\text{TOC})$ 值分布于1.00%~9.43%,平均值为5.5%,有机显微组分中腐泥组为47.7%,藻类组占22.9%,以腐泥型(I型)有机质为主。研究表明,该套烃源岩发育的沉积相带为斜坡—陆棚相。

2.2.2 奥陶系

巴楚—麦盖提地区钻遇奥陶系的钻井较多,和3、和4、玛10、玛东1、巴东2、康1井、玉2、同1、和田1、BT6、玉北1等10余口钻井的烃源岩样品有机质丰度低,大部分样品的 $w(\text{TOC}) < 0.2\%$,为非烃源岩。

奥陶系烃源岩主要发育于柯坪隆起大湾沟剖面的中上奥陶统萨尔干组(O_{2-3s})和上奥陶统印干组(O_{3Y}),其中萨尔干组以黑色泥岩为主,有机质丰度较高,泥质岩类 $w(\text{TOC})$ 为0.55%~4.65%,平均1.92%,为好烃源岩;印干组有机质丰度较萨尔干组低, $w(\text{TOC})$ 为0.41%~1.06%,平均0.60%,为一般—较好烃源岩。烃源岩主要发育于台内洼地。

2.2.3 石炭系

巴楚—麦盖提地区钻井钻揭了石炭系卡拉沙依组(C_{1-2kl})砂泥岩段中的烃源岩,烃源岩发育于潟湖相或湖沼相沉积环境,为还原—弱氧化环境,主要岩性为深灰色、灰黑色泥岩,有机质丰度较高,巴楚隆起巴探5井烃源岩样品 $w(\text{TOC})$ 值分布于0.64%~1.42%,平均值达到1.015%;玛扎塔格构造玛参1井48件泥岩样品有机碳含量的平均值达到1.86%,氯仿沥青“A”含量平均值为 113.51×10^{-6} ;麦盖提斜坡玉北1井泥岩样品有机碳平均含量达到0.75%,最高可达2.0%,表明卡拉沙依组砂泥岩段发育较好—好烃源岩。二叠纪末大多烃源岩进

入成熟演化阶段,具备供烃能力。

2.3 油源对比

2.3.1 类异戊二烯烃

根据柯坪隆起野外露头区下寒武统玉尔吐斯组、中上奥陶统绝大多数烃源岩类异戊二烯烃中 Pr/Ph 比值普遍大于 1.0 的特点,玉尔吐斯组与中上奥陶统萨尔干组的烃源岩落入同一区域,与上奥陶统印干组特征区别明显(图 7)。仅从姥植比来看,巴什托原油与玉尔吐斯组、萨尔干组烃源岩更相近,玉北奥陶系原油与塔河原油很相近,可能具有相似的生源。

多年研究表明^[11-16],塔河油田油源主要为寒武系—中、下奥陶统烃源岩,进一步研究认为主要与寒武系—下奥陶统斜坡相烃源岩关系密切。因此,推测玉北 1 井奥陶系的油源可能来自与塔河油田类似的斜坡相烃源岩。

2.3.2 碳同位素

干酪根碳同位素最重,干酪根、原油及其族组分碳同位素的变化一般为 $\delta^{13}C_{\text{饱和烃}} < \delta^{13}C_{\text{芳烃}} < \delta^{13}C_{\text{非烃}} < \delta^{13}C_{\text{沥青质}} < \delta^{13}C_{\text{干酪根}}$ 。

巴楚—麦盖提地区及周缘寒武—侏罗系烃源岩的干酪根碳同位素随地层时代变新而变重。下寒武统玉尔吐斯组烃源岩干酪根碳同位素值最轻, $\delta^{13}C_{\text{干酪根}}$ 为 $-34.63\text{‰} \sim -33.83\text{‰}$,中、下寒武统烃源岩的 $\delta^{13}C_{\text{干酪根}}$ 为 $-31.76\text{‰} \sim -29.4\text{‰}$,中上奥陶统的萨尔干组和上奥陶统的印干组 $\delta^{13}C_{\text{干酪根}}$ 值分别为 -30.05‰ 和 -29.53‰ ,石炭—二叠系烃源岩 $\delta^{13}C_{\text{干酪根}}$

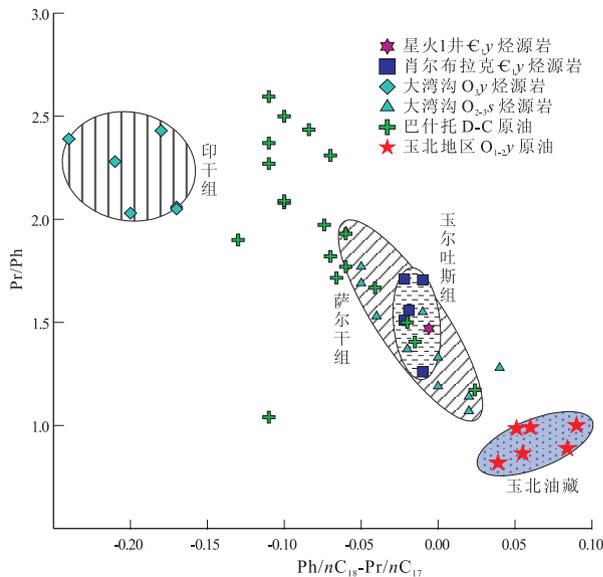


图 7 塔里木盆地巴楚—麦盖提地区原油和烃源岩 (Ph/nC₁₈-Pr/nC₁₇) 的关系

Fig.7 Pr/Ph ratio vs. Ph/nC₁₈-Pr/nC₁₇ value of crude oils and source rocks in Bachu-Maigaiti area of Tarim Basin

