

文章编号: 0253-2697(2015)10-1221-13 DOI:10.7623/syxb201510005

塔西南坳陷周缘原油地球化学特征与成因类型

胡 健^{1,2,3} 王铁冠³ 陈建平² 崔景伟² 张 斌² 师生宝³ 王晓梅²

(1. 北京大学地球与空间科学学院 北京 100871; 2. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083;
3. 中国石油大学油气成藏与探测国家重点实验室 北京 102249)

摘要:塔西南坳陷及其周缘是塔里木盆地重要的油气勘探战略接替区和新的储量增长点。伴随近年该区油气勘探活动中重要井位的突破,油气勘探显示十分明显的增长前景,成为重要的勘探和研究焦点。选取塔西南地区巴什托—亚松迪油气田、柯克亚油气田、喀什凹陷和玉北地区共 32 件原油和油砂进行原油族组成、原油气相色谱、色谱-质谱和碳同位素分析,厘定塔西南原油和油苗样品的典型地球化学特征,对原油进行精细划分并族群,揭示原油的成因类型。研究认为:塔西南麦盖提周缘地区识别出巴什托原油族群、柯克亚原油族群、克拉托原油族群和玉北原油族群。琼 002 井、琼 003 井、群 5 井、群 7 井等属巴什托原油族群,BT4 井、曲 1 井和琼 003 井位于色力布亚断裂逆冲断裂带下盘,可能受深部寒武系等烃源层烃源贡献的影响,地球化学特征与巴什托主体原油显示差异性,但仍属于巴什托族群,BT2 井分子地化特征与巴什托主体原油具明显差异,其位于色力布亚断裂带上盘,可能为寒武系烃源贡献。巴什托原油与 LN46 井和 TZ30 井所采集的典型台盆区奥陶系烃源岩具可对比性,可能存在石炭系烃源岩的贡献,为混源油气藏;饱和烃气相色谱显示其为至少 2 期充注。柯东 1 井属柯克亚原油族群,油-源对比显示,柯克亚原油与侏罗系烃源岩具良好对比性。喀什凹陷原油与油砂存在差异,原油来自中下侏罗统康苏组和杨叶组烃源岩具可比性,克拉托油砂与下石炭统烃源岩可比。玉北地区的 YB1 井和 YB1-2X 井与巴什托原油族群地化特征具有可比性。丰富的油气显示与多套烃源层的复杂成因关系揭示塔西南地区油气勘探具有广阔的勘探前景。

关键词:原油族群;油-源对比;地球化学;生物标志化合物;塔西南坳陷

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Geochemical characteristics and origin patterns of oils in periphery of southwestern Tarim Basin

Hu Jian^{1,2,3} Wang Tieguan³ Chen Jianping² Cui Jingwei² Zhang Bin² Shi Shengbao³ Wang Xiaomei²

(1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China; 3. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract:Southwestern Tarim depression and its periphery are important strategic replacement regions of hydrocarbon exploration and new reserve growth points in Tarim Basin. Succeeding oil and gas breakthroughs in recent years have brought this region into the new spotlight of exploration frontiers. In this study, a total of 32 crude oil and oil sand samples were selected from Bashituo-Yasongdi oil and gas field, Kekeya oil and gas field, Kashi sag and Yubei area, southwestern Tarim Basin, which were used for crude oil group composition, gas chromatography, gas chromatography-mass spectrometer and carbon isotope analysis to determine typical geochemical characteristics of crude oil and oil seepage samples in southwestern Tarim Basin, precisely divide crude oil and groups as well as reveal the genetic types of crude oil. Research has indicated that Bashituo crude oil group, Kekeya crude oil group, Kelatuo crude oil group and Yubei crude oil group are identified in the periphery of Makit slope of southwestern Tarim Basin. The Well Qiong 002, Qiong 003, Qun 5 and Qun 7 belong to Bashituo crude oil group. The Well BT4, Qu 1 and Qiong 003 are located at the foot-wall of Selibuya thrust fault belt, which may be influenced by the contributions of deep Cambrian source rocks, but still belong to Bashituo group though differences exist in geochemical characteristics compared with Bashituo crude oil. Located at the hanging wall of Selibuya fault belt, Well BT2 has significantly different molecular geochemical characteristics from Bashituo crude oil, which may be contributed from Cambrian source rocks. Bashituo crude oil has certain contrastive relations with typical Ordovician source rocks in craton area collected from Well LN46 and TZ30, which may be contributed from Carboniferous source rocks, and is classified as hybrid-source hydrocarbon reservoirs. Saturated hydrocarbon gas chromatography indicates that there are at least two stages of hydrocarbon charging. Well Kedong 1 belongs to Kekeya crude oil group. Oil source correlation shows that Kekeya crude oil has a good contrastive correlation to Jurassic source rocks. Differences have been identified between crude oil and oil sands in Kashi sag, of

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 40972089), 中国石油化工股份有限公司西北油田分公司科研项目(KT2009-090)和油气勘探新领域、新理论、新方法、新技术研究课题(2011A-0203-01)资助。

第一作者及通信作者:胡 健,男,1986 年 6 月生,2009 年获山东科技大学学士学位,2012 年获中国石油大学(北京)硕士学位,现为北京大学与中国石油勘探开发研究院联合培养博士研究生,主要从事石油天然气地球化学方面的研究工作。Email:hjwj@126.com

which crude oil is sourced from Lower Jurassic source rocks in Kangsu Formation, and has a contrastive relation with source rocks in Yangye Formation. Moreover, oil sands have a comparative relation with Lower Carboniferous source rocks, while geochemical characteristics of the Well YB1 and YB1-2X in Yubei area have the same relation with those of Bashituo crude oil group. The complex genetic relation between abundant hydrocarbon and multi-set source beds shows a broad prospect in the hydrocarbon exploration of southwestern Tarim Basin.

Key words: crude oil group, oil-source correlation, geochemistry, biomarkers, southwestern Tarim Basin

引用:胡健,工钦冠,陈建平,崔景伟,张斌,师生宝,工晓梅.塔西南坳陷周缘原油地球化学特征与成因类型[J].石油学报,2015,36(10):1221-1233.

Cite:Hu Jian,Wang Tieguan,Chen Jianping,Cui Jingwei,Zhang Bin,Shi Shengbao,Wang Xiaomei.Geochemical characteristics and origin patterns of oils in periphery of southwestern Tarim Basin[J].ActaPetrolci Sinica,2015,36(10):1221-1233.

塔里木盆地塔西南坳陷区有多处油苗和油气显示,麦盖提斜坡更是成为塔里木盆地油气勘探和储量增长的重要后备区^[1]。该区油气资源量据预测为 $(38.38 \sim 44.10) \times 10^8$ t,亦有预测可达 66.66×10^8 t^[2]。

近年来,塔西南地区麦盖提斜坡取得了一系列新的勘探进展^[1-11]。柯东1井风险勘探获重大突破,在白垩系克孜勒苏群发现凝析油气藏,对塔西南地区山前勘探具有重要意义^[8]。麦盖提斜坡东段YB1井在奥陶系鹰山组获得高产原油,YB1-2X井获得高产油流和天然气。麦盖提斜坡中段BT5井钻遇寒武系吾松格组(ϵ_1w)烃源岩,并同时产出天然气,为第一次获取麦盖提斜坡本地烃源岩样品^[9-10]。山前的柯克亚柯东1井获得油流,使得勘探家对塔西南地区予以更多关注并进行细致研究。

前人对塔西南地区油气的来源与成因做了大量研究^[2-7,11]。麦盖提斜坡西段巴什托普油田上石炭统小海子组(C_2x)油藏油源来自寒武系—奥陶系烃源层($\epsilon-O$),或者以寒武系—奥陶系烃源层($\epsilon-O$)为主,石炭系烃源层少量混源;下石炭统卡拉沙依组(C_1kl)油藏的油源为石炭系—二叠系($C-P$)烃源层,或者仅以 C_1kl 泥岩为烃源层,与二叠系无关^[12]。群4井上泥盆统东河塘组(D_3d)油藏也以卡拉沙依组为烃源层,或者以石炭系烃源层为主,寒武系—奥陶系烃源层可能有一定贡献^[13]。

目前,对柯克亚典型凝析气藏其油源形成3种不同认识:以中—下侏罗统(J_{1-2})为烃源层;以卡拉沙依组和二叠系棋盘组(P_2q)为烃源层,或以海相 $C-P$ 和陆相 J_{1-2} 烃源层混合^[14];喀什凹陷杨叶古油藏安居安组(N_1a)、克孜勒苏组(K_1k)、杨叶组(J_2y)液态油苗与油砂^[15-17]以及克拉托浅油藏帕卡布拉克组(N_1p)原油的油源来自 J_{1-2} 湖相泥岩烃源层^[18]。

因此,塔西南坳陷作为一个油气有利探区,对已发现油气的油气源以及油气成藏规律的认识,关系到勘探家对探区前景的评估,也成为油气地质-地球

化学家研究的首要问题。笔者对塔西南坳陷的原油地球化学特征进行精细厘定,通过原油宏观特征和微观特征的表征划分出巴什托、柯克亚、克拉托和玉北4个原油族群,并在此基础上判识原油的成因类型与油-源关系,为塔西南地区油气勘探决策提供重要依据。

1 地质背景

塔西南地区位于塔里木盆地西南部,挟持在南天山褶皱带、西昆仑褶皱带与柯坪隆起、铁克里克隆起之间,面积为 14.13×10^4 km²^[3]。在区域构造上,塔西南坳陷包含麦盖提斜坡、喀什凹陷、齐姆根凸起、叶城凹陷等次级构造单元(图1)。其中麦盖提斜坡主要发育古生界海相与新生界陆相沉积,中生界沉积则相对欠发育,属于塔里木盆地台盆区范畴;而喀什凹陷、齐姆根凸起、叶城凹陷在古生界海相沉积的基础上,叠置巨厚的中生界—新生界陆相沉积,在区域构造属性上属于前陆盆地。

塔西南地区前泥盆纪处于前陆挤压环境,第三纪发育陆内断陷盆地,第四纪总体上仍属于压扭性前陆型盆地,喜马拉雅期麦盖提斜坡由向北倾斜的斜坡转变为向南倾斜的斜坡^[3]。

