

塔里木盆地巴楚隆起盐下白云岩中油气来源

曹自成¹, 朱秀香², 吴 鲜², 徐勤琪², 路清华³, 李建交⁴, 蒋海军²

(1. 中国石化 西北油田分公司, 乌鲁木齐 830011;

2. 中国石化 西北油田分公司 勘探开发研究院, 乌鲁木齐 830011;

3. 中国石化 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126;

4. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要: 勘探研究表明, 塔里木盆地巴楚隆起不发育下寒武统主力烃源岩, 但该区 MB1 井在下寒武统见较好油气显示。为了明确 MB1 井的油源, 评价巴楚隆起的勘探潜力, 对 MB1 井下寒武统吾松格组油气显示段岩心抽提物进行了地球化学分析, 进一步开展了油—油、油—源对比等研究, 揭示了油气物质的成因特征与来源。结果表明, 抽提物具有典型的塔里木盆地海相原油的地球化学特征, 即饱和和烃色谱图为单峰前峰型, 正构烷烃系列保存完整, 谱图基线平整、未见明显的“鼓包”, Pr/Ph 比值为 0.89, 三环萜烷系列的相对丰度高于藿烷系列, $C_{27}-C_{28}-C_{29}\alpha\alpha\alpha 20R$ 规则甾烷具有明显的“V”字型分布特征, 原油碳同位素值为 -30.8% , 三萜系列化合物表现为明显的硫萜优势, 指示其来源于强还原沉积环境的腐泥型生烃母质, 处于高成熟演化阶段。MB1 井下寒武统油显示与玉北 1 条带奥陶系原油同源, 均来自于下寒武统烃源岩, 推测巴楚隆起 MB1 井下寒武统油气来自周边下寒武统烃源岩或古油藏, 从而提升了该区寒武系的勘探潜力。

关键词: 油显示; 地球化学特征; 油源对比; 寒武系; 巴楚隆起; 塔里木盆地

中图分类号: TE122.114

文献标识码: A

Source of hydrocarbons discovered from Cambrian sub-salt dolomite in Bachu uplift area, Tarim Basin

CAO Zicheng¹, ZHU Xiuxiang², WU Xian², XU Qinqi², LU Qinghua³, LI Jianjiao⁴, JIANG Haijun²

(1. Northwest Oilfield Company, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China;

2. Exploration and Production Research Institute of Northwest Oilfield Company, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China;

3. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China;

4. SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 102206, China)

Abstract: Exploration experiences have showed that the main source rocks of the Lower Cambrian have not been developed in the Bachu uplift; however, the well MB1 in this area had a good oil and gas showing in the Lower Cambrian. To clarify the hydrocarbon source of well MB1 and evaluate the exploration potential of the Bachu uplift, the core extracts from the oil and gas display section of the Lower Cambrian Wusongge'er Formation of well MB1 were studied here by using of geochemical analysis, moreover, oil-oil and oil-source correlations have also been carried out. The saturated hydrocarbon fraction of extracts showed a typical signature which is consistent with marine crude oil in the Tarim Basin, of which the *n*-alkanes have a single-peak pre-peak distribution, the series is preserved intact and there was no apparent “hump” in the baseline, the ratio of Pr/Ph was 0.89, the abundance of the tricyclic terpanes was higher than that of the hopanes, the $C_{27}-C_{28}-C_{29}\alpha\alpha\alpha 20R$ regular steranes had a typical “V” shape, the carbon isotope value of crude oil is -30.8% , and the trifluorene compounds were obviously override thiofluorene. It then indicates that they were derived from the saprolite-type sources with a strongly reducing sedimentary environment, moreover, the organic matters are high mature. The Lower Cambrian oil showed in well MB1 have the same origin as the Ordovician crude oil in the Yubei 1 belt, and both of them probably came from the Lower Cambrian source rocks. It was inferred that the Lower Cambrian oil and gas in well MB1 came from the peripheral Lower Cambrian source rocks or paleo-oil reservoirs, which enhanced the exploration potential of Cambrian in the Bachu uplift.

Key words: oil shows; geochemical characteristics; oil-source correlation; Cambrian; Bachu uplift; Tarim Basin

收稿日期: 2020-06-11; 修订日期: 2021-06-01。

作者简介: 曹自成 (1979—), 男, 高级工程师, 从事油气勘探综合研究与评价。E-mail: caozc.xbsj@sinopec.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目“海相深层油气富集机理与关键工程技术基础研究”(U19B6003-02)资助。

MB1 井是位于塔里木盆地巴楚隆起的一口重点探井(图 1),其目的是为了探索巴楚隆起寒武系盐间灰岩及盐下白云岩的储层发育特征及其含油气性,评价中下寒武统烃源岩发育特征。该井完钻层位为前震旦系,完钻井深 6 476.89 m。钻井在寒武系见多层油气显示,其中在上寒武统下丘里塔格群(5 206~5 207 m)见良好气测显示,槽面见针尖状气泡,占槽面 5%;在下寒武统吾松格尔组(6 180.38~6 184.41 m)见 2.9 m² 层荧光显示,2.13 m¹层油迹显示。

