

doi: 10.12029/gc20200313

代静静, 罗静兰, 何贤英, 马尚伟, 汪冲, 许学龙. 2020. 准噶尔盆地西泉地区石炭系火山熔岩油气储层特征及成岩演化过程研究[J]. 中国地质, 47(3): 742-754.

Dai Jingjing, Luo Jinglan, He Xianying, Ma Shangwei, Wang Chong, Xu Xuelong. 2020. Oil and gas characteristics and petrogenetic evolution of the Carboniferous volcanic lava in Xiquan area, Junggar Basin[J]. Geology in China, 47(3): 742-754(in Chinese with English abstract).

准噶尔盆地西泉地区石炭系火山熔岩油气储层特征 及成岩演化过程研究

代静静¹, 罗静兰¹, 何贤英², 马尚伟¹, 汪冲¹, 许学龙²

(1. 西北大学大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069; 2. 中国石油新疆油田公司准东采油厂, 新疆 阜康 831500)

摘要:火山熔岩油气藏是准噶尔盆地油气勘探和开发的重要目标之一。通过对准噶尔盆地西泉地区 16 口石炭系火山熔岩井的岩心观察、普通薄片和铸体薄片镜下鉴定和定量统计、扫描电镜和 X-射线衍射等实验, 研究玄武岩、安山岩、英安岩的岩石学特征、孔隙类型及储集特征及异同点, 建立火山熔岩成岩演化序列, 探讨成岩作用对火山熔岩孔隙演化的影响。研究表明, 安山岩的储集空间最发育, 孔隙类型及组合多样, 多为气孔+斑晶溶孔+基质溶孔+溶蚀缝组合和气孔+斑晶溶孔+基质溶孔+溶蚀缝+构造裂缝组合。英安岩的孔隙组合为气孔+斑晶溶孔+基质溶孔和气孔+斑晶溶孔+基质溶孔+溶蚀缝。玄武岩孔隙类型及组合单一, 为构造裂缝+溶蚀缝, 构造裂缝+基质溶孔, 气孔+溶蚀缝。挥发分逸出作用控制火山熔岩原生气孔的发育, 岩浆期后热液作用和充填作用破坏了火山熔岩的储集空间, 溶蚀作用、风化淋滤作用和构造破裂作用极大地改善了火山熔岩的储集性能。认为西泉地区石炭系顶部风化淋滤带(距石炭系顶面 0~20 m)的安山岩是油气聚集的最有利层段。

关键词:火山熔岩; 孔隙发育; 成岩作用; 成岩演化过程; 石炭系; 油气勘查工程; 西泉地区; 新疆
中图分类号: P588.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2020) 03-0742-13

Oil and gas reservoir characteristics and petrogenetic evolution of the Carboniferous volcanic lava in Xiquan area, Junggar Basin

DAI Jingjing¹, LUO Jinglan¹, HE Xianying², MA Shangwei¹, WANG Chong¹, XU Xuelong²

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China; 2. Zhundong Production Plant, Xinjiang Oilfield Co., Ltd., PetroChina, Fukang 831500, Xinjiang, China)

Abstract: Junggar Basin is an important area for the exploration and development of volcanic lava in western China. 16 volcanic lava wells were selected for core observation, ordinary thin-section and cast thin-section identification and quantitative statistic analysis under microscope, scanning electron microscopy and X-ray diffraction experiments to study petrological characteristics, pore types, combination characteristics, similarities and differences of basalt, andesite and dacite which are characterized by relative

收稿日期: 2017-12-04; 改回日期: 2018-08-08

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05001-002-008、2017ZX05008-004-004)资助。

作者简介: 代静静, 女, 1992 生, 硕士, 主要从事火山岩储层特征及成岩作用研究; E-mail: daijijwork@foxmail.com。

通讯作者: 罗静兰, 女, 1957 生, 教授, 主要从事储层沉积学、火山岩油气藏岩相学、储层特征及成岩作用研究; E-mail: jlluo@nwu.edu.cn。

lack of research data on the characteristics of the volcanic lava reservoirs and petrogenetic evolution processes in the Xiquan area, eastern Junggar Basin. Besides, diagenetic evolutionary sequence of volcanic lavas was built and the influence of diagenesis on the pore evolution of volcanic lava was explored. The results show that andesite has a large reservoir space, and its pore types and pore combinations are complex and diverse, which include stoma+phenocryst solution pore+matrix solution pore+dissolution fracture combination, and stoma+phenocryst solution pore+matrix solution pore+dissolution fracture +structural fracture combination. Pore types and combinations of dacite are stoma+phenocryst solution pore+matrix solution pore and stoma+phenocryst solution pore+matrix solution pore+dissolution fracture. Pore types and combinations of basalt are simple, which include structural fracture+dissolution fracture combination, structural fracture+matrix solution pore combination, and stoma+dissolution fracture combination. Volatilization controls the development of original gas hole in volcanic lava. Dissolution, weathering, leaching, and tectonic fracture have greatly improved the reservoir performance of volcanic lava. Post-magmatic hydrothermal and filling have destroyed the reservoir space of volcanic lava. Overall, it is considered that andesite in the weathering and erosion-leaching belt at the top of the Carboniferous in Xiquan area (0–20 m from the top of the Carboniferous) is the most advantageous segment of hydrocarbon accumulation.

Key words: volcanic lava; reservoir characteristics; diagenesis; diagenetic evolution; Carboniferous; oil and gas exploration engineering; Xiquan area; Xinjiang

About the first author: DAI Jingjing, female, born in 1992, master, mainly engages in the study of volcanic reservoir characteristics and petrogenesis; E-mail:daijjwork@foxmail.com.

About the corresponding author: LUO Jinglan, female, born in 1957, professor, engages in the study of reservoir sedimentology, volcanic oil and gas accumulation petrography, reservoir characteristics and petrogenesis; E-mail:jlluo@nwu.edu.cn.

Fund support: Supported by National Science and Technology Important Special Project (No.2011ZX05001-002-008, (No.2017ZX05008-004-004).

1 引言

2002年以来,中国相继在松辽盆地、海拉尔盆地、二连盆地、三塘湖盆地、准噶尔盆地等14个含油气盆地中发现了大量的火山岩油气藏。其中,准噶尔盆地石炭系火山岩已探明原油、天然气储量分别达2000万t和千亿 m^3 ,占总资源量的20.7%和5.2%(王璞珺等,2008;王洛等,2014),表明准噶尔盆地石炭系火山岩油气资源丰富,勘探潜力巨大(赵文智等,2009;柳双权等,2014)。前人对准噶尔盆地古生界火山岩的研究主要集中在火山岩的地球物理识别与预测(王洛等,2010;王泽华等,2015),地质特征、油气富集规律与控制因素、油气勘探方向(何登发等,2010;马学平等,2015;王怡然等,2016;陈建平等,2016;雷德文等,2017),火成岩的岩石地球化学及其构造环境(赵霞等,2008;张顺存等,2015;饶松等,2018),盆地的类型和构造演化特征(陈发景等,2005;胡秋媛等,2016),火山岩储层特征及主控因素(王洛等,2014;曲江秀等,2014;于景维等,2018)等方面。对火山岩的岩性与岩相、平面分布规律及其形成时代(谭佳奕等,2009;苏玉平

等,2010;刘阁,2018)也进行了相关研究。相比而言,对准噶尔盆地中的火山熔岩储层的精细研究相对薄弱,未进一步区分火山熔岩岩性储层类型,在分析玄武岩、安山岩和英安岩在岩石学特征、储集空间类型及组合、成岩作用的相同点与差异性、成岩作用对储集性能差异性影响等方面仍不够深入,影响了该区火山熔岩型油气藏的勘探进程。

准噶尔盆地东部西泉地区石炭系火山熔岩的试油试采资料显示:安山岩储层试油井共5口8层,其中4口4层油日产量达10 t/d以上,具工业开采价值;英安岩试油井共1口1层,油气产能中等,油日产量约3 t/d;玄武岩储层试油井共3口5层,未见油气产能(图1)。基于火山熔岩是研究区最重要的油气储层之一,而且目前对西泉地区石炭系火山熔岩的储层特征和成岩演化过程针对性研究相对薄弱。因此,选取准噶尔盆地东部的西泉地区石炭系火山熔岩作为研究对象,立足于16口火山熔岩取心井共计75.58 m岩心、50张岩石普通薄片、26张铸体薄片、扫描电镜和X-衍射等实验方法,研究玄武岩、安山岩、英安岩的矿物组成、孔隙类型及组合、物性特征(孔隙度和渗透率)和成岩演化过程及异

