

引用格式:樊柯廷,高岗,李新宁,等.准噶尔盆地东部石炭系—二叠系原油差异及运聚模式新认识——以吉15井区为例[J].天然气地球科学,2024,35(3):479-494.
FAN Keting, GAO Gang, LI Xinning, et al. New understanding of the differences and accumulation patterns of Carboniferous-Permian crude oil in the eastern Junggar Basin: Case study of the J15 well area[J]. Natural Gas Geoscience, 2024, 35(3): 479-494.
DOI: 10.11764/j.issn.1672-1926.2023.09.011

准噶尔盆地东部石炭系—二叠系原油差异 及运聚模式新认识 ——以吉15井区为例

樊柯廷^{1,2}, 高岗^{1,2}, 李新宁³, 张妍^{1,2}, 林潼⁴, 张有锦^{1,2},
杨玉忠⁵, 康积伦³, 张伟³, 马强³, 李杰^{1,2}

(1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249;

2. 油气资源与探测国家重点实验室(中国石油大学(北京)), 北京 102249;

3. 中国石油吐哈油田公司勘探开发研究院, 新疆 哈密 839009;

4. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083;

5. 中国石油招标中心新疆分中心, 新疆 哈密 839009)

摘要:针对准噶尔盆地东部吉木萨尔凹陷吉15井石炭系—二叠系多层段含油气、多套烃源岩及其油源关系仍有异议的关键问题,在各段原油与油砂物性特征、族组成特征、碳同位素特征与生物标志物特征分析基础上,主要依据生物标志物组成特征,综合考虑原油碳同位素等,将石炭系—二叠系原油类型划分为A、B、C 3类,明确了不同类型原油的来源,最终建立了石炭系—二叠系油气成藏模式。A型原油分布在二叠系梧桐沟组与芦草沟组上段,是源自芦草沟组咸水湖相烃源岩的低熟油,其中梧桐沟组属于古生新储,芦草沟组上段为自生自储;B型原油分布在芦草沟组下段与石炭系松喀尔苏组b段顶部,来自凹陷深部成熟度更高的松喀尔苏组b段烃源岩,并混有少量芦草沟组所生原油,具有侧向运移特征;C型原油分布于松喀尔苏组源岩内部的火山岩夹层,为低熟原油,属于近源自生自储。该认识肯定了准噶尔盆地东部地区石炭系烃源岩的有效性,为下步石炭系油气战略突破区的勘探提供了重要依据。

关键词:准噶尔盆地东部地区;吉15井;石炭系—二叠系;原油类型;油源对比;运聚模式

中图分类号:TE121

文献标志码:A

文章编号:1672-1926(2024)03-0479-16

0 引言

准噶尔盆地是中国西部重要的含油气盆地之一^[1-7],其沉积地层从石炭系到第四系均有广泛分布,除第四系外,其他层系都不同程度地发现了油气资源^[8]。已发现的油气资源主要分布在东部隆起区、西部隆起区、陆梁隆起区、中央拗陷区与南缘冲

断带。东部隆起区面积为 $2.6 \times 10^4 \text{ km}^2$,火烧山、沙南、三台与北三台等油气田主要分布在该区西侧的帐北断裂带,其控制面积不足4 000 km^2 ,作为准噶尔盆地油气勘探的重要接替区,东部隆起区的油气资源前景备受关注。作为东部隆起区重要生烃凹陷之一的吉木萨尔凹陷自20世纪50年代始就进行油气勘探,然而在近半个世纪中,该地区的勘探和

收稿日期:2023-07-24;修回日期:2023-09-15;网络首发日期:2023-10-09.

基金项目:中国石油天然气股份有限公司专项“吐哈探区石炭系石油地质条件与勘探方向选择研究”(编号:2021DJ0306),“北疆海相泥盆—石炭系油气地质研究”(编号:2022DJ0507);中石油战略合作专项(编号:ZLZX2020-01-06-03)联合资助。

作者简介:樊柯廷(1998-),男,山西孝义人,博士研究生,主要从事油气地质与油气成藏研究.E-mail: 2022310030@student.cup.edu.cn.

通信作者:高岗(1966-),男,陕西高陵人,博士,教授,主要从事油气地质与油气成藏研究.E-mail: gaogang2819@sina.com.

开发工作多集中于二叠系,仅有少量钻井钻遇石炭系^[9-10]。2001年,吉15井在石炭系压裂试油后获日产5.1 t的工业油流,并钻遇优质烃源岩;2022年,吉152井石炭系压裂试油见良好油气显示,最高日产10.88 t。虽然石炭系油气藏勘探不断取得突破^[11],但除了五彩湾气田、克拉美丽气田、阜康凹陷周缘扩边外,油气勘探场面一直难以拓展^[12],迄今为止石炭系石油探明率与天然气探明率分别仅为15.3%、13.9%,仍是勘探程度较低的一个层系^[13-14]。

吉15井于二叠系梧桐沟组、芦草沟组上段、下段和石炭系松喀尔苏组均发现了油气或油气显示。前人对该井原油类型及成因提出了不同观点:廖健德等^[15]认为原油可分为2类,分别来源于二叠系芦草沟组与石炭系,为自生自储型,但实际上凹陷周缘以扇三角洲沉积体系为主^[16],吉15井所处的斜坡高部位几乎不发育烃源岩,其中赋存的原油不属于自生自储;贺凯^[17]、刘海磊等^[18]认为石炭系原油成因复杂,主要来自于石炭系巴塔玛依内山组中段,而随着石炭纪地震、地层格架的进一步建立,认为巴塔玛依内山组为火山岩集中发育带,其与盆地北

部克拉美丽气田的主力产气层相对应,巴山组中段所发育的炭质泥岩带应归属于松喀尔苏组b段顶部^[10,12,19-20],吉3301井实钻结果也显示研究区巴塔玛依内山组并未发育规模烃源岩;于凯等^[19]认为石炭系内部原油为自生自储型,原油来源于原地松喀尔苏组b段,但吉15井松喀尔苏组b段原油邻近烃源岩埋深浅,其较低的成熟度与所开采出成熟度较高的“稀油”特征不符(表1),很显然该套原油应该来自更深部、成熟度更高的烃源岩。可见已有的认识并未客观反映石炭系烃源岩成烃特征与油气成藏规律。随着油气勘探的逐步推进和对石炭系发育的深入认识,对原油来源的不同认识势必会造成下一步勘探方向的不同。

本文通过对吉15井石炭系一二叠系不同层位原油与油砂的密度、黏度等物理特征,生物标志物参数、碳同位素等地球化学特征的综合对比分析,研究原油特征,划分原油类型,重新厘定了不同层段原油的来源,综合分析二叠系一石炭系油气成藏特征,明确准东地区石炭系资源潜力,为下步油气勘探提供重要的指导作用。

表1 吉15井石炭系一二叠系烃源岩综合评价(部分数据来源于文献[21-22])

Table 1 Comprehensive evaluation of Carboniferous-Permian source rocks in Well J15 (partial date based on Refs.[21-22])

层位	深度/m	岩性	有机质丰度评价				有机质类型评价						有机质成熟度评价			烃源岩综合评价
			TOC (S ₁ +S ₂)		氯仿沥青“A”含量/%	I _H /(mg/g)	氯仿沥青“A”碳同位素/‰	有机组分含量/%				类型指数	T _{max} /℃	R _O /‰	ββ/(ββ+αα)C ₂₉ 甾烷	
			/%	/(mg/g)				腐泥组	壳质组	镜质组	惰质组					
P ₂ L ₂	2 280.68	灰质泥岩	5.92	17.88	0.416 2	295.44	—31.66						429	1.00?	0.24	高丰度Ⅱ ₂ 型未熟油源岩
C ₁ S ₁ ^b	2 858.79	炭质泥岩	25.30	42.33		145.49							432			
	2 860.02	炭质泥岩	38.77	31.09	0.448 3	79.11	—25.61	4.30	12.60	54.90	28.20	—58.78	437	0.68	0.23	
	2 860.51	炭质泥岩	39.30	79.14		177.96							432			
	2 860.77	煤	41.20	36.49	0.588 9	86.94	—25.53						436	0.64	0.21	高丰度Ⅲ型
	2 860.94	煤	41.10	37.42		83.59							433			低熟气源岩
	2 863.95	炭质泥岩	29.50	29.45		97.73							432			
	2 865.00	炭质泥岩	29.32	28.67	0.294 9	96.96	—25.43	10.00	10.00	65.00	15.00	—48.80	431	1.00	0.20	
	2 878.98	炭质泥岩	25.10	57.06		210.20		6.83	13.47	76.18	3.52	—47.09	432			

1 地质特征

1.1 构造、地层特征

准噶尔盆地夹持于西北部扎伊尔山、东北部克拉美丽山与南部博格达山间,呈东西展布的狭长三角形展布形态^[23-28]。吉木萨尔凹陷位于盆地东部隆起区西南部[图1(a)],该隆起区先后经历了海西、印支、燕山、喜马拉雅等多期构造运动,晚石炭世进入陆内构造变形旋回,二叠纪经历裂谷一断陷盆地

阶段,三叠纪一侏罗纪经历了断一拗盆地阶段,而后白垩纪进入陆内拗陷盆地阶段,新近纪进入再生前陆盆地阶段^[9,21,29-32]。

吉木萨尔凹陷是准噶尔盆地东部地层发育最全的凹陷,泥盆系一第四系均有发育,东以斜坡过渡至奇台凸起,西、南、北侧以西地断裂、三台断裂、吉木萨尔断裂为界,整体呈西断东超的箕状凹陷^[33]。在北东一南西向构造剖面上,凹陷所在的断裂下盘的泥盆系一侏罗系厚度较大[图1(b),图2(a)]。该

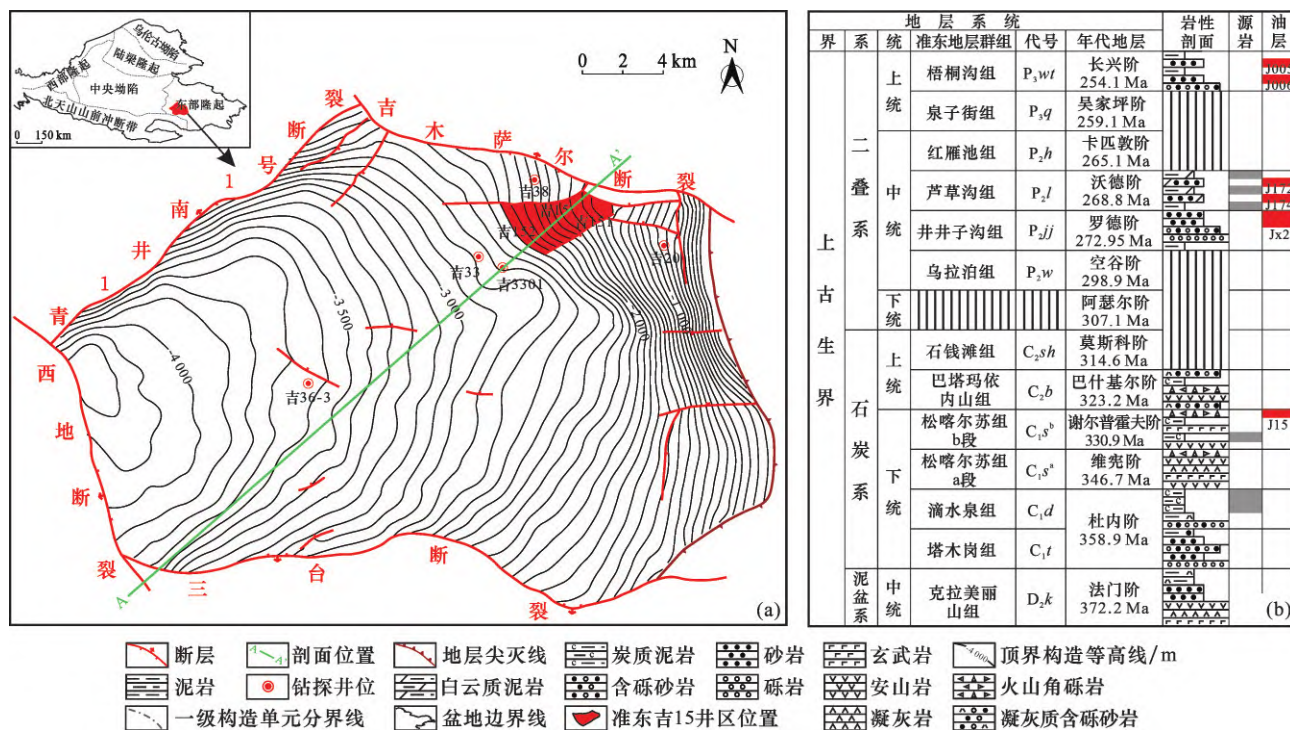


图1 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷位置示意(a)及地层综合柱状图(b)(据文献[28,34-35]修改)

