

准噶尔盆地盆1井西凹陷周缘石炭系火山岩优质储层特征及成因

刘汉青^{1,2}, 林承焰^{1,2}, 董春梅^{1,2}, 栾国强³, 连丽霞⁴, 刘明⁴, 陈彤彤¹

[1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 2. 深层油气全国重点实验室, 山东 青岛 266580; 3. 长江大学地球科学学院, 湖北 武汉 430100; 4. 中国石油新疆油田分公司, 新疆 克拉玛依 834000]

摘要:近年来,准噶尔盆地腹部的盆1井西凹陷周缘石炭系火山岩油气藏勘探取得连续突破,然而,火山岩储层非均质性强、优质储层成因复杂以及储层分布规律不明等问题极大增加了油气勘探开发成本。针对上述问题,利用岩石学、地球化学、微米CT、测井和地震等多种技术手段,系统刻画了火山岩岩性-岩相特征及储集空间类型与分布规律;通过古地貌恢复与构造演化解析,明确风化剥蚀持续时间,探讨了构造运动和风化淋滤强度对储层发育的控制作用;结合不同地区岩性、构造和风化淋滤的差异性,建立了火山岩规模性优质储层发育模式。研究认为:①研究区火山岩以溢流相(玄武岩、安山岩、英安岩和流纹岩)和爆发相热碎屑流亚相(火山角砾熔岩和熔结凝灰岩)为主,岩性-岩相时空分布受多期次喷发事件控制。②储集空间以次生孔-缝系统为主,其中构造缝和粒间溶孔占比较大。储层垂向分带差异显著,莫北凸起由于处在构造斜坡位置,完整保存了4层结构(黏土带、淋蚀带、崩解带和母岩带);而石西凸起由于隆升剥蚀阶段位于构造高部位,导致黏土带遭受剥蚀搬运。③风化淋滤是风化壳型储层形成的关键地质过程,持续40 Ma的风化剥蚀时间是储层物性显著改善的临界阈值。火山角砾岩、玄武岩和安山岩对风化溶蚀作用响应较为敏感,物性改善幅度更为明显。④海西期—印支期构造运动通过裂缝活化显著改善了内幕型储层的储集性能,形成了风化壳-内幕双层储层结构。英安岩、流纹岩和火山角砾岩是该类储层的优势岩性。本研究提出了“有利岩性-岩相为物质基础,表生风化与构造演化双重机制控制”的火山岩储层发育模式,指出海西期—印支期构造活跃区及长期暴露风化区(风化时长>40 Ma)的叠合区域为下一步优质火山岩储层勘探的重点靶区。

关键词:成因机制;储层特征;火山岩储层;石炭系;盆1井西凹陷;准噶尔盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Characteristics and genesis of the high-quality Carboniferous volcanic reservoirs in the periphery of the Western Well Pen-1 Sag, Junggar Basin

LIU Hanqing^{1,2}, LIN Chengyan^{1,2}, DONG Chunmei^{1,2}, LUAN Guoqiang³, LIAN Lixia⁴, LIU Ming⁴, CHEN Tongtong¹

[1. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China; 2. Key Laboratory of Deep Oil and Gas, Qingdao, Shandong 266580, China; 3. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China; 4. Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, China]

Abstract: In recent years, continuous breakthroughs have been achieved in exploring the Carboniferous volcanic hydrocarbon reservoirs in the periphery of the Western Well Pen-1 Sag within the central Junggar Basin. However, challenges such as the strong heterogeneity of volcanic reservoirs, complex genesis of high-quality reservoirs, and the unclear reservoir distribution patterns have significantly increased the costs of hydrocarbon exploration and development. To address these issues, we systematically characterize the lithology and lithofacies of volcanic rocks, as well as reservoir space types and their distribution patterns, using multiple techniques including petrology, geochemistry, micro-computed tomography (micro-CT), well logging, and seismic surveys. Through paleogeomorphic reconstruction and tectonic evolution analysis, we determine the durations of weathering and denudation and explore how tectonic movements, together with the intensities of weathering and leaching, control reservoir occurrence. In combination with differences in lithology, structure, and the intensity of weathering and leaching across various areas, we establish a developmental model for large-

收稿日期:2025-04-15;修回日期:2025-06-24。

第一作者简介:刘汉青(1992—),男,博士研究生,储层地质学。E-mail: liuhq@upc.edu.cn。

通信作者简介:林承焰(1963—),男,教授、博士研究生导师,储层地质学与油气描述、沉积学及油气地质与勘探。E-mail: lincy@upc.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(41972142,42202145)。

scale, high-quality volcanic reservoirs. The results indicate that the volcanic rocks in the study area are dominated by effusive phase (that is, basaltic, andesitic, dacitic, and rhyolitic types) and the pyroclastic flow sub-phase of explosive phase (i. e., resulting in volcanic breccia lavas and welded tuffs). The spatiotemporal distribution of the lithology and lithofacies is governed by multi-stage eruption events. The reservoir spaces are dominated by secondary pores and fracture systems, with tectonic fractures and intergranular dissolution pores representing high proportions. The reservoirs exhibit significant differences in vertical zoning. For instance, the Mobei Uplift, located on a structural slope, preserves a complete four-layered structure consisting of clay zone, leaching zone, disintegration zone, and parent rock zone. In contrast, the Shixi Uplift, located at a structural high during the uplifting and denudation stage, experienced the denudation and transport of the clay zone. Weathering and leaching are key geological processes in the formation of weathered crustal reservoirs. A duration of sustained weathering and denudation of approximately 40 Ma is identified as the critical threshold for significant improvement in reservoir physical properties. Pronounced improvements in physical properties are observed in volcanic breccias, basalts, and andesites as these lithologies are more sensitive to weathering and dissolution. The Hercynian to Indosinian tectonic movements significantly improve the storage capacity of interior reservoirs through fracture reactivation, leading to the formation of a dual-layered reservoir structure comprising weathered crustal and interior reservoirs. Preferential lithologies for this reservoir type include dacites, rhyolites, and volcanic breccias. Accordingly, a volcanic reservoir developmental model proposed is characterized by a material basis comprising favorable lithologies and lithofacies, along with the dual control of supergene weathering and tectonic evolution. The superimposed zones of the Hercynian-Indosinian tectonically active areas and areas subjected to long-term weathering (> 40 Ma) are identified as key targets for future exploration of high-quality volcanic reservoirs.

Key words: genetic mechanism, reservoir characteristics, volcanic reservoir, Carboniferous, Western Well Pen-1 Sag, Junggar Basin

引用格式:刘汉青,林承焰,董春梅,等. 准噶尔盆地盆1井西凹陷周缘石炭系火山岩优质储层特征及成因[J]. 石油与天然气地质, 2026, 47(1): 143–161. DOI: 10. 11743/ogg20260110.

LIU Hanqing, LIN Chengyan, DONG Chunmei, et al. Characteristics and genesis of the high-quality Carboniferous volcanic reservoirs in the periphery of the Western Well Pen-1 Sag, Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(1): 143–161. DOI: 10. 11743/ogg20260110.

随着全球主要含油气盆地多数已进入高勘探程度期,非常规油气资源勘探开发越来越受到重视,已经成为油气勘探的新目标^[1]。火山岩油气藏作为非常规油气资源的重要类型之一,近年来在松辽、四川、渤海湾和准噶尔等盆地的勘探开发上均取得了突破性进展,成为油气增储上产的关键接替领域^[2]。截至2023年,中国火山岩探明储量占到全球探明总储量的53%,已经成为全球火山岩油气藏勘探实践的主体^[3]。然而,大量研究表明:火山岩储层总体具有岩性-岩相种类多、非均质性强和控制因素复杂等特点^[4-7],导致储层预测和评价面临巨大挑战,制约了其高效勘探开发。

准噶尔盆地作为中国西部火山岩油气藏勘探的主阵地,油气成藏遵循“源控论”,在石炭系-二叠系地层中发现了工业油气流^[8]。盆1井西凹陷作为准噶尔盆地最主要的富烃凹陷之一,周缘发育一系列鼻凸构造,油气成藏条件十分优越^[9]。前人针对研究区石炭系火山岩储层的储集空间类型与分类评价^[10-11],岩性识别及岩相划分^[2,12],源-储配置与油气性质分析^[8,13]等所

开展的研究已取得了一些认识,奠定了良好的研究基础。但由于火山岩岩性-岩相复杂,加之长期的风化淋滤和多期构造作用改造,使得火山岩时空分布特征模糊及储层非均质性较强。同时勘探实践证实,不同井区油气显示和产能差异较大,含油气层段具有似层状分布的特征。因此,对研究区火山岩储层特征进行系统研究和明确储层成因机制是寻找优质储层的关键。本文针对上述存在的问题,在岩心观察和薄片鉴定的基础上,结合测井、地震和分析化验资料,精细表征了研究区火山岩的岩石学与储集性能特征,并深入探讨了火山岩优质储层发育的关键控制因素及其协同作用机制,最后建立了研究区火山岩储层发育的成因模式,以期为研究区下一步勘探部署提供支撑。

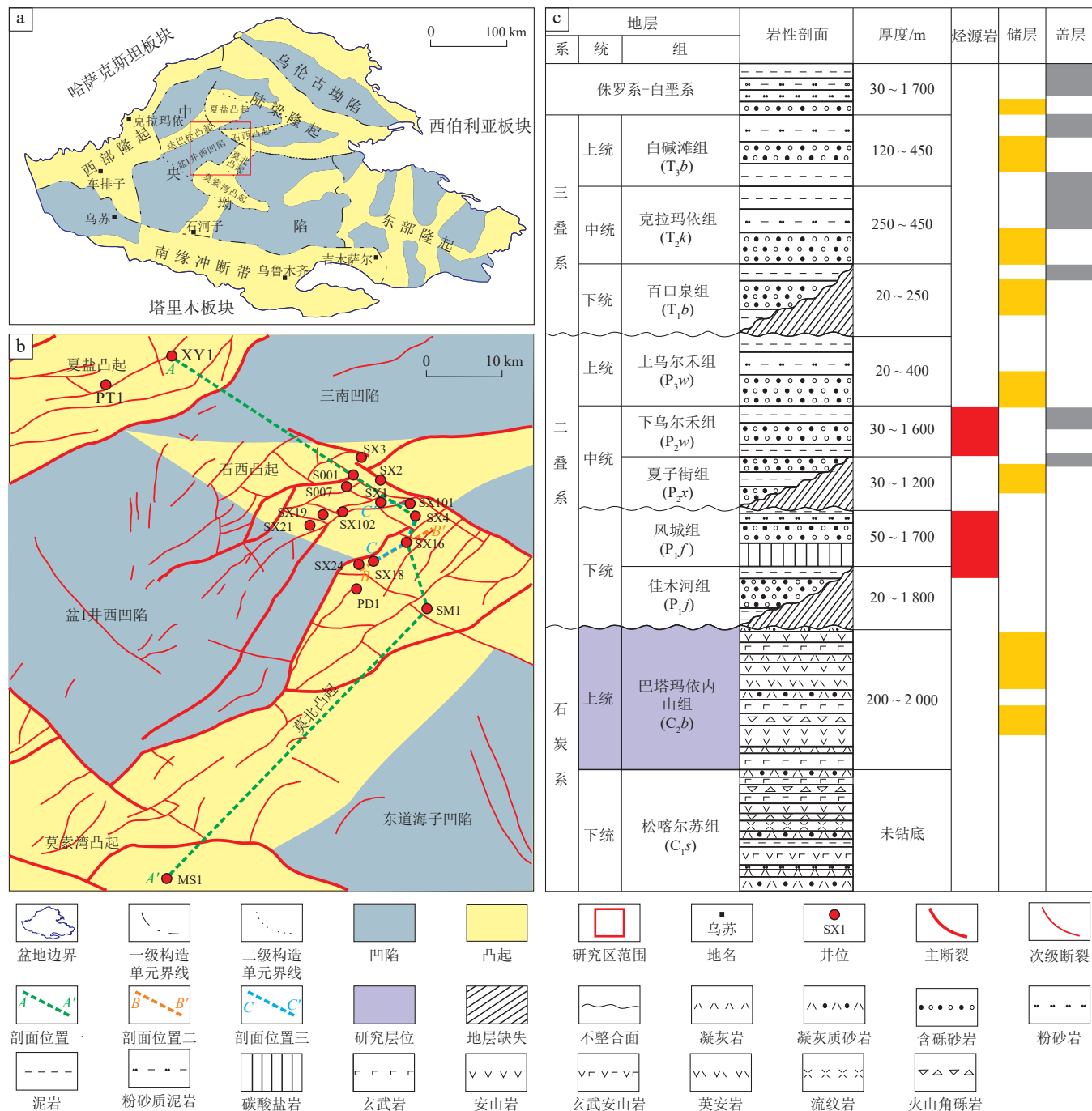
1 地质概况

准噶尔盆地处在塔里木、哈萨克斯坦和西伯利亚三大古板块的交汇地带,该盆地基底由前寒武系结晶

岩系与古生代褶皱带复合构成^[14]。基于含油气单元划分方案^[15],可将盆地划分为6个一级构造单元:乌伦古坳陷、陆梁隆起、西部隆起、中央坳陷、东部隆起和南缘冲断带(图1a)。盆1井西凹陷位于中央坳陷腹部,面积约8 720 km²,整体呈NE向展布,其周缘发育石西凸起、莫北凸起、夏盐凸起和莫索湾凸起等数个二级构造单元(图1b),构成了重要的油气富集地区,该区探明石油地质储量达 28×10^8 t,天然气地质储量为 $31.8 \times$