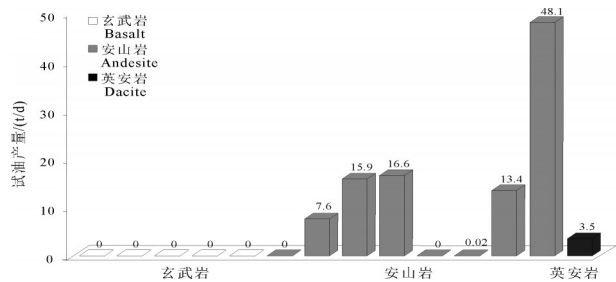


图1 研究区火山熔岩与试油产量关系柱状图
Fig.1 Columnar section showing relationship between oil production and volcanic lava of Carboniferous strata in Xiquan area

同点,进而厘清控制火山熔岩储集性能的主要因素,以期为研究区火山熔岩储层的油气勘探提供理论参考。

2 区域地质概况

西泉地区位于准噶尔盆地东部的北三台凸起,西与阜康凹陷以斜坡过渡,东与吉木萨尔凹陷毗邻,南以阜康断裂为界,北部逐渐过渡到沙奇凸起(丁心鲁,2012;李涤,2016)。研究区从北向南发育北三台北断裂、西泉026井北断裂(南倾逆断裂)和北87井北断裂(北倾逆断裂)3条东西向大断裂(图2)。晚石炭世到早二叠世期间,由于南部博格达山挤压隆升,北三台地区发生强烈构造抬升,在研究区南部形成一系列近东西走向的次级逆断裂,北部的次级断裂发育较少。石炭系钻遇的地层多为宝塔玛依内山组(C₂b),由一套火山碎屑岩类(火山角砾熔岩、火山角砾岩、凝灰岩)、火山熔岩类(玄武岩、安山岩和英安岩)、沉火山碎屑岩类(沉凝灰岩)和少量沉积岩类(凝灰砂岩)组成,与上覆二叠系梧桐沟组呈不整合接触(吴晓智等,2012;彭文春,2014)。

3 火山熔岩岩石学及储层特征

3.1 火山熔岩岩石学特征

西泉地区石炭系火山熔岩主要为安山岩(占火山熔岩的58%),少量英安岩(占火山熔岩的23%)和玄武岩(占火山熔岩的19%)。安山岩呈灰色、灰褐色等,斑状结构,斑晶含量约10%,主要为中性斜长石,含少量角闪石和辉石(图3a);斑晶斜长石普遍发生绢云母化,部分发生碳酸盐化,角闪石和辉石

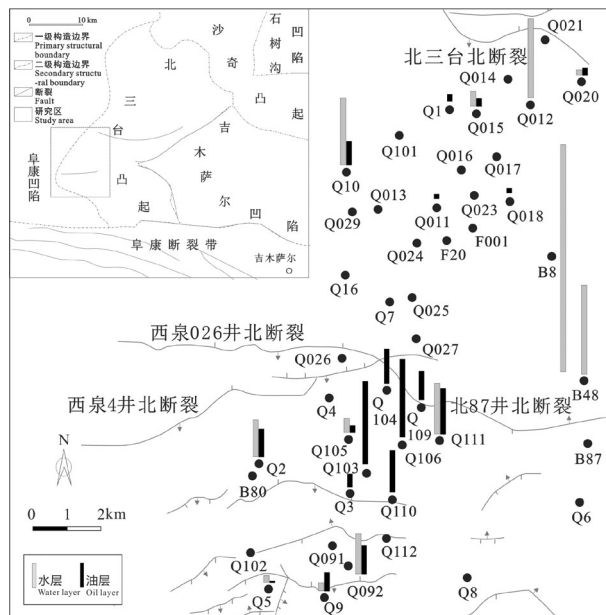


图2 北三台凸起西泉地区区域构造位置及井位图
(据丁心鲁,2012;李涤,2016修改)

Fig.2 Tectonic position and structural and well location of Xiquan area (modified from Ding Xinlu, 2012; Li Di, 2016)

多发生绿泥石化,基质主要由定向或半定向排列的微晶斜长石、磁铁矿、隐晶质及少量暗色矿物组成;气孔-杏仁构造(图3e、f),部分气孔被硅质、绿泥石、伊利石、碳酸盐等充填形成杏仁体(图3i、j、k、l)。英安岩多呈灰色、灰白色(图3b);斑状结构、无斑隐晶质结构,斑晶含量在0~5%,以斜长石为主,可见少量石英、角闪石和黑云母,斑晶多发生溶蚀作用(图3h);基质主要由长石和石英微晶组成,气孔多被绿泥石、伊利石、硅质充填或半充填(图3n)。玄武岩多呈深灰色、黑色(图3c),斑状结构,斑晶含量约6%,主要为基性斜长石和辉石,含少量角闪石;暗色矿物多发生绿泥石化,基质为拉斑玄武结构(图3d);发育少量气孔和杏仁构造,气孔多呈椭圆状及不规则状,多数被碳酸盐、绿泥石等矿物充填或半充填(图3o)。

3.2 火山熔岩储层特征

3.2.1 火山熔岩孔隙发育特征及孔隙组合

根据中国石油与天然气行业标准《火山岩储集层描述方法》(1994),结合岩心观察、普通薄片与铸体薄片鉴定、扫描电镜资料,按照孔隙形状和成因,将火山熔岩孔隙划分为原生孔隙、次生孔隙、原生裂缝及次生裂缝4大类和9小类(表1,图3)。

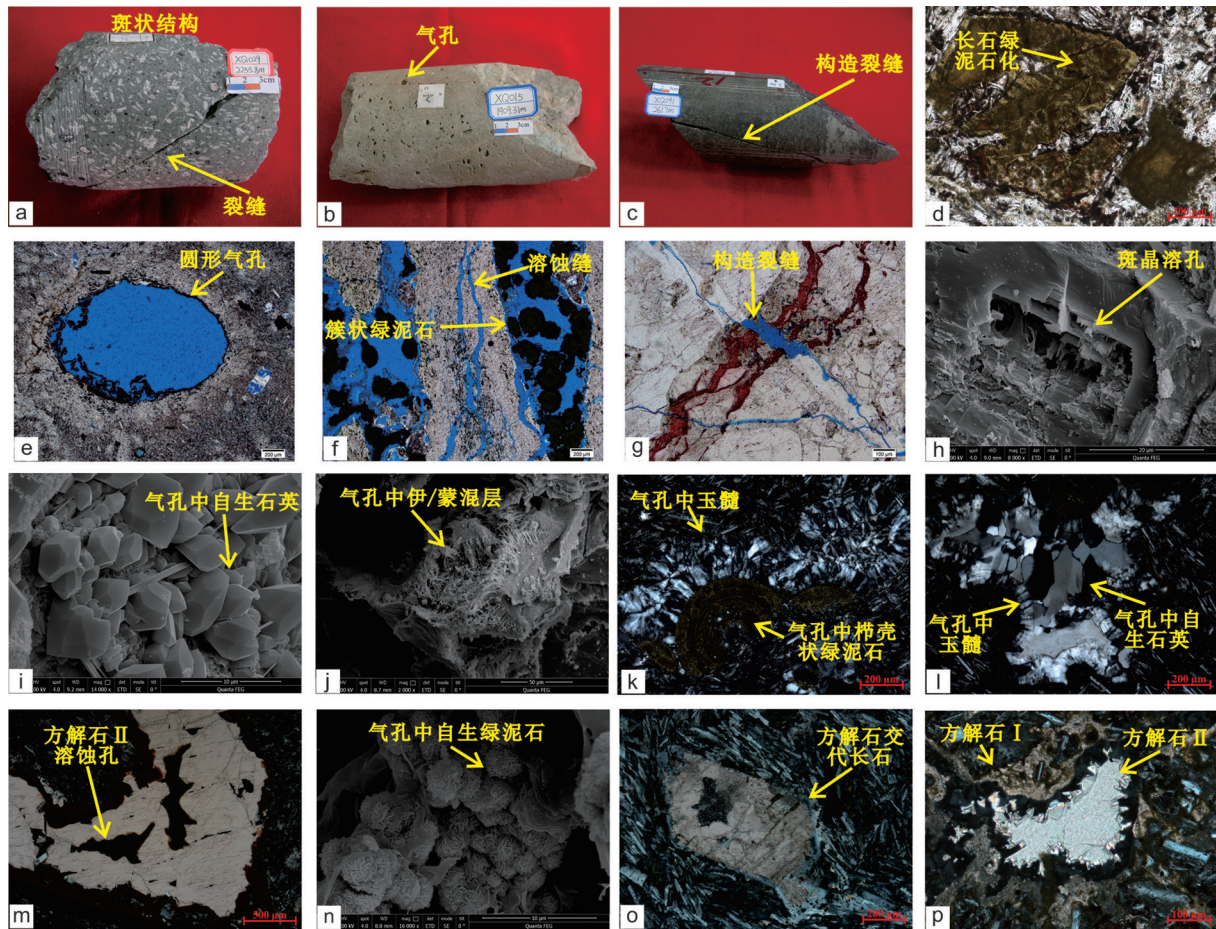


图3 西泉地区石炭系火山熔岩孔隙类型及成岩作用特征

a—Q029,安山岩的斑状结构;b—Q1,英安岩中的气孔;c—Q091,玄武岩中的构造裂缝;d—Q8,玄武岩中长石绿泥石化,单偏光;e—Q092,安山岩中气孔,单偏光;f—Q9,安山岩中气孔和溶蚀缝,单偏光;g—Q17,安山岩中构造裂缝,单偏光;h—Q114,英安岩中的斑晶溶孔,扫描电镜; i—Q092,安山岩中粒状石英,扫描电镜;j—Q092,安山岩气孔中伊蒙混层,扫描电镜;k—Q103,安山岩气孔中绿泥石及硅质 I,正交偏光;l—Q103,安山岩气孔中硅质 I 和硅质 II,正交偏光;m—Q092,安山岩中碳酸盐 II 发生溶蚀形成次生溶孔,正交偏光 5;n—Q1 英安岩气孔中绿泥石和伊利石,扫描电镜;o—Q2,玄武岩中碳酸盐 I 交代长石,正交偏光;p—Q8,玄武岩中碳酸盐 I 和碳酸盐 II,正交偏光