Fig.1 Schematic map of the Jimsar Depression in the Junggar Basin (a) and integrated stratigraphic histogram (b) (modified from Refs.[28,34-35])

区二叠系—石炭系存在石炭系滴水泉组、松喀尔苏组b段的暗色泥岩、炭质泥岩与中二叠统芦草沟组油页岩、暗色泥岩、白云质泥岩2套烃源岩^[36-42]。石炭系火山岩、中二叠统芦草沟组砂岩、上二叠统梧桐沟组砂砾岩为重要储集层,形成了多套生储盖组合^[43]。其中第一套储盖组合石炭系顶部火山角砾岩为储层,中二叠统井井子沟组下部泥岩为盖层;第二套井井子沟组上部砂岩和芦一段砂岩为储层,芦二段中上段泥岩为盖层;第三套为上二叠统梧桐沟组下部砂砾岩为储层,上部发育厚泥岩为盖层的储盖组合[图2(b)]。吉15井位于吉木萨尔凹陷东北部靠近凹陷边缘部位[图1(a)],相较于凹陷中心,地层埋藏较浅,完钻深度为2 890 m,完钻层位为石炭系。该井由上到下依次钻遇了第四系到石炭系松喀尔苏组b段,地层发育齐全,其中松喀尔苏组b段进钻遇了50 m。

1.2 钻遇烃源岩特征

吉15井中二叠统芦草沟组上段与上石炭统松喀尔苏组b段发育2套烃源岩。其中芦草沟组属于咸化湖泊沉积,本井钻揭200 m,烃源岩厚度在40 m左右,占钻揭地层厚度的20.0%,烃源岩主要为灰色

泥岩和灰色灰质泥岩;松喀尔苏组b段以火山岩发育为特征,夹有煤系源岩发育,本井钻揭松喀尔苏组b段50 m,烃源岩厚度为25.4 m,占钻揭地层厚度的50.8%,烃源岩主要为炭质泥岩和劣质煤。咸化湖相源岩多形成于闭塞的静水还原环境,煤系源岩多形成于河流相、沼泽相、浅湖等相对开放的氧化环境沉积体系^[10,12]。吉15井二叠系、石炭系2套源岩在不同沉积背景下,两者的有机质丰度、类型等地球化学指标参数上有相当大的差异。

从层位上看,松喀尔苏组b段烃源岩有机质丰度明显高于芦草沟组烃源岩(表1),吉15井二叠系芦草沟组湖相烃源岩TOC含量为5.92%、生烃潜量(S_1+S_2)为17.88 mg/g、氢指数为295.44 mg/g、甾烷构型转化参数 $\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$ C_{29} 甾烷为0.24,总体是一套高丰度Ⅱ₂型未熟油源岩,生油能力较差;石炭系松喀尔苏组b段煤系烃源岩TOC含量为25.10%~41.20%,平均为32.74%,生烃潜量(S_1+S_2)为28.67~79.14 mg/g,平均为44.16 mg/g,氢指数为79.11~210.20 mg/g,平均为132.02 mg/g,有机组分含量中腐泥组平均为7.0%,壳质组平均为12.0%,镜质组平均为65.4%,惰质组平均为15.6%,类型指数为-51.50,烃源岩干酪根碳同位

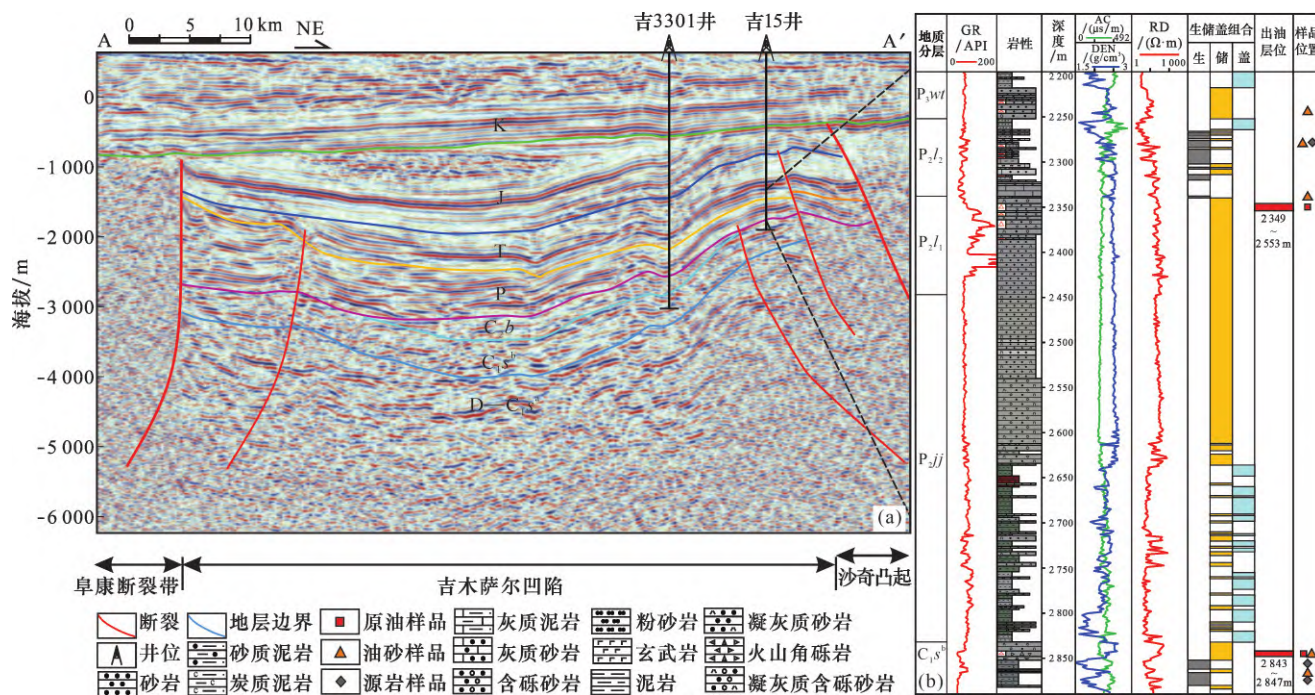


图2 吉木萨尔凹陷地震—地质解释剖面(a, 剖面位置见图1)及吉15井地层综合柱状图(b)
Fig.2 Seismic-geological interpreted cross-section of the Jimsar Depression (a, location is shown in Fig. 1) and integrated stratigraphic histogram of Well J15 (b)

素值为 $-24.03\% \sim -23.84\%$, 平均为 -23.97% , 镜质体反射率为 $0.64\% \sim 1\%$, 平均为 0.79% , 甾烷构型转化参数 $\beta\beta/(\beta\beta + \alpha\alpha)_{C_{29}}$ 甾烷为 $0.21 \sim 0.24$, 平均为 0.21 , 总体为一套高丰度低熟Ⅲ型好气源岩, 生气能力较好, 具有一定的生油能力(表1)。

2 原油特征与类型划分

吉15井在2 349~2 353 m井段的二叠系芦草沟组一段凝灰质砂砾岩层与2 833~2 847 m井段的石炭系松喀尔苏组b段顶部火山角砾岩层进行了试油[图2(b)]。因此本次原油样品主要为吉15井二叠系芦草沟组一段凝灰质砂砾岩层和石炭系松喀尔苏组b段顶部火山角砾岩层原油, 沥青样品主要为二叠系梧桐沟组砂砾岩、二叠系芦草沟组一段砂砾岩、石炭系松喀尔苏组b段顶部火山角砾岩与上部炭质泥岩中安山岩夹层抽提物[图2(b)]。

2.1 原油与沥青特征

吉15井的试油结果显示, 2个试油段的原油物性相近。其中二叠系芦草沟组一段的原油密度和黏度分别介于 $0.7758 \sim 0.7903 \text{ g/cm}^3$ 和 $1.24 \sim 2.53 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 之间, 均值分别为 0.7825 g/cm^3 和 $1.81 \text{ mPa}\cdot\text{s}$; 石炭系松喀尔苏组b段的原油密度和黏度分别介于 $0.7808 \sim 0.8005 \text{ g/cm}^3$ 和 $1.33 \sim 1.97 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, 均值分

别为 0.7881 g/cm^3 和 $1.53 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, 可见均属于低黏轻质油。芦一段的原油含蜡量分布在 $5.59\% \sim 6.5\%$ 之间, 平均为 5.96% , 凝固点为 $2 \sim 4^\circ\text{C}$, 松喀尔苏组b段的原油含蜡量区间为 $4.91\% \sim 5.88\%$, 均值为 5.50% , 凝固点为 $0 \sim 7^\circ\text{C}$, 两者同属于正常含蜡低凝原油。二叠系芦草沟组一段原油与石炭系松喀尔苏组b段纵向间隔500 m, 而由上述数据可知, 两者原油差异极小, 推测其应该来自相近烃源岩。目前芦草沟组勘探程度较高, 从已有的平面原油物性分析数据来看, 芦一段原油的密度和黏度分别介于 $0.8873 \sim 0.9247 \text{ g/cm}^3$ 和 $97.28 \sim 664.52 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 之间, 均值分别为 0.9122 g/cm^3 和 $289.02 \text{ mPa}\cdot\text{s}$; 芦二段原油密度和黏度分别介于 $0.8753 \sim 0.9032 \text{ g/cm}^3$ 和 $27.76 \sim 120.98 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 之间, 均值分别为 0.8866 g/cm^3 和 $61.17 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。2个层段的原油都总体属于中质油和稠油, 芦一段原油密度和黏度总体偏高主要与烃源岩成熟度和母质组成差异有关^[44-45]。可见, 吉15井发现的芦一段、石炭系松喀尔苏组b段原油与区域上芦草沟组生成的原油差异显著, 初步推断应该来自于其他烃源岩。吉15井梧桐沟组砂砾岩与松喀尔苏组b段上部安山岩夹层油砂未试油, 选取含油储层样品进行对比分析。

