

## 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

赵耀<sup>1</sup>,潘虹<sup>1</sup>,骆飞飞<sup>1</sup>,李亮<sup>1</sup>,李丹杨<sup>1</sup>,谢宗瑞<sup>1</sup>,卢东连<sup>2</sup>,张琴<sup>2</sup>

[1. 中国石油新疆油田公司勘探开发研究院,新疆克拉玛依,834000;2. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京102249]

**摘要:**石炭系火山岩是准噶尔盆地红车断裂带主要的勘探开发目的层,但目前对于火山岩储层特征及质量主控因素尚不明确,制约了进一步的勘探和开发部署。基于岩心、普通薄片、铸体薄片和成像测井等资料,对研究区火山岩储层的岩性进行精细划分,识别储集空间类型并揭示其质量控制因素,以期为有利目标优选提供科学依据。研究表明,研究区火山岩储层以火山角砾岩、凝灰质火山角砾岩、凝灰岩、玄武岩和安山岩为主,储集空间以次生孔隙和微裂缝为主,储层孔隙度平均为9.69%,渗透率平均为 $0.24 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,为特低孔、特低渗储层。石炭系火山角砾岩储集物性最好,而安山岩和玄武岩次之。储层物性受火山岩岩性、岩相、成岩作用和构造作用的共同控制,岩相控制了岩性的类型及分布,从物质成分上根本控制了压实作用及后期溶蚀作用的进行,从而主要控制了储层质量;风化淋滤作用、溶蚀作用及断裂活动可以形成裂缝-溶蚀孔体系,大大改善了储层质量;而压实作用和充填作用使得原生孔隙大量减少,储层物性变差。

**关键词:**岩相;火山岩储层;石炭系;红车断裂带;准噶尔盆地

**中图分类号:**TE122.2

**文献标识码:**A

## Characteristics and quality determinants of Carboniferous volcanic reservoirs in the Hongche Fault Zone, Junggar Basin

ZHAO Yao<sup>1</sup>, PAN Hong<sup>1</sup>, LUO Feifei<sup>1</sup>, LI Liang<sup>1</sup>, LI Danyang<sup>1</sup>, XIE Zongrui<sup>1</sup>, LU Donglian<sup>2</sup>, ZHANG Qin<sup>2</sup>

[1. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay, Xinjiang 834000, China;

2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China]

**Abstract:** The Carboniferous volcanic rocks within the Hongche Fault Zone in the Junggar Basin serve as pivotal exploration and exploitation targets. However, ambiguities regarding the characteristics and quality determinants of the volcanic reservoirs pose challenges for the forthcoming emplacement of exploratory and exploitation wells. Leveraging the data from core, ordinary thin section, and casting thin section observation, as well as image logs, we conduct a fine-scale lithological classification for these reservoirs. Furthermore, we identify the types of reservoir spaces and reveal the factors influencing the reservoir quality. This study seeks to provide a scientific basis for selecting the optimal exploration and exploitation targets. The results are as follows: (1) The volcanic reservoirs predominantly consist of volcanic breccia, tuffaceous volcanic breccia, tuff, basalt, and andesite. Their storage spaces are dominated by secondary pores and microfractures. These reservoirs are characterized by ultra-low porosity (average: 9.69 %) and ultra-low permeability (average:  $0.24 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ). Notably, the Carboniferous volcanic breccia exhibits the most favorable physical properties, followed by andesite and basalt; (2) The physical properties of these reservoirs are collectively molded by volcanic rocks' lithologies and lithofacies, diagenesis, and tectonism. Specifically, the lithologies determine the types of primary pores and their development degree. In comparison, the lithofacies are instrumental in governing the types and distributions of lithologies, determining the material composition of volcanic rocks and fundamentally influencing the compaction and subsequent dissolution of volcanic rocks. Therefore, the lithofacies serve as the predominant factor influencing the reservoir quality. Several processes, including weathering, leaching, dissolution, and fault activity, contribute to the formation of a fracture-dissolution pore system, significantly enhancing the reservoir quality. In contrast, compaction and the filling process greatly reduce the number of primary pores, leading to poor physical properties of reservoirs.

收稿日期:2023-06-20;修回日期:2023-08-09。

第一作者简介:赵耀(1994—),男,工程师,综合地质研究。E-mail: xjzhaoy@petrochina.com.cn。

基金项目:中国石油集团公司前瞻性基础性项目(2021DJ1004);国家自然科学基金项目(41872134, 41302081)。

**Key words:** lithofacies, volcanic reservoir, Carboniferous, Hongche Fault Zone, Junggar Basin

引用格式: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. DOI: 10. 11743/ogg20230505.

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. DOI: 10. 11743/ogg20230505.

随着全球对油气资源需求的不断增加,火山岩油气藏作为重要的非常规油气资源已成为油气勘探开发的新领域,已有广大地质学者对火山岩储层进行过综合地质研究<sup>[1–6]</sup>,并在世界范围内探明分布有非常可观的火山岩油气藏<sup>[7–8]</sup>。中国火山岩分布面积广,目前已在准噶尔盆地、二连盆地及四川盆地等发现多个不同规模的火山岩油气藏,火山岩油气勘探取得了重大突破<sup>[9–15]</sup>。准噶尔盆地西北缘是中国最早进行火山岩储层研究和开发的地区,蕴藏着丰富的油气资源<sup>[8,16]</sup>。近年来,准噶尔盆地红车断裂带石炭系火山岩储层勘探取得了较大进展,具有较大的勘探潜力<sup>[17–20]</sup>。红车断裂带内深、浅断裂发育,储层非均质性强,储层类型多样<sup>[21]</sup>,火山岩储层分布受岩相影响,整体含油但局部富集,差异较大<sup>[22]</sup>。前人对准噶尔盆地西北缘火山岩储层的研究主要从成岩作用<sup>[23]</sup>、裂缝特征<sup>[24–25]</sup>、成藏特征<sup>[22,26–28]</sup>、油气来源<sup>[29–31]</sup>、储层识别<sup>[32–33]</sup>等方面开展,目前对红车断裂带石炭系火山岩岩相、孔隙类型及其储层质量主控因素尚不明确,制约了火山岩油气藏进一步的勘探和开发部署。因此,本次研究对准噶尔盆地红车断裂带石炭系火山岩储层进行火山岩岩性特征及物性特征分析,明确火山岩优质储层的储集空间类型及特征并揭示储层质量控制因素,以期为红车断裂带火山岩有利储层的预测和有效开发提供理论依据。

## 1 区域地质概况

红车断裂带位于准噶尔盆地西北缘断裂带的南端,近南北走向,长约80 km,宽10~20 km<sup>[34]</sup>。其北临克百断裂带,东临中拐凸起和沙湾凹陷,南以四棵树凹陷为界,西与车排子隆起接壤,勘探面积约为2 000 km<sup>2</sup> (图1a)<sup>[35–37]</sup>,是准噶尔盆地西北缘有利油气富集区之一<sup>[38]</sup>。

红车断裂带经历了海西期、印支期、喜马拉雅期等多期构造运动,形成了复杂的断裂体系和多样的构造格局,形成数条大型南北向逆冲断裂和自东向西抬起的断阶带<sup>[39–40]</sup>,发育古生代—中生代地层,自下而上包括石炭系(C)、二叠系(P)、三叠系(T)、侏罗系(J)和白垩系(K)(图1b)<sup>[41]</sup>。由于多次构造运动,造成了主断裂上

盘从南到北二叠系、三叠系及侏罗系有不同程度的缺失<sup>[26,42]</sup>。红车断裂带石炭系主要发育玄武岩和安山岩等火山熔岩、火山角砾岩和凝灰岩等火山碎屑岩,及少量陆相粗碎屑岩、碳酸盐岩、页岩夹煤线等。石炭系主力出油段的岩性为火山角砾岩、玄武岩、安山岩、凝灰岩、凝灰质砂砾岩、沉凝灰岩以及少量陆源碎屑岩<sup>[43]</sup>。

## 2 样品及方法

本文所使用的样品来自22口井的岩心及钻、测井资料,主要包括常规岩心照片(96件)、铸体薄片(84件)、储层孔渗测试(387件)及成像测井资料(10口井)。铸体薄片是将蓝色液态胶在真空加压下注入岩石孔隙,待液态胶固化后磨制成薄片,显微镜下研究孔隙类型、大小、分布、连通性、组合特征及裂缝发育等<sup>[44]</sup>。储层孔渗测试方法根据行业标准SY/T 5 336—2006,将火山岩岩心样品装入直径为1.5 cm、长度为2.5 cm的岩石圆柱体中,利用氦气孔隙度仪,根据储气容器压力随时间的变化及相关参数分析孔隙度和渗透率。根据岩心和普通薄片等资料,综合开展火山岩储层岩石学特征研究;通过火山岩储层样品物性测试资料分析,明确孔隙度和渗透率分布特征;结合薄片资料和成像测井资料,分析火山岩储层的储集空间类型及特征。通过分析火山岩岩性、岩相、成岩作用及构造作用与储集空间、物性的关系,探讨火山岩储层的质量控制因素。