Fig.3 Reservoir pore types and petrogenesis of Carboniferous volcanic lava in Xiquan area

a—Q029, porphyritic structure of andesite; b—Q1, stoma in dacite; c—Q091, structural fracture in basalt; d—Q8, feldspar chloritization in basalt, plainlight; e—Q092, stoma of andesite, plainlight; f—Q9, stoma and dissolution fracture in andesite, plainlight; g—Q17, structural fracture in andesite, plainlight; h—Q114, phenocryst solution in dacite, scanning electron microscope; i—Q092, granular quartz in andesite, scanning electron microscope; j—Q092, illite/smectite formation in stoma of andesite, scanning electron microscope; k—Q103, chlorite and siliceous I in stoma of andesite, crossed nicols; l—Q103, siliceous I and siliceous II in stoma of andesite, crossed nicols; m—Q092, carbonate II corrosion form secondary solution pores, crossed nicols; n—Q1, chlorite and illite in stoma of dacite, scanning electron microscope; o—Q2, carbonate I metasomatism feldspar in basalt, crossed nicols; p—Q8, carbonate I and carbonate II in basalt, crossed nicols

孔隙是火山熔岩储集空间的重要组成部分,裂缝既是火山熔岩的储集空间,更是重要的渗流通道。因此,研究火山熔岩的孔隙类型及组合是预测油气有利聚集区的重要基础。火山熔岩的铸体薄片及图像孔喉资料表明:安山岩的储集空间最发育,面孔率在0.83%~7.26%(平均面孔率为4.18%)(图4),主要由气孔(占73%)、斑晶溶孔(占11%)、基质溶孔(占7%)、溶蚀缝(占8%)组成,构造裂缝较

英安岩发育;孔隙组合复杂多样,多为气孔+斑晶溶孔+基质溶孔+溶蚀缝组合和气孔+斑晶溶孔+基质溶孔+溶蚀缝+构造缝组合(图5)。英安岩的面孔率在0.5%~2.57%(平均面孔率为1.53%),主要由气孔(占37%)、斑晶溶孔(占38%)、基质溶孔(占20%),以及少量溶蚀缝和构造裂缝组成;孔隙组合多为气孔+斑晶溶孔+基质溶孔和气孔+斑晶溶孔+基质溶孔+溶蚀缝(图5)。玄武岩的面孔率在0.36%~

表1 西泉地区石炭系火山熔岩孔隙类型
Table 1 Pore types of Carboniferous volcanic lava in Xiquan area

基本类型	孔隙类型	备注	
孔隙	原生气孔	压力降低导致岩浆挥发分逸出形成的孔隙	
	原生孔隙	残余气孔	原生气孔未被碳酸盐、硅质等完全充填的剩余气孔
		收缩孔	冷凝收缩作用下形成
	次生孔隙	斑晶溶孔	斑晶发生部分溶蚀
		基质溶孔	基质矿物发生溶蚀
铸模孔		斑晶发生完全溶蚀	
裂缝	原生裂缝	冷凝收缩缝	
	次生裂缝	溶蚀缝	在溶蚀作用下形成的裂缝,边缘一般不规则
		构造裂缝	构造破裂作用下形成,一般平直而规则,具方向性

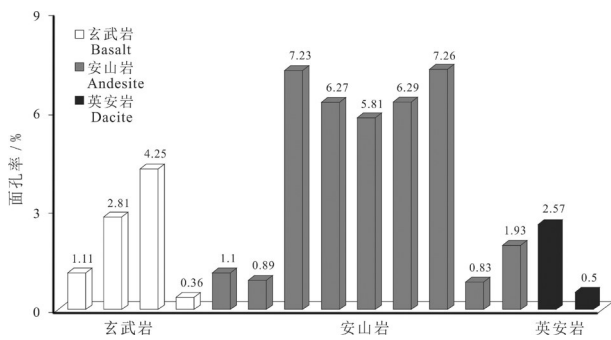


图4 西泉地区石炭系火山熔岩岩性与面孔率柱状图
Fig.4 Surface porosity of Carboniferous volcanic lava in Xiquan area

4.25%(平均面孔率为2.13%)(图4),主要由构造裂缝(占80%)和气孔(占16%)组成,基质溶孔和溶蚀缝含量少;但孔隙类型及组合单一,为构造裂缝+溶蚀缝,构造裂缝+基质溶孔,气孔+溶蚀缝(图5)。总体而言,安山岩的储集空间较玄武岩、英安岩发育,孔隙类型和组合复杂,是最具油气储集潜能的火山熔岩储层。

3.2.2 火山熔岩的物性特征

研究区火山熔岩总体属于中孔低渗、低孔特低渗储集体,不同岩性火山熔岩的实测物性存在差异(图6)。安山岩的孔隙度(主要集中在10%~30%,平均为15.9%)和渗透率(主要集中在0.1~10 mD,平均为3.234 mD)高,物性好(图6)。安山岩的渗透率随孔隙度的增大而增大,总体呈正相关关系(图6)。安山岩孔隙度在0~30%,渗透率小于0.3 mD时(图6a区),渗透率随孔隙度的增加缓慢增加,呈现良好的正相关关系,表明该层段安山岩储集空间以基质孔隙为主。安山岩的孔隙度在10%~30%,渗透

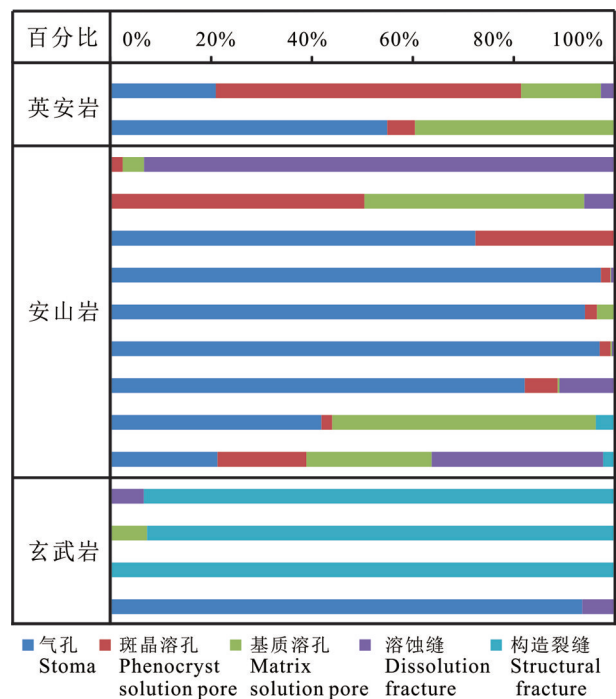


图5 西泉地区石炭系火山熔岩孔隙组合类型柱状图
Fig.5 Reservoir pore assembly types of Carboniferous volcanic lava in Xiquan area

率大于0.3 mD时(图6b区),渗透率随孔隙度的增大迅速增大,暗示安山岩除基质孔隙外,还发育大量的裂缝。通过岩心手标本、物性数据、铸体薄片和微电阻成像研究发现,图6b区中安山岩的构造裂缝较图6a区中安山岩的构造裂缝发育(图3a、g),说明随着构造裂缝数量的增加,孔隙度和渗透率增大,即构造作用提高了安山岩的储集性能。综合试油试采数据发现,油日产量在10 t/d以上的安山岩试油井的孔隙度和渗透率集中分布在图6b区中,即储集空间和构造裂缝发育层段的安山岩具较大的

