

溶蚀作用对火山岩有效储层形成的控制作用 ——以松辽盆地徐家围子断陷营城组为例

张玉银

(中国石化 石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:针对火山岩储层岩石类型复杂、储层非均质性较强的特点,通过大量岩心观察和铸体薄片鉴定,对松辽盆地徐家围子断陷营城组火山岩储层进行系统的成岩作用和孔隙演化研究。结果表明,研究区火山岩有效储层主要为流纹岩和晶屑凝灰岩,先后经历了6个成岩作用阶段,但是不同岩性的储层经历的成岩作用类型、阶段和演化规律有差异,从而导致孔隙演化和储层物性的差异。本区对有效储层发育贡献最大的是溶蚀作用,包括有机酸溶蚀和含CO₂酸性水溶蚀两种类型,有机酸溶蚀酸性火山岩形成的次生孔隙是对形成有效储层贡献最大。控制溶蚀作用的因素包括原生孔隙体系的发育程度、后期断裂活动强度与构造裂缝的分布、火山岩顶底的不整合面等。

关键词:成岩作用;溶蚀作用;有效储层;火山岩;营城组;松辽盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Controlling effect of dissolution on valid volcanic reservoir formation: A case study of the Yingcheng Formation in the Xujiaweizi Fault Depression, Songliao Basin

Zhang Yuyin

(Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: Volcanic reservoirs are usually characterized by complex rock types and higher heterogeneity. The paper systematically studied the diagenesis and porosity evolution of volcanic reservoirs from the Yingcheng Formation in the Xujiaweizi Fault Depression, Songliao Basin, via core observation and identification of casting thin slice. The result shows that all valid reservoir lithologies, including rhyolite and crystal tuff, underwent six diagenetic stages, while different types of diagenesis, stages, and evolution patterns occurred to different reservoir lithologies. That is why the porosity evolution and physical properties of those rocks were heterogeneous. In the study area, dissolution is the most effective diagenesis process to the formation of valid reservoir, including organic acid dissolution and CO₂-bearing acidulous water dissolution. And the secondary pores mostly developed in the acid volcanic rocks after organic acid dissolution played a decisive role in forming valid reservoirs. In terms of the controlling factors for dissolution, some of the most important ones may be the extent of original primary porosity system, the intensity of fracture activity and tectonic cracking in later periods, the top/bottom unconformities of volcanic rocks, etc.

Key words: diagenesis, dissolution, valid reservoir, volcanic rock, Yingcheng Formation, Songliao Basin

随着我国油气资源需求的日益增大,火山岩等非常规油气储层也逐渐成为油气勘探的重要领域,进入了全面勘探阶段^[1],特别是松辽盆地徐家围子断陷的深部火山岩储层^[2],自2002年取得突破性发现后,掀起了大庆油田火山岩气藏的勘探热潮。火山岩储层具

有“双孔介质”的特点,包括3种类型13个亚类储集空间^[3]。储集空间类型的差异受到火山岩相带发育的控制,在喷溢相、爆发相和侵出相内都发育有利的储集空间^[4],而火山岩相序受岩性控制^[2]。同时,火山岩储层不具岩石类型的专属性^[5],相同岩性在不同火山岩

相带的储集物性差异较大,换言之,火山岩相并不是决定火山岩有效储层发育的单一因素。

实际上,火山岩有效储层的形成发展、堵塞改造和再形成等一系列不同阶段的演化过程非常复杂,盆地的构造背景、火山喷发作用类型和成岩作用等都会影响和改变储集空间的发育程度。本文主要从徐家围子断陷营城组火山岩有效储层的储集空间特征入手,利用 7 口钻井的岩心观察和铸体薄片鉴定结果,详细分析不同岩性火山岩经历的成岩作用特征及孔隙演化规律,明确了溶蚀作用对火山岩有效储层形成的贡献,进一步系统解剖了火山岩储层的溶蚀作用类型和溶蚀模式,并探讨了溶蚀作用的主控因素,为寻找有利的火山岩有效储层提供重要依据。