近年来,通过对近 30 000 km 的地震剖面 and 500 余口钻井资料分析,认识到下寒武统烃源岩分布广泛、有机碳含量高,是塔里木盆地台盆区最主要的优质烃源岩^[1-3]。研究认为,在大埋深、高压、低地温梯度、晚期快速稳定深埋等因素的共同作用下,该套烃源岩在燕山—喜马拉雅期仍处于高成熟液态油—凝析油气规模生烃阶段^[4],为寒武系—奥陶系晚期成藏奠定了坚实的资源基础。塔里木盆地寒武系油气勘探在塔北、塔中、柯坪隆起均取得突破^[5-10],目前尚未有工业油气发现的巴楚隆起是今后盆地西部寒武系勘探的重点地区。巴楚隆起为前寒武纪古隆起, F1、H4、T1、XH1、BT5、

MB1 等多口钻井揭示寒武系底部不发育玉尔吐斯组。巴楚隆起 MB1 井在下寒武统取心见良好油气显示,表明该区在该领域可能具有良好的勘探前景。本文以 MB1 井油显示地球化学特征分析为基础,通过油—油、油—源对比,探究 MB1 井油来源,推测其油气成藏模式,以期对巴楚隆起寒武系油气勘探提供参考。

1 样品与地质背景

巴楚隆起位于塔里木盆地西南部,北邻阿瓦提坳陷和柯坪隆起,南邻麦盖提斜坡,东邻塘古巴斯坳陷与卡塔克古隆起,西邻柯坪隆起(图 1)。隆起区构造活动剧烈,区内北西向大型断裂较发育,同时也发育北东向断裂,规模相对北西向要小。巴楚隆起区南部边界为色力布亚—玛扎塔格断裂,西北部边界为阿恰断裂,西部边界为柯坪—沙井子断裂,东北部边界为吐木休克断裂^[11-12]。区内地层自下而上发育震旦系、寒武系、奥陶系、志留系、泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系以及新生界。其中,中南部 BT5—MB1—Ht1 井区缺失上震旦统和下寒武统玉尔吐斯组;全区缺失中奥陶统、白垩系、三叠系和部分古近系。

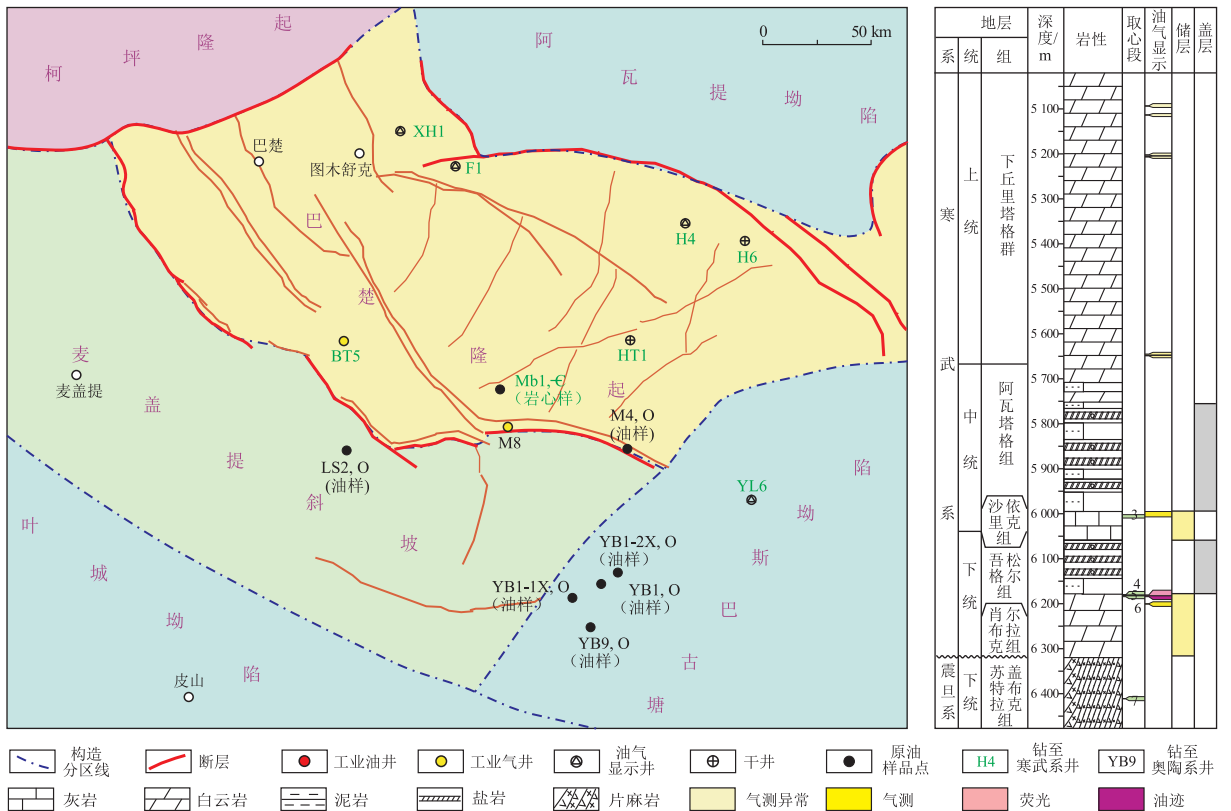


图 1 塔里木盆地巴楚隆起构造位置、样品位置及 MB1 井地层综合柱状图

Fig.1 Tectonic and sample locations of Bachu uplift area in Tarim Basin (left), and comprehensive stratigraphic histogram of well MB1(right)