塔西南坳陷震旦系—二叠系为一套海相碳酸盐岩与碎屑岩的交互沉积建造,在巴楚隆起和麦盖提斜坡组成的台盆区,地层厚度为4600~9700 m;该区中生界明显缺失三叠系;而侏罗系—新近系为巨厚的陆内湖盆、湖沼及河流相碎屑岩建造,在喀什凹陷、叶城凹陷、民丰凹陷等前陆盆地,地层厚度可达8000~12000 m(图2)^[5]。

塔西南地区的油气勘探需要在油源问题的研究中进一步深入。针对塔西南坳陷及周缘的原油、油砂和油苗等油气地球化学研究,鲜有系统性报道。本文通过丰富的原油取样和精细的原油地球化学分析,对塔西南坳陷原油地球化学特征、族群划分和成因类型进行系统性认识,具有十分重要的理论和勘探价值。

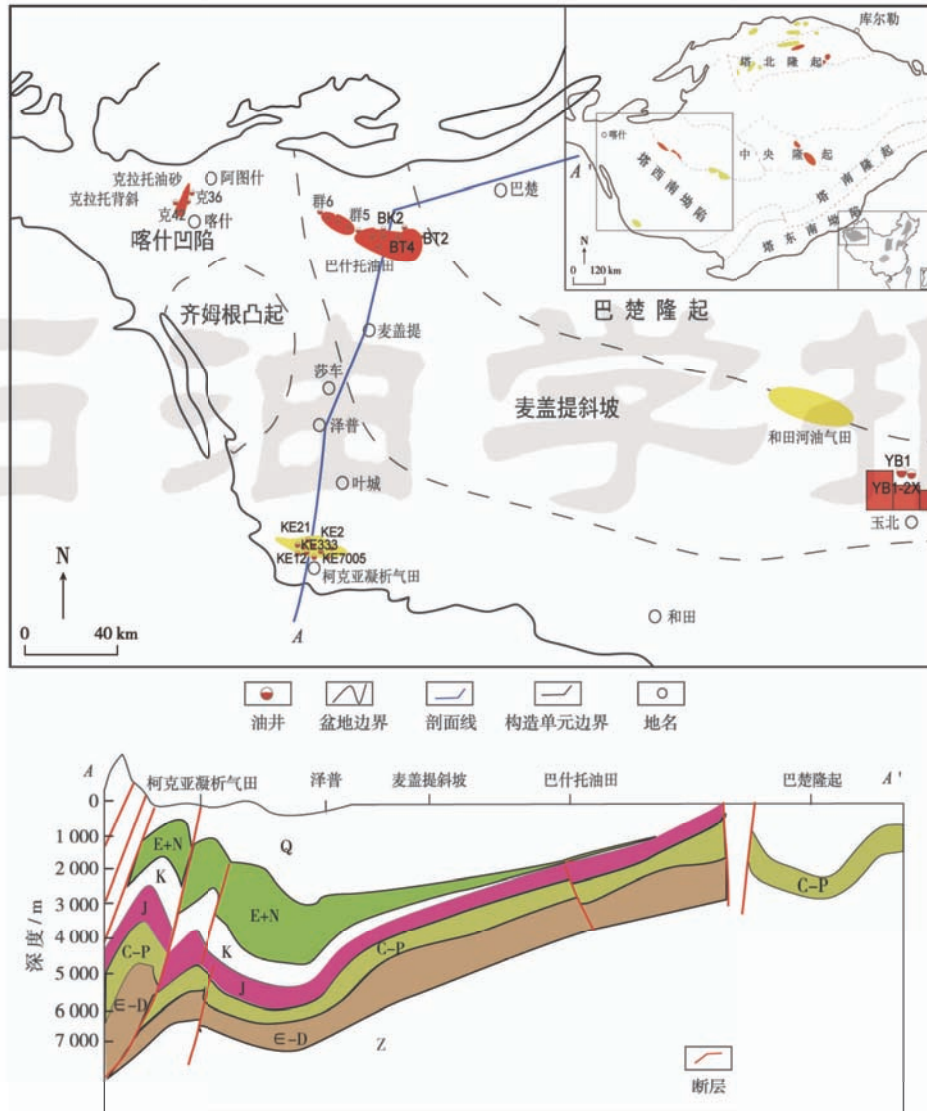


图 1 塔西南坳陷主要油气田及样品分布

Fig. 1 Major oil and gas fields and sample distribution of southwestern Tarim depression

2 样品与实验方法

2.1 样品分布

对收集和采集的塔西南地区麦盖提斜坡周缘 32 件样品(含 1 件油砂、1 件油苗,图 1)进行精细的地球化学分析,对其分子标志化合物、稳定碳同位素的精细剖析和对比,划分原油的族群。

2.2 实验方法

原油(油砂洗油)族组分分离采用柱层析法,在放有滤纸的漏斗内,将静止后的原油和氯仿沥青进行过滤,滤液为饱和烃、芳烃和非烃的混合溶液,用二氯甲烷获得沥青质,静置风干。用 60 mL 石油醚淋洗获得饱和烃组分,用 40 mL 二氯甲烷:石油醚(2:1, V/V)淋洗芳香烃组分,用 30 mL 乙醇淋洗非烃组分,分别将其静置风干。GC、GC-MS 分析使用 Agilent 6890 型气相色谱与美国 Agilent 6890-5975I 型气相色谱-质谱

联用仪。GC 测试条件:载气为 99.999% He、载气流速为 1 mL/min,色谱柱为 HP-5MS(30 m × 0.25 mm × 0.25 μm),气化进样器温度 300℃;升温程序为 100℃ 开始,4℃/min 升至 300℃,然后恒温 12 min;FID 检测。GC-MS 测试条件:载气为 99.999% He、载气流速为 1 mL/min,色谱柱为 HP-5MS(60 m × 0.25 mm × 0.25 μm),气化进样器温度 300℃;升温程序为 80℃ 恒温 1 min,3℃/min 升至 310℃,恒温 16 min;电离方式为 EI,70 eV;数据采集方式为全扫描/选择离子(Full Scan/SIM)。化合物定量软件为 Chemical Station,化合物定性主要依据标样、质谱图的解析、质谱图的检索与文献查找比对等方法。原油和组分碳同位素分析使用 FLASH 2000EA-MAT253 IRMS 联用仪,所用载气为 99.999% He;载气流速为 100 mL/min;燃烧气为高纯氧;反应炉温度 980℃;反应炉填料氧化铬、还原铜和含银氧化钴,填充柱温度 50℃。

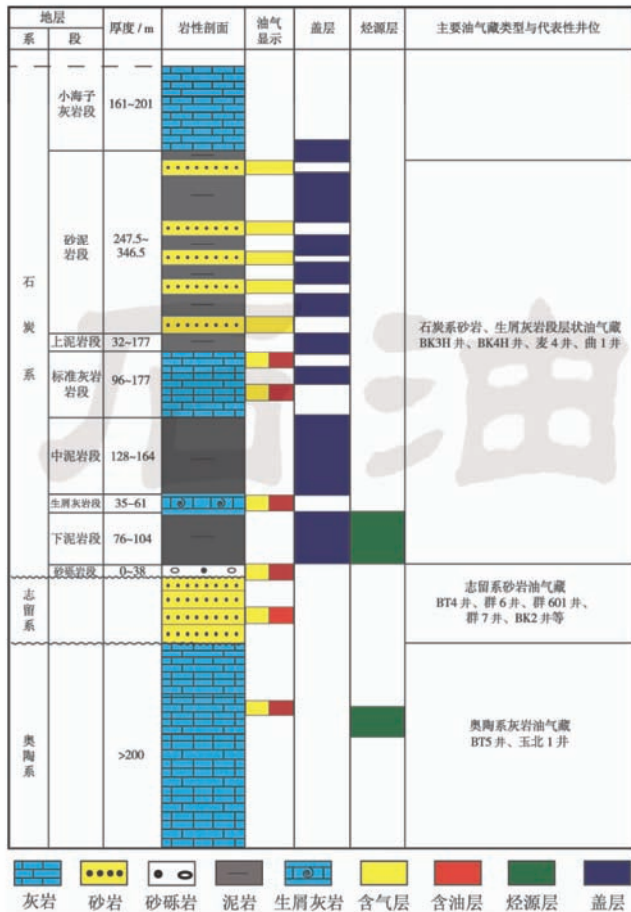


图2 塔西南地区综合地层柱状图(以巴赫断隆为例)

Fig. 2 Compiled stratigraphic column and the main oil production strata(a case study of Bachu uplift)

3 结果与讨论

3.1 原油物性

原油的物理性质包括密度、黏度、含蜡量、凝固点等特征与原油的化学组成、演化历史以及保存环境条件等密切相关。分析、研究原油的物性特征,有助于认识原油的成因类型。笔者将对麦盖提斜坡巴什托原油、柯克亚油田轻质油、玉北地区原油以及克拉托原油进行物性和原油族组成对比分析。

塔西南坳陷麦盖提斜坡不同凹陷、不同地区的原油物性差别较大(表1)。

巴什托油田原油密度为 0.712 2~0.843 0 g/cm³, 运动黏度 0.51~6.58 mm²/s, 含蜡量 0.06%~9.75%, 含硫量 0.06%~0.43%, 属于低黏、低蜡—含蜡、低硫、轻质油。亚松迪油田 BT2 井原油密度 0.862 g/cm³, 运动黏度 21.16 mm²/s, 含蜡量 2.38%, 含硫量 0.14%, 属于低蜡、低硫轻质油。巴什托油田群 6 井有 2 个油层, 其中 5 507.7m 油层原油密度相对偏低(0.792 8D g/cm³), 含蜡量高(23.40%), 属高蜡轻质油; 而 5 583 m 处原油密度相对较高(0.817 9~0.832 8 g/cm³), 含蜡量低(4.40%~4.51%), 则为低蜡轻质油(表 1)。原油密度与含蜡量的变化反映该井 5 507.7 m 处浅层原油可能遭受天然气气洗蒸发分馏效应。YB1 井地面原油密度 0.916 3 g/cm³, 30℃ 运动黏度 99.17 mm²/s, 含蜡量 6.63%, 含硫量 0.69%, 属于高