1 地质背景

徐家围子断陷位于松辽盆地北部东南断陷区西侧,是目前勘探程度最高的火山岩气藏区块(图 1),面积约 4 000 km²,整体上为近南北向展布的西陡东缓箕状断陷,可划分为安达凹陷、徐东凹陷、徐西凹陷、安达凸起、徐东斜坡带等构造单元。徐家围子断陷从晚侏罗世开始经历裂谷活动形成,在早白垩世结束,相应沉积了侏罗系火石岭组、白垩系沙河子组和营城组,其中营城组一段和三段发育较好的火山岩储层^[6]。徐家围子断陷深层火山岩气藏发现于 1994 年,突破于 2002 年。储层岩石类型主要包括玄武岩、安山岩、英安岩、流纹岩、凝灰岩和火山角砾岩等^[1],储集空间类型包括原生孔隙、次生孔隙和裂缝,孔隙度范围在 1.9%~10.8%,渗透率范围在 $(0.01\sim0.87)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。

根据研究区内 7 口井的岩心观察和铸体薄片鉴定结果,统计了 239 块样品中的火山岩储层岩石类型,以及各种岩性内不同类型储集空间的分布情况(表 1)。结果表明,岩石类型以流纹岩和流纹质角砾熔岩为主,其次是晶屑凝灰岩、火山角砾岩和熔结凝灰熔岩。

不同岩性内的储集空间类型也不同,各自所占比例差异较大。原生气孔和残余气孔主要发育在流纹岩和流纹质角砾熔岩内,长石溶孔、基质微孔和溶孔分布的岩性较广,同时裂缝在各种岩性储层中也比较发育。其中,长石溶孔、基质溶孔和裂缝都是在火山岩储层的成岩阶段被改造形成的,特别是各类溶孔,是溶蚀作用的结果。这类由溶蚀作用形成的储集空间在晶屑凝灰

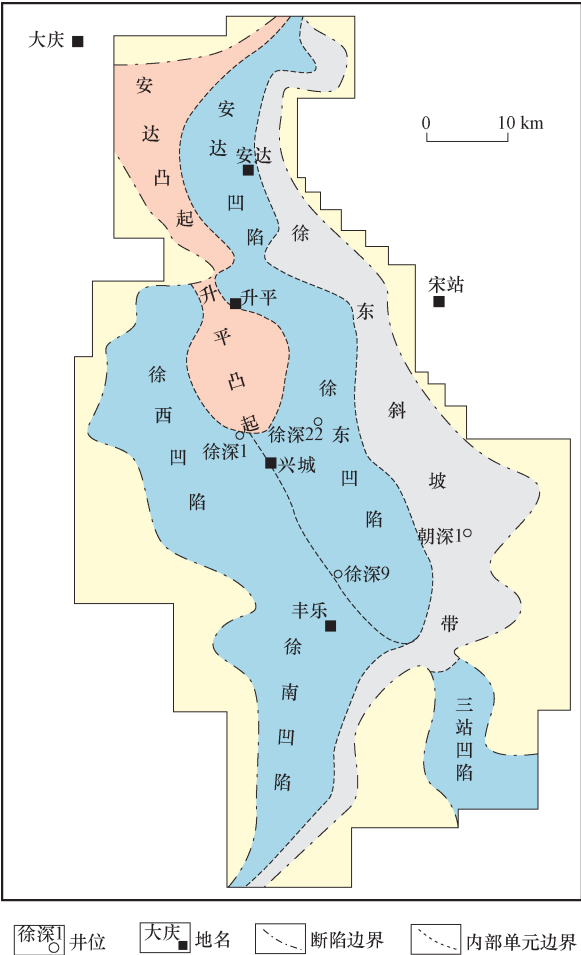


图 1 松辽盆地主要断陷和天然气藏分布
Fig. 1 Major fault depressions in Songliao Basin and its natural gas accumulation distribution