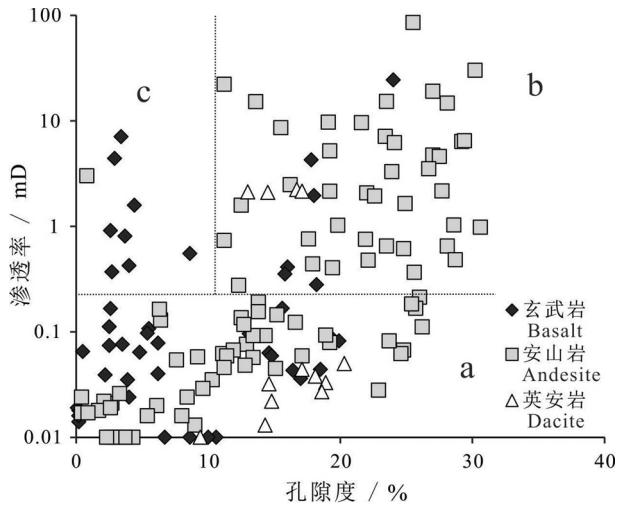


图6 西泉地区石炭系火山熔岩孔隙度与渗透率关系散点图
Fig.6 Relationship between porosity and permeability of Carboniferous volcanic lava in Xiquan area

油气开采潜力。

英安岩的孔隙度(主要集中在10%~20%,平均16%)高,而渗透率(分布在0.01~3 mD,平均为0.7 mD)较低。图6a区中英安岩的孔隙度大于10%,渗透率小于0.3 mD时,渗透率随着孔隙度的增加逐渐增加,呈现良好的正相关关系,表明该层段英安岩储集空间以基质孔隙为主。英安岩的孔隙度大于10%,渗透率大于0.3 mD时(图6b区),渗透率(均在2 mD左右)未随孔隙度的增大而增大,说明该层段英安岩的渗透率主要取决于裂缝的发育程度而非基质孔隙。通过岩心手标本和微电阻成像研究发现,图6b区中英安岩发育大量的构造裂缝,综合试油试采数据发现,油日产量在3 t/d以上的英安岩试油井的孔隙度和渗透率分布在图6b中,表明储集空间和构造裂缝发育层段的英安岩具有一定的油气开采潜力。

玄武岩整体致密,气孔不发育(气孔面孔率多在0~0.48%,平均气孔面孔率为0.3%)且部分呈孤立状,后期流体难于进入,溶蚀作用程度有限,致使次生孔隙少(次生溶孔面孔率主要集中在0~0.3%,平均次生溶孔面孔率为0.09%),孔隙度(分布在0~20%,平均8.1%)和渗透率(主要集中在0.03~10 mD,平均为1.0 mD)较低。玄武岩孔隙度小于10%时,同一孔隙度下渗透率在0.01~10 mD均有分布(图6c区),说明孔隙度不是控制玄武岩渗透率的决

定因素。结合岩心手标本、普通薄片、铸体薄片及微电阻成像资料,发现渗透率随着构造裂缝数量增多而增大,说明构造裂缝的存在和数量决定了玄武岩的渗流能力。玄武岩的孔隙度大于10%时,渗透率随着孔隙度的增大而增大,并且呈现一定的正相关关系(图6),该层段玄武岩的储集空间主要为基质孔隙。综合玄武岩手标本、岩石薄片、物性数据及试油试采资料,表明构造裂缝一定程度改善了玄武岩的渗透率,但未在玄武岩储层中发现一定规模的油气产能,是因为玄武岩整体致密、孔隙度低,未形成大规模的储集空间(图6c区)。

总体来看,火山熔岩中安山岩的储集性能较英安岩和玄武岩好,孔隙类型及组合多样,是最具油气勘探开发潜力的火山熔岩储层。

4 火山熔岩的成岩演化过程

4.1 成岩作用类型及特征

根据普通薄片及铸体薄片鉴定、扫描电镜等研究,表明西泉地区石炭系火山熔岩主要发育了8种成岩作用:(1)挥发分逸出作用:岩浆喷出地表过程中,岩浆中的水和二氧化碳等挥发分逸散形成气孔的过程(高有峰等,2007;罗静兰等,2013),主要发生于安山岩、英安岩中,形成大量的原生气孔(图3b、e);(2)冷凝收缩作用:指火山物质喷出地表后,由于温度降低,岩石发生不均匀的冷凝收缩,形成冷凝收缩缝,多呈弧形、圆形;(3)岩浆期后热液作用:指岩浆喷出地表,矿物自岩浆及挥发分中迅速结晶(王乃军等,2012;刘小洪等,2016),表现为硅质和绿泥石等充填气孔,形成杏仁体或残余气孔(图3k、n);(4)风化淋滤作用:研究区自火山岩形成之后,经历长时间的沉积间断,在此期间,火山熔岩遭受大气淡水的淋滤,岩石中的长石、碳酸盐等发生溶蚀作用,形成次生溶蚀孔隙(图3f、h);(5)构造破裂作用:火山熔岩脆性大,构造运动诱发断裂及大量构造裂缝的产生,构造裂缝较平直、缝较宽(图3a、c、g),构造裂缝不仅是火山熔岩重要的有效储集空间,还能连通先期形成的各类孔隙,为后期酸性流体进入火山熔岩发生进一步溶蚀提供有利通道(王岩泉等,2013);(6)压实固结作用:根据显微镜下鉴定表明,火山熔岩的骨架较其他岩石坚硬,抗压能力强,压实作用对火山熔岩的原生孔隙破坏程度

很小或几乎无影响(侯连华,2012);(7)次生充填作用:表现为构造裂缝、气孔与溶蚀孔隙的再充填,常见充填矿物为碳酸盐和石英(图3g,i,p)等;(8)深埋溶蚀作用:指在晚埋藏成岩阶段,深部热液及有机质排烃形成的有机酸、无机酸及地层水,溶蚀岩石中的长石、碳酸盐等形成次生溶孔(图3m)(余淳梅等,2004;李军等,2008)。

4.2 成岩演化序列的建立

根据钻井的岩石薄片、铸体薄片、图像孔喉、X-射线衍射、扫描电镜及物性资料等大量微观证据,利用以下四个成岩作用的划分依据,建立火山熔岩成岩演化序列。(1)自生矿物的类型、分布。自生矿物多为玉髓、粒状石英,方解石,放射状、球状绿泥石及毛发状伊利石等(图3i,j,n)。暗色矿物(辉石、角闪石)多在岩浆期后热液作用下发生蚀变形成蚀变绿泥石,栉壳状、簇状自生绿泥石多在早埋藏成岩阶段大量形成。自生伊利石一般形成于浅埋阶段的末期,大量出现在深埋阶段初期,粒状石英主要形成于晚埋藏成岩阶段(杨艳芳,2011;张瑞等,2015);(2)成岩产物接触关系及形成顺序。同一气孔或裂缝中存在的自生矿物,由气孔或裂缝壁向中心依次形成,绿泥石→玉髓(图3k),玉髓→粒状石英(图3l),表面粗糙的方解石早于干净的亮晶方解石(图3p);(3)孔隙类型、特征及孔隙带分布。火山熔岩的气孔在冷却成岩阶段形成(图3e);次生溶孔多产生于风化淋滤与埋藏-成岩阶段(图3h,m),而埋藏阶段的次生充填作用使得次生孔隙开始大量消减;(4)黏土矿物组合及I/S混层中I层的混层比。火山熔岩中黏土矿物X-射线衍射分析结果表明(表2),黏土矿物中I/S混层矿物均为有序度较高的伊利石,且伊/蒙间层比基本<30%,表明研究区黏土矿物的重结晶和演化程度总体较高,成岩演化

进入深埋成岩阶段。

结合成岩演化划分依据及岩石薄片、铸体薄片、扫描电镜实验:表明研究区火山熔岩共发生了3期溶蚀作用、2期硅质充填、2期构造作用(250~290 Ma和距今145 Ma)、3期碳酸盐及绿泥石等胶结作用(曲江秀,2014),火山熔岩的成岩演化进入深埋成岩阶段。玄武岩中:构造裂缝切穿长石绿泥石化(图3d),说明构造裂缝晚于长石的绿泥石化,碳酸盐I交代长石斑晶,并保持原来斑晶形状(图3o),其后,碳酸盐I发生溶蚀作用,亮晶碳酸盐II充填(图3p),其成岩演化序列为长石绿泥石化→溶蚀作用I→碳酸盐I→溶蚀作用II→碳酸盐II(图7)。安山岩中:气孔中依次为自生绿泥石(图3f,k)、毛发状伊利石和蒙脱石混层(图3j)、玉髓(图3k)、自生长石、粒状石英(图3l),其后,亮晶碳酸盐II充填孔隙,并且发生溶蚀作用(图3m),其成岩演化序列为气孔中自生绿泥石、毛发状伊利石、碳酸盐→玉髓→自生长石→溶蚀作用I→碳酸盐I→溶蚀作用II→粒状石英→碳酸盐II→溶蚀作用III(图7)。英安岩中:气孔中依次为自生绿泥石、玉髓(图3b、n),后期长石在溶蚀作用下形成的斑晶溶孔(图3h),其成岩演化序列为气孔中自生绿泥石、玉髓→溶蚀作用I→簇状绿泥石→溶蚀作用II→粒状石英(图7)。

