

文章编号: 0253-2697(2016)05-0631-13 DOI:10.7623/syxb201605007

松辽盆地下白垩统沉火山碎屑岩优质储层特征和形成机理

唐华风¹ 孔 坦¹ 刘 祥² 杨 迪¹ 霍宏宇² 黄玉龙¹

(1. 吉林大学地球科学学院 吉林长春 130061; 2. 中国石油吉林油田公司勘探开发研究院 吉林松原 138000)

摘要:松辽盆地王府断陷沉火山碎屑岩中发现了高丰度气藏,但对该类优质储层分布规律和形成机制的认识还不清楚。以王府断陷 CS6 井区沙河子组为例,利用铸体薄片、压汞法、压汞法和核磁共振方法研究了储集空间类型、储层物性、孔喉和孔隙直径,探讨了优质储层的形成机理和主控因素。研究表明优质储层岩性为沉集块岩和沉角砾岩,为向上变粗的序列。进一步识别出 3 类 7 种储集空间类型,其中具有丰富原生孔隙的岩屑内气孔是沉火山碎屑岩优质储层独有特征,为大孔隙-小喉道型储层;沉集块岩孔隙稍高于沉角砾岩,二者均明显高于沙河子组沉积岩,其孔隙度与埋深关系密切。沉火山碎屑岩储层形成机理为母岩挥发分逸出、颗粒支撑、溶蚀和构造改造作用,其中前两者为主控因素。研究区优质储层主要分布在沉火山碎屑岩扇体平面位置的中部,其中颗粒支撑、颗粒粗、岩屑内气孔碎屑含量高和埋深小于 3000 m 的沉火山碎屑岩最为有利。

关键词:沉火山碎屑岩;储层形成机理;有利勘探目标;沙河子组;王府断陷;松辽盆地

中图分类号:TE122.2 **文献标识码:**A

Characteristics and formation mechanisms of high quality reservoir of volcaniclastic sedimentary rocks of Early Cretaceous in Songliao Basin

Tang Huafeng¹ Kong Tan¹ Liu Xiang² Yang Di¹ Huo Hongyu² Huang Yulong¹

(1. College of Earth Science, Jilin University, Jilin Changchun 130061, China;

2. Exploration and Development Institute, PetroChina Jilin Oilfield Company, Jilin Songyuan 138000, China)

Abstract: The prolific gas reservoir of volcaniclastic sedimentary rocks of Early Cretaceous of Wangfu fault sag (WFS) in Songliao Basin (SB) was found in 2011. However, the characteristics and formation mechanisms of high quality reservoirs in volcaniclastic sedimentary rocks of SB is not well understood. In this paper, volcaniclastic sedimentary rocks of Shahezi Formation of well block CS6 in WFS of SB is taken as an example of high quality reservoirs. The void space, porosity-permeability, pore throat and pore diameter are discussed using the following method; thin sections impregnated with blue epoxy resin, helium (He) injection, mercury (Hg) injection and nuclear magnetic resonance respectively. The formation mechanism and main controlling factors of high quality reservoirs are analyzed based on all the above methods. The result shows that the high quality reservoirs are reworked lapilli and breccia, and exhibits the coarsening-upward successions. Primary and secondary porosity and secondary fracture porosity has been identified. The intragranular vesicular of primary porosity are distinguished void space of high quality reservoirs. It has the characteristics of large pore and small throat. The porosity and permeability of reworked breccia is higher than reworked lapilli, and both display relatively higher porosity and permeability than the sedimentary rocks in Shahezi Formation. The porosity is correlated to burial depth. The formation mechanism of volcaniclastic sedimentary rocks reservoir are gas released in parent rocks, grain-support contacts, alteration by organic acid and tectonic deformation. The main controlling factors of reservoirs formation are gas released in parent rocks and the grain-support. The high quality reservoirs are distributed in the middle part of alluvial fan of volcaniclastic sedimentary rocks. Volcaniclastic sedimentary rocks with grain-support, coarse particle, highly percentage of volcaniclasts with intragranular vesicle and burial depth less than 3000 m are the favorable target of exploration.

Key words: volcaniclastic sedimentary rocks; reservoir formation mechanism; favorable exploration target; Shahezi Formation; Wangfu fault sag; Songliao Basin

引用:唐华风,孔坦,刘祥,杨迪,霍宏宇,黄玉龙.松辽盆地下白垩统沉火山碎屑岩优质储层特征和形成机理[J].石油学报,2016,37(5):631-643.

Cite: Tang Huafeng, Kong Tan, Liu Xiang, Yang Di, Huo Hongyu, Huang Yulong. Characteristics and formation mechanisms of high quality reservoir of volcaniclastic sedimentary rocks of Early Cretaceous in Songliao Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(5): 631-643.

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目(2012CB822002)、国家自然科学基金项目(No. 41472304)和吉林大学优秀青年教师培养计划项目资助。

第一作者及通信作者:唐华风,男,1979年6月生,2001年获吉林大学学士学位,2007年获吉林大学矿产普查与勘探专业博士学位,现为吉林大学地球科学学院副教授,主要从事火山地层和火山岩储层研究。Email: tanghfc@jlu.edu.cn

沉火山碎屑岩是介于火山碎屑岩和沉积岩之间的过渡型岩石,形成于火山和沉积改造的双重作用之下。沉火山碎屑岩广泛分布于火山盆地中,是火山地层的重要组成部分,如松辽盆地断陷期地层(火石岭组、沙河子组和营城组)、辽河拗陷沙河街组和意大利 Stromboli 火山^[1-3]。其在横向上有3种分布类型,熔岩—碎屑熔岩—火山碎屑岩—沉火山碎屑岩、火山碎屑岩—沉火山碎屑岩以及只有沉火山碎屑岩^[4-6]。相比其他熔岩类和火山碎屑岩类,沉火山碎屑岩更方便与盆地中心区泥岩形成生-储-盖组合^[7],更有利于形成岩性油气藏或构造-岩性油气藏。

野外露头 and 浅钻井揭示沉火山碎屑岩可发育良好的储层,如在美国黄石国家公园 Y-8 井的沉火山碎屑岩孔渗条件与火山碎屑岩相当,明显好于碎屑熔岩和熔岩^[8];九台地区的营三 D1 井和营一 D1 井揭示的营城组沉火山碎屑岩储层稍差于美国黄石国家公园的 Y-8 井^[9,10],但其均好于松辽盆地徐家围子断陷和长岭断陷火山岩^[11]。这显示了沉火山碎屑岩具有形成良好储层的可能。同时在全球多处也发现沉火山碎屑岩油气藏和油气显示^[12],表明沉火山碎屑岩具有良好的勘探潜力。但在同一盆地,在烃源岩供给等条件相同的情况下,仅有少数沉火山碎屑岩取得突破。2011年在松辽盆地南部王府断陷 CS6 井沙河子组发现沉火山碎屑岩气藏,其单井试气产能高达 $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,控制储量可达 $500 \times 10^8 \text{ m}^3$,相比较在松辽盆地英台断陷、渤海湾盆地^[13]、海拉尔盆地^[14]、二连盆地^[15]、三塘湖盆地^[16]、酒泉盆地^[17]、新西兰 Taranaki 盆地^[18,19] 和美国 Great 盆地^[20] 等,这是目前发现的单个储量最大

和丰度最高的沉火山碎屑岩气藏。发现的沉火山碎屑岩优质储层,展示了松辽盆地沉火山碎屑岩良好的勘探前景。松辽盆地断陷地层中广泛发育沉火山碎屑岩,沉火山碎屑岩仅在少数区域获得突破,究其原因因为目前对沉火山碎屑岩优质储层特征、形成机理以及成藏规律等认识还不清楚。笔者以 CS6 井区为例进行沉火山碎屑岩优质储层的岩石学特征、储层特征和形成机理的分析,以期对沉火山碎屑岩油气藏高效勘探开发提供依据。

1 沉火山碎屑岩岩性特征

沉火山碎屑岩指火山碎屑物含量为 50%~90%,经受水搬运作用,成岩方式为压实胶结^[21,22]。碎屑颗粒磨圆程度可为各种类型,但通常分选差;按粒度可细划为沉凝灰岩、沉角砾岩和沉集块岩,以及之间的过渡类型;按成分可划分为复成分和单成分,单成分可以是流纹质、安山质、玄武质和之间的过渡成分。

松辽盆地主要经历了3个不同的演化阶段,分别为下部的断陷层,中部的拗陷层,上部的构造反转层;断陷层的地层为火石岭组、沙河子组和营城组,拗陷层的地层为登娄库组、泉头组、青山口组、姚家组和嫩江组,构造反转层地层为四方台组、明水组、依安组^[23]。CS6 井区位于松辽盆地中东部的王府断陷(图 1),CS6 井和 CS601 井岩心揭示该区沉火山碎屑岩主要是沉火山集块岩和沉火山角砾岩(图 2),CS6 井区沙河子组沉火山碎屑岩主要经历营城组沉积后期和嫩江组沉积后期 2 期构造反转运动。角砾集块成分主要是粗安岩(85%),少量石英岩(5%)和流纹岩(10%)。多数集

