

准噶尔盆地南缘油气苗 有机地球化学特征及成因

周妮, 李际, 刘翠敏, 何丹, 杨红霞, 王海静

(中国石油新疆油田分公司 实验检测研究院, 新疆 克拉玛依 834000)

摘要:为查明准噶尔盆地南缘油气苗的成因及其石油地质意义,对典型油气苗的地球化学特征进行了研究。该地区的油气苗可以分为 4 类:A 类主要分布于南缘东段,油源为二叠系;B 类分布于南缘中段第一排构造的齐古地区和南缘西段的托斯台背斜,油源以侏罗系为主;C 类主要分布于南缘中段第二排构造,油源为白垩系;D 类主要分布于南缘西段的乌苏—独山子地区,以泥火山为特色,油源为古近系而气源为侏罗系。油气苗的分布表现出典型的“源—断”双控特征,并与主要的含油气系统有很好的匹配关系,是地下油气藏在地面的直接线索,下步建议“西段上组合找气、中段中组合找油和东段下组合找有利储层”。

关键词:油气苗;泥火山;油砂;沥青;准噶尔盆地南缘

中图分类号:TE122.11

文献标识码:A

Organic geochemistry and genesis of oil and gas seeps in the southern Junggar Basin

ZHOU Ni, LI Ji, LIU Cuimin, HE Dan, YANG Hongxia, WANG Haijing

(Research Institute of Experiment and Testing, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay, Xinjiang 834000, China)

Abstract: The geochemical characteristics of oil and gas seepages from southern Junggar Basin were studied in order to determine the origin of complex seepages and their petroleum geology significance. The oil and gas seeps in the study area can be divided into 4 types. Type A is mainly distributed in the east section, mainly sourced from the Permian. Type B is mainly in the Qigu area, the first structural zone in the middle section and the Tuositai anticline in the west section, mainly sourced from the Jurassic. Type C is distributed in the second structural zone of the middle section, mainly from the Cretaceous. Type D is mainly distributed in Wusu-Dushanzi area of the west section, featured by mud volcanoes, with oil from the Paleogene and gas from the Jurassic. The distribution of oil and gas seeps shows a typical “source-fault” dual control mechanism, and has a good match with the main oil and gas systems, which is a direct indicator of underground oil and gas reservoirs on the surface. Further hydrocarbon exploration should be focused on gas in the upper segment in the west section, oil in the middle segment in the middle section, and favorable reservoirs in the lower segment of the east section.

Key words: oil-gas seeps; mud volcano; oil sand; bitumen; southern Junggar Basin

油气苗是石油、天然气及其衍生物在地表的露头,是石油产区的重要线索,对油气勘探具有重要的指示意义^[1-2]。众多油气勘探成功经验表明,国内外某些重要石油产区正是直接通过油气苗发现,如国内的克拉玛依油田和国外的加拿大 Syncrude 油田等^[3-4]。因此,对油气苗的研究历来得到了石油勘探和地质学家的重视,成为地质地球化学领域研究的热点之一。

准噶尔盆地是我国西北一个典型富油气苗的

大型叠合含油气盆地,盆地南缘更是以油气苗分布广、类型多而著称^[5-9]。前人报道准噶尔盆地南缘发现约 50 个油气苗点,类型包括泥火山、液体油苗、油砂和沥青等^[10-12]。前人认为准噶尔盆地南缘油气苗分别来源于古近系(独山子型)、侏罗系(齐古型)和二叠系(三台型)^[10-12];还认为泥火山气源主要为侏罗系^[12-15]。然而,迄今为止尚没有针对研究区典型油气苗地球化学特征的精细研究,不清楚时空上的差异,进而限制了勘探意义认识。

有鉴于此,本文拟通过对典型油气苗样品的有机地球化学进行研究,其结果也可供其他油气苗发育的地区参考。

1 油气苗分布

准噶尔盆地南缘归属北天山山前冲断带,是一个自海西期发展起来的盆地一级构造单元,呈“南北分带、东西分段”的长条状分布。南北分带是指北天山山前至盆地方向发育的三排构造,东西分段指西段的四棵树凹陷、中段的霍尔果斯—玛纳斯—吐谷鲁—古断褶带和东段的阜康断裂带^[16-17](图1)。研究区主要经历3个演化阶段,分别为石炭纪—二叠纪的早期前陆盆地阶段、中二叠世—晚侏罗世的陆内坳陷阶段和晚侏罗世至今的晚期再生前陆盆地阶段^[18]。盆地南缘发育石炭系—第四系,其中包括二叠系、侏罗系、白垩系和古近系等多套烃源岩,使得研究区发育多套复杂的含油气系统^[19]。此外,研究区断裂系统的发育在时空展布和规模上均表现出多样性、多期性和复杂性,尤其是多期构造的叠加,使得深层油气系统调整、破坏并出露地表形成复杂多样的油气苗^[20]。