4.3 成岩演化过程及对储层空间的影响

成岩作用不仅能改造原始矿物形成新的矿物,还可以改造火山熔岩的储集空间,进而影响火山熔岩原生储集空间和次生储集空间的演化(Sruoga and Rubinstein,2007;曲江秀,2014)。根据以上成岩作用类型、各岩性火山熔岩成岩演化序列、结合研究区火山岩锆石U-Pb定年结果(罗静兰等,2016)及前人对克拉美丽气田埋藏史及构造演化史的研究资料(曲江

表2 西泉地区石炭系火山熔岩黏土矿物X射线衍射相对含量数据

Table 2 Relative content of X-ray diffraction for clay minerals of Carboniferous volcanic lava in Xiquan area

井号	层位	黏土矿物含量/%					伊蒙混层比	
		蒙皂石(S)	伊利石(I)	高岭石(K)	绿泥石(C)	伊/蒙混层(I/S)	蒙皂石(S%)	伊利石(I%)
Q5	C _{2b}	/	10	/	12	78	15	/
Q015	C _{2b}	/	2	7	5	86	30	/
Q015	C _{2b}	/	9	/	10	81	35	/
Q015	C _{2b}	/	10	/	16	74	30	/
Q8	C _{2b}	/	5	/	6	89	5	/
Q6	C _{2b}	/	7	/	/	93	15	/

秀,2014),将西泉地区石炭系火山熔岩划分为同生成岩阶段(359~290 Ma)、表生成岩阶段(290~250 Ma)、埋藏成岩阶段(250 Ma以来)3个阶段。

同生成岩阶段(359~290 Ma):玄武岩、安山岩、英安岩均发生挥发分逸出作用和岩浆期后热液作用。在挥发分逸出作用下,安山岩和英安岩顶部产生大量的原生气孔(图3 b、e、f),孔隙度快速增大,玄武岩产生的气孔最少(图3 c,图7);岩浆期后热液作用下,各岩性火山熔岩中的部分原生气孔被绿泥石、硅质、碳酸盐等充填(图3k、l),导致原生气孔数量减少,孔隙度降低(图7)。同生成岩阶段的成岩作用主要控制了火山熔岩中气孔的孔径和数量,总体改善了火山熔岩的储集空间,安山岩孔隙度增长最多,其次为英安岩,玄武岩最少。

表生成岩阶段(290~250 Ma):石炭纪晚期,研究区遭受强烈的构造抬升(吴晓智,2012),火山熔岩发生构造破裂作用和风化淋滤作用。安山岩、英安岩中的长石斑晶、长石基质及早期充填的碳酸盐等发生溶蚀作用形成斑晶溶孔、基质溶孔和溶蚀缝等(图3a、f、h),极大地增大了安山岩、英安岩的孔隙度(图7),而玄武岩岩石十分致密,后期流体难以进入孔隙,溶蚀作用程度有限,但在构造破裂作用下易

形成构造裂缝(图3c),进而改善了孔隙度和渗透率(图7)。研究区各类火山熔岩的孔隙度、渗透率与距不整合面距离的关系表明(图8):不整合面附近安山岩的孔隙度和渗透率最高,随着距不整合面距离的增大,安山岩孔隙度和渗透率逐渐降低,约在60 m处,安山岩的物性达到最小。随着距离的继续增大,在110~130 m处构造裂缝发育段,安山岩的孔隙度和渗透率增高,再次达到顶峰,成为储集性能较好的另一个层段,但该层段安山岩的孔隙度和渗透率总体小于不整合面附近(图8)的同类岩石。岩心、普通薄片、铸体薄片和微电阻成像资料显示,风化淋滤带的安山岩发育大量气孔、斑晶溶孔、基质溶孔及溶蚀缝(图3a、e、h),极大地增加了安山岩的储集空间。构造裂缝发育带的安山岩发育大量构造裂缝及微裂缝(图3 a、f、g),不仅增大了安山岩储集空间,更连通了先期的孤立气孔、斑晶溶孔、基质溶孔,改善了安山岩的储集性能。油日产量在10 t/d以上的安山岩试油井大多集中在距不整合面0~20 m,少量形成于构造裂缝发育带(表3)。总的来说,风化淋滤作用和构造作用是改善安山岩储集性能的最重要因素,风化淋滤带安山岩的储集性能和油气产能最好,构造裂缝发育带次之。位于风化淋

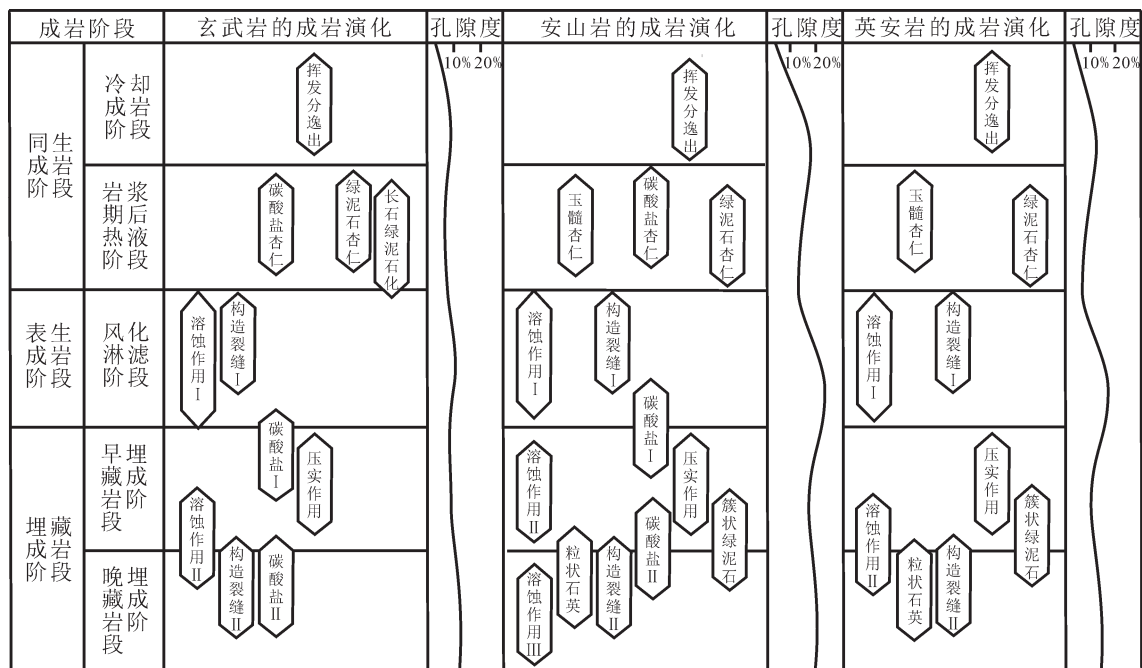


图7 准噶尔盆地西泉地区石炭系各类火山熔岩成岩演化序列

Fig.7 Petrogenetic evolution sequence of Carboniferous different lithological volcanic lavas in Xiquan area

