

· 能源与矿产资源 ·

银额盆地居延海坳陷原油物理化学特征与油源探讨

卢进才, 魏建设, 姜 亭, 许海红, 王宝文

LU Jincan, WEI Jianshe, JIANG Ting, XU Haihong, WANG Baowen

中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心, 陕西 西安 710054

Xi'an Center of China Geological Survey/ Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710054, Shaanxi, China

摘要:居延海坳陷的吉格达、天草、路井等次级凹陷原油物理、化学特征分析表明,原油物理特征以轻质-挥发性原油为主,个别井产凝析油,具有低粘度、中凝固点的特点。原油化学特征具有饱和烃含量高(78.06%~92.95%),全油碳同位素轻($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 为-33.7‰~-32.0‰),轻烃/重烃($\sum n\text{C}_{21-}/\sum n\text{C}_{22+}$)显著大于1(1.28~2.94)等特点。原油物理、化学特征指示其母质以低等水生生物为主,热演化程度为成熟-高成熟。在对钻井揭示的烃源岩及邻区地表剖面烃源岩分析的基础上,以吉格达凹陷蒙额参3井晚石炭世侵入岩和中-下二叠统2个产层为代表,开展了油-源生物标志化合物及碳同位素分布对比。结果表明,原油与上石炭统-下二叠统干泉组上段烃源岩具有良好的亲缘关系,与白垩系烃源岩无关,原油母岩为石炭系-二叠系烃源岩。依据原油指示的母岩演化程度显著高于钻井揭示的烃源岩演化程度,认为区内油气存在深层(干泉组下段)烃源岩的贡献。综合分析认为,居延海坳陷已揭示的油气藏为石炭系-二叠系含油系统,应将其作为主要勘探目的层。

关键词:居延海坳陷;原油;物理化学特征;油-源对比;石炭系-二叠系含油气系统

中图分类号:P534.45;P534.46;P618.13 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2020)10-1589-11

Lu J C, Wei J S, Jiang T, Xu H H, Wang B W. The physical and chemical characteristics of crude oil and oil-source of Juyanhai depression in Yingen-Ejina Basin. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(10): 1589-1599

Abstract: An analysis of physical and chemical characteristics of crude oil of Jigeda, Tiancao and Lujing sag in Juyanhai depression shows that the crude oil is mainly light-volatile oil, condensate is produced in individual wells, and the physical characteristics of the crude oil are low viscosity and medium freezing point. The chemical characteristics of crude oil are highly saturated hydrocarbon (78.06%~92.95%), light isotope of the whole oil ($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ from -33.7‰ to -32.0‰) and the ratio significantly greater than 1 of light hydrocarbon to heavy hydrocarbon ($\sum n\text{C}_{21-}/\sum n\text{C}_{22+}$ from 1.28 to 2.94). The physical and chemical characteristics show that the parent material is mainly low aquatic organism, and the thermal evolution degree is mature-high mature. Based on an analysis of the source rocks of the surface profile of the adjacent area and the source rocks revealed by wells, the authors made a comparative study of the biomarkers of oil and source rocks as well as carbon isotope, represented by two oil production zones of late Carboniferous intrusive rocks and middle-lower Permian of Mengcan 3 well in Jigeda sag. The results indicate that the crude oil has good relationship with Carboniferous-Permian hydrocarbon source rocks, but it is not related to Cretaceous source rocks, and hence the parent rocks of crude oil are surely Carboniferous-Permian source rocks. Then according to the fact that the evolution degree of the parent rocks indicated by crude oil is significantly higher than that of the source rocks revealed by wells, it is believed that there is the contribution of the source rocks in the deep layer (lower Ganquan Formation). The comprehensive analysis shows that the revealed oil and gas reservoir is a Carboniferous-Permian petroliferous system in Juyanhai depression, which should be taken as the main exploration target.

Key words: Juyanhai depression; crude oil; physical and chemical characteristics; oil-source correlation; petroliferous system of Carboniferous-Permian

收稿日期:2020-03-30;修订日期:2020-04-27

资助项目:中国地质调查局项目《银额盆地及周缘油气基础地质调查》(编号:DD20160172)和《北石石炭-二叠纪关键地质问题专题调查》(编号:DD20189961)

作者简介:卢进才(1961-),男,教授级高级工程师,油气地质学专业。E-mail:shiyou2002@163.com

油气物理化学特征主要受烃源岩母质类型、演化程度等因素的影响。对含油气系统及主要烃源岩时代认识不清的低勘探程度的盆地,可通过油气物理化学特征研究,分析其母岩地球化学特征及热演化程度,探讨含油系统与母岩时代。

居延海拗陷位于银额盆地西部,面积约 19370 km²,是银额盆地面积最大的二级构造单元。自 20 世纪 90 年代初,原地矿部石油地质海洋地质局、中石油等单位相继在居延海拗陷开展地面调查与地球物理勘探。1995 年原地矿部华北石油地质局在路井凹陷实施的额 1 井获工业油气流,额 4 井钻遇良好的油气显示,明确了居延海拗陷具有油气藏的赋存。之后,中石油在居东凹陷实施的居参 1 井、在天草凹陷实施的天 1、天 2 井等多口井不同程度钻遇油气显示。但由于对油气地质条件与资源前景认识不清,勘探进展缓慢。

2007 年以来,中国地质调查局开展的油气基础地质调查取得了一系列新认识,提出了银额盆地为石炭纪—二叠纪与白垩纪叠合盆地^[1],以居延海拗陷为重点实施的地质调查钻井与参数钻井不同程度地钻遇石炭系—二叠系油气显示,吉格达凹陷实施的蒙额参 3 井分别于晚石炭世侵入岩及中—下二叠统砂岩获得 2.64 m³/d 和 1.66 m³/d 的轻质原油。近年来,相关企业加大了其油气勘查区块的油气勘探力度,中石油吐哈油田分公司于天草凹陷实施的天 6、天 7 等一批钻井获工业油流或高产工业油流;中石化华北油气分公司于路井凹陷实施的一批钻井获得工业油气流。

虽然居延海拗陷不断取得油气的发现与突破,但由于基础地质与油气地质条件研究薄弱,油气物理、化学特征研究及油源对比几乎为空白,制约了对油气系统与油源时代的认识。有学者认为,区内主要为白垩系含油系统,油气主要源于下白垩统巴音戈壁组烃源岩^[2-3];也有学者认为居延海拗陷发育侏罗系与白垩系 2 套含油系统,具有侏罗系和白垩系两套有效烃源岩的贡献^[4-6];另有学者认为,区内主要含油系统及烃源岩为石炭系—二叠系^[7-11]。含油系统及主要烃源岩认识的争议,制约了研究区油气地质条件与资源潜力评价,并影响了地质调查与勘探部署。

此次研究,获得了居延海拗陷不同次级构造单元(凹陷)代表性产油井原油物理、化学特征资料,

以及不同岩石地层单元烃源岩地球化学特征及其热演化程度资料,为开展油源对比与探讨含油系统提供了原创性资料数据。

本文通过对吉格达、天草、路井等凹陷代表性产油井原油物性、地球化学特征(族组分、碳同位素、饱和烃特征、生物标志化合物)综合分析,探讨生烃母质类型及其热演化程度。结合不同地层单元烃源岩分布与地球化学特征、热演化程度分析,并选择代表性产油井进行油—源对比,探讨研究区主要含油气系统与主要油气源时代,为油气地质条件研究与资源潜力评价,以及下一步油气地质调查与勘探部署提供依据。