## 3 结果分析

### 3.1 火山岩储层岩石类型及特征

火山岩岩性是岩相划分、储层研究的基础。石炭系沉积时期是盆地基底形成的时期,构造运动强烈,地层剥蚀严重,且火山喷发具有多期性,火山岩岩性复杂,种类繁多。基于对红车断裂带石炭系岩心及薄片资料(共用16口井180块样品)和测井等资料分析,建立了自然伽马—声波时差和电阻率—声波时差岩性识别图版(图2),并根据王璞珺等<sup>[45]</sup>火山岩分类方案,将石炭系岩性分为火山碎屑岩、火山熔岩和火山沉积岩三大类。火

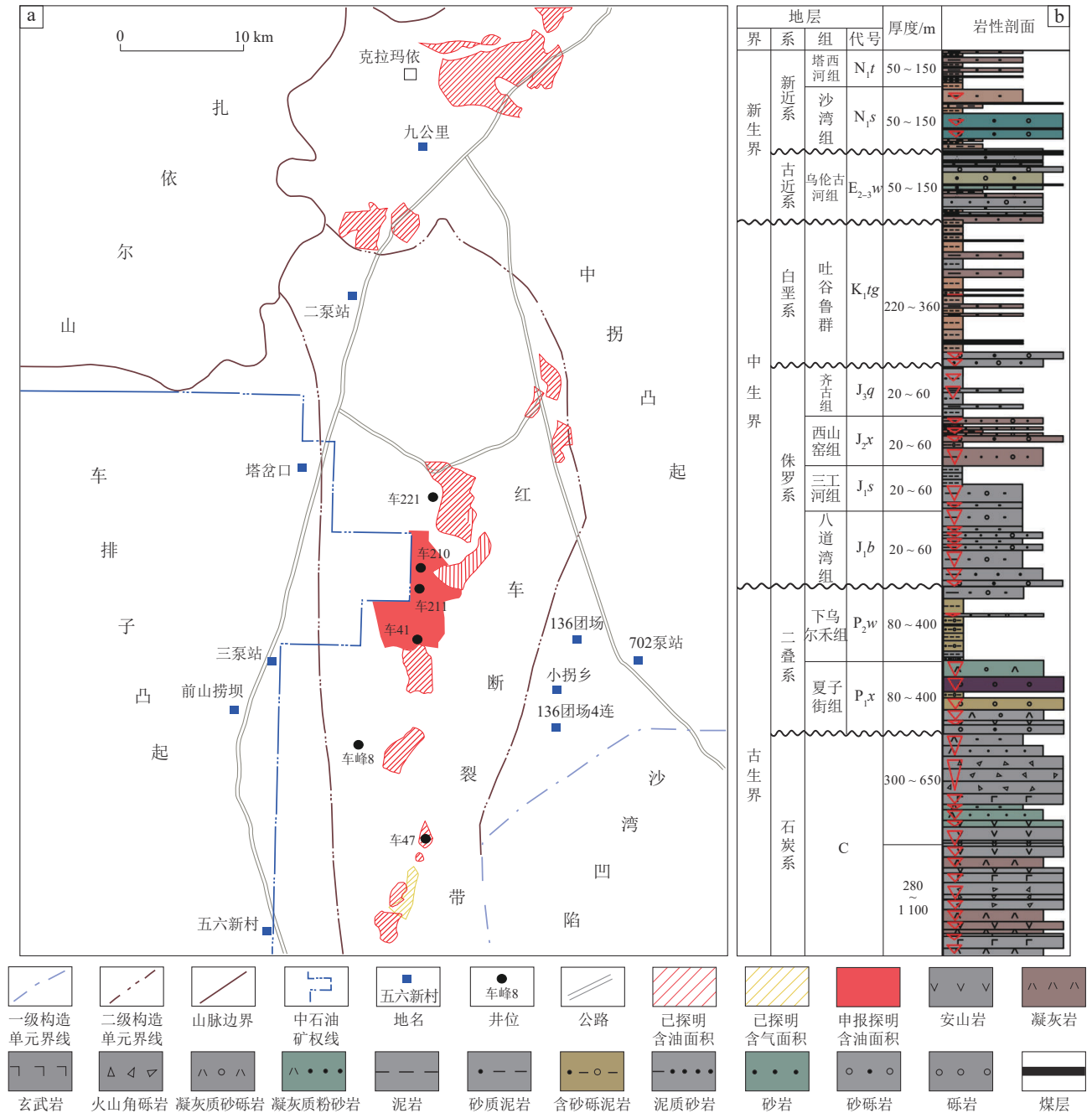


图1 红车断裂带区域位置(a)及地层柱状图(b)(据文献[37,41]修改)

Fig. 1 Regional location (a) and stratigraphic column (b) of the Hongche fault zone (modified after references [37,41])

山碎屑岩包括火山角砾岩、凝灰质火山角砾岩和凝灰岩；火山熔岩包括玄武岩和安山岩；火山沉积岩主要为凝灰质砂岩、凝灰质细砂岩和凝灰质泥岩(图2；表1)。

### 3.1.1 火山碎屑岩类

研究区火山碎屑岩包括火山角砾岩、凝灰质火山角砾岩及凝灰岩。火山角砾岩主要为褐灰色、棕褐色、褐红色及深灰色，由含量大于75%的火山角砾及少量火山灰组成。碎屑成分以岩屑为主，晶屑次之，少量玻屑。岩屑成分在不同井相差较大，主要为安山

岩、玄武岩和凝灰岩的岩屑，火山角砾大多数粒径在2~10 mm，次棱角状-棱角状，分选差；晶屑为斜长石、石英和少量辉石构成，长石具绿泥石化现象；火山灰为玻屑、细小的石英及长石、安山岩屑等(图3a,b)。火山角砾岩自然伽马值(*GR*)通常在5~29 API(图2a)，电阻率(*RT*)多在10 Ω·m以上(图2b)。凝灰质火山角砾岩多呈灰色、褐灰色及深灰色，由火山角砾(含量>50%)及火山灰、尘(含量25%~50%)组成。碎屑物质主要由晶屑、玻屑和少量岩屑组成，晶屑主要为石英和碱性长石，玻屑部分已蚀变为沸石类，岩屑主要为

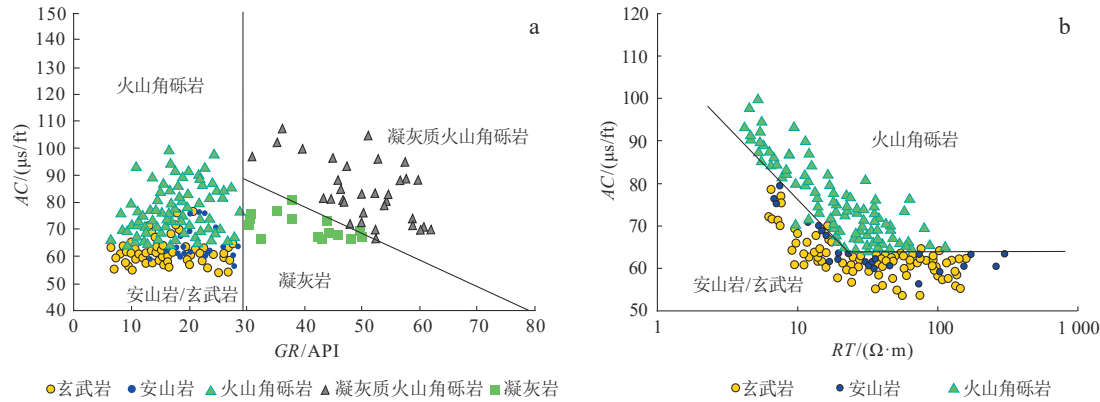


图2 红车断裂带石炭系火山岩岩性识别图版

Fig. 2 Lithological identification chart of the Carboniferous volcanic rocks in the Hongche fault zone  
a. GR-AC(自然伽马值-声波时差); b. RT-AC(电阻率-声波时差)

表1 红车断裂带石炭系岩性分类

Table 1 Lithological classification of the Carboniferous volcanic rocks in the Hongche fault zone

| 岩石类型   |                            | 结构             | 构造             | 代表井    |
|--------|----------------------------|----------------|----------------|--------|
| 火山碎屑岩类 | 火山角砾岩                      | 火山角砾结构         | 块状构造           | Ch471井 |
|        | 凝灰质火山角砾岩                   | 凝灰质火山角砾结构      | 块状构造           | Ch480井 |
|        | 凝灰岩                        | 凝灰结构           | 块状构造、层状构造      | Ch489井 |
| 火山熔岩类  | 安山岩、玄武岩                    | 交织结构、斑状结构、隐晶结构 | 杏仁构造、块状构造      | Ch542井 |
| 火山沉积岩类 | 凝灰质砂砾岩、凝灰质细砂岩、凝灰质粉砂岩、凝灰质泥岩 | 陆源碎屑结构         | 交错层理、粒序层理、块状构造 | C18井   |