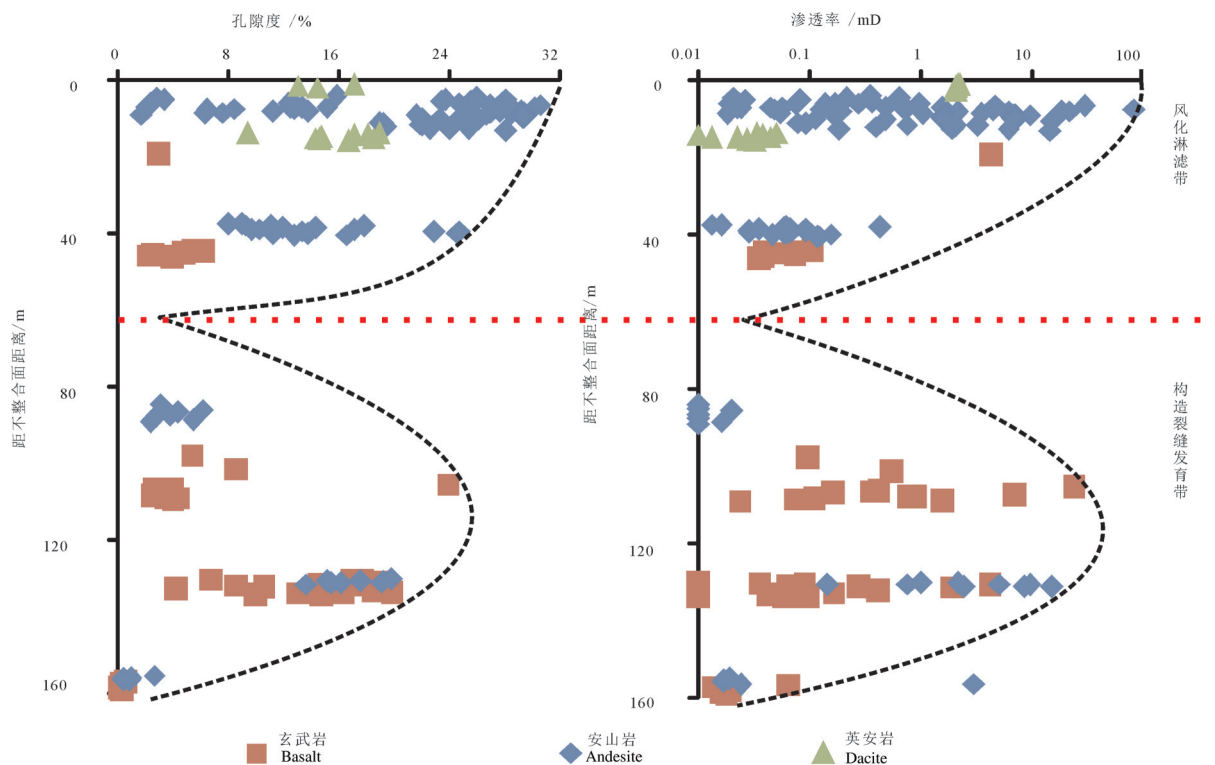


图8 西泉地区石炭系火山熔岩孔隙度、渗透率与不整合面距离的关系

Fig.8 Relationship between reservoir property of Carboniferous volcanic lava and distance to unconformity surfaces in Xiquan area

表3 西泉地区石炭系火山熔岩试油产量与不整合面距离的关系

Table 3 Relationship between oil production of Carboniferous volcanic lava and distance to unconformity surfaces in Xiquan area

井号	岩性	试油产量/(t/d)	不整合面深度/m	距不整合面距离/m
Q092	安山岩	16.56	2495	0
Q092	安山岩	0	2495	-99
Q2	安山岩	15.88	2527	0
Q2	安山岩	0	2842	236
Q9	安山岩	10.68	2722	-74
Q3	安山岩	7.61	2248	-1
Q10	安山岩	13.47	2376	0
Q10	安山岩	0.017	2376	-34
Q1	英安岩	3.53	1954	-10
Q101	玄武岩	0	2080	-100
Q101	玄武岩	0	2080	-32
Q7	玄武岩	0	1852	-10
Q8	玄武岩	0	2376	-450

滤带(距不整合面距离0~60 m)的英安岩和玄武岩的储层物性较安山岩差,英安岩的孔隙度明显高于

玄武岩,但渗透率偏低。而位于构造裂缝发育带(110~130 m)的玄武岩的孔隙度和渗透率达到顶峰。综合安山岩和玄武岩试油井的试油产量及孔隙度、渗透率与距不整合面距离关系显示,风化淋滤带的安山岩和构造裂缝发育带的玄武岩储集性能相对较好。其中,不整合面附近(0~20 m)的安山岩其储层物性最好,油气产能最高,最具油气开采潜力。风化淋滤带的英安岩也具有一定的油气产能,风化淋滤带和构造裂缝发育带玄武岩中均未见油气产能(图8,表3)。

埋藏成岩阶段(250 Ma以来):玄武岩、安山岩、英安岩在该阶段发生埋藏充填作用、构造破裂作用和深部溶蚀作用。埋藏充填作用使早期已形成的斑晶溶孔和裂缝被碳酸盐等充填(图3 g、o、p),致使玄武岩、安山岩、英安岩的孔隙度降低(图7)(郑曼等,2010)。但该阶段的构造作用和次生溶蚀作用增大了火山熔岩的储集空间(图3 f、m,图7)。同时,该期的2期烃类充注(第1次烃类充注发生于200~155 Ma的早埋藏成岩作用阶段;第2次烃类充注发生于145~85 Ma的晚埋藏成岩作用阶段)(罗静

兰等,2012)形成大量的有机酸通过断层以及次生裂缝进入火山熔岩储层中,溶蚀岩石中长石、碳酸盐等易溶组分,增大了火山熔岩的孔隙度和渗透率(图7)。

整体而言,研究区石炭系成岩作用类型、成岩演化过程对火山熔岩储层性能的影响基本相似,但各成岩作用对玄武岩、安山岩、英安岩的孔隙度影响程度存在差异(图7)。玄武岩岩石十分致密,挥发分逸出作用形成少量气孔,部分气孔在岩浆期后热液作用下被碳酸盐和绿泥石充填,导致后期流体难以进入孔隙,溶蚀作用程度有限;尽管玄武岩在构造破裂作用下易形成构造裂缝,在一定程度上可改善玄武岩的储集性能,但研究区风化淋滤带和构造裂缝发育带的玄武岩中均未见油气产能,暗示一方面玄武岩的孔隙不发育,另一方面,后期形成的少量构造裂缝没有形成有效的孔缝网络系统。安山岩在挥发分逸出作用下产生气孔,部分在岩浆期后热液作用下被玉髓、粒状石英、碳酸盐充填,同生成岩阶段安山岩中形成的原生孔隙经风化淋滤作用、溶蚀作用和构造破裂作用极大地提高了安山岩的孔隙度和渗透率,是安山岩重要的建设性成岩作用;而岩浆期后热液作用和次生充填作用破坏了安山岩的储集空间,属于破坏性成岩作用,压实作用对火山熔岩储集空间的影响较小。英安岩气孔相对玄武岩发育,气孔多被粒状石英半充填或完全充填,风化淋滤作用、溶蚀作用和构造作用增大了储层的孔隙度及渗透率,而岩浆期后热液作用和次生充填作用减少了英安岩的储集空间。

5 结 论

(1)西泉地区石炭系火山熔岩形成后经历了3期溶蚀作用、2期硅质充填、2期构造作用、3期碳酸盐及绿泥石等胶结作用的成岩作用过程。

(2)挥发分逸出作用主要控制着火山熔岩原生气孔的发育,对安山岩、英安岩孔隙度贡献大于玄武岩。溶蚀作用、风化淋滤作用、构造破裂作用在改善火山熔岩储集性能方面具有重要的建设性作用,安山岩、英安岩中的溶蚀孔隙较玄武岩发育。冷凝收缩作用对火山熔岩储集空间的贡献相对较少。岩浆期后热液充填作用,次生充填作用是破坏火山熔岩储集性能的成岩作用。压实固结作用对

火山熔岩的原生孔隙几乎无影响。

(3)西泉地区石炭系安山岩分布最广、储集性能最好,油日产量最高,特别是位于石炭系顶部风化剥蚀淋滤带(距石炭系顶面0~20 m)的安山岩是最具开采潜力的火山熔岩储层。英安岩的储集性能整体较差、油日产量低,但储集空间和构造裂缝发育层段的英安岩具有一定的油气开采潜力。玄武岩致密坚硬,未见油气产出,基本为非油气储层。

致谢:感谢西北大学大陆动力学国家重点实验室在样品测试方面的大力支持,感谢审稿专家和编辑对论文提出了宝贵修改意见。

注释

①罗静兰,马尚伟,代静静,汪冲.2016.西泉地区石炭系火山岩识别与储层特征研究[R].

Reference

- China National Petroleum Corporation. 1994. The Description Method of Volcanic Rock Reservoir(SY/T5830-93)[S]. Beijing: Standards Press of China, 2-10 (in Chinese).
- Chen Fajing, Wang Xinwen, Wang Xinwei. 2005. Prototype and tectonic evolution of the Junggar basin, northwestern China[J]. *Earth Science Frontiers*,12(3):77-89(in Chinese with English abstract).
- Chen Jianping, Wang Xulong, Deng Chunping, Liang Digang, Zhang Yueqian, Zhao Zhe, Ni Yunyan, Zhi Dongming, Yang Haibo, Wang Yutao. 2016. Oil and gas source, occurrence and petroleum system in the Junggar Basin, northwest China[J]. *Acta Geologica Sinica*, (3): 421-450(in Chinese with English abstract).
- Ding Xinlu. 2012. The Researchment of the Characteristics of the Carboniferous Volcanic Fracture and Crack Structure in Eastern Junggar Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 1-38 (in Chinese with English abstract).
- Gao Youfeng, Liu Wanzhu, Ji Xueyan, Bai Xuefeng, Wang Pujun, Huang Yulong, Zheng Changqing, Min Feiqiong. 2007. 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*, 37(6): 1251-1258(in Chinese with English abstract).
- He Dengfa, Chen Xinfu, Kuang Jun, Yuan Hang, Wu Xiaozhi, Du Peng, Tang Yong. 2010. Characteristics and exploration potential of Carboniferous hydrocarbon plays in Junggar Basin[J]. *Acta Petrole Sinica*, 31(1):1-11(in Chinese with English abstract).
- Hu Qiuyuan, Dong Dawei, Zhao Li, Li Li, Li Xiao, Kong Xue. 2016. Tectonic evolutionary characteristics and their causes of Chepaizi Uplift in Junggar Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 37(4): 556-564(in Chinese with English abstract).

