

准噶尔盆地车排子凸起东部走滑断裂对石炭系火山岩油气成藏的控制作用

吴孔友¹, 李云龙¹, 汪勇², 杜彦男^{3,4}

[1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 2. 中国石化胜利油田勘探管理中心, 山东 东营 257022; 3. 中国石化石油物探技术研究院有限公司, 江苏 南京 211103; 4. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023]

摘要:走滑断裂控藏作用研究已成为近年来的前沿和热点,但目前主要集中于碎屑岩和碳酸盐岩区,针对火山岩的相关研究较少。本研究综合野外露头踏勘、岩心观察、地震资料解释与测井数据分析,系统探讨了准噶尔盆地车排子凸起东部石炭系火山岩区走滑断裂的发育特征、组合样式及结构特征,进而建立了该区走滑断裂控制下的火山岩区油气成藏模式。研究结果显示,石炭系火山岩区主要发育逆冲断裂和走滑断裂,其中走滑断裂包括近NS向、NNW向、NE向和近WE向4个方向。平面上,断裂组合可分为网格状和斜交式2种类型:网格状组合有利于油气成藏,斜交式组合则更利于油气输导。结合露头、岩心观察与测井资料与样品测试结果,将走滑断裂带内部结构分为滑动破碎带和诱导裂缝带:滑动破碎带物性较差,具有较强的封堵性;诱导裂缝带物性较好,为油气运移提供了有效通道。基于典型井区油气藏解剖,将石炭系火山岩油气藏划分为风化壳型油气藏、裂缝型内幕油气藏和背斜型内幕油气藏3类,并进一步明确了有利勘探区带。

关键词:走滑断裂;控藏作用;火山岩;石炭系;车排子凸起;准噶尔盆地

中图分类号:TE122.3 **文献标识码:**A

Controlling effects of strike-slip faults on hydrocarbon accumulation within the Carboniferous volcanic rocks in the eastern Chepaizi Uplift, western Junggar Basin

WU Kongyou¹, LI Yunlong¹, WANG Yong², DU Yannan^{3,4}

[1. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China; 2. Oil and Gas Exploration Management Center, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257022, China; 3. Geophysical Research Institute Co., Ltd., SINOPEC, Nanjing, Jiangsu 211103, China; 4. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China]

Abstract: Investigating the controlling effects of strike-slip faults on hydrocarbon accumulation has emerged as the cutting edge and a hot topic of research in recent years. However, existing studies mostly focus on clastic and carbonate areas, while those on volcanic rocks remain limited. In this study, by integrating outcrop exploration, core observations, seismic interpretation, and log interpretation, we systematically explore the developmental characteristics, combination styles, and architectural features of strike-slip faults in the Carboniferous volcanic area of the eastern Chepaizi Uplift, western Junggar Basin. Accordingly, we determine the hydrocarbon accumulation patterns under the control of strike-slip faults in the volcanic area of the Chepaizi Uplift. The results indicate that the Carboniferous volcanic area primarily contains thrust faults and strike-slip faults, with the latter striking nearly SN, NNW, NE, and nearly EW. In the planar view, the strike-slip faults show reticulate and oblique combination styles. Among these, the reticulate fault combinations facilitate hydrocarbon accumulation, while the oblique fault combinations create more favorable conditions for hydrocarbon transport. In combination with outcrop and core observations, logs, and sample test results, two types of fault-zone architecture, i. e., sliding fractured zones and induced fracture zones, are identified in the strike-slip fault zones. The sliding fractured zones are characterized by poor physical properties and thereby exhibit high sealing capacity. In contrast, the induced fracture zones show favorable physical properties, providing effective pathways for hydrocarbon migration. Analysis of hydrocarbon reservoirs in

收稿日期:2025-09-05;修回日期:2025-11-25。

第一作者简介:吴孔友(1971—),男,教授、博士研究生导师,构造地质学与油气成藏研究。E-mail: wukongyou@163.com。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(42272155)。

representative well blocks indicates that the Carboniferous volcanic rocks contain three types of hydrocarbon reservoirs: weathering-crust hydrocarbon reservoirs, fractured interior hydrocarbon reservoirs, and anticlinal interior hydrocarbon reservoirs. Accordingly, play fairways for hydrocarbon exploration are further identified.

Key words: strike-slip fault, control of hydrocarbon accumulation, volcanic rock, Carboniferous, Chepaizi Uplift, Junggar Basin

引用格式:吴孔友,李云龙,汪勇,等. 准噶尔盆地车排子凸起东部走滑断裂对石炭系火山岩油气成藏的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2026, 47 (4): 1146–1159. DOI: 10. 11743/ogg20260406.

WU Kongyou, LI Yunlong, WANG Yong, et al. Controlling effects of strike-slip faults on hydrocarbon accumulation within the Carboniferous volcanic rocks in the eastern Chepaizi Uplift, western Junggar Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47 (4): 1146–1159. DOI: 10. 11743/ogg20260406.

近年来,走滑断裂因其与油气成藏的密切关系,成为石油天然气地质学的研究热点之一。走滑断裂的活动能够改善岩石的连通性和渗透性^[1],并通过控制储层发育和油气运移通道,控制古老岩层中的油气成藏^[2],表现出“控储、控藏、控富”的重要作用^[3–4]。然而,由于走滑断裂形成应力机制的复杂性^[5],导致其构造样式多样、结构特征多变^[6],沿断裂倾向或走向不同位置,油气富集程度与分布规律往往差异显著^[7]。目前,走滑断裂控藏作用的研究主要集中于碎屑岩和碳酸盐岩发育区,针对火山岩区的相关研究仍较为有限。

车排子凸起是准噶尔盆地西部隆起带的重要构造单元,其基底石炭系发育巨厚的火山岩层。该凸起北临达尔布特断裂带,东以红车断裂带与沙湾凹陷为界,西以艾卡断裂带与四棵树凹陷相邻,整体呈三角形展布^[8],油气主要来源于东北部的沙湾凹陷和西南部的四棵树凹陷^[9–11]。近年勘探表明,石炭系火山岩油气显示良好,打破了以往“准噶尔盆地基底石炭系火山岩不具备油气成藏条件”的认识^[12],显示出该区火山岩油气勘探前景广阔。前期的油气成藏研究主要集中在近油源的红车断裂带火山岩发育区,针对远离油源区域的探讨相对较少。本研究在分析石炭系火山岩走滑断裂平面组合样式与内部结构的基础上,以远离油源、位于车排子凸起东北部高部位的区域为主要目标,系统分析其成藏条件,总结远源区石炭系火山岩的成藏特征,明确输导体系,分析成藏期次,构建成藏模式,该研究对进一步挖掘车排子凸起石炭系的油气勘探潜力具有重要的指导意义。

1 区域地质背景

准噶尔盆地位于中国新疆北部,是新疆“三山两盆”空间格局的重要组成部分,也是中亚造山带东南部重要的俯冲拼贴区^[13–15]。车排子凸起位于准噶尔盆地西北缘,三面受走滑断裂(北部为达尔布特走滑断裂、

东部为红车走滑断裂、西部为艾卡走滑断裂)围限,呈三角形展布(图1a),是一个经历多期构造运动的长期继承性古隆起^[16]。受周缘造山带隆升影响,该凸起自西北向东南俯冲,形成一系列大型低角度逆冲断层;同时在达尔布特断裂印支–燕山运动期走滑活动作用下,石炭系中发育了大量NWW向走滑断裂^[17–19]。地层自凹陷向凸起剥蚀程度加剧,二叠系和三叠系在凸起高部位遭受强烈剥蚀,侏罗系仅局部低部位残留零星薄层^[20],大部分区域缺失,白垩系及新生界则直接超覆沉积于巨厚的石炭系火山岩之上^[21]。

石炭系在车排子凸起全区广泛分布,厚度巨大,其沉积环境经历了海相到陆相–浅海相的演变,自下到上依次发育太勒古拉组、包古图组和希贝库拉斯组^[22–23](图1b)。太勒古拉组为一套海洋沉积,岩性以玄武岩、硅质岩和凝灰岩为主,含少量凝灰质砂岩和粉砂岩。包古图组属于陆相–浅海相沉积,主要岩性为凝灰岩、凝灰质砂岩、凝灰质砾岩和泥岩,局部夹少量石灰岩和砂质泥岩。希贝库拉斯组整体为一套陆相–浅海相火山岩系,岩性以凝灰岩、玄武岩、安山岩、玄武质安山岩和凝灰质砂岩为主,含少量凝灰质角砾岩和硅质岩^[24–25]。

车排子凸起作为长期继承性发育的古隆起,历经多期构造运动。在印支期–燕山期,该区经历强烈构造抬升,形成大量逆冲断裂及高角度走滑断裂。长期隆升的构造背景使其成为油气运移的有利指向区。其东侧相邻的沙湾凹陷发育多套烃源岩,具多期成藏特征,与凸起内多种圈闭形成良好的匹配关系^[26]。