1.1 年代

南缘油气苗的分布在年代、空间和相态上具有显著的差异性。年代上,油气苗出露的地层存在差异,总体上,中生界(T-J)出露最广,其次是在南缘东段古生界(P_2l)发现沥青,而南缘西段新生界(E-Q)发育泥火山、液体油苗和油砂。古生代是盆地定型期,是盆地格局形成的原始阶段,在出露古油藏的局部地区形成古油苗,如南缘东段大龙

口芦草沟组沥青。中生代是盆地的发育期,沉积与构造活动活跃,也是油气系统形成的主要阶段,油藏的形成与调整频繁,因而油气苗的分布也最为广泛。到新生代伴随北天山隆升,南缘地区构造活化,中—新生代油气系统调整成藏与破坏活动加剧,油气苗的分布范围进一步扩大,同时由于构造活动强烈且形成时间晚,油气组成偏轻,其中典型代表就是乌苏泥火山、独山子泥火山等现今仍在活动。

1.2 空间

南缘油气苗在空间分布上严格受控于构造地质条件。最重要的控制因素是“源”,油气苗的产出基本上都是近“烃源灶”,与“源”的关系密切,以乌鲁木齐断裂为界,乌西地区与乌东地区油气苗分布特征差异显著,其中乌西地区包括南缘中段和西段油气苗产出的层位和相态明显更多,这可能主要受控于烃源岩的发育程度。乌东地区主要发育二叠系烃源岩,以古油藏为主,因而油气苗的类型主要是固体的沥青或油砂,而乌西地区发育中新生代烃源岩,且现今仍处于生烃期,因而油气相态多样,也有液态油苗和泥火山(气)。

1.3 相态

在南缘特定的时空格架下,油气苗的相态分布特征显著。南缘研究区油气苗广泛出露且类型丰富,总体而言,按其产状可以分为固体油苗(沥青脉和油砂)、液体油苗和气体油苗(泥火山)。这3类油气苗的时空分布规律明显,古生界(P)中主要以沥青脉、沥青砂岩为主,如南缘东段大龙口剖面芦草沟组页岩裂缝充填的沥青脉(图2a);中生界

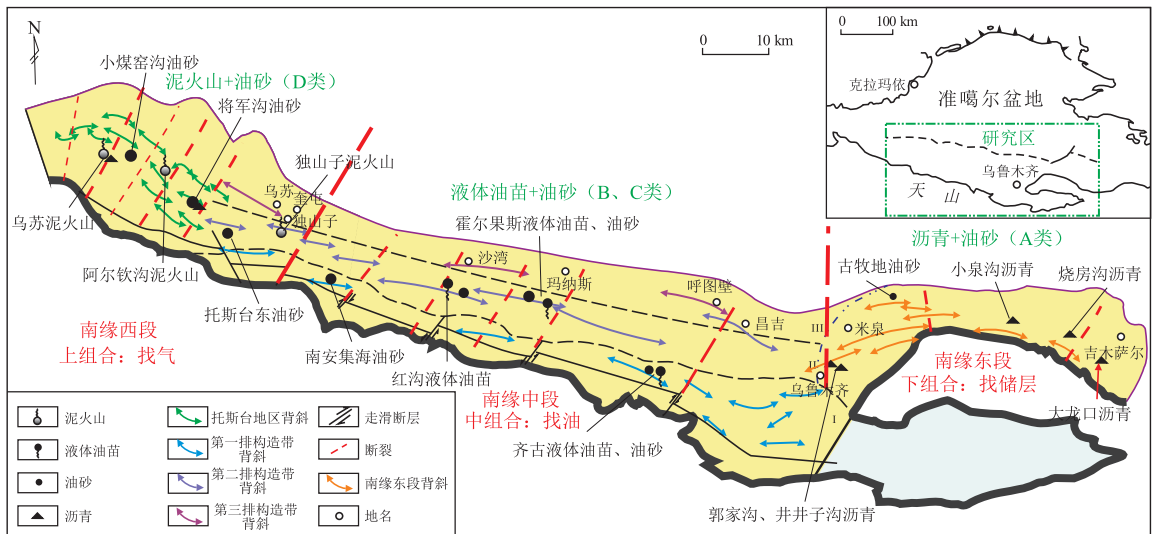


图1 准噶尔盆地南缘构造及油气苗分布

Fig.1 Schematic diagram of structure and oil and gas seep distribution in southern Junggar Basin

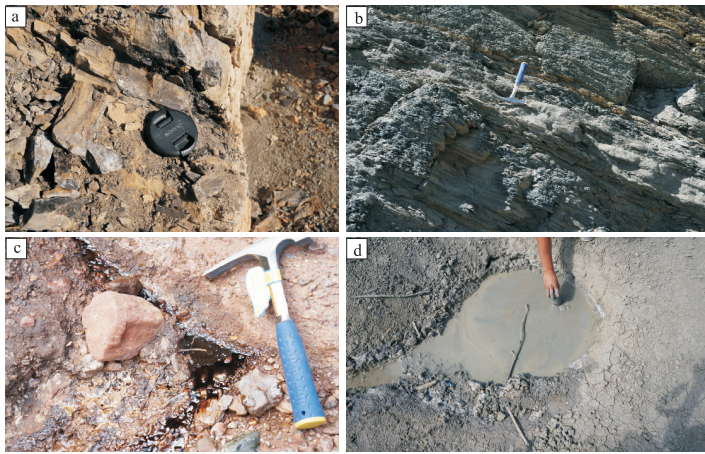


图 2 准噶尔盆地南缘油气苗野外照片

Fig.2 Field photos of oil and gas seeps in southern Junggar Basin

(T-K),以油砂为主(图 2b),其次含有少量的液体油苗,典型如红沟北剖面液体油苗(图 2c);而新生代(E-N)以含油砂岩为主,并以液体油苗和泥火山为特色,典型如独山子泥火山(图 2d)。