表 1 塔西南地区部分原油物性

Table 1 Physical properties of oils in southwestern Tarim Basin

油气田	井号	井深/m	层位	密度/(g·cm ⁻³)	运动黏度/(mm ² ·s ⁻¹)	含蜡量/%	含硫量/%	凝固点/℃	初馏点/℃	原油类型
巴什托	BK3H	4 772~4 775	C ₁ b	0.800 5	2.100	5.290	0.16	<-34	4.52	轻质油
	BK4H	4 951.6~4 956	C ₁ b	0.813 0	2.640	9.710	0.22	<-34	5.29	
	麦 4	4 755.5~4 767	C ₁ b	0.806 6	1.860	1.160	0.43	~28	1.16	
	曲 1	4 745.5~4 731.4	C ₁ b	0.830 0	—	1.190	0.27	—	—	
	曲 3	4 798~4 802	C ₁ b	0.816 9	3.930	0.800	0.06	—	—	
	BT4	4 880~4 913.9	D ₃ d	0.824 4	5.250	9.750	0.11	—	—	
	群 6	5 507.7~5 588.8	D ₃ d	0.792 8	1.826	24.500	0.10	~26	64	
	群 6	5 603.5~5 606.5	D ₃ d	0.817 9	2.858	4.400	0.26	~28	58	
	群 601	5 397.9~5 420.2	D ₃ d	0.827 8	2.999	6.880	0.27	<~30	—	
	BK2	4 944~4 991	S ₁₋₂ k	0.813 7	3.990	5.630	0.08	—	—	
BK8H	4 950.5~4 999.5	S ₁₋₂ k	0.822 6	4.020	9.060	—	—	—		
亚松迪	BT2	2 516.1~2 551	C ₁ b	0.861 2	21.160	2.380	0.14	-2	118.2	轻质油
玉北 1	玉北 1	5 550~5 630	O ₁₋₂ y	0.916 3	99.170	6.630	0.69	<-34	90.8	中质油
	玉北 1-2X	5 105~5 190	O ₁₋₂ y	—	—	—	—	—	—	
柯克亚	KE18	3 194.6	N ₁ x ₃ -x ₆	—	—	—	—	—	—	凝析油
	KEDONG1	4 286~4 425	K ₁ kz	0.820 0	9.200	17.800	—	26	—	

注: C₁b—下石炭统巴楚组; D₃d—上泥盆统东河塘组; S₁₋₂k—中下志留统柯坪塔格组; O₁₋₂y—中下奥陶统鹰山组; K₁kz—下白垩统克孜勒苏组; N₁x₃-x₆—中新统西河甫组四段二亚段-西河甫组六段。

黏、含蜡、含硫中质油, 密度偏重, 临界于重质油, 可能受生物降解作用影响; 喀什凹陷原油族群为轻质—凝析油。

3.2 原油族组成

原油的族组成蕴含的地球化学信息有助于判识烃源岩类型、原油成熟度、运移效应以及水洗-生物降解

程度等^[19]。柯克亚油田和巴什托油田的部分原油样品的部分轻质油由于油质过轻,原油族组成分析数据可能会有一定的偏差。

柯克亚轻质油饱和和烃含量高(64.22%~87.04%),总烃含量高达 87.23%~97.31%,饱/芳比很高(2.54~16.59),微含或不含沥青质,呈现凝析油的特征。巴什托油田与亚松迪油田轻质油族组成相当,饱和和芳烃含量分别为 57.5%~84.5%和 7.3%~25.5%,饱/芳比 3.4~11.4,“非烃+沥青质”含量 4.3%~26.1%,具轻质油的典型特征,与一般原油相比,饱和烃含量与饱/芳比相当或稍偏高,而“非烃+沥青质”含量则稍偏低。玉北地区的 YB1 井和 YB1-2X 井饱和和烃含量为 57.2%~61.0%,总烃含量达 84.2%~86.0%,饱/芳比 2.0~2.6,“非烃+沥青质”含量 14.0%~15.9%,明显高于上述轻质油和凝析油,显示中质油的典型特征。克拉托油田克 36 井、克 42 井产轻质油,饱和和烃含量高(77.1%~80.3%),总烃含量达 89.2%,饱/芳比 6.4~9.1,“非烃+沥青质”含量 10.6%,与中质油族组成相当。而克拉托油砂和杨叶油苗族组成含量显示各原油族组成明显差异,克拉托油砂的饱和和烃含量偏低(52.5%)可能为实验室洗油过程饱和和烃散失所致,杨叶油苗则因生物降解作用导致饱和和烃含量很低(31.8%),“非烃+沥青质”则相对富集,高达 60.3%(图 3)。

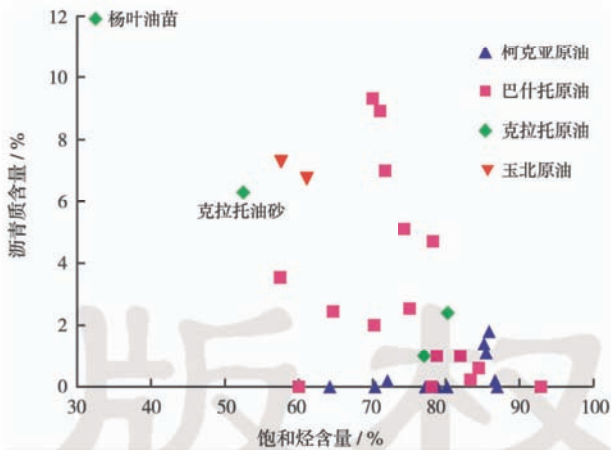


图 3 原油饱和烃含量与沥青质含量相关图

Fig. 3 Abundance correlogram of saturated hydrocarbons and asphaltenes in crude oils

3.3 饱和烃组成特征

3.3.1 烷烃类

正构烷烃是饱和烃馏分中含量最高的一类化合物。生物体中含有具偶数碳原子优势的脂肪酸、脂肪醇、蜡质成为沉积有机质中正构烷烃的主要来源^[19-22]。正构烷烃的碳数分布型式,常常蕴含着丰

富的地球化学信息,可指示有机质类型、沉积环境和热演化程度等^[19-23]。

在巴什托原油总离子流图上(图 4),正构烷烃系列碳数分布范围为 nC_{10} — nC_{33} ,主峰为 nC_{12} — nC_{16} ,以 nC_{15} 和 nC_{14} 居多,呈前峰型单峰态分布型式,正构烷烃峰型受生源母质和成熟度因素双重影响^[19-20]。群 6 井 5 507 m 处轻质油呈现异常的微弱双峰态分布型式,主峰为 nC_{12} ,次主峰为 nC_{25} ,结合该原油的含蜡量高达 23.4%,可能系蒸发分馏作用引起。CPI 值为 0.94~1.13,变动范围 <1.2 ,反应巴什托原油成熟度高,原油正构烷烃中奇偶优势不明显。

此外,UCM(Unresolved Complex Compounds)为“未可分辨化合物”,巴什托原油中 BT2 井、曲 1 井、曲 3 井轻质油的 UCM 峰最为明显,显示存在相对较强生物降解作用影响。麦 4 井、BK8H 井等的轻质油也存在较为微弱的 UCM 峰,表明也曾遭受到一定程度的生物降解作用。巴什托油田轻质油的植烷系列总体上都呈现 $Pr/Ph > 1$,只有群 6 井 5 507.7 m 处轻质油和 BT4 井轻质油的 Pr/Ph 值出现例外,前者具低 Pr/Ph 值,为 0.89;而后者显示异常高,达 2.71。可能是不同生源贡献的生标反应。

柯克亚原油的正构烷烃系列碳数分布范围为 nC_{10} — nC_{33} ,呈单峰态前峰型和微弱双峰态分布型式,主峰碳为 nC_{13} — nC_{17} 、 nC_{22} — nC_{23} ,且以 nC_{14} — nC_{15} 、 nC_{22} — nC_{23} 为主,其中 KE2 井、KE10 井、KE333 井具有明显的单峰态前峰型分布型式,显示原油具高一过成熟度;KE10 井、KE21 井、KEXI2 井、KEXI6 井、KE428 井、KE7005 井、KEDONG1 井显示了微弱双峰态分布型式,且后峰以 nC_{22} — nC_{23} 为主峰碳,显示其生源可能来自高等植物蜡质生源产物的贡献。

克拉托原油的正构烷烃系列碳数分布范围为 nC_{11} — nC_{33} ,主峰碳为 nC_{22} — nC_{23} ,呈单峰态中峰型分布型式,显示其生源可能来自藻类生源和高等植物蜡质生源的共同贡献。

克拉托油砂见明显的 UCM“鼓包”,正构烷烃发生明显降解, Pr/nC_{17} 为 0.60, Ph/nC_{18} 为 0.69, Pr/Ph 为 0.76,属轻微生物降解等级,且检测出完整的 25-降藿烷系列。杨叶油苗亦具明显 UCM“鼓包”,正构烷烃和无环类异戊二烯烷烃完全降解,25-降藿烷系列完整,属中等生物降解等级。YB1 井、YB1-2X 井原油具有极为明显的 UCM“鼓包”,表明其可能经历过生物降解次生改造,发育完整 25-降藿烷系列,同时 YB1 井、YB1-2X 井原油具有完整的正烷烃系列,呈前峰型单峰态分布,主峰 nC_{13} — nC_{30} 显示其具有高成熟度,表明玉北地区原油至少经历两次油气充注过程。