安山岩和玄武岩(图3c)。凝灰质火山角砾岩自然伽马值通常在29~65 API(图2a),电阻率多在4~10 Ω·m以上(图2b)。凝灰岩多呈灰色、黑灰色,具块状构造和凝灰结构,常与火山熔岩或火山角砾岩互层。凝灰岩的碎屑组分主要由晶屑、岩屑和浆屑组成,晶屑主要为长石晶屑,岩屑以玄武岩和安山岩为主,浆屑主要为玄武质和安山质,碎屑多呈棱角状(图3d),部分凝灰岩中火山灰尘脱玻化为霏细状长英质物质。结合岩性识别图版,确定凝灰岩的识别标准为30 API≤GR<45 API(图2a)。

3.1.2 火山熔岩类

石炭系主要发育玄武岩和安山岩2种火山熔岩。玄武岩主要为深灰色、绿灰色、褐灰色,成分以斜长石和辉石为主,多发育斑状结构,斑晶多由斜长石、辉石组成,部分斜长石和辉石具不均匀绿泥石化现象。常具气孔、杏仁、块状构造,靠近熔岩层的顶部杏仁体和气孔较发育,呈椭圆状及不规则状,多被浊沸石、绿泥石、方解石、硅质充填(图3e)。玄武岩自然伽马测井呈现低值(6~29 API)(图2a),声波时差(AC)较低(53~78 μs/ft)(图2b),补偿中子值较高。安山岩主要为棕褐色、褐灰色,经蚀变后则多呈褐色、绿色、灰白褐色等,成分以角闪石、斜长石为主,黑云母、辉石次之,常具斑晶结构,基质具交织结构、玻晶交织结

构,斑晶含量为25%~55%,多由中性斜长石、辉石、角闪石、云母构成;基质为玻璃质、长石微晶和细粒辉石等,基质中长石微晶以中长石为主。发育气孔、杏仁、块状构造,近熔岩层的顶部杏仁体和气孔发育,呈椭圆状及不规则状,多被硅质、绿泥石充填(图3f)。安山岩测井特征为中-低自然伽马值(11~29 API)、中-高电阻率(6~301 Ω·m)及低声波时差(56~80 μs/ft)(图2)。

3.1.3 火山沉积岩类

火山沉积岩类是火山岩和沉积岩的过渡类型,研究区主要包括凝灰质砂砾岩、凝灰质细砂岩及凝灰质泥岩。凝灰质砂砾岩多呈灰色、深灰色、褐灰色,砾石成分以火山岩岩屑为主;砂质成分包括火山岩岩屑及长石、石英等,分选差,棱角状-次圆状,具有一定程度蚀变,部分褐铁矿化(图3g)。岩心见斜交裂缝及网状裂缝发育,被方解石半充填。岩性图版分析确定其GR≥45 API(图2)。凝灰质细砂岩多呈灰色、深灰色、黑灰色,砂质成分以火山岩岩屑为主,长石、石英次之,粒径0.1~1.0 mm,分选差,棱角状-次圆状,颗粒间被火山灰、尘等凝灰质充填(图3h)。凝灰质泥岩呈灰色、深灰色、黑灰色,性脆,吸水性中等。岩心不规则,裂缝发育,出筒时沿裂缝面破碎严重,岩心局部断面见划痕迹(图3i)。



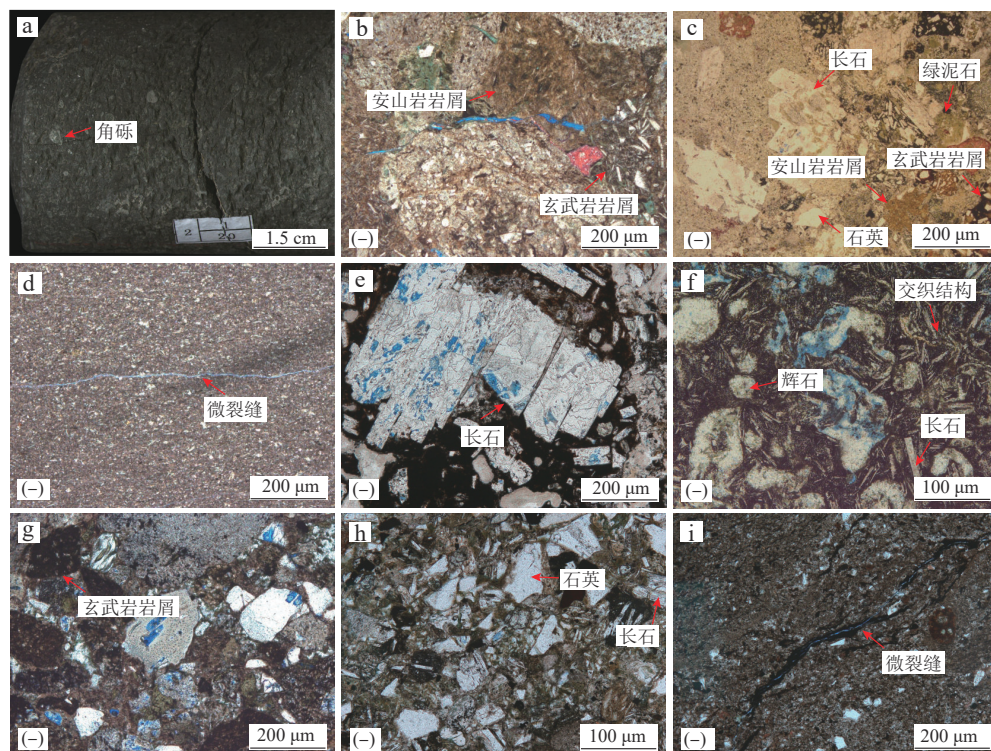


图3 红车断裂带石炭系火山岩储层岩石类型显微照片

Fig. 3 Microscope images showing rock types of the Carboniferous volcanic reservoirs in the Hongche fault zone

a. 火山角砾岩, 车438井, 埋深1 634.97~1 635.13 m, 岩心; b. 火山角砾岩, 车438井, 埋深1 637.61 m, 铸体薄片; c. 凝灰质火山角砾岩, 车210井, 埋深1 373.99 m, 普通薄片; d. 凝灰岩, 车435井, 埋深1 778.56 m, 铸体薄片; e. 玄武岩, 车441井, 埋深1 842.77 m, 铸体薄片; f. 安山岩, 车541井, 埋深2 078.81 m, 铸体薄片; g. 凝灰质砂砾岩, 车435井, 埋深1 613.75 m, 铸体薄片; h. 凝灰质细砂岩, 车443井, 埋深1 666.43 m, 铸体薄片; i. 凝灰质泥岩, 车443井, 埋深1 667.01 m, 铸体薄片

### 3.2 火山岩储层物性特征

根据岩心物性分析资料, 石炭系火山岩基质储层孔隙度为0.40%~21.85%, 平均为9.69%, 渗透率分布范围为 $(0.02 \sim 22.40) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 平均为 $0.24 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  (图4a, b)。因此, 石炭系火山岩总体为特低孔、特低渗储层。火山角砾岩基质储层孔隙度值分布在0.80%~21.85%, 平均为11.04%, 渗透率分布范围为 $(0.01 \sim 22.40) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 平均为 $0.34 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  (图4c, d)。安山玄武岩基质储层孔隙度值分布在0.40%~17.30%, 平均为6.55%, 渗透率分布范围为 $(0.02 \sim 6.86) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 平均为 $0.11 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  (图4e, f)。火山角砾岩为低孔、特低渗储层, 安山玄武岩为特低孔、特低渗储层, 火山角砾岩储集物性较好, 玄武岩和安山岩储集物性相对较差。

### 3.3 火山岩储层孔隙类型及特征

通过岩心观察并结合铸体薄片资料, 红车断裂带石炭系火山岩储层以次生孔隙为主, 包括粒内溶蚀孔、粒间溶孔和晶内溶孔, 发育少量原生孔隙。原生孔隙

类型以气孔为主, 是含挥发组分的岩浆喷出地表时, 由于压力降低, 其中的挥发组分逸散后残留的孔隙空间, 气孔特征与熔浆成份、挥发分含量有关<sup>[46-47]</sup>。气孔多呈椭圆形、花生形、云朵形及不规则形 (图5a)。孔径大小多介于0.1~5.0 mm, 多发育于溢流相的顶部。岩心和薄片观察表明, 熔岩中的气孔含量一般介于0.5%~2.0%, 但大多数被方解石等充填。次生孔隙是后期成岩过程中易溶组分发生了溶蚀作用而形成, 包括粒内溶孔及粒间溶孔 (图5c—f)。粒内溶孔主要包括晶屑或斑晶溶孔、岩屑溶孔和浆屑溶孔3种。岩屑及浆屑溶孔平均占总孔隙的54.82% (图5d, e); 其次为粒间溶孔 (图5f), 平均占总孔隙的15.63%; 长石晶粒内溶孔平均占总孔隙的3.58%, 包括凝灰岩中的长石晶屑 (图5b) 及安山岩、玄武岩的长石斑晶中发育的溶蚀孔隙 (图5c)。岩屑内溶孔主要见于火山角砾岩和凝灰质砂砾岩中 (图5d)。

