

准噶尔盆地西缘车排子凸起石炭系火山岩储层成因

孟凡超^{1,2}, 操应长¹, 崔岩³, 许涛⁴, 刘子超⁴, 王艳忠¹

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东青岛 266071; 3. 山东科技大学地球科学与工程学院, 山东青岛 266590; 4. 中国石化胜利油田公司勘探开发研究院西部分院, 山东东营 257000)

摘要:通过岩心观察、薄片鉴定、元素测试、物性分析等技术手段,对准噶尔西缘车排子凸起石炭系火山岩岩性、岩相、储集空间类型、物性特征及储层成因进行详细研究。结果表明:石炭系火山岩以玄武岩、安山岩、玄武安山岩等火山熔岩和中基性火山角砾岩、凝灰岩等火山碎屑岩为主;火山岩储层储集空间主要为次生溶蚀孔隙和裂缝,属于低孔-特低渗储层;石炭系火山岩储层的形成经历了复杂的演化过程,火山岩先后经历了冷凝固结、构造抬升、表生风化淋滤、埋藏流体充填、溶蚀等后期改造作用;火山岩储集性能呈现先提高后降低再提高的演化过程。

关键词:准噶尔盆地; 车排子凸起; 石炭系; 火山岩储层; 储层演化

中图分类号: TE 122.2 **文献标志码:** A

引用格式: 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.

Genesis of Carboniferous volcanic reservoirs in Chepaizi salient in western margin of Junggar Basin

MENG Fanchao^{1,2}, CAO Yingchang¹, CUI Yan³, XU Tao⁴, LIU Zichao⁴, WANG Yanzhong¹

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China;
3. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;
4. Western Branch, Institute of Exploration and Development, Shengli Oilfield, Dongying 257000, China)

Abstract: Carboniferous volcanic rock is an important reservoir type in Chepaizi salient, western margin of Junggar Basin. Based on the results of core observation, thin section identification, element test and physical property analysis, this study analyzed the lithology, lithofacies, reservoir space types, physical property and genesis of the Carboniferous volcanic rocks. The results reveal that Carboniferous volcanic rocks are dominated by volcanic lava (including basalt, andesite, and basaltic andesite) and pyroclastic rocks (including intermediate-basic volcanic breccias and tuff). The volcanic rocks are low porosity and ultra-low permeability reservoirs, with main reservoir space of secondary dissolved pore and fracture. The Carboniferous volcanic rocks have undergone intense reformation at late stage, including condensation consolidation, tectonic uplifting, weathering leaching, and cavity filling and dissolution. The quality of volcanic reservoirs is changed accordingly: first improved by tectonic uplifting or weathering leaching, then deteriorated by cavity filling, and finally improved by dissolution.

Keywords: Junggar Basin; Chepaizi salient; Carboniferous; volcanic reservoirs; reservoirs evolution

收稿日期:2016-03-21

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(15CX05007A,15CX08001A);国家自然科学基金项目(41302102);山东省自然科学基金项目(ZR2012DL10)

作者简介:孟凡超(1982-),男,副教授,博士,研究方向为岩石学。E-mail:mfc1982@126.com。

近年来随着盆地深层勘探的深入,火山岩油气储量增加较快,约占地层油气藏探明储量的 50% 以上,火山岩油气藏已逐渐成为我国油气勘探的一个重要新领域^[1-2]。2000 年以来,火山岩油气勘探在准噶尔、塔里木、三塘湖、松辽、渤海湾等盆地都取得了重大突破^[3]。火山岩作为一类特殊的储集层,与常规沉积油气相比,在储层和成藏方面更加复杂。诸多学者对储层性质进行了系统论述^[1,4-10]。目前认为火山岩储层主要有两种类型,一种为原生型火山岩储层,储层主要受岩性、岩相、火山机构、旋回期次等火山作用本身控制^[5-6,8,11-14]。另一种为改造型火山岩储层,储层主要受构造、风化淋滤、溶蚀、流体充填等作用控制^[1,15-16],这类油气藏在中国西部准噶尔盆地、三塘湖盆地和塔里木盆地尤为发育,具有区域性整体含油的特点^[3,17-20]。准噶尔盆地自 1956 年在石炭系火山岩中首见油气显示以来,在石炭—二叠系火山岩中探明油气当量已超过 3.6 亿 t^[21]。火山岩已成为准噶尔盆地西北缘石炭—二叠系的主力储层,在乌夏断裂带、克百断裂带、红车断裂带都发现了储量丰富的火山岩油气藏^[22-24],前人对研究区火山岩储层岩石学、储集空间及物性特征等进行过详细研究^[1,15-16,25]。研究结果多为现今储层静态描述,缺乏储层演化的动态过程研究。笔者以准噶

尔西缘车排子凸起石炭系火山岩作为研究对象,在储层岩心岩矿鉴定基础上,结合岩石元素分析、铸体薄片分析、流体分析、物性分析、测井解释等资料,明确研究区石炭系火山岩储层的岩石学、储集空间、物性变化特征,揭示车排子凸起石炭系火山岩储层演化过程及成储机制。

1 区域地质概况

准噶尔地块位于哈萨克斯坦、塔里木和西伯利亚三大古板块交汇部位,受控于古亚洲洋和周边造山带的演化,经历了多阶段不同性质的构造变革^[26-27]。泥盆纪至二叠纪,准噶尔盆地及邻区经历了古亚洲洋的消亡到陆陆碰撞的过程^[28-30](图 1(a))。早石炭世早期,准噶尔盆地处于碰撞间歇期伸展—残留海闭合和陆—陆碰撞阶段,导致深部热调整和岩浆活动。石炭纪中后期,准噶尔盆地经历了造山期后裂陷槽的开启—闭合阶段^[27],普遍发育火山—沉积建造,表现为火山—沉积岩裂陷盆地。火山岩年龄主要集中在 340 ~ 320 Ma 和 300 ~ 295 Ma 两个阶段^[31]。晚石炭世末,准噶尔盆地受周缘板块挤压整体抬升遭受风化淋蚀,为风化壳的形成提供了前提条件。二叠纪开始,准噶尔盆地已形成独立的盆地,进入陆内盆地发育阶段^[28]。