2 油气苗地球化学特征与来源成因

在以上油气苗年代、空间和相态分布特征明晰的基础上,通过地球化学特征的分析可以进一步解析其来源、成因,并进一步揭示其形成模式,进而为下步勘探提供有利指导。

2.1 族组分

盆地南缘油气苗族组分主体以饱和烃和芳烃为主(图 3a),饱和烃/芳烃比值整体大于 5,典型如乌苏泥火山、霍尔果斯油苗和齐古油苗,其最高饱/芳约 11,表明油质较轻。然而,也有一些样品的非烃+沥青质含量较高,最高可达 30%。油气苗族组分构成差异暗示其来源或成因可能不同,需要进一步结合下文的其他地球化学数据进行讨论。

2.2 同位素

南缘油气苗同位素组成差异明显,且与油气苗

分布的区域有关(图 3b)。其中南缘西段泥火山和油砂同位素组成偏重,多重于 -28.61‰ ,典型如阿尔钦沟泥火山;而南缘中段和东段油苗同位素整体偏轻,多轻于 -29‰ ,典型如大龙口剖面芦苇沟组沥青脉。

2.3 生物标志化合物

结合南缘地区烃源岩发育背景,并通过典型生物标志化合物的分析,结合油气苗同位素组成特征发现南缘地区油气苗主体可分为 4 大类,其主体油源分别对应于二叠系、侏罗系、白垩系和古近系烃源岩(表 1)。

2.3.1 A 类油苗

这类油苗主要分布于南缘东段的阜康构造带,典型剖面为大龙口沥青(图 4)。该类油苗沥青质含量高($>20\%$),同时碳同位素轻($<-30\text{‰}$),结合盆地烃源岩与原油的同位素组成特征,其生烃母质可能是 II₁-I 型干酪根^[19]。大龙口沥青样品 Pr/Ph 小于 1.2,同时检出有指示盐度的 β -胡萝卜烷和伽马蜡烷,表明其形成于还原的咸化环境。同时, C₂₇, C₂₈, C₂₉ 规则甾烷呈“上升型”分布。前人

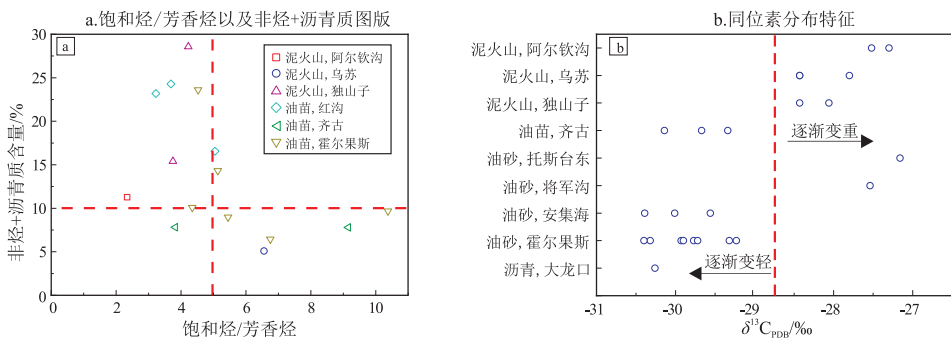


图 3 准噶尔盆地南缘油气苗基础地球化学特征

Fig.3 Geochemistry of oil and gas seeps in southern Junggar Basin

表 1 准噶尔盆地南缘油气苗分类及典型地球化学特征

Table 1 Classification and typical geochemical parameters of oil and gas seeps in southern Junggar Basin

分类	油源	地区	典型剖面	油气苗类型	典型地球化学特征
A	P	东段	大龙口	沥青	碳同位素小于 $-30‰$; Pr/Ph=0.8~1.2; β -胡萝卜素: 低; C_{27} - C_{28} - C_{29} 规则甾烷呈“上升型”
B	J (+P/E)	中/西段	齐古	液体油苗	碳同位素大于 $-29‰$; Pr/Ph=1.5~3.0; β -胡萝卜素/伽马蜡烷: 极低; C_{27} - C_{28} - C_{29} 规则甾烷呈“上升型”
C	K	中段	霍尔果斯	油砂	碳同位素小于 $-29‰$; Pr/Ph<0.8; β -胡萝卜素/伽马蜡烷: 高; C_{27} - C_{28} - C_{29} 规则甾烷呈“V”型
D	E (+J)	西段	独山子	泥火山	碳同位素大于 $-28.5‰$; Pr/Ph=0.8~1.5; β -胡萝卜素/伽马蜡烷: 低; C_{27} - C_{28} - C_{29} 规则甾烷呈“V”型