2 石炭系岩性特征与含油气差异

2.1 车排子凸起东部石炭系岩性特征

车排子凸起石炭系岩性以火山岩为主,主要包括火山角砾岩、凝灰岩、玄武岩、安山岩和玄武安山岩等。

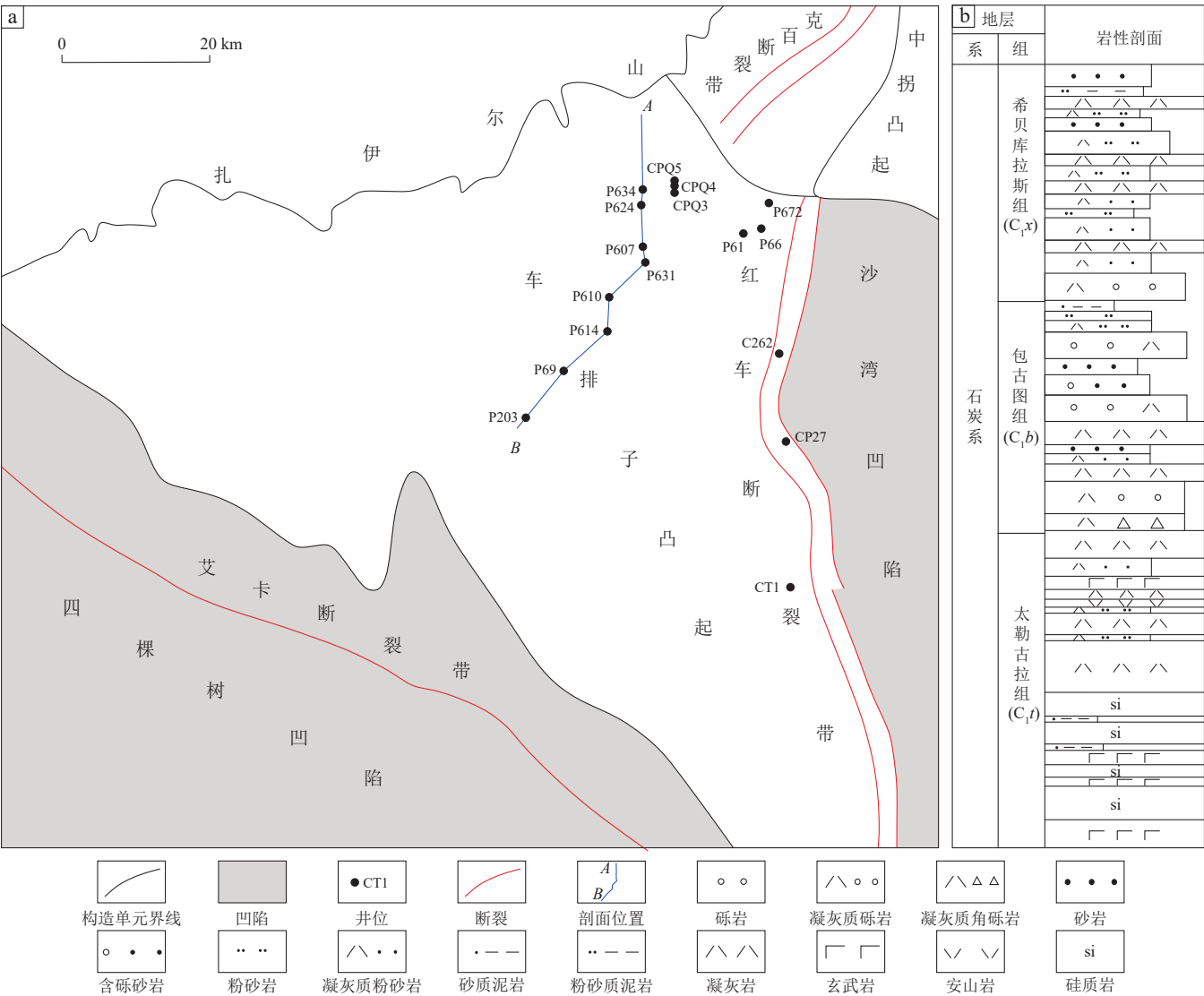


图1 准噶尔盆地车排子凸起地质背景

Fig. 1 Geological setting of the Chepaizi Uplift, western Jungar Basin

a. 车排子凸起构造单元划分; b. 石炭系岩性柱状图

其中,玄武岩结构致密,常见气孔和杏仁状构造,多发育于溢流相板状熔岩流亚相;安山岩为中性岩石,结构致密,常呈斑状结构;凝灰岩由细粒火山灰构成,经压实固结成岩后仍保持致密特征;火山角砾岩则具典型的火山角砾结构,其粒径较大的碎屑含量占比高,胶结压实后形成粗颗粒岩体。

2.2 车排子凸起东部油气显示特征

对车排子凸起东部多口典型含油气井进行油气藏解剖,统计了其含油气层位及油气显示特征差异(表1)。

近年来,随着火山岩油气藏勘探的持续推进^[27-29],研究表明火山岩自身孔-渗条件较差,通常难以形成有效储层^[30]。然而,车排子凸起含油气井的岩性虽为

火山岩,其储集层特征表明其可能经历了走滑剪切活动或风化淋滤作用的改造,发育裂缝带与风化壳结构(表1),从而改善了火山岩储集性能,形成了有效储层。

车排子凸起东部的油气主要来源于沙湾凹陷^[31-32]。该区域大多数含油气井距离油源较远,直线距离超过10 km,部分井甚至达到了30 km以上,属于典型的远源含油气区。对于此类远源井区,能否成藏的关键在于是否存在有效的长距离运移通道。前人研究认为,侏罗系以上油气藏可通过侏罗系底部的“毯砂”进行长距离侧向运移^[33],然而,对于石炭系油气成藏,尤其是内幕圈闭,其运移通道尚不明确。本研究表明,走滑断裂带可作为油气长距离侧向运移的重要通道,是远源石炭系内幕油气成藏的关键控制因素。

表 1 准噶尔盆地车排子凸起东部石炭系典型井含油气情况统计(井位见图 1b)

Table 1 Statistics of hydrocarbon-bearing properties of the Carboniferous strata in representative wells within the eastern Chepaizi Uplift, western Junggar Basin (see Fig. 1b for well locations)

井号	含油气层位	储层类型	储层岩性
CT1	C ₁ b	风化壳、诱导裂缝带	凝灰质砂岩、凝灰质角砾岩、凝灰质泥岩
CP27	C ₁ x	风化壳、诱导裂缝带	玄武岩、安山岩
P66	C ₁ x	风化壳	凝灰岩
P61	C ₁ x	风化壳	玄武岩
P672	C ₁ x	风化壳	火山角砾岩
CPQ4	C ₁ x	风化壳、诱导裂缝带	凝灰岩、安山岩
CPQ5	C ₁ x	风化壳、诱导裂缝带	凝灰岩、安山岩

注:C₁b为包古图组;C₁x为希贝库拉斯组。

3 车排子凸起东部断裂发育特征

3.1 剖面发育特征

车排子凸起经历了多期构造运动叠加,其深部基底石炭系发育低角度逆断裂和高角度走滑断裂,而盖层新近系则主要发育小规模正断裂。依据地震资料的精细解释,石炭系发育的走滑断裂可分为两类:①晚期形成、贯穿侏罗系和白垩系并向下切入石炭系的走滑断裂;②石炭系内部形成、经晚期构造活动改造并向上断至中生界的走滑断裂。前者在石炭系风化壳以上具有清晰的地震响应特征,可通过地震同相轴形态直接识别;后者发育在火山岩内部,地震反射杂乱,需要借

助地震属性和沉积特征间接识别。

因走滑断裂走向主要为 NWW 向,本研究选取 NNE 向地震剖面进行精细解释。该剖面为一条连井剖面,由北至南依次穿过 P634, P624, P607, P631, P610, P614, P627, P69 和 P203 共 9 口井。根据同相轴间断、错位、空白、挠曲和分叉等地震反射特征,在该剖面上可识别出多条走滑断裂,断裂规模较大,自石炭系内部向上延伸至盖层,其中主干断裂断至石炭系顶面,分支断裂则延伸至中生界。高陡的主走滑断裂与倾斜的分支断裂在剖面上常构成典型的花状构造样式。此外,石炭系内幕可见多条断面波,解释为 NE 向逆冲断裂的断面响应(图 2)。

3.2 平面发育特征及组合关系

对断裂的平面解释工作基于地震属性分析展开。

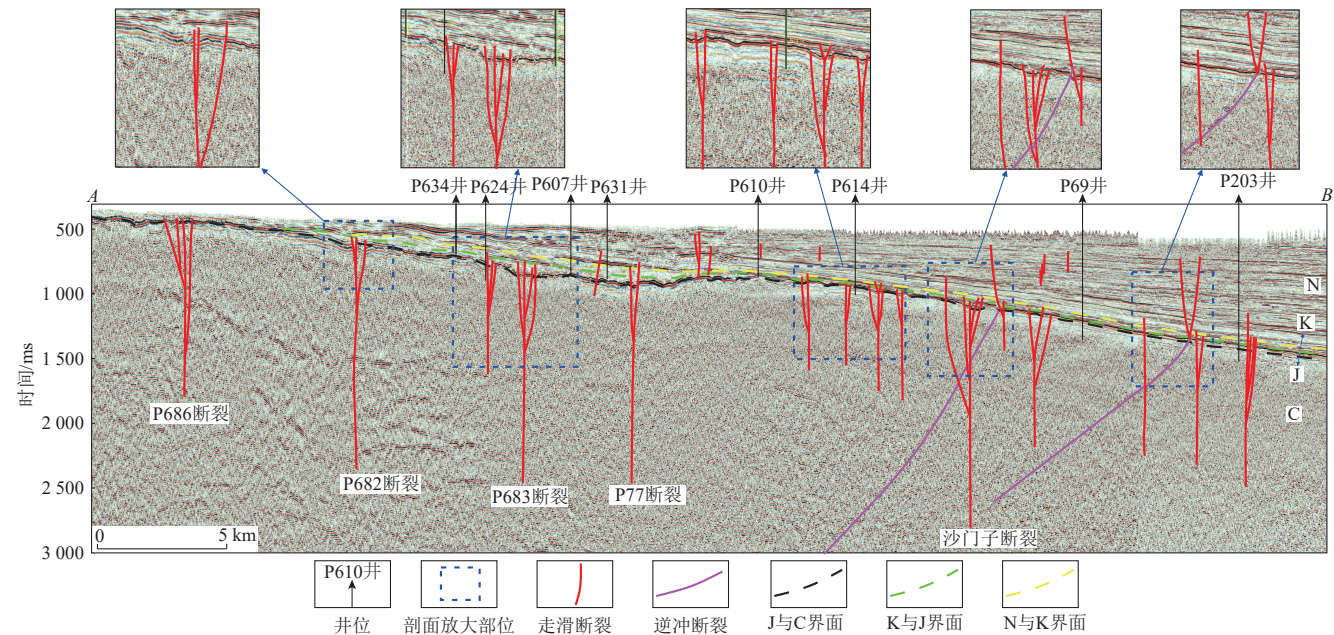


图 2 准噶尔盆地车排子凸起近 NS 向地震剖面构造特征(剖面位置见图 1b)