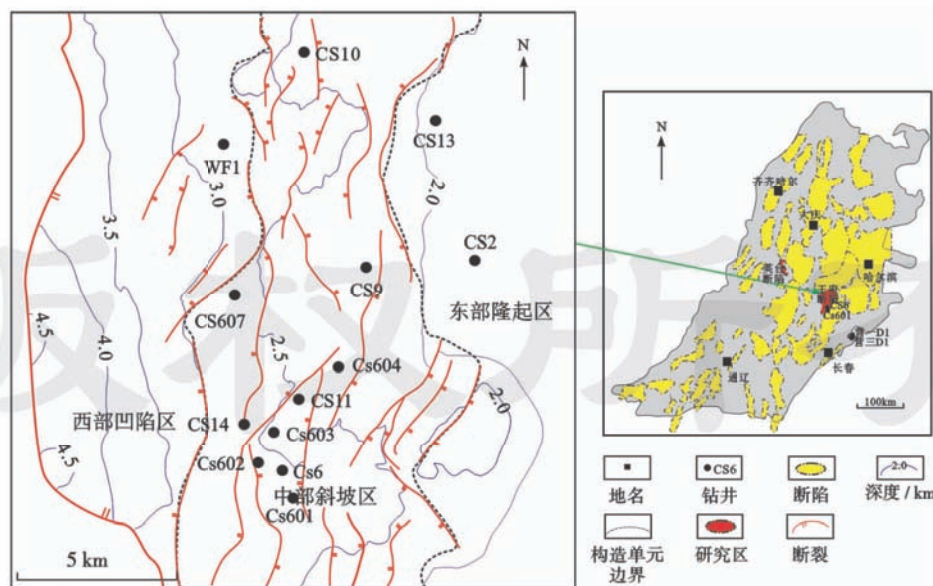


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

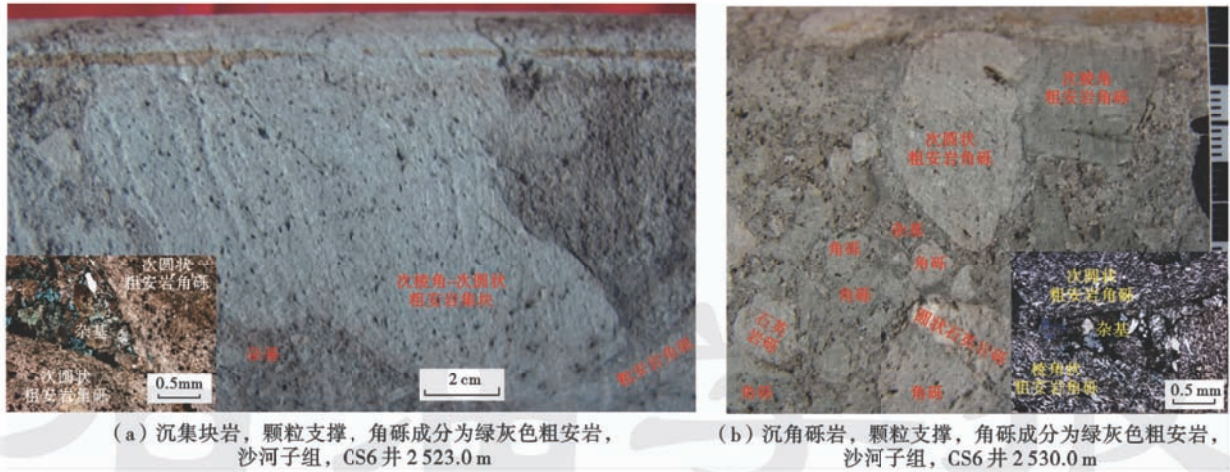


图 2 王府断陷 CS6 井区沉火山碎屑岩类型和特征

Fig. 2 Types and features of volcanoclastic sedimentary rocks for CS6 well block in Wangfu fault sag, Songliao Basin

块和角砾呈次棱角状一次圆状,颗粒定向性不明显、分选差、颗粒支撑—杂基支撑,杂基多为粗颗粒的凝灰。上述特征表明该沉火山碎屑岩应为近距离搬运和快速堆积的产物。

CS6 井区沉火山碎屑岩在平面上呈近 NS 向展布的扇状[图 3(a)],地震剖面揭示沉火山碎屑岩呈楔形和丘形,内部是中弱振幅,连续性好[图 3(b)];根据井震联合波阻抗反演结果可知厚度最大可达 200 m,主要分布在 CS602 井和 CS6 井南侧。沉集块岩主要分布在 CS6 井、CS601 井和 CS603 井,其他钻井揭示均为沉角砾岩[图 3(a)和图 3(b)]。以下伏煤层为参照面,利用岩性和测井曲线资料进行沉火山碎屑岩对比,可将沉火山岩碎屑岩划分为 4 个砂组,纵向上存在 2 种岩性序列:厚层状沉角砾/集块岩和薄层沉角砾/集块岩与泥岩互层;上部沉火山碎屑岩较为发育,下部沉火山碎屑岩分布较为局限,整体上表现为向上变粗的序列[图 3(c)]。目前产气段主要集中在砂组 3。

2 沉火山碎屑岩储层特征

2.1 储集空间类型

前人研究表明,根据孔隙的成因可将火山岩储集空间划分为原生孔隙、原生裂缝、次生孔隙和次生裂缝 4 种^[24-27]。按照该划分方案,通过岩心宏观描述和铸体薄片镜下鉴定,共识别出原生孔隙、次生孔隙和次生裂缝 3 类。其中原生孔隙主要有岩屑内气孔、粒间孔,对储层贡献率约为 54.9%;次生孔隙主要有铸模孔、海绵状溶蚀孔、筛状溶蚀孔和粒间-溶蚀孔,对储层的贡献率约为 34.6%;次生裂缝主要是构造缝,对储层的贡献率约为 10.5%。

2.1.1 原生孔隙

(1) 岩屑内气孔是富集气孔的母岩在剥蚀和搬运

过程中,一些气孔仍然得以保存在火山岩岩屑中形成的,如角砾或集块。在研究区该种孔隙形状不规则,呈离散状分布,直径为 0.1~1.0 mm,充填程度低[图 4(a)和图 4(b)]。该种孔隙是沉火山碎屑岩区别于陆源碎屑岩的显著特征,主要分布于沉火山集块/角砾岩中粗面岩集块和角砾内,在 CS6 井和 CS601 井中广泛分布。

(2) 粒间孔是由颗粒支撑而未完全被基质充填而形成的孔隙。该类孔隙形态不规则,呈离散状分布,研究区的粒间孔多经受了溶蚀溶解作用而扩大,这也是沉火山碎屑岩中主要的储集空间类型。

2.1.2 次生孔隙

(1) 铸模孔是岩屑中的矿物经强烈溶蚀溶解作用,次生矿物被溶解迁移后只保留了矿物晶形而形成的孔隙。研究区只是见到了部分具有菱形的铸模孔,直径为 50 μm[图 4(c)和图 4(d)],根据其棱形外形推测是由角闪石溶蚀溶解而成。

(2) 筛状溶蚀孔是矿物经较强烈溶蚀溶解作用矿物表面形成的具有筛网状的孔隙。研究区粗安质角砾中的碱性长石[图 4(d)]发现了筛状溶蚀孔。

(3) 海绵状溶蚀孔是岩屑经较弱溶蚀溶解作用,次生矿物被少量溶蚀后形成的孔隙或次生矿物结晶过程中形成的微孔隙。在研究区流纹质晶屑凝灰岩角砾中[图 4(e)和图 4(f)]发现了海绵状溶蚀孔,表现为铸体液可注入,但颜色较之其他孔隙类型浅。

(4) 粒间-溶蚀孔是颗粒间充填基质的矿物、火山灰和火山玻璃等遭受溶蚀溶解作用,使原生粒间孔得以扩大而形成的复合孔隙;在区分粒间孔和溶蚀扩大孔存在困难,所以统称为粒间-溶蚀孔。研究区可见丰富的粒间-溶蚀孔,直径为 0.1~0.5 mm,对孔隙度的贡献率应该较高[图 4(c)]。