1 地质概况

居延海拗陷由 7 个凹陷和 6 个凸起组成(图 1-a),分别为居东凹陷、乌珠尔凹陷、路井凹陷、天草凹陷、建国营凹陷、伊肯乌苏凹陷和吉格达凹陷,以及居西凸起、路北凸起、路南凸起、乌家井凸起、布龙图凸起、保格达凸起^[12]。除伊肯乌苏凹陷外,其他 6 个凹陷均实施了钻井(图 1-b),揭示了下白垩统苏红图组、巴音戈壁组,以及石炭系—二叠系与晚石炭世侵入岩的赋存^[9],并揭示了下白垩统巴音戈壁组、中—下二叠统、上石炭统—下二叠统干泉组上段等层系厚度巨大的暗色泥岩的赋存,为区内潜在烃源岩。各次级构造单元不同程度钻遇石炭系—二叠系油层或油气显示层,其中,吉格达凹陷、天草凹陷、路井凹陷获工业油气流,油层埋深一般 1200~3000 m,为中浅层油气藏。

2 原油物理化学特征

2.1 原油物理特征

原油物理特征受烃源岩母质类型、演化程度等因素的控制。通常生烃母质类型越好(低等水生生物含量越高)的烃源岩,其原油密度、粘度及凝固点越低(煤成油除外),初馏点亦较低^[13-14],且随着烃源岩成熟度的提高,生成的原油沥青质和非烃(胶质)减少,原油密度、粘度及凝固点降低。含硫量主要受烃源岩沉积环境的影响,高含硫的海洋盆地、大陆干燥气候带的咸水湖盆和半封闭泻湖中的碳酸盐—蒸发盐沉积易形成高硫干酪根,这是形成高硫石油的基础(含硫量大于 1% 为高含硫)。

本次研究采集了吉格达凹陷蒙额参 3 井 2 个产

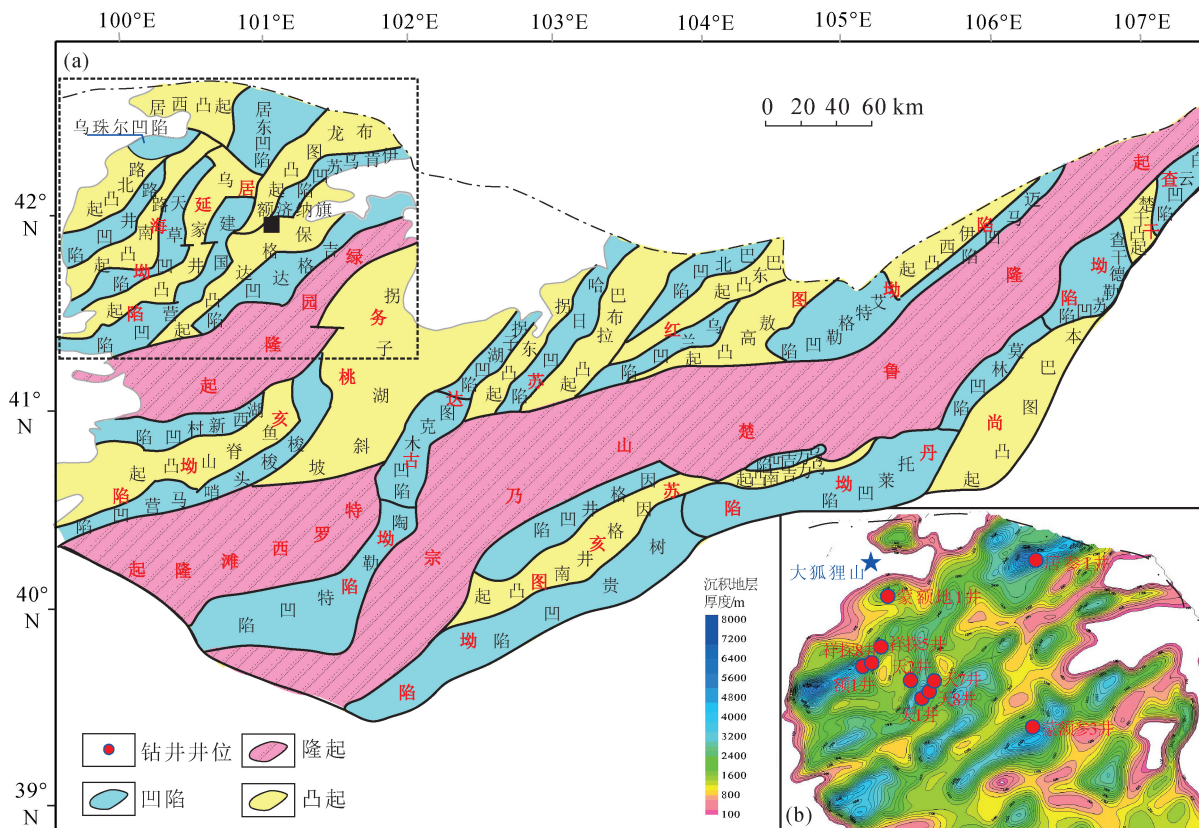


图 1 研究区位置及钻井分布示意图

Fig. 1 Schematic map of the distribution of the wells and the location of the study area

a—银额盆地中生代构造单元划分图;b—居延海坳陷钻井分布及沉积地层厚度图

层,以及天草凹陷天7、天8井等2口井原油进行了物性分析,并收集了路井凹陷祥探5井和祥探8井2口井原油物性资料(表1)。吉格达凹陷蒙额参3井2个产层及路井凹陷2口井的原油物性相近,均为轻质-挥发性、中-低粘度、中凝固点、高含蜡、低含硫原

油。其中,蒙额参3井晚石炭世侵入岩所产原油较该井中一下二叠统原油密度及粘度稍高,可能与前者原油放置时间长、轻质组分部分挥发有关。路井凹陷祥探5井原油密度、粘度较祥探8井稍高,可能与祥探5井油层浅、遭受轻微的微生物降解有关。

表 1 居延海坳陷不同构造单元代表性钻井原油物性统计结果

Table 1 Physical properties of the crude oil of representative wells of different tectonic units in Juyanhai depression

构造单元	井号	井深/m	产层	密度/(g·cm ⁻³) (50℃)	粘度/(mPa·s) (50℃)	沥青质+ 胶质/%	含蜡 量/%	初馏 点/℃	凝固 点/℃	含硫 /%
吉格达凹陷	蒙额参3	2474.4	二叠系	0.7954	3.49	5.80	35.59	55	18	0.022
		2772	晚石炭世侵入岩	0.8024	5.11	4.46	30.87	60	19	0.013
天草凹陷	天7	1525	二叠系	0.8785	16.05	9.60	6.41	108	31	0.047
		2052	二叠系	0.864	8.23	8.21	7.31	94	30	0.065
路井凹陷	祥探5	1238.5	二叠系	0.819	6.114	14.9	13.86	/	17	0.11
		1836	晚石炭世侵入岩	0.7747	1.933	3.76	16.75	/	23	0.07