吉15井不同层段原油与抽提物的族组成总体

上芳香烃相对含量偏低,饱和烃与非烃+沥青质相对含量有较大变化范围。其中芦一段原油饱和烃含量为88.77%,芳香烃含量为9.56%,非烃+沥青质含量为1.67%;石炭系松b段原油饱和烃含量为85.49%,芳香烃含量为10.07%,非烃+沥青质含量为4.44%;二叠系梧桐沟组油砂与芦二段油砂的饱和烃含量为37.31%~55.93%,芳香烃含量为20.50%~27.25%,非烃+沥青质含量为18.11%~42.18%;石炭系松喀尔苏组b段2个油砂样品数据差异大,顶部火山角砾岩油砂抽提物的饱和烃含量为78.99%,芳香烃含量为12.15%,非烃+沥青质含量为8.85%,而中部安山岩夹层油砂样品饱和烃含量仅为14.19%,芳香烃含量为21.46%,非烃+沥青质含量达64.35%。芦一段原油、松b段原油与火山角砾岩抽提物饱和烃相对含量最高,其均在75%以上,非烃+沥青质相对含量均低于10%,芳香烃相对含量在9.56%~12.15%之间;梧桐沟组油砂、芦二段油砂特征相近;松b段炭质泥岩安山岩夹层油砂抽提物特征又呈独一类的特点。上述族组成差异表明,不同层段原油、沥青来源不同(图3)。

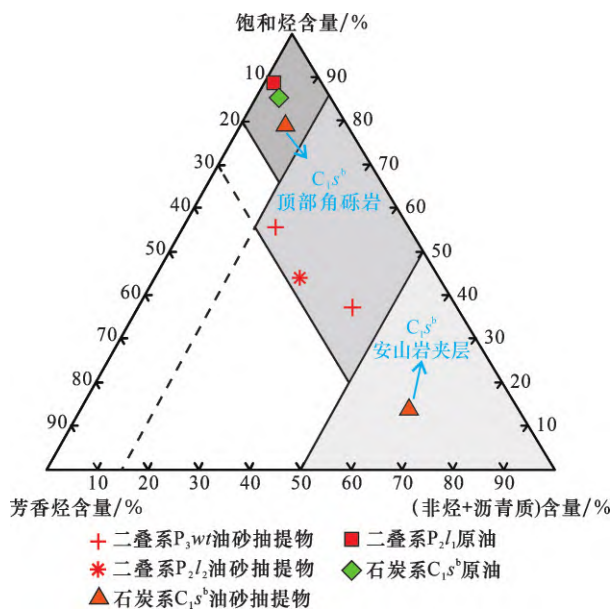


图3 吉15井石炭系—二叠系原油、油砂提取物族组成三角图

Fig.3 Triangular diagram showing the fraction composition of crude oil, oil sand extract samples of the Carboniferous-Permian in Well J15

原油碳同位素是一个复合成因指标,其影响因素与母质及运移等均有联系,合理的使用是成藏研究中的重要判断依据^[46-48]。吉15井全油及其氯仿抽

提物 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈现两类特征(图4):其中芦一段原油 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-25.22‰、松b段原油 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-26.22‰、松b段油砂 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-26.21‰和-25.53‰,该部分原油碳同位素组成偏重,属于典型的煤成油碳同位素特征;而梧桐沟组油砂 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-31.07‰、芦二段油砂 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-31.66‰,具有明显的腐泥型干酪根贡献^[49-50]。值得指出的是,二叠系芦一段原油与其之上芦二段的油砂样品碳同位素值有较大差异,揭示了其来源的不同。

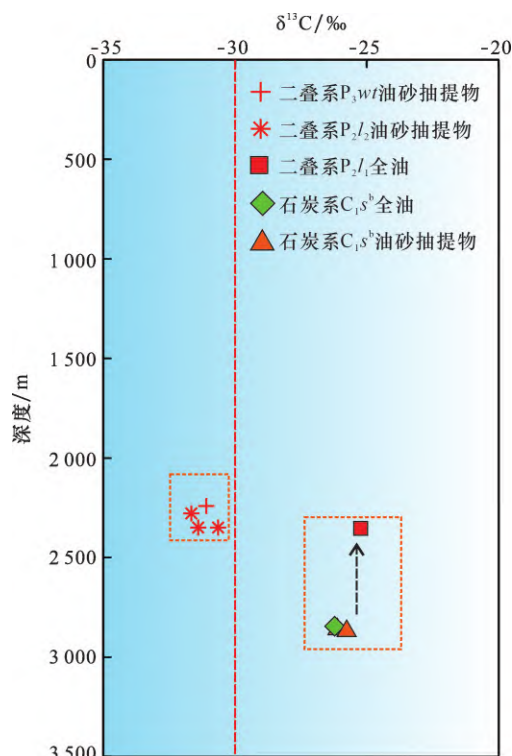


图4 吉15井石炭系—二叠系全油、氯仿抽提物碳同位素值与深度关系

Fig.4 Relationship between the carbon isotope values and depth of the whole oil and chloroform extract samples of the Carboniferous-Permian in Well J15

生物标志物表现特征中吉15井石炭系与二叠系原油及抽提物有着较大变化。在 C_{20} — C_{21} — C_{23} 三环萜烷组成特征上(图5),除松b段安山岩油砂样品外,其余原油及油砂分布在同一范围内。主体部分 C_{20} 三环萜烷相对含量集中于25%左右; C_{21} 三环萜烷的相对含量与 C_{20} 三环萜烷相对含量的分布情况类似,集中于35%~45%之间,少数样品高于45%; C_{23} 的相对含量分布于20%~40%之间;而松b段安山岩油砂样品 C_{20} 三环萜烷相对含量为46.25%, C_{21} 三环萜烷相对含量为38.55%, C_{23} 三环萜烷相对

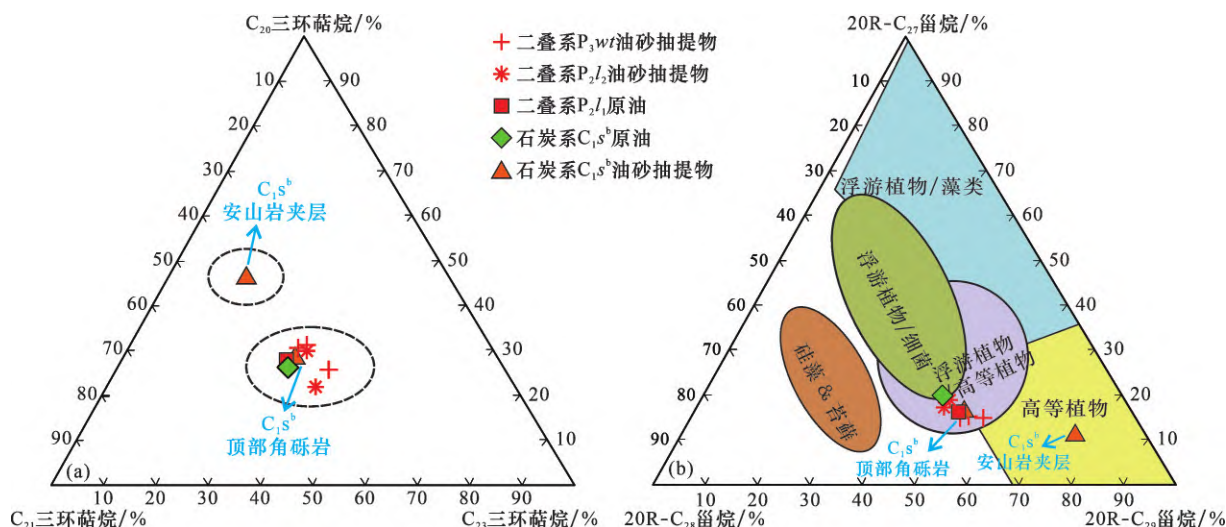


图5 吉15井石炭系—二叠系原油及油砂 C_{20} — C_{21} — C_{23} 三环萜烷(a)与 C_{27} — C_{28} — C_{29} 规则甾烷含量(b)分布

Fig.5 The distribution of relative contents of C_{20} — C_{21} — C_{23} tricyclic terpanes (a) and C_{27} — C_{28} — C_{29} regular steranes in crude oil and oil sand samples (b) of the Carboniferous-Permian from Well J15

含量明显低,仅为15.20%。同样对规则甾烷 C_{27} — C_{28} — C_{29} 的分布型式进行统计,图示在全部样品中, $20R$ - C_{29} 规则甾烷占有绝对的优势, $20R$ - C_{28} 规则甾烷次之, $20R$ - C_{27} 规则甾烷的相对占比较小,反映母质以高等植物来源为主。其中松b段安山岩油砂样品的 $20R$ - C_{27} 规则甾烷占比为11.21%, $20R$ - C_{28} 规则甾烷占比为13.64%, $20R$ - C_{29} 规则甾烷占比为75.15%, 其余二叠系原油及油砂样品分布较为集中, $20R$ - C_{29} 规则甾烷占比介于44.79%~55.78%之间,平均占比为49.64%; $20R$ - C_{28} 规则甾烷占比范围为19.59%~35.64%,平均为30.08%; $20R$ - C_{27} 规则甾烷占比仅为14.83%~32.16%,平均为20.31%[图5(a),图5(b)]。

相较于三环二萜烷与规则甾烷的分布构型, $\alpha\alpha\alpha$ - $20S/(20S+20R)$ C_{29} 甾烷、姥植比(Pr/Ph)、伽马蜡烷指数($Gam./C_{30}H$)、 Pr/nC_{17} 、 Ph/nC_{18} 等生物标志物参数对于样品的区别度更为明显。本井样品的成熟度从低熟到高熟均有分布,其中松喀尔苏组安山岩油砂样品成熟度最低,其次为梧桐沟组油砂与芦二段油砂,而芦一段原油、松b段原油、松b段火山角砾岩油砂抽提物的成熟度已达到高熟阶段[图6(a)]。姥植比在0.89~3.61之间均有分布,其中松喀尔苏组b段原油姥植比为1.76,顶部火山角砾岩油砂样品姥植比为1.88,中部安山岩油砂姥植比为3.61;芦一段原油样品姥植比为2.16;芦二段油砂样品姥植比为1.40;梧桐沟组油砂样品姥植比集中于0.89~1.10之间。在 Pr/nC_{17} 、 Ph/nC_{18} 参数上也可见明显差异,其中梧桐沟组油砂与芦二段油砂反

映母质来源于藻类;松喀尔苏组安山岩夹层油砂反映有机质主要来源于陆相环境;芦一段原油、松喀尔苏组原油、松喀尔苏组顶部火山角砾岩油砂母质为过渡环境下的混合有机质[图6(b)],由于样品热演化程度较高,点位偏向于低值范围,恢复热演化程度后,样品点应位于上述两者间。根据上述原油物性、族组分含量、碳同位素值、生物标志物数据等可见,该井原油并非来自同一层位,且原油样品间存在一定差异。

2.2 原油类型划分

综合上述对研究区原油、油砂各类特征的分析,将其划分为A型、B型、C型3类(图7,表2)。3类原油在正构烷烃、类异戊二烯烃、萜烷、甾烷等生物标志物组成及相关参数方面都表现出了较为明显的差异(表2)。