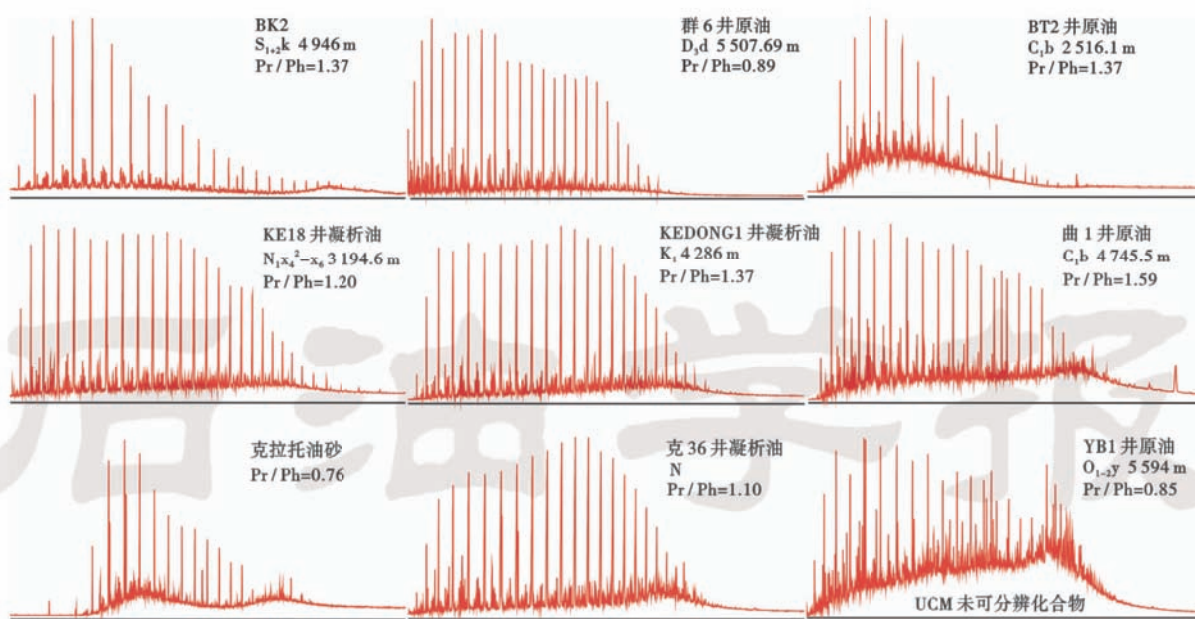


图4 塔西南坳陷周缘原油饱和烃和天然气相色谱

Fig. 4 Gas chromatography of saturated hydrocarbons in crude oils in periphery of southwestern Tarim Basin

3.3.2 植烷系列

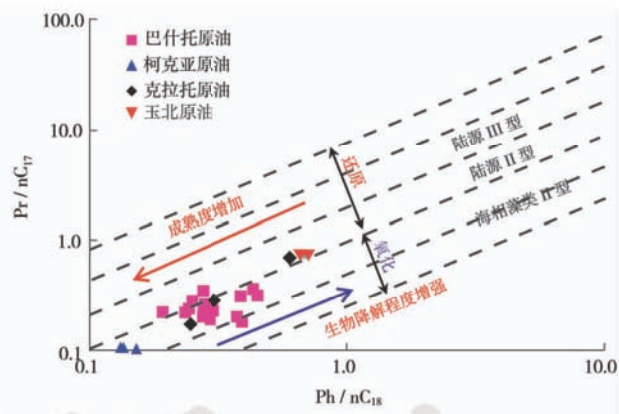
Pr/Ph 是重要的判识原油生源沉积环境的指标, 一般而言, Pr/Ph < 0.5 为强还原原盐沉积环境, Pr/Ph = 0.5 ~ 1.0 为还原环境, Pr/Ph = 1.0 ~ 2.0 为弱还原—弱氧化环境, Pr/Ph > 2.0 为偏氧化环境, 如河湖和滨海沼泽或浅湖—浅海沉积, 典型煤系地层有机质以 Pr/Ph > 2.5 为特征, 或高者可达 8.0 以上。除生源环境因素外, Pr/Ph 在一定程度上还受成熟度影响。早期随成熟度升高而升高, 在成熟阶段 ($R_o = 0.7\% \sim 1.1\%$) 达到稳定高值, 成熟度影响可以忽略不计, 这是进行油-源对比的前提^[19-22]。

巴什托原油 Pr/Ph = 1.24 ~ 1.85, 反应弱还原—弱氧化的沉积环境, 其中琼 002 井和 BT4 井 Pr/Ph 值分别为 2.08 和 2.71, 为异常高值, 可能反应湖相源岩生源的贡献, 群 6 井浅层原油 Pr/Ph = 0.89, 为还原环境的生源贡献。YB1 井和 YB1-2X 井原油 Pr/Ph = 0.86 ~ 0.88, 反应还原环境的有机质贡献。克拉托原油和克拉托油砂 Pr/Ph 分别为 1.10 ~ 1.31 和 0.76 (图 5), 其生源环境可能存在细微差别, 分来自弱还原—弱氧化环境和还原环境。

原油中的 Ph/nC₁₈ 和 Pr/nC₁₇ 参数受其成熟度和生物降解作用等的多重作用制约^[19-23]。姥鲨烷(Pr)和植烷(Ph)具有比正构烷烃更强的抗生物降解能力。因而在 Pr/nC₁₇-Ph/nC₁₈ 相关图上, 随原油成熟度的升高 Pr/nC₁₇ 和 Ph/nC₁₈ 值不断降低, 随原油遭受生物降解作用程度的增大, Pr/nC₁₇ 和 Ph/nC₁₈ 值不断升高。

柯克亚原油成熟度最高, 未见生物降解。巴什托

原油成熟度低于柯克亚原油, 可能存在轻微生物降解作用。克拉托原油与巴什托原油类似, 克拉托油砂、玉北地区原油显示成熟度低和生物降解程度高的特征, 杨叶油苗降解作用最高, 其植烷系列已经降解殆尽。

图5 塔西南地区原油 Ph/nC₁₈—Pr/nC₁₇ 相关图Fig. 5 Ph/nC₁₈—Pr/nC₁₇ correlogram of crude oils in southwestern Tarim Basin

3.3.3 甾烷类

甾烷类一般包括 C₂₀-C₂₁ 孕甾烷系列和 C₂₇-C₂₉ 甾烷系列, 通用的 C₂₇-C₂₈-C₂₉ 甾烷分布三角图反映沉积有机质的生源构成, 对油-油对比和油-源对比研究具有重要意义^[19,24-31]。重排甾烷是由甾烯在黏土矿物酸性催化作用下发生碳骨架重排转变而来。除与成熟度相关外, 还可以指示源岩类型为泥质岩、泥灰岩或煤系, 由此可根据原油中重排甾烷的含量来确定源岩类型^[19,25]。通常, 奥陶系生源的原油 C₂₈ 相对含量低于

25%,寒武系生源的原油 C_{28} 相对含量高于 25%^[26,27],而在石炭系生源的混源油中,该指标未取得较好的指示效果。

塔西南地区麦盖提斜坡西部巴什托油田原油中规则甾烷分布模式基本呈现为 $C_{27} \gg C_{28} < C_{29}$ [图 6]。值得指出的是,曲 1 井、琼 003 井原油为 $C_{27} < C_{28} \ll C_{29}$

的“反 L 型”,曲 3 井原油具有巴什托地区最低的 C_{28} 值 11.7%,显示这 3 口井与其他原油可能具有生源差异。孕甾烷和升孕甾烷的相对含量在麦盖提斜坡西部巴什托油田原油中较高,只有曲 1 井、BT2 井和琼 003 井原油中孕甾烷和升孕甾烷的相对含量偏低,重排甾烷的含量分布具有与孕甾烷相似分布特征。

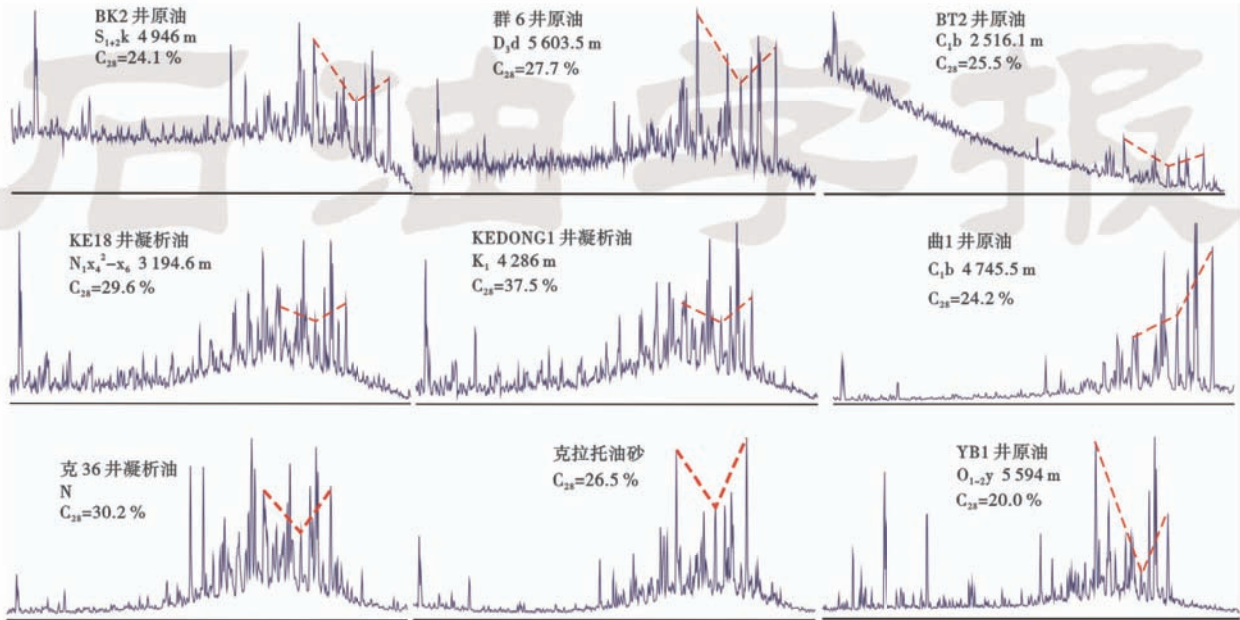


图 6 塔西南坳陷周缘原油甾烷典型质量色谱图 (m/z217)

Fig. 6 Typical mass chromatograms for sterane of crude oils in periphery of southwestern Tarim Basin (m/z217)

柯克亚原主体具有 $C_{27} > C_{28} < C_{29}$ 特征,呈近对称“V”型分布,而 KE2 井和 KEX12 井原油则具 $C_{27} < C_{28} < C_{29}$,呈现反“L”型分布, C_{28} 甾烷介于 27.9%~44.4%。

克拉托原油和油砂中, C_{27} - C_{28} - C_{29} 甾烷呈 $C_{27} > C_{28} < C_{29}$ 近对称“V”型分布, C_{28} 甾烷一般为 24.9%~30.2%;杨叶油苗呈 $C_{27} \gg C_{28} < C_{29}$ 的“L”型分布,具明显的 C_{27} 优势。杨叶油苗中甾烷的这种分布型式,可能与其遭受中等程度的生物降解作用有关,由于细菌选择性消耗 C_{29} $\alpha\alpha\alpha$ 20R 差向异构体,而造成 C_{29} $\alpha\alpha\alpha$ 20S/(20S+20R)增至 0.55 以上,其作为成熟度的指标已经失去效用。克 36 井、克 42 井和杨叶油苗中含有很高的 C_{27} 重排甾烷。克拉托油砂中重排甾烷含量较低,可能反映源岩差异贡献的结果。