本次研究包括巴楚隆起 1 件岩心样品、隆起周缘的 6 口井奥陶系原油样品和柯坪露头苏盖特布拉克剖面下寒武统玉尔吐斯组黑色页岩(表 1)。岩心样品和柯坪露头黑色页岩是经 30 min 清水浸泡后抽提有机物;原油样品采用常规方法处理进行分析,开展了饱和和烃色谱—色质、芳烃、轻烃指纹、碳同位素等有机地球化学分析,全部分析测试在中国石化油气成藏重点实验室(无锡)完成。

2 油/岩心抽提物地球化学特征

2.1 饱和烃色谱特征

MB1 井下寒武统吾松格尔组油显示抽提物饱和和烃色谱均为单峰前峰型,正构烷烃系列保存完整,碳数分布于 nC_{11} — nC_{37} ,主峰碳为 C_{16} — C_{19} (图 2)。谱图基线平整,没有明显“鼓包”, $\sum C_{21-}/\sum C_{22+}$ 比值为 1,指示油未经历生物降解作用。奇偶优势比(OEP)值为 1.079,非常接近于平衡值 1,反映奇偶碳优势非常微弱,指示油显示抽提物处于成熟—高成熟演化阶段。姥植比(Pr/Ph)可以有效地反映生源沉积环境的氧化还原性,是确定原油成因的重

要参数之一^[13-14]。MB1 井吾松格尔组油显示抽提物中 Pr/ nC_{17} 值为 0.120,Ph/ nC_{18} 值为 0.150,Pr/Ph 为 0.893,植烷含量占优势,指示油显示生烃母质沉积环境为强还原环境。

2.2 甾萜类化合物特征

2.2.1 规则甾烷

根据 MB1 井抽提原油饱和和烃色质 m/z 217 谱图(图 3)中原油甾烷的分布,下寒武统油显示抽提物原油中 $5\alpha\alpha\alpha$ - C_{27} 、 C_{28} 、 C_{29} 规则甾烷的分布呈明显的“V”字型,其中 $5\alpha\alpha\alpha$ - $20R$ - C_{28} 规则胆甾烷含量相对较低,占比为 14.89%, $5\alpha\alpha\alpha$ - $20R$ - C_{27} 和 $5\alpha\alpha\alpha$ - $20R$ - C_{29} 规则甾烷含量相对较高,分别为 39.85% 和 45.26%。通常规则甾烷组成特征中 C_{29} 甾烷优势被认为是陆相有机质输入的标志,但陆相高等植物在泥盆纪才开始大面积繁盛,因此早古生代和前寒武纪的海相石油和源岩中的 C_{29} 甾烷优势来源于海洋藻类已达到共识,且塔里木盆地寒武系高含量的 C_{29} 甾烷与浮游绿藻有关^[15]。由此推测,MB1 井寒武系抽提原油来源于水生浮游藻类,分析认为 MB1 井下寒武统的原油母质类型可能为腐泥型。

表 1 样品信息表

Table 1 Sample information

序号	构造位置	样品编号	采样井或露头剖面	层位	样品类型
1	巴楚隆起	MB1-1	MB1	吾松格尔组(ϵ_1w)	抽提物
2	玉北地区	YB1-1	YB1	鹰山组($O_{1-2}y$)	原油
3	玉北地区	YB1-1X-1	YB1-1X	鹰山组($O_{1-2}y$)	原油
4	玉北地区	YB1-2X-1	YB1-2X	鹰山组($O_{1-2}y$)	原油
5	玉北地区	YB9-1	YB9	鹰山组($O_{1-2}y$)	原油
6	巴楚隆起	M4-1	M4	奥陶系(O)	原油
7	巴楚隆起	LS2-1	LS2	奥陶系(O)	原油
8	柯坪露头	苏盖特布拉克剖面-1	苏盖特布拉克剖面	玉尔吐斯组(ϵ_1y)	抽提物