A型原油/沥青主要分布在二叠系梧桐沟组及芦草沟组上段。主峰碳数为 nC_{25} 或 nC_{27} , CPI 值为1.11~1.52,平均值为1.29,奇偶优势较为明显,姥植比介于0.98~1.15之间,均值为1.08, Pr/nC_{17} 相较于 Ph/nC_{18} 低,含有丰度极高的 β -胡萝卜素, GC-MS 图(图7)上可见明显 α -胡萝卜素。三环萜烷含量相对较低, C_{20} 、 C_{21} 、 C_{23} 三环萜烷具有山峰型构型,其中 C_{20} 相对平均含量为27.55%, C_{21} 相对平均含量为36.89%, C_{23} 三环萜烷相对平均含量为35.55%。五环萜烷以 C_{30} 藿烷为主, $(C_{20}+C_{21}+C_{23})$ 三环萜烷/ C_{30} 藿烷值为0.10~0.19。Ts 丰度较低, Ts/Tm 值最小为0.09,最大值为0.28,伽马蜡烷含量较高,伽

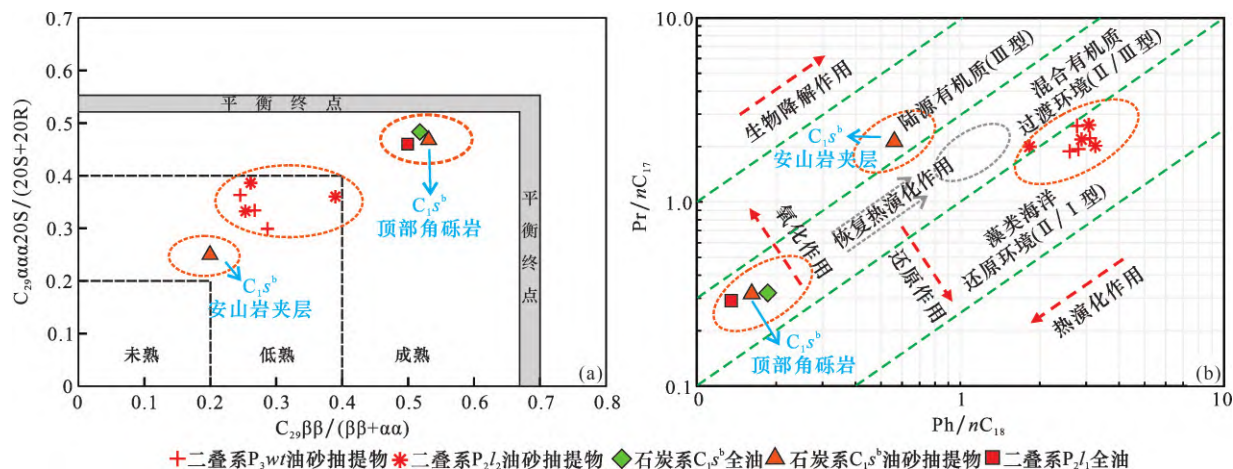


图6 吉15井石炭系—二叠系原油及油砂生物标志物参数判别图

Fig.6 Parameter discrimination diagrams of biomarker compounds of crude oil and oil sand samples in the Carboniferous-Permian from Well J15

马蜡烷/ C_{30} 藿烷平均值为0.20。规则甾烷以 C_{29} 、 C_{28} 甾烷为主, C_{27} 甾烷含量较低,呈上升型分布。其中规则甾烷 C_{27} 相对含量为14.94%~18.74%,平均含量为16.92%,规则甾烷 C_{28} 相对含量为33.61%~35.64%,平均含量为34.29%,规则甾烷 C_{29} 相对含量为47.29%~51.43%,平均含量为49.08%。油气成熟度参数 $\alpha\alpha 20S/(20S+20R)C_{29}$ 甾烷为0.33~0.39, $\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)C_{29}$ 甾烷为0.25~0.26,处于低成熟阶段(表2)。

B型原油主要分布在芦草沟组下段与石炭系松喀尔苏组,期间未发育烃源岩。该类原油正构烷烃碳数分布在 nC_{10} — nC_{35} 之间,TIC总离子流显双峰型,主峰碳数均为 nC_{19} , nC_{20}/nC_{21} 范围为1.25~1.86,CPI值范围为1.17~1.21,均值为1.19,奇偶优势弱,姥鲛烷与植烷比值较高,范围为1.76~2.16,含微量 β -胡萝卜素。 Pr/nC_{17} 值相较于 Ph/nC_{18} 值高,其 Pr/nC_{17} 值为0.29~0.32,平均为0.31, Ph/nC_{18} 值为0.14~0.19,平均为0.16(表2)。在三环二萜烷的分布上, C_{20} — C_{21} — C_{23} 三者丰度稍高,组成形态表现为山峰型。其中 C_{21} 相对含量高,约为40%, C_{22} 相对含量近三分之一,为31.30%~32.88%, C_{20} 三环萜烷相对含量为26.37%~28.23%, $(C_{20}+C_{21}+C_{23})$ 三环萜烷/ C_{30} 藿烷值为0.52~0.55。 Ts/Tm 范围值为0.37~0.45,伽马蜡烷含量较低,伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷值在0.12~0.14之间。规则甾烷分布中以 C_{29} 为主, C_{27} 甾烷含量较低, C_{27} — C_{28} — C_{29} 呈上升型, C_{27} 甾烷平均相对含量为17.55%, C_{28} 甾烷平均相对含量为33.38%, C_{29} 甾烷平均相对含量为49.08%, C_{27}/C_{29} 值为0.32~0.43,反映母质类型以高等植物占优势。

油气成熟度参数 $\alpha\alpha 20S/(20S+20R)C_{29}$ 甾烷为0.46~0.48, $\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)C_{29}$ 甾烷为0.50~0.53,油气处于高成熟阶段(图7,表2)。

C型原油主要分布在松喀尔苏组暗色泥岩层内。正构烷烃丰度介于A型与B型之间,正构烷烃分布为正态分布形式,其主峰碳数为 nC_{25} — nC_{27} ,反映母质为高等植物,CPI值为1.45~1.63,奇偶优势明显,成熟度在3类原油中最低。类异戊二烯烷烃相对丰度不高,姥植比介于3.61~6.58之间,均值为5.13,煤系地层特征明显, Pr/nC_{17} 均值为1.66, Ph/nC_{18} 均值为0.34, Pr/nC_{17} 值大于 Ph/nC_{18} 值,未检出或不含 β -胡萝卜素。反映其陆源母质的 C_{19} 三环萜烷较A型、B型原油高,三环萜烷 C_{19}/C_{20} 值为0.71~1.23,平均值为1.06,三环萜烷 C_{20} 、 C_{21} 、 C_{23} 三环萜烷具有下降型构型,其中 C_{20} 相对含量最高,平均含量为44.76%, C_{21} 平均含量为39.21%, C_{23} 三环萜烷相对平均含量为16.03%。五环萜烷中 C_{29} 降藿烷与 C_{30} 藿烷含量相当,比值平均值为0.90。 $(C_{20}+C_{21}+C_{23})$ 三环萜烷/ C_{30} 藿烷值为0.11~0.23。 Ts 丰度低, Ts/Tm 值分布在0.03~0.06之间,伽马蜡烷含量很低,伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷平均值为0.06。规则甾烷以 C_{29} 甾烷为主, C_{27} 甾烷、 C_{28} 甾烷含量较低,呈反“L”形分布。其中规则甾烷 C_{27} 相对含量为8%~12%,平均含量为11%,规则甾烷 C_{28} 相对含量为11%~14%,平均含量为13%,规则甾烷 C_{29} 相对含量为74%~81%,平均含量为77%(图7,表2)。C型原油的 $\alpha\alpha 20S/(20S+20R)C_{29}$ 甾烷与 $\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)C_{29}$ 甾烷成熟度参数分别为0.21~0.26和0.20~0.23(表2),其属于低熟演化阶段。

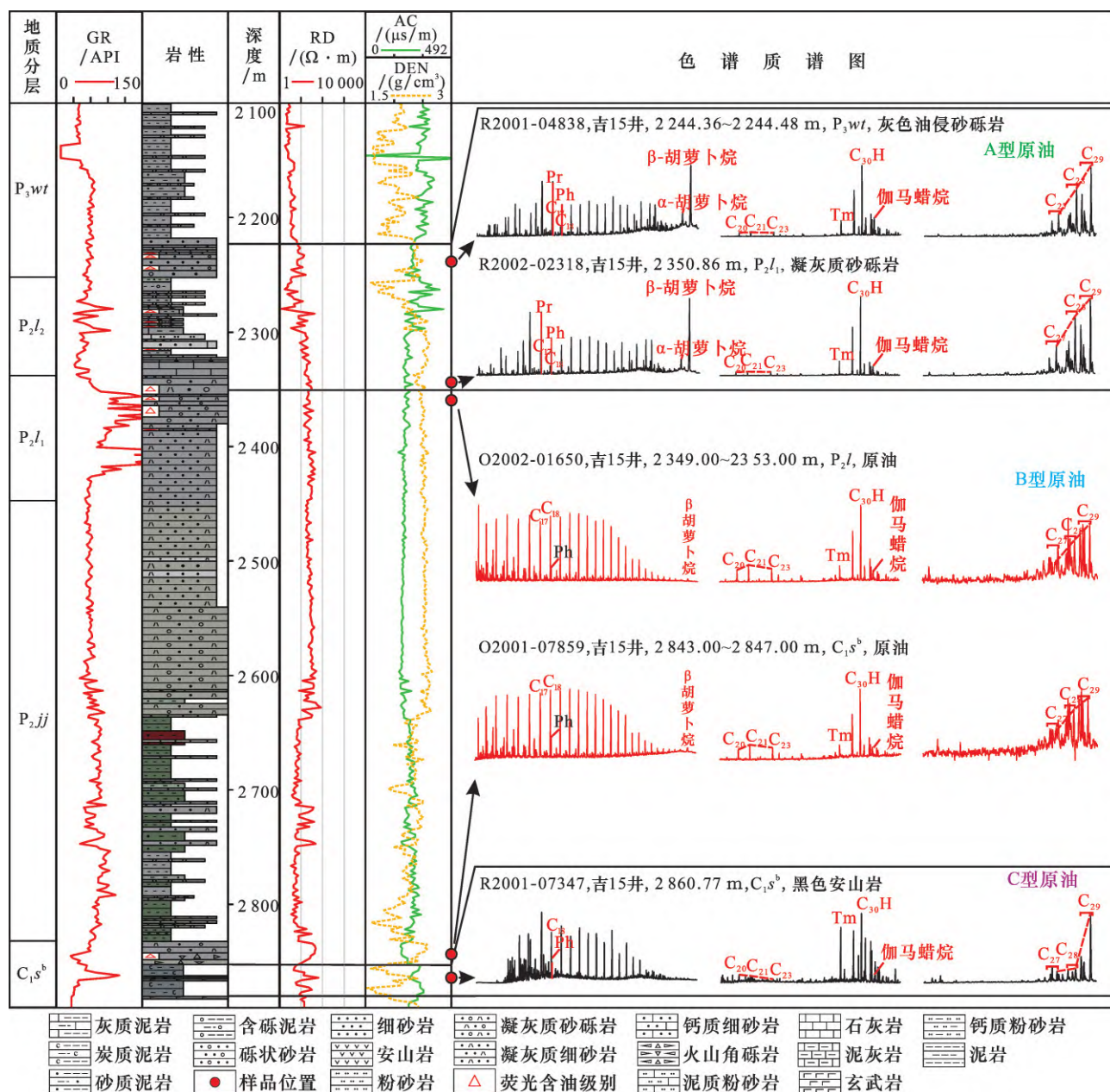


图7 吉15井石炭系—二叠系3类原油气相色谱—质谱

Fig.7 Gas chromatogram-mass spectrometry (GC-MS) analysis of three types of crude oil samples from the Carboniferous-Permian in Well J15