### 3.4 裂缝类型及特征

红车断裂带石炭系火山岩储层裂缝类型多样, 包括构造裂缝、冷凝收缩缝和成岩裂缝 (图6)。构造裂

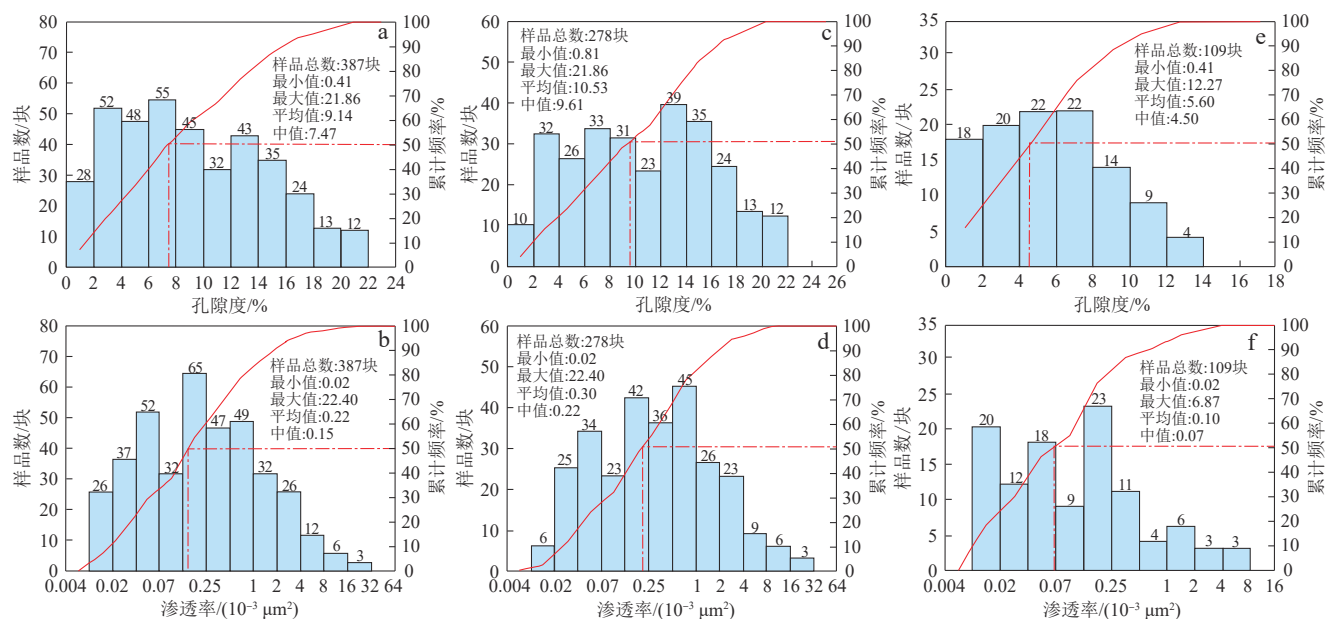


图4 红车断裂带石炭系火山岩储层物性分布

Fig. 4 Histograms showing the physical properties of the Carboniferous volcanic reservoirs in the Hongche fault zone

a. 火山岩储层孔隙度; b. 火山岩储层渗透率; c. 火山角砾岩储层孔隙度; d. 火山角砾岩储层渗透率; e. 安山玄武岩储层孔隙度; f. 安山玄武岩储层渗透率

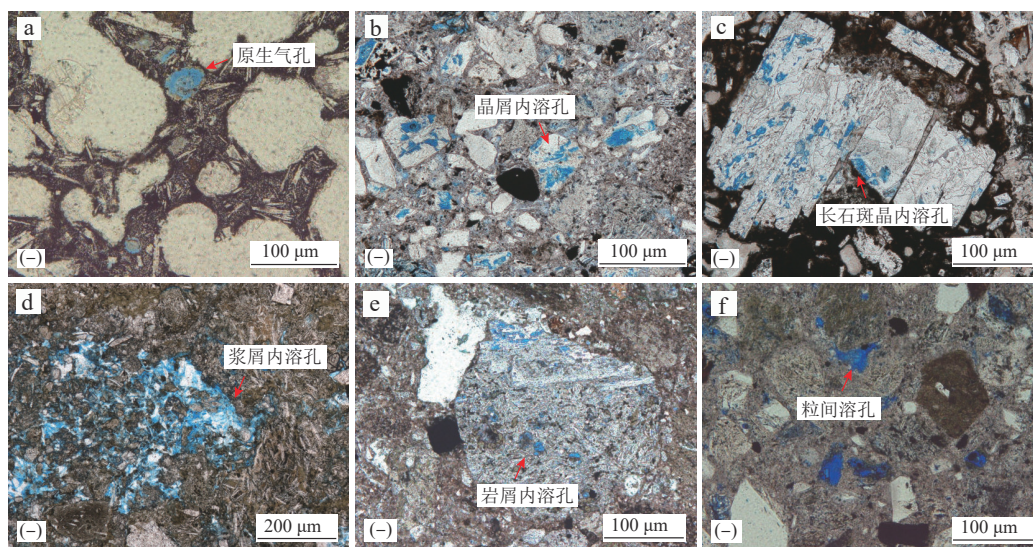


图5 红车断裂带石炭系火山岩孔隙类型显微照片

Fig. 5 Microscope images showing pore types of the Carboniferous volcanic rocks in the Hongche fault zone

a. 安山岩, 原生气孔, 车 541 井, 埋深 2 079.05 m, 铸体薄片; b. 凝灰质砂砾岩, 晶屑内溶孔, 车 441 井, 埋深 1 408.54 m, 铸体薄片; c. 玄武岩, 长石斑晶内溶孔, 车 441 井, 埋深 1 842.77 m, 铸体薄片; d. 凝灰角砾岩, 浆屑内溶孔, 车 443 井, 埋深 1 753.73 m, 铸体薄片; e. 凝灰质砂砾岩, 岩屑内溶孔, 车 435 井, 埋深 1 613.08 m, 铸体薄片; f. 凝灰岩, 粒间溶孔, 车 439 井, 埋深 1 691.73 m, 铸体薄片

缝是石炭系火山岩主要的裂缝类型, 主要分布在火山角砾岩、凝灰质角砾岩和凝灰岩中, 构造微裂缝常有一定的延伸方向, 且延伸距离远, 部分早期形成的微裂缝被全充填或半充填(图 6a—d, g)。冷凝收缩缝主要是火山碎屑岩中由于碎屑颗粒间大量充填的火山灰、尘冷凝收缩而形成的微裂缝, 包括在凝灰岩中岩屑或晶屑的颗粒边缘发育的粒缘缝(图 6f), 该类裂缝

主要发育于火山喷发末期。冷凝收缩缝连通原生孔隙, 同时也是后期溶蚀作用所需流体进入的主要通道<sup>[48]</sup>。薄片中还观察到大量发育的成岩溶蚀缝, 主要是埋藏成岩过程中溶蚀作用对原有的构造裂缝和冷凝收缩缝进行改造, 呈现不规则的溶蚀边缘(图 6e)。