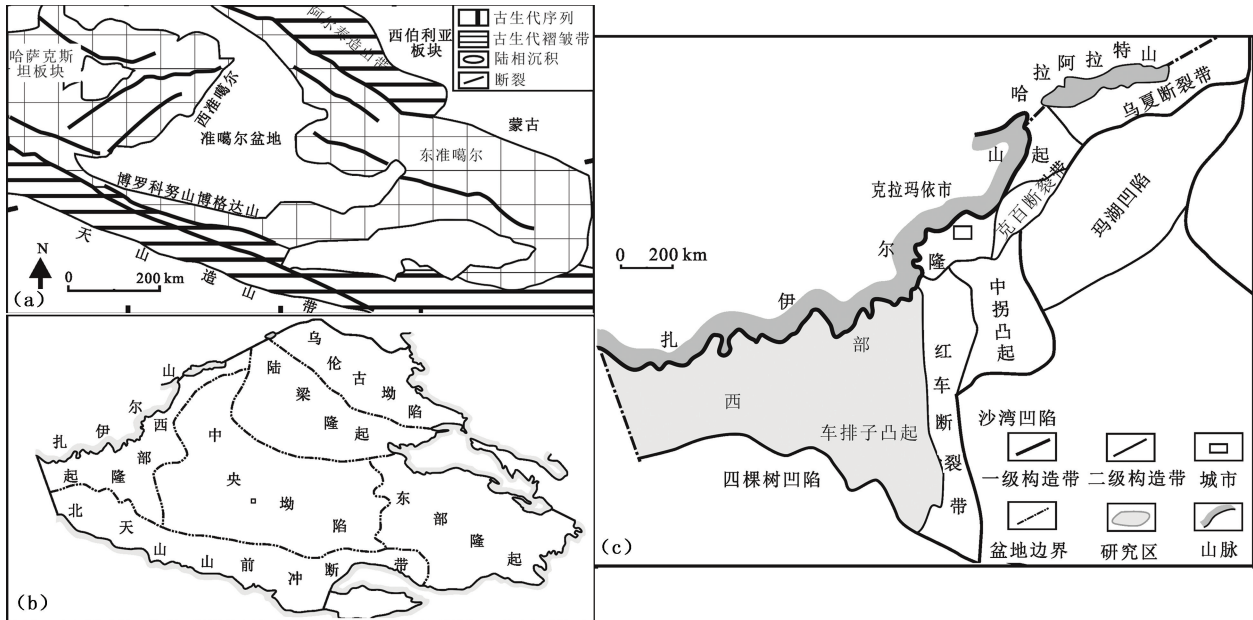


图 1 研究区构造位置简图

Fig.1 Simplified tectonic location map of study area

准噶尔盆地西缘是该盆地中油气最富集、勘探程度最高的地区。西部隆起带自南至北发育有车排子凸起、西北缘断裂带和中拐凸起 3 个二级构造单元^[32](图 1(b))。车排子凸起东面紧邻红车断裂

带,南面为南缘冲断带的四棵树凹陷,北西伸入扎伊尔山山前^[33](图 1(c))。该凸起是一个海西晚期形成且继承性发育的古凸起,现今的构造格局为喜山运动后的面貌,平面上呈三角形。石炭系自下而上

发育太勒古拉组、包古图组和希贝库拉斯组。研究目的层位为石炭系希贝库拉斯组,该组主要发育火山岩,且遭受中长期风化和淋滤改造,是西北缘石炭系油气勘探主要目的层位。

2 石炭系火山岩储层特征

2.1 岩石学特征

火山岩岩性、岩相的划分是火山岩储层特征及演化研究工作的基础。由于火山岩成因复杂、种类繁多,尚没有统一的岩性划分方案。通过对车排子凸起 22 口钻井 408 m 石炭系钻井岩心描述、薄片鉴定、岩石元素分析,采用火山岩形成方式、化学成分、结构构造的三级方案进行岩性划分。首先,按照火山岩形成方式,将车排子凸起石炭系火山岩分为火山熔岩类、火山碎屑岩类、火山碎屑熔岩类、沉火山碎屑岩类。火山熔岩类在岩心中比例最大,约占 63%,火山碎屑岩次之,约占 21%。然后,按照火山岩化学成分,根据火山熔岩类样品的元素地球化学数据(图 2),将火山熔岩类划为玄武岩、玄武安山岩、安山岩和粗面安山岩,车排子凸起石炭系火山熔岩以玄武安山岩及玄武岩为主。这与准噶尔盆地中部陆东-五彩湾石炭系火山岩成分略有差别,后者以玄武岩和粗面玄武岩为主^[34-35]。此外,火山碎屑岩类的化学成分主要为玄武安山质或安山质。最后,按照火山岩的结构、构造,将火山熔岩类划分为火山熔岩、同生角砾熔岩,火山碎屑岩类分为火山集块岩、火山角砾岩、火山凝灰岩以及不同粒级之间的

过渡类型,火山碎屑熔岩以角砾熔岩为主及少量凝灰熔岩,沉火山碎屑岩主要为凝灰质泥岩和沉凝灰岩。关于岩相,依据火山作用方式,将车排子地区石炭系火山岩划分为火山通道相、爆发相、溢流相、火山沉积相。结合岩石空间位置、结构、构造等特征,溢流相又划分为角砾熔岩流亚相、板状熔岩流亚相、自碎熔岩流亚相;爆发相划分为热碎屑流亚相和空落亚相;火山沉积相划分为沉火山碎屑沉积亚相和含火山碎屑沉积亚相。