Fig. 2 Nearly SN-oriented well-correlation seismic section showing the structural characteristics of the Chepaizi Uplift, western Junggar Basin (see Fig. 1b for the section location)

鉴于车排子凸起东部走滑断裂均断至石炭系顶面的特征,对三维工区进行了最大正曲率、均方根振幅和倾角等地震属性分析,构建三维属性体,并将属性体投影至石炭系顶面形成层面属性图,进而完成走滑断裂的平面识别、解释和组合(图3)。

曲率属性主要用于表征地层的弯曲程度,可以间接反映断裂发育情况。研究区内走滑断裂在切穿石炭系顶面反射层及成层性较好的火山岩层时,其同相轴常呈现明显的曲率异常^[34],这一现象主要是压扭应力环境下地层变形所致,表现为正曲率特征。因此,通过

计算正曲率属性能较好地刻画出此类走滑断裂的平面展布特征。本次研究结合相轴特征,选取的参数为:垂直半径16,主测线方向半径(Inline)和联络测线方向半径(Xline)2。

均方根振幅是对振幅平方的平均值再开平方,对大幅度变化响应显著。该方法适用于地层岩性相变分析、薄砂层厚度计算、亮点和暗点识别、烃类指示和火成岩识别等。走滑断裂通常具有较大的水平断距,导致断裂两侧岩相差异显著,这一特征亦可用于走滑断裂识别。本次研究选取的时窗范围为9 ms。

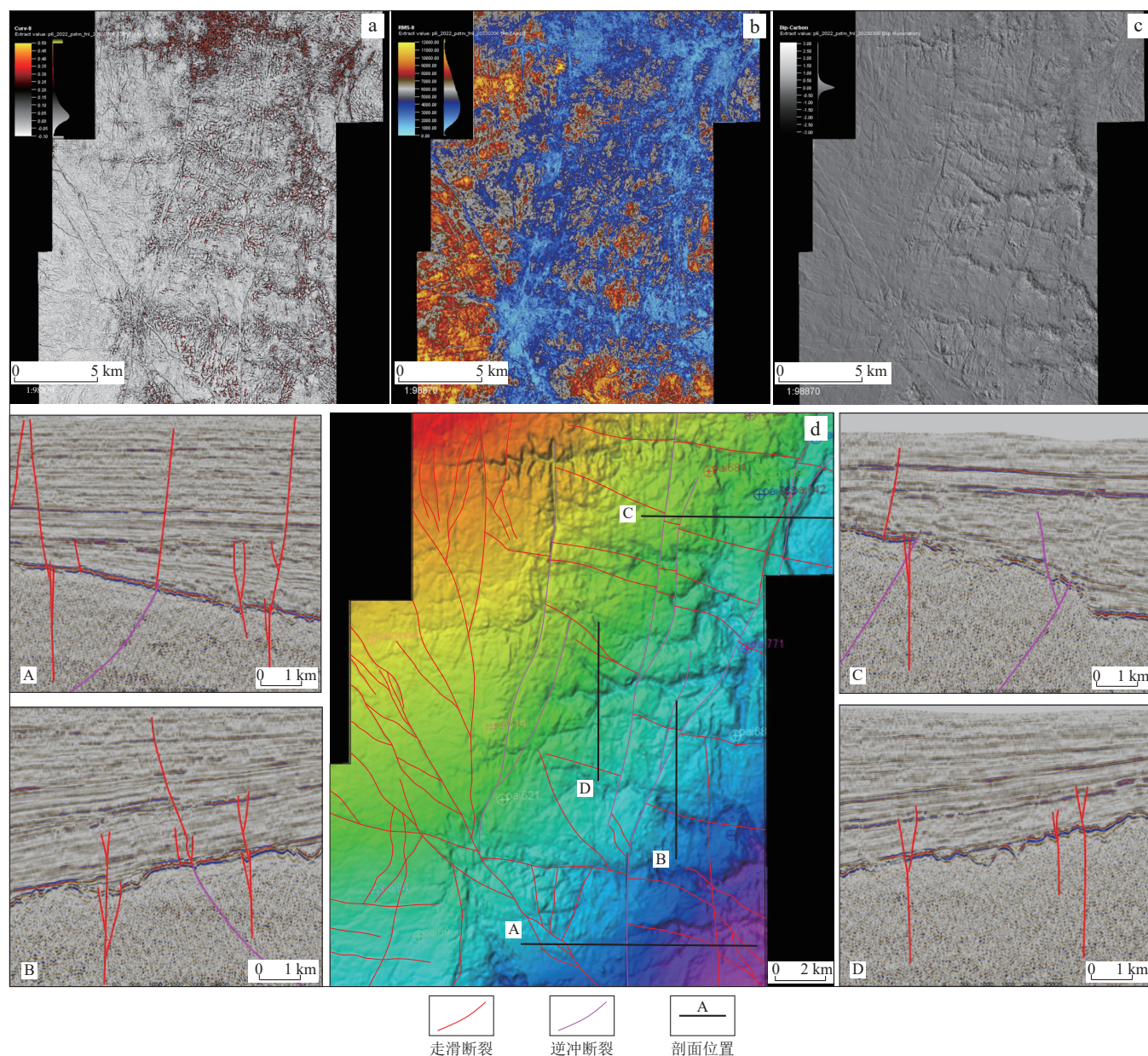


图3 准噶尔盆地车排子凸起石炭系顶面地震属性分析

Fig. 3 Seismic attributes of the top surface of the Carboniferous strata in the Chepaizi Uplift, western Junggar Basin
a. 最大正曲率属性平面分布; b. 均方根振幅属性平面分布; c. 倾角属性平面分布; d. 石炭系顶面构造与走滑断裂解释结果叠合图
(A, B, C和D分别表示4个对应位置切出的剖面。)

倾角属性能够有效凸显具有倾角特征的小断层及地层结构。由于走滑断裂垂向断距较小,通常难以完全断开同相轴。但石炭系顶面出现的同相轴倾斜与挠曲现象与走滑断裂活动有关,这类局部倾角变化可通过倾角属性识别。本次研究采用Dip Illumination属性进行分析,并开启方向控制开关,将倾角调节至 20° 。

走滑断裂的平面分布特征,综合运用层面属性图与剖面解释结果进行判定。在最大正曲率属性上,断裂表现为明显的曲率高值;在均方根振幅属性上,呈现与围岩差异显著的低振幅特征;在倾角属性上显示为正负异常值。综合解释结果(图3d)表明,研究区走滑断裂在地震属性界面上具有清晰的线性特征。

根据地震资料解释结果,车排子凸起东部石炭系主要发育走滑断裂和逆冲断裂。其中,走滑断裂可划分为近NS向、NNW向、NE向和近WE向4类走向,以NNW向和NE向走滑断裂为主体。这些走滑断裂的平面组合样式可分为网格状和斜交式两种类型。近NS向走滑断裂主要分布在红车断裂中部和车排子凸起南部,其中3级以上断裂与艾卡断裂的走滑活动相关,4级和5级断裂多为NNW向走滑派生的次级断裂。NNW向走滑断裂在车排子凸起东翼广泛分布,规模较大的断裂可延伸至沙湾凹陷,其形成与扎伊尔山碰撞推覆和早期右旋走滑作用相关。NE向走滑断裂主要分布于车排子凸起北部,自北向南断裂数量逐渐减少,该断裂早期为逆冲断裂,后期受构造活动改造而具有右旋走滑特征^[35-36]。近WE向断裂发育数量较少,主要为NE向走滑派生的次级断裂。网格状断裂组合分布于研究区北部,由NNW向走滑断裂与NE向断裂共同构成,形成密集的断裂网络。该组合样式构建了“立体输导-局部封闭”系统,油气沿走滑断裂立体输导,并在封闭性较好的逆冲断裂附近聚集成藏,有利于油气成藏。斜交式断裂组合则分布在沙门子断裂南部,由主走滑断裂及其分支断裂组合而成,通过主断裂与次级断裂的交叉形成立体输导网络,且由于断裂走向斜交,在油气运移中的遮挡作用较差,为油气的高效运移与输导提供了有利条件^[37-39](图4)。