表 1 徐家围子断陷营城组不同岩性火山岩储集空间类型

Table 1 Classification of varying volcanic reservoir space in lithology from the Yingcheng Formation, Xujiaweizi Fault Depression

主要岩石类型	所占比例/%	储集空间类型占比/%					
		原生气孔	基质微孔	残余气孔	长石溶孔	基质溶孔	裂缝
流纹岩	56.33	24	17	36	12	6	5
熔结凝灰熔岩	5.14	0	73	0	0	0	27
晶屑凝灰岩	7.22	0	47	0	35	8	10
英安岩	2.94	0	72	0	0	0	28
火山角砾岩	5.20	0	46	0	26	28	0
英安质角砾熔岩	3.11	0	0	0	0	83	17
流纹质角砾熔岩	20.06	38	0	0	0	39	23

注:所占比例为铸体薄片镜下鉴定结果。

岩、角砾熔岩、火山角砾岩和流纹岩中都有发育,分布普遍。因此,本文认为溶蚀作用对本区各类火山岩形成有效的储集空间贡献很大。

2 不同岩性储层成岩作用特征

火山岩的成岩过程一般包括冷凝阶段、热液阶段、表生阶段和埋藏阶段^[7]。冷凝阶段可以发生火山玻璃的脱玻化及气孔收缩作用,热液阶段可以出现大量自生矿物的结晶和气孔充填作用,表生阶段时容易发生火山喷发间歇的淋滤溶蚀作用,而埋藏阶段的成岩作用类型最多,包括压实、胶结、交代、溶蚀和重结晶作用。埋藏阶段的各类成岩作用是改造表生阶段之前形成的原生储集空间的重要因素。

前人对该区火山岩相和储层的研究成果表明,喷溢相流纹岩类和爆发相凝灰岩类是有效储层最发育的岩性^[4]。本文针对有效储层比较发育的流纹岩和晶屑凝灰岩两种岩性为例,对比分析了各自的成岩作用特征和演化规律,认为不同类型的火山岩具有不同的岩石组构,这种组构差异导致不同类型的火山岩具有不同的成岩演化,制约了火山岩储层的改造和发育程度,决定了其是否能够最终形成有效储层^[8]。

2.1 流纹岩的成岩阶段与孔隙演化

根据对大量流纹岩铸体薄片的观察和对其中各类成岩作用的特征分析,认为在冷凝阶段,流纹岩中的气泡由于快速冷凝无法逃逸,形成原生气孔(图3a),其孔径大,分布有规律,文献表明这类气孔流纹岩的初始孔隙度可达到20%^[8]。同时,早期的石英和绿泥石等自生矿物充填气孔作用也在逐渐出现(图2a,图3b)。进入热液阶段后,残留气孔中开始充填较多的石英(5%左右)和绿泥石(0.5%左右),孔隙开始减小。在表生阶段,正长石斑晶的高岭土化(图3c)和溶蚀作用发育,也可以形成少量的粒内溶孔,同时也出现石英的次生加大以及基质的碳酸盐化(图3d)。

埋藏成岩阶段的成岩作用以矿物充填、溶蚀和重结晶作用为主。早期埋藏阶段,孔隙损失较大,主要因为石英次生加大和碳酸盐矿物的充填作用(图3e)。对气孔中充填矿物含量统计结果表明,孔隙度由最初的20%能够减低至10%左右(图2a)。进入中、晚埋藏阶段,会出现有机酸的溶蚀,形成溶蚀孔隙(图3f),溶蚀扩大的孔隙含量达到了3%~5%。埋藏成岩阶段晚期,基质还经历了部分重结晶作用(图3g),但重结晶形成的晶间孔贡献较小,因此,流纹岩储层的最终