对 10 口取心井岩心、薄片及成测井(XRMI)解



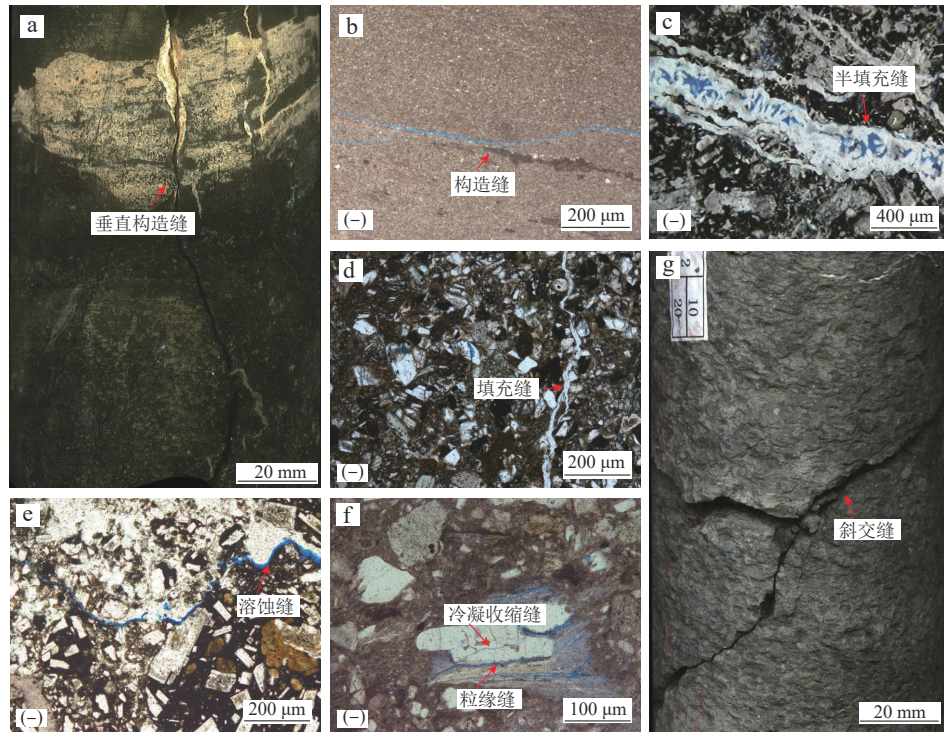


图6 红车断裂带石炭系火山岩裂缝类型显微照片和岩心照片

Fig. 6 Microscope images and core photo showing fracture types of Carboniferous volcanic rocks in the Hongche fault zone

a. 凝灰岩,垂直构造缝,车435井,埋深1 776.45~1 776.65 m,岩心;b. 沉凝灰岩,构造缝,车435井,埋深1 780.62 m,铸体薄片;c. 玄武质安山角砾岩,半填充缝,车峰6井,埋深2 506.00 m,铸体薄片;d. 凝灰岩,填充缝,车443井,埋深1 648.89 m,铸体薄片;e. 含角砾凝灰岩,溶蚀缝,车472井,埋深2 971.88 m,铸体薄片;f. 凝灰岩,冷凝收缩缝,粒缘缝,车439井,埋深1 679.04 m,铸体薄片;g. 凝灰岩,斜交缝,车438井,埋深1 636.64~1 636.94 m,岩心

释成果资料进行统计,进一步根据裂缝发育形态及充填情况分为斜交缝、网状缝、直劈缝、诱导缝、填充缝5种类型(图7),裂缝发育非均质性强,其中大部分被充填。有效裂缝中斜交缝、网状缝居多,本区倾角小于 $45^{\circ}$ 的裂缝占总裂缝厚度的85.6%,占总裂缝条数的62.9%。从岩性看,火山角砾岩和安山玄武岩裂缝最发育,主要发育斜交缝和网状缝,部分裂缝被方解石、

沸石、绿泥石充填或半充填(图8);凝灰质火山角砾岩和凝灰岩中裂缝发育次之。

XRMI测井解释裂缝评价结果表明(图9),研究区裂缝发育非均质性强,部分井段裂缝发育程度较高。斜交缝倾角小于 $90^{\circ}$ 的开口缝在XRMI图像上显示为黑色正弦曲线,包括高角度和低角度斜交缝。直劈缝倾角等于 $90^{\circ}$ 的开口缝在XRMI图像上表现为黑色竖线,缝宽忽大忽小,一般两条线相互平行,延伸较长。网状缝在XRMI图像上表现为暗色网状形态。诱导缝

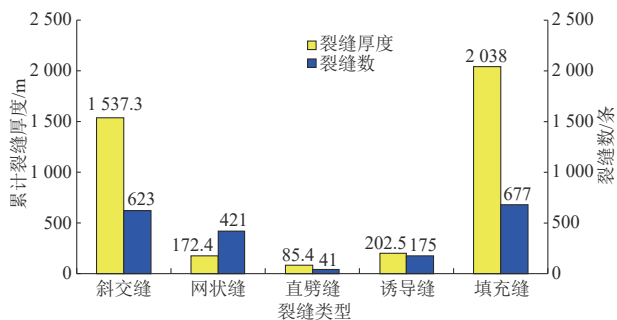


图7 红车断裂带石炭系火山岩成像测井识别的裂缝类型分布柱状图

Fig. 7 Bar graph showing the image log-based fracture types of the Carboniferous volcanic rocks in the Hongche fault zone derived from image logs

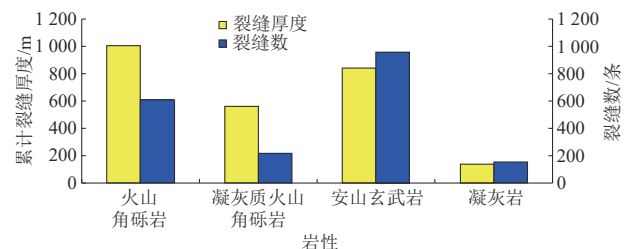


图8 红车断裂带石炭系不同岩性成像裂缝分布柱状图

Fig. 8 Bar graph showing the distributions of image log-based fractures in various lithologies from the Carboniferous volcanic rocks in the Hongche fault zone

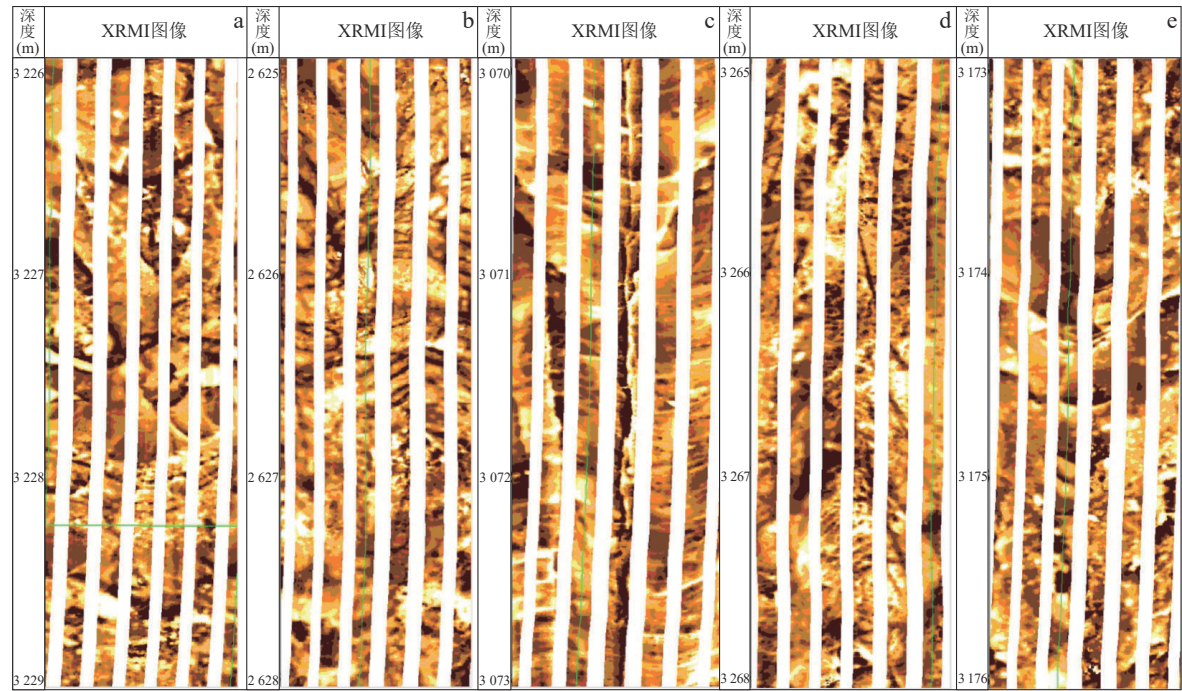


图9 红车断裂带不同类型裂缝XRFI成像测井发育特征  
Fig. 9 XRFI-derived development characteristics of different fractures in the Hongche fault zone  
a. 斜交缝;b. 网状缝;c. 直劈缝;d. 诱导缝;e. 充填缝

在成像图像上表现为“八”字形或倒“八”字形的黑色条带。充填缝在裂缝平面上的上、下倾斜交汇处显示一个高、低电阻率交互区。

4 讨论

4.1 岩性、岩相对储层质量的控制作用

岩性和岩相是影响储层储集性能的主要因素。岩性是火山岩形成的基础,控制着原生孔隙的类型和发育程度,为后期成岩改造提供物质基础<sup>[4,49-50]</sup>。研究区石炭系岩性横向变化快、纵向分布具有多样性的特点,各井区岩性组合差异较大。

石炭系的火山岩岩相主要包括爆发相、溢流相和火山沉积相,对应的储层类型分别为火山岩类和沉积岩类。不同岩石类型储集空间类型和物性存在差异。红车断裂带石炭系火山岩的物性变化范围较大,爆发相的火山角砾岩的物性最好,而溢流相的玄武岩物性最差(表2;图4)。