注:蒙额参3井晚石炭世侵入岩产层原油样品放置时间长,可能部分轻质组分挥发

天草凹陷天8井原油为轻质、中粘度、中凝固点、中-高含蜡、低含硫原油,天7井原油密度及粘度稍高,亦可能与其埋藏浅、遭受轻微的微生物降解有关。

吉格达凹陷中一下二叠统和晚石炭世侵入岩原油初馏点分别为55℃和60℃,天草凹陷2口井原油初馏点分别为108℃和94℃,与其他油田轻质油和中质油初馏点一致。所有样品原油含硫量极低,分布在0.013%~0.11%之间。

综合而言,居延海拗陷各次级构造单元(凹陷)原油物性均指示了其母源以低等水生生物为主,虽然油藏埋藏深度小(以中浅层为主),但指示的烃源岩演化程度较高。天草凹陷与吉格达、路井凹陷原油物性的差异可能反映了低等水生生物所占比例的差异,或烃源岩热演化程度的差异。低含硫指示潮湿、半潮湿的沉积环境。

此外,路井凹陷额1井晚石炭世侵入岩产凝析油与天然气,指示原油母岩演化进入高成熟阶段。

2.2 原油地球化学特征

2.2.1 原油族组分

原油族组分特征主要受母质类型、演化程度等因素的影响,通常生烃母质类型较好的烃源岩所生成的原油饱和烃含量较高,芳烃及非烃+沥青质含量较低。并随着烃源岩成熟度的提高,生成的原油饱和烃含量增加,芳烃及沥青质和非烃含量减少。

与原油物性样品对应获得了原油族组分资料,所有原油均具有饱和烃含量高、芳烃及非烃+沥青质含量低的特点(表2)。饱和烃含量为78.06%~92.95%,平均84.98%,芳烃含量为3.51%~14.17%,平均9.40%,饱/芳值为5.5~26.5,平均12.24。非

烃+沥青质含量为3.54%~7.77%,平均5.62%。

原油族组分亦指示原油生烃母质以低等水生生物为主,且烃源岩演化程度较高。不同次级构造单元或产层原油族组分之间存在一定的差异,代表了生烃母质低等水生生物所占比例或烃源岩热演化程度存在一定的差异。

2.2.2 原油同位素

原油碳同位素($\delta^{13}C_{PDB}$)与烃源岩母质类型和演化程度密切相关,碳同位素越轻,代表生油母质类型越好,并随着烃源岩演化程度的提高,其烃类产物(原油)碳同位素变重,但演化程度影响较小。

不同构造单元、不同层系原油碳同位素差别不大,全油碳同位素 $\delta^{13}C_{PDB}$ 为-33.7‰~-32.0‰,总体偏轻。代表了生烃母质类型以低等水生生物为主,且演化程度较高,与族组分分析结果吻合。结合原油族组分与原油物性分析,吉格达凹陷、路井凹陷较天草凹陷原油密度及粘度低,碳同位素偏重,表明其生烃母质演化程度相对要高。

2.2.3 饱和烃

饱和烃包括正构烷烃、异构烷烃和环烷烃,其含量及组成主要受母质类型与热演化程度的影响。在相同演化程度条件下,母质类型好的烃源岩生成的烃类低分子含量相对较高,并随着演化程度提高,高分子烃逐渐向低分子烃演化。

不同凹陷原油饱和烃特征统计结果表明,碳数分布范围以 C_{10} (或 C_{11})~ C_{38} (或 C_{37})为主(表3),具有单峰型分布特征,以低碳数烷烃为主,但主峰碳存在一定的差异。路井凹陷、吉格达凹陷和天草凹陷原油主峰碳分别为 C_{13} 、 C_{17} 和 C_{23} (图2),表明原油母质主要来源于低等水生生物。路井凹陷2口

表2 居延海拗陷代表性钻井原油族组分及同位素特征

Table 2 The characteristics of composition and isotope of the crude oil of representative wells in Juyanhai depression

构造单元	井号	产层	族组分				全油或干酪根同位素 $\delta^{13}C_{PDB}/\text{‰}$	
			饱和烃/%	芳烃/%	非烃/%	沥青质/%		饱/芳
吉格达凹陷	蒙额参3	二叠系	88.01	7.89	3.06	1.05	11.20	-32.7
		晚石炭世侵入岩	92.95	3.51	1.89	1.65	26.50	-32.0
天草凹陷	天7	二叠系	78.06	14.17	6.94	0.83	5.50	-33.7
	天8	二叠系	82.09	13.28	3.43	1.19	6.20	-33.1
路井凹陷	祥探5	二叠系	80.69	12.55	4.63	2.12	6.43	-32.79
	祥探8	晚石炭世侵入岩	88.05	5.01	1.16	5.78	17.60	-32.9

表 3 不同构造单元、不同产层原油饱和烃特征

Table 3 The characteristics of saturated hydrocarbon of the crude oil in different tectonic units and different oil layers

构造单元	井号	层位	碳分布范围	主峰碳	$\sum nC_{21-}/\sum nC_{22+}$	OEP	Pr/Ph	Pt/ nC_{17}	Ph/ nC_{18}
吉格达 凹陷	蒙额参 3	二叠系	$C_{11} \sim C_{37}$	C_{17}	1.55	1.12	0.70	0.24	0.36
		晚石炭世侵入岩	$C_{11} \sim C_{37}$	C_{17}	2.05	1.08	0.70	0.14	0.21
天草凹陷	天 7	二叠系	$C_{10} \sim C_{32}$	C_{23}	1.69	1.15	0.73	0.46	0.62
	天 8	二叠系	$C_{10} \sim C_{37}$	C_{23}	1.28	1.14	0.85	0.37	0.44
路井凹陷	祥探 5	二叠系	$C_{10} \sim C_{38}$	C_{13}	2.94	1.05	0.72	0.23	0.36
	祥探 8	晚石炭世侵入岩	$C_{10} \sim C_{38}$	C_{13}	2.63	1.06	0.71	0.24	0.36