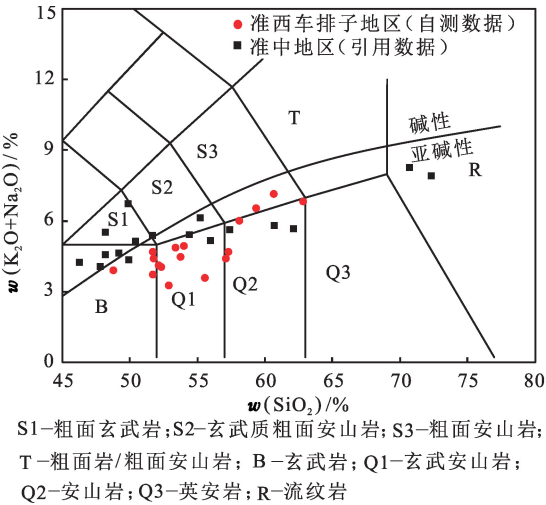


图 2 石炭系火山岩 TAS 图

Fig. 2 TAS diagram of Carboniferous volcanic rocks

2.2 储集空间类型

车排子凸起石炭系火山岩储集空间类型包括孔隙和裂缝两种类型(表 1、图 3)。

表 1 车排子凸起石炭系火山岩储集空间类型

Table 1 Reservoir space types of Carboniferous volcanic rocks, Chepaizi salient

孔隙类型		成因	特征	代表性
原生孔隙	原生气孔	含有大量挥发分的火山物质喷出地表时,流动单元上部、下部遗留下来后期未充填物质的气孔	气孔的形态有圆形、椭圆形、线状及不规则形态,大小不等,分布均匀。部分为不连通的独立孔	玄武岩、安山岩、玄武安山岩或者火山角砾岩中的熔岩角砾
	砾间/晶粒间孔	火山碎屑颗粒间经成岩压实和重结晶作用后残余的孔隙或者矿物晶体间结晶残余孔隙	形态不规则,通常沿碎屑边缘分布,主要为晶间孔和残余的孔隙,连通性较好	火山角砾岩、凝灰岩
次生孔隙	杏仁体内孔	后期流体形成矿物充填气孔但未充满形成的杏仁体内部的孔隙	其形态多为长形、多边形或围边棱角状不规则形状,主要为晶间孔和气孔残余	火山熔岩类安山岩、玄武安山岩
	斑晶/晶屑溶蚀孔	斑状火成岩中,斑晶被溶蚀产生的孔隙或者凝灰岩中晶屑被溶蚀产生孔隙	主要在长石和暗色矿物中发育,依据溶蚀程度可划分为网状孔、铸模孔	各种火山岩
	岩屑溶蚀孔	火山碎屑中的角砾、岩屑等发生不同程度溶蚀	角砾内不均匀溶蚀,斑点状、筛状,保留角砾形态	火山碎屑岩
	基质内溶蚀孔	细小火山灰或者隐晶质基质溶蚀产生孔隙	细小的筛孔状,具有一定的相互连通性	凝灰岩、角砾凝灰岩、凝灰质角砾岩
	杏仁溶蚀残余孔	早期充填的杏仁再次溶蚀	杏仁体内不规则孔隙	安山岩

续表 1					
裂缝	成岩作用	自碎裂缝	自碎角砾岩或者隐爆角砾岩沿原缝破裂	可复原,延续性差	自碎熔岩类
		冷凝收缩裂缝	火山岩在冷凝和压实的成岩过程中自发产生的裂缝	裂缝规律性不强,延伸距离短、中间宽两端窄	凝灰岩
		杏仁收缩缝	矿物充填气孔形成的杏仁体,杏仁冷凝过程中收缩,在杏仁与气孔之间或杏仁体内形成孔缝	围绕气孔形成形成环状孔缝或者杏仁内的网状缝	含气孔-杏仁的火山岩
	构造作用	风化裂缝	火山岩暴露地表,长时间风化淋滤,破碎,后期流体沿裂隙充填	裂缝宽窄不一、大小不一、通常垂直地层方向	各类火山岩
		构造裂缝	火山岩成岩后受构造应力作用产生的裂缝	高角度或水平缝较多,平直、是很好的油气运移通道	各类火山岩
		溶蚀缝	流体溶蚀作用产生	一般沿着矿物解理或原始成岩微裂缝溶蚀	各种火山岩
		充填残余缝	裂隙被后期热液不完全充填	不规则形状的构造节理裂缝孔,连通性好	火山岩构造带
流体作用	充填-溶蚀缝	被充填构造缝隙,后溶蚀重新开启成为有效储集空间	保留原裂隙形态,溶蚀构造缝隙,连通性较好	火山岩构造带	