石炭系火山岩储层中次生溶蚀孔隙和微裂缝较发育,主要发育在火山角砾岩和玄武安山岩中(图5,图6,图8)。火山角砾岩中发育的长石及其富长石的岩屑均易溶蚀形成粒内溶蚀孔隙(图5d,e)。此外,火山角砾岩的抗压实作用较强,对孔隙的保存起着重要

表2 红车断裂带石炭系储层岩石平均有效孔隙度和渗透率  
Table 2 Average effective porosities and permeabilities of the Carboniferous reservoir rocks in the Hongche fault zone

| 岩性    | 平均有效孔隙度/% | 水平渗透率/(10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup> ) |       |
|-------|-----------|-------------------------------------------|-------|
|       |           | 对数平均值                                     | 算术平均值 |
| 火山角砾岩 | 11.76     | -0.401                                    | 4.28  |
| 安山岩   | 8.89      | -0.465                                    | 9.14  |
| 玄武岩   | 3.56      | -1.164                                    | 0.69  |

作用,因此火山角砾岩储层物性较好。研究区玄武岩或安山岩形成时气体逸散而形成的少量原生气孔发育,而大部分被后期充填为杏仁体,因而原生孔隙不发育;同时在埋藏成岩过程中抗压实作用较弱,孔隙水也难以进入,因而溶蚀作用也不发育,次生孔隙发育较少,储层物性较差。因此,岩相的分布控制了岩性的分布,而岩性的物质成分从根本上控制了压实作用及其后期溶蚀作用的进行,从而影响了储层质量的好坏。

4.2 成岩作用对储层质量的控制作用

研究区石炭系火山岩成岩作用及后生作用较为复杂,多种环境条件在多种成岩后生作用下造成了储层的非均质性较强。石炭系火山岩储层主要经历了冷凝收缩作用、挥发组分逸散作用、风化淋滤作用、溶蚀作用、压实作用及充填作用等。



冷凝收缩作用和挥发分逸散作用主要发生于火山喷发期。冷凝收缩作用是在炽热的熔浆喷发到地表后,在快速冷却的同时发生体积收缩,形成圆形、弧形等不同形态的收缩孔缝。该成岩作用发育的收缩孔缝规模小,范围较局限,且后期充填程度高,对储层贡献不大(图6f)。挥发分逸散作用主要发生在安山岩和玄武岩等火山熔岩中,其中的挥发组分由于地面压力或温度的降低发生冷凝和体积收缩,挥发组分逸出而形成原生气孔(图5a),但容易被后期充填为杏仁体。

风化淋滤和溶蚀作用是造成石炭系火山岩次生孔隙发育的主要原因。石炭系顶部发育不整合面,说明石炭系长期暴露地表,岩石经历了不同程度的风化剥蚀和淋滤作用,岩石中的易溶组分溶解形成大量的溶蚀孔和风化缝等,从而改善了储层的储集性能<sup>[23,51]</sup>。溶蚀作用主要发生于埋藏过程中,附近的泥页岩中的有机质成熟释放的有机酸沿着不整合面、断裂面和早期的构造裂缝进入火山岩体,将其易溶组分如长石、岩屑等溶蚀,形成粒内溶孔及少量粒间溶孔,也大大改善了储层物性(图5c,f)。

压实作用在石炭系火山岩中发育较强。石炭系火山岩均具有较低的成分成熟度,塑性岩屑含量和基质含量较高,塑性岩屑容易挤压变形,同时缺乏早期胶结物,抗压实能力较弱,压实减孔明显,进而降低储层的质量(图3d)。

充填作用主要表现为原生气孔、粒内溶孔、粒间溶孔以及裂缝被火山热液和表生矿物再充填,形成残余气孔构造、杏仁构造等,研究区充填物主要为方解石、绿泥石及沸石等,大幅度降低了储层质量。

综上所述,不同的成岩作用共同控制了火山岩优质储层的发育。风化淋滤作用和埋藏溶蚀作用都可以形成次生溶蚀孔隙,从而大大改善了火山岩的储层质量;压实作用和充填作用使得原生孔隙大量减少,储层物性变差;而冷凝收缩作用和挥发分逸散作用对储层局部有影响,但对储层质量贡献不大。

#### 4.3 构造作用对储层质量的控制作用

受早期海西、印支、燕山和喜马拉雅等多期构造运动的叠加改造,红车断裂带构造活动强烈,会导致断裂发育及其附近火山岩发育大量的构造裂缝<sup>[52-54]</sup>,石炭系火山岩裂缝XRF图像(图9)显示,石炭系火山岩储层中广泛发育构造裂缝(图6)。同时,这些构造裂缝能够很好地沟通各类孔隙,提高渗流能力。火山角砾岩和安山玄武岩比凝灰岩等更容易发生破碎,前两者

裂缝发育密度最大(图8)。研究区构造裂缝对储层物性影响较大,其发育段厚度占裂缝段总厚度的95%以上,未充填的构造裂缝为油气运移提供了重要通道<sup>[21,55-56]</sup>。同时红车断裂带石炭系裂缝的广泛发育能够很好地为酸性流体提供运移通道,形成了裂缝-溶蚀孔体系,进而改善了储层的物性,进一步提高了储层的渗流能力。

综上所述,红车断裂带石炭系火山岩储层受岩性岩相、成岩作用及构造作用的共同控制。岩相控制了岩性及其分布,而岩性的物质成分从根本上控制了压实作用及其后期溶蚀作用的进行,从而主要控制了储层质量的好坏。不同的成岩作用对储层质量的影响差异较大,风化淋滤作用和溶蚀作用所形成的次生溶蚀孔隙成为火山岩主要的孔隙类型,从而改善了储层质量;而压实作用和充填作用使得原生孔隙大量减少,使储层质量变差;冷凝收缩作用和挥发组分逸散作用只对储层局部有影响。断裂活动引起构造裂缝的发育,进一步为酸性流体活动提供通道,从而形成了裂缝-溶蚀孔体系,大大地改善了储层质量。

## 5 结论

1) 红车断裂带石炭系火山岩储层岩性以火山碎屑岩和火山熔岩为主,包括火山角砾岩、凝灰质火山角砾岩、凝灰岩、安山岩和玄武岩。整体火山岩储层储集性能较差,孔隙度平均9.69%,渗透率平均 $0.24 \times 10^{-3} \mu\text{m}$ ,为特低孔、特低渗储层,其中火山角砾岩储层物性最好,其次为安山岩、玄武岩。

2) 石炭系火山岩储层孔隙类型以次生孔隙和裂缝为主,少量原生孔隙。原生孔隙主要为气孔,大部分被充填;次生孔隙主要为粒内溶孔和粒间溶孔;裂缝主要为构造裂缝,部分冷凝收缩缝和少量溶蚀缝。

3) 石炭系火山岩储层受岩性、岩相、成岩作用及构造作用的共同控制。岩性和岩相从物质成分上根本控制了储层质量的好坏;不同的成岩作用对储层质量的影响差异较大,风化淋滤作用和溶蚀作用形成了有利的储集空间类型,而压实作用和充填作用使得原生孔隙大量减少。断裂活动引起的构造裂缝发育,促成了裂缝-溶蚀孔体系的发育,从而大大改善了储层质量。

## 参 考 文 献

- [1] 刘晓宁,姜在兴,袁晓冬,等. 滦平盆地白垩系细粒火山物质对页岩油气形成的影响[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 390-406.