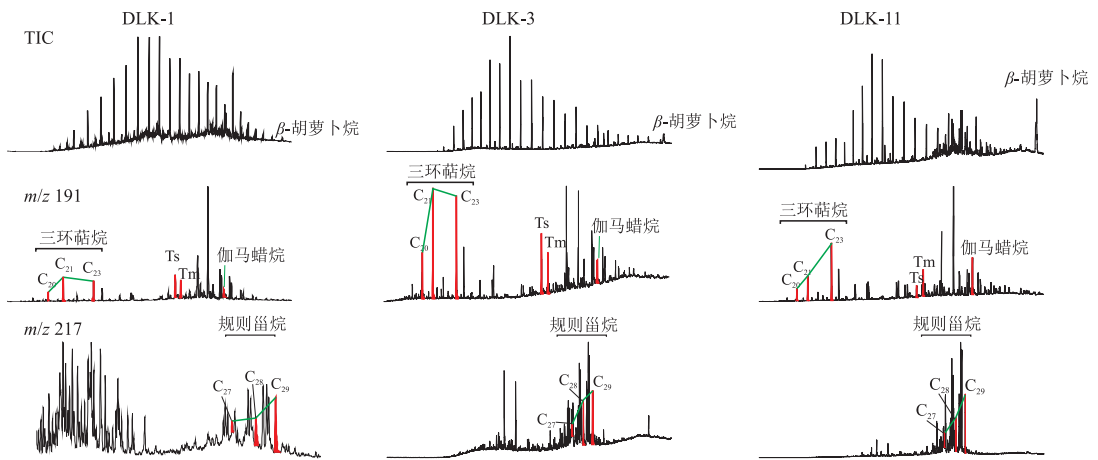


图 4 准噶尔盆地南缘东段 A 类油苗(大龙口沥青)典型生物标志化合物谱图

Fig.4 Typical biomarker spectra of type A oil seeps (Dalongkou bitumen) in east section of southern Junggar Basin

认为,二叠系来源的原油碳同位素小于 $-29‰$,含有丰富的 β -胡萝卜素,三环萜烷以 C_{21} 或 C_{23} 为最高,甾烷以 C_{28} , C_{29} 规则甾烷为主^[19-22]。由前所述,可以判定其油源为二叠系烃源岩^[19,22]。

2.3.2 B 类油苗

这类油苗主要分布于南缘中段的齐古液态油苗剖面和西段的阿尔钦沟泥火山、将军沟油砂、小煤窑沟油砂和托斯台东油砂剖面(图 5)。该类油苗饱和烃含量高($>60\%$),Pr/Ph 大于 2.0,指示盐度的 β -胡萝卜素和伽马蜡烷极低,表明其形成于弱还原—弱氧化的淡水环境。同时规则甾烷中以 C_{29} 丰度最高,以陆源有机质输入为主。前人研究表明,侏罗系来源烃类碳同位素通常为 $-28‰$ ~ $-26‰$,Pr/Ph 比值通常大于 2.5,伽马蜡烷含量很

低,甾烷以 C_{29} 规则甾烷为主^[19,22]。结合研究区烃源岩有机相地球化学特征,可发现其主要来源于侏罗系烃源岩^[19,22]。综合以上,可发现其烃类受到了强烈的生物降解作用,油苗的降解程度高于油砂;且Ts/Tm 比值整体较高,为成熟油(图 5)。然而,这类油苗可能并不是单一的侏罗系来源。比如,齐古液体油苗碳同位素轻于 $-29‰$,表现出 II_2 型干酪根特征,部分样品的伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷介于 0.1~0.2,同时规则甾烷呈“上升型”分布。考虑到齐古剖面二叠系烃源岩发育,其可能受到二叠系烃源岩的影响。南缘西段还有部分剖面的同位素组成偏重($>-28‰$),与侏罗系烃源岩特征一致,但伽马蜡烷表现出微咸水特征,因此推测其可能还受到古近系油源的影响^[19,22]。

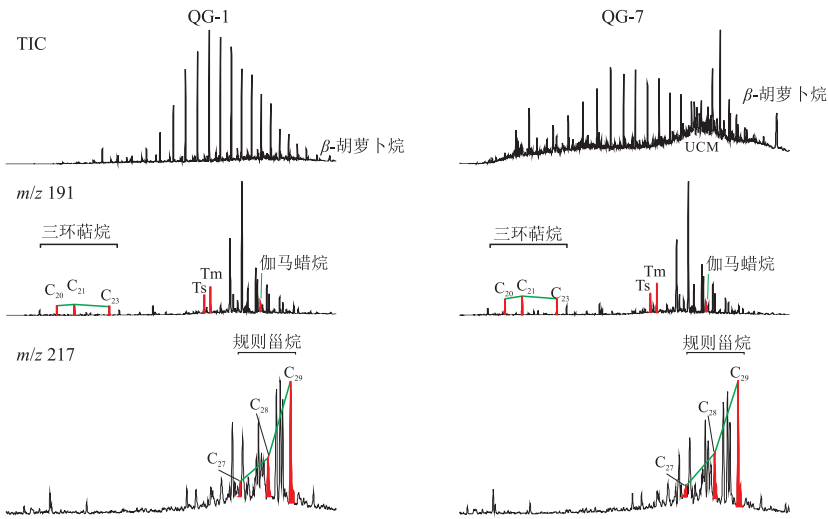


图 5 准噶尔盆地南缘中段 B 类油苗(齐古液体油苗)典型生物标志化合物谱图

Fig.5 Typical biomarker spectra of type B oil seeps (Qigu oil seep) in middle section of southern Junggar Basin