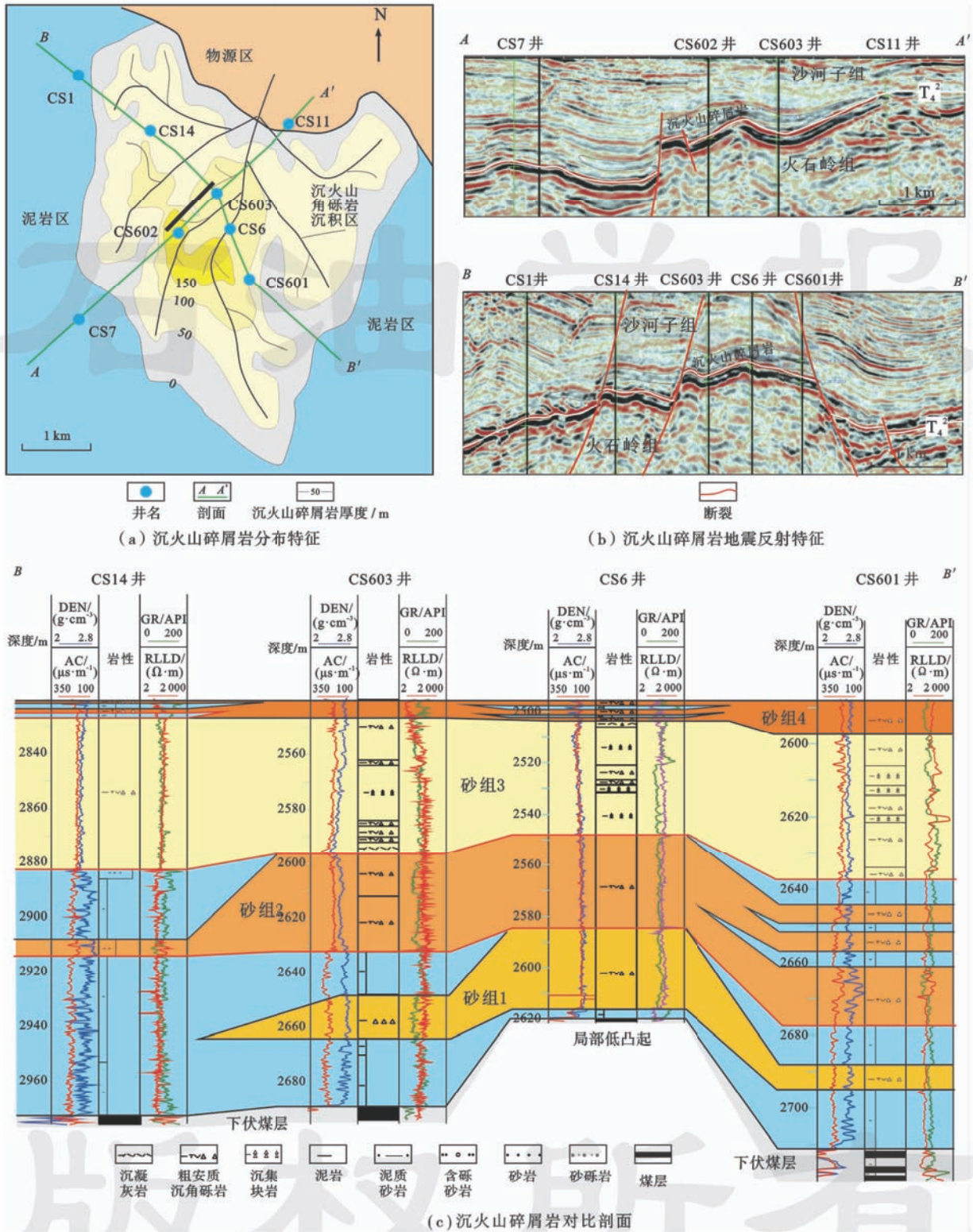


图3 王府断陷CS6井区沙河子组沉火山碎屑岩分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of volcaniclastic sedimentary rocks for CS6 well block in Wangfu fault sag, Songliao Basin

2.1.3 次生裂缝

次生裂缝是后期在构造应力或埋藏压实条件下形成的裂缝,可切穿火山岩屑或矿物,多是成组出现,也可是共轭状态。在岩心上可见含煤沉凝灰岩中发育镜面擦痕[图4(g)和图4(h)],形态平直,充填程度低。

此外裂缝还可见2类,①无充填或充填程度低的构造裂缝(小型断层)[图4(g)];②有充填的裂缝,缝面平直切穿了角砾和石英碎屑,缝中充填石英,充填程度50%~95%[图4(h)],可对岩石孔隙的连通起到重要的作用。

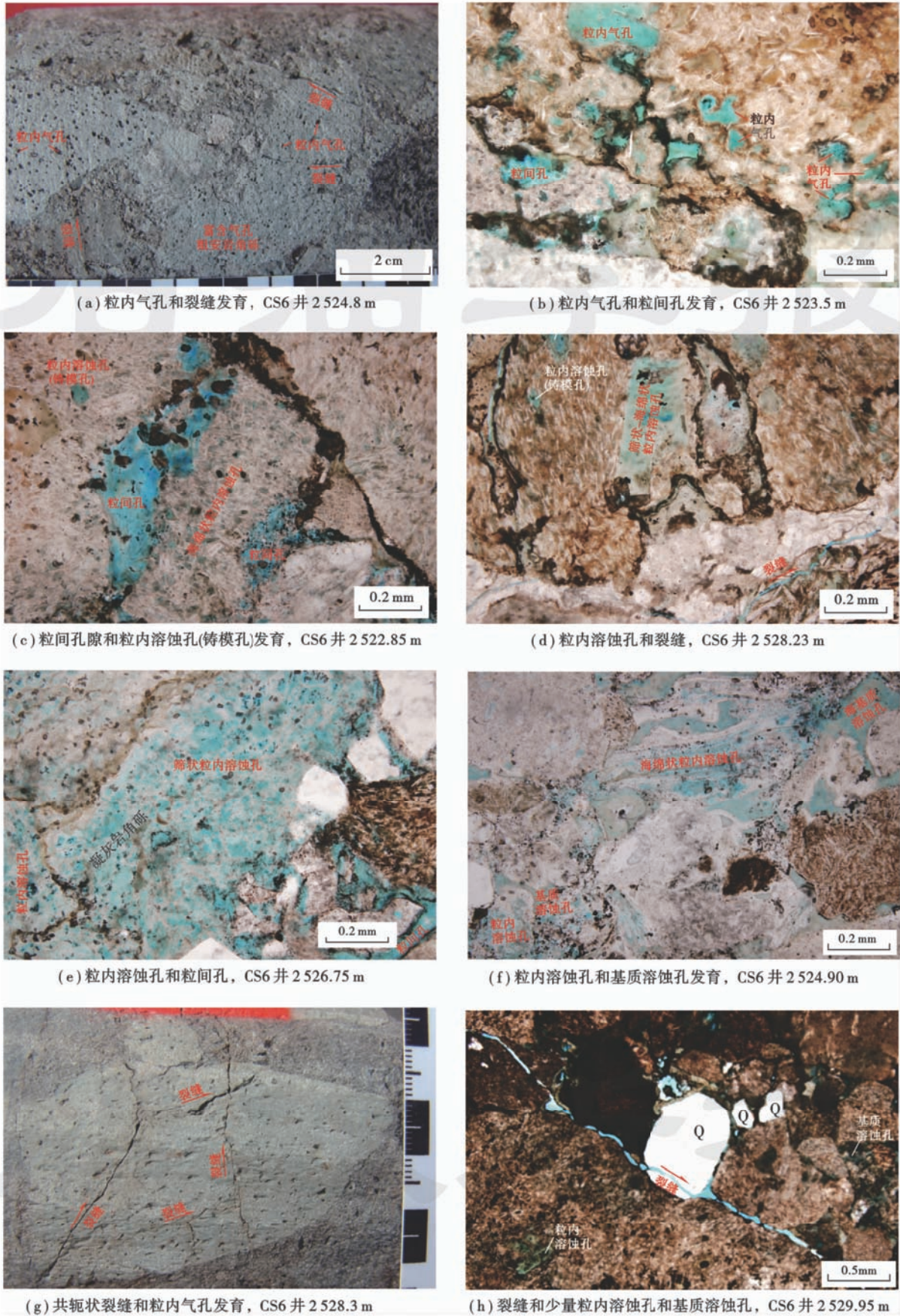


图 4 王府断陷 CS6 井区沙河子组沉火山碎屑岩储集空间特征

Fig. 4 Reservoir space features of volcaniclastic sedimentary rocks for CS6 well block in Wangfu fault sag, Songliao Basin

2.2 储层物性特征

孔隙度和渗透率样品为直径 2.5 cm 和长度约 3 cm 的圆柱体,利用压氦法进行孔隙度-渗透率的测试,在中国石油吉林油田公司勘探开发研究院实验中心完成测试,实验结果见图 5(a)。整体上看孔隙度范围为 1.27%~11.40%,渗透率范围为 0.000 3~3.230 0 mD。从孔隙

度和渗透率平均值来看,沉集块岩略高于沉角砾岩,明显高于沙河子组沉积岩(表 1);从渗透率级差(最大渗透率与最小渗透率的比值)来看,沉集块岩为 10 766、沉角砾岩为 800、砂砾岩为 16.1,表明沉集块岩储层非均质性强于沉角砾岩、远强于砂砾岩。所以沉火山碎屑岩物性高于相邻的砂砾岩,但非均质性也更强。

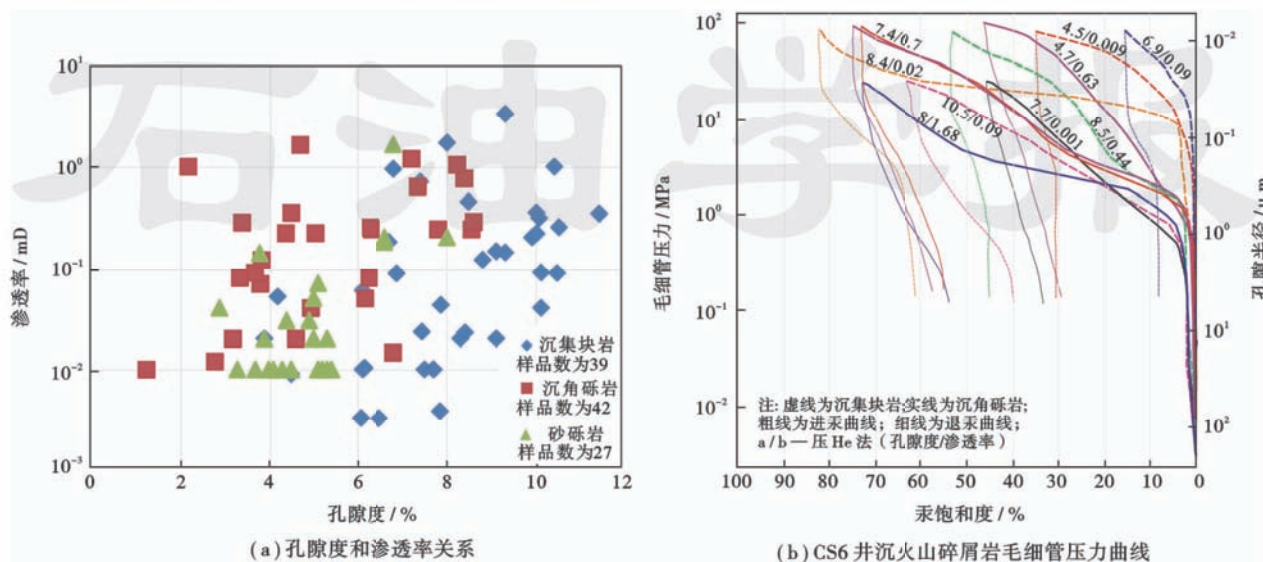


图 5 王府断陷 CS6 井区沙河子组沉火山碎屑岩孔隙度-渗透率和毛细管压力曲线特征

Fig. 5 Porosity and permeability feature and the capillary pressure curve feature of volcaniclastic sedimentary rocks for CS6 well block in Wangfu fault sag, Songliao Basin