- LIU Xiaoning, JIANG Zaixing, YUAN Xiaodong, et al. Influence of the Cretaceous fine-grained volcanic materials on shale oil/gas, Luanping Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(2): 390-406.
- [2] 李长志, 郭佩, 柯先启, 等. 火山活动影响下的碱湖优质烃源岩成因及其对页岩油气勘探和开发的启示[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(6): 1423-1434.
- LI Changzhi, GUO Pei, KE Xianqi, et al. Genesis of high-quality source rocks in volcano-related alkaline lakes and implications for the exploration and development of shale oil and gas[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(6): 1423-1434.
- [3] ZAFFARANA C, GALLASTEGUI G, LAGORIO S, et al. Geochemical signature and reservoir conditions of Early Jurassic calc-alkaline volcanic rocks from Lonco Trapial Formation, Central Patagonia[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2018, 88: 415-445.
- [4] 曾凡成, 张昌民, 李忠诚, 等. 断块型沉火山碎屑岩致密气藏有效储层控制因素及分布规律——以松辽盆地南部王府气田白垩系沙河子组为例[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(2): 481-493.
- ZENG Fancheng, ZHANG Changmin, LI Zhongcheng, et al. Controlling factors and distribution pattern of effective tight gas pools in blocky pyroclastic rocks in the Cretaceous Shahezi Formation in Wangfu gas field, southern Songliao Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(2): 481-493.
- [5] 梁新平, 金之钧, 刘全有, 等. 火山灰对富有机质页岩形成的影响——以西伯利亚盆地中生界巴热诺夫组为例[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(1): 201-211.
- LIANG Xiping, JIN Zhijun, LIU Quanyou, et al. Impact of volcanic ash on the formation of organic-rich shale: A case study on the Mesozoic Bazhenov Formation, West Siberian Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(1): 201-211.
- [6] 王韬, 徐倩, 李永军, 等. 车排子油田南部火山岩地质时代及成因[J]. *新疆石油地质*, 2022, 43(2): 160-168.
- WANG Tao, XU Qian, LI Yongjun, et al. Geological age and petrogenesis of volcanic rocks in southern Chepaizi oilfield [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2022, 43(2): 160-168.
- [7] SCHUTTER S R. Occurrences of hydrocarbons in and around igneous rocks[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2003, 214(1): 35-68.
- [8] 邹才能, 赵文智, 贾承造, 等. 中国沉积盆地火山岩油气藏形成与分布[J]. *石油勘探与开发*, 2008, 35(3): 257-271.
- ZOU Caineng, ZHAO Wenzhi, JIA Chengzao, et al. Formation and distribution of volcanic hydrocarbon reservoirs in sedimentary basins of China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2008, 35(3): 257-271.
- [9] 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.
- [10] 徐方慧, 王祝文, 王文华, 等. 联合 EMD 和分数阶 Fourier 变换的裂缝性火成岩地层纵波和横波时频特征[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2021, 45(6): 60-71.
- XU Fanghui, WANG Zhuwen, WANG Wenhua, et al. Time-frequency characteristics of P and S waves in fractured igneous formation based on joint EMD and fractional Fourier transform[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2021, 45(6): 60-71.
- [11] 王绪诚, 陈维涛, 何叶, 等. 珠江口盆地惠西南地区古新世火山机构对有利储层的控制作用[J]. *石油实验地质*, 2022, 44(3): 466-475.
- WANG Xucheng, CHEN Weitao, HE Ye, et al. Control of Paleocene volcanic edifice on favorable reservoirs: a case study of the southwestern Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2022, 44(3): 466-475.
- [12] 杨双, 李忠博, 闫相宾, 等. 火山岩圈闭识别描述方法及其应用[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(3): 540-548.
- YANG Shuang, LI Zhongbo, YAN Xiangbin, et al. Method of identifying and characterizing of volcanic traps and its application [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(3): 540-548.
- [13] 李欣诚, 侯宇光, 陈振宏, 等. 黔南坳陷二叠纪玄武质火山活动对含煤泥页岩储层的影响[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(4): 620-627.
- LI Xincheng, HOU Yuguang, CHEN Zhenhong, et al. Influence of Permian basaltic volcanic activity on coal-bearing shale reservoirs, Southern Guizhou Depression [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(4): 620-627.
- [14] 李光云, 毛世权, 陈凤来, 等. 三塘湖盆地马朗凹陷卡拉岗组火山岩油藏主控因素及勘探方向[J]. *中国石油勘探*, 2010, 15(1): 11-15.
- LI Guangyun, MAO Shiquan, CHEN Fenglai, et al. Key controlling factors and exploration direction of volcanic reservoir in Kalagang Formation of Malang Sag in Santanghu Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2010, 15(1): 11-15.
- [15] 文龙, 李亚, 易海永, 等. 四川盆地二叠系火山岩岩相与储层特征[J]. *天然气工业*, 2019, 39(2): 17-27.
- WEN Long, LI Ya, YI Haiyong, et al. Lithofacies and reservoir characteristics of Permian volcanic rocks in the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(2): 17-27.
- [16] 王泽华, 朱筱敏, 孙中春, 等. 测井资料用于盆地中火成岩岩性识别及岩相划分: 以准噶尔盆地为例[J]. *地学前缘*, 2015, 22(3): 254-268.
- WANG Zehua, ZHU Xiaomin, SUN Zhongchun, et al. Igneous lithology identification and lithofacies classification in the basin using logging data: Taking Junggar Basin as an example[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(3): 254-268.
- [17] FAN Cunhui, LI Hu, QIN Qirong, et al. Formation mechanisms and distribution of weathered volcanic reservoirs: A case study of the carboniferous volcanic rocks in northwest Junggar Basin, China [J]. *Energy Science & Engineering*, 2020, 8(8): 2841-2858.
- [18] YANG Zhi, ZHU Aiguo, CHEN Yanhui, et al. The characteristics of Carboniferous volcanic lithofacies and volcanic reservoirs of Ke-Bai Fault Belt, northwestern Junggar Basin [J]. *Geological Journal*, 2021, 56(8): 4280-4292.
- [19] 肖重阳, 杨林, 林波, 等. 塔里木盆地顺北地区二叠纪火山活动期次与分布[J]. *石油实验地质*, 2020, 42(2): 177-185.
- XIAO Chongyang, YANG Lin, LIN Bo, et al. Volcanic activity stages and distribution during the Permian in the Shunbei area, Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42



- (2): 177-185.
- [20] CHENG Hanlie, MA Peng, DONG Guofeng, et al. Characteristics of carboniferous volcanic reservoirs in Beisantai Oilfield, Junggar Basin [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, 2022: 7800630.
- [21] 黄玉, 白晓寅, 郭璇, 等. 层序约束下的火山岩储层地震反演技术及其应用[J]. *岩性油气藏*, 2011, 23(6): 89-92.  
HUANG Yu, BAI Xiaoyan, GUO Xuan, et al. Seismic inversion technique based on volcanic sequence and its application [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2011, 23(6): 89-92.
- [22] ZHU Danping, LIU Xuwei, GUO Shaobin. Reservoir formation model and main controlling factors of the carboniferous volcanic reservoir in the Hong-Che fault zone, Junggar Basin [J]. *Energies*, 2020, 13(22): 6114.
- [23] MAO Zhiguo, ZHU Rukai, WANG Jinghong, et al. Characteristics of diagenesis and pore evolution of volcanic reservoir: A case study of Junggar Basin, northwest China [J]. *Journal of Earth Science*, 2021, 32(4): 960-971.
- [24] 苏培东, 秦启荣, 袁云峰, 等. 红车断裂带火山岩储集层裂缝特征[J]. *新疆石油地质*, 2011, 32(5): 457-460.  
SU Peidong, QIN Qirong, YUAN Yunfeng, et al. Characteristics of volcanic reservoir fractures in upper wall of Hongche fault belt [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2011, 32(5): 457-460.
- [25] MA Shangwei, LUO Jinglan, HE Xianying, et al. The influence of fracture development on quality and distribution of volcanic reservoirs: A case study from the carboniferous volcanic reservoirs in the Xiquan area, eastern Junggar Basin [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, 12(4): 110.
- [26] 吴孔友, 郭建勋, 姚卫江, 等. 准噶尔盆地红车断裂带结构与成藏差异性分析[J]. *地质与资源*, 2019, 28(1): 57-65.  
WU Kongyou, GUO Jianxun, YAO Weijiang, et al. Analysis on the structure and accumulation differences of Hongche fault belt in Junggar Basin [J]. *Geology and Resources*, 2019, 28(1): 57-65.
- [27] 石骏铭, 张欣, 蒲钰龙, 等. 车21井区石炭系低孔特低渗火山岩油藏地质特征[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2020, 40(2): 135-136.  
SHI Junming, ZHANG Xin, PU Yulong, et al. Geological characteristics of Carboniferous low porosity ultra-low permeability volcanic rock reservoir in Well Che 21 area [J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2020, 40(2): 135-136.
- [28] 蒋奇君, 李勇, 刘向君, 等. 准噶尔盆地红车断裂带多源多期油气成藏控制因素及有利勘探方向[J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(5): 807-820.  
JIANG Qijun, LI Yong, LIU Xiangjun, et al. Controlling factors of multi-source and multi-stage complex hydrocarbon accumulation and favorable exploration area in the Hongche fault zone, Junggar Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(5): 807-820.
- [29] 赵爱文, 王振奇, 李伟强. 准噶尔盆地西北缘红车断裂带油气来源与成藏模式[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2015, 30(5): 16-22, 6-7.  
ZHAO Aiwu, WANG Zhenqi, LI Weiqiang. Hydrocarbon sources and accumulation modes of Hongche fault zone in the northwestern margin of Junggar Basin [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition)*, 2015, 30(5): 16-22, 6-7.
- [30] LI Yong, LU Juegang, LIU Xiangjun, et al. Geochemistry and origins of natural gas in the Hong-Che fault zone of the Junggar Basin, NW China [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 214: 110501.
- [31] HE Qingbo, CHEN Shijia, WANG Jian, et al. Geochemical characteristics and origin of crude oil from Carboniferous volcanic rocks in the Hongche fault zone of the Junggar Basin of China [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 953245.
- [32] 冯梓岩, 殷文, 钟云滔, 等. 基于常规测井的火成岩岩性识别方法——以准噶尔盆地西北缘红车断裂带石炭系火成岩储层为例[J]. *东北石油大学学报*, 2021, 45(5): 95-108, 11-12.  
FENG Ziyang, YIN Wen, ZHONG Yuntao, et al. Lithologic identification of igneous rocks based on conventional log: A case study of Carboniferous igneous reservoir in Hongche fault zone in northwestern Junggar Basin [J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2021, 45(5): 95-108, 11-12.
- [33] 殷文, 冯程, 周发鑫, 等. 红车断裂带石炭系火山岩岩性岩相特征分析及储层识别[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2023, 47(1): 50-61.  
YIN Wen, FENG Cheng, ZHOU Faxin, et al. Lithology and lithofacies characteristics analysis and reservoir identification of Carboniferous volcanic rocks in Hongche fault zone [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2023, 47(1): 50-61.
- [34] 陈爱章, 刘文锋, 谢天寿, 等. 火山岩孔缝型油气藏产能特征及控制因素——以准噶尔盆地金龙10井区为例[J]. *天然气地球科学*, 2020, 31(6): 877-889.  
CHEN Aizhang, LIU Wenfeng, XIE Tianshou, et al. Productivity characteristics and controlling factors of carboniferous volcanic reservoir: Case study of Jinlong 10 well area in the Junggar Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2020, 31(6): 877-889.
- [35] 仲伟军, 黄新华, 张玉华, 等. 准噶尔盆地红车断裂带结构特征及其控藏作用[J]. *复杂油气藏*, 2018, 11(2): 1-5.  
ZHONG Weijun, HUANG Xinhua, ZHANG Yuhua, et al. Structural characteristics and reservoir forming control of Hongche fault zone in Junggar Basin [J]. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 2018, 11(2): 1-5.
- [36] JIANG Wenlong, IMIN A, WANG Xueyong, et al. Geochemical characterization and quantitative identification of mixed-source oils from the Baikouquan and Lower Wuerhe formations in the eastern slope of the Mahu Sag, Junggar Basin, NW China [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 191: 107175.
- [37] 陈轩, 张昌民, 张尚锋, 等. 准噶尔盆地红车断裂带岩性地层油气藏勘探新思路[J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(4): 420-427.  
CHEN Xuan, ZHANG Changmin, ZHANG Shangfeng, et al. A new approach to the exploration of lithologic-stratigraphic reservoirs in the Hong-Che fault belt, the Junggar Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(4): 420-427.
- [38] 姚卫江, 党玉芳, 张顺存, 等. 准噶尔盆地西北缘红车断裂带石炭系成藏控制因素浅析[J]. *天然气地球科学*, 2010, 21(6): 917-923.  
YAO Weijiang, DANG Yufang, ZHANG Shuncun, et al. Formation of carboniferous reservoir in Hongche fault belt, northwestern margin of Junggar Basin [J]. *Natural Gas*