平均为 -24.96‰ 。根据有机质热演化生成油气的碳同位素分馏理论,其生成的原油碳同位素应该更轻。由此可见,对于巴什托油气田碳同位素普遍轻 (-34.4‰)的原油来说,仅有陆棚相下寒武统玉尔吐斯组烃源岩与之相对应($\delta^{13}C_{\text{干酪根}}$ 为 -34‰ 左右)。另外,巴什托油气田的麦 3(P)、曲 1(C_{1b})和麦 3(C_{2x})井原油碳同位素偏重($\delta^{13}C_{\text{原油}}$ 为 -31.34‰ 左右),可能来自海相类型偏差的油源。

玉北 1 井原油碳同位素较轻 (-32.65‰),与塔河油田原油相近^[12,21],而比巴什托主体原油碳同位素值重约 2‰。类异戊二烯烃、生物标志化合物以及芳烃组成等也显示,玉北 1 井原油和巴什托原油差异显著,因此二者应具有不同的油源。

2.3.3 生物标志化合物对比

巴什托主体原油中孕甾烷含量相对较高,规则甾烷/孕甾烷比值分布于 1.62~2.84,平均值 2.24。柯坪隆起下寒武统玉尔吐斯组和中上奥陶统萨尔干组烃源岩具孕甾烷含量高的特点。高含量的孕甾烷可能与强还原沉积环境有关,玉尔吐斯组和萨尔干组烃源岩样品中见到大量黄铁矿,反映了强还原沉积环境。早寒武世和中奥陶世庙坡期(相当于 Caradoc 期)均是全球性缺氧事件发生时期,造成沉积环境相对闭塞,有利于有机质的保存。由图 8 可见,巴什托原油与玉尔吐斯组烃源岩亲缘关系明显,而与萨尔干组烃源岩相差较远。玉北地区原油与塔河油田相近,推测其烃源岩为沉积环境与塔

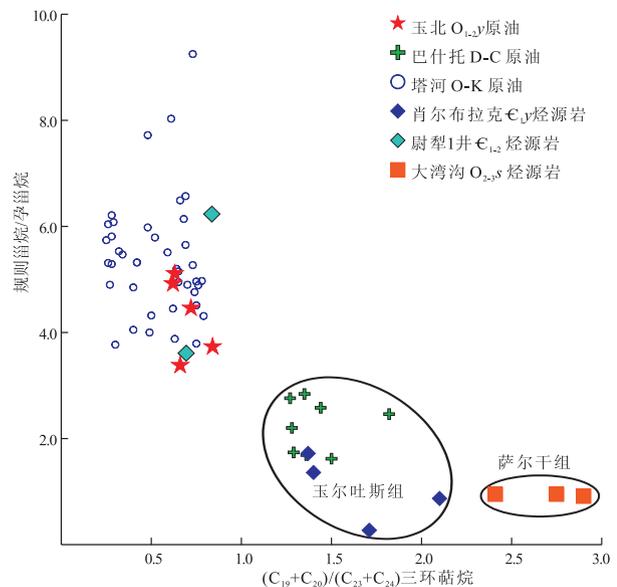


图 8 塔里木盆地玉北地区玉北 1 井、巴什托原油与寒武—奥陶系烃源岩甾萜烷对比

Fig.8 Steroid terpane of crude oils in well Yubei 1 and Bashituo and Cambrian-Ordovician source rocks in Yubei area of Tarim Basin

里木盆地东部寒武系—中下奥陶统斜坡相类似的寒武系,但受钻井以及地震资料制约,该烃源岩分布还有待进一步研究证实。

3 结论

1) 根据玉北地区原油地球化学特征分析,推测原油可能来自中下寒武统斜坡相烃源岩。

2) 巴什托油田原油可能来自盆地—陆棚相下寒武统烃源岩,石炭系储层中的部分原油来源于海陆交互相的石炭系烃源岩。

参考文献:

[1] 陈强路,周凌方,张根发,等.塔里木盆地巴楚—麦盖提地区油气勘探领域评价[J].石油实验地质,2009,31(4):343-349.

[2] 丁勇,宫继萍,王辉.塔里木盆地西南坳陷生油岩综合评价[J].石油实验地质,1999,21(4):336-339.

[3] 丁勇,邱芳强,李国政.塔里木盆地西南坳陷油气源对比分析[J].新疆地质,2000,18(1):61-67.

[4] 高志农.塔里木盆地巴楚隆起烃源岩特征及其油气源研究[J].石油实验地质,2000,22(4):319-324.