- Hou Lianhua, Zhu Rukai, Zhao Xia, Pang Zhenglian, Luo Xia, Mao Zhiguo. 2012. The control factors and distribution laws of volcanic oil and gas reservoir in China[J]. *Engineering Sciences*, (6):77–86 (in Chinese with English abstract).
- Lenhardt N, Götz A E. 2011. Volcanic settings and their reservoir potential: An outcrop analog study on the Miocene Tepoztlán Formation, Central Mexico[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 204(1–4):66–75.
- Li Di. 2016. Carboniferous Tectonic Framework and Sedimentary Filling Evolution in The Junggar Basin and Adjacent Area, NW China[D]. Beijing: China University of Geosciences. 1–298(in Chinese with English abstract).
- Li Jun, Xue Peihua, Zhang Aiqing, Liu Xiaoyan. 2008. Characteristics and controlling factors of carboniferous volcanism reservoir in the middle section of the northwestern margin of Junggar Basin[J]. *Acta Petroli Sinica*, 29(3):329–335(in Chinese with English abstract).
- Lei Dewen, Chen Gangqiang, Liu Hailei, Li Xiao, Tao Keyu, Cao Jian. 2017. Study on the Forming Conditions and Exploration Fields of the Mahu Giant Oil (Gas) Province, Junggar Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(7):1604–1619(in Chinese with English abstract).
- Liu Ge, She Jianzhong, Yang Wenlong, Wang Qingjun, Jia Jian, Di Xiaochen. 2018. Zircon U–Pb chronology and geochemistry of the Kalagang Formation volcanic rocks in Bayindala area, West Junggar, and their geological significance[J]. *Geology in China*, 45(6): 1241–1250(in Chinese with English abstract).
- Liu Xiaohong, Feng Pengyou, Xi Aihua, Yan Xiaorong, Wu Yu, Liu Chang. 2016. Diagenesis and pore evolution of carboniferous volcanic reservoirs in Dixi area, Kelameili Gas Field[J]. *Lithologic Reservoirs*, (1):38–48(in Chinese with English abstract).
- Liu Shuangquan, Zhang Shuncun, Dai Long, Jiao Ri, Lu Xinchuan, Shi Ji'an, Zhang Shengyin, Zou Niuniu. 2014. Characteristics and main controlling factors of high quality carboniferous volcanic reservoirs in Junggar Basin [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, (6):786–794(in Chinese with English abstract).
- Luo Jinglan, Hou Lianhua, Jiang Yiqin, Shao Hongmei, Yang Yanfang, Guo Yongfeng, Kang Jing. 2012. Chronology and tectonic settings of igneous rocks and origin of volcanic reservoirs in Ludong area, eastern Junggar Basin[J]. *Acta Petroli Sinica*. 33(3):351–360(in Chinese with English abstract).
- Luo Jinglan, Shao Hongmei, Yang Yanfang, Li Miao, Luo Chunyan. 2013. Temporal and spatial evolution of burial– hydrocarbon filling– diagenetic process of deep volcanic reservoir in Songliao Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 20(5):175–187(in Chinese with English abstract).
- Ma Xueping1, Zong Pu, Zhang Meiqiong, Zhang Yubo, Lv Dan. 2015. Two new stratigraphic units of the Upper Devonian in the northwest border of the Junggar Basin, Xinjiang[J]. *Geology in China*, (2): 695–709(in Chinese with English abstract).
- Peng Wenchun, Zhang Chunsheng, Wei Dongtao, Wang Yanjun, Wei Cairu, Guo Juanjuan, Liu Shengxu. 2014. Different geological conditions and accumulation modes of Carboniferous between the South and North belt in Xiquan area[J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, (2):72–76(in Chinese with English abstract).
- Qu iangxiu, Gao Changhai, Zha Ming, Zhang Yong. 2014. Reservoir characteristics and diagenetic evolution of Carboniferous volcanic rock in Kelameili gas field of Junggar Basin[J]. *Journal of China University of Petroleum*, (5):1–8(in Chinese with English abstract).
- Rao Song, Zhu Yake, Hu Di, Hu Shengbiao, Wang Qiang. 2018. The thermal history of Junggar Basin: Constraints on the tectonic attribute of the Early– Middle Permian basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(6):1176–1195 (in Chinese with English abstract).
- Su Yuping, Zheng Jianping, Griffin William L, Tang Huayun, O'Reilly Suzanne Y, Lin Xiangyang. 2010. Zircon U–Pb and Hf isotopes of volcanic rocks from the Batamayineishan Formation in the eastern Junggar Basin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(30):2931–2943(in Chinese with English abstract).
- Sruoga Patricia, Rubinstein Nora. 2007. Processes controlling porosity and permeability in volcanic reservoirs from the Austral and Neuque basins, Argentina [J]. *AAPG Bulletin*, 91(1):115–129.
- Tan Jiayi, Wu Runjiang, Zhang Yuanyuan, Wang Shufang, Guo Zhaojie. 2009. Characteristics and geochronology of volcanic rocks of Batamayineishan Formation in Kalamaily, Easter Junggar, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(3):539–546(in Chinese with English abstract).
- Wu Xiaozhi, Zhou Lu, Yang Disheng, Qi Xuefeng, Li Bohau. 2012. Structure evolution and hydrocarbon accumulation the Beisantai uplift in Junggar Basin[J]. *Chinese Journal of Geology(Scientia Geologica Sinica)*, 47(3): 653–668(in Chinese with English abstract).
- Wang Luo, Li Jianghai, Shi Yongmin, Zhang Liwei. 2010. The identification and prediction of Carboniferous volcanic rocks in Dixi area, Junggar basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(1): 242–254(in Chinese with English abstract).
- Wang Luo, Li Jianghai, Shi Yongmin, Zhao Yue, Ma Yansheng. 2014. Analysis of the reservoir spaces and their main controlling factors of Carboniferous volcanic rocks in Dixi area, Junggar Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 21(1): 205–215(in Chinese with English abstract).
- Wang Najun, Luo Jinglan, Liu Huaqing, Li Shuangwen, Shao Hongmei, Guo Yongfeng, Yao Jun. 2012. Diagenesis of volcanic rocks in Shahejie formation of Qikou Depression and its control over reservoir performance[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 33(3): 360–370(in Chinese with English abstract).
- Wang Pujun, Feng Zhiqiang, Liu Wanzhu. 2008. Basin Volcanic Rock[M]. Beijing: Science Press(in Chinese with English abstract).
- Wang Yiran, Wu Tianqi, Tian Jijun, Yang Shuguang, Wang Changjiang, Zhang Guo Qing, Wei Bo, Li Le, Fan Qi. 2016.