YB1 井、YB1-2X 井原油总体呈现 $C_{27} > C_{28} \ll C_{29}$ 特征,呈不对称“V”型分布, C_{28} 甾烷介于 18.3%~20.0%,低于巴什托油田原油主体原油的 C_{28} 甾烷分布范围 22%~34% [图 7]。

3.3.4 萜烷类

原油中检测出的各种萜类生物标志物主要有三环萜烷系列、四环萜烷、藿烷系列等^[19,29-33]。不同生源构

成的沉积有机质中,三环萜烷、四环萜烷及藿烷类的相对丰度和分布型式会有一些的差别,常作为油-油对比和油-源对比研究的标志。

塔西南坳陷麦盖提斜坡巴什托油田原油具有较高的三环萜烷,且 $C_{21} TT < C_{23} TT$,具明显的 $C_{23} TT$ 优势,而曲 1 井和琼 003 井原油中三环萜烷含量较低, $C_{23} TT/C_{30} H$ 值分别为 0.26 和 0.11,但是 $C_{21} TT <$

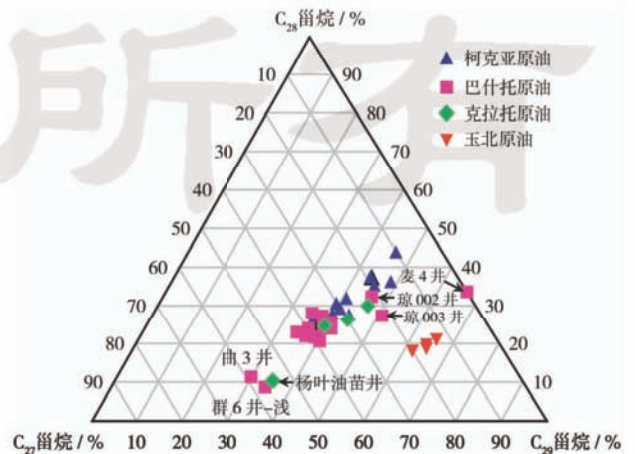


图 7 塔西南坳陷原油 C_{27} - C_{28} - C_{29} 甾烷三角图分布特征

Fig. 7 C_{27} - C_{28} - C_{29} terpane triangle plot of crude oils in southwestern Tarim Basin

C_{23} TT, C_{21} TT/ C_{23} TT 比值处于 0.52~0.87。BT2 井原油中 C_{21} TT 具微弱优势, C_{21} TT/ C_{23} TT 值为 1.17 [图 8]。

柯克亚原油中三环萘烷化合物丰度普遍相对较高^[34]。三环萘烷系类化合物的分布型式, 呈现出 C_{23}

TT 丰度的微弱优势, C_{21} / C_{23} TT 值 1.18~1.74。藿烷系列化合物丰度较低, 可能与原油为高一过成熟度的凝析油有关。柯克亚原油中 C_{30} 重排藿烷含量异常高, 除柯东 1 井外, 其余油井中原油含量 C_{30} 重排藿烷 > C_{30} 藿烷。

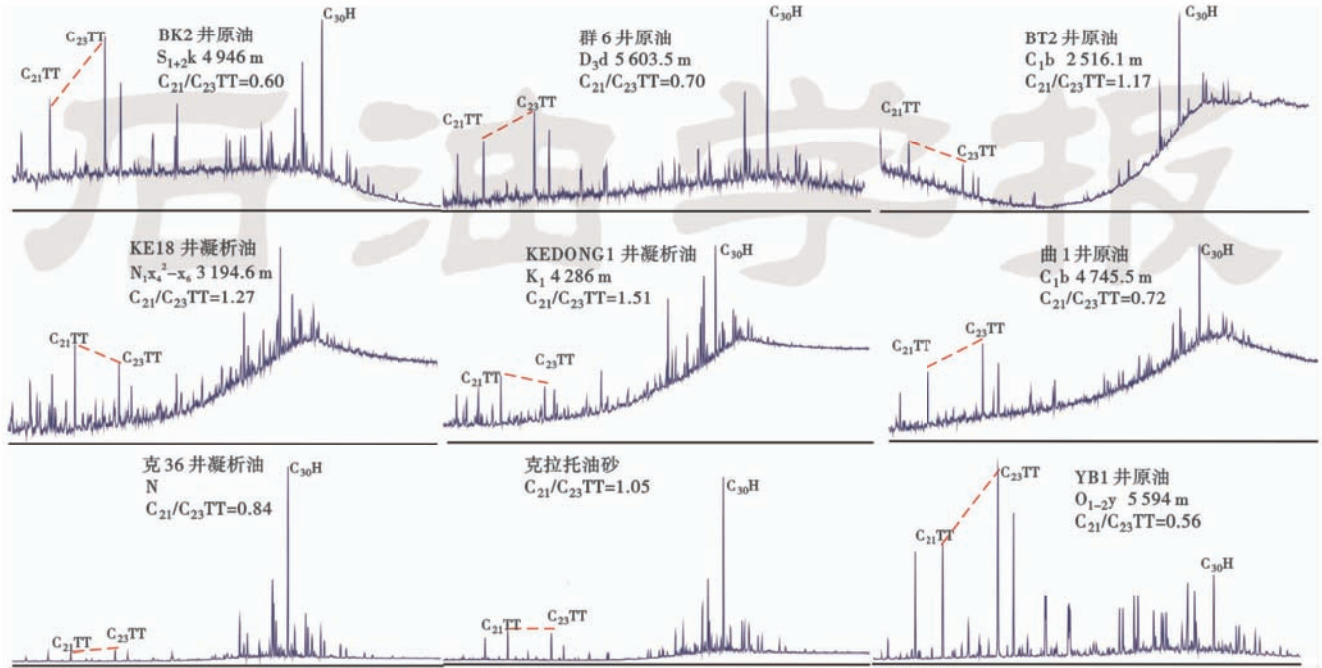


图 8 塔西南坳陷周缘原油萘烷典型质量色谱图 (m/z191)

Fig. 8 Typical mass chromatograms for terpane of crude oils in periphery of southwestern Tarim Basin (m/z191)

克拉托原油、油砂和杨叶油苗中三环萘烷化合物丰度普遍偏低, 藿烷系列化合物丰度高。三环萘烷系类化合物的分布型式, 呈现出 C_{23} TT 丰度的微弱优势, C_{21} / C_{23} TT 值 0.81~0.84, 克拉托油砂 C_{21} / C_{23} TT 值为 1.05, 显示出明显差别。

玉北地区原油具有 C_{23} TT 优势, C_{21} / C_{23} TT 值介于 0.52~0.57, 与巴什托油田主体原油分布相一致。18 α (H)-新藿烷参数 $T_s/(T_s + T_m)$ 和 4-/1-MDBT 的应用越来越广泛, 这两项参数对高成熟—过成熟原油的成熟度判识尤为重要^[34-37]。根据图 9 显示柯克亚原油具有较高的成熟度, 明显高于巴什托油田和玉北地区中质油, 麦 4 井和 YB1 井的成熟度在该参数下最低。

3.4 芳烃馏分地球化学特征

常用的芳烃组分通常为原油芳烃馏分的“三芴”系列与三芳甾烷系列分子生物标志物的组成^[35]。

芴、氧芴(二苯并呋喃)和硫芴(二苯并噻吩)是三类分子结构相似的化合物, 其基本环系分子骨架均由两个苯环与一个五元环拼合而成的三环芳烃; 中间五元环上分别为一个碳、氧或硫原子[图 10]。芴、氧芴和硫芴及其烷基取代的衍生物俗称为“三芴”系列, 通常三芴系列的相对组成具有沉积环境的指示意义, 海

相咸水的强还原环境原油及烃源岩具有高硫芴系列含量, 偏氧化沉积环境的有机质氧芴含量高^[19,36]。

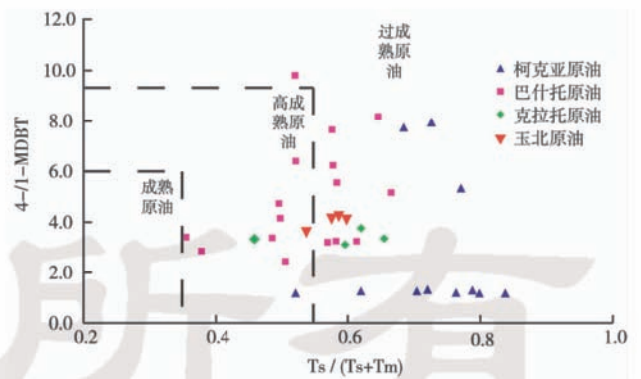


图 9 塔西南地区原油 $T_s/(T_s+T_m)$ -4-/1-MDBT 值相关图
Fig. 9 $T_s/(T_s+T_m)$ -4-/1-MDBT correlagram of crude oils in southwestern Tarim Basin



图 10 芴、硫芴和氧芴的分子结构式^[36]

Fig. 10 Molecular structure of fluorene, dibenzothiophene and dibenzofuran

柯克亚原油“三芴”系列特征与喀什凹陷的克 36 井、克 42 井原油和油砂、杨叶油苗具有一定的差别。柯克亚原油硫芴含量大部分大于 80%，反映其生源条件为咸水条件下的强还原环境特征。KE2 井、KE21 井和柯东 1 井硫芴含量较低。巴什托轻质油中硫芴的含量相对丰度为 45%~80%，二苯并呋喃的含量小于 20%，其中巴什托油田 BT2 井、BT4 井原油氧芴含量达 46.1%和 55%；克拉托油砂具绝对的硫芴优势，硫芴含量高达 98.7%，克拉托原油与杨叶油苗具有较高的氧芴含量，大于 60%。YB1 井和 YB1-2X 井原油“三芴”系列特征与巴什托原油类似[图 11]。

Hughes^[38]建立了 Pr/Ph-DBT/P 图版,用来解释原油与烃源岩的沉积环境和有机相, DBT/P 主要反映了还原硫与有机质的结合能力,而 Pr/Ph 主要反映沉积环境的氧化-还原性。