4 走滑断裂结构特征与结构模式

4.1 走滑断裂结构特征

断裂带结构特征及其相关的成岩封闭作用是目前断裂带研究中的热点,其内部结构能否准确、合理地划

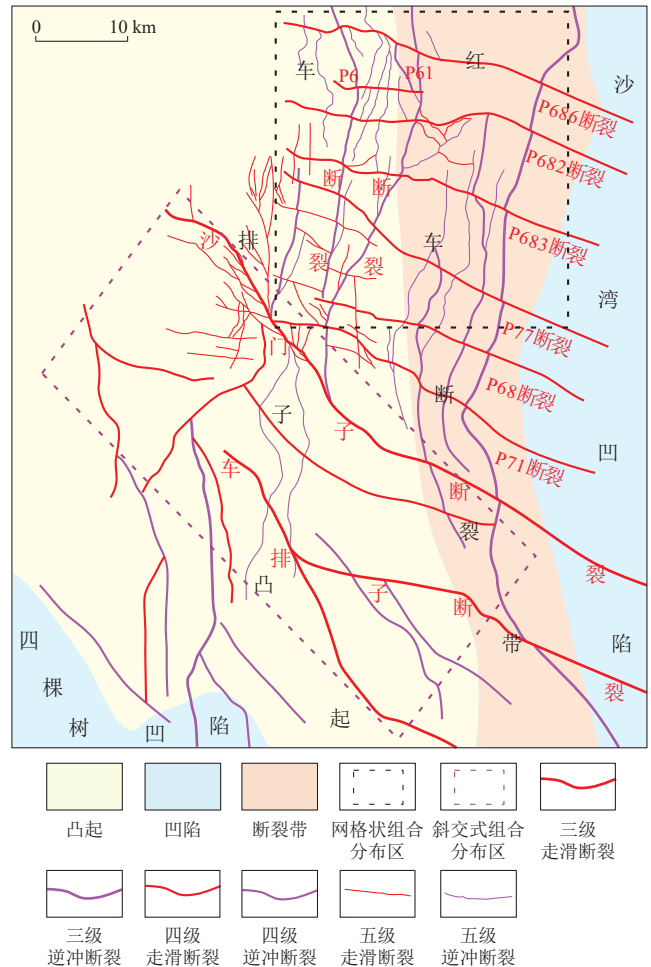


图4 准噶尔盆地车排子凸起东部断裂平面分布

Fig. 4 Map showing the distribution of faults in the eastern Chepaizi Uplift, western Junggar Basin

分,对深入研究油气运移路径及断层封闭性等油气勘探关键问题具有重要意义。本次研究选择构造背景相似的扎依尔山柳树沟露头区,作为直观分析走滑断裂带几何特征的参考对象。

通过野外调查发现,准噶尔盆地西北缘石炭系中走滑断裂广泛发育,断裂带内形成了包含滑动破碎带和诱导裂缝带在内的完整结构单元(图5)。断裂带内部结构具有以下两个显著特征:

1) 发育于石炭系的断层带十分破碎,滑动破碎带特征明显,断裂带规模较大且内部结构发育完整。诱导裂缝带常见后期脉体充填与胶结现象。断裂内部结构特征明显:滑动破碎带主要由经历强烈断裂作用的角砾岩、碎裂化岩石及断层泥组成,岩石出现一定程度的变质;诱导裂缝带则基本保留了原岩的特征,但裂缝发育,其中充填有多期方解石和石英脉体。断裂带整体宽度超过10.0 m,其中滑动破碎带宽度约为0.5 m,诱导裂缝带宽度可达数10.0 m。滑动破碎带受断裂

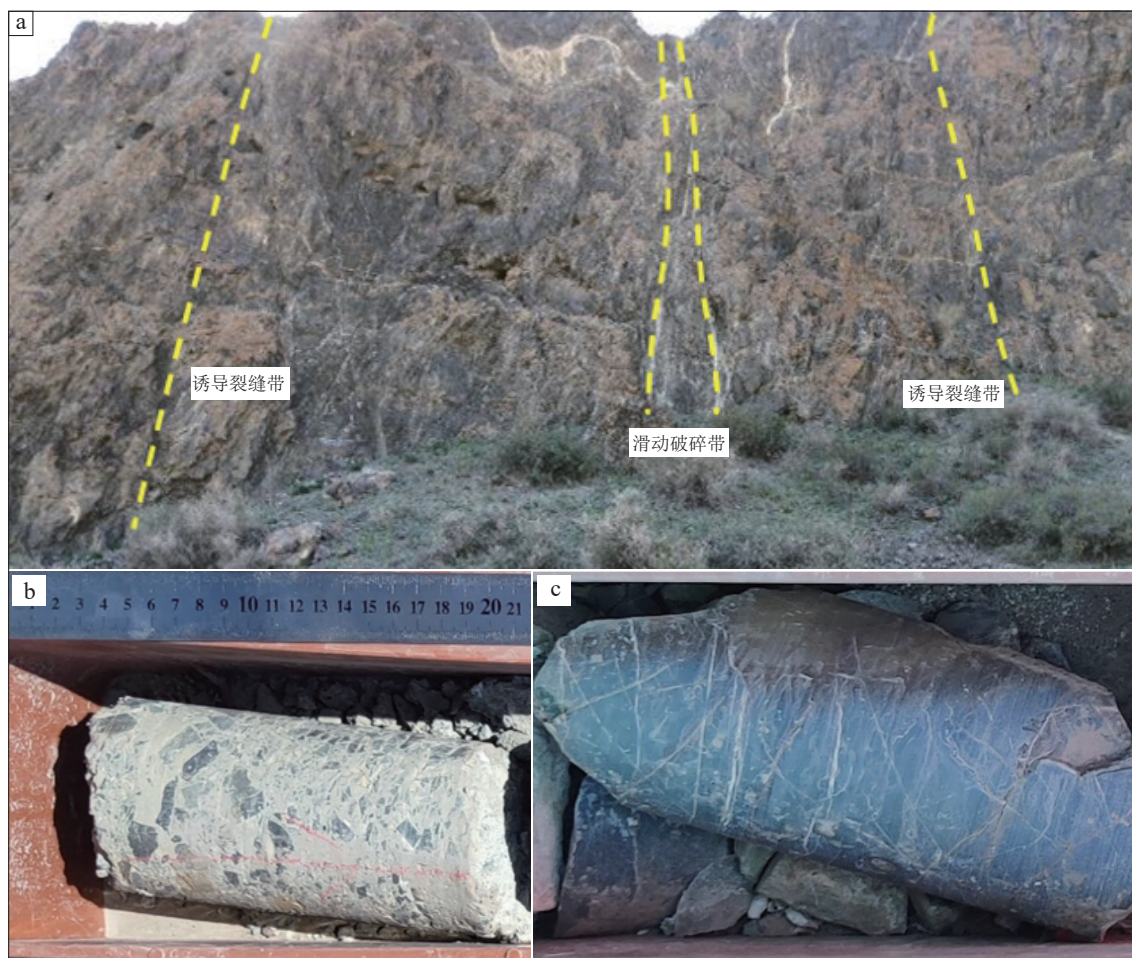


图5 准噶尔盆地车排子凸起柳树沟野外露头及典型井岩心照片

Fig. 5 Photos of the Liushugou outcrop and cores from representative wells in the Chepaizi Uplift, western Junggar Basin

a. 柳树沟典型走滑断裂,野外露头;b. CPQ5井,埋深278.6 m,滑动破碎带含断层角砾,岩心;c. CPQ5井,埋深347.6 m,诱导裂缝,岩心

动力作用影响岩石高度破碎,碎块间常有泥质充填;而诱导裂缝带内裂缝发育明显,岩石母岩特征保留完好,裂缝中多见胶结物充填。

2)出露地表的走滑断裂带受风化作用影响,常形成呈串珠状分布的溶蚀孔洞。孔洞长轴直径介于0.5~2.0 m,在两条共轭断裂的交汇处尤为发育。

通过对研究区钻遇走滑断裂且取心的典型井岩心进行观察,发现走滑断裂带内岩心破碎程度高,挤压研磨作用强烈,普遍发育镜面擦痕、断层角砾岩及断层泥,部分甚至发生变质作用,并在后期热液影响下出现蛇纹石化和绿泥石化等蚀变现象。而诱导裂缝带则基本保留原岩形态,仅发育不同方向的微裂缝,后期流体在裂缝中产生成岩胶结充填。

4.2 走滑断裂结构识别与结构模式

本研究在前人定性研究断裂带内部特征的基础上,采用测井曲线识别裂缝的方法,筛选并计算出裂缝

敏感性参数。通过多参数融合,对断裂带结构综合判别参数进行拟合,实现了断裂带内部结构的量化划分,从而充分提取了测井曲线所反映的地质信息^[40]。

选取研究区内钻遇走滑断裂带的典型井CPQ4井进行计算分析(图6),从测井曲线响应来看,诱导裂缝带表现为高声波时差、深-浅侧向电阻率异常、高孔隙度和高综合判别参数值(FZI)等特征;而在滑动破碎带发育段,则显示为低声波时差值、深-浅侧向电阻率异常、低孔隙度和低综合判别参数值等测井响应特征。

CPQ4井钻遇两处完整的断裂带结构,分别位于深度约340~390 m和460~510 m井段。其中,浅部断裂带宽度为49.0 m,可识别出两处滑动破碎带,宽度分别为5.8 m和2.6 m,诱导裂缝带宽度分别为20.7, 6.9和13.0 m;深部断裂带宽度为44.3 m,滑动破碎带宽度为9.4 m,两侧诱导裂缝带宽度分别为20.2 m和14.7 m。