表 1 浅埋藏沉火山碎屑岩、深埋藏沉火山碎屑岩和深埋藏火山岩的孔隙度与渗透率对比

Table 1 Comparison of porosity and permeability among shallow buried of volcaniclastic sedimentary rocks, deep-buried of volcaniclastic sedimentary rocks and deep-buried volcanic rocks

岩性	地点和地层	孔隙度/%	渗透率/mD
浅埋藏沉火山碎屑岩	美国黄石国家公园 Y-8 井 ^[8]	15.5~31.6/27.2[5]	(<0.10)~(>5000)/346[39]
	吉林九台营三 D1 井 ^[9]	16.9~24.0/21.1[7]	0.64~1.29/1.02[7]
	吉林九台营一 D1 井 ^[10]	9.6~25.1/21.3[4]	0.02~2.43/0.47[4]
深埋藏沉火山碎屑岩	英台断陷营城组二段	沉凝灰岩 0.1~11.2/5.1[250]	0.001~6.60/0.12[249]
		沉角砾岩 0.9~11.4/6.7[25]	0.003~1.00/0.14[24]
	王府断陷 CS6 井区沙河子组	沉角砾岩 1.3~10.6/6.6[42]	0.002~1.60/0.22[42]
		沉集块岩 3.9~11.4/8.2[39]	0.0003~3.23/0.29[39]
深埋藏火山岩	徐家围子断陷和长岭断陷营城组 ^[11]	熔岩 0.3~21.9/7.4[249]	0.004~17.3/0.08[249]
		碎屑熔岩 0.2~15.6/6.4[300]	0.002~5.33/0.05[300]
		火山碎屑岩 0.7~14.3/4.6[62]	0.004~4.64/0.03[62]

注:“/”后为平均值,[]中为样品数。

2.3 储层孔喉特征

毛细管压力曲线样品为直径 2.5 cm 和长度约 3 cm 的圆柱体,样品测试在中国石油勘探开发研究院廊坊分院测试中心完成,测试结果见图 5(b)。从整体上看沉火山碎屑岩属于小孔喉储层,排驱压力范围为 0.52~55.30 MPa,最大进汞饱和度为 15%~82%,退汞效率为 12.3%~49.3%,表明储层孔喉变化较大。图 5(b)中虚线部分样品为沉集块岩、实线部分样品为沉角砾岩,对比 2 种岩性的毛细管压力曲线形态可知,形态与岩性的关系不明显,沉集块岩与沉角砾岩均为小

孔喉的特征,其中沉集块岩的喉直径均值在 0.014~0.480 μm,沉角砾岩的喉直径均值在 0.16~0.43 μm。

2.4 储层孔隙直径特征

核磁测试样品为直径 2.5 cm 和长度约 3 cm 的圆柱体,样品测试在中国石油勘探开发研究院廊坊分院测试中心完成,测试结果见图 6。其中多数样品显示弛豫时间谱宽,其分布范围为 0.1~3 000 ms,表明其孔隙直径分布范围大。曲线形态可划分为 2 类,为中高幅双峰态和中高幅单峰态;前者表明孔隙中具有大直径孔隙和小直径孔隙[图 6(a)],后者表明样品中大直径孔隙含量稀

少、仅发育小直径孔隙[图 6(b)]。图 6(b)中虚线部分样品是采自于沉集块岩,实线部分样品采自于沉角砾岩。沉集块岩孔隙均大,沉角砾岩孔隙部分大、部分小,这是因为沉集块岩样品中均发育岩屑内气孔、粒间孔或裂缝,沉角砾岩样品中部分发育上述孔隙、部分不发育。对比储集空间类型之间的差异可知,弛豫时间 < 10 ms 的区域对应溶蚀孔,且多是选择性溶蚀形成的海绵状-筛状溶蚀孔;弛豫时间在 10~1000 ms 时对应岩屑内气

孔、粒间孔或裂缝,也可能是完全溶蚀形成的铸模孔,对比岩心分析可知孔隙直径可达 1 mm。结合毛细管压力曲线可知,沉火山碎屑岩为大孔隙-小喉道储层。

2.5 优质储层分布特征

利用实测孔隙度标定,根据密度、声波和电阻率曲线解释孔隙度,然后进行井间对比。可知在 CS6 井和 CS603 井区域平均孔隙度最高,以此为中心,向四周降低(图 7)。从图 7(b)和图 7(c)中可知,高孔隙带主要

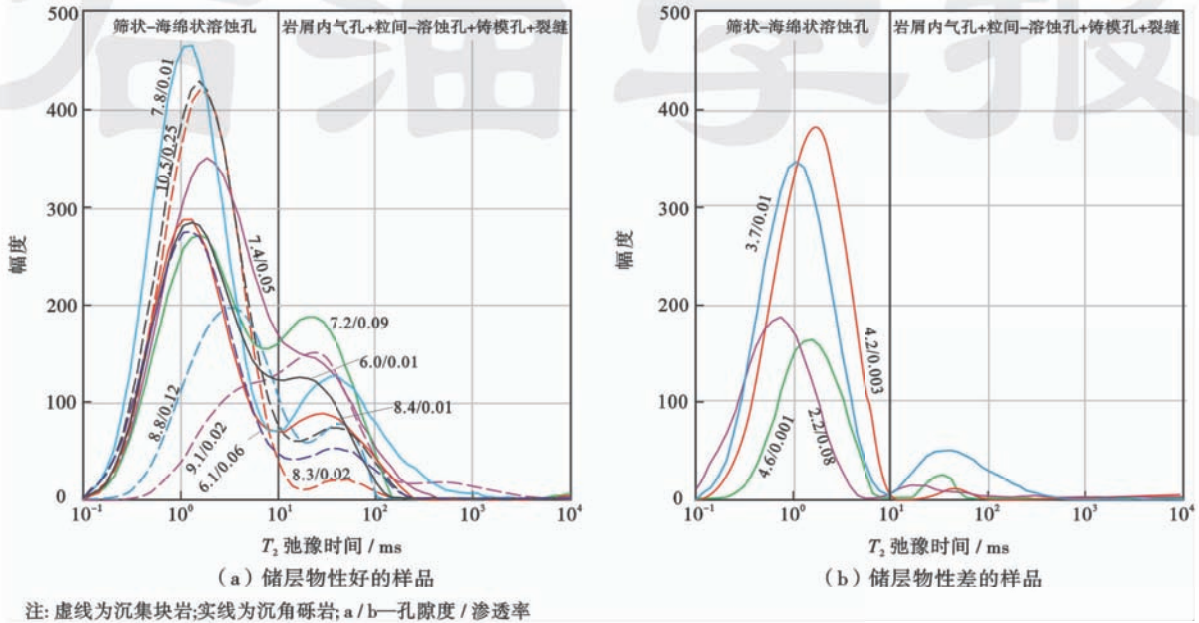


图 6 王府断陷 CS6 井区沙河子组沉火山碎屑岩核磁特征

Fig. 6 Characterization of nuclear magnetic resonance of volcaniclastic sedimentary rocks for CS6 well block in Wangfu fault sag, Songliao Basin

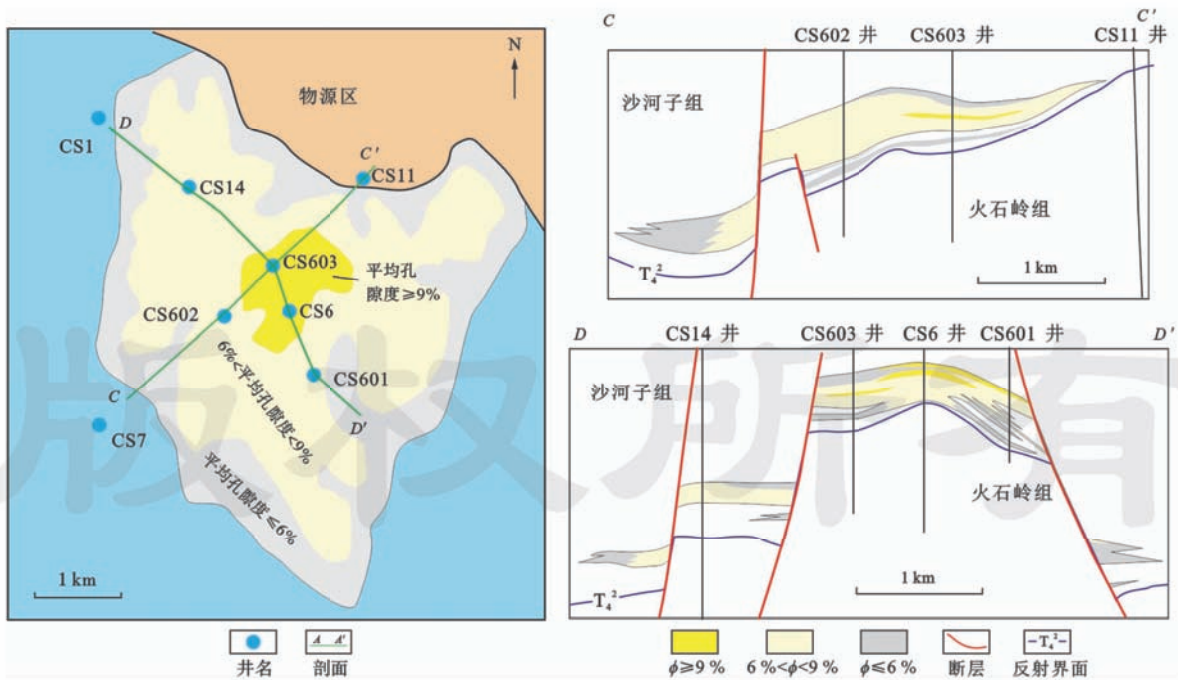


图 7 王府断陷 CS6 井区沙河子组沉火山碎屑岩测井解释孔隙度分布特征

Fig. 7 Distribution characteristics of porosity of log interpretation of volcaniclastic sedimentary rocks for CS6 well block in Wangfu fault sag, Songliao Basin