根据图 12 可以得出,柯克亚轻质油 DBT/P 比值最低,克拉托油砂与柯克亚原油类似。巴什托油田轻

质油分布范围较宽,其主体原油和玉北地区中质油略高,群 5 井、BK3 井、曲 1 井、麦 4 井和 BK4H 井轻质油具有较高的 DBT/P 值,BT4 井轻质油具有最高的 Pr/Ph;克拉托油砂与柯克亚原油类似,DBT/P 值很低,值得注意的是 DBT/P 值较高的轻质油产层均为下石炭统巴楚组,仅从该参数来看可能是生源或者沉积环境差异所致。

三芳甾烷系列化合物是塔里木盆地油-源对比中重要的参数和指标,并在区分寒武系—奥陶系烃源特征中取得良好的应用效果^[39-40]。

通过原油和烃源岩抽提物三芳甾烷的分布特征分析(图 13),发现塔西南地区原油中巴什托油田除 BT2 井、曲 1 井外,均以 24-乙基三芳胆甾烷 20S 和 20R 为主峰,这与塔河油田主体区原油具有一致的特征,与塔中 30 井、轮南 46 井典型奥陶烃源岩具可比性。而 BT2 井、曲 1 井原油三芳甾烷特征与下寒武统吾松格组(Є_{1w})烃源岩抽提物以三芳胆甾烷 20R 和 24-甲基三芳胆甾烷 20S 为主峰,24-乙基三芳胆甾烷 20S 和 20R 的丰度明显偏低,与典型寒武系油源的原油一致,显示了 BT2 井、曲 1 井存在寒武系烃源岩的贡献, BK2 井可能存在侵染。

3.5 原油及馏分碳同位素组成特征

原油的碳同位素组成继承其母源有机质的组成,同源原油因成熟度不同而产生的稳定碳同位素组成 $\delta^{13}C$ 差异不超过 2‰~3‰^[19]。原油的碳同位素值一定程度上也受热成熟过程中同位素分馏效应的影响。

塔西南地区原油同位素组成存在明显的差异,巴什托油田原油及族组分碳同位素最轻,全油碳同位素处于 -33.9‰~-35.5‰,其中曲 3 井和 BT2 井轻质油碳同位素明显较其他原油偏重,碳同位素值分布在和田河气田轻质油分布范围区间内(-31.5‰~-32.4‰)^[41,42]。柯克亚油田轻质油全油碳同位素偏重,分布范围为 -29.0‰~-30.5‰。玉北 1 井原油全油碳同位素为 -33.5‰~-33.6‰,基本与巴什托油田原油相当。克拉托原油碳同位素介于 -30.2‰~-31.0‰[图 14]。

根据同位素曲线可以将塔西南地区原油分成 3 组:①巴什托油田轻质油和 YB1 井中原油碳同位素最轻;②BT2 井以及曲 3 井轻质油同位素居中,其余麦盖提斜坡东段的和田河凝析气田具有类似的碳同位素值;③柯克亚原油和克拉托原油同位素最重。

基于原油和烃源岩及其饱和烃、芳香烃、非烃和沥青质组分的碳同位素分析发现:柯克亚凝析油碳同位素值最重,分布范围为 -29.0‰~-30.2‰,可能受高等植物生源的影响,推测为石炭系—二叠系烃源岩;克

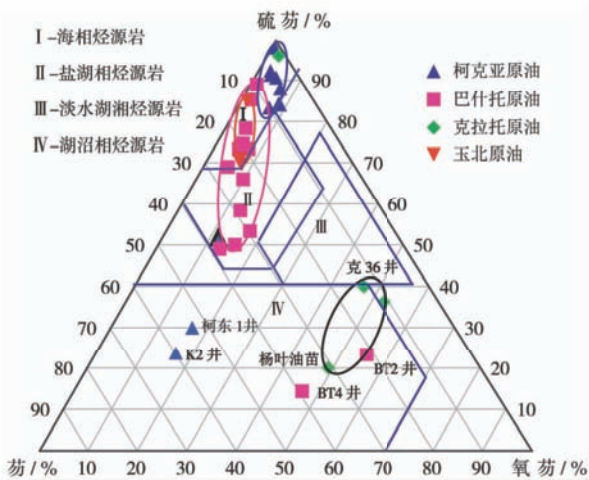


图 11 塔西南地区原油芴、硫芴、氧芴系列相对组成三角图
Fig. 11 Correlative triangle plot of fluorine, dibenzothiophene and dibenofuran of crude oils in southwestern Tarim Basin

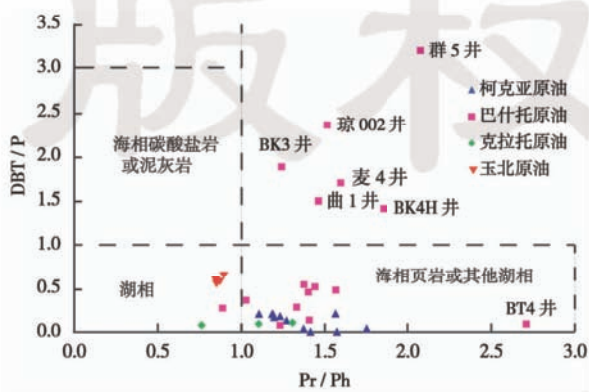
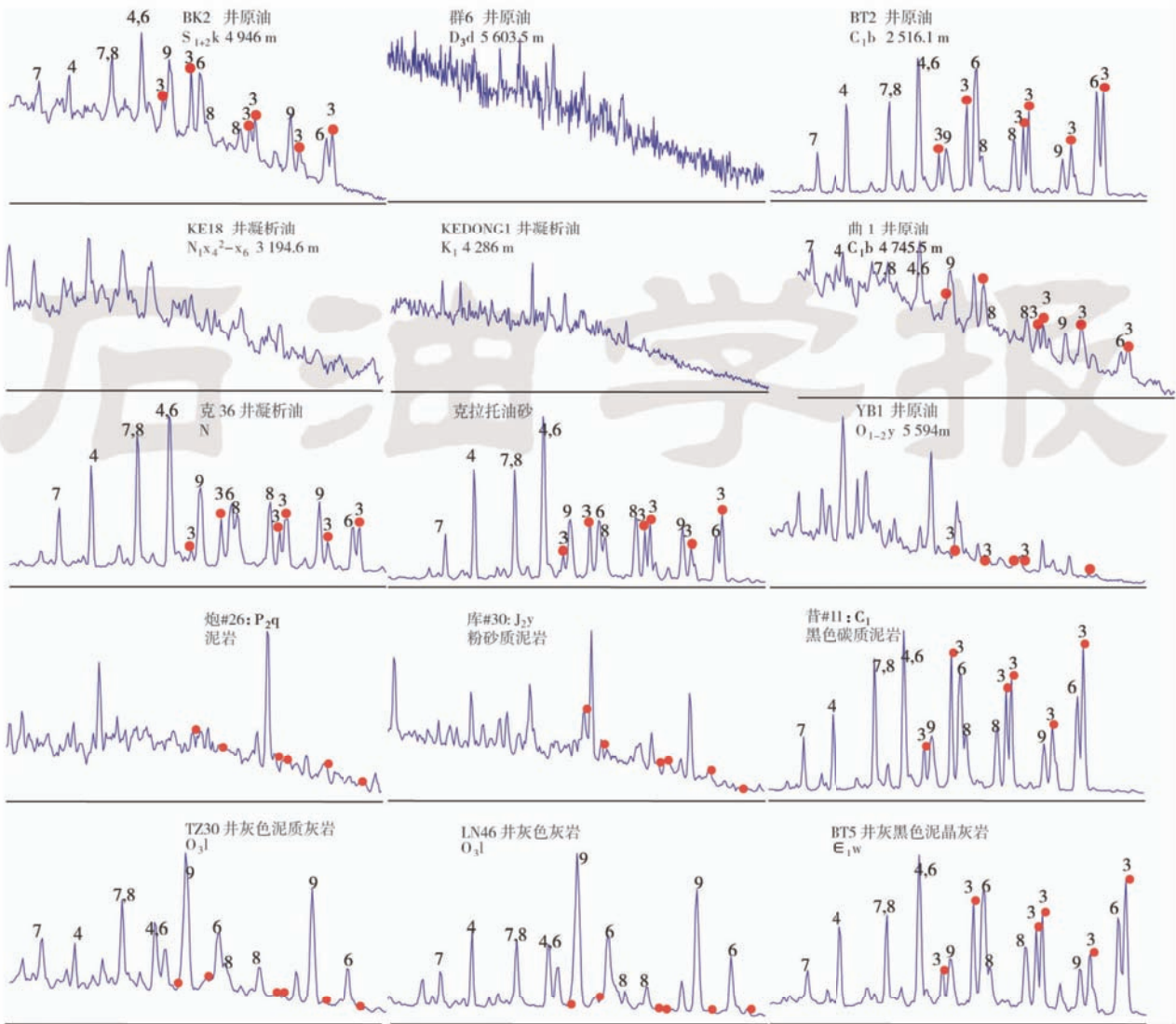


图 12 塔西南地区原油 DBT/P—Pr/Ph 关系
Fig. 12 DBT/P and Pr/Ph correlogram of oils in southwestern Tarim Basin



注: 3号峰为 4,23,24-三甲基三芳甲萜甾烷(C₂₉), 4号峰为 3-甲基-24-甲基三芳甾烷(C₂₈), 6号峰为 4-甲基-24-乙基三芳甾烷(C₂₉), 7号峰为 3-甲基三芳甾烷(C₂₇), 8号峰为 3-甲基-24-甲基三芳甾烷(C₂₈), 9号峰为 4-甲基三芳甾烷(C₂₇)。

图 13 塔西南坳陷周缘原油与代表性烃源岩抽提物中三芳甾烷典型质量色谱图(m/z245)

Fig. 13 Typical mass chromatograms of crude oils and representative source rock extracts in periphery of southwestern Tarim Basin(m/z245)