10^{10} m³,成为准噶尔盆地油气战略接替的重要区域^[9]。

受海西运动、印支运动、燕山运动和喜马拉雅运动的影响,盆地构造演化经历了中-晚古生代前陆盆地阶段、晚古生代—古近纪陆内坳陷盆地阶段以及新近纪以来的再生前陆盆地阶段^[16]。石炭纪作为盆地构造机制转换的关键期,伴随古特提斯洋闭合引发的板块拼合事件,诱发了大规模岛弧型火山活动^[17-19]。区内火山活动具有多幕式喷发特征,溢流相和爆发相



交替出现,岩浆演化总体符合基性—中—酸性序列特征(图1c)^[20]。研究区所在的中央坳陷作为准噶尔盆地中资源量最大的构造单元,“源—储同盆共存,构造—成藏同步”的独特地质条件使其平面上成藏要素配置关系相对较好,为火山岩储层研究提供了理想的载体^[21]。

2 储层基本特征

2.1 岩性—岩相类型

盆1井西凹陷周缘火山岩类型多样,岩相学分析表明:以溢流相中—酸性熔岩(安山岩、英安岩和流纹

岩)为主,占比49%~62%;火山碎屑岩次之,占比15%~22%;基性熔岩和沉火山碎屑岩等过渡类岩性仅在局部井区可见。

玄武岩中斑晶由大小不等的板状斜长石、辉石及少量角闪石和橄榄石组成,其中长石斑晶表面可见钠长石化和绿泥石化等蚀变现象,部分橄榄石斑晶发生伊丁石化;基质由细小板柱状微晶斜长石组成格架,格架间充填粒状辉石和磁铁矿等次生矿物,构成间粒—间隐结构;部分气孔被硅质、绿泥石和方解石充填或半充填,孔径多分布在150~2 000 μm(图2a)。玄武质安山岩作为过渡岩类,斑晶多为斜长石和辉石,可见少量角闪石和黑云母,基质由更—中长石、辉石和橄榄石等构成。安山岩中发育斑状结构和基质交织结构,斑晶为自

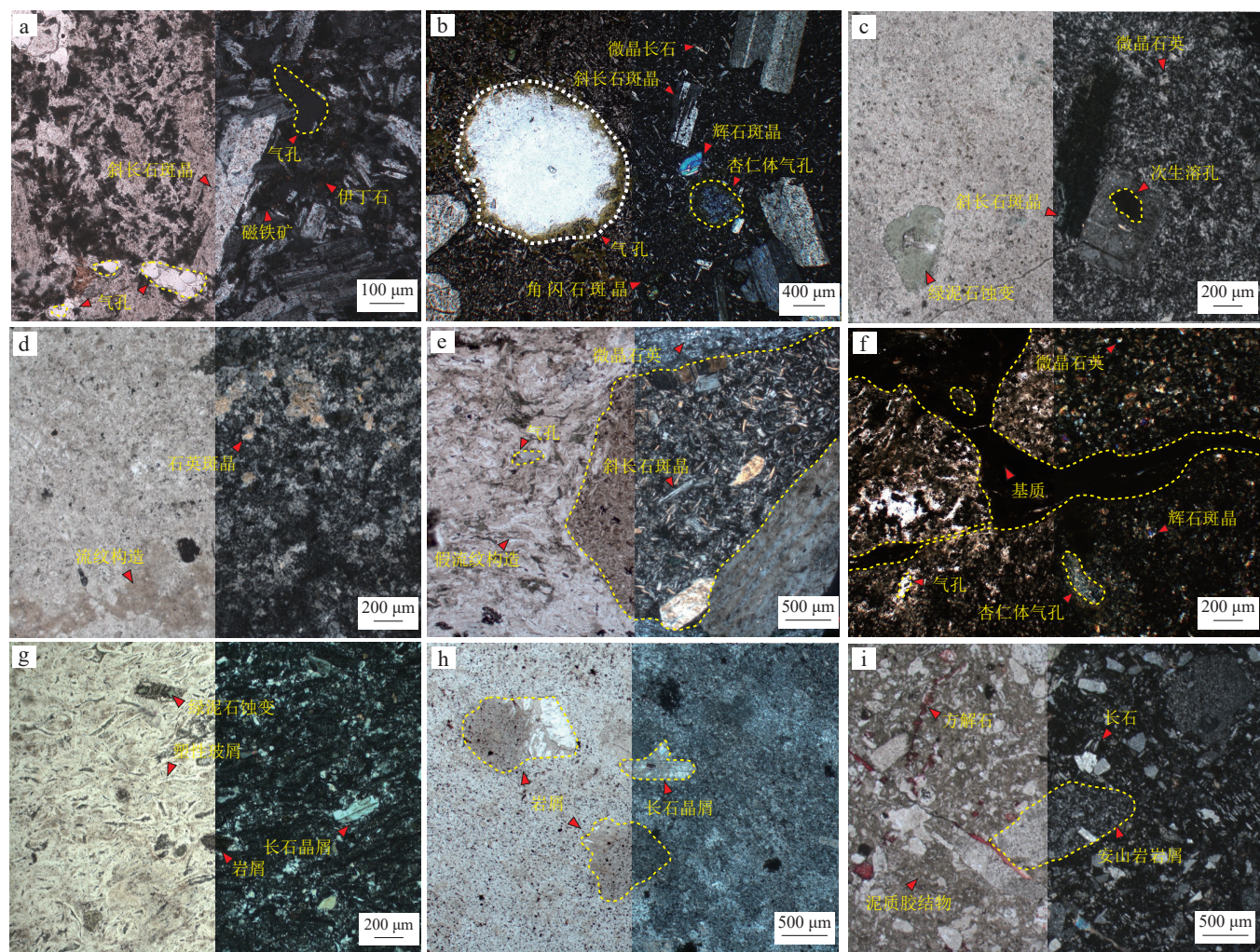


图2 准噶尔盆地盆1井西凹陷周缘石炭系火山岩典型镜下特征(普通薄片显微照片,左为单偏光,右为正交光)

Fig. 2 Typical microscopic characteristics of the Carboniferous volcanic rocks in the periphery of the Western Well Pen-1 Sag, Junggar

Basin (left: plane-polarized light; right: cross-polarized light)

- a. 伊丁玄武岩,XY1井,埋深4 927.6 m; b. 气孔安山岩,SX17井,埋深4 863.2 m; c. 蚀变英安岩,SX4井,埋深4 589.8 m; d. 流纹岩,SX4井,埋深4 605.0 m; e. 安山质角砾熔岩,SX24井,埋深5 626.5 m; f. 英安质火山角砾岩,S004井,埋深4 417.0 m; g. 熔结凝灰岩,S001井,埋深4 451.7 m; h. 流纹质晶屑凝灰岩,SX19井,埋深4 496.0 m; i. 安山质沉凝灰岩,MS1井,埋深7 008.9 m

形板状斜长石和少量角闪石、辉石和黑云母;基质主要由微针状和柱状斜长石微晶构成半定向交织结构,斜长石格架间分布了他形粒状石英;气孔被绿泥石、自生长石和方解石等充填形成杏仁体构造(图2b)。英安岩中石英、长石和角闪石斑晶最为常见,在斜长石周围存在正边结构,斑晶多被熔蚀,可见熔蚀反应边结构,部分斑晶完全被绿泥石取代;基质主要为长英质微晶组成,玻璃质发生脱玻化形成霏细结构(图2c)。流纹岩中斑晶主要为石英和碱性长石,还有少量斜长石和黑云母等铁镁矿物斑晶,石英斑晶常被熔蚀成港湾状,基质由长英质微晶和隐晶质组成,长英质微晶和隐晶质绕石英斑晶分布,形成典型的流纹构造(图2d)。

爆发相受控于火山活动强度,按照其形成方式可分为热碎屑流亚相和空落亚相^[22-23]。热碎屑流亚相主要以火山角砾熔岩、普通火山角砾岩以及熔结凝灰岩组成^[18,24]。火山角砾熔岩发育特有的假流纹构造,塑形碎屑在重荷和高温的共同影响下,发生拉长定向和扁平化(图2e)。普通火山碎屑显示出斑状、隐晶状或微晶结构,角砾棱角明显;局部见塑性浆屑挤压变形、撕裂状,角砾和岩屑成分在不同井之间变化很大,主要由安山岩和英安岩组成;胶结物常为火山灰或其分解物,火山灰具有绿泥石、硅化和方解石化等现象(图2f)。熔结凝灰岩具有熔结凝灰结构,岩石中含有大量粒径细小($< 2\text{ mm}$)的塑性玻屑和塑性岩屑,少量的晶屑和刚性岩屑交织分布,具有碎屑熔岩结构,镜下玻屑或小规模的浆屑呈一定程度的定向排列(图2g)。空落亚相指从火山口喷向空中的火山灰和火山尘等火山碎屑因其轻且细小容易被风搬运,具有典型的降落堆积特征^[25]。

空落亚相以凝灰岩为主,镜下具有凝灰结构,成分由凝灰级晶屑(以斜长石、石英和碱性长石为主)、玻屑和岩屑组成,常被火山灰和水化学物质胶结(图2h)。

火山沉积相形成于火山活动间歇期,该岩相中火山碎屑物质含量占比降低,可见类似于正常沉积岩的沉积构造^[26-27],晶屑颗粒主要为次棱角状-次圆状石英和长石,胶结物为黏土矿物与火山灰,局部可见脱玻化和绢云母化现象(图2i)。

根据地球化学特征显示,火山岩 SiO_2 含量在 $45.40\% \sim 75.40\%$ (平均值为 59.71%),全碱($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)含量为 $4.39\% \sim 9.87\%$ (平均值为 7.50%),TAS 判别图版(图3a)与 Zr/TiO_2 -Nb/Y 判别图版(图3b)共同揭示了火山岩岩性以钙碱性系列中-酸性熔岩为主导,指示了岛弧背景下岩浆分异演化过程^[16,18]。

2.2 岩性-岩相时空分布变化

针对研究区石炭系火山幕式喷发的特征,在前人锆石 U-Pb 同位素定年以及火山玻璃成分对比的约束条件下^[28-29],基于岩心观察、薄片鉴定以及测井解释等分析方法,开展火山喷发期次划分和岩相时空展布研究。一个相对完整的火山喷发期次是由一个喷发中心一次相对集中的(准连续)火山活动产生的,其底部为含有外碎屑的爆发相,下部为致密块状与气孔-杏仁构造并存的溢流相,顶部为爆发时悬浮在空中随后缓慢沉降下的火山沉积相^[30]。根据研究区实际的火山岩岩相垂向叠置特征,识别出6个期次:期次1—期次6受控于岩浆成分演化,岩浆酸度呈现出“高一低一高”的旋回变化趋势(图4)。