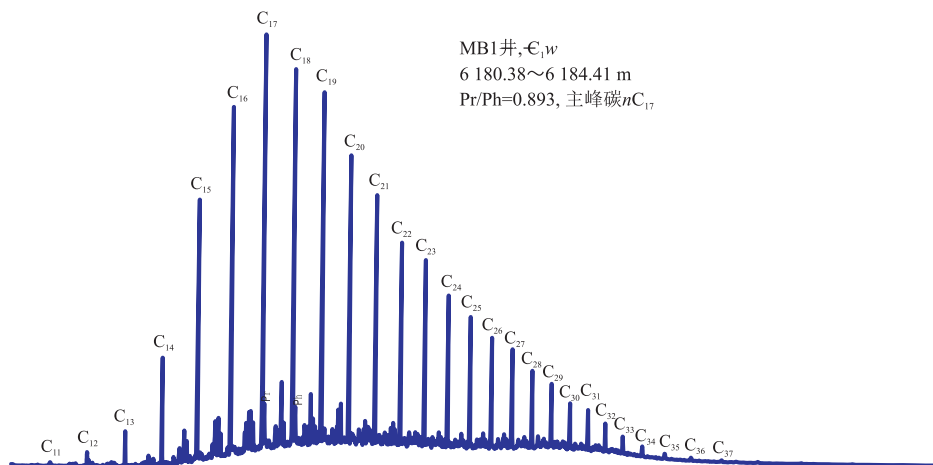


图 2 塔里木盆地巴楚隆起 MB1 井寒武系岩心油显示饱和和烃色谱

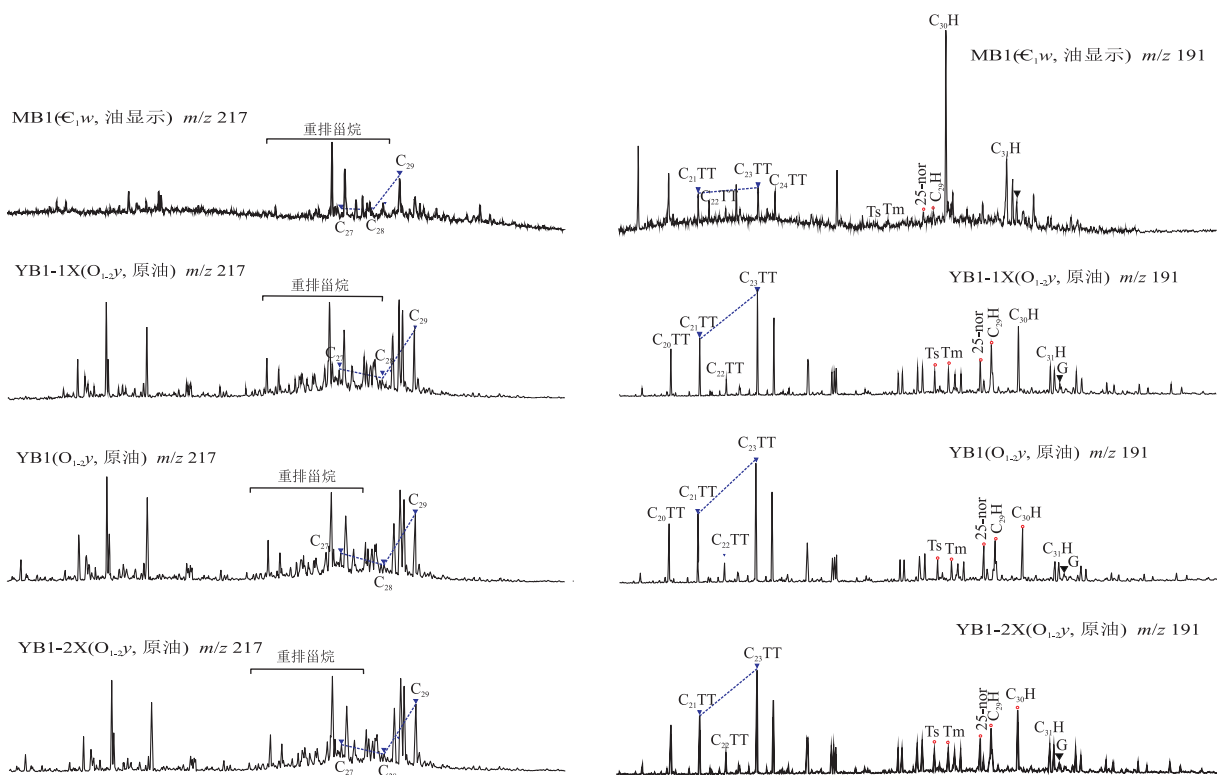


图 3 塔里木盆地巴楚隆起区寒武系油显示与玉北奥陶系原油对比
Fig.3 Comparison of biomarker distribution between Cambrian oil shows of Bachu uplift and Ordovician crude oil of Yubei area, Tarim Basin

2.2.2 萜烷类化合物

原油中含有丰富的萜烷类化合物, C₁₉—C₂₇长链三环萜烷主要来自海相烃源岩及其所生的原油中, 有的学者认为长链三环萜烷类化合物可能来源于水生藻类^[16]。从 MB1 井吾松格尔组油显示饱和烃色谱图(图 3)中原油甾烷的分布可见, 其萜烷系列化合物中三环萜烷系列化合物丰度高于藿烷系列; 在三环萜烷中, C₂₁TT/C₂₃TT (C₂₁三环萜烷/C₂₃三环萜烷) 比值为 0.88, C₂₃TT 的丰度占优势(表 2), 指示油显示生烃母质沉积环境为海相沉积环境。藿烷系列化合物中的 18α(H)-22, 29,

30-三降藿烷(Ts)和 17α(H)-22, 29, 30-三降藿烷(Tm)的相对含量比值可以反映原油热演化程度, 伽马蜡烷/C₃₀藿烷比值可以侧面反映烃源岩沉积环境。MB1 井 Ts/(Ts+Tm) 指标为 0.6, 指示其演化程度较高, 处于高热演化成熟阶段; 伽马蜡烷/C₃₀藿烷比值为 0.27, 指示其烃源岩沉积环境为咸水环境(表 2)。

2.3 油显示原油及组分碳同位素

原油及族组分碳同位素组成继承其母源有机质的组成, 尤其芳烃同位素受热演化程度、沉积环境等影响较小, 能有效反映原油成因^[3,14-18]。MB1 井

表 2 塔里木盆地巴楚隆起 MB1 井寒武系岩心抽提物与玉北奥陶系原油生标参数对比

Table 2 Biomarker comparison between Cambrian core extracts of well MB1 of Bachu uplift and Ordovician crude oils of Yubei area, Tarim Basin