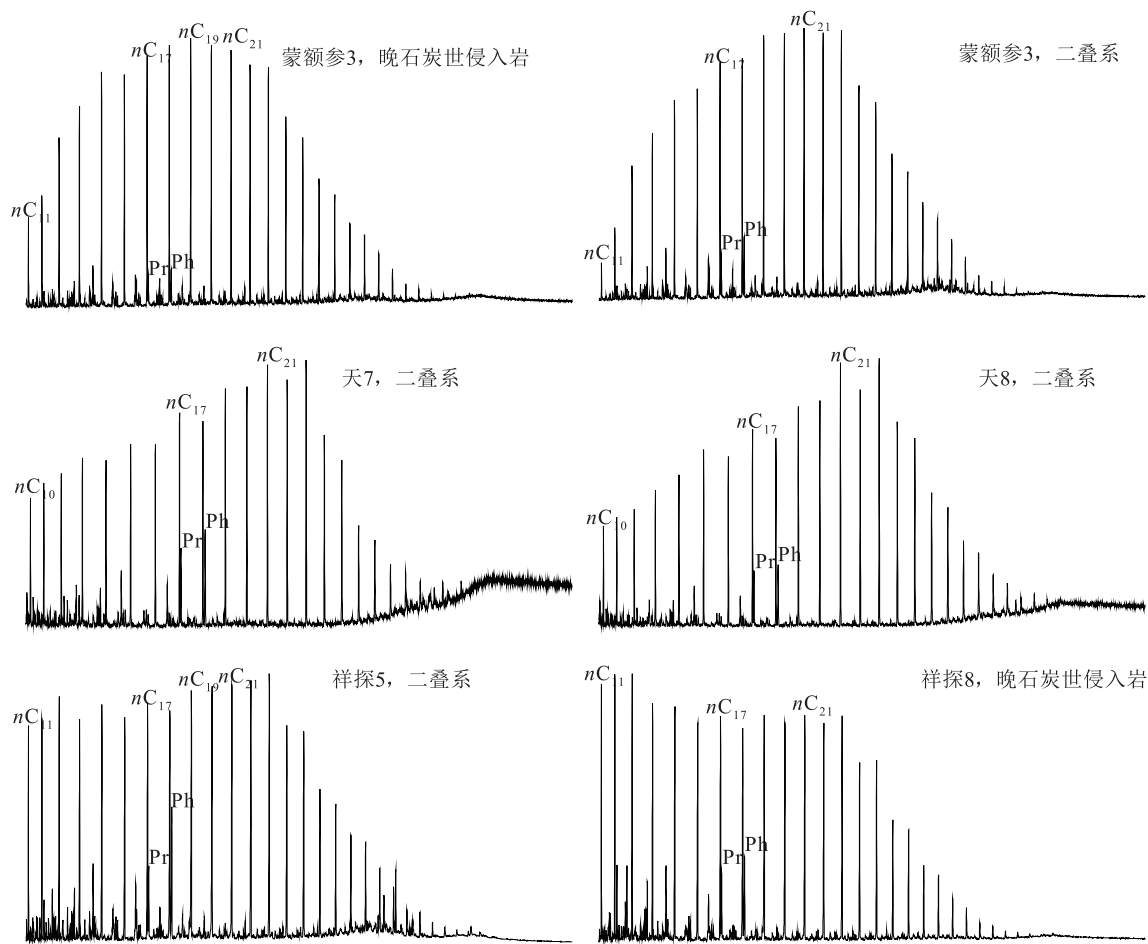


图 2 原油饱和烃色谱图

Fig. 2 Saturated hydrocarbon chromatogram of the crude oil

井主峰碳最低 (C_{13}), 轻烃/重烃值 ($\sum nC_{21-}/\sum nC_{22+}$) 最高 (大于 2.6); 吉格达凹陷蒙额参 3 井 2 个产层原油主峰碳相同 (C_{17}), 中一下二叠统和晚石炭世侵入岩原油 $\sum nC_{21-}/\sum nC_{22+}$ 值分别为 1.55 和 2.05, 存在一定的差异, 反映存在不同演化程度烃源岩的供给; 天草凹陷 2 口井原油主峰碳最大 (C_{23}), $\sum nC_{21-}/\sum nC_{22+}$ 值分别为 1.69 和 1.23。综

合分析表明, 在总体生烃母质以低等水生生物为主, 且烃源岩演化程度较高的前提下, 天草凹陷生烃母质低等水生生物所占比例较低或烃源岩演化程度较低。

原油 OEP 分析结果表明, 各井原油低碳数奇偶优势不明显 (OEP 接近 1), 指示生烃母源以细菌或藻类低等生物为主, 且烃源岩演化达到成熟阶段。其

中,吉格达凹陷蒙额参3井中—上二叠统原油及天草凹陷2口井原油 OEP 大于 1.1,分布在 1.12~1.15 之间,表明原油生烃母质混入的陆源有机质相对要多。

姥姦烷/植烷 (Pr/Ph) 指示生油母质的沉积环境, $Pr/Ph=0.5\sim 1.0$ 代表还原环境, $Pr/Ph=1\sim 2$ 代表弱还原—弱氧化环境。各井原油 Pr/Ph 分布在 0.70~0.85 之间,指示生烃母质的沉积环境为还原环境。 Pr/nC_{17} 、 Ph/nC_{18} 亦可作为环境判断指标,其指标越低,表明还原环境越强。各井原油 Pr/nC_{17} 、 Ph/nC_{18} 均较低,分别分布在 0.14~0.46 和 0.21~0.44 之间,亦指示生烃母质为还原环境条件下沉积形成。

2.2.4 生物标志化合物

由于许多生物标志化合物都具有特定的来源,且具有稳定的结构,对油气或烃源岩研究具有独特的溯源意义。

藿烷系列化合物指示主要为细菌生源,生烃母质以低等水生生物为主的烃源岩具有 C_{30} 藿烷的显著优势;三环萜烷在以低等水生生物为主的腐泥型烃源岩中具有相对的高含量。一般认为,低等水生生物生源富含 C_{27} 和 C_{28} 甾烷,高等植物生源富含 C_{29} 甾烷,伽马蜡烷的存在指示生烃母质沉积时具强还原环境和水体含盐度较高。

研究区各凹陷原油均具有 C_{30} 藿烷明显偏高的特点(图 2),其次为 C_{29} 降藿烷及伽马蜡烷。伽马蜡烷含量为 2.52%~8.95%,伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷为 0.40~0.71;并具有较高的三环萜烷,分布范围为

5.59%~10.55%。除吉格达凹陷蒙额参3井中—下二叠统原油外,其他井或层原油均具有藿烷>甾烷>三环萜烷的特点(表 4)。甾烷相对含量 C_{27} 甾烷+ C_{28} 甾烷分布在 41.47%~55.89% 之间,多数样品 C_{27} 甾烷+ C_{28} 甾烷大于 50%。因此,生物标志化合物指示,原油生烃母质以低等水生生物为主,且烃源岩沉积环境为强还原的咸水环境。

甾烷 $C_{29} \alpha\alpha\alpha 20S / (20S + 20R) > 0.4$, $C_{29} \alpha\beta\beta / (\alpha\beta\beta + \alpha\alpha\alpha) > 0.45$ 为成熟原油,随着演化程度的提高, $C_{29} \alpha\alpha\alpha 20S / (20S + 20R)$ 和 $C_{29} \alpha\beta\beta / (\alpha\beta\beta + \alpha\alpha\alpha)$ 增大(最大小于 0.6)。三降新藿烷(T_s)对三降藿烷(T_m)的优势指示具有较高的演化程度,但母质生物类型对 T_s 与 T_m 也存在不同程度的影响。

不同凹陷原油甾烷 $C_{29} \alpha\alpha\alpha 20S / (20S + 20R)$ 差别不大,分布在 0.50~0.57 之间,甾烷 $C_{29} \alpha\beta\beta / (\alpha\beta\beta + \alpha\alpha\alpha)$ 分布在 0.47~0.59 之间,指示生烃母质演化程度达到成熟—高成熟阶段。蒙额参3井、祥探8井晚石炭世侵入岩所产原油和天8井中—下二叠统原油 T_s 对 T_m 优势明显,指示成熟—高成熟阶段。其他钻井中—下二叠统原油 T_s 对 T_m 无优势,结合其他指标,认为除其源岩演化程度稍低外,还可能与生烃母质存在一定差异有关。