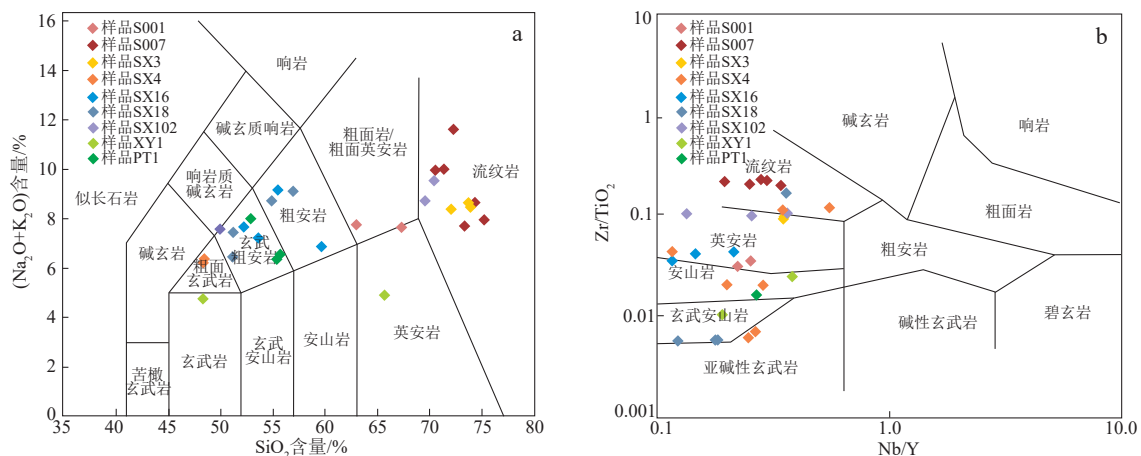


图3 准噶尔盆地盆1井西凹陷周缘石炭系火山岩分类

Fig. 3 Discriminant diagrams showing the classification of the Carboniferous volcanic rocks in the periphery of the Western Well Pen-1 Sag, Junggar Basin

a. 火山岩 TAS 判别图版; b. 火山岩 Zr/TiO_2 -Nb/Y 判别图版

(TAS 为火山岩全碱-二氧化硅图解; Zr/TiO_2 元素含量比值表示岩浆分异指数; Nb/Y 元素含量比值表示碱度指数。)

火山岩相的空间展布规律表现为:①期次1(中性溢流相玄武安山岩+爆发相+火山沉积相)平面分布较为局限,仅在莫索湾凸起可见;②期次2(中-酸性溢流相英安岩+爆发相)主要分布在莫索湾凸起、莫北凸起和石西凸起东翼;③期次3(中性溢流相安山岩+爆发相)喷发规模最大,构成各凸起石炭系主体地层;④期次4(基性溢流相玄武岩)与期次5(酸性溢流相流纹岩+爆发相)二者集中分布在莫北凸起西翼;⑤期次6(中-酸性溢流相英安岩+火山沉积相)处于火山活动衰退阶段,主要分布在莫北凸起西翼和中部。

2.3 储集空间类型

火山岩储层不同于其他基岩潜山储层的储集空间,由于其主体发育大量原生孔隙,有效的储集空间由原生孔-缝(气孔、晶间孔、脱玻化孔、斑晶炸裂缝和冷凝收缩缝)和次生孔-缝(斑晶溶孔、粒内/间溶孔、基质溶孔以及杏仁体溶蚀孔、溶蚀缝和构造缝)系统组成,具有明显的双重介质特征^[31]。

原生孔-缝系统受控于火山喷发-冷凝过程,原生气孔广泛发育在玄武岩、安山岩及火山角砾熔岩中,形态上受熔岩流动影响可见拉长变形的现象,部分气孔中被硅质、方解石和绿泥石等次生矿物半充填或充填(图5a)。在火山喷发的高能环境下,部分斑晶在爆炸作用下形成斑晶炸裂缝,该类裂缝具有非定向、延伸距离不远和无差别贯穿斑晶和基质的特点(图5b)。脱玻化孔形成于火山玻璃质快速淬火后的次生结晶过程,孔径不规则但多小于50 μm (图5c)。晶间孔多见于玄武岩和安山岩等熔岩中,发育受控于矿物晶体结晶程度(图5d)。火山角砾岩和凝灰岩可见原生颗粒间孔,主要为压实固结成岩残余的粒间孔和冷凝收缩缝(图5e)。

次生孔-缝系统与构造-流体耦合改造密切相关,杏仁体溶蚀孔发育在杏仁体气孔的基础上,是后期充填在气孔中的矿物又经溶蚀形成的不规则的孔隙(图5f)。粒内溶孔形成在火山角砾中,基质溶孔多形成于角砾边缘,形成微米-纳米级筛状孔隙(图5g)。粒间溶孔是由颗粒间所充填的矿物被溶蚀后残留下来的孔隙,该类孔隙被颗粒所围限,形态受颗粒形态控制(图5h)。斑晶溶孔主要为碱性长石斑晶溶蚀,由于该地区熔岩以发育多斑结构的中-酸性岩性为主,故能提供相对较多的储集空间(图5i)。裂缝可作为火山岩中重要的油气储集空间和流体运移通道^[32]。后期流体(主要为大气淡水和有机酸)与次生矿物发生水-岩反应,使矿物发生活化,形成大量的溶蚀扩大缝(图5j)。断裂带附近构造裂缝均较发育,裂缝之间的

交切关系指示了多期次形成的特点(图5k)。随着远离风化壳和构造破碎带,火山岩的裂缝发育密度逐渐减小,并几乎被次生矿物完全充填(图5l)。对薄片图像进行储集空间面孔率分析表明(图6),次生孔-缝系统构成了主要的储集空间类型,其中构造缝(13.50%)和粒间溶孔(11.60%)占比相对较大。

2.4 储层物性特征

研究区火山岩储层物性参数统计分析表明(图7a),孔隙度与渗透率呈弱相关性且离散性较强,反映出储集空间形成机制的复杂性。各凸起之间储集性能差异显著:莫索湾凸起火山岩储层孔隙度分布在1.40%~5.50%,平均值为3.24%,渗透率分布在 $(0.015 \sim 23.600) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值为 $2.139 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;夏盐凸起火山岩储层孔隙度分布在0.70%~14.21%,平均值为7.79%,渗透率分布在 $(0.011 \sim 89.050) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值为 $5.280 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;莫北凸起火山岩储层孔隙度分布在0.60%~20.60%,平均值为7.84%,渗透率分布在 $(0.010 \sim 8.570) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值为 $0.390 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;石西凸起火山岩储层孔隙度分布在0.88%~37.20%,平均值为13.34%,渗透率分布在 $(0.010 \sim 86.640) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值为 $8.247 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

由孔隙度频率分布直方图可知(图7b),莫索湾凸起和夏盐凸起火山岩储层整体孔隙度较低,孔隙度以2.00%~5.00%范围内为主,分别占比80%和50%;莫北凸起和石西凸起火山岩储层整体孔隙度较高,孔隙度以10.00%~15.00%为主,分别占比31%和44%。在对渗透率的贡献上,仍然存在类似的差异(图7c):莫索湾凸起和夏盐凸起火山岩储层整体渗透率较低,渗透率以小于 $0.050 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 范围内为主,分别占比67%和50%;莫北凸起和石西凸起火山岩储层整体渗透率较高,渗透率以 $(0.100 \sim 1.000) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为主,分别占比37%和47%,但不同的是,石西凸起在渗透率大于 $1.000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的区间都有分布。整体而言,研究区储层类型属于高孔-低渗型储层的范畴,物性优劣排序为石西凸起>莫北凸起>夏盐凸起>莫索湾凸起。

从火山岩储层物性与距石炭系顶界距离间的关系可知(图7d,e):除莫索湾凸起受制于采样深度的限制,其余凸起孔-渗参数垂向变异系数均大于30%,体现出极强的非均质性。莫北和石西凸起在靠近顶部不整合面采样相对集中(距石炭系顶界距离<200 m),孔-渗高值的样品与顶部不整合面风化淋滤的次生溶蚀作用密切相关^[33]。在远离不整合面的深处,仍有孔-渗高值相对集中的内幕层段,石西凸起在距石炭

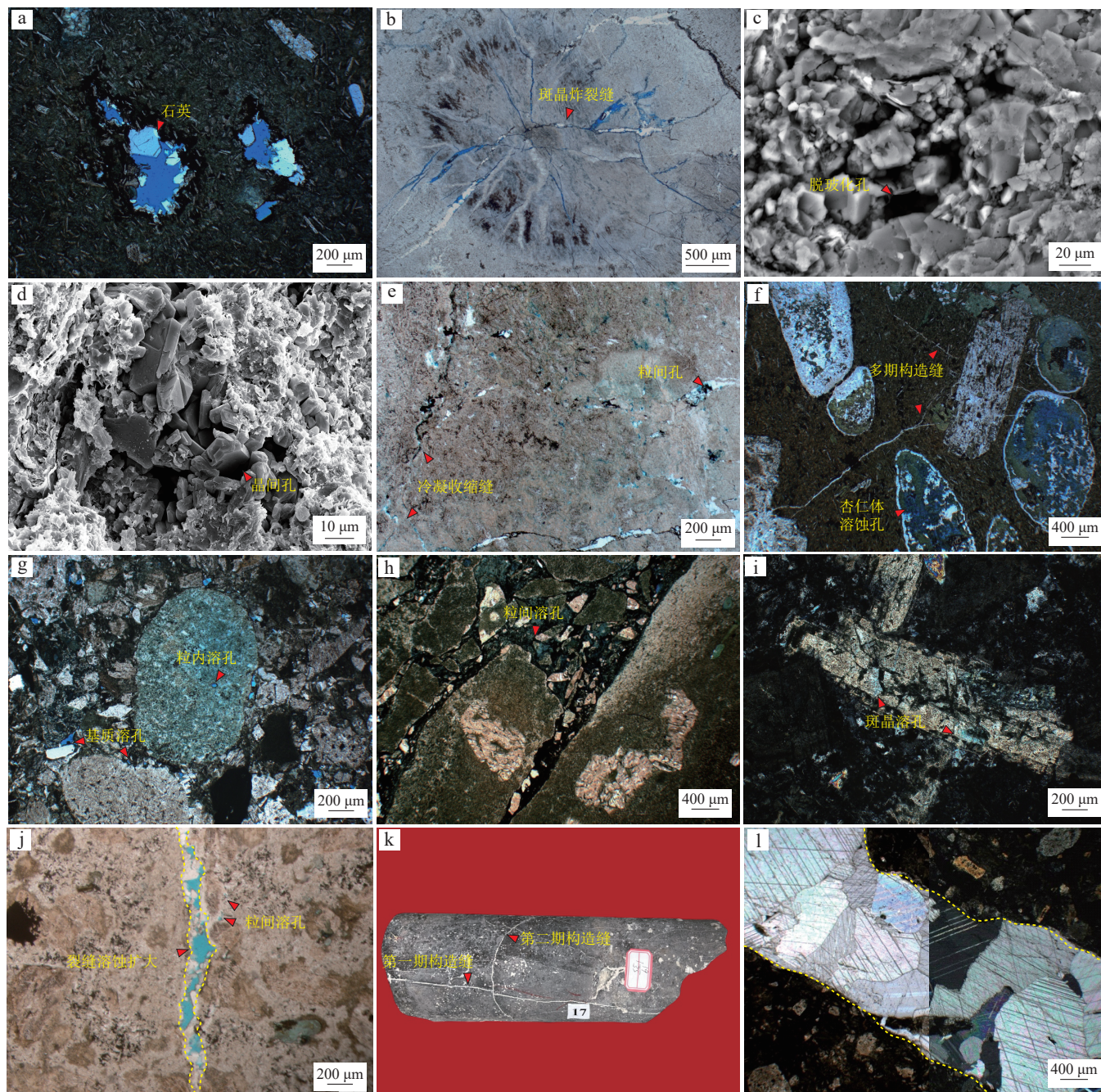


图5 准噶尔盆地1井西凹陷周缘石炭系火山岩储集空间特征显微照片

Fig. 5 Images showing the reservoir space characteristics of the Carboniferous volcanic rocks in the periphery of the Western Well Pen-1 Sag,

Junggar Basin

- a. 气孔,铸体薄片,SX4井,埋深4 590.0 m;b. 斑晶炸裂缝,铸体薄片,SX4井,埋深4 607.4 m;c. 脱玻化孔,扫描电镜,SX24井,埋深5 530.0 m;
d. 晶间孔,扫描电镜,XY1井,埋深5 158.4 m;e. 冷凝收缩缝,铸体薄片,SX16井,埋深4 736.7 m;f. 杏仁体溶蚀孔,铸体薄片,SX16井,埋深4 811.0 m;
g. 粒内溶孔和基质溶孔,铸体薄片,SX3井,埋深4 727.6 m;h. 粒间溶孔,铸体薄片,SX3井,埋深4 723.7 m;i. 斑晶溶孔,铸体薄片,XY3井,埋深4 786.6 m;
j. 溶蚀扩大缝且裂缝附近发育次生溶孔,铸体薄片,XY3井,埋深4 867.5 m;k. 两期构造裂缝,岩心,SX21井,埋深4 854.0 m;
l. 构造裂缝中充填方解石,普通薄片,MS1井,埋深6 998.0 m