井位或露头剖面	层位	类型	三类规则甾烷相对含量/%			Ts/(Ts+Tm)	重排甾烷/规则甾烷	C ₂₁ /C ₂₃ 三环萜烷	伽马蜡烷/C ₃₀ 藿烷
			C ₂₇ ααα20R	C ₂₈ ααα20R	C ₂₉ ααα20R				
MB1	€ _{1w}	抽提物	39.85	14.89	45.26	0.60	3.03	0.88	0.27
YB1	O _{1-2Y}	原油	23.49	9.97	66.54	0.48	0.68	0.55	0.21
YB1-1X	O _{1-2Y}	原油	16.60	9.60	73.80	0.44	0.87	0.53	0.16
YB1-2X	O _{1-2Y}	原油	18.80	10.10	71.10	0.49	0.58	0.56	0.18
YB9	O _{1-2Y}	原油	18.50	10.50	71.00	0.64	0.88	0.66	0.24
M4	O	原油	35.60	22.80	41.60	0.58	0.17	0.65	0.24
LS2	O	原油	41.40	23.50	50.10	0.62			0.23
苏盖特布拉克剖面	€ _{1Y}	抽提物	35.00	30.00	36.00	0.44	0.17	0.79	0.30

吾松格尔组油显示抽提物原油和饱和烃、芳烃、非烃、沥青质的碳同位素均大于 $-32‰$,原油、饱和烃、芳烃、非烃、沥青质的 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值分别为 $-30.8‰$, $-31.5‰$, $-29.9‰$, $-29.7‰$, $-28.9‰$ 。

2.4 芳烃组成特征

芳烃组分中“三芴”系列(硫芴—二苯并噻吩、芴—吡咯类化合物、氧芴—二苯并呋喃)被认为是烃源岩沉积环境的良好指标,硫芴系列含量通常指示还原沉积环境,而氧芴则指示偏氧化的还原环境^[19-20]。MB1井下寒武统油显示抽提物原油“三芴”系列化合物中,硫芴占比76.3%,氧芴占比4.7%,芴占比18.9%,硫芴占决定优势,指示原油形成于强还原的沉积环境。

3 油气来源分析

MB1井在吾松格尔组钻遇良好油气显示,证实该区寒武系经历了油气成藏过程。将MB1井寒武系岩心抽提物与邻区的玉北地区、和田河地区及LS2井奥陶系的原油进行油—油对比,研究MB1井原油来源,这对于分析巴楚隆起油气成藏模式、评价寒武系勘探潜力具有重要意义。丁勇等^[21]通过玉北地区奥陶系原油与XH1井寒武系玉尔吐斯组烃源岩、肖尔布拉克剖面玉尔吐斯组烃源岩、大湾沟下奥陶统烃源岩油源的对比研究,认为玉北地区奥陶系原油来源于中下寒武统斜坡相烃源岩。

原油及族组分碳同位素组成特征是生烃母质类型、沉积环境和热演化程度的综合反映,广泛应用于油源对比工作。MB1井寒武系岩心抽提物与周缘地区原油及组分碳同位素分布特征(图4)表明,从玉北地区—MB1井—LS2井—和田河气田M4井,碳同位素值呈逐渐变重的趋势,其中MB1井、LS2井及和田河气田M4井原油碳同位素分布特征相似,与玉北地区原油碳同位素值差异较大。前

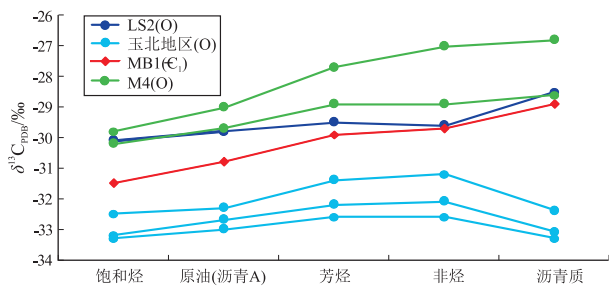


图4 塔里木盆地巴楚隆起MB1井寒武系岩心抽提物与周缘原油碳同位素特征分布

Fig.4 Carbon isotope comparison of peripheral crude oil and Cambrian core extracts from well MB1, Bachu uplift area, Tarim Basin

人^[21-23]研究结果表明,LS2井、和田河地区和玉北地区原油均为寒武系来源,且和田河地区及LS2井原油遭受过TSR改造作用,推测MB1井寒武系岩心抽提物同样来源于寒武系,不同地区样品碳同位素差异主要受控于热演化程度及后生蚀变的影响。

根据原油饱和和烃色谱图Pr/C₁₇—Ph/C₁₈图版分析,MB1井寒武系抽提物与玉北地区、LS2井及M4井奥陶系原油的母质类型均为藻类干酪根类型(图5),同样指示相似的母源特征,成熟度较高。