3 油源对比与原油成因分析

A型原油主要分布在二叠系芦草沟组及其之上的梧桐沟组(图7),其较高的 β -胡萝卜素与伽马蜡烷含量及低的Pr/Ph值等反映其生油母质是具较高盐度的还原水体沉积环境,其规则甾烷 C_{27} — C_{28} — C_{29} 分布呈“上升”型特征,反映母质类型好,水生生物成分相对较高,该特征与二叠系芦草沟组咸水湖相烃源岩特征相似。A型原油的碳同位素组成较轻,介于 -29.18% — -30.17% 之间,这种特征与吉

木萨尔凹陷、西泉地区、北三台地区二叠系来源原油稳定碳同位素组成均轻于 -30% 的特征基本一致^[51-53]。据A型原油的地质分布、生物标志物组成、碳同位素组成等特征综合对比,该类原油来自芦草沟组烃源岩,其油气成熟度参数 $\alpha\alpha 20S/(20S+20R)C_{29}$ 甾烷为 $0.25\sim 0.26$, $\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)C_{29}$ 甾烷为 $0.33\sim 0.39$,属于低成熟—成熟油气,也与井区芦草沟组烃源岩成熟度特征接近(图8)。

B型原油的特殊性表现在其分布在芦草沟组下段砂砾岩与石炭系松喀尔苏组顶部的火山角砾岩

表2 吉15井石炭系—二叠系3类原油典型生物标志物特征

Table 2 Typical biomarker parameters of three types of crude oils from the Carboniferous-Permian in Well J15

原油/沥青类型	层位,深度/m	沉积环境与生源参数				
		A	B	C	D	E
A类	P ₃ wt, 2 244.36~2 244.48					
	P ₂ l ₁ , 2 350.86	0.37~0.82(0.63)	0.98~1.15(1.08)	2.09~2.66(2.32)	3.05~3.23(3.12)	0.11~0.25(0.20)
	P ₂ l ₁ , 2 351.30~2 351.37					
B类	P ₂ l ₁ , 2 349~2 353					
	C ₁ s ^b , 2 843~2 847	1.25~1.86(1.49)	1.76~2.16(1.93)	0.29~0.32(0.31)	0.14~0.19(0.16)	0.12~0.14(0.13)
	C ₁ s ^b , 2 846					
C类	C ₁ s ^b , 2 858.72~2 861.32					
	C ₁ s ^b , 2 860.77	0.69~1.28(0.91)	3.61~6.58(5.13)	1.27~2.12(1.66)	0.20~0.57(0.34)	0.05~0.07(0.06)
	C ₁ s ^b , 2 864~2 866					
原油/沥青类型	层位,深度/m	沉积环境与生源参数				
		F	G	H	I	J
A类	P ₃ wt, 2 244.36~2 244.48					
	P ₂ l ₁ , 2 350.86	0.09~0.12(0.10)	0.55~0.99(0.79)	0.96~1.14(1.04)	0.29~0.39(0.35)	0.65~0.75(0.70)
	P ₂ l ₁ , 2 351.30~2 351.37					
B类	P ₂ l ₁ , 2 349~2 353					
	C ₁ s ^b , 2 843~2 847	0.18~0.28(0.22)	0.81~0.89(0.85)	1.18~1.30(1.25)	0.32~0.43(0.36)	0.62~0.76(0.68)
	C ₁ s ^b , 2 846					
C类	C ₁ s ^b , 2 858.72~2 861.32					
	C ₁ s ^b , 2 860.77	0.71~1.24(1.06)	2.24~3.31(2.86)	1.90~3.13(2.52)	0.10~0.17(0.14)	0.13~0.18(0.16)
	C ₁ s ^b , 2 864~2 866					
原油/沥青类型	层位,深度/m	成熟度参数				
		K	L	M	N	O
A类	P ₃ wt, 2 244.36~2 244.48					
	P ₂ l ₁ , 2 350.86	1.11~1.52(1.29)	0.10~0.19(0.15)	0.09~0.22(0.14)	0.25~0.26(0.25)	0.33~0.39(0.36)
	P ₂ l ₁ , 2 351.30~2 351.37					
B类	P ₂ l ₁ , 2 349~2 353					
	C ₁ s ^b , 2 843~2 847	1.17~1.21(1.19)	0.52~0.56(0.54)	0.27~0.31(0.29)	0.50~0.53(0.52)	0.46~0.48(0.47)
	C ₁ s ^b , 2 846					
C类	C ₁ s ^b , 2 858.72~2 861.32					
	C ₁ s ^b , 2 860.77	1.45~1.63(1.55)	0.11~0.23(0.15)	0.03~0.05(0.04)	0.20~0.23(0.21)	0.21~0.26(0.24)
	C ₁ s ^b , 2 864~2 866					

注:0.37~0.82(0.63)=最小值—最大值(平均值);A为C₂₀/C₂₁⁺;B为Pr/Ph;C为Pr/nC₁₇;D为Ph/nC₁₈;E为伽马蜡烷指数(Gam./C₃₀H);F为C₁₉/C₂₀三环萜烷;G为C₂₀/C₂₃三环萜烷;H为C₂₁/C₂₃三环萜烷;I为C₂₇/C₂₉αα20R甾烷;J为C₂₈/C₂₉αα20R甾烷;K为CPI;L为(C₂₀+C₂₁+C₂₃)三环萜烷/C₃₀藿烷;M为Ts/(Ts+Tm);N为ββ/(ββ+αα)C₂₉甾烷;O为αα-20S/(20S+20R)C₂₉甾烷

层中(图7),其较低含量的伽马蜡烷、β-胡萝卜烷与中等Pr/Ph值(1.76~2.16)指示其烃源岩母质形成于弱还原的淡水沉积环境^[54]。其具有较重的稳定碳同位素(可达-25.22‰)和C₇轻烃分子中甲基环己烷含量占67%以上的特点,反映母质类型以腐殖型为主^[55-58],因此,该型原油应来源于石炭系煤系烃源岩。同时,值得注意的是B型原油的αα20S/(20S+20R)C₂₉甾烷与ββ/(ββ+αα)C₂₉甾烷参数明显高于上部的A型与其之下的C型原油,其原油密度低,大致在0.786 4 g/cm³附近,表明其具有比A

型和C型原油母质更高的成熟度(图7,图8),应来自更深部成熟度更高的烃源岩。有多位学者认为该型原油的源岩为巴塔玛依内山组或松喀尔苏组,为自生自储型油气藏。随着进一步研究,结合地震剖面发现,巴塔玛依内山组已在吉15井区尖灭且其以火山岩沉积为主,未发育源岩。虽然吉15井区松喀尔苏组钻遇了30 m的炭质泥岩,但该井位于高部位,炭质泥岩所生成油气的成熟度远达不到B型原油的母质成熟度(图8)。显然B型原油并非原地松喀尔苏组烃源岩所生成的油气,认为该型原油只能

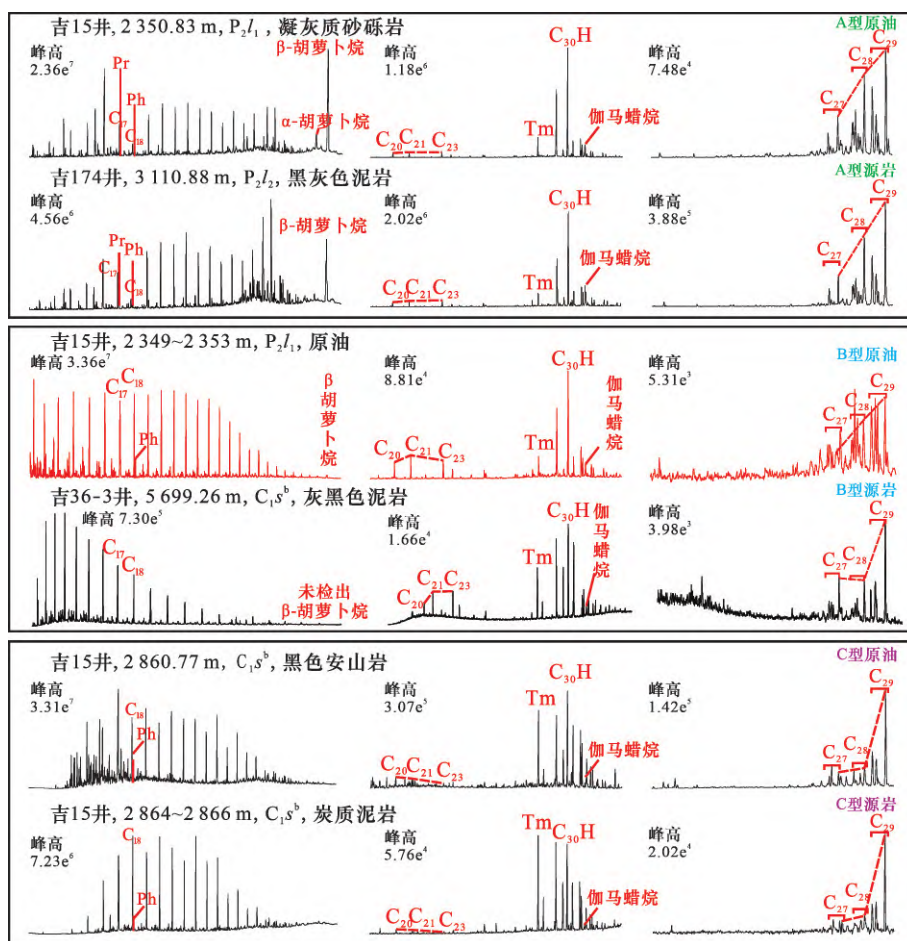


图8 吉15井石炭系—二叠系原油和油砂与烃源岩生物标志物对比

Fig.8 Biomarker contrast of the crude oil, oil sand samples and source rocks of the Carboniferous-Permian in Well J15

来自于凹陷中心更深部石炭系。本文通过对比凹陷中心吉36-3井松喀尔苏组炭质泥岩生物标志物组成与地球化学特征发现,该套油气与深部石炭系烃源岩特征较为一致,结合其较高的碳同位素值,推断B型原油主要来自于凹陷中心石炭系 C_{15}^b 灰黑色泥岩。但是,在TIC总离子流图的甾烷、萜烷部分,B型原油的丰度较高,与深部 C_{15}^b 灰黑色泥岩呈现出一定差异,而和芦苇沟组泥岩特征较为一致。本文认为该型原油是混合油,以深部石炭系松b段排出原油为主,混有少量芦苇沟组源岩侧向运移所生成的原油。C型原油仅分布在吉15井石炭系松喀尔苏组炭质泥岩层内的薄安山岩层中。与A、B型原油区别在于稳定碳同位素组成最重,姥植比极高, C_{19} 三环二萜烷丰度高,规则甾烷 C_{27} — C_{28} — C_{29} 均呈现为“上升”型,低伽马蜡烷含量(图8,表2),均反映其母质为弱还原—弱氧化淡水沉积环境形成的腐殖型。生物标志物分子对比表明,吉15井C型原油来自于其紧密接触的石炭系松喀尔苏组原地