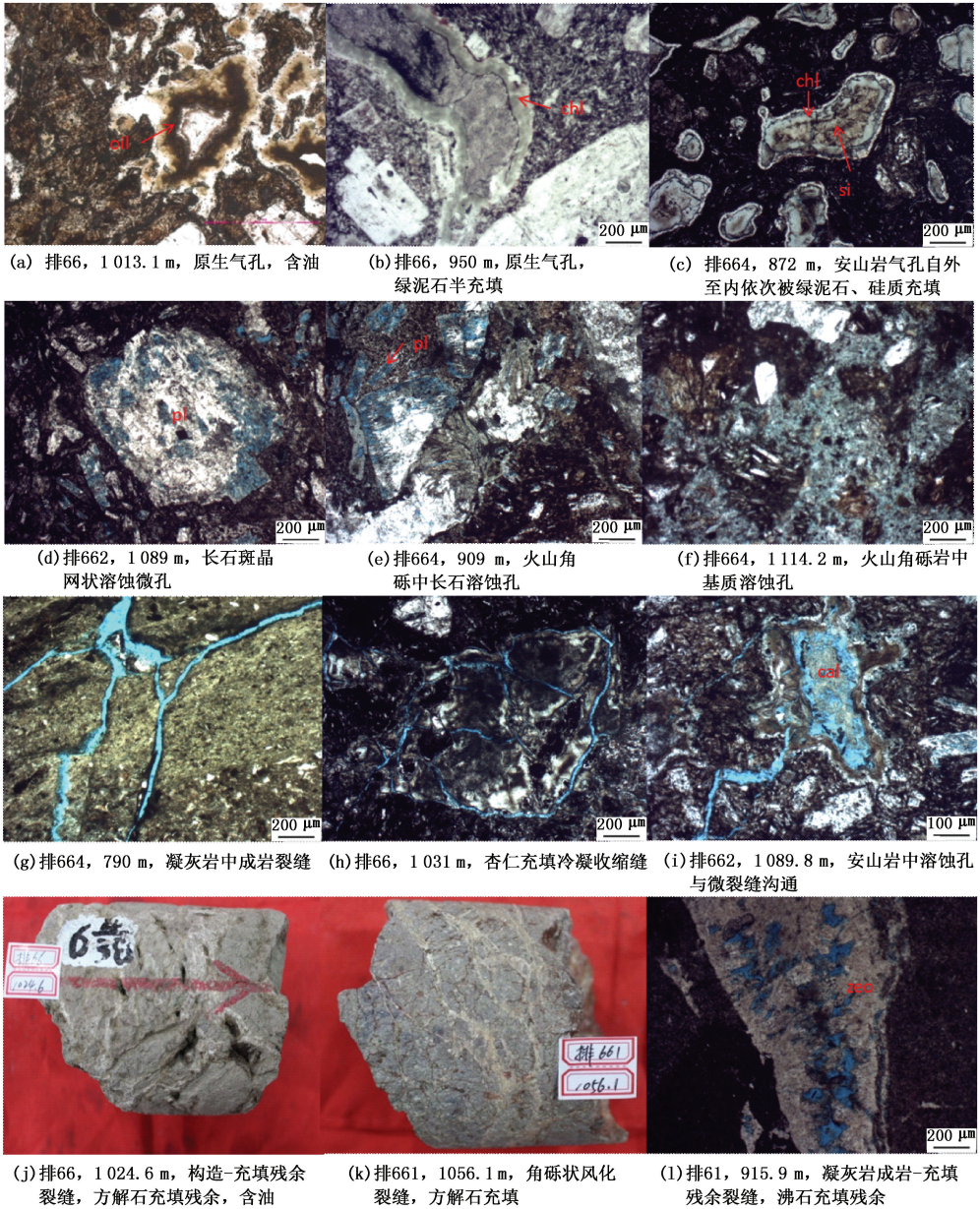


图 3 车排子地区石炭系火山岩储集空间类型

Fig.3 Reservoir space types of Carboniferous volcanic rocks in Chepaiz salient

车排子地区石炭系火山岩储层孔隙以次生孔隙为主,原生孔隙仅保留极少量的气孔和角砾间孔。次生孔隙包括杏仁充填残余孔、杏仁收缩孔、杏仁溶蚀孔、斑晶溶蚀孔、角砾溶蚀孔、基质溶蚀孔等。火山岩中的裂缝依据成因可划分为成岩裂缝、构造裂缝以及流体改造裂缝,其中以流体改造裂缝最为常见,充分体现了流体在火山岩储层形成过程中的重要作用。

2.3 车排子凸起火山岩储层物性特征

车排子地区石炭系 79 个火山岩样品物性测试

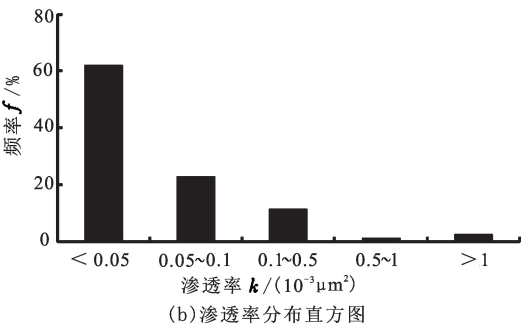
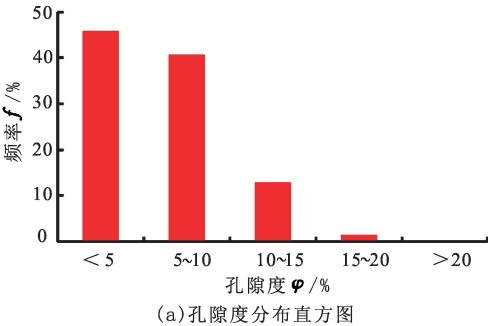


图 4 车排子凸起石炭系火山岩储层孔隙度和渗透率分布直方图

Fig.4 Porosity and permeability histograms of Carboniferous volcanic reservoirs, Chepaizi salient

3 石炭系火山岩储层主控因素

准噶尔西缘车排子地区晚石炭世希贝库拉斯组主要由火山岩组成。受红车断裂及次生断裂的逆冲推覆作用影响,石炭系隆升,遭受长期风化淋滤;直到侏罗纪,部分区域开始接受沉积,石炭系火山岩被埋藏^[36]。因此车排子凸起火山岩冷凝固结以后,先后经历了构造抬升、表生淋滤以及埋藏作用,最终形成有利储层。

3.1 岩性岩相

首先,岩性岩相制约着原生孔隙发育类型和程度。车排子地区石炭系火山近源相组合中的火山熔岩(玄武岩、安山岩、角砾熔岩、同生角砾熔岩)、火山碎屑岩(火山角砾岩)比远源相中的凝灰岩、沉凝灰岩原生孔隙发育。近源相中的原生孔隙主要为熔岩气孔、杏仁体内孔、晶间孔、角砾间孔,其中原生气孔最为发育,主要出现在溢流相角砾熔岩流亚相和爆发相热碎屑流亚相中的角砾中。其次,岩性岩相影响后期改造作用的程度。近源相组合(爆发相热碎屑流亚相和溢流相)在风化淋滤作用影响下都可以形成有利储层,且近源相组合中爆发相热碎屑流亚相溶蚀程度比溢流相更高,物性更佳。远源相组合(凝灰岩类)很难形成有利储层(图 5)。除此以外,从垂向上同一亚相的物性变化可以看出,在没有

结果表明,孔隙度小于 5% 者占 45.57%,介于 5%~10% 者占 40.51%,10%~15% 者占 12.66%,15%~20% 者占 1.27%,大于 20% 者为 0,总体上为低孔(图 4(a))。渗透率小于 $0.05 \times 10^{-3} \mu m^2$ 者占 62.03%,介于 $(0.05 \sim 0.1) \times 10^{-3} \mu m^2$ 者占 22.78%,介于 $(0.1 \sim 0.5) \times 10^{-3} \mu m^2$ 者占了 11.39%,介于 $(0.5 \sim 1) \times 10^{-3} \mu m^2$ 者占 1.27%,大于 $1 \times 10^{-3} \mu m^2$ 者占 2.53%(图 4(b)),总体为低孔-特低渗储层。

断裂的影响下,火山岩受风化淋滤的影响深度可达 350 m,而在断裂的影响下,火山岩风化壳储层厚度可达 500 m。

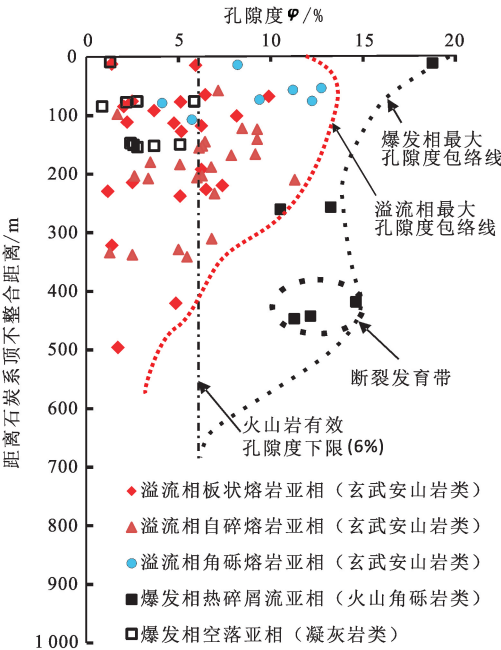


图 5 火山岩孔隙度随风化壳顶面深度变化关系

Fig.5 Relationship between volcanic porosity with distance to top of weathered crust