孔隙度约在8%~13%。

2.2 晶屑凝灰岩的成岩阶段与孔隙演化

与流纹岩相比,晶屑凝灰岩在冷凝阶段形成的原生气孔较少,因此初始孔隙度较低,约为15%。冷凝阶段中可以形成一些矿物炸裂缝(图2b,图3h)。进入热液阶段,气孔中也会充填少量的石英和绿泥石,孔隙略有减少,基质也开始出现高岭石和碳酸盐的交代作用。而且,表生阶段的碳酸盐交代和高岭土化都有所加强。这3个阶段中,储层的孔隙度在不断减小(图2b)。

进入早期埋藏成岩阶段,由于压实作用、碳酸盐的胶结作用和充填作用,孔隙进一步损失。由于各类胶结物的含量约为3%~5%,孔隙度进一步减低至8%左右。进入中、晚期埋藏成岩阶段,由于有机酸和碳酸的溶蚀,晶屑凝灰岩的孔隙度才开始增加。溶蚀作用形成了大量溶孔,包括长石的晶内溶孔(图4a)和基质溶孔(图4b)。晚期重结晶作用不发育,而晚期构造作用形成的构造裂缝也稍稍改善了储层的储集性能。因此,晶屑凝灰岩的孔隙度最终保存至8%~12%(图2b)。

3 溶蚀作用特征及其主控因素

尽管上述两种岩性的成岩阶段和孔隙演化特征有所不同,但在埋藏阶段都经历过较强的溶蚀作用,这对储层孔隙度的改善贡献很大。前人研究表明,溶蚀作用是喷溢相和爆发相火山岩储层中有效储层形成的主要因素^[9-11]。根据对研究区溶蚀作用的详细研究结果,把引起本区溶蚀作用的流体类型划分为有机酸溶蚀和含CO₂酸性水溶蚀两类(图4)。根据两类溶蚀作用发生时期和溶蚀程度的差异,建立了本区的溶蚀作用模式,分析了控制溶蚀作用的主要因素。

3.1 有机酸溶蚀

本区的有机酸溶蚀主要发生中期埋藏成岩阶段,有机酸溶蚀对象为长石斑晶和碳酸盐化的火山基质。有机酸的溶蚀能力远远大于含CO₂酸性水(为其6~350倍^[9]),无论是对碳酸盐还是铝硅酸盐都溶蚀。有机酸溶蚀长石后形成高岭石、自生石英和其他金属阳离子络合物,而有机酸溶蚀碳酸盐矿物后可以形成具有比碳酸钙溶解度大得多的羧酸钙或碳酸氢钙。对本区各类薄片分析认为,凡是出现长石斑晶部分或全部溶蚀、碳酸盐化的火山基质强烈溶蚀的地方都存在有机酸的溶蚀。因为其溶蚀能力较强,因此碳酸盐矿物