系顶界400~500 m和900~1 000 m处出现孔-渗双高值层段,莫北凸起高孔-高渗层段出现在距石炭系顶界200~300 m范围内,表明火山岩有效储层的发育不受埋深绝对控制。

3 储层垂向分带结构差异

综合井壁取心、常规测井和成像测井资料分析表

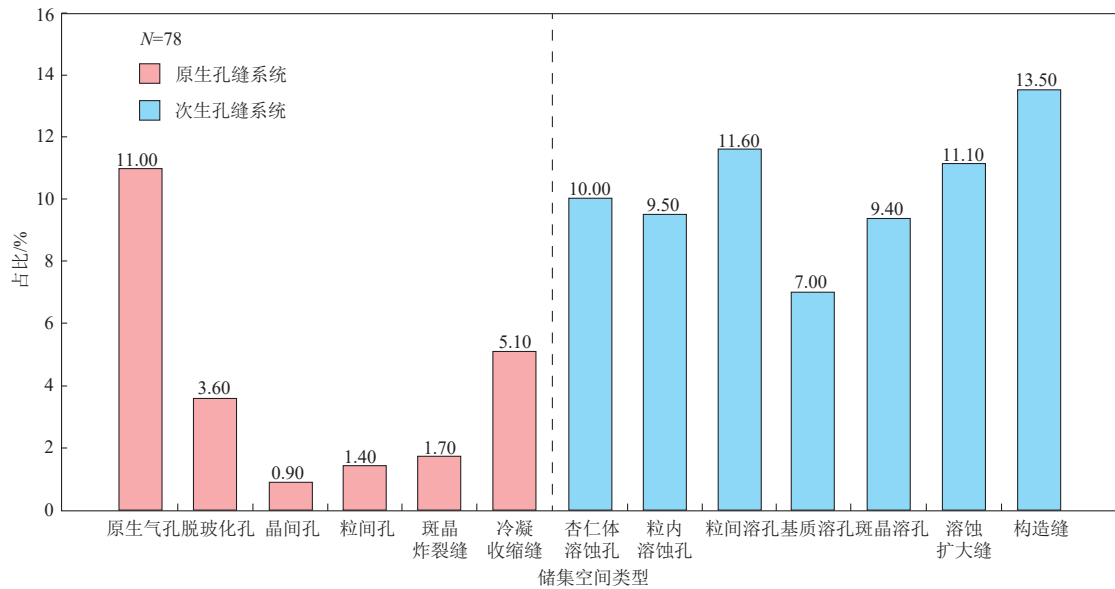


图6 准噶尔盆地1井西凹陷周缘石炭系火山岩储层各类储集空间占比柱状图

Fig. 6 Proportions of various reservoir space types in the Carboniferous volcanic reservoirs in the periphery of the Western Well Pen-1 Sag, Junggar Basin
(N 为样本个数。)

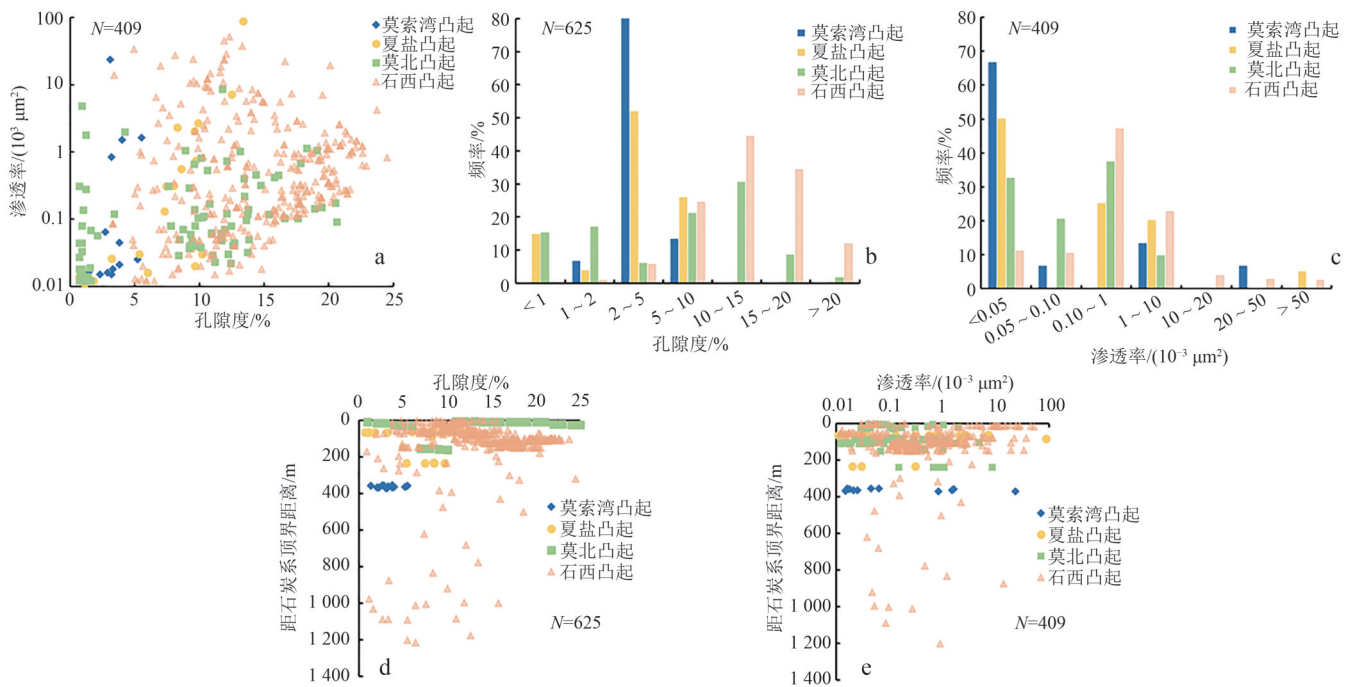


图7 准噶尔盆地1井西凹陷周缘石炭系火山岩储层物性特征

Fig. 7 Physical properties of the Carboniferous volcanic reservoirs in the periphery of the Western Well Pen-1 Sag, Junggar Basin
a. 孔隙度与渗透率交会图; b. 孔隙度频率分布直方图; c. 渗透率频率分布直方图; d. 孔隙度与距石炭系顶界距离关系; e. 渗透率与距石炭系顶界距离关系
(N 为样本个数。)

明,准噶尔盆地火山岩储层垂向分带特征在周缘各凸起之间存在较为显著的差异性。垂向分带的差异性主要受控于不整合面附近的风化淋滤强度及风化壳结构单元的保存完整性^[34];风化壳厚度通常与风化强度呈

正相关,且剥蚀作用可能导致部分结构单元缺失。

以莫北凸起SX16井为例,其火山岩储层垂向具有4层结构(图8a),火山岩储层上部为风化壳型储层,内部自上而下可划分为黏土带、淋蚀带和崩解带等多个

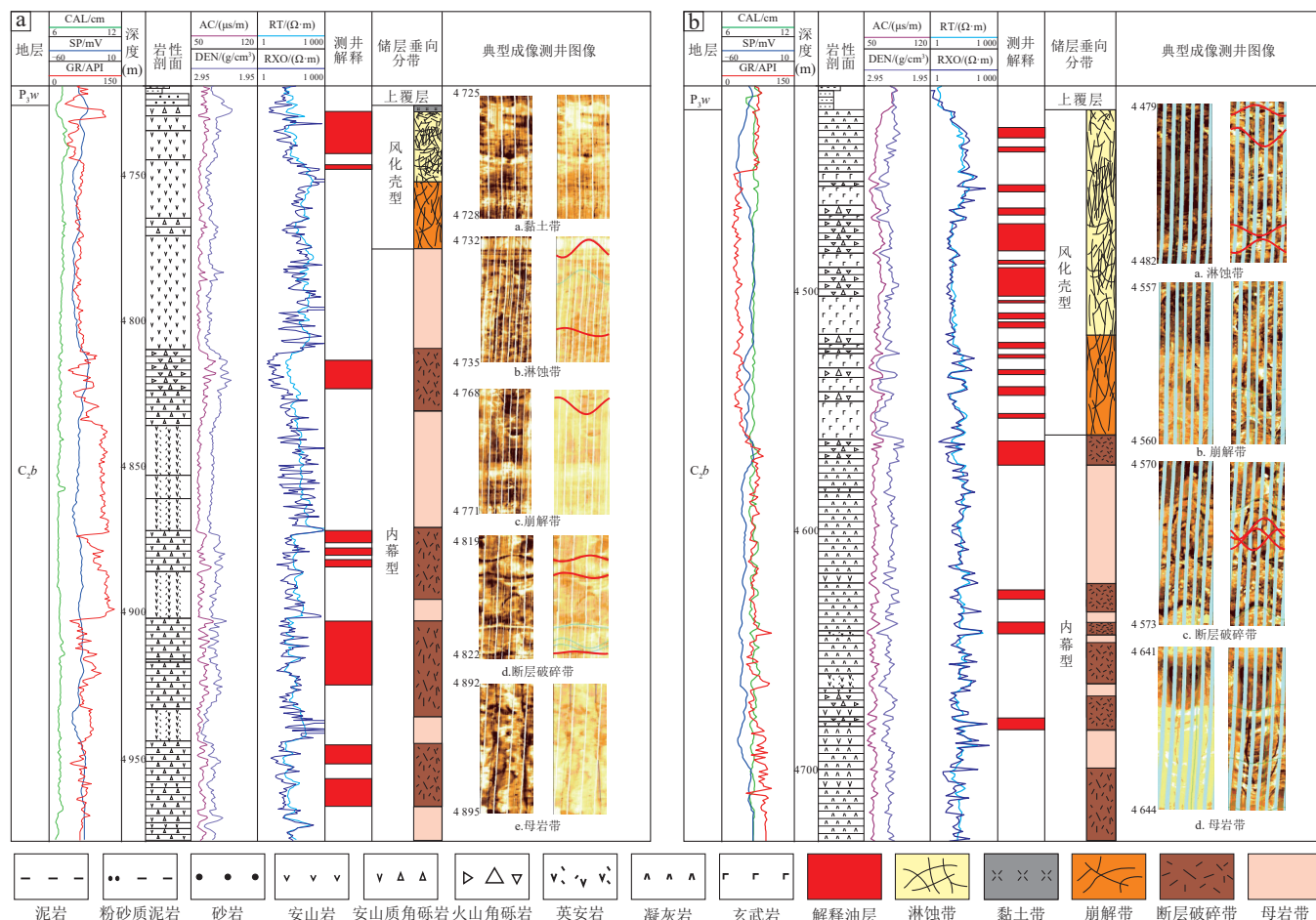


图8 准噶尔盆地盆1井西凹陷周缘石炭系火山岩储层单井分带结构特征地层综合柱状图

Fig. 8 Vertical zoning patterns of the Carboniferous volcanic reservoirs in individual wells in the periphery of the Western Well Pen-1 Sag, Junggar Basin

a. SX16井垂向4层结构; b. SX101井垂向3层结构

垂向结构单元^[33,35];下部为内幕型储层,垂向上穿插多个构造破碎带,揭示出后期断裂活动较为活跃。其中,黏土带中可见大量的次生黏土矿物,电阻率和声波时差曲线呈现中-高幅度齿状特征,成像测井图像上显示出明暗交替的层状条带,未见有效裂缝和孔隙,黏土带孔隙度最大值为2.57%、平均值为0.10%,渗透率普遍小于 $0.010 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;淋蚀带中可见大量溶蚀孔隙和网状溶蚀扩大裂缝,密度测井数值整体较低,电阻率曲线呈中-高幅度箱型,声波时差曲线为中-低幅度齿状,成像测井图像总体较暗,可见多条宽度不规则的低阻缝和低阻溶蚀孔,淋蚀带孔隙度可达20.00%以上、平均值为11.32%,渗透率分布在 $(0.038 \sim 457.860) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;崩解带中裂缝和溶蚀孔隙的出现频率明显减少,电阻率和密度曲线数值回升,反映此时岩石破碎程度较低,成像测井图像上较亮,溶蚀孔隙少见,但可见少量溶蚀扩大缝发育,崩解带孔隙度最大值为16.80%、平均值为10.31%,最大渗透率为 $5.760 \times$