烃源岩,属于自生自储特征(图8)。

原油与烃源岩的生物标志物参数可以清楚表明其间的亲缘关系,本文利用多种原油间差别明显的特征生物标志物参数比值,建立了准东地区上古生界原油来源判别图版(图9)。本图版可将原油划

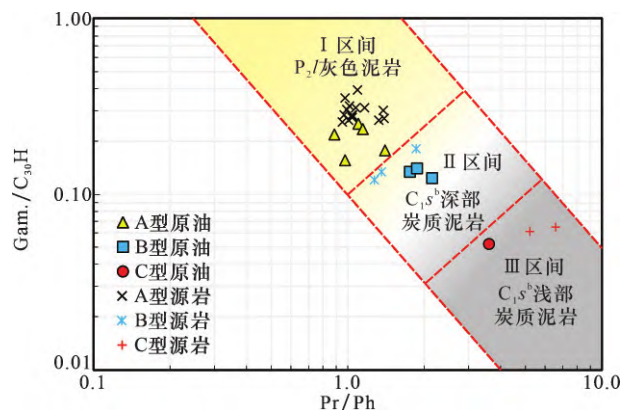


图9 准东地区石炭系—二叠系原油来源判别图版

Fig.9 Identification plate of oil source of the Carboniferous-Permian in eastern Junggar Basin

分为三大来源:如原油与本次A型原油相近,以伽马蜡烷指数含量高,姥植比低为特征,则点位落于I区间,代表该类原油来源于二叠系芦草沟组;如果其特征为伽马蜡烷指数略低,姥植比次之,则点落于II区间,认为该型原油与凹陷中心松b段深部炭质泥岩具有良好的亲缘关系;III区间离散范围较大,特征为伽马蜡烷指数低,姥植比高,如投点落于该区间,代表原油为松b段埋深较浅的炭质泥岩生成。本图版可以对准东地区尤其吉木萨尔凹陷二叠系—石炭系原油来源起到较好的指示意义。

4 油气成藏模式与油气勘探意义

4.1 油气成藏模式

晚泥盆世克拉美丽洋向北俯冲消减^[12,59],吉木萨尔凹陷属于隆后斜坡位置,经历了前陆—断陷—凹陷盆地演化序列,于石炭纪、二叠纪沉积了规模煤系烃源岩与优质湖相烃源岩,为油气成藏提供了物质基础。勘探实践证明,准东地区已发现的油气藏都具有源控、近源成藏的特征。与我国东部火山岩成藏主控因素不同的是,准东地区火山岩油气藏多以不整合油气藏为主,其分布受区域不整合面的影响很大^[20,60],研究区石炭系、二叠系存在大型不整

合面,不整合面附近的储集体为油气聚集的重要位置^[61-62]。克拉美丽气田、五彩湾气田、北三台油田等众多油气藏的形成都受二叠系与石炭系的不整合面控制^[63]。此外,凹陷发育多条断裂,断裂系统成为了石炭系松喀尔苏组烃源岩生成油气向上部不整合面运移的重要通道。

通过对上古生界油气特征与来源分析,认为吉15井发育近源自生自储、古生新储和长距离侧向运聚3种油气成藏模式。其中芦草沟组上段与石炭系松喀尔苏组安山岩夹层为自生自储成藏模式,芦草沟组上段呈现源储紧邻特征,松喀尔苏组安山岩夹层表现为“泥包储”的典型特征,烃源岩生成的油气从源内排出后,就近在储集层聚集成藏,具有运移距离短、散失少、保存条件好等优点(图10),对于该类成藏模式,应重点考虑烃源问题;芦草沟组之上的梧桐沟组油气主要来自下部的芦草沟组咸水湖相优质烃源岩,为近源古生新储成藏模式,在凹陷周缘,芦草沟组上段发生剥蚀,盖层的削薄为下部油气向上部梧桐沟组输导提供了可能,断裂沟通源岩和有效圈闭是成藏的关键,芦草沟组与梧桐沟组之间的不整合也可能有一定的输导作用(图10)。第三类成藏模式为长距离侧向运聚模式,芦草沟组

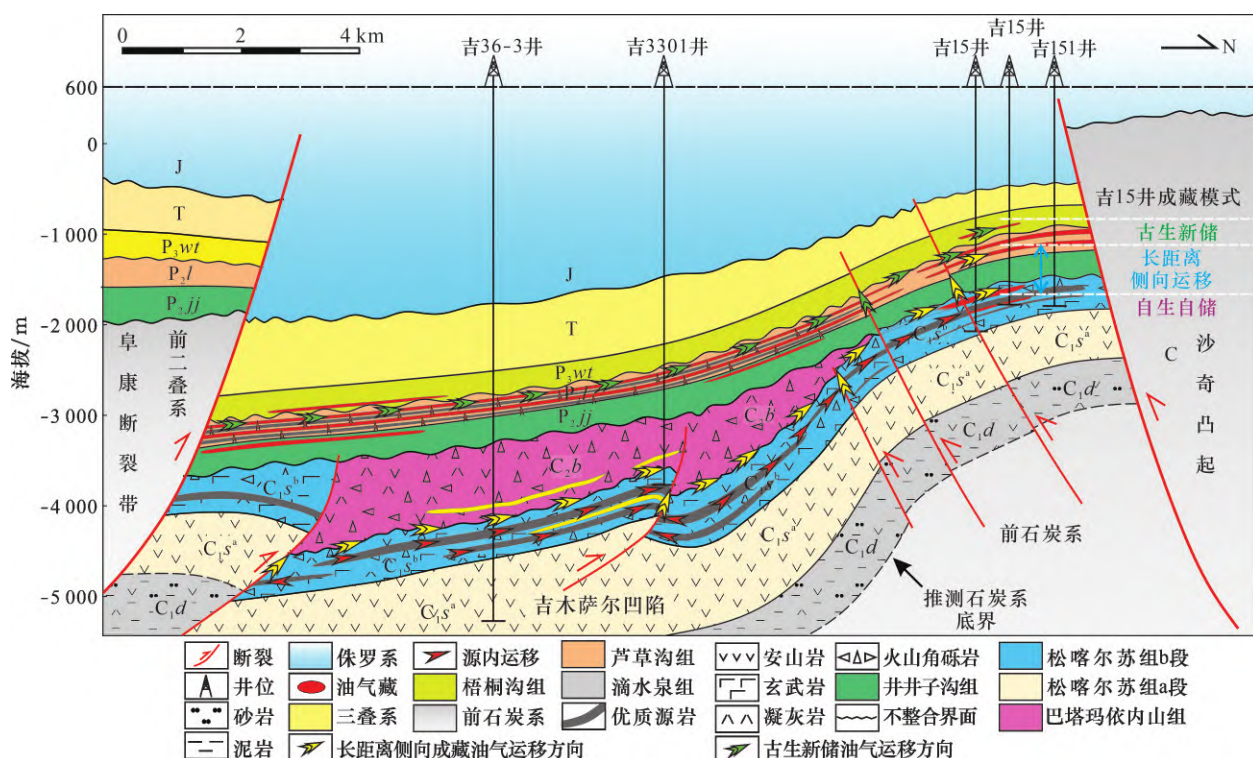


图10 吉木萨尔凹陷石炭系—二叠系油气藏与油气运移剖面(剖面位置见图1)

Fig.10 Oil reservoir and hydrocarbon migration profile of the Carboniferous-Permian in the Jimsar Depression (profile location is indicated in Fig.1)

下段和石炭系顶部发育较厚的输导层,其中芦草沟组下段与井井子沟组储集层连续厚度达300 m,石炭系顶部松喀尔苏组火山角砾岩与凝灰质角砾岩厚度也有20 m,油气具有侧向运移的输导通道。除此之外,石炭纪发生海退,海相沉积逐步转化为陆相沉积,储层易于遭受风化剥蚀改善,同时火山岩储层天然裂缝发育,裂缝沟通基质孔隙成为优势储层。盆地中心烃类产物沿周缘断裂和风化壳运移至高部位优质储层中,圈闭捕获油气,从而体现长距离侧向运聚模式(图10)。

4.2 油气勘探意义

近年来全球在深层、超深层领域获得一系列重大突破,预示了深层油气勘探具有重要的现实与战略意义。中国中西部深层油气资源丰富,塔科1井、川科1井鸣金开钻,而由于准噶尔盆地发育复合含油气系统,油气成因复杂,致使深层勘探尚处早期阶段。截至目前,克拉美丽 $1\,000\times 10^8\text{ m}^3$ 级气田、阜康凹陷高产气流阜26井等已展示了石炭系巨大的勘探潜力。

准东石炭系烃源岩是大型火山岩油气成藏的基础,本文通过对吉木萨尔凹陷高部位吉15井上古生界油气来源展开分析,肯定了石炭系煤系烃源岩的生油气潜力,证明吉木萨尔凹陷与滴水泉凹陷、五彩湾凹陷等具有类似的优质物质基础,由此落实石炭系富烃灶,展示了准东石炭系油气勘探的潜力。同时,本文研究肯定了吉15井高产是深部油气运聚富集的结果,在二叠系—石炭系不整合界面稳定发育的背景中,可以进一步探索准东地区的火山岩体油气藏与规模风化壳油气藏,从而实现准东地区石炭系的勘探突破。重、磁、电数据在吉木萨尔凹陷已确定了不低于13个石炭系火山岩性圈闭(潜山),覆盖面积达 230 km^2 。构造高部位远源供烃—复合输导成藏模式的建立也为寻找下一步油气勘探接替区提供了可能性思路。

5 结论

(1)准噶尔盆地东部吉木萨尔凹陷吉15井区上古生界原油及储集层沥青分为A、B与C3种类型,不同类型的原油特征与分布差异明显。A型原油主要分布于上部的二叠系梧桐沟组与芦草沟组上段,为低熟原油,源自二叠系芦草沟组咸水湖相烃源岩;B型原油纵向分布在芦草沟组下段与石炭系松喀尔苏组顶部,源自于凹陷深部的松喀尔苏组b段

较高成熟度的烃源岩,混有少量芦草沟组所生原油;C型原油主要分布于松喀尔苏组源岩内部的储集层中,来源于原位炭质泥岩。

(2)吉15井区发育近源自生自储、古生新储和长距离侧向运聚3种油气成藏模式。芦草沟组上段与石炭系松喀尔苏组泥岩层系内主要为自生自储成藏模式;芦草沟组之上的梧桐沟组油气为近源古生新储成藏模式;B型原油所在的芦草沟组下段与松喀尔苏组顶部具有侧向运移条件,属于长距离侧向运聚模式。

参考文献(References)