2.3.3 C 类油苗

这类油苗主要分布于南缘中段的南安集海油砂、霍尔果斯油砂、紫泥泉子油砂和红沟油苗剖面(图 6)。其碳同位素小于 -29‰ ,为 II 型干酪根特征,Pr/Ph <0.8 ,且检出丰富的 β -胡萝卜素和伽马蜡烷,表明其咸化的湖相的沉积环境。同时规则甾烷呈“V”型分布,这也区别于研究区的其他烃源岩。前人研究表明,白垩系来源的烃类碳同位素通常小于 -29‰ ,Pr/Ph 比值通常小于 1.0,伽马蜡烷含量高,规则甾烷呈“V”型分布。结合研究区烃源岩发育特征,表明其来源于咸水湖相的白垩系烃源岩^[7, 18-19, 21]。综上可知,这类油气苗都受到了中等—强烈的生物降解作用,其中背斜核部的降解作用最强,北翼和南翼基本相当,强度从核部向两翼

逐渐减弱,同时已为成熟油。

2.3.4 D 类油苗

该类油气苗主要分布于南缘西段与中段的交汇,典型如独山子泥火山和乌苏泥火山(图 7)。其碳同位素偏重,Pr/Ph 为 0.8~1.5, β -胡萝卜素和伽马蜡烷含量低,表明形成于弱还原—弱氧化环境,同时规则甾烷呈“V”型分布。前人研究表明,古近系来源的烃类碳同位素通常在 $-28\text{‰} \sim -26\text{‰}$,Pr/Ph 大于 1,伽马蜡烷含量中等较低,规则甾烷呈“V”型分布^[18-19, 22],判定其油源来源于古近系。然而,乌苏泥火山的原油碳同位素重于 -27.5‰ ,指示了天然气主要来源于侏罗系^[7, 14]。结合图 7,发现泥火山周围油砂及原油降解程度强于泥火山喷出物,且都已达到成熟。

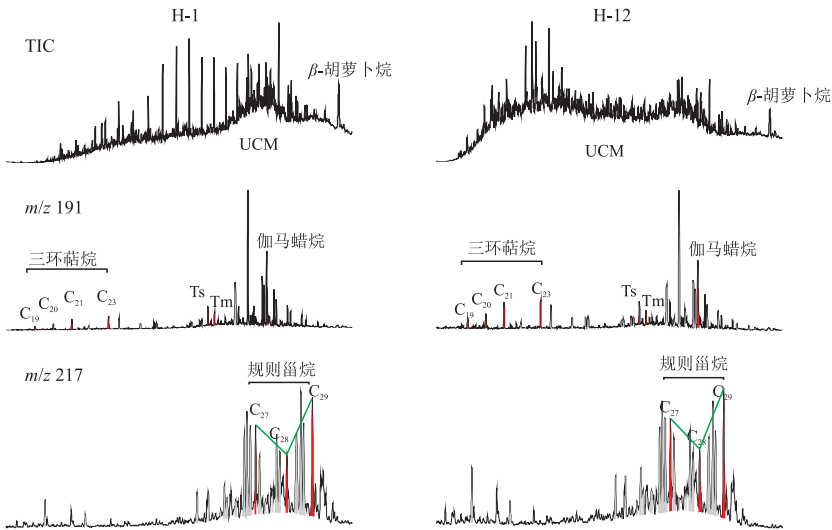


图 6 准噶尔盆地南缘中段 C 油苗(霍尔果斯油砂)典型生物标志化合物谱图

Fig.6 Typical biomarker spectra of type C oil seeps (Horgos oil sands) in middle section of southern Junggar Basin