3.2 构造抬升作用

红车断裂带位于准噶尔盆地西北缘断裂带南

端,车排子凸起东侧。断裂带长约 70 km,宽约 10 ~ 120 km,平面呈反“S”形,走向近南北,倾向 NW - NNW。自北向南,由红山嘴逆冲断裂亚带、中拐反冲断裂亚带、车排子近 NS 向逆冲断裂亚带和车 75 - 车 77 井 NW 向逆冲断裂亚带组成^[37]。红车断裂演化历史长,石炭纪为初始发育期,活动较弱;二叠纪为逆冲推覆活动期;印支期为断裂带定型期;燕山期为余动期;晚侏罗世以后逆冲断裂才停止活动。因此受红车断裂带影响,车排子地区构造活跃,石炭系火山岩构造裂缝和构造角砾岩非常发育(图 3)。在断裂影响下,火山岩风化壳厚度更大^[38]。如排 66 井,在断裂影响下,距不整合面 450 m 处,火山岩角砾岩孔隙度仍达到 14.5% (图 5),远高于同深度未受断裂影响的火山角砾岩孔隙度。

3.3 风化淋滤作用

准噶尔西缘车排子地区石炭纪火山岩形成以后,受构造挤压作用影响,区域构造抬升,石炭系希贝库拉斯组火山岩形成后未被及时埋藏,处于新疆北部干旱—半干旱的亚热带环境下遭受长期风化剥蚀。在表生作用环境下,火山岩中不同矿物相继遭受破坏析出,形成次生孔隙,储层物性提高,形成大面积火山岩风化壳储层。通过对排浅 4 井石炭系凝灰质泥岩详细观察,将石炭系风化壳自上而下划分为土壤带、水解带、淋蚀带、崩解带和原岩带(图 6)。

风化壳的形成除了受岩性、表生环境、风化时间影响外,还受风化残余物的剥蚀速度影响。通常在古构造低洼区可保存完整的 5 层结构,在构造高部位和斜坡地带则缺失土壤带和水解带。风化壳的 5 层结构中,土壤层可作为盖层,水解带为差储层,淋蚀带和崩解带受风化裂缝和溶蚀作用的影响储集物性最佳^[1]。按照溢流相亚相的分类标准,将车排子地区石炭系玄武安山岩进行亚相划分后,基于玄武安山岩 55 组孔隙度测试数据,绘制了不同玄武安山岩亚相孔隙度与不整合面距离之间的关系图(图 7)。图中可看出,车排子地区玄武安山岩风化壳中淋蚀带物性最好,最大孔隙度 13%,其次为崩解带,最大孔隙度达到 11%。在古构造高部位或短期风化淋滤区,由于土壤层和水解带较薄,钻遇风化壳即可至地层油气藏。在长期风化淋滤的古构造斜坡和低洼部位,土壤层和水解带厚度一般大于 50 m,不整合面之下 50 m 内储层物性较差,没有油气显示,50 m 之下的淋蚀带和崩解带才是有利勘探区(图 7)。因此,对于风化壳储层而言,通常 0 ~ 50 m 以下才是勘探的有利区。

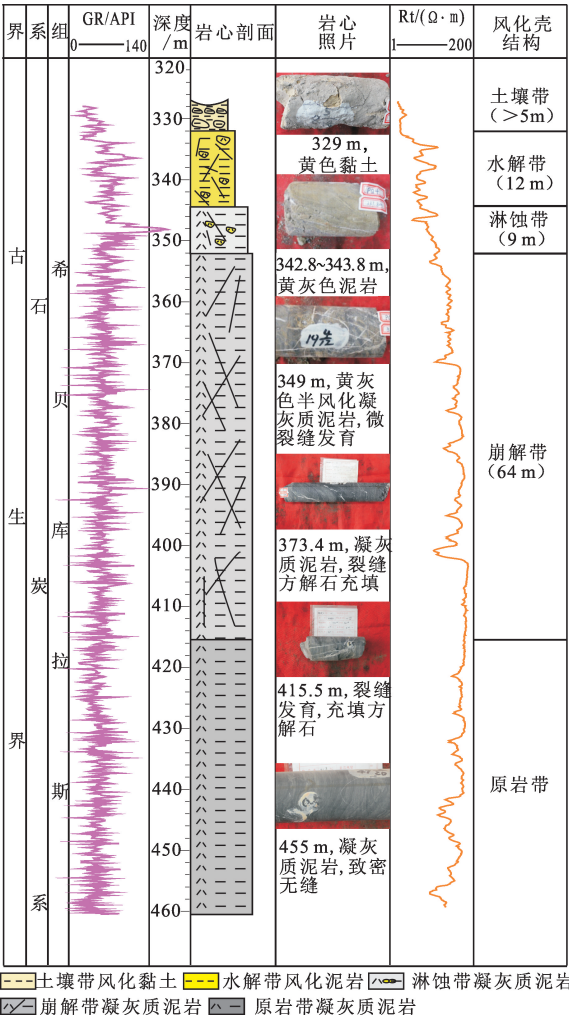


图 6 排浅 4 井石炭系火山岩风化壳结构示意图

Fig.6 Structure diagram of Carboniferous volcanic weathered crust of well Paiqian 4, Chepaizi salient

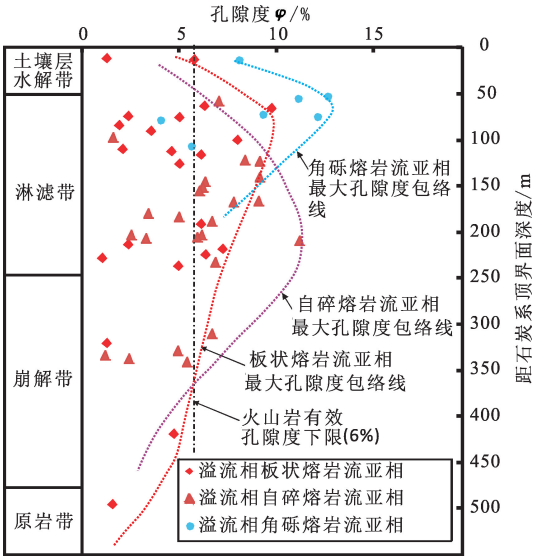


Fig.7 Vertical variation of porosity of basaltic andesite weathered crust

3.4 流体的充填与溶蚀双重作用

地层中的流体活动是非常普遍的现象,流体种类也十分丰富,包括正常地层水、有机酸、有机酸脱羧形成碱性水、深部流体等。流体对储层的作用主要分为两种,一种是形成新的矿物,充填孔隙和裂缝,起到减孔作用。车排子地区钻井岩心和铸体薄片显示,石炭系火山岩中的流体活动主要体现在充填作用方面。裂缝主要被方解石充填(图 3(j)、(k)),火山岩气孔则几乎全被绿泥石、硅质充填,偶见沸石和方解石充填(图 3(b)、(c)),这些充填作用导致本区火山岩原生孔隙基本消失,多数裂缝处于半充填—完全充填状态。地层流体的另一个作用