根据原油甾烷、萜烷的分布(图3,表2),可见MB1井寒武系抽提物、玉北地区奥陶系原油、苏盖特布拉克剖面寒武系玉尔吐斯组烃源岩具有较好的亲缘性,并具有以下几个特征:①C₂₇—C₂₈—C₂₉规则甾烷系列化合物中呈C₂₉规则甾烷优势,呈明显不规则“V”字型形态,在塔里木盆地这种较高含量的C₂₉规则甾烷分布特征,表明生烃母质为水生低等藻类;②萜烷系列化合物含量丰富,明显高于藿烷系列化合物,且三环萜烷系列中C₂₃三环萜烷含量较高,C₂₁TT/C₂₃TT值均小于1,其中MB1井寒武系抽提物、玉北地区奥陶系原油、苏盖特布拉克剖面玉尔吐斯组烃源岩C₂₁TT/C₂₃TT分别为0.88,0.53~0.66,0.79;③具有较高含量的伽马蜡烷,伽马蜡烷指数在0.2左右,其中MB1井寒武系抽提物、玉北地区奥陶系原油、苏盖特布拉克剖面玉尔吐斯组烃源岩伽马蜡烷/C₃₀藿烷比值分别为0.27,0.16~0.24,0.295,指示生烃母质的沉积环境相似,为咸水、还原沉积环境;④Ts/(Ts+Tm)是反映热演化程度的良好参数,MB1井寒武系抽提物Ts/(Ts+Tm)值为0.6,玉北地区奥陶系原油该参数为0.44~0.64,苏盖特布拉克剖面玉尔吐斯组烃源岩为0.44,表明不同地区成熟度存在差异。

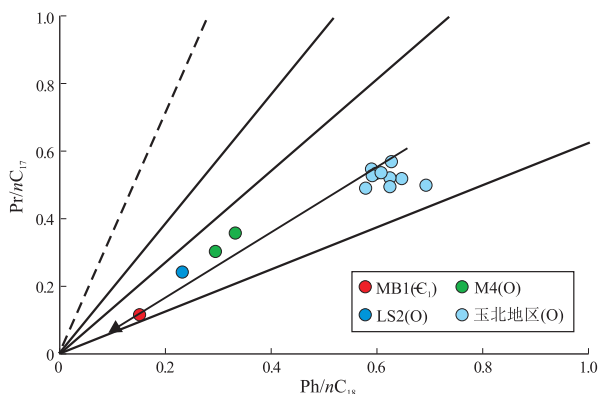


图5 塔里木盆地巴楚隆起MB1井寒武系抽提物及周缘原油干酪根类型与成熟度识别图版

Fig.5 Kerogen type and maturity recognition of peripheral crude oil and Cambrian core extracts from well MB1, Bachu uplift area, Tarim Basin

综上所述,MB1井吾松格组岩心抽提物与玉北地区奥陶系原油和玉尔吐斯组烃源岩具有较好亲缘性,指示MB1井吾松格组油气来自下寒武统玉尔吐斯组烃源岩。同时,MB1井吾松格组油气显示段之上发育厚层膏盐岩盖层,其封盖性能优越,膏盐岩之下的油气不可能来自膏盐岩之上的烃源岩。

巴楚隆起不发育下寒武统玉尔吐斯组烃源岩,而其周边均发育该套优质烃源岩。MB1井在下寒武统钻遇了来自下寒武统烃源岩生成的油气,说明巴楚隆起周边下寒武统烃源岩生成的油气或古油藏具备侧向运移至此的条件,从而提升了巴楚隆起寒武系的勘探潜力。开展寒武系成藏期油气优势输导方向研究,在油气优势输导方向上寻找有效圈闭是巴楚隆起寒武系油气勘探的目标。

4 结论

(1)MB1井油显示的饱和烃色谱图为单峰前峰型,正构烷烃系列保存完整,谱图基线平整,未见明显的“鼓包”;Pr/Ph比值为0.893, $C_{21}TT/C_{23}TT$ 小于1,三环萜烷系列的丰度高于藿烷系列, $C_{27}-C_{28}-C_{29}\alpha\alpha\alpha 20R$ 规则甾烷表现为 C_{29} 甾烷优势明显不对称的“V”字型;原油碳同位素中等,三萜系列化合物表现为明显的硫芴优势,指示该油显示属于形成于还原沉积环境的海相原油。

(2)MB1井寒武系抽提物与周缘和田河地区、LS2井、玉北地区奥陶系原油整体地球化学面貌相似,母质类型相同,均为藻类干酪根型;原油甾烷、萜烷分布特征上,MB1井寒武系抽提物与玉北地区奥陶系原油、苏盖特布拉克剖面寒武系玉尔吐斯组烃源岩具有较好的亲缘性,指示MB1井寒武系原油可能来自下寒武统玉尔吐斯组烃源岩。

参考文献:

- [1] 焦方正.塔里木盆地顺北特深碳酸盐岩断溶体油气藏发现意义与前景[J].石油与天然气地质,2018,39(2):207-216.
JIAO Fangzheng.Significance and prospect of ultra-deep carbonate fault-karst reservoirs in Shunbei area,Tarim Basin[J].Oil & Gas Geology,2018,39(2):207-216.
- [2] 漆立新.塔里木盆地顺北超深断溶体油藏特征与启示[J].中国石油勘探,2020,25(1):102-111.
QI Lixin.Characteristics and inspiration of ultra-deep fault-karst reservoir in the Shunbei area of the Tarim Basin[J].China Petroleum Exploration,2020,25(1):102-111.
- [3] 谷茸,云露,朱秀香,等.塔里木盆地顺北油田油气来源研究[J].石油实验地质,2020,42(2):248-254.
GU Rong,YUN Lu,ZHU Xiuxiang,et al.Oil and gas sources in

Shunbei Oilfield,Tarim Basin[J].Petroleum Geology & Experiment,2020,42(2):248-254.