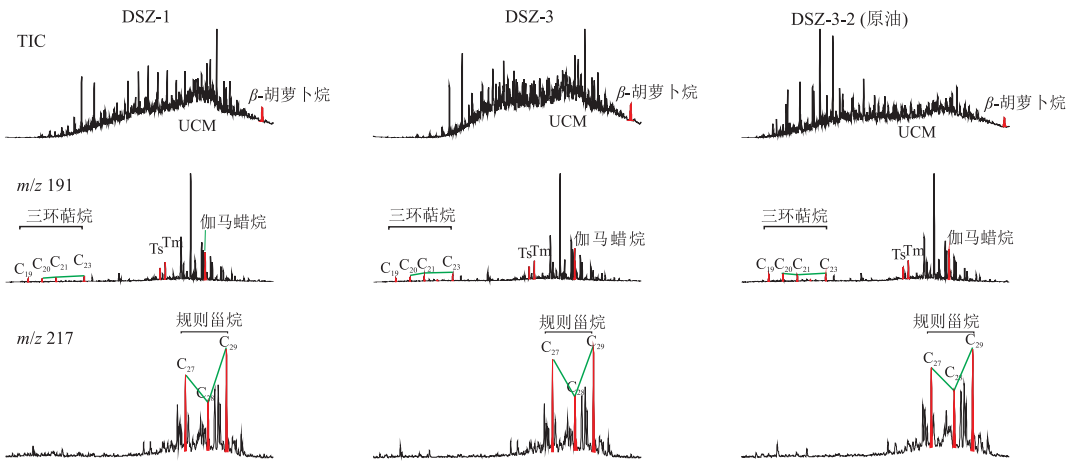


图 7 准噶尔盆地南缘西段 D 类油气苗(独山子泥火山)典型生物标志化合物谱图

Fig.7 Typical biomarker spectra of type D oil and gas seeps (Dushanzi mud volcano) in west section of southern Junggar Basin

3 油气苗形成模式

基于上述油气苗地球化学特征与油源分析,结合 4 类油气苗的构造地质特征,进一步讨论了其成因模式。

A 类油苗以沥青为主,典型的特征为“源控”,即近源出露,烃源岩的发育与分布是直接控制因素(图 8a)。以南缘东段大龙口剖面为例,其与烃源岩共同产出,即油苗产出地层二叠系芦草沟组同时也是油苗的油源。油气苗出露位置断裂不发育,沥青主要沿储层裂缝发育。这类油苗可能是烃源岩生成的原油沿其自身裂缝运移并在适合位置聚集成藏,表现为“自生自储”或“近源成藏”特征。

B 类油苗相比于 A 类同为“近源”,但断裂控藏特征更加显著。首先,B 类主要产于侏罗系,同时其主要油源也是侏罗系,但两者不是同一套地层,油气苗富集层一般是中—上侏罗统,而油源主

要是下侏罗统烃源岩,故而是“近源但不同层”。因而,断裂起着重要的沟通作用,其形成模式表现为“源+断”双控特征(图 8b)。

C 类油苗相比于 A、B 类油苗其典型特征是“断控”特征更加显著(图 8c)。这类油苗的油源为白垩系烃源岩,而产出层主要为古近系和新近系,典型的“源储分离”,断裂在油苗的形成中起着至关重要的桥梁作用。如图 8c 所示,以南缘中段的霍尔果斯油苗剖面为例,可发现烃类组分来自于白垩系烃源岩且已经处于排烃阶段,且延断裂向浅层调整。而古近系都有泥岩发育,为很好的盖层,因此推测可能存在通天断层,白垩系原油直接运移至古近系储层中,甚至直接运移至地表。

D 类油苗以泥火山为特色,典型如乌苏和独山子泥火山,其形成重点得满足 3 个基本条件:烃—水—岩物源充足,通道畅通,外力诱导(图 8d)。首先,烃源岩发育是关键,乌苏—独山子泥火山原油

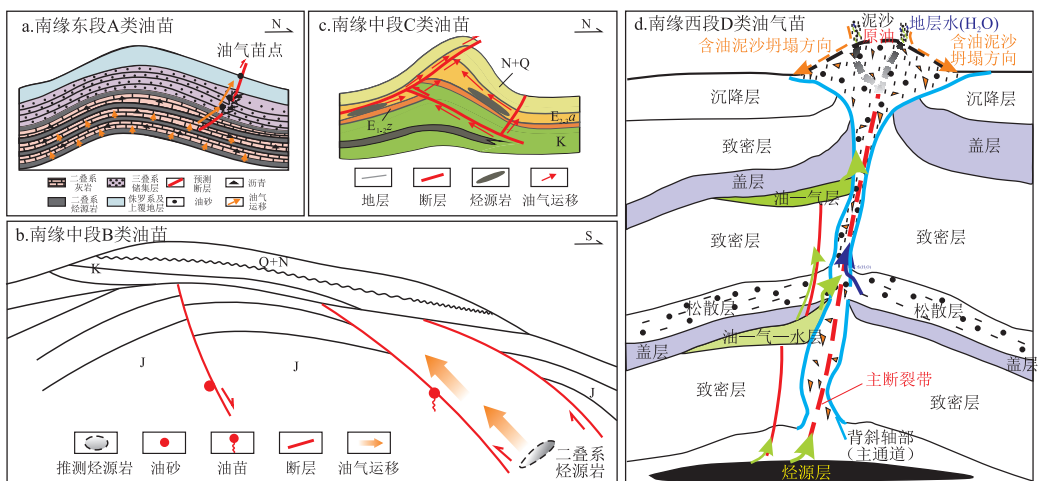


图 8 准噶尔盆地南缘 4 类油气苗成因模式

Fig.8 Genetic models of four types of oil and gas seeps in southern Junggar Basin