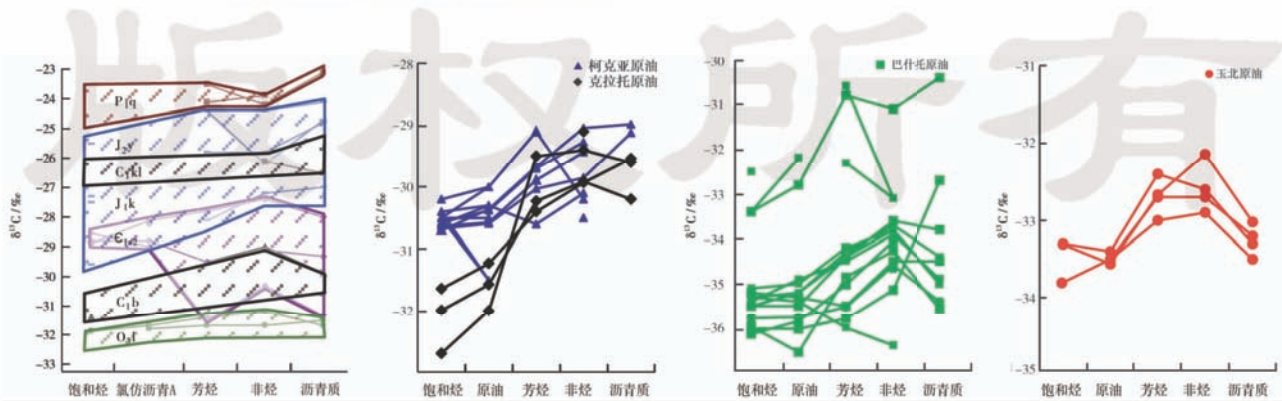


图 14 塔西南坳陷周缘烃源岩、全油与馏分碳同位素 $\delta^{13}C$ 值分布曲线及油-源对比

Fig. 14 Oil-source correlation of carbon isotopic $\delta^{13}C$ values between source rocks, crude oil and fractions in periphery of southwestern Tarim Basin

拉托原油较柯克亚凝析油碳同位素轻,为 $-29.5\% \sim -32.7\%$,反映其为高等植物和藻类的双重生源特征,可能是侏罗系康苏组(J_1k)、杨叶组(J_2y)和下石炭统巴楚组(C_1b)混源形成。巴什托油田原油及族组分碳同位素最轻,全油碳同位素处于 $-33.9\% \sim -35.5\%$,其中曲 3 井和 BT2 井轻质油碳同位素明显较其他原油偏重。烃源岩抽提物三芳甾烷和碳同位素显示,巴什托原油以上奥陶统良里塔格组(O_3l)烃源岩贡献为主,存在中下寒武系烃源岩(ϵ_{1+2})侵染,全油碳同位素为 $-33.5\% \sim -33.6\%$,碳同位素特征与上奥陶统良里塔格组(O_3l)接近,三芳甾烷特征显示玉北原油来源于奥陶系烃源岩。

4 结 论

(1) 据原油饱和烃和芳香烃馏分分子地球化学特征以及碳同位素分析结果,将塔西南地区原油划分为 4 个族:巴什托族群为低蜡—含蜡、低硫轻质油;柯克亚族群为含蜡—高蜡、低硫凝析油,柯东 1 井原油具柯克亚原油类似物性特征;YB1 井族群原油为含蜡含硫的中质油;喀什凹陷原油族群为轻质—凝析油。

(2) 巴什托族群和柯克亚族群轻质油的族组成具有高饱和烃含量、高饱/芳比、低“非烃+沥青质”含量的特征;甾烷系列分布型式呈现 $C_{27} >> C_{28} < C_{29}$, C_{28} 甾烷相对丰度分布范围为 $21\% \sim 31\%$;三环萜烷系列分布型式大体一致,均呈 C_{23} 三环萜烷丰度优势, $C_{21}/C_{23} < 1$;巴什托曲 1 井、琼 003 井和亚松迪 BT2 井轻质油三环萜烷含量低, $C_{23}TT/C_{30}H$ 仅为 $0.11 \sim 0.26$;“三芬”系列组成差别明显,具硫芬丰度优势,介于 $50\% \sim 90\%$;巴什托油田原油及族组分碳同位素最轻,全油碳同位素处于 $-33.9\% \sim -35.5\%$,其中曲 3 井和 BT2 井轻质油碳同位素明显较其他原油偏重。烃源岩抽提物三芳甾烷和碳同位素显示,巴什托原油以奥陶系烃源岩贡献为主,存在寒武系烃源岩侵染。

(3) 柯克亚族群原油正构烷烃系列显示其生源可能来自高等植物蜡质生源产物的贡献;甾烷基本呈 $C_{27} < C_{28} \ll C_{29}$ 或 $C_{27} > C_{28} \ll C_{29}$ 分布, C_{28} 甾烷的相对丰度为 $31\% \sim 43\%$ 。三环萜烷系类化合物的分布型式呈现出 $C_{23}TT$ 丰度的微弱优势,藿烷系列化合物丰度较低,可能与原油为高一过成熟度的凝析油有关;“三芬”系列硫芬含量大部分大于 80% ,反映其生源条件为咸水条件下的强还原环境特征;全油碳同位素偏重,分布范围为 $-29.0\% \sim -30.2\%$ 。柯克亚原油族群具有高等植物生源的典型特征,可能来源于石炭系—二叠系烃源岩。

(4) 玉北原油族群 YB1 井原油与 YB1-2X 井原油

以饱和烃为主,高“非烃+沥青质”含量;甾烷呈现 $C_{27} < C_{28} \ll C_{29}$, C_{28} 甾烷的相对丰度为 22.8% ,处于巴什托原油族群内;三环萜烷 $C_{21}/C_{23} < 1$,“三芬”系列特征、全油碳同位素为 $-33.5\% \sim -33.6\%$,与巴什托油田原油相似。三芳甾烷特征显示玉北原油来源于奥陶系烃源岩。

(5) 克拉托原油的正构烷烃系列显示其生源可能来自藻类生源和高等植物蜡质生源的共同贡献,与克拉托油砂生源环境可能存在细微差别;克拉托原油和油砂中呈 $C_{27} > C_{28} < C_{29}$ 近对称“V”型分布;克拉托原油、油砂和杨叶油苗中三环萜烷化合物丰度普遍偏低,藿烷系列化合物丰度高;克拉托油砂较克拉托原油与杨叶油苗具绝对的硫芬优势及较高的氧芬含量;碳同位素和三芳甾烷系列显示,原油与陆相杨叶组湖相烃源岩可对比,克拉托油砂与下石炭统海相烃源岩相关。

参 考 文 献

- [1] 周路. 塔里木盆地麦盖提斜坡油气地质与勘探[M]. 北京:石油工业出版社,2006:23-275.
Zhou Lu. Petroleum geology and exploration in Makit Slope Tarim Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006: 23-275.
- [2] 康玉柱. 新疆油气资源开发工作回顾与展望[J]. 新疆地质, 2000, 18(2): 97-104.
Kang Yuzhu. Review and prospect on the exploitation work of the Oil-gas resources in Xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 2000, 18(2): 97-104.
- [3] 贾承造. 中国塔里木盆地构造特征与油气[M]. 北京:石油工业出版社,1997:12-57.
Jia Chengzao. Structure characteristics, oil, and gas in Tarim Basin, China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 12-57.
- [4] 童晓光, 梁狄刚, 贾承造, 等. 塔里木盆地石油地质研究新进展[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 1-178.
Tong Xiaoguang, Liang Digang, Jia Chengzao, et al. New frontiers of petroleum geology in Tarim Basin [M]. Beijing: Science Press, 1996: 1-178.
- [5] 赵文智, 张光亚. 被动大陆边缘演化与油气地质—以塔里木盆地西南地区为例[M]. 北京:石油工业出版社,2007:1-155.
Zhao Wenzhi, Zhang Guangya. Petroleum geology and evolution of passive continental margin example of southwest Tarim Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007: 1-155.
- [6] 刘梭军, 袁文贤. 塔里木盆地西南地区油气勘探回顾与展望[J]. 新疆地质, 2002, 20(增刊): 1-5.
Liu Loujun, Yuan Wenxian. Retrospect and prospect of oil-gas exploration in southwestern Tarim Basin [J]. Xinjiang Geology, 2002, 20(S1): 1-5.
- [7] 董大忠, 肖安成. 塔里木盆地西南坳陷油气地质特征及油气资源[M]. 北京:石油工业出版社,1998:1-256.
Dong Dazhong, Xiao Ancheng. Petroleum geological characteristics and resources and Southwest Depression of Tarim Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998: 1-256.