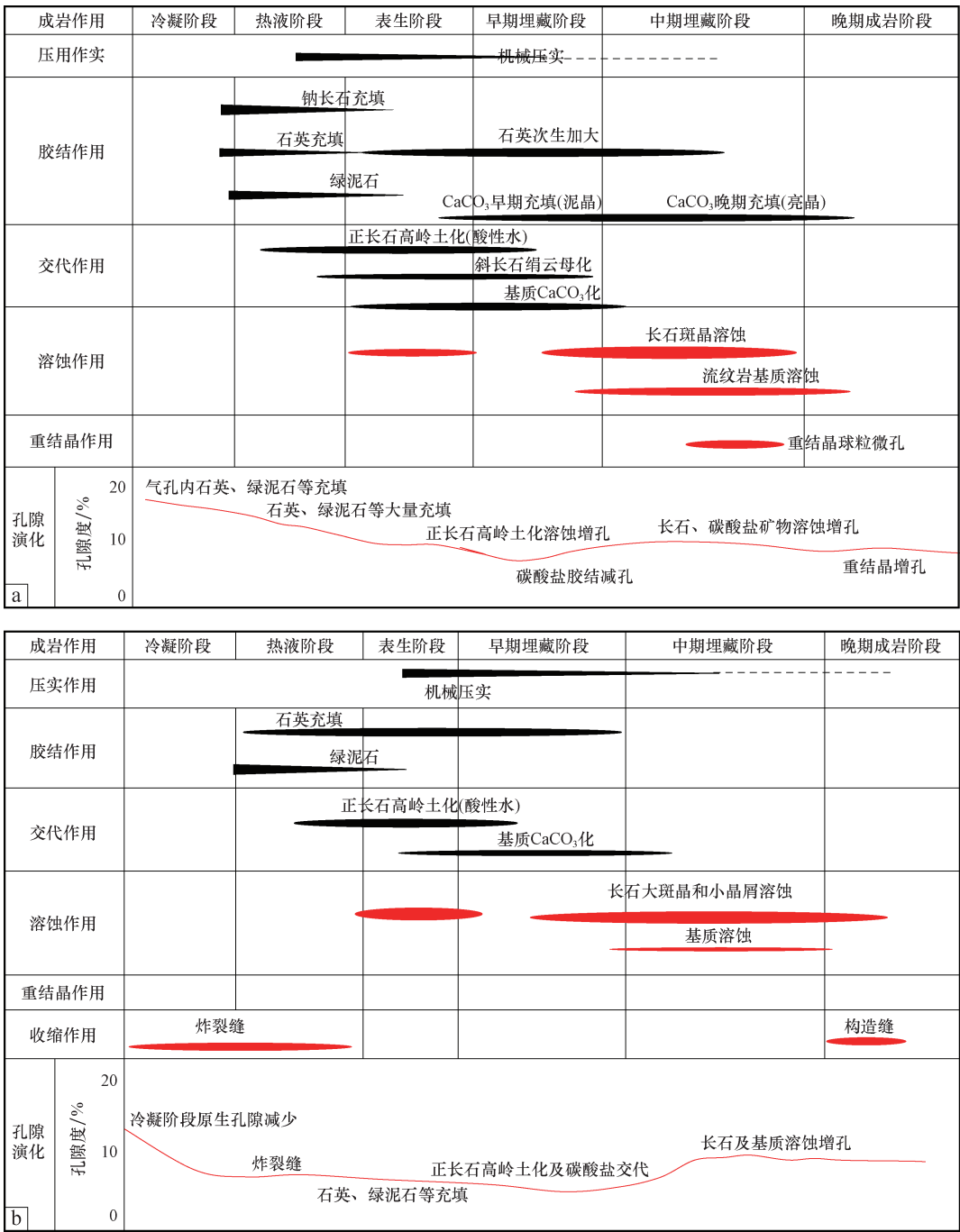


图2 徐家围子断陷营城组流纹岩(a)与晶屑凝灰岩(b)成岩作用阶段与孔隙演化特征

Fig. 2 Diagenetic stages and porosity evolution characterization for rhyolite (a) and crystal tuff (b) in the Yingcheng Formation, Xujiaweizi Fault Depression

全部溶蚀、无残留痕迹、且形成较大的基质溶孔而不是微孔(图4a),而长石溶蚀更是可以形成较大的粒内溶孔和铸模孔(图4b)。

3.2 含CO₂酸性水溶蚀

含CO₂酸性水溶蚀包括岩石在表生阶段暴露在地表状态情况下的含CO₂大气淡水的淋滤溶蚀和中等埋藏条件下有机质成熟和脱羧产生的CO₂以及深

部幔源CO₂酸性水溶蚀。前者主要引起长石斑晶局部或整体高岭土化(图4c),火山灰基质中的长石微晶高岭土化或溶蚀(颗粒细小,比表面大)形成基质微孔。后者溶蚀过程中,火山灰基质(颗粒细小,比表面大)溶蚀强烈形成基质微孔(图4d)。基质长石高岭土化后再被溶蚀形成大面积微孔(长石斑晶高岭土化少)。碳酸盐胶结物晶粒不溶蚀(如果存在有机酸,碳酸盐是难以存在的),交代长石,呈团块分布。