主要来源于古近系烃源岩,而天然气主要来源于侏罗系烃源岩,多源混合形成了复杂油气系统;同时由于新生代沉积物质松散,有利于提供岩屑物源。其次,泥火山发育于背斜构造核部与断裂交汇处,张性应力环境为烃—水—岩系统提供了必要的通道。最后,新生代喜马拉雅造山远程应力使得北天山持续挤压隆升,为泥火山的形成提供了诱导外力条件。

4 勘探意义

4.1 油气苗与油气系统

淮南油气苗除了与主要含油气系统具有良好的对应关系外,还与主要的构造系统和流体系统关系密切。从构造上看,“断裂+背斜”是南缘的构造组合特征,也是控制南缘油气苗分布的主要因素。构造对油气苗的控制主要体现在:首先构造沟通油源,控制着油气苗的来源;其次构造控制含油气流体的活动,是含油气流体的运移通道;最后构造是油气苗出露的空间载体。具体而言,南缘西段主要出露B和D类油气苗,并以泥火山为特征,出露于中、新生界,油源为侏罗系、古近系及两者混源。从油气勘探的角度看,主要对应于南缘上组合油气系统。南缘中段主要出露C类油苗,以液体油苗为特色,出露层位为中—新生界,油源以白垩系为主,对应于南缘地区的中组合含油气系统。相比而言,南缘东段油气苗点少而老,以沥青为特征,油源为二叠系芦草沟组,对应于南缘地区的下组合含油气系统。

4.2 油气勘探前景预测

综合南缘地区油气苗特征及其所揭示的油气系统成藏特征,本次研究提出了南缘地区下一步油气勘探的总体预测方案,简而言之“西段找气、中段找油、东段找有利储层”(图1)。

首先,南缘西段地区勘探的目的层为中上组合,主要为三叠系及其以上地层,勘探的目标主要是侏罗系天然气,其次为古近系液态石油,同时需要进一步对南缘西段与中段交汇区域白垩系油源贡献重新评估。

其次,南缘中段的勘探应聚焦中组合目的层,中—新生界有利储层为主要目标储层,勘探目标为白垩系液态原油,兼顾对古近系、侏罗系和二叠系油源的重新评估,以进一步明确南缘中段地区的资源潜力。同时,南缘中段在构造上具有“南北分带”特征,其中油苗直接指示的是第一、二排构造上的油气资源特征,第一排构造如齐古剖面主要为

侏罗系油源,但在邻近乌鲁木齐地区也受二叠系油源的影响,构造上受南北向断裂控制;第二排构造油源主要为白垩系烃源岩,且在邻近乌苏—独山子地区油气最为富集,故而勘探目标应放在中段的中—西部地区;第三排构造邻近生烃凹陷区,油气苗出露少,难以用油气苗理论对其进行资源评估。

最后,南缘东段勘探的目的层应该是下组合,古—中生界有利储层为主要目标储层;勘探的目标主要为液态原油,兼顾沥青,主要锁定二叠系芦草沟组油源,兼顾对侏罗系原油的勘探。由于南缘东段的主控因素为“源控”,故而对其烃源岩的研究尤为重要。

5 结论

(1)准噶尔盆地南缘油气苗面广、类多,包括气态的泥火山、液态的原油、固态的油砂及沥青等,可进一步分为4类:A类油源为二叠系烃源岩;B类油源主要为侏罗系烃源岩;C类来自白垩系烃源岩;而D类油源主要为古近系烃源岩。

(2)南缘地区油气苗形成模式表现为典型的“源—断”双控,烃源岩分布是核心,而断裂的输导是关键,4类油气苗分别对应4种成因模式:A类“源储一体”,裂缝控藏;B类“断裂输导、近源成藏”;C类“源储分离、断裂沟通”和D类“断+背斜核部、外力诱导”。

(3)南缘油气苗系统与研究区主要含油气系统具有很好的匹配关系,是地下油气藏的地表线索,具有重要的勘探指示意义,“西段上组合找气、中段中组合找油、东段下组合找有利储层”。

参考文献:

- [1] MILKOV A V. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates[J]. *Marine Geology*, 2000, 167(1/2): 29-42.
- [2] KÖRBER J H, SAHLING H, PAPE T, et al. Natural oil seepage at Kobuleti Ridge, eastern Black Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 50: 68-82.
- [3] 刘志泉. 原油物性分析对油气勘探的指导意义[J]. *新疆石油地质*, 1990, 11(3): 253-257.
LIU Zhiqun. Directing significance of crude oil property analysis to oil and gas exploration[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 1990, 11(3): 253-257.
- [4] POUDEUX H, CODERRE A B, PEDERSEN P K, et al. Characterization, architecture and controls of Cold Lake marginal-marine oil sands: the Grand Rapids Formation (Upper Mannville) of east-central Alberta, Canada[J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 2016, 64(2): 119-146.