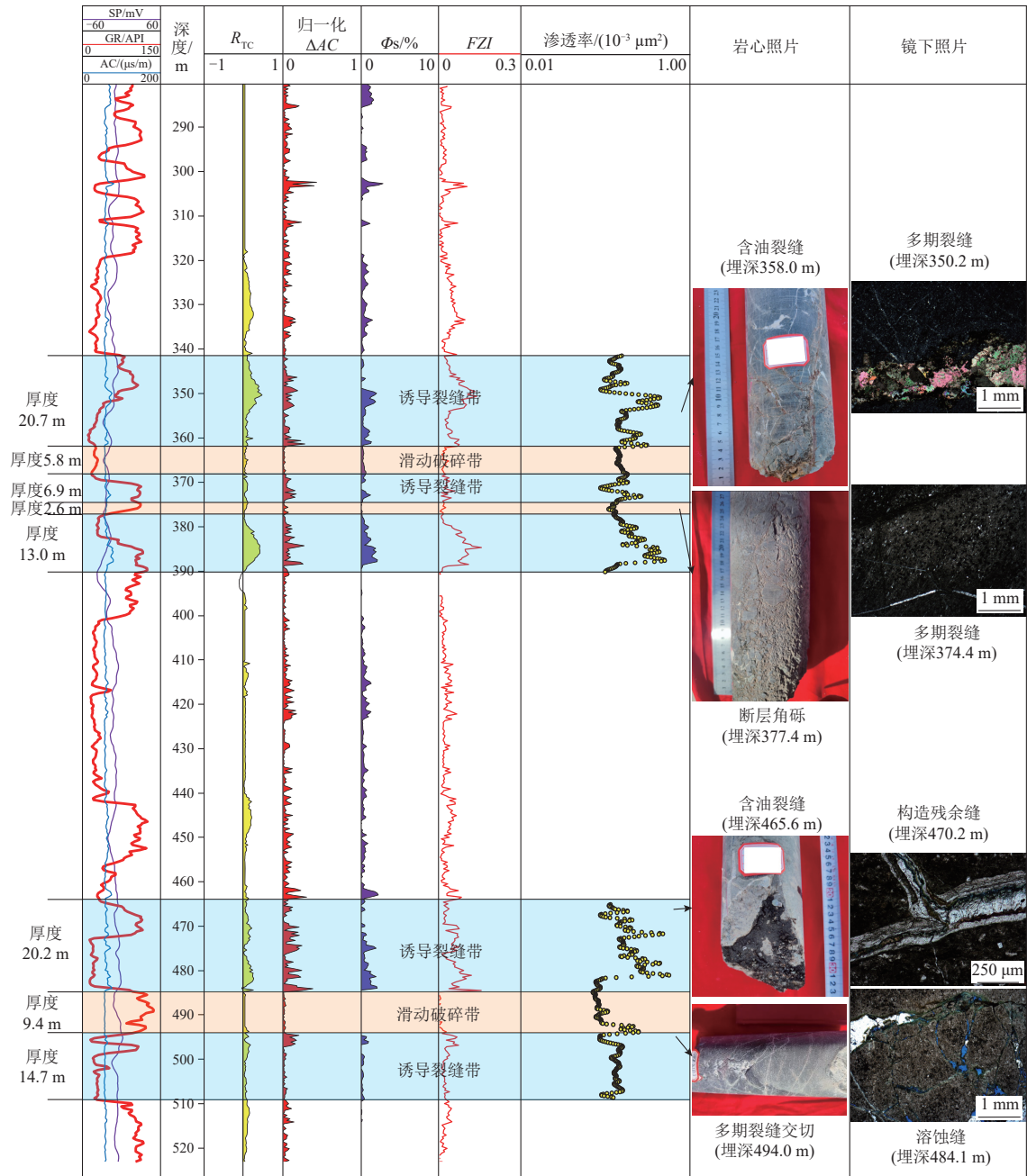


图6 准噶尔盆地车排子凸起CPQ4井断裂带结构测井识别与物性分析柱状图(井位见图1b)

Fig. 6 Log-based identification and physical property analysis of the fault-zone architecture in well CPQ4, Chepaizi Uplift, western Junggar Basin (see Fig. 1b for the well location)

(R_{TC} 为深、浅侧向电阻率差比值; ΔAC 为声波时差; Φ_s 为岩石总孔隙度; FZI 为综合判别参数。)

通过对典型井油气显示位置与铸体薄片和岩心照片的对比分析,发现CPQ4井的油气显示层段主要分布在石炭系顶面风化壳附近,而石炭系内幕走滑断裂发育在450~500 m深度范围内。含油气显示的层段与有效裂缝发育部位具有显著相关性。此外,距CPQ4井仅50 m的CPQ3井并未发现任何油气显示。推测其原因在于,该井距离CPQ4井所钻遇的走滑断裂较远,储层未受断裂改造,也未能接受沿走滑断裂运移的油

气充注,因而未能成藏。由此可见,走滑断裂产生的有效次生裂缝,是车排子凸起石炭系内幕火山岩油气藏的重要储集空间。

进一步对滑动破碎带与诱导裂缝带的岩石物性进行分析发现,滑动破碎带渗透率较低且波动幅度较小,呈稳定的低值特征;而诱导裂缝带渗透率较高且波动幅度也较大,具有非均值特征。这表明诱导裂缝带物性相对较好,具有输导能力;滑动破碎带的物性较差,

封堵性更强。基于此,建立了研究区走滑断裂结构的发育模式(图7)。

5 走滑断裂控藏模式与有利区带预测

5.1 典型井油气藏解剖

通过对研究区石炭系已发现油气藏的系统解剖,揭示出受走滑断裂控制的石炭系油气藏主要分为3类:石炭系顶面的不整合风化壳型油气藏,以及位于石炭系内部的裂缝型内幕油气藏和背斜型内幕油气藏(图8)。

风化壳型油气藏位于石炭系顶部不整合面附近,经长期风化淋滤作用改造,岩石物性得到改善,储集性能显著提升^[41]。油气可沿不整合面与断裂系统运移至圈闭内,再由风化黏土层或岩性变化等形成有效封堵。研究区井位距离油源普遍较远,仅依靠不整合面输导难以使油气充分运移至风化壳内成藏,因此需要走滑断裂提供有效的侧向运移通道,典型代表井如P66井(图8a)。

裂缝型内幕油气藏主要发育于火山岩内部,受走滑断裂错动改造形成的裂缝改善了原本致密的火山岩物性,使其成为有效储层。油气主要沿走滑断裂运移至圈闭内成藏^[42],典型代表井如CPQ4井和CPQ5井

(图8b)。该类油气藏分布于被后期走滑断裂错动的逆冲断裂附近,CPQ4井与CPQ5井油层呈现明显的分段特征:上部靠近石炭系顶面为风化壳油气藏,下部在走滑断裂错动的早期逆冲断裂位置亦见油层。分析认为,逆冲断裂原诱导裂缝带经走滑断裂二次改造后,形成的次生孔隙物性更好,更易成为良好储层并形成油气藏。

背斜型内幕油气藏发育于石炭系内部,埋藏相对较深。该油气藏的储层岩性以火山角砾岩和安山岩等基础物性相对较好的岩石为主^[43],在区域应力作用下形成背斜构造时,背斜转折端因弯曲作用产生张裂缝^[44],后期走滑断裂活动进一步叠加剪裂缝,从而改善了储层物性。在成藏过程中,油气沿走滑断裂带运移至背斜圈闭储层内聚集成藏,典型代表井如C262井(图8c)。

5.2 石炭系油气成藏模式

综合石炭系油气藏的解剖分析,各类火山岩经风化淋滤作用或断裂诱导裂缝改造后,均可形成有效储层并成藏。研究显示油气藏分布与断裂系统具有显著关联,尤其受走滑断裂的控制作用明显,主要表现在油气运移通道形成与储层物性改善两个方面。在此基础上,建立了研究区石炭系火山岩油气的成藏模式(图9)。

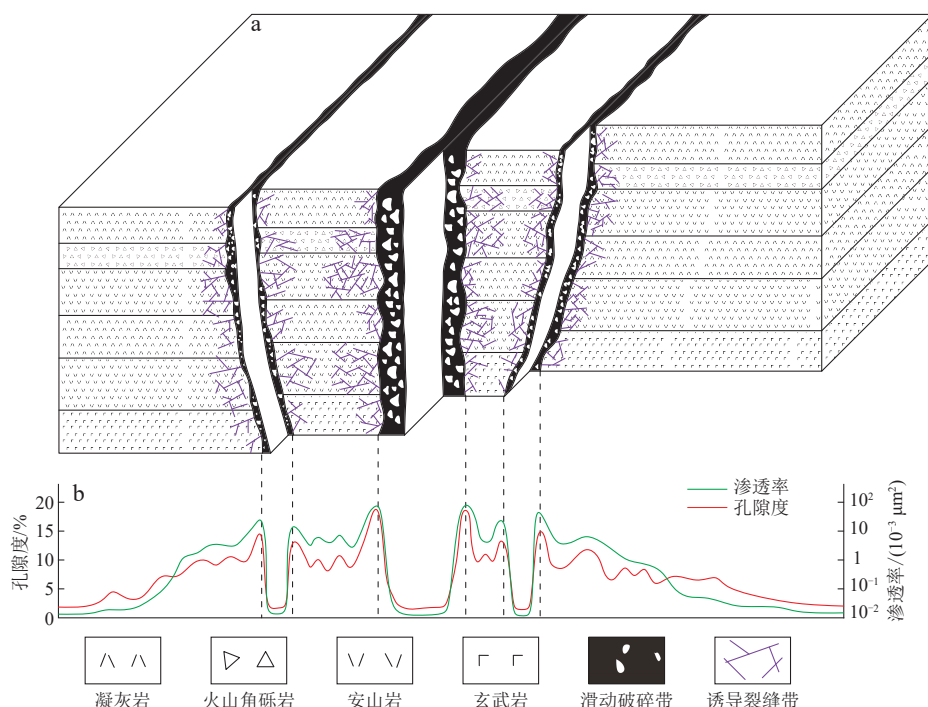


图7 准噶尔盆地车排子凸起走滑断裂结构立体示意图(a)与储层物性测井响应特征曲线(b)