分布在 CS6 井中上部、CS601 井顶部和 CS603 井中部,多数井段的测井解释孔隙度在 6%~9%;在沉火山碎屑岩边部孔隙度多低于 6%,多数薄层沉火山碎屑岩的孔隙度也小于 6%;表明储层与粒度具有相关性。上述特征在平面分布上与火山岩储层分布特征具有一定的相似性,即地质体中心部位好^[28];在纵向分布上不受界面的约束,这与熔岩储层受界面控制不一致^[29,30]。

3 沉火山碎屑岩储层形成机理

3.1 (母岩)挥发分逸出作用

沉火山碎屑岩母岩在冷凝固结成岩过程中,岩浆中的挥发分,如水、二氧化碳、氟、氯等组分,在岩浆温度压力下降时从岩浆中逸出。并随熔岩的迁移发生膨胀—上升—合并^[31-33],被冷却的熔浆捕获,则形成气孔,并在剥蚀、搬运和沉积分散过程中得以保存。通过面孔率分析可知岩屑内气孔的面孔率可达 7.8%,如图 8 所示岩屑内气孔对孔隙的贡献可达 80%,粒间-溶蚀孔仅有 20%,该作用对于研究区沉火山碎屑岩优质储层形成有着至关重要的作用。CS6 井和 CS14 井的角砾均为粗安岩,CS601 井含有流纹岩角砾,而该部分角砾不发育岩屑内气孔。岩屑内气孔得以保存的先决条件是岩屑直径需要足够大,因为只要气孔暴露就会遭受侵蚀而消失,即使得以保存由于细碎屑的充填孔隙也难以形成有效孔隙。如图 9 所示,颗粒直径在大于 8 mm 时含有岩屑内气孔,颗粒直径小于 3 mm 时则不含岩屑内气孔;颗粒大的发育岩屑内气孔的比例高,颗粒小的发育岩屑内气孔的比例低。这可能与离火山碎屑物源近、颗粒大、外碎屑含量低,离火山物源远、颗粒小、外碎屑含量高相关,CS601 井岩心中就含有

流纹岩角砾(不含岩屑内气孔)。所以岩屑气孔保存最好的方式就是大直径的岩屑,且颗粒越大、保存越好,这也是促使在埋藏压实作用较强区域的沉集块岩/沉角砾岩储层好于沉凝灰岩的重要因素。如果岩屑内气孔与粒间-溶蚀孔、筛状溶蚀孔、海绵状溶蚀孔或次生裂缝相互配合时能显著提高储层的品质。

3.2 颗粒支撑作用

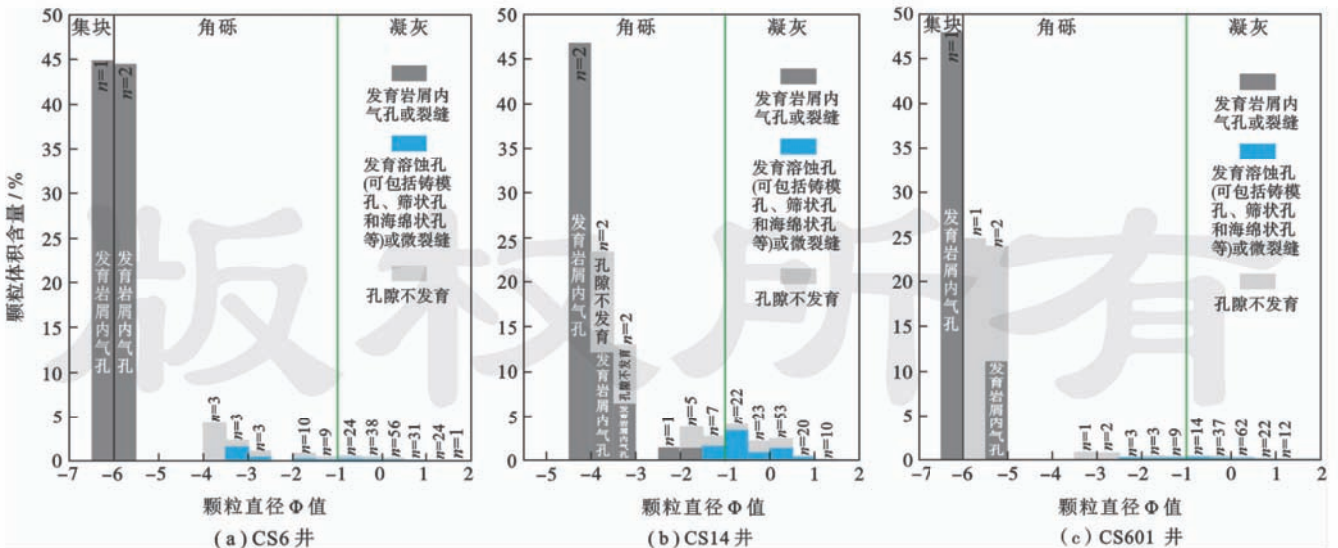
颗粒支撑作用是由于火山碎屑颗粒之间的互相支撑,形成岩石骨架。骨架的形成对于储层的形成具有 2 方面的作用:①在支架之中未充填或低充填程度时可形成粒间孔,②由于颗粒支架的支撑作用,减少压实作用对粒间孔和基质溶蚀孔的破坏。如图 4(b)、图 4(c)和图 8 所示,颗粒间存在线-凹凸接触,表明其机械压实作用较为明显,幸运的是存在一些抗压颗粒支撑形



注:根据图 4(b)样品解释,CS6 井 2523.5 m。

图 8 沉火山碎屑岩储集空间的构成特征

Fig. 8 Characteristics of void space of volcaniclastic sedimentary rocks



注:n 为颗粒数。

图 9 沉火山碎屑岩颗粒直径与储集空间类型的关系

Fig. 9 Relationship between grain size and void space of volcaniclastic sedimentary rocks

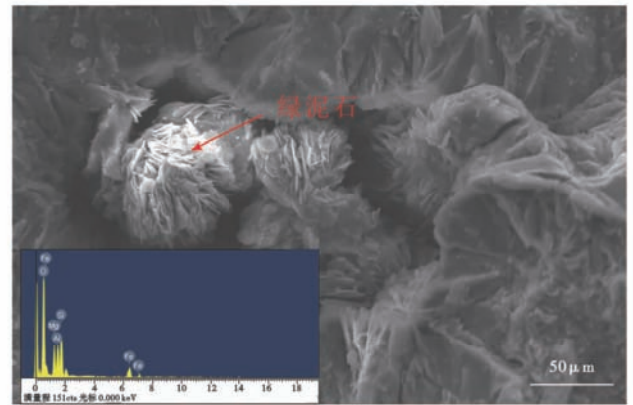
成骨架保护了基质中的粒间-溶蚀孔,通过孔隙图像照片分析可知其面孔率约为 1.8%,在图 4(c)中其面孔率约为 5%。所以颗粒支撑作用对于沉火山碎屑岩具有重要的保存孔隙作用,存在内凹边缘的颗粒可以发挥更好的保护作用。

3.3 溶蚀溶解作用

沉火山碎屑岩发育丰富的酸不稳定成分,如角闪石、长石、岩屑和火山灰等^[33-38],这为沉火山碎屑岩溶蚀溶解作用的发生提供了物质基础。研究区的沉火山岩碎屑岩下伏岩层为含煤暗色泥岩,资料显示该暗色泥岩为品质较好的烃源岩^[39,40],烃源岩和煤在热演化过程中均会排出酸性物质。按照煤的形成过程可知有 2 个阶段会产生大量的酸:①在埋深 200~400 m 的植物遗体转化为泥炭、再到褐煤的过程,其 pH 值可达 3.3~4.6^[41]。由图 3(c)可知,下伏煤层埋藏深度就接近 200 m,此时煤层进入早期排酸阶段,可为上覆沉火山碎屑岩溶蚀作用提供酸性流体。②当地温达到 80~120℃时,随着泥岩和煤层有机质演化排出酸性物质,地层水 pH 值明显降低,酸不稳定成分可再次发生溶蚀溶解作用;研究区在泉头组沉积早期进入该阶段,酸性物质排出直至嫩江组沉积末期结束,推测溶蚀溶解作用主要发生在泉头组沉积早期—嫩江组沉积中后期(图 10)。在溶蚀过程中产生了石英的沉淀,如图 4(e)的流纹质凝灰岩中的石英晶屑边缘发育不规则状加大边,支持研究区遭受酸溶蚀 SiO₂ 沉淀。