是溶蚀作用,起到增孔作用。本区火山岩常见早期充填方解石被溶蚀(图 3(i)),但极少见硅质被溶蚀(图 3(c))。可见,石炭系埋藏后地层流体活动经历了酸性—碱性—酸性的过程,早期的酸性和碱性流体活动规模远远大于后期的酸性流体活动,主要表现为绿泥石、方解石等矿物的充填,而溶蚀作用较弱。

4 石炭系火山岩储层演化

车排子地区石炭系火山岩有利储层的形成经历了长期、复杂的演化过程(图 8)。

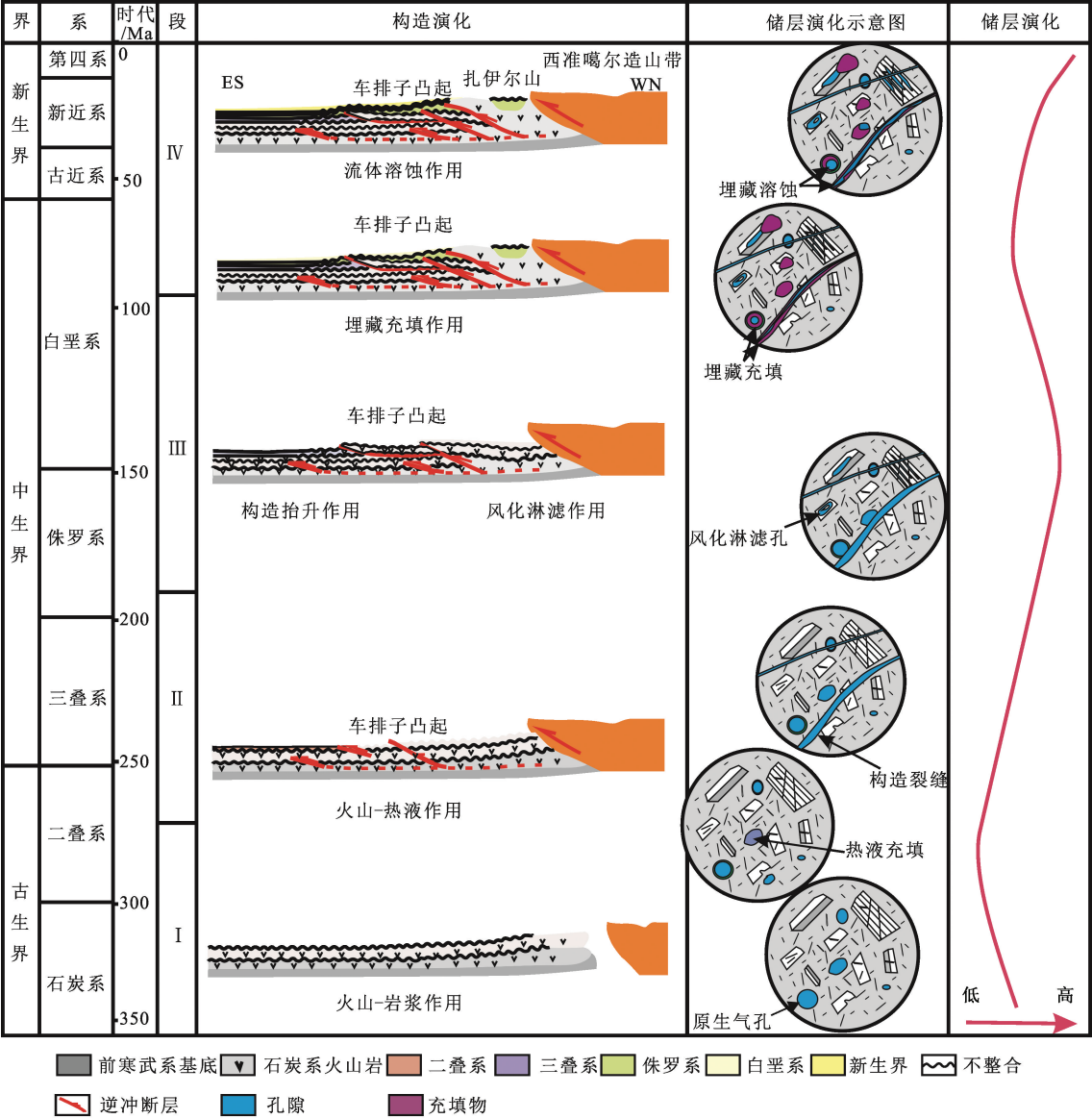


图 8 石炭系火山岩储层成因模式

Fig. 8 Genetic model of Carboniferous volcanic reservoirs

按时间先后顺序,包括如下几个过程:①冷凝固 结期,岩浆喷出地表,温度降低,冷凝固结形成火山

岩,期间形成了大量原生孔隙,主要包括原生气孔、冷凝收缩裂缝、晶间孔隙等,此时火山岩具有一定的储集性能,但孔隙间缺乏沟通,渗透性较差;②热液流体期,火山岩形成以后,岩浆晚期热液活动频繁,热液活动常导致原生气孔被充填,常见的充填矿物包括绿泥石、沸石,通常沿着气孔或者成岩裂缝的内壁呈半充填状态,降低了储集性能;③构造抬升期,伴随红车断裂的逆冲推覆作用,石炭系火山岩被整体抬升,形成大量构造裂缝,大大增加了储层的储集物性且使原有孔隙被连通;④风化淋滤期,石炭系火山岩构造抬升以后,经历了长期的风化作用,形成大量次生溶蚀孔隙和风化裂缝,大大增强了火山岩储集物性;⑤埋藏流体活动期,侏罗纪开始,受构造影响,区域开始接受沉积,火山岩逐渐被埋藏,接受地层流体作用。地层流体具有双重作用,一方面,方解石、硅质等矿物质逐渐充填早期形成的气孔和裂缝,降低了火山岩储集物性;另一方面,有机酸活动溶蚀早期充填矿物,提高储层物性。