Fig. 7 Strike-slip fault architecture (a) and log response characteristics of reservoirs (b) in the Chepaizi Uplift, western Junggar Basin

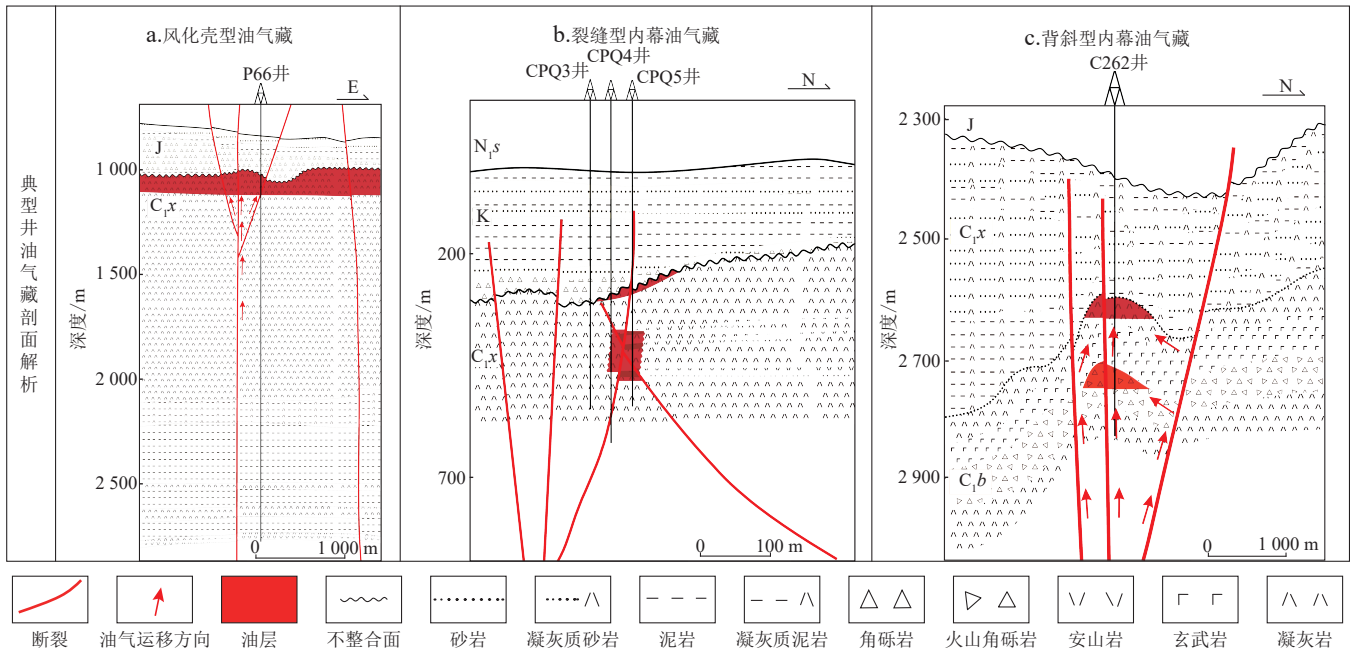


图8 准噶尔盆地车排子凸起典型井油气藏剖面解析(井位见图1b)

Fig. 8 Profiles of hydrocarbon reservoirs in representative wells in the Chepaizi Uplift, western Junggar Basin (see Fig. 1b for well locations)

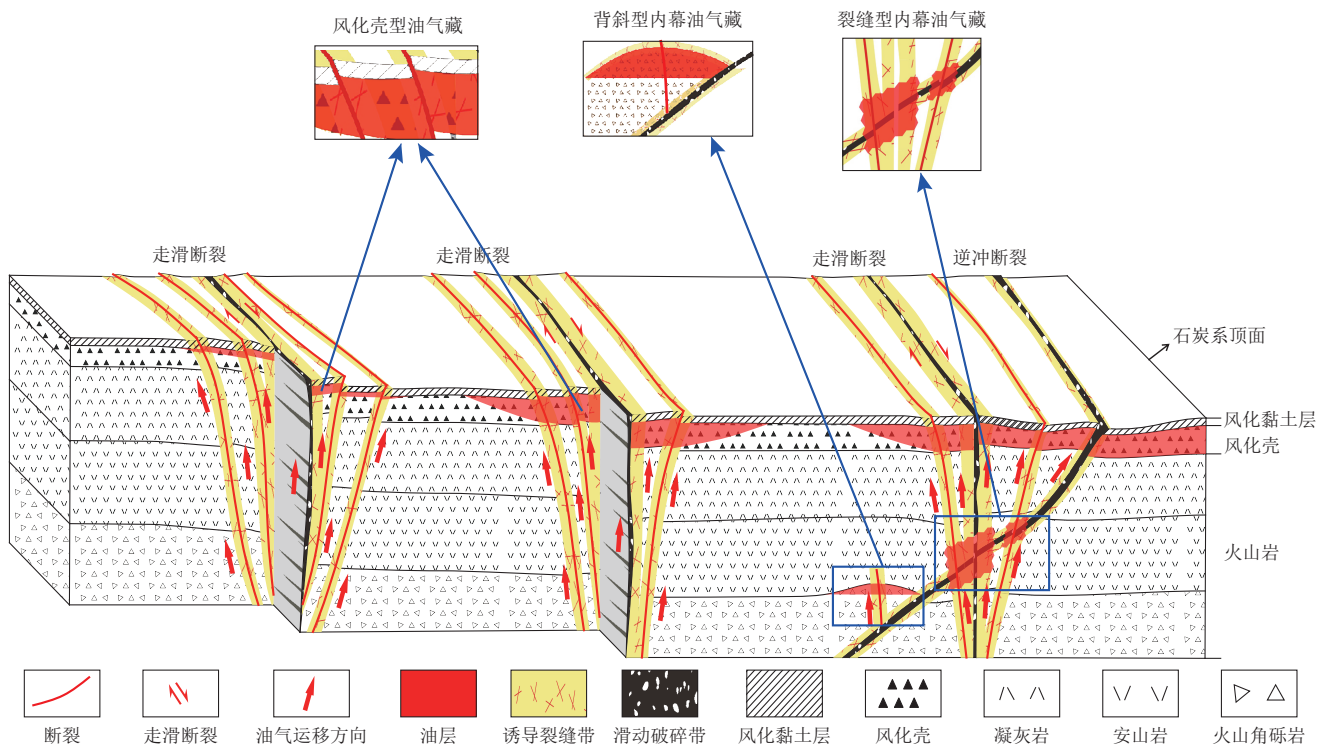
(N_{1s}为沙湾组;C_{1b}为包谷图组;C_{1x}为希贝库拉斯组。)

图9 准噶尔盆地车排子凸起东部石炭系油气成藏模式立体示意图

Fig. 9 Hydrocarbon accumulation patterns of the Carboniferous strata in the eastern Chepaizi Uplift, western Junggar Basin

针对风化壳型油气藏,近源井的油气可沿不整合面、逆冲断裂与走滑断裂等进入石炭系顶部风化壳,并受风化黏土层遮挡成藏;而在远源井区,走滑断裂

因其较强的侧向输导能力,成为该类油气藏的主要运移通道。对于裂缝型内幕油气藏,油气可沿逆冲断裂或走滑断裂等运移,进入经走滑断裂改造形成的有效

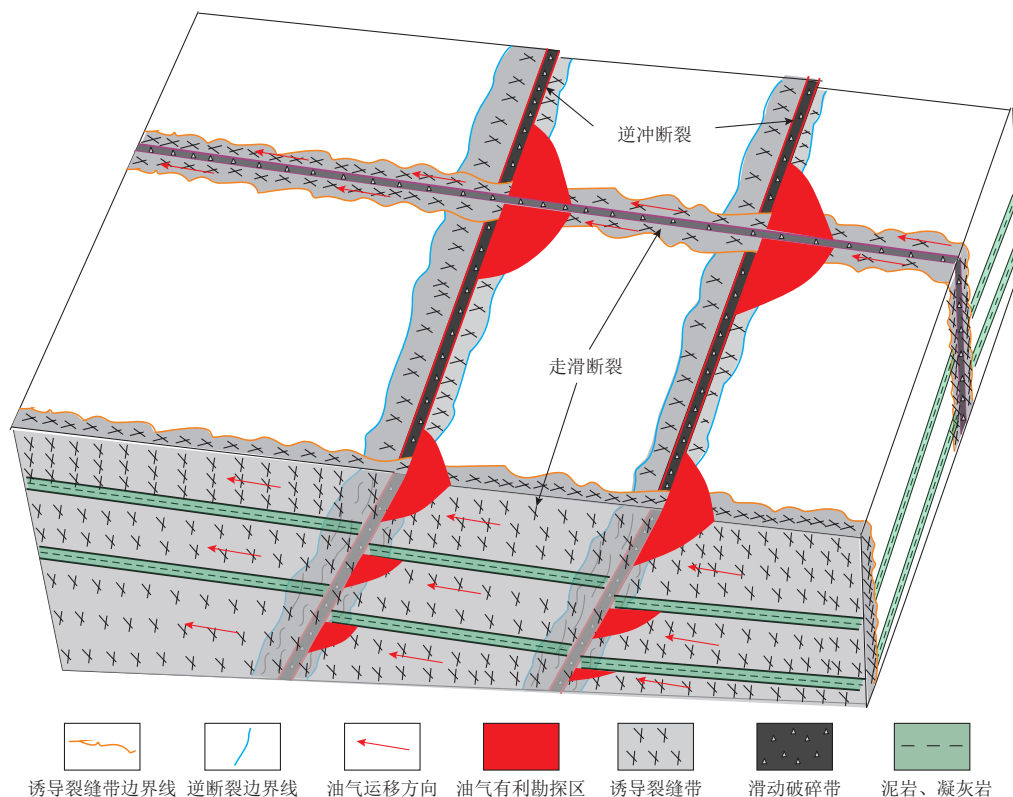


图10 准噶尔盆地车排子凸起东部石炭系油气有利勘探区预测立体示意图

Fig. 10 Predicted play fairways for hydrocarbon exploration in the Carboniferous strata within the eastern Chepaizi Uplift, western Junggar Basin