- [4] 顾忆,万旸璐,黄继文,等.“大埋深、高压”条件下塔里木盆地超深层油气勘探前景[J].石油实验地质,2019,41(2):157-164.
GU Yi,WAN Yanglu,HUANG Jiwen,et al.Prospects for ultra-deep oil and gas in the “deep burial and high pressure” Tarim Basin[J].Petroleum Geology & Experiment,2019,41(2):157-164.
- [5] 王招明,谢会文,陈永权,等.塔里木盆地中深1井寒武系盐下白云岩原生油气藏的发现与勘探意义[J].中国石油勘探,2014,19(2):1-13.
WANG Zhaoming,XIE Huiwen,CHEN Yongquan,et al.Discovery and exploration of Cambrian subsalt dolomite original hydrocarbon reservoir at Zhongshen-1 well in Tarim Basin[J].China Petroleum Exploration,2014,19(2):1-13.
- [6] 翟晓先,顾忆,钱一雄,等.塔里木盆地塔深1井寒武系油气地球化学特征[J].石油实验地质,2007,29(4):329-333.
ZHAI Xiaoxian,GU Yi,QIAN Yixiong,et al.Geochemical characteristics of the Cambrian oil and gas in well Tashen 1,the Tarim Basin[J].Petroleum Geology & Experiment,2007,29(4):329-333.
- [7] 田军.塔里木盆地油气勘探成果与勘探方向[J].新疆石油地质,2019,40(1):1-11.
TIAN Jun.Petroleum exploration achievements and future targets of Tarim basin[J].Xinjiang Petroleum Geology,2019,40(1):1-11.
- [8] 张天付,黄理力,倪新锋,等.塔里木盆地柯坪地区下寒武统吾松格组岩性组合及其成因和勘探意义:亚洲第一深井轮探1井突破的启示[J].石油与天然气地质,2020,41(5):928-940.
ZHANG Tianfu,HUANG Lili,NI Xinfeng,et al.Lithological combination,genesis and exploration significance of the Lower Cambrian Wusonggeer Formation of Kalpin area in Tarim Basin:Insight through the deepest Asian onshore well-Well Luntan 1[J].Oil & Gas Geology,2020,41(5):928-940.
- [9] 王玉伟,陈红汉,郭会芳,等.塔里木盆地顺1走滑断裂带超深储层油气充注历史[J].石油与天然气地质,2019,40(5):972-989.
WANG Yuwei,CHEN Honghan,GUO Huifang,et al.Hydrocarbon charging history of the ultra-deep reservoir in Shun 1 strike-slip fault zone,Tarim Basin[J].Oil & Gas Geology,2019,40(5):972-989.
- [10] 杨海军,李勇,唐雁刚,等.塔里木盆地克拉苏盐下深层大气田的发现[J].新疆石油地质,2019,40(1):12-20.
YANG Haijun,LI Yong,TANG Yan'gang,et al.Discovery of Kelasu subsalt deep large gas field,Tarim basin[J].Xinjiang Petroleum Geology,2019,40(1):12-20.
- [11] 马庆佑,吕海涛,蒋华山,等.塔里木盆地台盆区构造单元划分方案[J].海相油气地质,2015,20(1):1-9.
MA Qingyou,LY Haitao,JIANG Huashan,et al.A division program of structural units in the Paleozoic platform-basin region,Tarim Basin[J].Marine Origin Petroleum Geology,2015,20(1):1-9.
- [12] 王毅,张仲培,张波,等.塔里木盆地巴楚地区大型膝褶带的发现及油气勘探意义[J].石油与天然气地质,2014,35(6):914-924.
WANG Yi,ZHANG Zhongpei,ZHANG Bo,et al.Discovery of