- Formation conditions and favorable exploration zones of shale gas on the southern margin of Junggar Basin[J]. *Geology in China*, (1): 288–297(in Chinese with English abstract).
- Wang Yanquan, Hu Daqian, Cai Guogang, Wang Pujun, Yu Xiaojian. 2013. Characteristics and controlling factors of cenozoic volcanic reservoirs in Liaohe Basin, NE China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, (5): 896–904(in Chinese with English abstract).
- Wang Zehua, Zhu Xiaomin, Sun Zhongchun, Luo Xingping, Dai Xiongjun, Dai Yong. 2015. Igneous lithology identification and lithofacies classification in the basin using logging data: Taking Junggar Basin as an example[J]. *Earth Science Frontiers*, 22 (3): 254–268(in Chinese with English abstract).
- Yang Yanfang. 2011. Research on Volcanic Reservoir Space Evolution, Diagenesis and Diagenetic Facies——The Lower Cretaceous Volcanic Rocks of Yingcheng Formation, Xujiawezi, Songliao Basin[D], Xi'an: Northwest University(in Chinese with English abstract).
- Yu Chunmei, Zheng Jianping, Tang Yong, Yang Zhao, Qi Xuefeng. 2004. Reservoir properties and effect factors on volcanic rocks of basement beneath Wucuiwan depression, Junggar Basin[J]. *Earth Science*, 29(3): 303–307(in Chinese with English abstract).
- Yu Jingwei, Ye Yong, Liu Ni, Zhu Yongcai, Wen Huaguo. 2018. Character differences and controlling factors of reservoirs in the upper-middle Jurassic Fudong slope area, Junggar Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(5):1070–1080(in Chinese with English abstract).
- Zhang Rui, Zha Ming, Qu Jiangxiu, Zhang Yong. 2015. Diagenesis of Carboniferous volcanic reservoir in Dixi Area of Junggar Basin[J]. *Fault Block Oil & Gas Field*, (1): 31–35(in Chinese with English abstract).
- Zhao Wenzhi, Zou Caineng, Li Jianzhong, Jia Yufeng, Zhang Shengyin. 2009. Comparative study on volcanic hydrocarbon accumulations in western and eastern China and its significance[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 36(1):1–11.
- Zhao Xia, Jia Cheng zao, Zhang Guangya, Feng Zhiqiang, Zhang Guangya, Hu Suyun, Kuang Lichun, Zhang Yan. 2008. Geochemistry and tectonic settings of Carboniferous intermediate-basic volcanic rocks in Ludong-Wucuiwan, Junggar basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 15(2):272–279(in Chinese with English abstract).
- Zhang Shuncun, Niu Bin, Wang Xuehua, Wei Yanzhao, Lai Shaocong, Fang Xiang, Zhang Lijun. 2015. Geochemical characteristics of the Carboniferous volcanic rocks in Dixi area, Junggar Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 20(supp.2):138–147(in Chinese with English abstract).
- Zheng Man, Li Jianzhong, Wang Liwu, Zhang Qingchun, Wu Xiaozhi, Ran Weipeng, Wang Ying. 2010. Reservoir space characteristics and evolution of the volcanic rocks in Yingcheng Formation of Changling fault depression, Songliao Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(1): 135–141(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈发景, 汪新文, 汪新伟. 2005. 准噶尔盆地的原型和构造演化[J]. *地学前缘*, 12(3): 77–89.
- 陈建平, 王绪龙, 邓春萍, 梁狄刚, 张越迁, 赵喆, 倪云燕, 支东明, 杨海波, 王屿涛. 2016. 准噶尔盆地油气源、油气分布与油气系统[J]. *地质学报*, (3): 421–450.
- 丁心鲁. 2012. 准噶尔盆地东部石炭纪火山岩断裂及裂缝构造特征研究[D]. 西安: 西北大学, 1–38.
- 高有峰, 刘万洙, 纪学雁, 白雪峰, 王璞琨, 黄玉龙, 郑常青, 闵飞琼. 2007. 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*, 37(6):1251–1258.
- 何登发, 陈新发, 况军, 袁航, 吴晓智, 杜鹏, 唐勇. 2010. 准噶尔盆地石炭系油气成藏组合特征及勘探前景[J]. *石油学报*, 31(1): 1–11.
- 胡秋媛, 董大伟, 赵利, 李理, 李萧, 孔雪. 2016. 准噶尔盆地车排子凸起构造演化特征及其成因[J]. *石油与天然气地质*, 37(4): 556–564.
- 侯连华, 朱如凯, 赵霞, 庞正炼, 罗霞, 毛治国. 2012. 中国火山岩油气藏控制因素及分布规律[J]. *中国工程科学*, (6):77–86.
- 李涤. 2016. 准噶尔盆地及邻区石炭纪构造格架与沉积充填演化[D]. 北京: 中国地质大学, 1–298.
- 李军, 薛培华, 张爱卿, 刘小燕. 2008. 准噶尔盆地西北缘中段石炭系火山岩油藏储层特征及其主控因素[J]. *石油学报*, 29(3):329–335.
- 雷德文, 陈刚强, 刘海磊, 李啸, 陶柯宇, 曹剑. 2017. 准噶尔盆地玛湖凹陷大油(气)区形成条件与勘探方向研究[J]. *地质学报*, 91(7): 1604–1619.
- 刘阔, 舍建忠, 杨文龙, 王庆军, 贾健, 邸晓辰. 2018. 西准噶尔巴音达拉地区卡拉岗组火山岩锆石 U–Pb 年代学、地球化学及其地质意义[J]. *中国地质*, 45(6): 1241–1250.
- 刘小洪, 冯明友, 郗爱华, 鄢晓荣, 吴宇, 刘畅. 2016. 克拉美丽气田滴西地区石炭系火山岩储层成岩作用及孔隙演化[J]. *岩性油气藏*, (1):38–48.
- 柳双权, 张顺存, 戴龙, 矫睿, 鲁新川, 史基安, 张生银, 邹妞妞. 2014. 准噶尔盆地石炭系火山岩优质储层特征及主控因素[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, (6):786–794.
- 罗静兰, 侯连华, 蒋宜勤, 邵红梅, 杨艳芳, 郭永峰, 康静. 2012. 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*, 33(3):351–360.
- 罗静兰, 邵红梅, 杨艳芳, 李杪, 罗春燕. 2013. 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*, (5): 175–187.
- 马学平, 宗普, 张美琼, 张宇波, 吕丹. 2015. 新疆准噶尔盆地西北缘上泥盆统两个新地层单元[J]. *中国地质*, (2): 695–709.
- 彭文春, 张春生, 魏东涛, 王彦君, 魏彩茹, 郭娟娟, 刘生旭. 2014. 西泉地区石炭系南北油气地质条件及成藏模式差异分析[J]. *长江大学学报(自科版)*, (2):72–76.
- 曲江秀, 高长海, 查明, 张勇. 2014. 准噶尔盆地克拉美丽气田石炭系火山岩储层特征及成岩演化[J]. *中国石油大学学报(自然科学)*

- 版), (5): 1-8.
- 饶松, 朱亚珂, 胡迪, 胡圣标, 王强. 2018. 准噶尔盆地热史恢复及其对早一中二叠世时期盆地构造属性的约束[J]. 地质学报, 92(6): 1176-1195.
- 苏玉平, 郑建平, Griffin William L, 汤华云, O'Reilly Suzanne Y, 林向洋. 2010. 东准噶尔盆地巴塔玛依内山组火山岩锆石U-Pb年代及Hf同位素研究[J]. 科学通报, (30): 2933-2945.
- 谭佳奕, 吴润江, 张元元, 王淑芳, 郭召杰. 2009. 东准噶尔卡拉麦里地区巴塔玛依内山组火山岩特征和年代确定[J]. 岩石学报, 25(3): 539-546.
- 吴晓智, 周路, 杨迪生, 齐雪峰, 李伯华. 2012. 准噶尔盆地北三台凸起构造演化与油气成藏[J]. 地质科学, 47(3): 653-668.
- 王洛, 李江海, 师永民, 张立伟. 2010. 准噶尔盆地滴西地区石炭系火山岩识别与预测[J]. 岩石学报, 26(1): 242-254.
- 王洛, 李江海, 师永民, 赵越, 马寅生. 2014. 准噶尔盆地滴西地区石炭系火山岩储集空间及主控因素分析[J]. 地学前缘, 21(1): 205-215.
- 王乃军, 罗静兰, 刘华清, 李双文, 邵红梅, 郭永峰, 姚军. 2012. 歧口凹陷沙河街组火山岩成岩作用及对储集性能的控制[J]. 地球学报, 33(3): 360-370.
- 王璞珺, 冯志强, 刘万洙. 2008. 盆地火山岩[M]. 北京: 科学出版社.
- 王怡然, 吴天琦, 田继军, 杨曙光, 王长江, 张国庆, 韦波, 李乐, 樊奇. 2016. 准噶尔盆地南缘页岩气形成条件与有利区预测[J]. 中国地质, (1): 288-297.
- 王岩泉, 胡大千, 蔡国刚, 王璞珺, 于小健. 2013. 辽河盆地东部凹陷火山岩储层特征与主控因素[J]. 石油学报, (5): 896-904.
- 王泽华, 朱筱敏, 孙中春, 罗兴平, 戴雄军, 戴勇. 2015. 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, 22(3): 254-268.
- 杨艳芳. 2011. 火山岩储层储集空间演化、成岩作用及成岩相研究[D]. 西安: 西北大学.
- 余淳梅, 郑建平, 唐勇, 杨召, 齐雪峰. 2004. 准噶尔盆地五彩湾凹陷基底火山岩储集性能及影响因素[J]. 地球科学, 29(3): 303-307.
- 于景维, 叶勇, 柳妮, 朱永才, 文华国. 2018. 准噶尔盆地阜东斜坡区中上侏罗统储集层特征差异及控制因素分析[J]. 地质学报, 92(5): 1070-1080.
- 张瑞, 查明, 曲江秀, 张勇. 2015. 准噶尔盆地滴西地区石炭系火山岩储层成岩作用[J]. 断块油气田, (1): 31-35.
- 张顺存, 牛斌, 汪学华, 加玉锋, 张生银. 2015. 准噶尔盆地滴西地区石炭系火山岩地球化学特征[J]. 天然气地球科学, (Supp.2): 138-147.
- 赵文智, 邹才能, 李建忠, 冯志强, 张光亚, 胡素云, 匡立春, 张研. 2009. 中国陆上东-西部地区火山岩成藏比较研究与意义[J]. 石油勘探与开发, 36(1): 1-11.
- 赵霞, 贾承造, 张光亚, 卫延召, 赖绍聪, 方向, 张丽君. 2008. 准噶尔盆地陆东-五彩湾地区石炭系中-基性火山岩地球化学及其形成环境[J]. 地学前缘, 15(2): 272-279.
- 郑曼, 李建忠, 王立武, 张庆春, 吴晓智, 闫伟鹏, 王颖. 2010. 松辽盆地长岭断陷营城组火山岩储集空间特征及演化[J]. 岩石学报, 26(1): 135-141.
- 中国石油天然气总公司. 1994. 火山岩储集层描述方法(SY/T5830-93)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2-10.