- Geoscience, 2010, 21(6): 917-923.
- [39] 范存辉, 秦启荣, 袁云峰, 等. 红车断裂带石炭系构造特征及裂缝发育模式[J]. 特种油气藏, 2010, 17(4): 47-49, 122.  
FAN Cunhui, QIN Qirong, YUAN Yunfeng, et al. Structure characteristics and fracture development pattern of the Carboniferous in Hongche fracture belt [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2010, 17(4): 47-49, 122.
- [40] YU Yangli, WANG Xin, RAO Gang, et al. Mesozoic reactivated transpressional structures and multi-stage tectonic deformation along the Hong-Che fault zone in the northwestern Junggar Basin, NW China[J]. Tectonophysics, 2016, 679: 156-168.
- [41] 李二庭, 靳军, 王剑, 等. 准噶尔盆地沙湾凹陷周缘中、浅层天然气地球化学特征及成因[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 175-185.  
LI Erting, JIN Jun, WANG Jian, et al. Geochemical characteristics and genesis of mid-to-shallow natural gas on the periphery of Shawan Sag, Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 175-185.
- [42] 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.
- [43] 薛晓军, 马玉明, 李建成, 等. 准噶尔盆地西北缘红-车断裂带中浅层降解油藏录井解释评价[J]. 石油天然气学报, 2017, 39(5): 62-71.  
XUE Xiaojun, MA Yuming, LI Jiancheng, et al. Evaluation and interpretation of medium-shallow degradation reservoirs in Hongche fault zone on the northwest margin of Junggar Basin[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2017, 39(5): 62-71.
- [44] AJDUKIEWICZ J M, LARESE R E. How clay grain coats inhibit quartz cement and preserve porosity in deeply buried sandstones: Observations and experiments [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(11): 2091-2119.
- [45] 王璞珺, 陈崇阳, 张英, 等. 松辽盆地长岭断陷火山岩储层特征及有效储层分布规律[J]. 天然气工业, 2015, 35(8): 10-18.  
WANG Pujun, CHEN Chongyang, ZHANG Ying, et al. Characteristics of volcanic reservoirs and distribution rules of effective reservoirs in the Changling fault depression, Songliao Basin[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(8): 10-18.
- [46] 李伟, 何生, 谭开俊, 等. 准噶尔盆地西北缘火山岩储层特征及成岩演化特征[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(6): 909-916.  
LI Wei, HE Sheng, TAN Kaijun, et al. Characteristics of reservoir and diagenetic evolution of volcanic rocks in northwestern Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(6): 909-916.
- [47] 刘清俊, 裴保锋, 于炳松, 等. 火山岩储层特征及影响因素分析——以新疆三塘湖盆地牛东区块为例[J]. 大庆石油地质与开发, 2011, 30(1): 25-31.  
LIU Qingjun, NIE Baofeng, YU Bingsong, et al. Analysis on characteristics and influencing factors of volcanic reservoirs——a case of Niudong Block in Santanghu Basin in Xinjiang[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2011, 30(1): 25-31.
- [48] 黄玉龙, 王璞珺, 舒萍, 等. 松辽盆地营城组中基性火山岩储层特征及成储机理[J]. 岩石学报, 2010, 26(1): 82-92.  
HUANG Yulong, WANG Pujun, SHU Ping, et al. Characteristics and formation mechanism of the Cretaceous intermediate and mafic volcanic reservoirs in Songliao Basin, NE China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(1): 82-92.
- [49] 侯连华, 邹才能, 刘磊, 等. 新疆北部石炭系火山岩风化壳油气地质条件[J]. 石油学报, 2012, 33(4): 533-540.  
HOU Lianhua, ZOU Caineng, LIU Lei, et al. Geologic essential elements for hydrocarbon accumulation within Carboniferous volcanic weathered crusts in northern Xinjiang, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 33(4): 533-540.
- [50] 孟凡超, 操应长, 崔岩, 等. 准噶尔盆地西缘车排子凸起石炭系火山岩储层成因[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(5): 22-31.  
MENG Fanchao, CAO Yingchang, CUI Yan, et al. Genesis of Carboniferous volcanic reservoirs in Chepaizi salient in western margin of Junggar Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(5): 22-31.
- [51] 邹才能, 侯连华, 杨帆, 等. 碎屑岩风化壳结构及油气地质意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(12): 2652-2664.  
ZOU Caineng, HOU Lianhua, YANG Fan, et al. Structure of weathered clastic crust and its petroleum potential [J]. Science China Earth Sciences, 2014, 44(12): 2652-2664.
- [52] 刘国平, 曾联波, 雷茂盛, 等. 徐家围子断陷火山岩储层裂缝发育特征及主控因素[J]. 中国地质, 2016, 43(1): 329-337.  
LIU Guoping, ZENG Lianbo, LEI Maosheng, et al. Fracture development characteristics and main controlling factors of the volcanic reservoir in Xujiaweizi fault depression [J]. Geology in China, 2016, 43(1): 329-337.
- [53] LIU Zhaoyi, PAN Zhejun, LI Shibin, et al. Study on the effect of cemented natural fractures on hydraulic fracture propagation in volcanic reservoirs[J]. Energy, 2022, 241: 122845.
- [54] 单玄龙, 王蔚, 张新涛, 等. 渤海海域渤中凹陷中生界火山机构地质模式及建造过程[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3): 675-688.  
SHAN Xuanlong, WANG Wei, ZHANG Xintao, et al. Geological model and construction process of the Mesozoic volcanic edifices in Bozhong Sag, Bohai Sea [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 675-688.
- [55] 高帅, 巩磊, 刘小波, 等. 松辽盆地北部深层致密火山岩气藏天然裂缝分布特征及控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(3): 503-512.  
GAO Shuai, GONG Lei, LIU Xiaobo, et al. Distribution and controlling factors of natural fractures in deep tight volcanic gas reservoirs in Xujiaweizi area, northern Songliao Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(3): 503-512.
- [56] 王京红, 邹才能, 靳久强, 等. 火成岩储集层裂缝特征及成缝控制因素[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(6): 708-715.  
WANG Jinghong, ZOU Caineng, JIN Jiuqiang, et al. Characteristics and controlling factors of fractures in igneous rock reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(6): 708-715.

(编辑 张亚雄)