$10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、平均渗透率为 $0.480 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;风化壳最底部为未风化的母岩带,相对致密。除此之外,孔隙度的垂向变化趋势与各结构单元的划分层位具有良好的对应关系。相比之下,石西凸起SX101井火山岩储层发育3层结构(图8b),顶部黏土带因剥蚀作用缺失。这种分带差异反映了盆1井西凹陷周缘构造演化与差异风化的进程:推测石西凸起作为古隆起高部位(如SX101井区),在隆升剥蚀阶段处于山顶高部位,黏土带遭受强烈剥蚀;而莫北凸起(如SX16井区)位于古斜坡带,在隆升剥蚀阶段风化壳结构得以完整保存,覆盖埋藏后形成完整的4层结构。

4 优质储层成因

优质储层的界定具有相对性,通常指在当前经济技术条件下具备高效开发潜力的储层^[36]。准噶尔盆地石炭系火山岩储层的实际数据表明,当孔隙度超过

10.00% 和渗透率大于 $0.100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,具有较好的试油-试采效果^[15]。因此,结合优质储层的普遍概念和该区的储层特征,将满足上述物性下限(孔隙度 > 10.00% 和渗透率 > $0.100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)的储层归为优质储层。

4.1 有利的岩性-岩相

不同的岩性-岩相由于形成环境不同,其内部的

矿物组成、储集空间类型及发育程度也各不相同,直接导致了储层孔隙结构和物性上的差异^[37]。为了更好的刻画风化作用和构造改造程度对不同岩性-岩相火山岩储集性能的影响,本次研究基于结构单元划开展岩性-岩相的物性差异对比分析(图 9)。

母岩段由于远离不整合面,整体较为致密且遭受的风化作用强度相对较弱,因此选取该层段中不同岩性的孔-渗参数作为对照组进行变化幅度的量化。淋

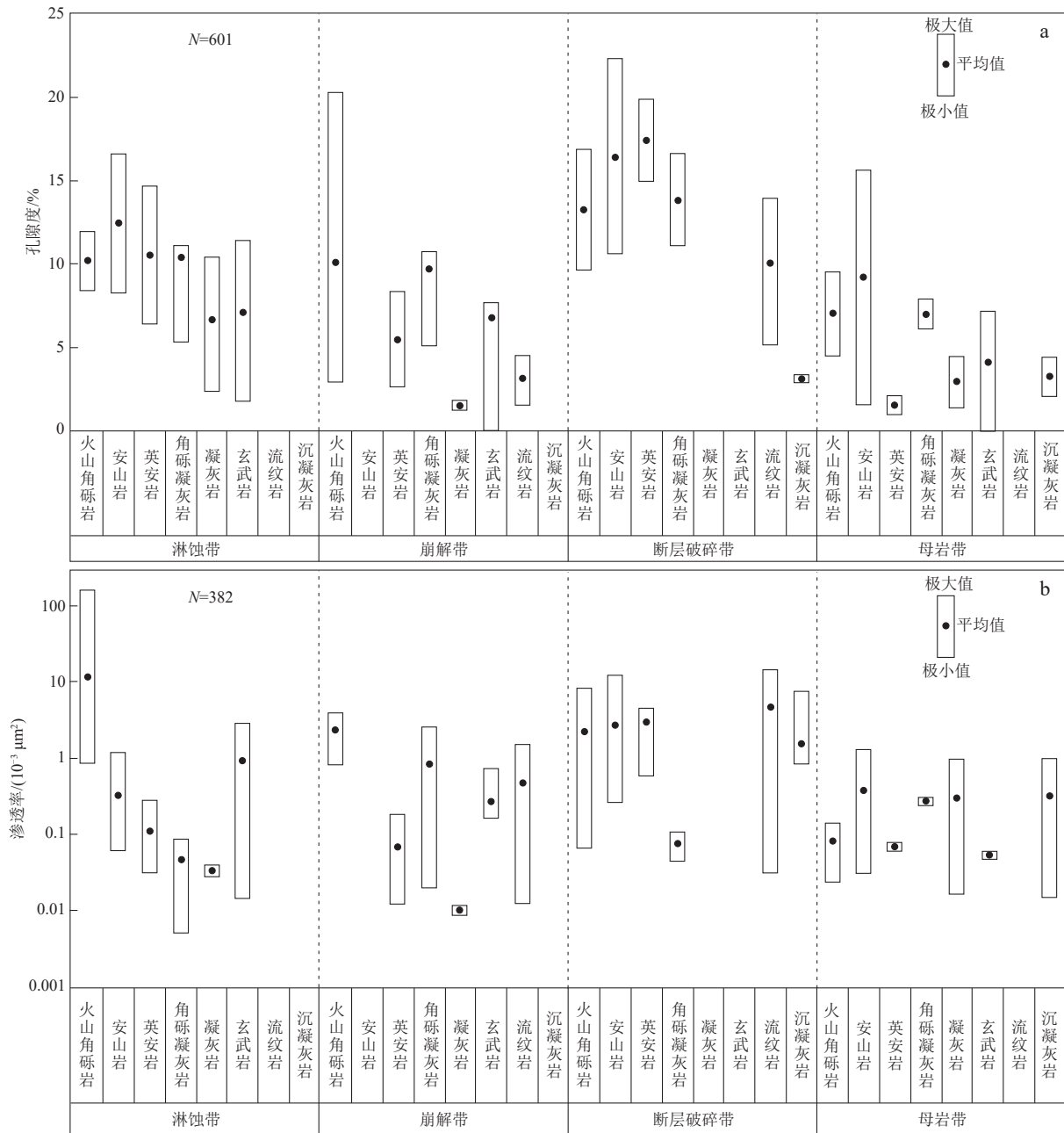


图 9 准噶尔盆地盆 1 井西凹陷周缘石炭系不同火山岩物性箱形图

Fig. 9 Box plots showing the physical properties of different Carboniferous volcanic rocks in the periphery of the Western Well Pen-1 Sag, Junggar Basin
a. 孔隙度; b. 渗透率
(N 为样本个数。)

蚀带中热碎屑流亚相(火山角砾岩)储集物性最优,平均孔隙度为10.37%,平均渗透率为 $15.790 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,与远离风化壳的母岩带相比,孔隙度和渗透率涨幅分别为47%和196倍,可能是由于强烈的风化作用致使大幅扩溶原有的粒间孔和裂缝。基性溢流相(玄武岩)物性提升同样可观,孔隙度和渗透率相较于母岩带分别提升了1倍和16倍,可能是由于其自身含有较多的碱性矿物,其抗风化能力较差且易于与酸性流体发生反应,形成有一定规模的溶蚀孔隙。中性溢流相(安山岩)孔隙度和渗透率分别提升34%和32%,反映出其原有孔隙由溶蚀扩大缝相互连通的特征。崩解带中热碎屑流亚相(火山角砾岩和角砾凝灰岩)储集性能仍占主导,平均孔隙度为10.96%,平均渗透率为 $1.040 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,其他岩性的物性参数都有明显衰减。断层破碎带中,流纹岩(平均孔隙度为10.03%,平均渗透率为 $4.690 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)与英安岩(平均孔隙度为17.45%,平均渗透率为 $2.510 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)为优势岩性,可能是高脆性石英含量促进了裂缝网络的发育。火山角砾岩由于其原本的物性基础较好,涨幅不大但仍能作为该层带的有利岩性。

储层微米CT三维重构结果进一步显示,淋蚀带安山岩样品(体积 $1.29 \times 10^4 \text{ mm}^3$)识别出孔隙体积744.63 mm^3 (计算孔隙度为5.77%),其中连通孔隙占比75.14%,孔隙半径在100 μm 以上的占孔隙总体积的99%,半径大于80 μm 的喉道占96%(图10a)。熔结凝灰岩样品孔隙体积152.41 mm^3 (计算孔隙度1.18%),连通孔隙占比28.45%,孔隙半径在100 μm 以上的占孔隙总体积的79%,半径大于80 μm 的喉道占98%(图10b)。这表明溶蚀作用沿裂缝优势发育,安山岩内部的原生气孔本身较为发育,与构造缝和溶蚀缝等连通构成了良好的复合储集体系;而熔结凝灰岩中内部原生气孔发育程度不高,有利储集空间更依赖于构造裂缝和附近形成的各类溶蚀孔隙。综上所述,火山岩储层非均质性主要受原生孔隙与构造-溶蚀次生改造作用的共同控制,风化壳型储层以热碎屑流亚相及基性-中性溢流相为优势岩相;内幕型储层以热碎屑流亚相和中-酸性溢流相组成的储层物性最佳。这种控储机制为火山岩储层甜点区预测提供了地质依据。

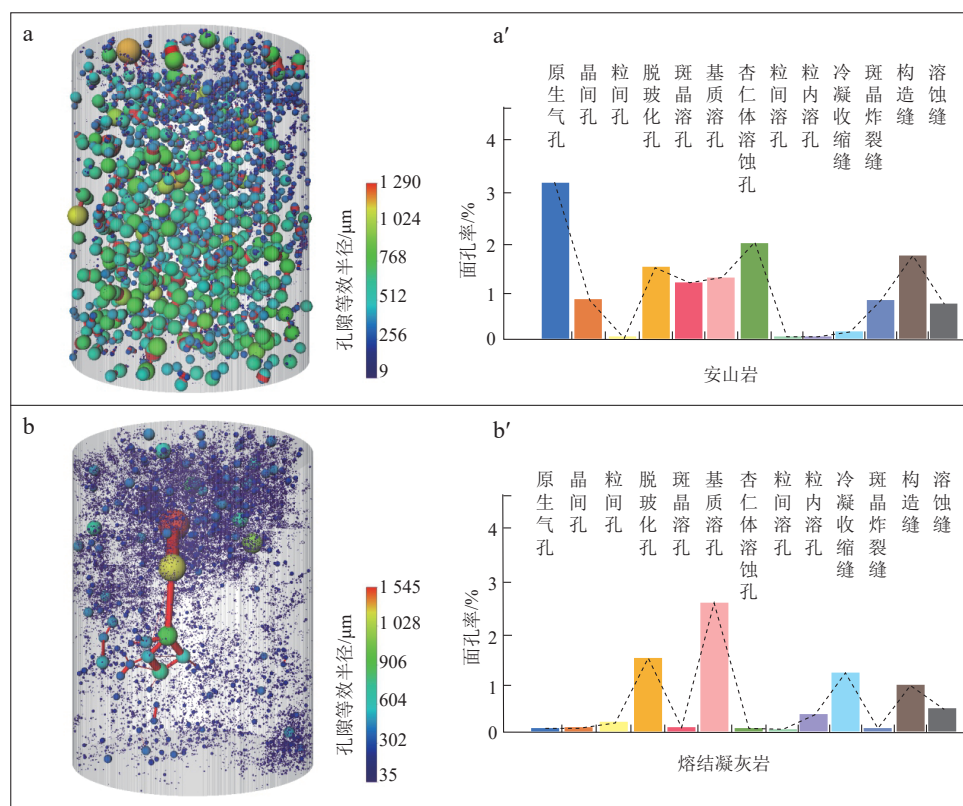


图10 准噶尔盆地1井西凹陷储层微米CT三维重构图(a,b)及储集空间占比柱状图(a',b')

Fig. 10 Diagrams showing the characteristics of reservoir spaces and bar charts illustrating the proportions of various reservoir space types in the Western Well Pen-1 Sag, Junggar Basin derived using micro-CT-scanning-based 3D reconstruction

a, a'. 安山岩, SX4井, 埋深4 605.2 m; b, b'. 熔结凝灰岩, SX102井, 埋深4 450.6 m

4.2 持续的表生风化作用

盆1井西凹陷周缘火山岩在被上覆地层深埋之前经历了包括海西期在内的多期构造挤压作用,石炭系顶部普遍存在的不整合面是其经历长期风化剥蚀的直接证据^[38-39]。风化壳内部淋蚀带在表层风化淋滤和构造抬升活动的双重改造下,整体物性最优(平均孔隙度高达11.06%,平均渗透率为 $13.550 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)。崩解带因风化强度衰减,物性次之(图9)。母岩带仅保留原生孔-缝系统,物性最差(平均孔隙度为7.82%,平均渗透率为 $0.310 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)。相较于母岩带,火山角砾岩、玄武岩及安山岩在风化壳中储集性能显著提升,孔隙度增幅分别达46.99%,102.94%和34.41%,渗透率增幅均超30.00%,从不整合面顶部向下物性数值逐渐降低的趋势证实了风化淋滤强度是导致储层垂向结构单元差异化的直接因素。