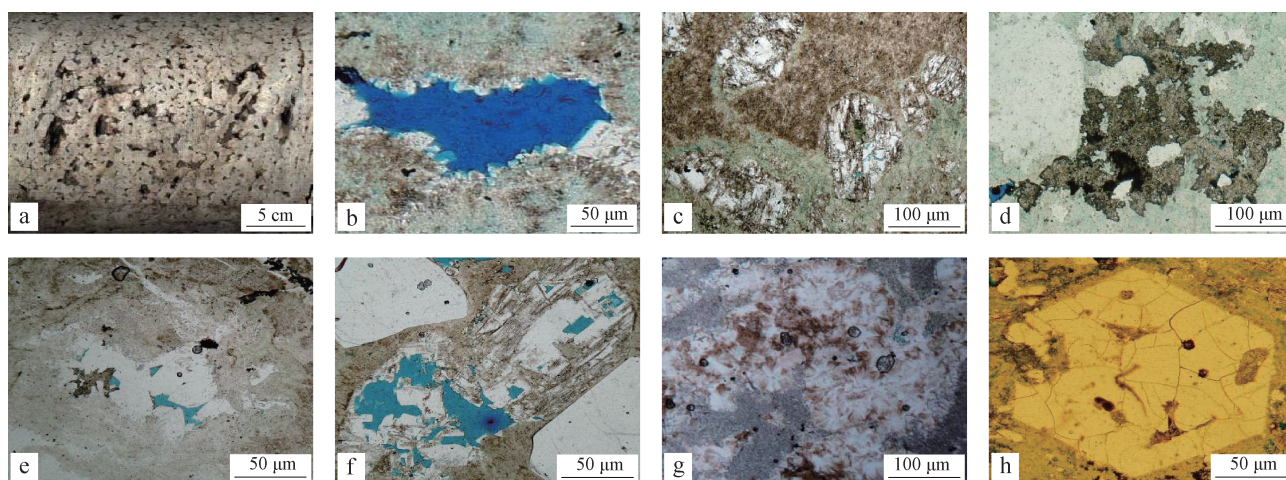
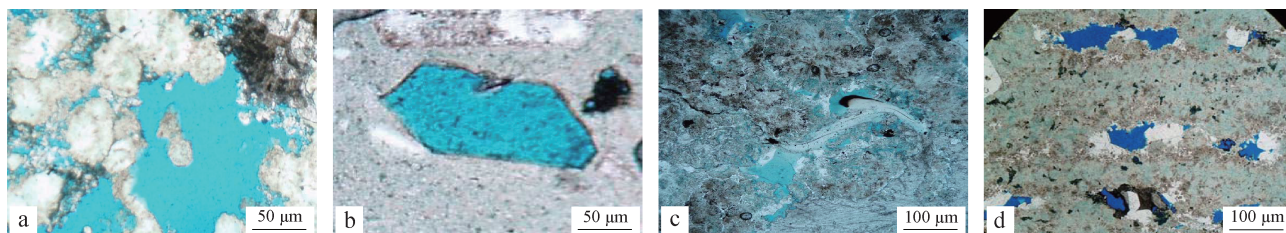


图3 徐家围子断陷营城组流纹岩与晶屑凝灰岩成岩作用特征

Fig. 3 Features for rhyolite and crystal tuff diagenesis in the Yingcheng Formation, Xujiaweizi Fault Depression

a. 徐深9井,埋深3 593.28 m,流纹岩,发育原生气孔构造;b. 徐深9井,埋深3 597.78 m,流纹岩,气孔内的石英充填作用;c. 徐深801井,埋深3 855.99 m,长石颗粒的高岭土化;d. 徐深9井,埋深3 596.25 m,流纹岩,基质碳酸盐化;e. 徐深801井,埋深3 752.83 m,流纹岩,石英次生加大及碳酸盐胶结;f. 徐深801井,埋深3 854.09 m,长石的溶蚀作用;g. 徐深901井,埋深3 860.90 m,流纹岩的重结晶作用;h. 徐深301井,埋深3 949.09 m,石英颗粒的炸裂缝