- [1] CAO J, ZHANG Y, HU W, et al. The Permian hybrid petroleum system in the northwest margin of the Junggar Basin, Northwest China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2005, 22(3): 331-349.
- [2] 庞雄奇. 中国西部叠合盆地深部油气勘探面临的重大挑战及其研究方法意义[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(5): 517-534, 541.
PANG X Q. Key challenges and research methods of petroleum exploration in the deep of superimposed basins in western China[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(5): 517-534, 541.
- [3] 匡立春, 唐勇, 雷德文, 等. 准噶尔盆地二叠系咸化湖相云质岩致密油形成条件与勘探潜力[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(6): 657-667.
KUANG L C, TANG Y, LEI W D, et al. Formation conditions and exploration potential of tight oil in the Permian saline lacustrine dolomitic rock, Junggar Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(6): 657-667.
- [4] 陈建平, 王绪龙, 邓春萍, 等. 准噶尔盆地油气源、油气分布与油气系统[J]. 地质学报, 2016, 90(3): 421-450.
CHEN J P, WANG X L, DENG C P, et al. Oil and gas source, occurrence and petroleum system in the Junggar Basin, Northwest China[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(3): 421-450.
- [5] 雷德文, 陈刚强, 刘海磊, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷大油(气)区形成条件与勘探方向研究[J]. 地质学报, 2017, 91(7): 1604-1619.
LEI D W, CHEN G Q, LIU H L, et al. Study on the forming conditions and exploration fields of the Mahu giant oil(gas) depression, Junggar Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91(7): 1604-1619.
- [6] 支东明, 宋永, 何文军, 等. 准噶尔盆地中—下二叠统页岩油地质特征、资源潜力及勘探方向[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(4): 389-401.
ZHI D M, SONG Y, HE W J, et al. Geological characteristics, resource potential and exploration direction of shale oil in Middle-Lower Permian, Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum

- Geology, 2019, 40(4): 389-401.
- [7] 赵文智, 胡素云, 侯连华, 等. 中国陆相页岩油类型、资源潜力及与致密油的边界[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(1): 1-10. ZHAO W Z, HU S Y, HOU L H, et al. Types and resource potential of continental shale oil in China and its boundary with tight oil[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(1): 1-10.
- [8] 高岗, 刘诗局, 靳军, 等. 原油物性演化规律新发现及其对页岩油勘探的启示[J]. 地质学报, 2023, 97(5): 1561-1575. GAO G, LIU S J, JIN J, et al. A new discovery of physical property evolution of crude oil and insights into shale oil exploration[J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(5): 1561-1575.
- [9] 杨智, 侯连华, 林森虎, 等. 吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油、页岩油地质特征与勘探潜力[J]. 中国石油勘探, 2018, 23(4): 76-85. YANG Z, HOU L H, LIN S H, et al. Geologic characteristics and exploration potential of tight oil and shale oil in Lucaogou Formation in Jimsar Sag [J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(4): 76-85.
- [10] GONG D Y, SONG Y, PENG M, et al. The hydrocarbon potential of carboniferous reservoirs in the Jimsar Sag, Northwest China: Implications for a giant volcanic-petroleum reserves[J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 1-17.
- [11] 何登发, 陈新发, 况军, 等. 准噶尔盆地石炭系油气成藏组合特征及勘探前景[J]. 石油学报, 2010, 31(1): 1-11. HE D F, CHEN X F, KUANG J, et al. Characteristics and exploration potential of Carboniferous hydrocarbon plays in Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(1): 1-11.
- [12] 杨帆, 宋永, 陈洪, 等. 准噶尔盆地阜东地区石炭系松喀尔苏组烃源岩评价及气源对比[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(7): 1018-1026. YANG F, SONG Y, CHEN H, et al. Evaluation of Carboniferous Songkaersu Formation source rocks and gas-source correlation in the Fukang Sag of eastern Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(7): 1018-1026.
- [13] 张朝军, 石昕, 吴晓智, 等. 准噶尔盆地石炭系油气富集条件及有利勘探领域预测[J]. 中国石油勘探, 2005, 10(1): 11-15, 1. ZHANG C J, SHI X, WU X Z, et al. Carboniferous oil and gas abundance conditions and predicted favorable exploration fields in Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2005, 10(1): 11-15, 1.
- [14] YU S, WANG X, XIANG B, et al. Organic geochemistry of Carboniferous source rocks and their generated oils from the eastern Junggar Basin, NW China[J]. Organic Geochemistry, 2014, 77: 72-88.
- [15] 廖健德, 罗力崇, 吴运强, 等. 吉木萨尔凹陷东斜坡区油气成藏分析[J]. 油气地质与采收率, 2005, 12(4): 52-54, 86. LIAO J D, LUO L C, WU Y Q, et al. Oil and gas reservoir-forming analyses in east slope region of Jimusaer Sag [J]. Oil & Gas Recovery Technology, 2005, 12(4): 52-54, 86.
- [16] 支东明, 李建忠, 杨帆, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系全油气系统地质特征与勘探开发实践[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(4): 14-23. ZHI D M, LI J Z, YANG F, et al. Geological characteristics and exploration and development practice of the Permian full oil and gas system in Jimsar Sag, Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(4): 14-23.
- [17] 贺凯. 准噶尔盆地东部石炭系火山岩油气成藏规律研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2009: 95-99. HE K. Study on the Reservoir Formation Rule of Volcanic Rock of Carboniferous in the East of Junggar Basin [D]. Beijing: China University of Geoscience(Beijing), 2009: 95-99.
- [18] 刘海磊, 李卉, 向辉, 等. 准噶尔盆地东南缘阜康断裂带及其周缘原油地球化学特征和成因[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(2): 258-267. LIU H L, LI H, XIANG H, et al. Geochemistry, genesis and distribution of crude oils in the Fukang fault zones and their periphery in Junggar Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(2): 258-267.
- [19] 于凯, 职文栋, 向辉, 等. 吉木萨尔凹陷石炭系油藏形成及分布规律[J]. 新疆石油天然气, 2019, 15(4): 11-14, 1. YU K, ZHI W D, XIANG H, et al. Formation and distribution of the carbonic oil deposit in Jimusaer Sag of Junggar Basin [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2019, 15(4): 11-14, 1.
- [20] 张璐, 李剑, 宋永, 等. 准噶尔盆地石炭系火山岩天然气成藏特征及勘探潜力[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(6): 141-151. ZHANG L, LI J, SONG Y, et al. Gas accumulation characteristics and exploration potential of the Carboniferous volcanic rocks in Junggar Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(6): 141-151.
- [21] 陈军, 陈静, 李娜, 等. 准噶尔盆地东部石炭系天然气勘探潜力[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(7): 952-961. CHEN J, CHEN J, LI N, et al. The exploration potential of Carboniferous natural gas in the eastern Junggar Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(7): 952-961.
- [22] 赵应成, 谭开俊, 王鹏, 等. 准东地区石炭系烃源岩特征及分布规律[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(5): 753-759. ZHAO Y C, TAN K J, WANG P, et al. Geochemical characteristics of Carboniferous source rocks and distribution in the eastern part of Junggar Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(5): 753-759.
- [23] 高岗, 向宝力, 王轩, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组湖相混合沉积中缝合线发育与有机质富集研究[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(11): 1963-1969. GAO G, XIANG B L, WANG X, et al. Stylolite occurrence and organic matter enrichment of the mixed sediments in the Lucaogou Formation of the Jimusaer Sag in Junggar Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(11): 1963-1969.

- [24] 王屿涛,杨作明,马万云,等.吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油地球化学特征及成因[J].新疆石油地质,2017,38(4): 379-384.
WANG Y T, YANG Z M, MA W Y, et al. Geochemical characteristics and genesis of tight oil in Lucaogou Formation of Jimsar Sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2017, 38(4): 379-384.
- [25] 陈磊,杨德婷,汪飞,等.准噶尔盆地勘探历程与启示[J].新疆石油地质,2020,41(5): 505-518.
CHEN L, YANG Y T, WANG F, et al. Exploration history and enlightenment in Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2020, 41(5): 505-518.
- [26] 匡立春,支东明,王小军,等.新疆地区含油气盆地深层—超深层成藏组合与勘探方向[J].中国石油勘探,2021,26(4): 1-16.
KUANG L C, ZHID M, WANG X J, et al. Oil and gas accumulation assemblages in deep to ultra-deep formations and exploration targets of petroliferous basins in Xinjiang region[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(4): 1-16.
- [27] 宋永,杨智峰,何文军,等.准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系凤城组碱湖型页岩油勘探进展[J].中国石油勘探,2022,27(1): 60-72.
SONG Y, YANG Z F, HE W J, et al. Exploration progress of alkaline lake type shale oil of the Permian Fengcheng Formation in Mahu Sag, Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(1): 60-72.
- [28] 唐勇,侯章帅,王霞田,等.准噶尔盆地石炭纪—二叠纪地层对比框架新进展[J].地质论评,2022,68(2): 385-407.
TANG Y, HOU Z S, WANG X T, et al. Progress of the Carboniferous and Permian stratigraphic framework and correlation of the Junggar Basin, Xinjiang, Northwest China[J]. Geological Review, 2022, 68(2): 385-407.
- [29] 徐学义,李荣社,陈隽璐,等.新疆北部古生代构造演化的几点认识[J].岩石学报,2014,30(6): 1521-1534.
XU X Y, LI R S, CHEN J L, et al. New constraints on the Paleozoic tectonic evolution of the northern Xinjiang area[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(6): 1521-1534.
- [30] 易泽军,何登发.准噶尔盆地东部构造地层层序及盆地演化[J].石油与天然气地质,2018,39(5): 932-942.
YI Z J, HE D F. Tectono-stratigraphic sequence and basin evolution of the eastern Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(5): 932-942.
- [31] 郑孟林,田爱军,杨彤远,等.准噶尔盆地东部地区构造演化与油气聚集[J].石油与天然气地质,2018,39(5): 907-917.
ZHENG M L, TIAN A J, YANG T Y, et al. Structural evolution and hydrocarbon accumulation in the eastern Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(5): 907-917.
- [32] 何文军,王绪龙,邹阳,等.准噶尔盆地石油地质条件、资源潜力及勘探方向[J].海相油气地质,2019,24(2): 75-84.
HE W J, WANG X L, ZOU Y, et al. The geological conditions, resource potential and exploration direction of oil in Junggar Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2019, 24(2): 75-84.
- [33] 张义杰,齐雪峰,程显胜,等.准噶尔盆地晚石炭世和二叠纪沉积环境[J].新疆石油地质,2007,28(6): 673-675.
ZHANG Y J, QI X F, CHENG X S, et al. Approach to sedimentary environment of Late Carboniferous-Permian in Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(6): 673-675.
- [34] 焦悦,吴朝东,王家林,等.天山东段地区二叠系芦草沟组沉积特征与古环境对比[J].古地理学报(中文版),2023,25(2): 277-342.
JIAO Y, WU C D, WANG J L, et al. Comparative study on sedimentary characteristics and palaeoenvironment of the Permian Lucaogou Formation in eastern Tianshan mountains[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2023, 25(2): 277-342.
- [35] GAO G, ZHANG W, XIANG B, et al. Geochemistry characteristics and hydrocarbon-generating potential of lacustrine source rock in Lucaogou Formation of the Jimusaer Sag, Junggar Basin[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016, 145: 168-182.
- [36] TAO S, WANG Y, TANG D, et al. Organic petrology of Fukang Permian Lucaogou Formation oil shales at the northern foot of Bogda Mountain, Junggar Basin, China[J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 99: 27-34.
- [37] TAO S, TANG D, XU H, et al. Organic geochemistry and elements distribution in Dahuangshan oil shale, southern Junggar Basin: Origin of organic matter and depositional environment[J]. International Journal of Coal Geology, 2013, 115: 41-51.
- [38] 匡立春,高岗,向宝力,等.吉木萨尔凹陷芦草沟组有效源岩有机碳含量下限分析[J].石油实验地质,2014,36(2): 224-229.
KUANG L C, GAO G, XIANG B L, et al. Lowest limit of organic carbon content in effective source rocks from Lucaogou Formation in Jimusaer Sag[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(2): 224-229.
- [39] 曲长胜,邱隆伟,杨勇强,等.吉木萨尔凹陷芦草沟组碳酸盐岩碳氧同位素特征及其古湖泊学意义[J].地质学报,2017,91(3): 605-616.
QU C S, QIU L W, YANG Y Q, et al. Carbon and oxygen isotope compositions of carbonatic rock from Permian Lucaogou Formation in the Jimsar Sag, NW China and their paleolimnological significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91(3): 605-616.
- [40] 王剑,周路,刘金,等.准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组酸碱交替成岩作用特征及对页岩储集层的影响[J].石油勘探与开发,2020,47(5): 898-912.
WANG J, ZHOU L, LIU J, et al. Acid-base alternation diagenesis and its influence on shale reservoirs in the Permian Lu-