- [5] ZHENG Guodong, XU Wang, ETIOPE G, et al. Hydrocarbon seeps in petroliferous basins in China; a first inventory [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 151: 269–284.
- [6] 张景坤, 周基贤, 王海静, 等. 准噶尔盆地西北缘超剥带轻质油的发现及意义[J]. *地质通报*, 2017, 36(4): 493–502.
ZHANG Jingkun, ZHOU Jixian, WANG Haijing, et al. The discovery of light oil in the overlap-erosion zones of the northwestern Junggar Basin and its significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(4): 493–502.
- [7] ZHANG Jingkun, CAO Jian, WANG Yan, et al. Geochemistry and genesis of oil and gas seeps in the Junggar Basin, NW China; implications for hybrid petroleum systems [J]. *Geofluids*, 2019, 2019: 9732674.
- [8] ZHANG Jingkun, CAO Jian, WANG Yan, et al. Origin of giant vein-type bitumen deposits in the northwestern Junggar Basin, NW China; Implications for fault-controlled hydrocarbon accumulation [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 179: 287–299.
- [9] WANG Yan, CAO Jian, JIN Jun, et al. Diverse oil and gas seeps in the southern Junggar Basin, NW China (piedmont Northern Tian Shan); origins and links to tectono-sedimentary evolution [J]. *Geological Journal*, 2020, 55(1): 3497–3521.
- [10] 何钊. 准噶尔盆地南缘西部油苗 [J]. *新疆石油地质*, 1989, 10(1): 87–89.
HE Zhao. Oil seeps in the western of southern Junggar Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 1989, 10(1): 87–89.
- [11] 吴键. 艾比湖—安集海地区构造地质特征及其对油气勘探的意义 [J]. *新疆石油地质*, 1988, 9(3): 15–22.
WU Jian. Tectonic geological characteristics of the Aibi Lake-Anjihai area and its significance to oil and gas exploration [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 1988, 9(3): 15–22.
- [12] WAN Zhifeng, WANG Xianqing, LU Ye, et al. Geochemical characteristics of mud volcano fluids in the southern margin of the Junggar Basin, NW China; implications for fluid origin and mud volcano formation mechanisms [J]. *International Geology Review*, 2017, 59(13): 1723–1735.
- [13] NAKADA R, TAKAHASHI Y, TSUNOGAI U, et al. A geochemical study on mud volcanoes in the Junggar Basin, China [J]. *Applied Geochemistry*, 2011, 26(7): 1065–1076.
- [14] 戴金星, 吴小奇, 倪云燕, 等. 准噶尔盆地南缘泥火山天然气的地球化学特征 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42(2): 178–190.
DAI Jinxing, WU Xiaochi, NI Yunyan, et al. Geochemical characteristics of natural gas from mud volcanoes in the southern Junggar Basin [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2012, 55(3): 355–367.
- [15] 黄华谷, 李牛, 王钦贤, 等. 新疆独山子泥火山沉积物及孔隙水的地球化学特征与流体来源 [J]. *大地构造与成矿学*, 2015, 39(2): 325–333.
HUANG Huagu, LI Niu, WANG Qinxian, et al. Geochemical features and origins of pore fluids and sediments of the mud volcanoes in southern margin of the Junggar Basin, Xinjiang, Northwestern China [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2015, 39(2): 325–333.
- [16] 陈书平, 漆家福, 于福生, 等. 准噶尔盆地南缘构造变形特征及其主控因素 [J]. *地质学报*, 2007, 81(2): 151–157.
CHEN Shuping, QI Jiafu, YU Fusheng, et al. Deformation characteristics in the southern margin of the Junggar Basin and their controlling factors [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(2): 151–157.
- [17] 郭召杰, 吴朝东, 张志诚, 等. 准噶尔盆地南缘构造控藏作用及大型油气藏勘探方向浅析 [J]. *高校地质学报*, 2011, 17(2): 185–195.
GUO Zhaojie, WU Chaodong, ZHANG Zhicheng, et al. Tectonic control on hydrocarbon accumulation and prospect for large oil-gas field exploration in the southern Junggar Basin [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2011, 17(2): 185–195.
- [18] WANG Yan, CAO Jian, LI Xueyi, et al. Cretaceous and Paleogene saline lacustrine source rocks discovered in the southern Junggar Basin, NW China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 185: 104019.
- [19] 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 Jianping, WANG Xulong, DENG Chunping, 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.
- [20] 邵雨, 陈伟, 张伯友. 断层相关褶皱理论在准噶尔盆地南缘山前带构造研究的应用 [J]. *地球科学与环境学报*, 2005, 27(1): 26–29.
SHAO Yu, CHEN Wei, ZHANG Boyou. Application of the geometry of fault-related folding to the southern Junggar basin [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2005, 27(1): 26–29.
- [21] 李二庭, 陈俊, 迪丽达尔·肉孜, 等. 准噶尔盆地腹部地区原油金刚烷化合物特征及应用 [J]. *石油实验地质*, 2019, 41(4): 569–576.
LI Erting, CHEN Jun, ROUZI Dilidaer, et al. Characteristics of diamondoids in crude oil and its application in hinterland of Junggar Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(4): 569–576.
- [22] 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: 原油地球化学特征与分类 [J]. *石油学报*, 2015, 36(11): 1315–1331.
CHEN Jianping, WANG Xulong, DENG Chunping, et al. Geochemical features and classification of crude oil in the southern margin of Junggar Basin, Northwestern China [J]. *Acta Petroli Sinica*, 2015, 36(11): 1315–1331.