裂缝储层中聚集成藏。其中,早期逆冲断裂的诱导裂缝带受后期走滑断裂错动改造后,次生裂缝更为发育,更利于成藏。在背斜型内幕油气藏中,油气通过逆冲断裂与走滑断裂运移,背斜构造转折端形成的张裂缝与走滑断裂叠加的剪裂缝共同构成主要储集空间。

5.3 有利勘探区带预测

基于前文分析,研究区石炭系油气藏,尤其是距油源较远的油气藏主要通过走滑断裂带进行油气运移。研究区大量发育的NWW向走滑断裂可有效沟通沙湾凹陷的油源,其诱导裂缝带物性较好,具备油气输导能力。同时,研究区存在大量与NWW向走滑断裂近直交的NE向逆冲断裂(即图4所示的网格状分布地区),其滑动破碎带结构致密,可对油气起到侧向封堵作用;垂向上则依赖石炭系顶部不整合面上的致密风化黏土层,以及泥岩、凝灰岩或沉凝灰岩等塑性较强的岩性形成有效封盖。

基于上述认识,对研究区的油气有利勘探区进行了预测。认为具备以下条件的区域为有利勘探目标:发育网格状分布的逆冲断裂与走滑断裂,且位于能够

沟通沙湾凹陷油源的NWW向走滑断裂附近(图10)。

6 结论

1) 研究区石炭系发育近NS向、NW向、NE向和近WE向4组走滑断裂,其中NW向和NE向走滑断裂规模较大、分布广泛,为主要断裂体系。规模较大的NW向走滑段裂可延伸至沙湾凹陷内部,对沟通油源和输导油气具有重要作用。断裂平面组合样式可划分为网格式和斜交式两类:网格式断裂组合有利于油气的聚集与成藏;斜交式断裂组合则更有利于油气的运移与输导。

2) 走滑断裂内部具有分带结构,可划分为滑动破碎带及其两侧的诱导裂缝带。其中,滑动破碎带物性较差,封堵性较强;诱导裂缝带物性较好,有利于油气输导。二者共同构成“封堵-输导”协同体系。

3) 车排子凸起东部石炭系火山岩油气藏受走滑断裂控制明显,可分为3类成藏模式:风化壳型油气藏、裂缝型内幕油气藏和背斜型内幕油气藏。在这3类模式中,走滑断裂均发挥了改善储层物性或输导油气的关键作用。

参 考 文 献

- [1] 范秋海, 吕修祥, 李伯华. 走滑构造与油气成藏[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2008, 30(6): 76-80, 209.
FAN Qiuhai, LYU Xiuxiang, LI Bohua. Strike-slip fault and the hydrocarbon reservoir formation [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2008, 30(6): 76-80, 209.
- [2] 马德波, 邬光辉, 朱永峰, 等. 塔里木盆地深层走滑断层分段特征及对油气富集的控制: 以塔北地区哈拉哈塘油田奥陶系走滑断层为例[J]. 地学前缘, 2019, 26(1): 225-237.
MA Debo, WU Guanghui, ZHU Yongfeng, et al. Segmentation characteristics of deep strike slip faults in the Tarim Basin and its control on hydrocarbon enrichment: taking the Ordovician strike slip fault in the Halahatang Oilfield in the Tabei area as an example [J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(1): 225-237.
- [3] 马永生, 何治亮, 赵培荣, 等. 深层—超深层碳酸盐岩储层形成机理新进展[J]. 石油学报, 2019, 40(12): 1415-1425.
MA Yongsheng, HE Zhiliang, ZHAO Peirong, et al. A new progress in formation mechanism of deep and ultra-deep carbonate reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(12): 1415-1425.
- [4] 杨海军, 邓兴梁, 张银涛, 等. 塔里木盆地满深1井奥陶系超深断控碳酸盐岩油气藏勘探重大发现及意义[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(3): 13-23.
YANG Haijun, DENG Xingliang, ZHANG Yintao, et al. Great discovery and its significance of exploration for Ordovician ultra-deep fault-controlled carbonate reservoirs of Well Manshen 1 in Tarim Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(3): 13-23.
- [5] SYLVESTER A G. Strike-slip faults [J]. GSA Bulletin, 1988, 100(11): 1666-1703.
- [6] FAULKNER D R, JACKSON C A L, LUNN R J, et al. A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones [J]. Journal of Structural Geology, 2010, 32(11): 1557-1575.
- [7] 焦方正. 塔里木盆地顺托果勒地区北东向走滑断裂带的油气勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(5): 831-839.
JIAO Fangzheng. Significance of oil and gas exploration in NE strike-slip fault belts in Shuntuoguole area of Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(5): 831-839.
- [8] 吴孔友, 郗润芝, 李天然, 等. 准噶尔盆地车排子凸起西翼断裂特征及其控藏作用[J]. 地质与资源, 2017, 26(6): 570-576.
WU Kongyou, XI Runzhi, LI Tianran, et al. Characteristics and reservoir-forming control of faults in the west wing of Chepaizi uplift, Junggar Basin [J]. Geology and Resources, 2017, 26(6): 570-576.
- [9] 吴孔友, 查明, 王绪龙, 等. 准噶尔盆地构造演化与动力学背景再认识[J]. 地球学报, 2005, 26(3): 217-222.
WU Kongyou, ZHA Ming, WANG Xulong, et al. Further researches on the tectonic evolution and dynamic setting of the Junggar Basin [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2005, 26(3): 217-222.
- [10] 何登发, 翟光明, 况军, 等. 准噶尔盆地古隆起的分布与基本特征[J]. 地质科学, 2005, 40(2): 248-261, 304.
HE Dengfa, ZHAI Guangming, KUANG Jun, et al. Distribution and tectonic features of paleo-uplifts in the Junggar Basin [J]. Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica), 2005, 40(2): 248-261, 304.
- [11] 吴康军, 刘洛夫, 肖飞, 等. 准噶尔盆地车排子周缘油气导体体系特征及输导模式[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(1): 86-96.
WU Kangjun, LIU Luofu, XIAO Fei, et al. Characteristics of the hydrocarbon pathway system and transport model of the Chepaizi and its surrounding areas in the Junggar Basin of China [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(1): 86-96.
- [12] 赵俊猛, 黄英, 马宗晋, 等. 准噶尔盆地北部基底结构与属性问题探讨[J]. 地球物理学报, 2008, 51(6): 1767-1775.
ZHAO Junmeng, HUANG Ying, MA Zongjin, et al. Discussion on the basement structure and property of northern Junggar Basin [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(6): 1767-1775.
- [13] 王林. 车排子凸起P66井区石炭系火山岩岩相及分布特征[J]. 新疆地质, 2018, 36(3): 368-374.
WANG Lin. The features of volcanic facies of Carboniferous and its distribution characteristics in Chepaizi uplift, Junggar Basin [J]. Xinjiang Geology, 2018, 36(3): 368-374.
- [14] JIAN Ping, KRÖNER A, JAHN B M, et al. Zircon ages of metamorphic and magmatic rocks within peridotite-bearing mélanges: Crucial time constraints on early Carboniferous extensional tectonics in the Chinese Tianshan [J]. Lithos, 2013, 172/173: 243-266.
- [15] 周培兴, 吴孔友, 董方, 等. 准噶尔盆地断拗转换期剥蚀厚度及其分布规律[J]. 地质与资源, 2023, 32(5): 575-583.
ZHOU Peixing, WU Kongyou, DONG Fang, et al. Denudation thickness and distribution rule in the fault-depression transition period of Junggar Basin [J]. Geology and Resources, 2023, 32(5): 575-583.
- [16] 陈林. 车排子凸起西翼石炭系火山沉积岩储层油气成藏特征[J]. 东北石油大学学报, 2018, 42(3): 46-55.
CHEN Lin. Hydrocarbon accumulation features of Carboniferous pyroclastic sedimentary rock reservoir in western wing of Chepaizi uplift [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2018, 42(3): 46-55.
- [17] 靖辉, 江洪, 向奎. 准噶尔盆地西缘车排子地区岩性油气藏成藏主控因素[J]. 石油实验地质, 2007, 29(4): 377-383.
JING Hui, JIANG Hong, XIANG Kui. Key factors to control formation conditions of stratigraphic pools in Chepaizi area, the