总之,原油族组分、碳同位素、饱和烃特征、生物标志化合物等均指示了生烃母质以低等水生生物为主,且演化程度较高。比较而言,晚石炭世侵入岩所产原油指示的生烃母质演化程度高于中—下二叠统所产原油的生烃母质演化程度。

表 4 银额盆地不同构造单元原油生物标志化合物特征

Table 4 The characteristics of biomarkers of the crude oil in different tectonic units of Yingen-Ejina basin

构造单元	井号	地层	甾烷相对含量/%			三环萜烷含量/%	伽马蜡烷相对含量/%	伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷	生物标志化合物相对含量/%			T_s/T_m	$C_{29} \alpha\alpha\alpha 20S / (20S + 20R)$	$C_{29} \alpha\beta\beta / (\alpha\beta\beta + \alpha\alpha\alpha)$
			$C_{27} / (C_{27} + C_{28} + C_{29})$	$C_{28} / (C_{27} + C_{28} + C_{29})$	$C_{29} / (C_{27} + C_{28} + C_{29})$				藿烷	三环萜烷	甾烷			
吉格达凹陷	蒙额参3	二叠系	21.91	33.98	44.11	9.94	3.80	0.71	32.11	14.61	53.28	0.85	0.51	0.56
		晚石炭世侵入岩	22.80	32.81	44.39	10.55	4.92	0.70	43.17	16.41	40.42	1.18	0.54	0.59
天草凹陷	天7	二叠系	26.02	25.43	48.55	6.34	8.95	0.47	64.59	7.34	28.07	0.52	0.50	0.54
			天8	18.57	22.90	58.52	6.15	8.76	0.43	49.20	4.65	46.15	2.01	0.56
路井凹陷	祥探5	二叠系	21.15	33.67	45.18	5.59	7.09	0.40	61.60	7.13	31.27	0.56	0.50	0.47
			祥探8	20.12	27.31	52.57	6.08	2.52	0.57	55.84	21.46	22.69	2.90	0.57

3 烃源岩发育特征与油-源对比

3.1 烃源岩发育特征

不同学者对居延海坳陷钻井揭示的烃源岩及邻区地表剖面烃源岩进行了研究^[15-17],但由于地层划分的不统一,不同学者所描述的层系之间的关系不明确。本文参照最新的地层划分研究进展^[9],自下而上对钻井揭示及邻区主要地表剖面的烃源岩特征进行说明。

3.1.1 上石炭统一下二叠统千泉组下段烃源岩

虽然研究区目前无钻井揭示干泉组下段,但紧邻研究区西北部的大狐狸山剖面下段暗色泥岩厚度为 231.30 m, TOC 含量分布范围为 0.41%~2.50%, 平均为 0.58%, TOC 含量大于 0.5% 以上的样品占 88.50%, 其中 47.86% 的样品 TOC 含量大于 1%, 有机质丰度中等—好。虽然干酪根同位素受地表风化作用及构造动力变质作用的影响普遍偏重,但甾烷 C_{27} 占绝对优势、 Ph/nC_{17} 与 Ph/nC_{18} 干酪根类型判别图均指示以 I—II 型为主。受构造动力作用的影响,烃源岩演化进入高成熟—过成熟阶段^[12]。

3.1.2 上石炭统一下二叠统千泉组上段烃源岩

研究区一批钻井均揭示了干泉组上段烃源岩,受赛汉陶来古陆的控制,不同构造单元烃源岩发育程度、地球化学特征存在一定的差异。以吉格达凹陷蒙额参 3 井为代表,发育巨厚的浅海陆棚相沉积暗色泥岩,累计厚度 162 m。30 件岩心样品 TOC 含量平均 1.01%, 生烃潜量(S_1+S_2)平均 6.41 mg/g, 有机质丰度中等—好,采集的 7 件样品干酪根碳同位素($\delta^{13}C_{PDB}$)分布在 $-28.1\% \sim -29.3\%$ 之间,平均 -28.6% ,干酪根类型以 I 型为主。 R_o 分布在 $0.82\% \sim 1.04\%$ 之间,烃源岩演化程度为成熟。

3.1.3 中一下二叠统烃源岩

研究区主要凹陷揭示了中一下二叠统(未分组)烃源岩,其中乌珠尔凹陷的蒙额地 1 井为全取心钻井,揭示灰色、深灰色泥岩、钙质泥岩厚度 202 m。采集的 16 件岩心样品分析结果,TOC 含量分布在 $0.01\% \sim 3.29\%$ 之间,平均 1.23%,生烃潜量(S_1+S_2)分布在 $0.08 \sim 22.98$ mg/g 之间,平均 6.91 mg/g,50% 以上样品为中等—好的烃源岩。采集的 8 件样品的干酪根碳同位素分析结果显示, $\delta^{13}C_{PDB}$ 小于 -28.0% 的 6 件,介于 $-25.0\% \sim -28.0\%$ 之间的 1 件,大于 -25.0% 的 1 件,干酪根类型以 I—II 型为主。 R_o

分布在 $0.52\% \sim 0.69\%$ 之间,烃源岩演化程度为低成熟。

路井凹陷祥探 9 井代表了距离赛汉陶来古陆较近带的钻井,暗色泥岩厚 64.5 m,据 5 件岩心样品分析结果,TOC 含量分布于 $0.70\% \sim 4.13\%$ 之间,平均 1.76%,生烃潜量(S_1+S_2)为 $1.00 \sim 27.00$ mg/g,平均 8.86 mg/g,有机质丰度中等—好。采集的 5 件样品干酪根碳同位素分析结果显示, $\delta^{13}C_{PDB}$ 小于 -28.0% 的 2 件,介于 $-25.0\% \sim -28.0\%$ 之间的 3 件,干酪根类型为 I—II 型。 R_o 为 $0.59\% \sim 0.60\%$,烃源岩演化程度为低成熟。与蒙额地 1 井比较,除烃源岩厚度较小外,其他各项指标基本可对比。

3.1.4 白垩系巴音戈壁组烃源岩

银额白垩纪盆地(群)由一系列小型盆地组成,居延海坳陷的各次级凹陷均为小型沉积盆地。暗色泥岩主要发育在白垩纪盆地初始演化阶段(巴音戈壁组沉积期),分布范围局限,不同凹陷差异较大。

乌珠尔凹陷巴音戈壁组暗色泥岩最发育,蒙额地 1 井暗色泥岩厚度达 482 m。其他凹陷以粉砂质泥岩、粉砂岩、砂岩互层为主。本次研究采集了蒙额地 1 井样品 6 件,TOC 含量分布在 $0.69\% \sim 3.29\%$ 之间,平均 1.54%,生烃潜量(S_1+S_2)分布在 $1.57 \sim 22.00$ mg/g,平均 6.70 mg/g,有机质丰度以好—最好为主;3 件样品的干酪根碳同位素分析结果显示, $\delta^{13}C_{PDB}$ 小于 -28.0% 的 2 件,介于 $-25.0\% \sim -28.0\%$ 之间的 1 件,干酪根类型为 I—II 型; R_o 分布在 $0.49\% \sim 0.71\%$ 之间,平均 0.59%,烃源岩演化程度以未成熟—低成熟为主。