沉火山碎屑岩中发生溶蚀作用形成次生孔隙可划分为 5 类:①角闪石溶蚀形成铸模孔,②钾长石溶蚀形

成筛状-海绵状孔,③流纹质凝灰岩岩屑溶蚀产生海绵状孔,④粗安岩岩屑溶蚀产生的海绵状孔,⑤凝灰质填隙物溶蚀使粒间孔扩大。孔隙中充填的自生黏土矿物绝大多数为绿泥石(图 11),这可能与以下 3 个原因有关:①角闪石蚀变过程中可产生绿泥石;②从粗安岩岩屑中发现的大量球粒状菱铁矿可知流体中的铁镁离子含量较高,有足够量的铁镁离子为钾长石或凝灰质溶蚀时生成绿泥石提供保障;③研究区 2500~2900 m 处泥岩 R₀ 为 1.4%~1.7%,对应酸性水介质(含煤地层)碎屑岩成岩阶段划分标志可知该区也进入了中成岩 B 阶段,也是促使伊利石等黏土矿物向绿泥石转换的因素之一。溶蚀溶解形成的铸模孔、筛状孔为大直径孔隙,形成的海绵状孔多是小直径孔隙,这就形成了大孔-小喉型储层;在研究区溶蚀孔对孔隙度的贡献可能有限,但这些孔隙的存在表明了储层的连通性较好^[42-45],可促使储层有效性提高,特别是对岩屑内气孔的连通可起重要作用。



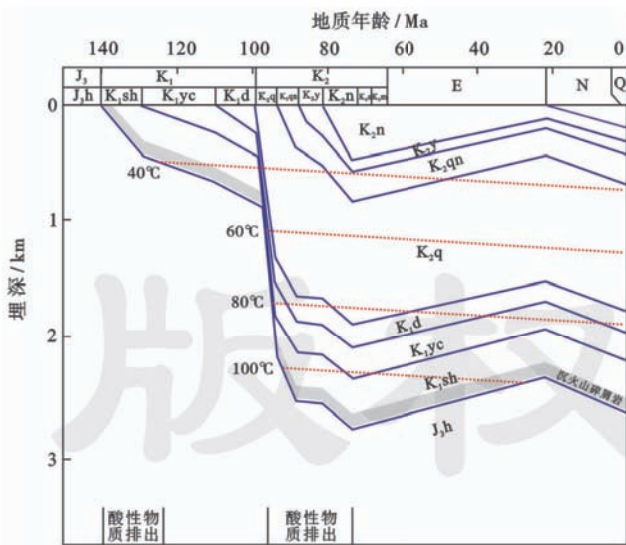
注:粗安质沉火山角砾岩,CS6 井 2545 m。

图 11 沉火山碎屑岩碱性长石溶蚀孔充填绿泥石

Fig. 11 Chlorite filling in alteration pore of volcanoclastic sedimentary rocks

3.4 构造作用

CS6 井区沉火山碎屑主要经历了 2 次构造改造作用:①在母岩区,自火石岭组沉积中后期到沙河子组沉积早期经受隆升构造作用,可产生裂缝;该期裂缝形成于岩石埋藏之前,经历了复杂的改造过程,如图 4(h)所示裂缝经历了后期硅质充填作用,其面孔率大幅度降低。②嫩江运动使沉火山碎屑岩经受了挤压反转构造作用,也可产生构造裂缝;该期裂缝形成于压性条件下,图 4(g)中的擦痕与此可对应,虽然充填程度较低,但整体上该段岩心中裂缝发育程度较低,同时裂缝多表现为闭合状态,所以在埋藏条件下裂缝对孔隙度的贡献有限。但有望增加各类孔隙间的连通性,可提高储层的有效性。



注:J₃h—火石岭组;K₁sh—沙河子组;K₁yc—营城组;K₁d—登娄库组;K₂q—泉头组;K₂qn—青山口组;K₂y—姚家组;K₂n—嫩江组。

图 10 CS6 井埋藏-热史演化模式

Fig. 10 Burial-thermal evolution modeling of Well CS6

4 沉火山碎屑岩优质储层勘探方向

通过实测孔隙度、测井解释孔隙度与岩石学特征对比可知,储层主要受火山碎屑颗粒支撑类型、粒度、埋深和发育岩屑内气孔粗安岩角砾的含量密切相关。如CS6井的孔隙度峰值为10%~11%,高于CS14井

的8%~9%[图12(a)和图12(b)];利用成像测井资料和岩心资料对比可知,二者之间的差别是CS6井为沉集块岩和沉角砾岩、颗粒支撑、岩屑内气孔发育(成像测井中表现为低阻集块和角砾),而CS14井为沉角砾/凝灰岩、颗粒/杂基支撑、岩屑内气孔较少(成像测井中表现为中高阻角砾)[图12(d),图13(a)—图13(d)]。

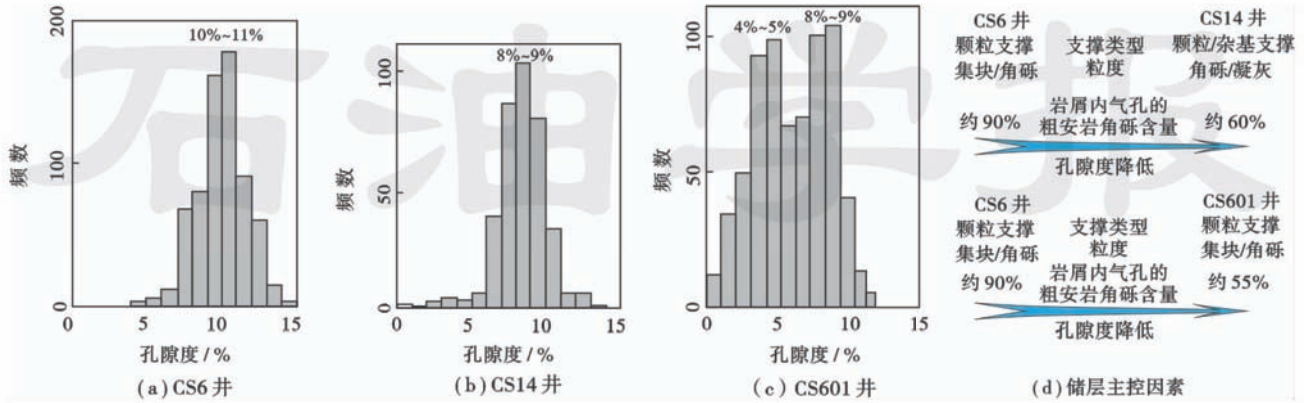
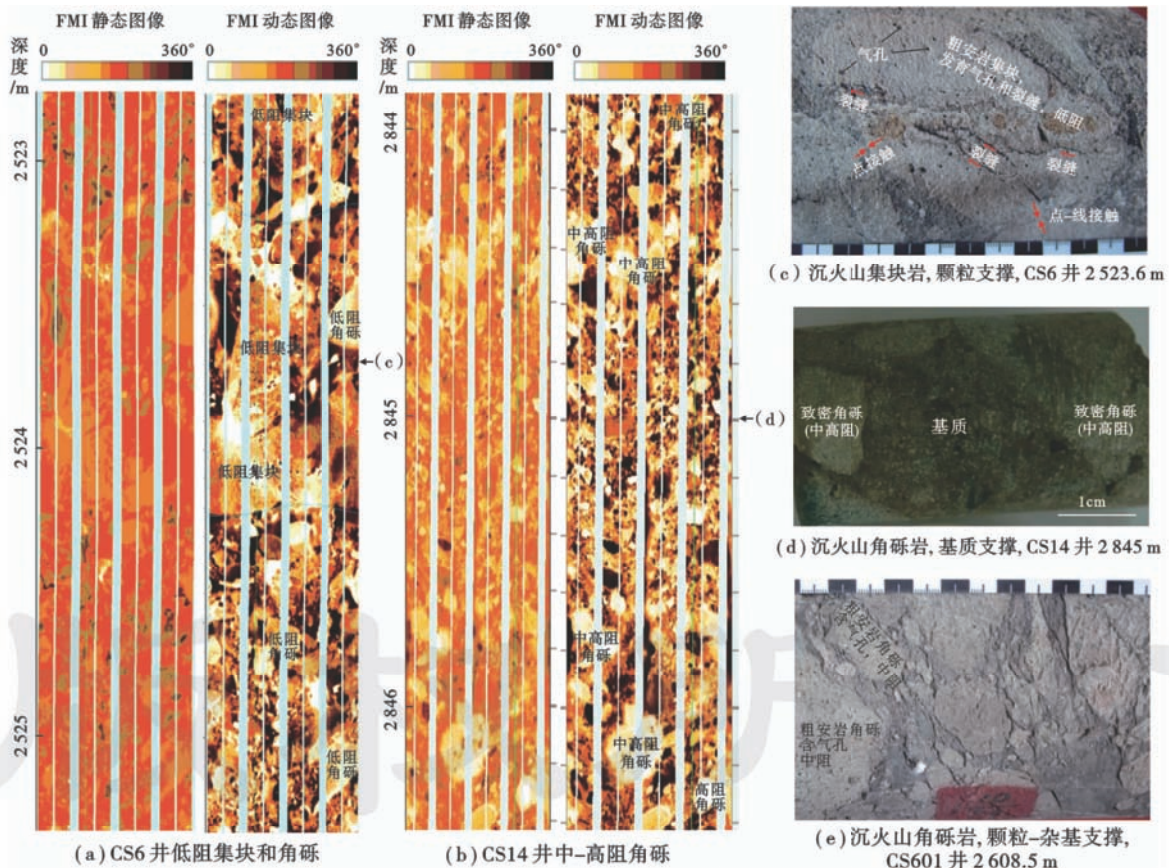


图12 王府断陷CS6井区沙河子组沉火山碎屑岩测井解释孔隙度特征和储层主控因素对比

Fig. 12 Characteristics of porosity of log interpretation and main controlling factor comparison of volcanoclastic sedimentary rocks for CS6 well block in Wangfu fault sag, Songliao Basin



注:集块为直径大于64mm的颗粒;CS6井和CS14井的井孔直径为25.4cm,井壁的周长约为79.8cm,图像的横向宽度即为周长;成像测井图像反映的是一个圆柱面,经换算在图像上颗粒直径需大于65mm才是集块。