5 结 论

(1)车排子凸起石炭系火山岩岩石类型包括火山熔岩、火山碎屑岩、火山碎屑熔岩和火山沉积岩。火山熔岩以玄武安山岩、玄武岩、安山岩为主,少量粗面玄武岩;火山碎屑岩包括火山角砾岩、凝灰岩以及相应过渡粒级岩性;火山碎屑熔岩主要为角砾熔岩,少量凝灰熔岩。火山沉积岩主要为沉凝灰岩和凝灰质泥岩。

(2)石炭系火山岩储层储集空间主要为次生溶蚀孔隙和裂缝,少量原生孔隙。火山岩为低孔-特低渗储层。

(3)石炭系火山岩先后经历了凝固结、岩浆期后热液活动、红车断裂逆冲推覆构造、表生风化淋滤、埋藏流体充填、晚期流体溶蚀等作用。断裂构造、风化淋滤、晚期流体溶蚀作用有效提高了火山岩储集物性,流体充填作用则降低了火山岩储层物性。火山岩储层物性经历了先提高后降低再提高的演化过程。

参考文献:

[1] 邹才能,侯连华,陶士振,等.新疆北部石炭系大型火山岩风化体结构与地层油气成藏机制[J].中国科学(D辑),2011,41(11):1613-1626.
ZOU Caineng, HOU Lianhua, TAO Shizhen, et al. Hydrocarbon accumulation mechanism and structure of large-scale volcanic weathering crust of the Carboniferous in

northern Xinjiang, China[J]. Science China (Earth Sciences), 2012, 55(2):221-235.
[2] 刘嘉麒,孟凡超.火山作用与油气成藏[J].天然气工业,2009,29(8):1-4.
LIU Jiaqi, MENG Fanchao. Hydrocarbon generation, migration and accumulation related to igneous activity[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(8):1-4.
[3] 邹才能,赵文智,贾承造,等.中国沉积盆地火山岩油气藏形成与分布[J].石油勘探与开发,2008,35(3):257-271.
ZOU Caineng, ZHAO Wenzhi, JIA Chengzao, et al. Formation and distribution of volcanic hydrocarbon reservoirs in sedimentary basins of China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(3):257-271.
[4] 王璞珺,冯志强.盆地火山岩:岩性、岩相、储层、气藏、勘探[M].北京:科学出版社,2008.
[5] FENG Z Q. Volcanic rocks as prolific gas reservoir: a case study from the Qingshen gas field in the Songliao Basin, NE China [J]. Marine and Petroleum Geology 2008, 25:416-432.
[6] 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.
[7] 赵文智,邹才能,李建忠,等.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,2009,36(1):1-11.
ZHAO Wenzhi, ZOU Caineng, LI Jianzhong, et al. Comparative study on volcanic hydrocarbon accumulations in western and eastern China and its significance[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(1):1-11.
[8] CHEN Z Y, YAN H, LI J S, et al. Relationship between Tertiary volcanic rocks and hydrocarbons in the Liaohé Basin, People's Republic of China[J]. AAPG Bulletin, 1999, 83(6):1004-1014.
[9] SRUOGA P, RUBINSTEIN N, HINTERWIMMER G. Porosity and permeability in volcanic rocks: a case study on the Serie Tobífera, South Patagonia, Argentina[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2004, 132:31-43.
[10] 操应长,姜在兴,邱隆伟.山东惠民凹陷商741块火成岩油藏储集空间类型及形成机理探讨[J].岩石学报,1999,15(1):129-136.
CAO Yingchang, JIANG Zaixing, QIU Longwei. Study on the type and origin of the reservoir space of igneous oil reservoir in Shang 741 block, Huimin depression, Shandong[J]. Acta Petrologica Sinica, 1999, 15(1):129-136.
[11] 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. Volcanic facies of the Songliao Basin: classification, characteristics and reservoirs significance[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2003, 33(4): 449-456.
- [12] ZOU C N, ZHU R K, ZHAO W Z, et al. Geologic characteristics of volcanic hydrocarbon reservoirs and exploration directions in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(1): 194-205.
- [13] DUTKIEWICZ A, VOLK H, RIDLEY J, et al. Geochemistry of oil in fluid inclusions in a middle Proterozoic igneous intrusion: implications for the source of hydrocarbons in crystalline rocks[J]. Organic Geochemistry, 2004, 35(8): 937-957.
- [14] KAWAMOTO T. Distribution and alteration of the volcanic reservoir in the Minami-Nagaoka gas field[J]. Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology, 2001, 66: 46-55.
- [15] 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): 557-567.
- 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): 557-567.
- [16] 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 Petroleum Sinica, 2012, 33(4): 533-540.
- [17] 陈业全, 李宝刚. 塔里木盆地中部二叠系火山岩地层的划分与对比[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2004, 28(6): 6-10.
- CHEN Yequan, LI Baogang. Classification and correlation of Permian volcanic rocks in Mid-Tarimarea[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2004, 28(6): 6-10.
- [18] 匡立春, 薛新克, 邹才能, 等. 火山岩岩性地层油藏成藏条件与富集规律: 以准噶尔盆地克一百断裂带上盘石炭系为例[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(3): 285-290.
- KUANG Lichun, XUE Xinke, ZOU Caineng, et al. Oil accumulation and concentration regularity of volcanic lithostratigraphic oil reservoir: a case from upper-plate Carboniferous of KA-BAI fracture zone, Junggar Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(3): 285-290.
- [19] 曲江秀, 高长海, 查明, 等. 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), 2014, 38(5): 1-8.
- QU Jiangxiu, GAO Changhai, ZHA Ming, et al. Reservoir characteristics and diagenetic evolution of Carboniferous volcanic rock in Kelameili gas field of Junggar Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(5): 1-8.
- [20] 张奎华, 林会喜, 张关龙, 等. 哈山构造带火山岩储层发育特征及控制因素[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 39(2): 16-22.
- ZHANG Kuihua, LIN Huixin, ZHANG Guanlong, et al. Characteristics and controlling factors of volcanic reservoirs of Hala'alate mountains tectonic belt[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(2): 16-22.
- [21] 鲜本忠, 牛花朋, 朱筱敏, 等. 准噶尔盆地西北缘下二叠统火山岩岩性、岩相及其与储层的关系[J]. 高校地质学报, 2013, 19(1): 46-55.
- XIAN Benzhong, NIU Huapeng, ZHU Xiaomin, et al. Early Permian volcanic lithology, lithofacies and their relations to reservoir in Northwestern Margin of the Junggar Basin[J]. Geological Journal of China Universities, 2013, 19(1): 46-55.
- [22] 姚卫江, 党玉芳, 张顺存, 等. 准噶尔盆地西北缘红车断裂带石炭系成藏控制因素浅析[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(6): 917-923.
- YAO Weijiang, DANG Yufang, ZHANG Shuncun, et al. Formation of Carboniferous reservoir in Hongche Fault Belt, Northwestern Margin of Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(6): 917-923.
- [23] 牛海青, 陈世悦, 张鹏, 等. 准噶尔盆地乌夏地区二叠系储集层特征及影响因素分析[J]. 古地理学报, 2009, 11(4): 425-434.
- NIU Haiqing, CHEN Shiyue, ZHANG Peng, et al. Analysis of the Permian reservoir characteristics and controlling factors in Wuxia area, Junggar Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2009, 11(4): 425-434.
- [24] 李军, 薛培华, 张爱卿, 等. 准噶尔盆地西北缘中段石炭系火山岩油藏储层特征及其控制因素[J]. 石油学报, 2008, 29(3): 329-335.
- LI Jun, XUE Peihua, ZHANG Aiqing, et al. Characteristics and controlling factors of Carboniferous volcanic reservoir in the middle section of the northwestern margin of Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(3): 329-335.
- [25] 张年富, 曹耀华, 况军, 等. 准噶尔盆地腹部石炭系火山岩风化壳模式[J]. 新疆石油地质, 1998, 19(6):