从石炭系顶部古地貌恢复图来看,由夏盐凸起到莫索湾凸起,石炭系凸起高度先升高后降低,石西凸起为古地貌高点(图11a)。基于地层剥蚀量反演与同位素年龄约束,各凸起风化剥蚀持续时间在平面上呈现出显著的差异性^[40-41]。研究区整体的风化时间跨度较大:夏盐凸起西北部风化时间较短,多为30~40 Ma,

但东南部大多处在40~60 Ma;石西凸起风化时间能达到66~70 Ma;莫北凸起与夏盐凸起西北部风化时间相同,莫索湾凸起风化时间大多少于20 Ma(图11b)。为了明确风化剥蚀持续时间与储层物性的定量响应关系,对不同井区风化壳层段孔隙度随剥蚀时间变化进行了统计(表1),结果表明:风化剥蚀持续时间与火山岩储层物性呈正相关关系;当持续时间超过40 Ma时,火山岩储层物性突破原始物性的束缚得到显著提升,平均孔隙度跃升至11.58%,并且标准差从3.00升至4.55,反映出孔隙发育分异加剧,内部的不均一性更加明显。这充分说明,在有利岩性-岩相发育的基础上,持续的表生风化作用是形成有效储层的关键。

4.3 多期构造运动的改造

准噶尔盆地经历了海西期、印支期、燕山期与喜马拉雅期等多期构造活动,断裂活动的性质、断开层位以及应力方向相差较大^[42-43]。取心井岩心扫描及成像测井裂缝走向统计表明,研究区发育NW向与NE向两组优势断裂体系(图12a,b)。结合盆地构造演化史解析^[12]:海西期的碰撞造山运动形成了盆地基底断裂系统;印支期—燕山期的陆内挤压改造并激活了这些断裂,且产生大量伴生裂缝;喜马拉雅期挤压作用强度稍

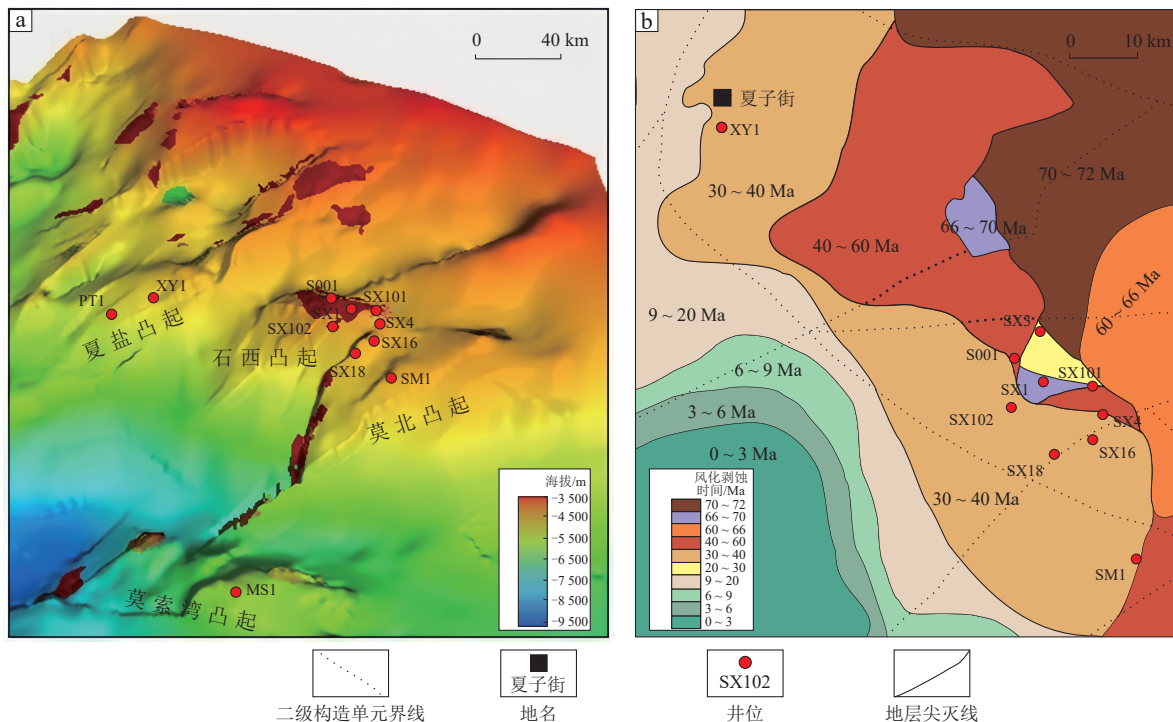


图11 准噶尔盆地盆1井西凹陷周缘石炭系古地貌恢复图(a)及风化剥蚀持续时间分布图(b)(据参考文献[41]修改)

Fig. 11 Contour maps showing the reconstructed Carboniferous paleo-landform and corresponding weathering and denudation durations in the periphery of the Western Well Pen-1 Sag, Junggar Basin (after reference [41])

表 1 准噶尔盆地盆 1 井西凹陷周缘石炭系风化剥蚀持续时间与风化壳孔隙度对比

Table 1 Correlation of weathering-crust porosity with weathering and denudation durations for the Carboniferous volcanic reservoirs in the periphery of the Pen-1 Well West Depression , Junggar Basin

		孔隙度			剥蚀时间/Ma
最大值/%	最小值/%	平均值/%	统计个数	标准差/%	
12.30	0.70	8.43	28	3.00	< 20
16.61	2.56	9.15	46	3.57	20 ~ 30
16.80	0.80	9.52	60	3.85	30 ~ 40
20.30	5.40	11.58	137	4.55	> 40

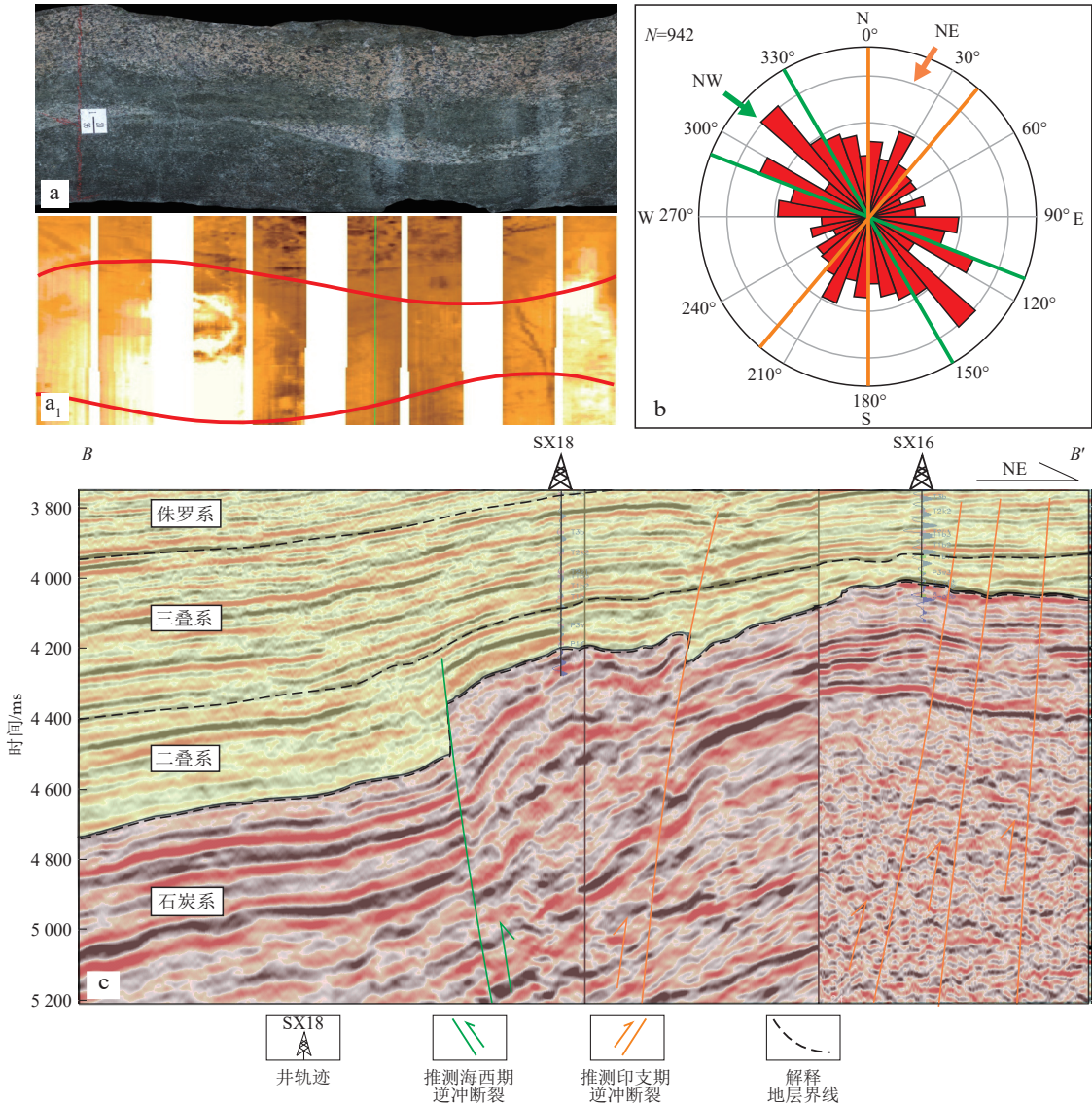


图 12 准噶尔盆地盆 1 井西凹陷周缘石炭系裂缝特征及断裂解释

Fig. 12 Fracture characteristics and fault interpretation of the Carboniferous volcanic rocks in the periphery of the Western Well Pen-1 Sag, Junggar Basin

a, a₁. 分别为岩心扫描照片和成像测井图像, SX19 井, 埋深 4 543. 2 m; b. 研究区成像测井裂缝走向玫瑰花图; c. 典型地震解释剖面位置

弱,但对裂缝网络的形成十分重要。对研究区三维地球物理数据分析发现,石炭系火山岩内部的主要断裂存在逆冲推覆方向分别为NW向和NE向的先存逆冲断裂(图 12c),分别对应海西期(NW向挤压)与印支期

(NE向挤压)构造事件^[44]。断裂平面展布分析进一步显示(图 13),NE向断裂(绿色)形成于海西期,近SN向断裂(橙色)发育于印支期,二者叠加区可形成高密度裂隙网络,为内幕型储层发育提供了良好的构造背景。

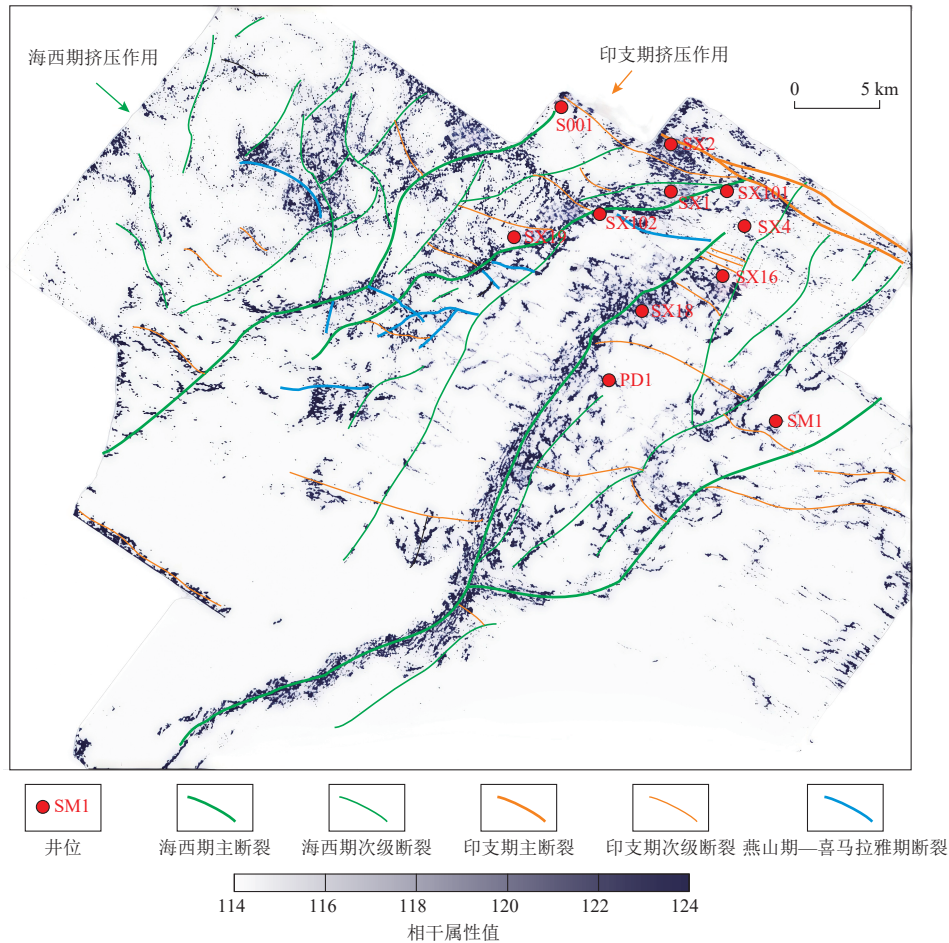


图13 准噶尔盆地盆1井西凹陷周缘石炭系顶面断裂解释(底图来源于中国石油新疆油田公司)