- large kink-band structures and petroleum exploration implications in Bachu area, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(6): 914-924.
- [13] 罗明霞, 夏永涛, 邵小明, 等. 塔里木盆地顺北油气田不同层系原油地球化学特征对比及成因分析[J]. *石油实验地质*, 2019, 41(6): 849-854.
- LUO Mingxia, XIA Yongtao, SHAO Xiaoming, et al. Geochemical characteristics and origin of oil from different strata in Shunbei oil and gas field, Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(6): 849-854.
- [14] 彼得斯 K E, 沃尔特斯 C C, 莫尔多万 J M, 等. 生物标志化合物指南(下册)[M]. 2 版. 张水昌, 李振西, 译. 北京: 石油工业出版社, 2011.
- PETERS K E, WALTERS C C, MOLODOWAN J M, et al. The biomarker guide[M]. 2nd ed. ZHANG Shuichang, LI Zhenxi, trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [15] 孟凡巍, 周传明, 燕夔, 等. 通过 C_{27}/C_{29} 甾烷和有机碳同位素来判断早古生代和前寒武纪的烃源岩的生物来源[J]. *微生物古生物学报*, 2006, 23(1): 51-56
- MENG Fanwei, ZHOU Chuanming, YAN Kui, et al. Biological origin of Early Palaeozoic and preCambrian hydrocarbon source rocks based on C_{27}/C_{29} sterane ratio and organic carbon isotope[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica* 2006, 23(1): 51-56.
- [16] 李政, 徐兴友, 宋来亮, 等. 伊朗卡山区块原油地球化学特征[J]. *石油勘探与开发*, 2005, 32(5): 130-133.
- LI Zheng, XU Xingyou, SONG Lailiang, et al. Oil geochemical characteristics in the Kashan block, Iran[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32(5): 130-133.
- [17] ANDVUSEVICH V E, ENGEL M E, ZUMBERGE J E, 等. 原油稳定碳同位素在地史中阶段性变化[J]. 张殿伟, 译. *天然气地球科学*, 2000, 11(4/5): 49-56.
- ANDVUSEVICH V E, ENGEL M E, ZUMBERGE J E, et al. The stable carbon isotopes of crude oil change periodically in geologic history[J]. ZHANG Dianwei, trans. *Natural Gas Geoscience*, 2000, 11(4/5): 49-56.
- [18] 马中远, 黄苇, 李婧婧, 等. 塔中北坡 SH9 井区柯坪塔格组下段原油地球化学特征[J]. *石油实验地质*, 2013, 35(5): 559-563.
- MA Zhongyuan, HUANG Wei, LI Jingjing, et al. Geochemical characteristics of crude oil from lower Kalpintag Formation in SH9 well area, northern slope of middle Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2013, 35(5): 559-563.
- [19] 吴鲜, 曹自成, 路清华, 等. 塔里木盆地顺北地区白垩系原油成因类型与来源[J]. *石油实验地质*, 2020, 42(2): 255-262.
- WU Xian, CAO Zicheng, LU Qinghua, et al. Genetic types and sources of Cretaceous crude oil in Shunbei area, Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(2): 255-262.
- [20] 李水福, 何生. 原油芳烃中三萜系列化合物的环境指示作用[J]. *地球化学*, 2008, 37(1): 45-50.
- LI Shuifu, HE Sheng. Geochemical characteristics of dibenzothiophene, dibenzofuran and fluorene and their homologues and their environmental indication[J]. *Geochimica*, 2008, 37(1): 45-50.
- [21] 路清华, 邵志兵, 贾存善, 等. 塔里木盆地玉北地区奥陶系原油成因特征分析[J]. *石油实验地质*, 2013, 35(3): 320-324.
- LU Qinghua, SHAO Zhibing, JIA Cunshan, et al. Genesis features of crude oil in Ordovician, Yubei area, Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2013, 35(3): 320-324.
- [22] 马安来, 金之钧, 朱翠山, 等. 塔里木盆地麦盖提斜坡罗斯 2 井奥陶系油气藏的 TSR 作用: 来自分子标志物的证据[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(4): 730-737.
- MA Anlai, JIN Zhijun, ZHU Cuishan, et al. Effect of TSR on the crude oil in Ordovician reservoirs of well Luosi-2 from Maigaiti slope, Tarim Basin: evidences from molecular markers[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(4): 730-737.
- [23] ZHU Guangyou, ZHANG Ying, ZHOU Xiaoxiao, et al. TSR, deep oil cracking and exploration potential in the Hetianhe gas field, Tarim Basin, China[J]. *Fuel*, 2019, 236: 1078-1092.

(编辑 徐文明)

(上接第 647 页)

- [21] 吴冬, 朱筱敏, 朱世发, 等. 南沙万安盆地新生界层序特征和主控因素[J]. *岩性油气藏*, 2015, 27(2): 46-54.
- WU Dong, ZHU Xiaomin, ZHU Shifa, et al. Characteristics and main controlling factors of Cenozoic sequence stratigraphy in Wan'an Basin, Nansha islands[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2015, 27(2): 46-54.
- [22] 杨振, 张光学, 张莉. 万安盆地生物礁及碳酸盐台地的发育演化及控制因素[J]. *地球科学*, 2016, 41(8): 1349-1360.
- YANG Zhen, ZHANG Guangxue, ZHANG Li. The evolution and main controlling factors of reef and carbonate platform in Wan'an Basin[J]. *Earth Science*, 2016, 41(8): 1349-1360.
- [23] 吕彩丽, 姚永坚, 吴时国, 等. 南沙海区万安盆地中新世碳酸盐台地的地震响应与沉积特征[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2011, 36(5): 931-938.
- LÜ Caili, YAO Yongjian, WU Shiguo, et al. Seismic responses and sedimentary characteristics of the Miocene Wan'an carbonate platform in the southern South China Sea[J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 2011, 36(5): 931-938.
- [24] 王龙, 谢晓军, 刘世翔, 等. 南海南部主要盆地油气分布规律及主控因素[J]. *天然气地球科学*, 2017, 28(10): 1546-1554.
- WANG Long, XIE Xiaojun, LIU Shixiang, et al. Analysis of hydrocarbon accumulation and diversity of the major basins in mid-southern part of the South China Sea[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2017, 28(10): 1546-1554.
- [25] 孙桂华, 高红芳, 彭学超, 等. 越南南部涓公盆地地质构造与沉积特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(6): 25-33.
- SUN Guihua, GAO Hongfang, PENG Xuechao, et al. Geologic and tectonic characteristics of the Mekong Basin, south Vietnam[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 30(6): 25-33.

(编辑 黄娟)