图13 王府断陷CS6井区沙河子组沉火山碎屑岩颗粒特征成像测井和岩心对比

Fig. 13 Particle characteristics comparison between FMI and core of volcanoclastic sedimentary rocks for CS6 well block in Wangfu fault sag, Songliao Basin

CS601井孔隙度峰值有2个,且均低于CS6井[图12(a)和图12(c)],岩心资料揭示二者的差别在于发育岩屑内气孔的粗安岩角砾/集块含量,CS6井含量高达90%,而CS601井只有55%[图12(d)、图13(c)、图13(e)]。所以优质储层分布于沉集块岩、含岩屑内气孔的集块/角砾含量高的区域,这也说明优质储层主要受母岩挥发分逸出、颗粒支撑作用控制;主要分布在沉火山碎屑岩扇体平面位置的中部。如果结合烃源岩分布,则是位于扇体前缘部位更容易形成良好的生-储-盖组合。结合孔隙度与埋深的关系可知,在埋深小于3000m时沉凝灰、沉角砾和沉集块均可,当埋深大于3000m时沉角砾和沉集块更为有利(图14)。所以沉火山碎屑岩优质储层勘探潜力最大的区域是埋深小于3000m,母岩区挥发分逸出作用发育、近距离搬运、颗粒直径较大的扇体中部区域,其次是扇体前缘区域。

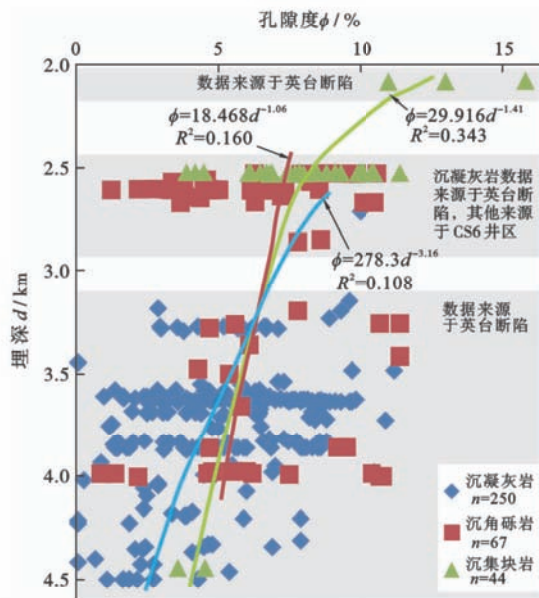


图14 沉火山碎屑岩孔隙度与埋深关系

Fig. 14 Relationship between porosity and buried depth of volcaniclastic sedimentary rocks

5 结论

(1) CS6井区岩心揭示沉火山碎屑岩主要是沉火山集块岩和沉火山角砾岩2种,在平面上呈近NS向展布的扇状,厚度最大可达200m,存在2种岩性序列:厚层状沉角砾/集块岩和薄层沉角砾/集块岩与泥岩互层,其整体上表现为向上变粗的序列。

(2) 在研究区共识别出原生孔隙、次生孔隙和次生裂缝3种类型。原生孔隙有岩屑内气孔和粒间孔,次生溶蚀孔有铸模孔、海绵状溶蚀孔、筛状溶蚀孔和粒间-溶蚀孔,次生裂缝主要有构造缝;其中粒内原生气孔是沉火山碎屑岩区别于陆源碎屑岩的显著特征。

(3) 沉集块岩储层物性和非均质性高于沉角砾岩,沉集块岩与沉角砾岩均为小孔隙的特征。弛豫时间小于10ms的区域对应溶蚀孔;弛豫时间在10~1000ms时对应岩屑内气孔、粒间-溶蚀孔、裂缝或铸模孔。其总体上为大孔隙-小喉道类型。埋深在2500~3000m时沉集块、沉角砾和沉凝灰之间的孔隙度差异不明显,但在3000m之下却差异明显。

(4) 沉火山碎屑岩储层形成机理主要为母岩挥发分逸出作用、颗粒支撑作用、有机酸溶蚀作用和构造作用。因为储层主要受火山碎屑颗粒支撑类型、粒度和粗安岩角砾含量控制,母岩挥发分逸出作用和颗粒支撑作用是储层的主控因素。优质储层分布于沉集块岩、含岩屑内气孔的集块/角砾含量高的区域,主要分布在沉火山碎屑岩扇体平面位置的中部。

参 考 文 献

- [1] 瞿雪姣,王璞珺,高有峰,等. 松辽盆地断陷期火石岭组时代归属探讨[J]. 地学前缘,2014,21(2):234-250.
Qu Xuejiao, Wang Pujun, Gao Youfeng, et al. Chronostratigraphy of Huoshiling Formation in the Songliao Basin, NE China: an overview[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(2): 234-250.
- [2] 黄玉龙,单俊峰,边伟华,等. 辽河拗陷中基性火成岩相分类及储集意义[J]. 石油勘探与开发,2014,41(6):671-680.
Huang Yulong, Shan Junfeng, Bian Weihua, et al. Facies classification and reservoir significance of the Cenozoic intermediate and mafic igneous rocks in Liaohe depression, East China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(6): 671-680.
- [3] Casalbore D, Romagnoli C, Chiocci F, et al. Morpho-sedimentary characteristics of the volcaniclastic apron around Stromboli volcano (Italy)[J]. Marine Geology, 2010, 269(3/4): 132-148.
- [4] 唐华风,李瑞磊,吴艳辉,等. 火山地层结构特征及其对波阻抗反演的约束[J]. 地球物理学报,2011,54(2):620-627.
Tang Huafeng, Li Ruilei, Wu Yanhui, et al. Textural characteristics of volcanic strata and its constraint to impedance inversion [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(2): 620-627.
- [5] 王璞珺,张功成,蒙启安,等. 地震火山地层学及其在我国火山岩盆地中的应用[J]. 地球物理学报,2011,54(2):597-610.
Wang Pujun, Zhang Gongcheng, Meng Qi'an, et al. Applications of seismic volcanostratigraphy to the volcanic rifted basins of China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(2): 597-610.
- [6] 唐华风,白冰,边伟华,等. 松辽盆地营城组火山机构地层结构定量模型[J]. 石油学报,2012,33(4):541-550.
Tang Huafeng, Bai Bing, Bian Weihua, et al. Quantitative models of strata texture within volcanic edifices of Yingcheng Formation in Songliao Basin, NE China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(4): 541-550.
- [7] 王鹏,潘建国,魏东涛,等. 新型烃源岩—沉凝灰岩[J]. 西安石油大学学报:自然科学版,2011,26(4):19-22.
Wang Peng, Pan Jianguo, Wei Dongtao, et al. A new type of hydrocarbon source rock-sedimentary tuff[J]. Journal of Xi'an Shi-