Fig. 13 Interpretation of faults at the top of the Carboniferous volcanic rocks in the periphery of the Western Well Pen-1 Sag, Junggar Basin (base map sourced from the Xinjiang Oilfield Company, PetroChina)

岩心及成像测井统计证实裂缝走向以NW-SE向主导,该方位与现今最大水平主应力方向高度匹配,有效保障了裂缝的渗流能力。

通过壁心和铸体薄片观察发现,远离不整合面的断层碎裂带同样可见溶蚀孔隙和溶蚀裂缝发育(图5j),先期形成的方解石脉和构造角砾被大量溶蚀,指示出沿断裂发生了埋藏期流体溶蚀作用。有机酸和深源高含CO₂流体是埋藏期关键的溶蚀流体^[45]。研究证实工区石炭系火山岩储层油气源主要来自于上覆二叠系上乌尔禾组烃源岩,排烃期生成的有机酸能沿断裂进入下伏火山岩深部造成溶蚀^[46]。由于该区深切地幔的大型走滑断裂较少^[16-17],深源高含CO₂流体对溶蚀的贡献度较低。因此,有机酸溶蚀作用是研究区内幕型火山岩储层溶蚀孔-缝形成的主导因素。

4.4 储层发育模式

本研究聚焦准噶尔盆地盆1井西凹陷周缘石炭系火山岩储层,建立了“以有利岩性-岩相为物质基础,

受表生风化与构造演化双重机制控制”的储层发育模式(图14)。基于火山喷发期次的划分,研究区以多喷发中心的中-酸性熔岩火山机构为主,其中溢流相和爆发相热碎屑流亚相是构成规模性优质火山岩储层的地质基础。纵向上,风化壳型优质储层发育在风化剥蚀时间久、溶蚀作用强的不整合面附近,主要分布在距不整合面200 m的范围以内;内幕型优质储层受控于火山多期喷发,往往存在于期次界面和岩性突变处。由于中-酸性熔岩黏度较大,横向流动距离较近,并且爆发相火山碎屑岩主要位于火山机构近源地带,因此,优质火山岩储层横向上更易于集中在火山喷发中心附近。横向上,石西凸起和莫北凸起西南翼的石炭系火山岩发育期次3中-酸性溢流相与热碎屑流亚相,并且由于处在古隆起高部位,风化剥蚀时间大于60 Ma,是形成高孔、高渗风化壳型优质储层的有利区域。莫北凸起和石西凸起东翼由于处在先存断裂叠合交会地带,该区域期次2、期次5以及期次6的中-酸性溢流相、酸性溢流相和热碎屑流亚相储集性能受构造作用

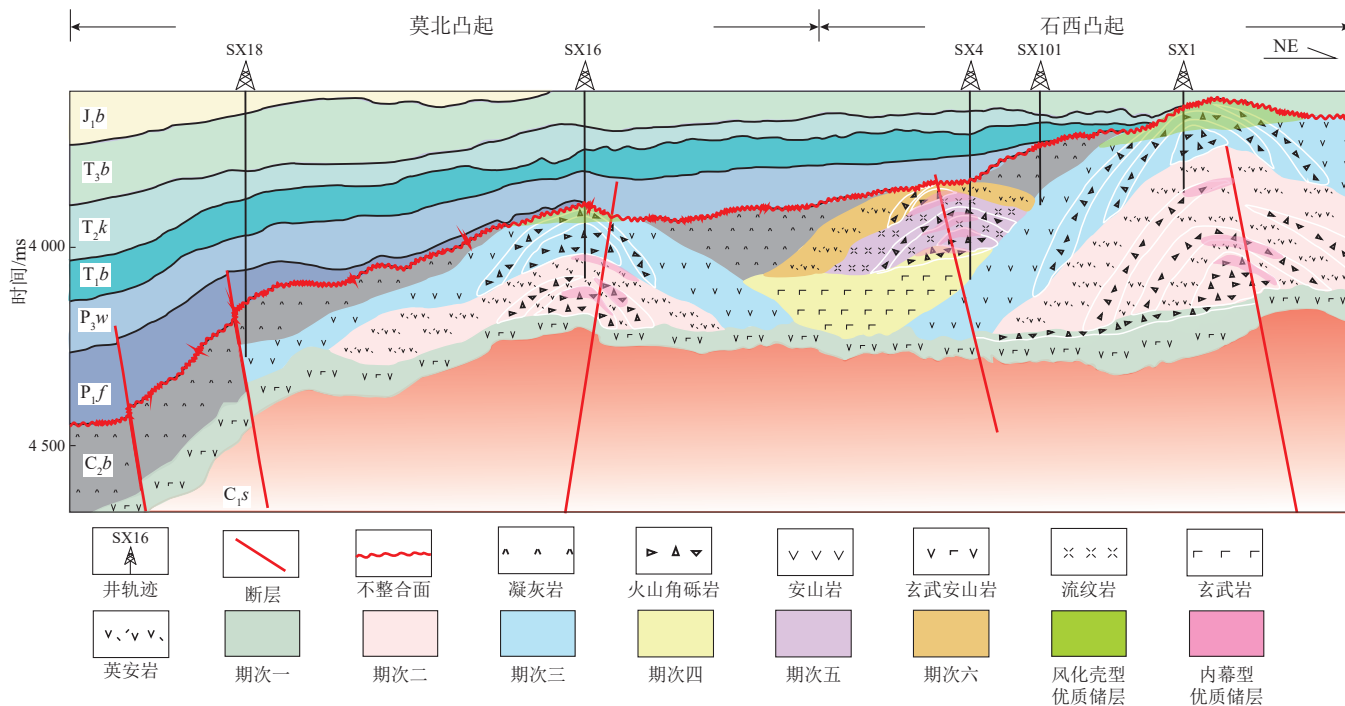


图14 准噶尔盆地盆1井西凹陷周缘石炭系火山岩储层发育模式(剖面位置见图1b)

Fig. 14 Developmental model of the Carboniferous volcanic reservoirs in the periphery of the Western Well Pen-1 Sag, Junggar Basin (see Fig. 1b for the section location)

C_{1s} . 石炭系上统松喀尔苏组; C_{2b} . 石炭系上统巴塔玛依内山组; P_{1f} . 二叠系下统风城组; P_{3w} . 二叠系上统上乌尔禾组; T_{1b} . 三叠系下统百口泉组; T_{2k} . 三叠系中统克拉玛依组; T_{3b} . 三叠系上统白碱滩组; J_{1b} . 侏罗系下统八道湾组

改造明显,具备形成内幕型优质储层的条件。

综上所述,研究区石炭系火山岩油气藏勘探有利区集中于发育先存逆冲挤压构造(尤其海西期-印支期)的地带,多期次中-酸性岩类是优质储层发育的物质基础,而长期的风化淋滤作用则能进一步促进规模优质储层的形成。

5 结论

1) 研究区石炭系火山岩储层岩性种类多样,但主要以安山岩、英安岩、流纹岩和火山角砾岩为主,局部可见凝灰岩和沉火山碎屑岩;岩相主要以中-酸性溢流相和爆发相热碎屑流亚相为主,发育少量空落亚相与火山-沉积相。

2) 通过岩性特征和岩相组合识别出6个火山喷发期次,其中期次3规模最大,构成了研究区石炭系火山岩的主体,整体的岩浆酸度呈现“高一低一高”的旋回演化,且各期次岩相展布具有显著的空间分异性。

3) 研究区火山岩储层类型属于中孔-低渗型,储集空间以粒间溶孔和构造裂缝占主体的次生孔-缝系统为主,垂向分带受控于构造抬升与风化强度的共同作用,莫北凸起由于处在凸起斜坡带发育完整的四层

结构,石西凸起处在隆起高部位,缺失黏土带。

4) 研究区具有“以有利岩性-岩相为物质基础,受表生风化与构造演化双重机制控制”的火山岩储层发育模式,海西期-印支期的构造活动与流体溶蚀主导了储层的后期改造;对于风化壳型优质储层而言,发育于古隆起高部位(石西凸起和莫北凸起西南翼),由期次3中-酸性溢流相及热碎屑流亚相构成,长期风化剥蚀形成的溶蚀孔-缝是关键控储因素。内幕型优质储层发育于断裂交汇区(莫北凸起和石西凸起东翼),由期次2、期次5和期次6的中-酸性溢流相及热碎屑流亚相构成。

致谢:本研究工作的顺利开展,得益于新疆油田实验检测研究院提供的大量宝贵资料 and 大力支持。同时,衷心感谢审稿专家和编辑老师对本文提出的极具价值的修改意见。

参 考 文 献

- [1] 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.

- [2] TANG Huafeng, TIAN Zhiwen, GAO Youfeng, et al. Review of volcanic reservoir geology in China[J]. *Earth-Science Reviews*, 2022, 232: 104158.
- [3] 徐长贵, 杨海风, 王清斌, 等. 火山岩油气藏勘探进展[J]. *地球科学*, 2025, 50(2): 363-376.
- XU Changgui, YANG Haifeng, WANG Qingbin, et al. Progress in exploration of volcanic oil and gas reservoirs [J]. *Earth Science*, 2025, 50(2): 363-376.
- [4] JIANG Fei, CHENG Rihui, RUAN Baotao, et al. Formation mechanism of volcanic reservoirs within a volcanostratigraphic framework: The case of the Wangfu fault depression in the Songliao Basin, China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 84: 160-178.
- [5] 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.
- [6] 贾建亮, 吴彦佳, 杨帝, 等. 阜新盆地早白垩世火山成因古潜山油气藏的发现及成藏机制[J]. *地质学报*, 2022, 96(11): 3977-3993.
- JIA Jianliang, WU Yanjia, YANG Di, et al. Discovery and accumulation mechanism of Early Cretaceous volcanogenic buried-hill reservoir in the Fuxin Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(11): 3977-3993.
- [7] CHEN Yuting, ZHENG Han, VENTURA G, et al. Volcanic lithofacies control the space in unconventional, rhyolitic hydrocarbon reservoirs: The Hailar Basin, NE China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2024, 165: 106872.
- [8] 陈新发, 匡立春, 查明, 等. 火山岩油气成藏机理与勘探技术——以准噶尔盆地为例[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- CHEN Xinfu, KUANG Lichun, ZHA Ming, et al. Mechanism of volcanic oil and gas formation and exploration technology—Taking Junggar Basin as an example[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [9] 宋永, 唐勇, 何文军, 等. 准噶尔盆地油气勘探新领域、新类型及勘探潜力[J]. *石油学报*, 2024, 45(1): 52-68.
- SONG Yong, TANG Yong, HE Wenjun, et al. New fields, new types and exploration potentials of oil-gas exploration in Junggar Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2024, 45(1): 52-68.
- [10] 卞保力, 刘海磊, 蒋文龙, 等. 准噶尔盆地盆1井西凹陷石炭系火山岩凝析气藏的发现与勘探启示[J]. *岩性油气藏*, 2024, 36(3): 96-105.
- BIAN Baoli, LIU Hailei, JIANG Wenlong, et al. Discovery and exploration enlightenment of Carboniferous volcanic condensate gas reservoirs in western Well Pen-1 sag, Junggar Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2024, 36(3): 96-105.
- [11] 张勇. 准噶尔盆地滴西地区石炭系火山岩储层特征及油气分布[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2013.
- ZHANG Yong. Reservoir characteristics and the oil and gas distribution of Carboniferous volcanic in Dixi area of Junggar Basin [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2013.
- [12] 顾雯, 印兴耀, 卞保力, 等. 准噶尔盆地石炭系火山岩地震勘探关键技术[J]. *石油地球物理勘探*, 2022, 57(6): 1453-1463.
- GU Wen, YIN Xingyao, BIAN Baoli, et al. Key technologies for seismic exploration of Carboniferous volcanic rocks in Junggar Basin [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2022, 57(6): 1453-1463.
- [13] 江梦雅, 王江涛, 刘龙松, 等. 准噶尔盆地盆1井西凹陷石炭系一二叠系天然气特征及成藏主控因素[J]. *岩性油气藏*, 2023, 35(3): 138-151.
- JIANG Mengya, WANG Jiangtao, LIU Longsong, et al. Characteristics and main controlling factors of natural gas of Carboniferous-Permian in western Well Pen-1 Sag, Junggar Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2023, 35(3): 138-151.
- [14] 何登发, 张磊, 吴松涛, 等. 准噶尔盆地构造演化阶段及其特征[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(5): 845-861.
- HE Dengfa, ZHANG Lei, WU Songtao, et al. Tectonic evolution stages and features of the Junggar Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(5): 845-861.
- [15] 苏东旭, 朱永才, 刘龙松, 等. 准噶尔盆地盆1井西凹陷及周缘石炭系一二叠系天然气成藏条件及勘探方向[J]. *中国石油勘探*, 2024, 29(4): 82-96.
- SU Dongxu, ZHU Yongcai, LIU Longsong, et al. Gas accumulation conditions and exploration orientation of the Carboniferous-Permian in West Well Pen 1 Sag and its periphery in Junggar Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2024, 29(4): 82-96.
- [16] 李涤. 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(北京), 2016.
- LI Di. Carboniferous tectonic framework and sedimentary filling evolution in the Junggar Basin and adjacent area, NW China [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.
- [17] 何登发, 陈新发, 况军, 等. 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*, 2010, 31(1): 1-11.
- HE Dengfa, CHEN Xinfu, KUANG Jun, et al. Characteristics and exploration potential of Carboniferous hydrocarbon plays in Junggar Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(1): 1-11.
- [18] 王璞琨, 缴洋洋, 杨凯凯, 等. 准噶尔盆地火山岩分类研究与应用[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2016, 46(4): 1056-1070.
- WANG Pujun, JIAO Yangyang, YANG Kaikai, et al. Classification of volcanogenic successions and its application to volcanic reservoir exploration in the Junggar Basin, NW China [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2016, 46(4): 1056-1070.
- [19] LI Di, HE Dengfa, QI Xuefeng, et al. How was the Carboniferous Balkhash-West Junggar remnant ocean filled and closed? Insights