- caogou Formation, Jimusar Sag, Junggar Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(5): 898-912.
- [41] 刘诗局,高岗,靳军,等. 咸化湖相富含层状藻与结构藻烃源岩的成烃特征新探与意义[J]. 地质学报, 2023, 97(3): 879-887.
- LIU S J, GAO G, JIN J, et al. Significance of hydrocarbon generation characteristics of source rock samples dominated by telalginite and lamalginite in saline lacustrine sediments[J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(3): 879-887.
- [42] 支东明,唐勇,杨智峰,等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷陆相页岩油地质特征与聚集机理[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 524-534.
- ZHI D M, TANG Y, YANG Z F, et al. Geological characteristics and accumulation mechanism of continental shale oil in Jimusar Sag, Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 524-534.
- [43] HE D F, CHEN X F, KUANG J, et al. Distribution of Carboniferous source rocks and petroleum systems in the Junggar Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(4): 397-408.
- [44] CAO Z, LIU G, KONG Y, et al. Lacustrine tight oil accumulation characteristics: Permian Lucaogou Formation in Jimusar Sag, Junggar Basin[J]. International Journal of Coal Geology, 2016, 153: 37-51.
- [45] SHIJU L, MISCH D, GAO G, et al. Physical properties of lacustrine shale oil: A case study on the lower member of the Lucaogou Formation(Jimusar Sag, Junggar Basin, NW China) [J]. Marine and Petroleum Geology, 2022, 145: 1-18.
- [46] 徐永昌,刘文汇,沈平. 含油气盆地油气同位素地球化学研究概述[J]. 沉积学报, 2001, 19(2): 161-168.
- XU Y C, LIU W H, SHEN P. A review of isotope geochemical researches on oil and gas in oil and gas bearing basins[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(2): 161-168.
- [47] 段毅,彭德华,张晓宝,等. 柴达木盆地原油碳同位素组成的主控因素与成因类型[J]. 沉积学报, 2003, 21(2): 355-359.
- DUAN Y, PENG D H, ZHANG X B, et al. Main controlling factors and genetic types of carbon isotopic compositions for crude oils from the Qaidam Basin, China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(2): 355-359.
- [48] 李素梅,郭栋. 东营凹陷原油单体烃碳同位素特征及其在油源识别中的应用[J]. 现代地质, 2010, 24(2): 252-258.
- LI S M, GUO D. Characteristics and application of compound specific isotope in oil-source identification for oils in Dongying Depression, Bohai Bay Basin[J]. Geoscience, 2010, 24(2): 252-258.
- [49] 黄第藩,熊传武. 含煤地层中石油的生成、运移和生油潜力评价[J]. 勘探家, 1996, 1(2): 6-11.
- HUANG D F, XIONG C W. Generation, migration and evaluation of hydrocarbon generation potential of oil formed in coal-bearing strata[J]. Explorationist, 1996, 1(2): 6-11, 7.
- [50] 杨斌,严志民,尤绮妹,等. 准东石炭系原油地球化学特征[J]. 新疆石油地质, 2002, 23(6): 478-481, 444.
- YANG B, YAN Z M, YOU Q M, et al. Geochemical characteristics of Carboniferous crude oil in Jundong area[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2002, 23(6): 478-481, 444.
- [51] 陈建平,王绪龙,邓春萍,等. 准噶尔盆地烃源岩与原油地球化学特征[J]. 地质学报, 2016, 90(1): 37-67.
- CHEN J P, WANG X L, DENG C P, et al. Geochemical features of source rocks and crude oil in the Junggar Basin, Northwest China[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(1): 37-67.
- [52] 陈建平,王绪龙,邓春萍,等. 准噶尔盆地南缘油气生成与分布规律——典型油藏油源解剖与原油分布规律[J]. 石油学报, 2016, 37(4): 415-429.
- CHEN J P, WANG X L, DENG C P, et al. Investigation of typical reservoirs and occurrence regularity of crude oils in the southern margin of Junggar Basin, northwestern China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(4): 415-429.
- [53] 张立平,王社教,瞿辉. 准噶尔盆地原油地球化学特征与油源讨论[J]. 勘探家, 2000, 5(3): 30-35.
- ZHANG L P, WANG S J, QU H. Geochemistry of crude oil and oil-source analysis of Junggar Basin[J]. Petroleum Explorationist, 2000, 5(3): 30-35.
- [54] 苗建宇. 新疆北部主要盆地二叠系烃源岩沉积环境与生烃特征[D]. 西安:西北大学, 2001: 72-74.
- MIAO J Y. The Depositional Environment of Permian System Hydrocarbon Source Rocks and Its Potential Hydrocarbon Generating Characteristics in Major Basins in North Xinjiang [D]. Xi'an: Northwest University, 2001: 72-74.
- [55] 戴金星. 天然气碳氢同位素特征和各类天然气鉴别[J]. 天然气地球科学, 1993, 4(Z1): 1-40.
- DAI J X. Carbon and hydrogen isotope characterization of natural gas and identification of various types of natural gas[J]. Natural Gas Geoscience, 1993, 4(Z1): 1-40.
- [56] 戴金星. 煤成气及鉴别理论研究进展[J]. 科学通报, 2018, 63(14): 1291-1305, 1290.
- DAI J X. Coal-derived gas theory and its discrimination [J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(14): 1291-1305, 1290.
- [57] 戴金星. 利用轻烃鉴别煤成气和油型气[J]. 石油勘探与开发, 1993, 20(5): 26-32.
- DAI J X. Identification of coal formed gas and oil type gas by light hydrocarbons[J]. Petroleum Exploration and Development, 1993, 20(5): 26-32.
- [58] 段毅,赵阳,姚泾利,等. 轻烃地球化学研究进展及发展趋势[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(12): 1875-1887.
- DUAN Y, ZHAO Y, YAO J L, et al. Research advance and tendency of light hydrocarbon geochemistry [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(12): 1875-1887.
- [59] 毛翔,李江海,张华添,等. 准噶尔盆地及其周缘地区晚古生

- 代火山机构分布与发育环境分析[J]. 岩石学报, 2012, 28(8): 2381-2391.
- MAO X, LI J H, ZHANG H T, et al. Study on the distribution and developmental environment of the Late Paleozoic volcanoes in Junggar Basin and its adjacent areas[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(8): 2381-2391.
- [60] 赵文智, 邹才能, 李建忠, 等. 中国陆上东、西部地区火山岩成藏比较研究与意义[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(1): 1-11.
- ZHAO W Z, ZOU C N, LI J Z, et al. Comparative study on volcanic hydrocarbon accumulations in western and eastern China and its significance[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(1): 1-11.
- [61] 郑孟林, 樊向东, 何文军, 等. 准噶尔盆地深层地质结构叠加演变与油气赋存[J]. 地学前缘, 2019, 26(1): 22-32.
- ZHENG M L, FAN X D, HE W J, et al. Superposition of deep geological structural evolution and hydrocarbon accumulation in the Junggar Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(1): 22-32.
- [62] 王小军, 宋永, 郑孟林, 等. 准噶尔盆地复合含油气系统与复式聚集成藏[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(4): 29-43.
- WANG X J, SONG Y, ZHENG M L, et al. Composite petroleum system and multi-stage hydrocarbon accumulation in Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(4): 29-43.
- [63] 吴小奇, 刘德良, 李振生. 准噶尔盆地陆东—五彩湾地区火山岩中天然气富集的主控因素[J]. 高校地质学报, 2012, 18(2): 318-327.
- WU X Q, LIU D L, LI Z S. The main controlling factors on the enrichment of natural gas in volcanic rocks in Ludong-Wucaowan area, Junggar Basin[J]. Geological Journal of China Universities, 2012, 18(2): 318-327.

New understanding of the differences and accumulation patterns of Carboniferous–Permian crude oil in the eastern Junggar Basin: Case study of the J15 well area

FAN Keting^{1,2}, GAO Gang^{1,2}, LI Xinning³, ZHANG Yan^{1,2}, LIN Tong⁴, ZHANG Youjin^{1,2},
YANG Yuzhong⁵, KANG Jilun³, ZHANG Wei³, MA Qiang³, LI Jie^{1,2}

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

3. Research Institute of Exploration & Development, PetroChina Tuha Oilfield Company, Hami 839009, China;

4. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China;

5. Xinjiang Branch of China Petroleum Tendering Center, Hami 839009, China)

Abstract: This research focuses on the contentious issue of oil-gas content and multiple sets of source rocks and oil-source relationships in the Carboniferous and Permian of Well J15 in the Jimsar Depression, eastern Junggar Basin. Through analysis of physical properties, group composition, carbon isotope and biomarker characteristics of crude oil and oil sands in the Upper Paleozoic, crude oil is classified into types A, B, and C, based on biomarker composition and carbon isotopes. The origins of these oil types are defined, leading to the establishment of a C-P oil and gas accumulation model. Type A oil is found in the Wutonggou Formation and Upper Lucaogou Formation, sourced from low-maturity oil in the saline lake source rocks of the Lucaogou Formation. Type B oil is located in the Lower Lucaogou Formation and the top of the b member of Songkaersu Formation. It is sourced from higher maturity source rocks in the deep depression of the b member of Songkaersu Formation, and is mixed with a small amount of crude oil produced by the Lucaogou Formation, exhibiting lateral migration characteristics. Type C oil is found in the volcanic rock interlayer within the source rock of the Songkaersu Formation, representing low-maturity oil from near-source self-generation and self-storage. This understanding affirms the effectiveness of the Carboniferous source rocks in the eastern Junggar Basin, providing a crucial basis for the exploration of the strategic breakthrough area of Carboniferous oil and gas.

Keywords: Eastern Junggar Basin; Well J15; Carboniferous-Permian; Crude oil types; Oil-source correlation; Migration-accumulation patterns

Foundation items: The Special Projects of China National Petroleum Corporation (Grant Nos. 2021DJ0306, 2022DJ0507); the Strategic Cooperation Technology Projects of CNPC and CUPB (Grant No. ZLZX 2020-01-06-03).