吉格达凹陷巴音戈壁组暗色泥岩不发育,以灰色粉砂质泥岩为主,3 件样品的 TOC 含量平均 0.50%,生烃潜量(S_1+S_2)平均 0.31 mg/g,有机质丰度评价为差烃源岩。干酪根元素判别其类型为 II₂ 型。热解分析 T_{max} 平均 $437^\circ C$,烃源岩演化程度为低成熟。

李光云等^[16]对居延海居东、天草凹陷巴音戈壁组烃源岩研究表明,暗色泥岩厚度变化大,有机质丰度中等—好,有机质类型以 II—III 型为主。

3.2 油-源对比

3.2.1 生物标志化合物对比

生物标志化合物是油-源对比中最常用的指标,有学者对路井凹陷主要产油井油源进行了对比研究,认为路井凹陷不同层段获得的原油均与上石炭统一下二叠统干泉组烃源岩具有良好的亲缘关系^[18]。

本文以吉格达凹陷蒙额参 3 井晚石炭世侵入岩

段及中—下二叠统2个产层原油为代表开展油源对比研究。饱和烃藿烷($m/z191$)对比表明,2个产层的原油与石炭系—二叠系烃源岩均具有藿烷相对

含量占绝对优势的特点,藿烷系列分布范围为 $C_{27} \sim C_{35}$, C_{30} 藿烷显著偏高(图3-a),其次为 C_{29} 降藿烷,具少量的 C_{34} 四升藿烷和 C_{35} 五升藿烷,伽马蜡烷相

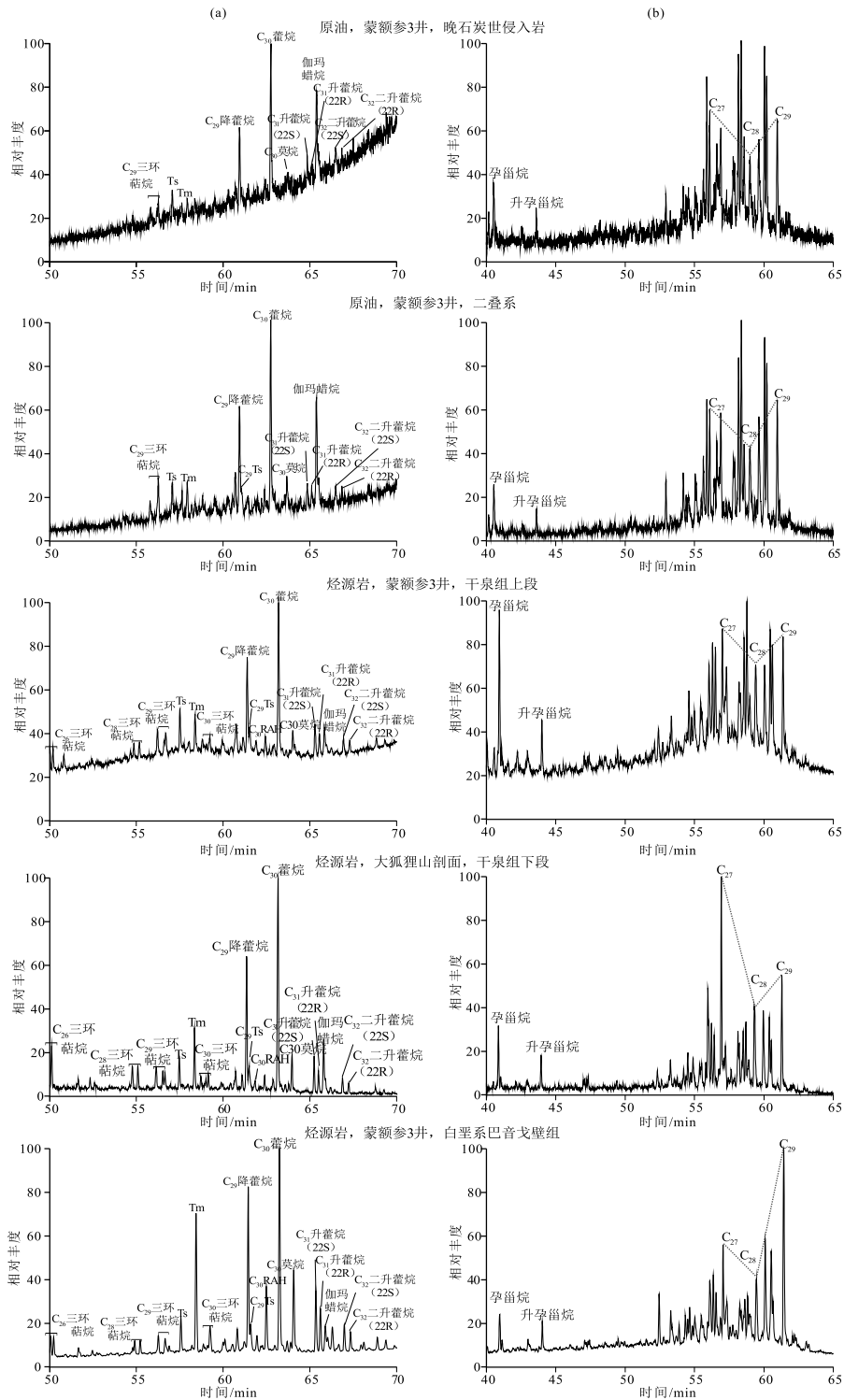


图3 蒙额参3井油-源生物标志化合物对比图

Fig. 3 Comparison diagrams of biomarkers between oil and source rocks of Mengecan 3 well

a— $m/z=191$ 饱和烃质量色谱图;b— $m/z=217$ 饱和烃质量色谱图

对含量较高, T_s 略大于 T_m (或二者相当)。

白垩系烃源岩除 C_{30} 藿烷偏高外, 具有较高的 C_{29} 降藿烷、 C_{30} 莫烷、 C_{31} 升藿烷, 而伽马蜡烷含量相对较低, T_m 显著高于 T_s , 与原油具有显著的区别。

饱和烃甾烷 ($m/z217$) 对比 (图 3-b) 表明, 2 个产层的原油与石炭系—二叠系烃源岩甾烷 C_{27} 大于 C_{29} 或二者基本相当, 均具有孕甾烷大于升孕甾烷的特点。白垩系烃源岩甾烷具有显著的 C_{29} 优势, 孕甾烷对升孕甾烷的优势不明显, 与原油具有显著的区别。

3.2.2 碳同位素分布对比

原油的碳同位素组成取决于其母源有机质的组成及沉积环境, 因此, 碳同位素组成常用于油—源对比^[19]。

本次研究采集了吉格达凹陷蒙额参 3 井上石炭统—下二叠统干泉组上段 10 件烃源岩样品, 以及中—下二叠统 8 件烃源岩样品, 进行了抽提物及其族组分同位素分析, 分别取 2 个岩石地层单元烃源岩同位素平均值与晚石炭世侵入岩及中—下二叠统 2 个产层原油同位素进行对比, 干泉组上段烃源岩碳同位素与 2 个产层的原油具有良好的—致性 (图 4)。尽管由于中—下二叠统与上石炭统—下二叠统干泉组上段沉积环境差异不大, 烃源岩同位素差异较小, 但中—下二叠统烃源岩碳同位素较原油碳同位素偏重的特征还是十分明显。因此, 油源主要为上石炭统—下二叠统干泉组上段烃源岩。