- from the Well Tacan-1 strata in the Tacheng Basin, NW China [J]. *Gondwana Research*, 2015, 27(1): 342–362.
- [20] 张磊, 何登发, 李涤, 等. 准噶尔盆地陆东地区石炭系地震波组及构造-地层层序特征[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(5): 918–931.
- ZHANG Lei, HE Dengfa, LI Di, et al. Characteristics of seismic wave groups and tectono-stratigraphic sequences of the Carboniferous, eastern Luliang uplift, Junggar Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(5): 918–931.
- [21] 李建忠, 王小军, 杨帆, 等. 准噶尔盆地中央坳陷西部下组合油气成藏模式及勘探前景[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(5): 1059–1072.
- LI Jianzhong, WANG Xiaojun, YANG Fan, et al. Hydrocarbon accumulation pattern and exploration prospect of the structural traps in lower play of the western Central Depression in the Junggar Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(5): 1059–1072.
- [22] 唐华凤, 边伟华, 王璞珺, 等. 盆地火山岩相分类和模式[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2023, 53(6): 1651–1671.
- TANG Huafeng, BIAN Weihua, WANG Pujun, et al. Classification and model of volcanic facies in the basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2023, 53(6): 1651–1671.
- [23] 单玄龙, 牟汉生, 刘玉虎, 等. 湖盆水下喷发火山岩相类型、特征与储集意义——以松辽盆地南部查干花地区白垩系为例[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(4): 719–730.
- SHAN Xuanlong, MU Hansheng, LIU Yuhu, et al. Subaqueous volcanic eruptive facies, facies model and its reservoir significance in a continental lacustrine basin: A case from the Cretaceous in Chaganhua area of southern Songliao Basin, NE China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(4): 719–730.
- [24] 王海峰, 卢景松, 邹明倬, 等. 渤海湾盆地莱州湾凹陷南斜坡中生界火山岩相模式和储层特征[J]. *地质学报*, 2024, 98(6): 1814–1828.
- WANG Haifeng, HU Jingsong, ZOU Mingzhuo, et al. Mesozoic volcanic facies model and reservoir characteristics in the southern slope of Laizhou Bay Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2024, 98(6): 1814–1828.
- [25] 王璞珺, 迟元林, 刘万洙, 等. 松辽盆地火山岩相: 类型、特征和储层意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2003, 33(4): 449–456.
- WANG Pujun, CHI Yuanlin, LIU Wanzhu, et al. Volcanic facies of the Songliao Basin: Classification, characteristics and reservoir significance [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2003, 33(4): 449–456.
- [26] 王璞珺, 吴河勇, 庞颜明, 等. 松辽盆地火山岩相: 相序、相模式与储层物性的定量关系[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2006, 36(5): 805–812.
- WANG Pujun, WU Heyong, PANG Yanming, et al. Volcanic facies of the Songliao Basin: Sequence, model and the quantitative relationship with porosity & permeability of the volcanic reservoir [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2006, 36(5): 805–812.
- [27] 孙中春, 蒋宜勤, 查明, 等. 准噶尔盆地石炭系火山岩储层岩性岩相模式[J]. *中国矿业大学学报*, 2013, 42(5): 782–789.
- SUN Zhongchun, JIANG Yiqin, ZHA Ming, et al. Lithology-lithofacies model of Carboniferous volcanic reservoirs in the Junggar Basin, NW China [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2013, 42(5): 782–789.
- [28] 刘森, 陈井胜, 李斌, 等. 赤峰市敖汉旗地区义县组火山岩的喷发旋回特征[J]. *地质论评*, 2017, 63(增刊1): 259–260.
- LIU Miao, CHEN Jingsheng, LI Bin, et al. Characteristics of volcanic eruption cycles in the Yixian Formation in the Aohan Banner area Chifeng [J]. *Geological Review*, 2017, 63(S1): 259–260.
- [29] 马尚伟, 罗静兰, 许学龙, 等. 准噶尔盆地西泉地区石炭系火山喷发旋回划分及地质意义[J]. *地球物理学进展*, 2018, 33(5): 1936–1942.
- MA Shangwei, LUO Jinglan, XU Xuelong, et al. Division of the Carboniferous volcanic eruption cycles and geological significance in Xiquan area, Junggar Basin [J]. *Progress in Geophysics*, 2018, 33(5): 1936–1942.
- [30] LIU Tianjiao, JIA Haibo, JI Hancheng, et al. Volcanic reservoirs lacking a paleoweathering crust in Carboniferous deposits of the Junggar Basin, western China: Characteristics, controlling factors and hydrocarbon potential [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 209: 111119.
- [31] 范存辉. 准噶尔西北缘中拐凸起石炭系火山岩储层综合研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- FAN Cunhui. The comprehensive research on Carboniferous volcanic rock reservoir of Zhongguai uplift in northwestern margin of Junggar Basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.
- [32] 周健, 林承焰, 刘惠民, 等. 准噶尔盆地哈山地区石炭系-二叠系火山岩储层发育机制研究[J]. *地学前缘*, 2024, 31(2): 327–342.
- ZHOU Jian, LIN Chengyan, LIU Huimin, et al. Mechanism of reservoir development in the Carboniferous-Permian volcanic rock reservoirs in Hala' alate Mountain area, Junggar Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2024, 31(2): 327–342.
- [33] 侯连华, 罗霞, 王京红, 等. 火山岩风化壳及油气地质意义——以新疆北部石炭系火山岩风化壳为例[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(3): 257–265, 274.
- HOU Lianhua, LUO Xia, WANG Jinghong, et al. Weathered volcanic crust and its petroleum geologic significance: A case study of the Carboniferous volcanic crust in northern Xinjiang [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(3): 257–265, 274.
- [34] 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 Petroli Sinica*, 2012, 33(4): 533-540.
- [35] 衣健, 李慧勇, 单玄龙, 等. 渤海湾盆地渤中凹陷太古宇变质岩潜山储集层垂向结构单元划分与识别[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(6): 1107-1118.
- YI Jian, LI Huiyong, SHAN Xuanlong, et al. Division and identification of vertical reservoir units in Archaeozoic metamorphic buried hill of Bozhong Sag, Bohai Bay Basin, East China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(6): 1107-1118.
- [36] 王冠民, 庞小军, 黄晓波, 等. 渤海海域辽中凹陷南部古近系东营组三段重力流砂岩优质储层特征及成因[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(1): 81-95.
- WANG Guanmin, PANG Xiaojun, HUANG Xiaobo, et al. Characteristics and origin of high-quality gravity-flow sandstone reservoirs in the 3rd member of the Dongying Formation, southern Liaozhong Sag, Bohai Sea [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(1): 81-95.
- [37] 李宗浩, 侯磊, 李卉, 等. 准噶尔盆地石西凸起晚石炭世火山岩储层发育影响因素[J]. *油气地质与采收率*, 2023, 30(4): 33-45.
- LI Zonghao, HOU Lei, LI Hui, et al. Influencing factors of late Carboniferous volcanic reservoir development in Shixi uplift, Junggar Basin [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2023, 30(4): 33-45.
- [38] 侯连华, 王京红, 邹才能, 等. 火山岩风化体储层控制因素研究——以三塘湖盆地石炭系卡拉岗组为例[J]. *地质学报*, 2011, 85(4): 557-568.
- HOU Lianhua, WANG Jinghong, ZOU Caineng, et al. Controlling factors of weathering volcanic reservoir: An example from the Carboniferous Kalagang Formation in Santanghu Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(4): 557-568.
- [39] 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.
- [40] 王泽九, 黄枝高, 姚建新, 等. 中国地层表及说明书的特点与主要进展[J]. *地球学报*, 2014, 35(3): 271-276.
- WANG Zejiu, HUANG Zhigao, YAO Jianxin, et al. Characteristics and main progress of the stratigraphic chart of China and directions [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2014, 35(3): 271-276.
- [41] XIA Lu, ZHAO Yiwei, YU Chunlan, et al. Key factors controlling deep Carboniferous volcanic reservoirs in the east slope of Mahu Sag, Junggar Basin, NW China [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2023, 220(Part A): 111223.
- [42] 梁舒艺. 盆1井西凹陷及周缘断裂特征与控藏作用[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2020.
- LIANG Shuyi. The fault characteristic and hydrocarbon accumulation of the Pen-1 Well west sag and surrounding areas [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2020.
- [43] 王小军, 宋永, 郑孟林, 等. 准噶尔西部陆内盆地构造演化与油气聚集[J]. *地学前缘*, 2022, 29(6): 188-205.
- WANG Xiaojun, SONG Yong, ZHENG Menglin, et al. Tectonic evolution of and hydrocarbon accumulation in the western Junggar Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(6): 188-205.
- [44] 刘海磊, 雷德文, 江梦雅, 等. 准噶尔盆地石炭纪末期中央隆起区分布特征及地质意义[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 49(2): 150-161, 203.
- LIU Hailei, LEI Dewen, JIANG Mengya, et al. Distribution characteristics and geological significance of central uplift area in late Carboniferous in Junggar Basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2022, 49(2): 150-161, 203.
- [45] CAO Yingchang, YUAN Guanghui, WANG Yanzhong, et al. Successive formation of secondary pores via feldspar dissolution in deeply buried feldspar-rich clastic reservoirs in typical petroliferous basins and its petroleum geological significance [J]. *Science China Earth Sciences*, 2022, 65(9): 1673-1703.
- [46] 谭力熊, 李啸, 陈洪, 等. 准噶尔盆地盆1井西凹陷石炭系火山岩储层流体包裹体特征及油气成藏期次划分[J/OL]. *地质通报*: 1-14. <https://link.cnki.net/urlid/11.4648.P.20250115.1023.006>.
- TAN Lixiong, LI Xiao, CHEN Hong, et al. Fluid inclusions in the Carboniferous volcanic reservoirs: Implications for the timing of petroleum accumulation in the western Well Pen-1 Depression of Junggar Basin [J/OL]. *Geological Bulletin of China*: 1-14. <https://link.cnki.net/urlid/11.4648.P.20250115.1023.006>.

(编辑 刘格云)