- [8] 王强,彭平安,曾建,等.叶城凹陷柯东1井凝析油及柯克亚原油的油源分析[J].地球化学,2014,43(05):469-476.
Wang Qiang,Peng Ping'an,Zeng Jian,et al. Oil source of condensates from Well Kedong 1 and crude oil from Kekeya in Yecheng depression[J]. *Geochimica*,2014,43(05):469-476.
- [9] 丁勇,贾存善,邵志兵.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[J].石油实验地质,2013,35(06):683-688.
Ding Yong,Jia Cunshan,Shao Zhibing. Geochemical features and sources of crude oils in Bachu—Maigaiti area[J]. *Petroleum Geology & Experiment*,2013,35(06):683-688.
- [10] 陶小晚,张义杰,段书府,等.塔里木盆地哈拉哈塘油田原油聚集过程与密度多变成因[J].石油学报,2015,36(4):405-415.
Tao Xiaowan,Zhang Yijie,Duan Shufu,et al. Crude oil accumulation processes and causes of highly variable oil density in Halahatang oilfield, Tarim Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*,2015,36(4):405-415.
- [11] 张水昌,张宝民,王飞宇,等.中—上奥陶统;塔里木盆地的主要油源层[J].海相油气地质,2000,5(1/2):16-22.
Zhang Shuichang,Zhang Baomin,Wang Feiyu,et al. The major source rock layers of Tarim Basin; Middle-Upper Ordovician[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*,2000,5(1/2):16-22.
- [12] 陈俊湘,屈秋平,邱斌.塔里木盆地巴什托普背斜石炭系油气藏形成条件[J].新疆石油地质,1997,18(4):319-323.
Chen Junxiang,Qu Qiuping,Qiu Bin. Formation condition of Carboniferous reservoir in Bashituopu anticline, Tarim basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*,1997,18(4):319-323.
- [13] 段毅,周世新,孟自芳.塔里木盆地群5井和曲1井原油的油源研究—脂肪酸及烷基环己烷系列化合物提供的新证据[J].石油实验地质,2001,23(4):433-437.
Duan Yi,Zhou Shixin,Meng Zifang. Study on the oil source of crude oils from Well Qun-5 and Well Qu-1 in the Tarim Basin—New evidences from fatty acids and alkyl cyclohexanes series compounds[J]. *Petroleum Geology & Experiment*,2001,23(4):433-437.
- [14] 王东良,李勇,敬兵,等.塔里木盆地柯克亚地区原油差异与成因分析[J].石油实验地质,2007,29(2):192-198.
Wang Dongliang,Li Yong,Jing Bing,et al. Analysis of the differences and genesis for the Kekeya oil in TarimBasin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*,2007,29(2):192-198.
- [15] 钱玲,卢玉红,黄龙藏,等.塔里木盆地喀什凹陷克拉托天然气来源分析及聚气特征[J].地质科学,2007,42(2):253-266.
Qian Ling,Lu Yuhong,Huang Longcang,et al. Source and gathering features of Kelatuo Natural gas in the Kashi Sag, TarimBasin[J]. *Chinese Journal of Geology*,2007,42(2):253-266.
- [16] 王昭明,赵孟军,张水昌,等.塔里木盆地西部阿克莫木气田形成初探[J].地质科学,2005,40(2):237-247.
Wang Zhaoming,Zhao Mengjun,Zhang Shuichang,et al. A preliminary study on formation of Akemo gas field in the Kashi sag, TarimBasin[J]. *Chinese Journal of Geology*,2005,40(2):237-247.
- [17] 张君峰,王东良,王招明,等.喀什凹陷阿克莫木气田天然气成藏地球化学[J].天然气地球科学,2005,16(4):507-513.
Zhang Junfeng,Wang Dongliang,Wang Zhaoming,et al. Natural gas deposit formation geochemistry of Akmomugasfield Kashi Sag in TarimBasin[J]. *Natural Gas Geoscience*,2005,16(4):507-513.
- [18] 赵孟军,王招明,宋岩,等.塔里木盆地喀什凹陷油气来源及其成藏过程分析[J].石油勘探与开发,2005,32(2):50-54.
Zhao Mengjun,Wang Zhaoming,Song Yan,et al. Source and accumulation of oil and gas in Kashi Sag, Tarim Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*,2005,32(2):50-54.
- [19] Peters K E, Moldowan J M. The biomarker guide; interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments [M]. New Jersey:Prentice Hall Englewood Cliffs,1993:1-363.
- [20] Tissot BP,Welte DH. Petroleum formation and occurrence[M]. Xu Yongsheng,Xu Lian,Hao Shisheng,trans. Beijing:Petroleum Industry press,1984:1-699.
- [21] Connan J. Biodegradation of crude oils in reservoir[G]//Brooks J,Welte D H (Eds.), *Advance in Petroleum Geochemistry*. London:Academic Press,1984:299-333.
- [22] Larter S,Wilhelm A,Head I,et al. The controls on the composition of biodegraded oils in the deep subsurface, part1: biodegradation rates in petroleum reservoirs[J]. *Organic Geochemistry*,2003,34(4):601-613.
- [23] Magoon L B,Dow W G. The petroleum System—from source to trap [M]. New York: American Association of Petroleum Geologists,1994,60:3-23. Tissot BP,Welte D H. 石油形成与分布[M].徐永元,徐谦,郝石生译.北京:石油工业出版社,1984:1-699.
- [24] 李素梅,庞雄奇,金之钧.八面河地区原油、烃源岩中甾类化合物的分布特征及其应用[J].地球科学—中国地质大学学报,2002,27(6):711-717.
Li Sumei,Pang Xiongqi,Jin Zhijun. Distribution and significance of steroids in bamianhe oilfield, East China[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*,2002,27(6):711-717.
- [25] 朱扬明,张春明,张敏,等.沉积环境的氧化还原性对重排甾烷形成的作用[J].沉积学报,1997,15(4):105-110.
Zhu Yangming,Zhang Chunming,Zhang Min,et al. The effect of Oxidation-reduction nature of depositional environments on the formation of diasteranes[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*,1997,15(4):105-110.
- [26] 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,1995:1-107.
Wang Tieguan,Zhong Ningning,Hou Dujie,et al. Genetic mechanism and occurrence of immature hydrocarbon[M]. Beijing:Petroleum Industry Press,1995:1-107.
- [27] 王铁冠,何发岐,王春江,等.塔河油田奥陶系油气藏成藏地球化学研究[R].中国石油大学(北京),研究报告,2003,1-155.
Wang Tieguan,He Faqi,Wang Chunjiang,et al. Study Work on accumulation geochemistry of Ordovician petroleum reservoir in Tahe Oilfield[R]. Internal Report, China University of Petroleum (Beijing),2003,1-155.
- [28] 常象春,林玉祥,郭海花,等.混合原油的地球化学特征及成藏贡献率[J].地质科技情报,2007,26(2):75-80.
Chang Xiangchun,Lin Yuxiang,Guo Haihua,et al. Geochemistry and individual contribution ratio of mixed crude oils[J]. *Geological Science and Technology Information*,2007,26(2):75-80.
- [29] 陈建平,梁狄刚,王绪龙,等.彩南油田多源混合原油的油源(一)—烃源岩基本地球化学特征与生物标志物特征[J].石油勘

- 探与开发,2003,30(4):20-24.
- Chen Jianping, Liang Digang, Wang Xulong, et al. Oil-source identification for the mixed oils derived from multiple source rocks in the Cainan Oilfield, Junggar Basin, Northwest China. Part I: fundamental geochemical features of source rocks[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(4): 20-24.
- [30] 陈建平, 梁狄刚, 王绪龙, 等. 彩南油田多源混合原油的油源(二)—原油地球化学特征、分类与典型原油油源[J]. *石油勘探与开发*, 2003, 30(5): 34-38.
- Chen Jianping, Liang Digang, Wang Xulong, et al. Oil-source correlation of mixed oils derived from multiple source rocks in the Cainan Oilfield, Junggar Basin, Northwest China. Part II: geochemical characteristics, typing and oil sources of typical crude oils[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(5): 34-38.
- [31] 常象春, 王明镇, 韩作振. 试论适合叠合盆地的油源对比方法[J]. *地球科学与环境学报*, 2004, 26(4): 32-36.
- Chang Xiangchun, Wang Mingzhen, Han Zuozhen. Discussion on methods of oil-source correlations suitable for composite basins[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2004, 26(4): 32-36.
- [32] 卢鸿, 冯小杰. 油源对比常规方法的使用误区[J]. *西安工程学院学报*, 2000, 22(2): 56-59.
- Lu Hong, Feng Xiaojie. On the misunderstand of oil-source correlation methods[J]. *Journal of Xi'an Engineering University*, 2000, 22(2): 56-59.
- [33] 李振广, 李景坤, 宋桂侠. 多元统计分析在油源对比中的应用[J]. *新疆石油地质*, 2004, 25(3): 262-263.
- Li Zhengguang, Li Jingkun, Song Guixia. Application of multivariate statistical analysis to Oil-source correlation[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2004, 25(3): 262-263.
- [34] 张敏, 黄光辉, 赵红静, 等. 塔里木盆地柯克亚地区凝析油气藏成因特征研究[J]. *中国科学(D辑:地球科学)*, 2008, 38(增刊 II): 17-23.
- Zhang M, Huang G H, Hu G Y, et al. Geochemical study on oil-cracked gases and kerogen-cracked gases (I)—Experimental simulation and products analysis[J]. *Science in China*, 2009, 52(1 Supplement): 1-9.
- [35] 林壬子, 王培荣, 戴允健, 等. 矿物燃料中多环芳烃的石油地球化学意义[M]. 北京:地质出版社, 1987: 1-50.
- Lin Renzi, Wang Peirong, Dai Yunjian, et al. Geochemical significance of polycyclic aromatic hydrocarbons in fossil fuels[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 1-50.
- [36] 李美俊, 王铁冠, 刘菊, 等. 烷基二苯并噻吩总量示踪福山凹陷凝析油藏充注途径[J]. *中国科学 D 辑:地球科学*, 2008, 38(S1): 122-128.
- Li Meijun, Wang Tieguan, Liu Ju, et al. Total alkyl dibenzothiophenes content tracing the filling pathway of condensate reservoir in the Fushan Depression, South China Sea [J]. *Science in China*, 2008, 51(2 Supplement): 138-145.
- [37] 王铁冠, 何发岐, 李美俊, 等. 烷基二苯并噻吩类: 示踪油藏充注途径的分子标志物[J]. *科学通报*, 2005, 50(2): 176-182.
- Wang Tieguan, He Faqi, Li Meijun, et al. Alkyldibenzothiophenes: molecular tracers for filling pathway in oil reservoirs[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(22): 2399-2404.
- [38] Hughes W B, Holba A G, Dzou L I P. The ratios of dibenzothiophene to phenanthrene and Pristane to phytane as indicators of depositional environment and lithology of petroleum source rocks[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(17): 3581-3598.
- [39] 张水昌, 梁狄刚, 张宝民, 等. 塔里木盆地海相油气的生成[M]. 北京:石油工业出版社, 2004: 1-406.
- Zhang Shuichang, Liang Digang, Zhang Baomin, et al. Petroleum geology and exploration of Tarim Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 1-406.
- [40] 张水昌, 梁狄刚, 黎茂稳, 等. 分子化石与塔里木盆地油源对比[J]. *科学通报*, 2002, 47(增刊): 16-23.
- Zhang Shuichang, Liang Digang, Li Maowen, et al. Molecular fossils and oil-source rock correlation in Tarim Basin, NW, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(S1): 20-27.
- [41] 刘全有, 金之钧, 王毅, 等. 塔里木盆地天然气成因类型与分布规律[J]. *石油学报*, 2009, 30(1): 46-50.
- Liu Quanyou, Jin Zhijun, Wang Yi, et al. Genetic type and distribution of natural gas in Tarim Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(1): 46-50.
- [42] 秦胜飞, 贾承造, 李梅. 和田河气田天然气东西部差异及原因[J]. *石油勘探与开发*, 2002, 29(5): 16-18.
- Qin Shengfei, Jia Chengzao, Li Mei. The difference in geochemical characteristics of natural gases between eastern and western parts in Hetianhe gas field of Tarim basin and its origin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2002, 29(5): 16-18.

(收稿日期 2015-04-11 改回日期 2015-08-06 责任编辑 张怡)