综合分析认为, 生物标志化合物、碳同位素均指示蒙额参 3 井 2 个产层的原油与石炭系—二叠系烃源岩具有良好的亲缘关系。且原油物理化学特征指示其母质以低等水生生物为主, 以及烃源岩热演化程度进入成熟—高成熟阶段, 与石炭系—二叠系烃源岩地球化学特征及演化程度吻合。

由于吉格达凹陷巴音戈壁组烃源岩不发育, 未进行烃源岩的碳同位素分析, 但白垩系烃源岩生物标志化合物与原油生物标志化合物具有显著差别, 且白垩系烃源岩演化程度为低成熟, 原油指示的烃源岩热演化程度进入成熟—高成熟阶段, 亦排除了白垩系烃源岩提供油源的可能性。因此, 研究区原油源于石炭系—二叠系烃源岩无疑, 与白垩系烃源岩无关。

4 讨论

近年来, 居延海坳陷不断取得油气的发现, 但由于基础地质与油气地质研究薄弱, 尤其是缺乏系统的原油物理、化学特征研究与油源对比, 对主要油气系统与油源时代认识存在争议^[2-11]。

此次研究表明, 居延海坳陷不同次级构造单元 (凹陷) 原油物理、地球化学特征均指示, 生烃母质以低等水生生物为主, 烃源岩演化程度以成熟—高成熟为主, 且多数钻井原油指示的烃源岩演化程度明显高于含油层段附近烃源岩的演化程度, 路井凹陷额 1 井 2685~2716 m 井段产凝析油, 指示了生烃母质演化程度为高成熟的特征。

居延海坳陷钻井揭示的白垩系烃源岩演化处于低成熟—未成熟阶段, 生物标志化合物以高 T_m 、 C_{29} 莫烷、 C_{30} 降藿, 以及低伽马蜡烷与已知的原油具有显著的区别。且目前所有含油层均位于白垩系之下, 排除了白垩系含油系统, 以及原油源于下白垩统巴音戈壁组烃源岩的可能。

虽然对居延海坳陷钻井揭示的主要岩石地层单元时代存在不同的认识, 对是否存在侏罗纪地层存在争议, 但西北地区侏罗纪以成煤为主的沉积环境的认识一致^[20], 指示了侏罗系烃源岩以高等陆生生物为主。不同学者对银额盆地周缘的北山盆地群、阿拉善盆地群 (潮水盆地、雅布赖盆地) 侏罗系烃源岩的研究, 均表明烃源岩干酪根以 II—III 型为主^[21-22], 且烃源岩演化程度处于低成熟—成熟阶段。明显不同于居延海坳陷原油指示的生烃母质

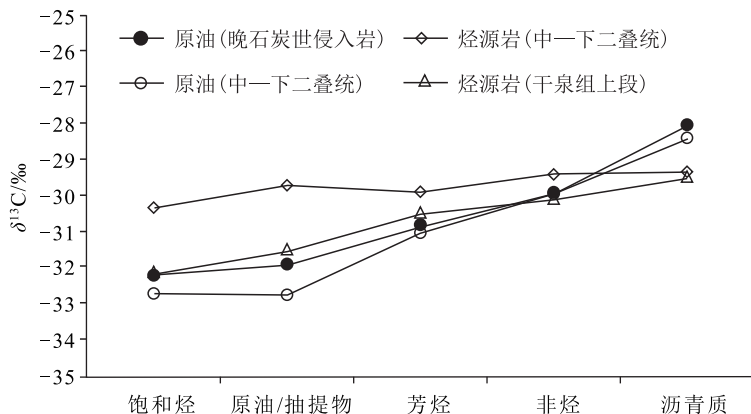


图 4 蒙额参 3 井原油及烃源岩同位素分布曲线对比图

Fig. 4 Distribution curve of carbon isotope $\delta^{13}C$ of the crude oil and the source rocks of Menggecan 3 well

以低等水生生物为主, 烃源岩演化程度以成熟—高成熟为主的特征。因此, 排除了侏罗系含油系统, 以及原油源于侏罗系烃源岩的可能。

近年来, 银额盆地及周缘石炭纪—二叠纪沉积环境与石炭系—二叠系沉积之后的构造演化研究取得了新进展。有学者认为, 石炭纪—二叠纪为陆内裂谷盆地沉积, 广泛发育浅海陆棚相沉积的泥页岩为有利烃源岩^[23-24]。居延海坳陷原油物理化学特征及生物标志化合物指示的生烃母质以低等水生生物为主, 沉积环境为强还原的咸水环境, 与石炭系—二叠系烃源岩形成于浅海陆棚相沉积环境吻合。油—源生物标志化合物、碳同位素对比表明, 研究区原油与石炭系—二叠系烃源具有良好的亲缘关系。石炭系—二叠系沉积之后经历了多期构造改造, 虽然居延海坳陷钻遇的油藏以中浅层为主, 但多期次的构造演化与埋藏史, 有利于烃源岩的热演化^[25-26], 与原油指示的生烃母质演化程度为成熟—高成熟吻合。因此, 居延海坳陷目前已发现的油气藏其油气源于石炭系—二叠系烃源岩及含油系统为石炭系—二叠系无疑, 且与银额盆地为石炭纪—二叠纪与白垩纪叠合含油气盆地的认识吻合。

值得注意的是, 居延海坳陷钻井揭示的上石炭统—二叠统干泉组上段及中—下二叠统烃源岩及油藏埋深以中浅层为主, 但原油指示生烃母岩热演化程度进入成熟—高成熟阶段, 显著高于钻井揭示的烃源岩演化程度。结合大狐狸山剖面上石炭统—二叠统干泉组下段发育良好烃源岩^[27], 认为居延海坳陷发现的油气藏普遍存在深层未揭示的上石炭统—二叠统干泉组下段烃源岩的贡献。

5 结论

(1) 居延海坳陷不同构造单元(凹陷)原油以轻质—挥发性原油为主, 个别井产凝析油, 并具有低粘度、中凝固点、高含蜡、低含硫的特点, 指示其母岩以低等水生生物为主, 且演化程度为成熟—高成熟阶段。

(2) 不同次级构造单元获得的原油均具有饱和烃含量高, 碳同位素轻, 轻烃/重烃值高等特点, 指示生烃母岩有机质类型、热演化程度与原油物性反应的母质类型一致。

(3) 油—源对比表明, 原油生物标志化合物、碳

同位素与石炭系—二叠系烃源岩具有显著的亲缘关系, 而与白垩系烃源岩生物标志化合物区别显著, 其母岩为石炭系—二叠系烃源岩无疑。

(4) 原油指示的母岩演化程度为成熟—高成熟, 显著高于钻井揭示的上石炭统—二叠统干泉组上段及中—下二叠统烃源岩的演化程度, 表明研究区存在钻井未揭示的深层烃源岩的贡献, 是今后勘探中值得重视的新层系。