- 450-452.
- ZHANG Nianfu, CAO Yaohua, KUANG Jun, et al. Weathering crust model of Carboniferous volcanic rock in Hinterland of Junggar Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 1998, 19(6):450-452.
- [26] 李锦轶,何国琦,徐新,等. 新疆北部及邻区地壳构造格架及其形成过程的初步探讨[J]. *地质学报*, 2006, 80(1):148-168.
- LI Jinyi, HE Guoqi, XU Xin, et al. Crustal tectonic framework of northern Xinjiang and adjacent regions and its formation[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(1):148-168.
- [27] 肖序常,汤耀庆,冯益民,等. 新疆北部及其邻区大地构造[M]. 北京:地质出版社,1992.
- [28] 陈发景,汪新文,汪新伟. 准噶尔盆地的原型和构造演化[J]. *地学前缘*, 2005, 12(3):77-89.
- CHEN Fajing, WANG Xinwen, WANG Xinwei. Types and tectonic evolution of Junggar Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(3):77-89.
- [29] 肖文交,韩春明,袁超,等. 新疆北部石炭纪二叠纪独特的构造成矿作用:对古亚洲洋构造域南部大地构造演化的制约[J]. *岩石学报*, 2006, 22(5):1062-1076.
- XIAO Wenjiao, HAN Chunming, YUAN Chao, et al. Unique Carboniferous-Permian tectonic metallogenic framework of Northern Xinjiang(NW China): constraints for the tectonics of the southern Paleozoic Domain [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(5):1062-1076.
- [30] XIAO Y, ZHANG H F, SHI J A, et al. Late Paleozoic magmatic record of East Junggar, NW China and its significance: implication from zircon U-Pb dating and Hf isotope[J]. *Gondwana Research*, 2011, 20:532-542.
- [31] 毛翔,李江海,张华添,等. 准噶尔盆地及其周缘地区晚古生代火山机构分布与发育环境分析[J]. *岩石学报*, 2012, 28(7):2381-2391.
- MAO Xiang, LI Jianghai, ZHANG Huatian, et al. Study on the distribution and developmental environment of the Late Paleozoic volcanoes in Junggar Basin and its adjacent areas [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(7):2381-2391.
- [32] 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 Xinfa, KUANG Jun, et al. Characteristics and exploration potential of Carboniferous hydrocarbon plays in Junggar Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 31(1):1-11.
- [33] 陈庆,张立新. 准噶尔盆地西北缘石炭系火山岩岩性岩相特征与裂缝分布关系[J]. *现代地质*, 2009, 23(2):305-312.
- CHEN Qing, ZHANG Lixin. Relationship between the characteristic of lithology-lithofacies and distribution of fractures in carboniferous reservoirs, Northwestern margin of Junggar Basin [J]. *Geoscience*, 2009, 23(2):305-312.
- [34] 毛治国,邹才能,朱如凯,等. 准噶尔盆地石炭纪火山岩岩石地球化学特征及其构造环境意义[J]. *岩石学报*, 2010, 26(1):207-216.
- MAO Zhiguo, ZOU Caineng, ZHU Rukai, et al. Geochemical characteristics and tectonic setting of Carboniferous volcanic rocks in Junggar Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(1):207-216.
- [35] 赵霞,贾承造,张光亚,等. 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*, 2008, 15(2):272-279.
- ZHAO Xia, JIA Chengzao, ZHANG Guanya, et al. Geochemistry and tectonic settings of Carboniferous intermediate-basic volcanic rocks in Ludong-Wucaiwai, Junggar Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(2):272-279.
- [36] MA D, HE D, LI D, et al. Kinematics of syntectonic unconformities and implications for the tectonic evolution of the Hala'ala Mountains at the northwestern margin of the Junggar Basin, Central Asian Orogenic Belt [J]. *Geoscience Frontiers*, 2015, 6(2):247-264.
- [37] 严世帮,胡望水,李瑞升,等. 准噶尔盆地红车断裂带同生逆冲断裂特征[J]. *岩性油气藏*, 2008, 20(1):64-68.
- YAN Shibang, HU Wangshui, LI Ruisheng, et al. Structural features of contemporaneous thrust faults in Hongche fault belt of Junggar Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2008, 20(1):64-68.
- [38] 王京红,邹才能,靳久强,等. 火成岩储集层裂缝特征及成缝控制因素[J]. *石油勘探与开发*, 2011, 38(6):708-715.
- WANG Jinghong, ZOU Caineng, JIN Jiuqiang, et al. Characteristics and controlling factors of fractures in igneous rock reservoirs [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(6):708-715.

(编辑 徐会永)