[5] 马红强,王恕一,蔺军.塔里木盆地巴楚—麦盖提地区油气运聚与成藏[J].石油实验地质,2006,28(3):243-247.

[6] 顾忆,邵志兵,赵明,等.塔里木盆地巴楚隆起油气保存条件与勘探方向[J].石油实验地质,2011,33(1):54-59.

[7] 严继新,赵习森,何云峰,等.塔里木盆地巴什托油气田石炭系碳酸盐岩沉积相特征[J].石油实验地质,2011,33(4):353-358.

[8] 陈践发,苗忠英,张晨,等.塔里木盆地塔北隆起天然气轻烃地球化学特征及应用[J].石油与天然气地质,2010,31(3):271-276.

[9] 丁勇,彭守涛,李会军.塔河油田及塔北碳酸盐岩油藏特征与

成藏主控因素[J].石油实验地质,2011,33(5):488-494.

[10] 苏江玉,俞仁连.对塔河油田油气成藏地质研究若干问题的思考[J].石油实验地质,2011,33(2):105-112.

[11] 顾忆.塔里木盆地北部塔河油田油气藏成藏机制[J].石油实验地质,2000,22(4):307-312.

[12] 顾忆,黄继文,邵志兵.塔河油田奥陶系油气地球化学特征与油气运移[J].石油实验地质,2003,25(6):746-750.

[13] 赵靖舟.塔里木盆地北部寒武—奥陶系海相烃源岩重新认识[J].沉积学报,2001,19(1):117-124.

[14] 王廷栋.轮南地区油气成藏机制研究[R].乌鲁木齐:塔里木油田分公司勘探开发研究院,2002.

[15] 孙永革,肖中尧,徐世平,等.塔里木盆地原油中芳基类异戊二烯烃的检出及其地质意义[J].新疆石油地质,2003,25(2):215-218.

[16] 赵宗举,周新源,郑兴平,等.塔里木盆地主力烃源岩的诸多证据[J].石油学报,2005,26(3):10-15.

[17] 刘高波,施泽进,余晓宇,等.巴楚—麦盖提的区域构造演化与油气分布规律[J].成都理工大学学报:自然科学版,2004,31(2):157-161.

[18] 邵志兵,吕海涛,耿锋,等.塔里木盆地麦盖提地区石炭系油藏地球化学特征[J].石油与天然气地质,2010,31(1):84-90.

[19] 赵斌,邓炜.西北油田麦盖提斜坡油气前景[J].科技创新导报,2011(14):60.

[20] 朱扬明,张洪波,傅家谟,等.塔里木不同成因原油芳烃组成和分布特征[J].石油学报,1998,19(3):33-37.

[21] 王传刚,王铁冠,何发歧,等.塔河油田原油稳定碳同位素特征及其成藏意义[J].新疆石油地质,2005,26(2):155-157.

[22] 朱俊章,包建平.塔里木盆地寒武系—奥陶系海相烃源岩地球化学特征[J].海相油气地质,2000,5(3/4):55-59.

[23] 赵孟军,张宝民,边立曾,等.奥陶系类Ⅲ型烃源岩及其生成天然气的特征[J].科学通报,1999,44(21):2333-2336.

[24] 马安来,金之钧,张水昌,等.塔里木盆地寒武系—奥陶系烃源岩的分子地球化学特征[J].地球化学,2006,35(6):593-601.

(编辑 黄娟)

(上接第 661 页)

[4] 李嵘,张娣,朱丽霞.四川盆地川西坳陷须家河组砂岩致密化研究[J].石油实验地质,2011,33(3):274-281.

[5] 盘昌林,刘树根,马永生,等.川东北地区须家河组天然气成藏主控因素分析[J].断块油气田,2011,18(4):418-423.

[6] 尹正武,凡睿,陈祖庆,等.生物礁滩岩性气藏含气面积的圈定方法:以元坝气田长兴组气藏为例[J].石油实验地质,2012,34(5):499-505.

[7] 冯明刚,严丽,王雪玲,等.元坝气田长兴组气藏有效储层物性下限标准研究[J].石油实验地质,2012,34(5):535-538.

[8] 林小兵,刘莉萍,魏力民.川西丰谷地区须四段钙屑砂岩含气

储层预测[J].西南石油大学学报,2007,29(4):82-84.

[9] 郑荣才,魏钦廉,高红灿,等.川西坳陷中段须四段钙屑砂岩储层特征及有利区块预测[J].成都理工大学学报:自然科学版,2007,34(5):489-496.

[10] 林煜,吴胜和,徐樟有,等.川西丰谷构造须家河组四段钙屑砂岩优质储层控制因素[J].天然气地球科学,2012,23(4):691-699.

[11] 曾小英,张小青,钟玉梅.川西坳陷中段须家河组四段钙屑砂岩气层的成因[J].沉积学报,2007,25(6):896-901.

[12] 王多云,郑希民,李凤杰,等.低孔渗油气富集区优质储层形成条件及相关问题[J].天然气地球科学,2003,14(2):87-91.

(编辑 徐文明)