致谢: 中石油吐哈油田分公司、中石化华北油气分公司勘探开发研究院有关领导及同行为样品采集与资料收集提供了方便, 中石化中原油田分公司研究院、国家地质试验测试中心及中国石油大学(北京)承担了相关样品分析, 在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] 卢进才, 张洪安, 牛亚卓, 等. 内蒙古西部银额盆地石炭系—二叠系油气地质条件与勘探发现[J]. 中国地质, 2017, 44(1): 13-32.
- [2] 李光云, 樊太亮, 唐龙, 等. 银额盆地天草凹陷下白垩统层序地层构架与油气分布[J]. 新疆石油地质, 2007, 25(3): 295-299.
- [3] 林卫东, 周永章, 陈启林, 等. 兴蒙褶皱带西段盆地群和二连盆地成藏条件比较与油气勘探方向分析[J]. 中山大学研究生学刊(自然科学、医学版), 2006, 26(1): 70-75.
- [4] 王新民, 郭彦如, 马龙, 等. 银—额盆地侏罗、白垩系油气超系统特征及其勘探方向[J]. 地球科学进展, 2001, 16(4): 490-495.
- [5] 张代生, 李光云, 罗肇, 等. 银根—额济纳旗盆地油气地质条件[J]. 新疆石油地质, 2003, 24(2): 130-134.
- [6] 李明杰, 郑孟林, 曹春潮, 等. 北山—阿拉善地区侏罗—白垩纪盆地的叠合演化[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(1): 54-57.
- [7] 卢进才, 牛绍武, 魏建设, 等. 银额盆地西部蒙额地 1 井二叠纪叶肢介的发现及其意义[J]. 地质通报, 2018, 37(1): 16-25.
- [8] 卢进才, 牛亚卓, 姜亭. 中国北方石炭系—二叠系油气地质调查与勘探进展[J]. 地质通报, 2018, 37(1): 7-15.
- [9] 卢进才, 魏建设, 姜亭, 等. 银额盆地居延海坳陷钻井地层对比及对油气产层时代的约束[J]. 中国地质, 2020, 47(5)(网络首发).
- [10] 魏仙样, 卢进才, 魏建设, 等. 内蒙古银额盆地居延海坳陷 X 井地层划分修正及其油气地质意义[J]. 地质通报, 2014, 33(9): 1409-1416.
- [11] 曹洁, 魏仙样, 严小鳞, 等. 内蒙古西部额济纳旗探 8 井华力西期风化壳原油地球化学特征[J]. 地质通报, 2012, 31(10): 1639-1641.
- [12] 卢进才, 陈高潮, 李玉宏, 等. 银额盆地及邻区石炭—二叠系油气地质条件与资源前景[M]. 北京: 地质出版社, 2012: 1-439.
- [13] 刘华, 蒋有录, 蔡东梅, 等. 东营凹陷古近系原油物性及其影响因素[J]. 油气地质与采收率, 2006, 13(3): 8-11.
- [14] 王朋, 柳广弟, 曹喆, 等. 查干凹陷下白垩统稠油地球化学特征及成因分析[J]. 沉积学报, 2015, 33(6): 1265-1274.
- [15] 唐友军, 文志刚, 张超漠, 等. 银根—额济纳旗盆地天草凹陷天 2 井烃源岩生烃潜力评价[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(4): 530-536.

- [16] 李光云, 漆万珍, 樊太亮. 银额盆地居延海坳陷油气勘探前景[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报). 2007, 29(5): 13-19.
- [17] 金庆花, 魏仙样, 魏建设, 等. 内蒙古额济纳旗西部 ZK0-1 井二叠系烃源岩特征及其意义[J]. 地质通报, 2015, 34(5): 953-960.
- [18] 魏仙样, 卢进才, 魏建设, 等. 内蒙古银额盆地西部路井凹陷油气地球化学特征与油气源[J]. 地质通报, 2013, 32(10): 1665-1672.
- [19] 宋到福, 王铁冠, 李美俊, 等. 和田河气田凝析油油源及油气成因关系判识[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(7): 941-952.
- [20] 陈建平, 赵长毅, 王兆云, 等. 西北地区侏罗纪煤系烃源岩和油气地球化学特征[J]. 地质论评, 1998, 44(2): 149-158.
- [21] 牛海青, 韩小锋, 肖波, 等. 中口子盆地侏罗系煤系烃源岩地球化学特征及生烃潜力评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2019, 49(4): 970-981.
- [22] 田涛, 任战利, 马国福, 等. 雅布赖盆地萨尔台凹陷烃源岩地球化学特征、成熟度演化与油气关系[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(6): 2745-2753.
- [23] 卢进才, 陈高潮, 魏仙样, 等. 内蒙古西部额济纳旗及邻区石炭系—二叠系沉积建造与生烃条件——石炭系—二叠系油气地质条件研究之一[J]. 地质通报, 2011, 30(6): 811-826.
- [24] 卢进才, 史冀忠, 牛亚卓, 等. 内蒙古西部北山—银额地区石炭纪—二叠纪层序地层与沉积演化[J]. 岩石学报, 2018, 34(10): 3101-3115.
- [25] 韩伟, 卢进才, 张云鹏, 等. 内蒙古西部额济纳旗及其邻区磷灰石裂变径迹研究及其油气地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2014, 38(3): 647-655.
- [26] 许伟, 魏建设, 韩伟, 等. 银额盆地及周缘石炭系和二叠系沉积之后构造改造初探[J]. 地质通报, 2018, 37(1): 132-143.
- [27] 唐友军, 孔雪, 蒋兴超, 等. 内蒙古额济纳旗大狐狸山地区干泉组烃源岩生物标志化合物特征及意义[J]. 地质通报, 2013, 32(4): 652-660.

《地质通报》第39卷第11期要目预告

矿田构造变形岩相分类与应用效果	吕古贤等
胶东玲珑金矿田不同矿段构造蚀变岩相特征对比与深部找矿预测	张宝林等
论沉积盆地内成岩相系类型划分与地球化学岩相学作用	方维莹
南秦岭汉阴长沟金矿陆内造山期构造—蚀变岩相填图与找矿	杨兴科等
塔里木东北缘坡北镁铁—超镁铁质岩体的岩相划分及岩浆演化过程	焦建刚等
湖南花垣铅锌矿藻灰岩相层状角砾岩成矿阶段的地质研究	吕承训等
内蒙古维拉斯托锂锡多金属矿含矿构造变形岩相分带和分布	付旭等
湘西花垣铅锌矿田成矿构造系统与成矿规律	高伟利等
豫西栾川三道庄钨钼矿区构造蚀变岩相的观测与研究	罗毅甜等
江西银坑铅锌银矿田基底褶皱构造特征及其南北向矿化带研究	杨人毅等
玲珑金矿 50 号脉三维构造蚀变岩地球化学特征及深部预测	高海东等
胶东三山岛北海域金矿床热液蚀变作用研究	王建等
个旧新山含钨夕卡岩地球化学特征及成岩成矿	郭玉乾等
花岗岩剪切变形与矿物成分变化的高温高压实验	刘贵等
中国南方碳酸盐岩系层滑断裂控矿和成矿研究	钱建平
新疆中生代萨热克巴依盆地构造样式、变形特征与控矿规律	刘孜等