- ou University; Natural Science Edition, 2011, 26(4): 19-22.
- [8] Dobson P F, Kneafsey T J, Hulen J, et al. Porosity, permeability, and fluid flow in the Yellowstone geothermal system, Wyoming[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2003, 123(3/4): 313-324.
- [9] 闵飞琼, 王璞珺, 于世泉, 等. 营城组三段及二段岩性岩相和储层物性的精细刻画——基于标准剖面营三 D1 井全取心钻孔资料[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2007, 37(6): 1203-1206.
Min Feiqiong, Wang Pujun, Yu Shiquan, et al. Meticulous depiction of lithology, lithofacies and reservoir porosity and permeability in the third & second Member of Yingcheng Formation; based on whole coring Ying-3 D1 well drilled in the standard section[J]. *Journal of Jilin University; Earth Science Edition*, 2007, 37(6): 1203-1206.
- [10] 吴颜雄, 王璞珺, 曲立才, 等. 营城组一段及下段岩性岩相和储层物性的精细刻画——基于标准剖面营-D1 井全取心钻孔资料[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2007, 37(6): 1192-1202.
Wu Yanxiong, Wang Pujun, Qu Licai, et al. Detailed description of lithology, lithofacies and porosity and permeability of the first and the Lower Member of Yingcheng Formation; based on the latest data of Ying-1 D1 well cores in standard section[J]. *Journal of Jilin University; Earth Science Edition*, 2007, 37(6): 1192-1202.
- [11] Wang Pujun, Chen Shumin. Cretaceous volcanic reservoirs and their exploration in the Songliao Basin, northeast China[J]. *AAPG Bulletin*, 2015, 99(3): 499-523.
- [12] Schutter S R. Occurrences of hydrocarbons in and around igneous rocks[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2003, 214(1): 35-68.
- [13] Qiang Jin, McCabe P. Genetic features of petroleum systems in rift basins of eastern China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1998, 15(4): 343-358.
- [14] 王玉普, 刘合, 卓胜广, 等. 海拉尔油田沉凝灰岩储层岩石稳定乳化压裂液的研制及应用[J]. *石油学报*, 2005, 26(5): 67-70.
Wang Yupu, Liu He, Zhuo Shengguang, et al. Emulsified fracturing fluid used for early screen-out of hydraulic fracturing in alkali sediment-tuff reservoir of Hailare oilfield[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2005, 26(5): 67-70.
- [15] 高瑞琴, 杨继波, 丛培栋, 等. 二连油田沉凝灰岩储层特征分析[J]. *测井技术*, 2006, 30(4): 330-333.
Gao Ruiqin, Yang Jibo, Cong Peidong, et al. Analysis of the characteristics of tuffite reservoir in Erlian oilfield[J]. *Well Logging Technology*, 2006, 30(4): 330-333.
- [16] 陈旋, 李杰, 梁浩, 等. 三塘湖盆地条湖组沉凝灰岩致密油藏成藏特征[J]. *新疆石油地质*, 2014, 35(4): 386-390.
Chen Xuan, Li Jie, Liang Hao, et al. Hydrocarbon accumulation elements analysis of Tiaohu tuff reservoir of Middle Permian, Santanghu Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2014, 35(4): 386-390.
- [17] 李军, 王伟, 王书勋. 青西油田沉凝灰岩储集特征[J]. *新疆石油地质*, 2004, 25(3): 288-290.
Li Jun, Wang Wei, Wang Shuxun. Bedded tuff reservoir in Qingxi oilfield[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2004, 25(3): 288-290.
- [18] Batchlor A S. Hydrocarbon production from fractured basement formations[R]. Fahnouth, Cornwall; Geoscience Ltd., 2000.
- [19] Hart A. New Zealand potential[J]. *Oil & Gas Journal*, 2001, 99(29): 38-44.
- [20] Grabb R. Three bar oil field, Eureka county, Nevada[M]//Schalla R A, Johnson E H. Oil fields of the great basin, Reno; Nevada Petroleum Society, 1994: 333-338.
- [21] 王璞珺, 郑常青, 舒萍, 等. 松辽盆地深层火山岩岩性分类方案[J]. *大庆石油地质与开发*, 2007, 26(4): 17-22.
Wang Pujun, Zheng Changqing, Shu Ping, et al. Classification of deep volcanic rocks in Songliao Basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2007, 26(4): 17-22.
- [22] 孙善平, 刘永顺, 钟蓉, 等. 火山碎屑岩分类评述及火山沉积学研究展望[J]. *岩石矿物学杂志*, 2001, 20(3): 313-317.
Sun Shanping, Liu Yongshun, Zhong Rong, et al. Classification of pyroclastic rocks and trend of volcanic sedimentology; a review[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2001, 20(3): 313-317.
- [23] 王璞珺, 赵然磊, 蒙启安, 等. 白垩纪松辽盆地: 从火山裂谷到陆内拗陷的动力学环境[J]. *地学前缘*, 2015, 22(3): 99-117.
Wang Pujun, Zhao Ranlei, Meng Qi'an, et al. The Cretaceous Songliao Basin; dynamic background from volcanic rift to interior sag basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(3): 99-117.
- [24] 王璞珺, 陈树民, 刘万洙, 等. 松辽盆地火山岩相与火山岩储层的关系[J]. *石油与天然气地质*, 2003, 24(1): 18-23.
Wang Pujun, Chen Shumin, Liu Wanzhu, et al. Relationship between volcanic facies and volcanic reservoirs in Songliao Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2003, 24(1): 18-23.
- [25] Sruoga P, Rubinstein N. Processes controlling porosity and permeability in volcanic reservoirs from the Austral and Neuquén Basins, Argentina[J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(1): 115-129.
- [26] 高有峰, 刘万洙, 纪学雁, 等. 松辽盆地营城组火山岩成岩作用类型、特征及其对储层物性的影响[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2007, 37(6): 1251-1258.
Gao Youfeng, Liu Wanzhu, Ji Xueyan, et al. Diagenesis types and features of volcanic rocks and its impact on porosity and permeability in Yingcheng Formation, Songliao Basin[J]. *Journal of Jilin University; Earth Science Edition*, 2007, 37(6): 1251-1258.
- [27] 刘嘉麒, 孟凡超, 崔岩, 等. 试论火山岩油气藏成藏机理[J]. *岩石学报*, 2010, 26(1): 1-13.
Liu Jiaqi, Meng Fanchao, Cui Yan, et al. Discussion on the formation mechanism of volcanic oil and gas reservoirs[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(1): 1-13.
- [28] 唐华凤, 庞彦明, 边伟华, 等. 松辽盆地白垩系营城组火山机构储层定量分析[J]. *石油学报*, 2008, 29(6): 841-845.
Tang Huafeng, Pang Yanming, Bian Weihua, et al. Quantitative analysis on reservoirs in volcanic edifice of early Cretaceous Yingcheng Formation in Songliao Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(6): 841-845.
- [29] Tang Huafeng, Cryton P, Gao Youfeng, et al. Types and characteristics of volcanostratigraphic boundaries and their oil-gas reservoir significance[J]. *Acta Geologica Sinica; English Edition*, 2015, 89(1): 163-174.
- [30] 衣健, 王璞珺, 唐华凤, 等. 火山地层界面的地质属性、地质内涵和储层意义——以中国东北地区中生代—新生代火山岩为例

- [J]. 石油学报, 2015, 36(3): 324-336.
- Yi Jian, Wang Pujun, Tang Huafeng, et al. Geological property, geological connotation and reservoir significance of volcanostratigraphic boundary: a case study of the Mesozoic & Cenozoic volcanic rocks in northeastern China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(3): 324-336.
- [31] Gaonac'h H, Lovejoy S, Schertzer D. Scaling vesicle distributions and volcanic eruptions[J]. *Bulletin of Volcanology*, 2005, 67(4): 350-357.
- [32] Lovejoy S, Gaonac'h H, Schertzer D. Bubble distributions, and dynamics; the expansion-coalescence equation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(B11): B11203.
- [33] Lockwood J P, Hazlett R W. *Volcanoes-global perspectives*[M]. Hoboken, USA: Wiley-Blackwell, 2010.
- [34] 孟万斌, 吕正祥, 刘家铎, 等. 川西中侏罗统致密砂岩次生孔隙成因分析[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2371-2380.
- Meng Wanbin, Lü Zhengxiang, Liu Jiaduo, et al. Genesis of secondary porosity in Middle Jurassic tight sandstone in western Sichuan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(8): 2371-2380.
- [35] 王宏语, 樊太亮, 肖莹莹, 等. 凝灰质成分对砂岩储集性能的影响[J]. 石油学报, 2010, 31(3): 432-439.
- Wang Hongyu, Fan Tailiang, Xiao Yingying, et al. Effect of tuffaceous components on physical property of sandstone reservoir[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(3): 432-439.
- [36] 赵国泉, 李凯明, 赵海玲, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界天然气储集层长石的溶蚀与次生孔隙的形成[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(1): 53-55.
- Zhao Guoquan, Li Kaiming, Zhao Hailing, et al. Feldspar corrosion and secondary pore formation in the Upper Paleozoic gas reservoir, Ordos Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32(1): 53-55.
- [37] 朱筱敏, 王英国, 钟大康, 等. 济阳坳陷古近系储层孔隙类型与次生孔隙成因[J]. 地质学报, 2007, 81(2): 197-204.
- Zhu Xiaomin, Wang Yingguo, Zhong Dakang, et al. Pore types and secondary pore evolution of Paleogene reservoir in the Jiyang sag[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(2): 197-204.
- [38] 钟大康, 朱筱敏, 周新源, 等. 次生孔隙形成期次与溶蚀机理——以塔中地区志留系沥青砂岩为例[J]. 天然气工业, 2006, 26(9): 21-24.
- Zhong Dakang, Zhu Xiaomin, Zhou Xinyuan, et al. Phases of secondary pore generation and dissolution mechanism; taking Silurian asphaltic sandstone in Central Tarim Basin as an example[J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(9): 21-24.
- [39] 张炬. 王府断陷深层天然气成藏条件研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2013.
- Zhang Ju. *Reservoir forming conditions of deep gas in Wangfu faulted depression*[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2013.
- [40] 叶龙. 王府断陷火山岭组天然气分布规律研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2014.
- Ye Long. *The study of nature gas distributing in Huoshiling Formation, Wangfu fault depression*[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2014.
- [41] 郑浚茂, 应凤祥. 煤系地层(酸性水介质)的砂岩储层特征及成岩模式[J]. 石油学报, 1997, 18(4): 19-24.
- Zheng Junmao, Ying Fengxiang. Reservoir characteristics and diagenetic model of sandstone intercalated in coal-bearing strata (acid water medium)[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1997, 18(4): 19-24.
- [42] 罗静兰, 邵红梅, 杨艳芳, 等. 松辽盆地深层火山岩储层的埋藏-烃类充注-成岩时空演化过程[J]. 地学前缘, 2013, 20(5): 175-187.
- Luo Jinglan, Shao Hongmei, Yang Yanfang, et al. Temporal and spatial evolution of burial-hydrocarbon filling-diagenetic process of deep volcanic reservoir in Songliao Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(5): 175-187.
- [43] 罗静兰, 侯连华, 蒋宜勤, 等. 陆东地区火成岩形成时代与构造背景及火山岩储层成因[J]. 石油学报, 2012, 33(3): 351-360.
- Luo Jinglan, Hou Lianhua, Jiang Yiqin, et al. Chronology and tectonic settings of igneous rocks and origin of volcanic reservoirs in Ludong area, eastern Junggar Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(3): 351-360.
- [44] 张丽媛, 纪友亮, 刘立, 等. 火山碎屑岩储层异常高孔隙成因——以南贝尔凹陷东次北北洼槽为例[J]. 石油学报, 2012, 33(5): 814-821.
- Zhang Liyuan, Ji Youliang, Liu Li, et al. Origin of anomalously high porosity in pyroclastic reservoirs: a case study on the northern region of the east sub-sag in Nanbeier sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(5): 814-821.
- [45] 蔡东梅, 孙立东, 齐景顺, 等. 徐家围子断陷火山岩储层特征及演化规律[J]. 石油学报, 2010, 31(3): 400-407.
- Cai Dongmei, Sun Lidong, Qi Jingshun, et al. Reservoir characteristics and evolution of volcanic rocks in Xujiaweizi fault depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(3): 400-407.

(收稿日期 2015-08-28 改回日期 2016-02-23 编辑 王培玺)