- west of the Junggar Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2007, 29(4): 377-383.
- [18] 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.
- ZHANG Chaojun, SHI Xin, WU Xiaozhi, 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.
- [19] 梁宇生, 何登发, 甄宇, 等. 准噶尔盆地沙湾凹陷构造-地层层序与盆地演化[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(5): 943-954.
- LIANG Yusheng, HE Dengfa, ZHEN Yu, et al. Tectono-stratigraphic sequence and basin evolution of Shawan Sag in the Junggar Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(5): 943-954.
- [20] 陈林. 准噶尔盆地西缘侏罗系沉积特征研究[J]. *山东石油化工学院学报*, 2021, 35(3): 1-6.
- CHEN Lin. Study on Jurassic depositional model of western Junggar Basin [J]. *Journal of Shandong Institute of Petroleum and Chemical Technology*, 2021, 35(3): 1-6.
- [21] 董大伟, 李理, 王晓蕾, 等. 准噶尔盆地西缘车排子凸起构造演化及断层形成机制[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2015, 45(4): 1132-1141.
- DONG Dawei, LI Li, WANG Xiaolei, et al. Structural evolution and dislocation mechanism of western margin Chepaizi uplift of Junggar Basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2015, 45(4): 1132-1141.
- [22] 徐佑德. 车排子地区石炭系火山岩油藏油气输导体系与运聚模式[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2018, 33(6): 34-41.
- XU Youde. Hydrocarbon migration pathways and migration and accumulation modes in carboniferous volcanic reservoirs of Chepaizi area [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2018, 33(6): 34-41.
- [23] 赵乐强, 林会喜, 郭瑞超, 等. 准噶尔盆地车排子凸起区火山岩风化壳油藏油气运聚模式[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2018, 41(3): 403-410.
- ZHAO Leqiang, LIN Huixi, GUO Ruichao, et al. Hydrocarbon migration and accumulation pattern of weathered volcanic layer reservoir in Chepaizi Uplift of Junggar Basin [J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2018, 41(3): 403-410.
- [24] 宋继叶, 秦明宽, 蔡煜琦, 等. 准噶尔盆地基底结构特征及其对砂岩型铀矿成矿的影响[J]. *地质论评*, 2015, 61(1): 128-138.
- SONG Jiye, QIN Mingkuan, CAI Yuqi, et al. Basement characteristics of Junggar Basin and its effect on sandstone-type uranium metallogenesis [J]. *Geological Review*, 2015, 61(1): 128-138.
- [25] 杨怀龙, 李勇. 新疆东天山地区柳树沟组与七角井组岩石地层划分与对比[J]. *甘肃地质*, 2014, 23(2): 27-32.
- YANG Huailong, LI Yong. Stratigraphic division and correlation of Liushugou Formation and Qijiaoing Formation in east Tianshan Mountain area, Xinjiang [J]. *Gansu Geology*, 2014, 23(2): 27-32.
- [26] 刘国勇, 许多年, 胡婷婷, 等. 准噶尔盆地沙湾凹陷侏罗系八道湾组滩砂的发现及石油地质意义[J]. *岩性油气藏*, 2023, 35(5): 1-10.
- LIU Guoyong, XU Duonian, HU Tingting, et al. Discovery and petroleum geological significance of beach sand bodies of Jurassic Badaowan Formation in Shawan Sag, Junggar Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2023, 35(5): 1-10.
- [27] SCHUTTER S R. Occurrences of hydrocarbons in and around igneous rocks [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2003, 214(1): 35-68.
- [28] LI C Q, PANG Y M, CHEN H L, et al. Gas charging history of the Yingcheng Formation igneous reservoir in the Xujiaweizi Rift, Songliao Basin, China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2006, 89(1/3): 210-213.
- [29] ZOU Caineng, HOU Lianhua, YANG Fan, et al. Structure of weathered clastic crust and its petroleum potential [J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57(12): 3015-3026.
- [30] 赵耀, 潘虹, 骆飞飞, 等. 准噶尔盆地红车断裂带石炭系火山岩储层特征及质量控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(5): 1129-1140.
- ZHAO Yao, PAN Hong, LUO Feifei, et al. Characteristics and quality determinants of Carboniferous volcanic reservoirs in the Hongche Fault Zone, Junggar Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(5): 1129-1140.
- [31] 尹艳芳, 常象春, 徐佑德, 等. 准噶尔盆地车排子凸起中生界稠油油源分析[J]. *特种油气藏*, 2024, 31(1): 39-47.
- YIN Yanfang, CHANG Xiangchun, XU Youde, et al. Mesozoic heavy oil source analysis of Chepaizi uplift in Junggar Basin [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2024, 31(1): 39-47.
- [32] SHI Bingbing, CHANG Xiangchun, XU Youde, et al. Origin and migration pathway of biodegraded oils pooled in multiple-reservoirs of the Chepaizi Uplift, Junggar Basin, NW China: Insights from geochemical characterization and chemometrics methods [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 122: 104655.
- [33] 陈桐, 卞保力, 李啸, 等. 准噶尔盆地腹部中浅层油气输导体系及其控藏作用[J]. *岩性油气藏*, 2021, 33(1): 46-56.
- CHEN Gang, BIAN Baoli, LI Xiao, et al. Transport system and its control on reservoir formation of Jurassic-Cretaceous in hinterland of Junggar Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2021, 33(1): 46-56.
- [34] MA Shuo, ANDREWS D J. Inelastic off-fault response and three-dimensional dynamics of earthquake rupture on a strike-slip fault [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2010, 115

- (B4): B04304.
- [35] 邵雨, 汪仁富, 张越迁, 等. 准噶尔盆地西北缘走滑构造与油气勘探[J]. 石油学报, 2011, 32(6): 976-984.
- SHAO Yu, WANG Renfu, ZHANG Yueqian, et al. Strike-slip structures and oil-gas exploration in the NW margin of the Junggar Basin, China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(6): 976-984.
- [36] 豆方鹏, 李江海, 彭谋. 准噶尔盆地西北缘断裂带构造变形机制——基于物理实验模拟研究[J]. 地质通报, 2024, 43(4): 527-535.
- DOU Fangpeng, LI Jianghai, PENG Mou. Tectonic deformation mechanism of the fault zone in the northwest margin of Junggar Basin: Based on physical experimental simulation[J]. Geological Bulletin of China, 2024, 43(4): 527-535.
- [37] 张煜, 毛庆言, 李海英, 等. 顺北中部超深层断控缝洞型油气藏储集体特征与实践应用[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(1): 1-13.
- ZHANG Yu, MAO Qingyan, LI Haiying, et al. Characteristics and practical application of ultra-deep fault-controlled fractured-cavity type reservoir in central Shunbei area[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(1): 1-13.
- [38] 江同文, 徐朝晖, 徐怀民, 等. 塔中低凸起石炭系网毯式油气成藏体系结构及输导体系[J]. 石油科学通报, 2017, 2(2): 176-186.
- JIANG Tongwen, XU Chaohui, XU Huaimin, et al. Meshwork-Carpet structural petroleum accumulation and transportation systems of the Carboniferous in the central tarim uplift [J]. Petroleum Science Bulletin, 2017, 2(2): 176-186.
- [39] CHEN Yan, LIU Haitao, JIANG Zhenglong, et al. Structural characteristics of the fault zone and fault-controlled hydrocarbon accumulation in the Chenghai area of Dagang offshore [J]. ACS Omega, 2024, 9(49): 47983-48003.
- [40] LIU Yin, WU Kongyou, WANG Xi, et al. Architecture of buried reverse fault zone in the sedimentary basin: A case study from the Hong-Che Fault Zone of the Junggar Basin [J]. Journal of Structural Geology, 2017, 105: 1-17.
- [41] 范存辉, 吴强, 邓玉森, 等. 火山岩风化壳储层特征及分布规律——以准噶尔西北缘中拐凸起石炭系火山岩为例[J]. 现代地质, 2017, 31(5): 1046-1058.
- FAN Cunhui, WU Qiang, DENG Yusen, et al. Reservoir characteristics and distribution rule of weathering volcanic crust: A case study of the Carboniferous volcanic rock in Zhongguai uplift, NW Junggar Basin[J]. Geoscience, 2017, 31(5): 1046-1058.
- [42] 黄金富, 王啊丽, 夏国朝, 等. 喷发相火山岩储层特征研究及地质意义[J]. 非常规油气, 2023, 10(6): 27-34.
- HUANG Jinfu, WANG Ali, XIA Guochao, et al. Study on reservoir characteristics of eruptive facies volcanic rock and its geological significance [J]. Unconventional Oil & Gas, 2023, 10(6): 27-34.
- [43] 云露, 汪洋, 曹飞, 等. 顺北裂缝型储集层油水两相相对渗透率实验[J]. 新疆石油地质, 2025, 46(4): 485-491.
- YUN Lu, WANG Yang, CAO Fei, et al. Experimental study on oil/water relative permeability in fractured reservoirs in Shunbei Oilfield, Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2025, 46(4): 485-491.
- [44] 郑超, 刘宜文, 魏凌云, 等. 准噶尔盆地南缘霍尔斯背斜构造解析及有利区带预测[J]. 断块油气田, 2015, 22(6): 692-695.
- ZHENG Chao, LIU Yiwen, WEI Lingyun, et al. Analysis of Horgos anticline in southern margin of Junggar Basin and prediction of favorable zone [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2015, 22(6): 692-695.

(编辑 刘格云)