图4 徐家围子断陷营城组有机酸溶蚀和含CO₂酸性水溶蚀的岩石特征Fig. 4 Lithological characteristics for organic acid dissolution and CO₂-bearing acidulous water dissolution rocks

in the Yingcheng Formation, Xujiaweizi Fault Depression

a. 基质溶蚀形成超大孔隙,徐深901井,埋深3 861.13 m,球流纹质凝灰熔岩;b. 长石斑晶溶蚀形成铸模孔,徐深801井,埋深3 854.09 m,含角砾流纹质晶屑凝灰岩;c. 徐深8-1井,埋深3 696.02 m,凝灰岩,碳酸盐溶蚀;d. 徐深9井,埋深3 597.78 m,球粒流纹岩,表生淋滤造成的长石高岭土化明显顺条带状气孔两侧分布

3.3 溶蚀作用模式

通过比较有机酸和含CO₂酸性水(碳酸)对不同长石和方解石溶蚀作用中的吉布斯自由能(ΔGr)及溶蚀前后固相体积变化(ΔV)^[12-13]认为(表2):①有机酸溶蚀各类矿物所需的吉布斯自由能较低,说明有机酸的溶蚀能力强于碳酸,各类矿物有机酸溶蚀比碳酸溶蚀作用更容易发生;②各类矿物分别在有机酸和碳酸溶蚀作用中的吉布斯自由能也不一样,基性斜长石最小,酸性斜长石和碱性长石略大,方解石居中,因此,可以判断基性斜长石比酸性斜长石和碱性长石更易于溶蚀,方解石居中;③根据各类矿物溶蚀后的体积变化结果来看,碱性长石和酸性斜长石溶蚀后的体积减小更多,因此可以说这类矿物溶蚀后可

以形成较大的次生孔隙,而基性斜长石溶蚀后的体积变化较小。换言之,玄武质和安山质凝灰岩(基性斜长石含量高)比流纹岩易于溶蚀(与薄片观察一致),但溶蚀形成的次生孔隙比流纹岩少(钾长石溶蚀后体积减小最大)。

进一步,根据不同流体类型来源的基本条件和时期分析,结合本区火山岩储层经历的溶蚀作用次序和特征,建立了本区火山岩储层的溶蚀作用模式。两种溶蚀作用出现的时间和持续时间有差异(图5)。火山物质在表生阶段,受大气淡水(含CO₂酸性水)的溶蚀作用,长石溶蚀并高岭土化,产生了部分的溶蚀孔、洞、缝。进入早期浅埋藏作用阶段,受断裂构造影响,火山岩发育大量构造裂缝,作为渗流通道带来少数CO₂酸性水。中等埋藏成岩阶段有机质成熟大量生烃,脱羧

表 2 徐家围子断陷营城组有机酸溶蚀和含 CO₂ 酸性水溶蚀的岩石特征

Table 2 Lithological characteristics for organic acid dissolution and CO₂-bearing acidulous water dissolution rocks in the Yingcheng Formation, Xujiaweizi Fault Depression

溶质	$\Delta V/\%$	溶剂	$\Delta Gr/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$
钾长石	-15.30	H ₂ CO ₃	429.57
		HCOOH	400.26
		CH ₃ COOH	99.35
钠长石	-12.50	H ₂ CO ₃	96.21
		HCOOH	66.15
		CH ₃ COOH	-17.92
钙长石	-1.26	H ₂ CO ₃	-62.80
		HCOOH	-69.08
		CH ₃ COOH	-154.49
方解石	—	H ₂ CO ₃	118.78
		CH ₃ COOH	46.89

产生大量的有机酸和 CO₂。它们与地下水作用形成有机酸和 CO₂ 酸性水,并沿断裂或裂缝及孔隙等运移通道渗流到火山岩体中,溶蚀长石、碳酸盐和火山灰等。此阶段形成了大量的次生孔洞和裂缝,是有效储层形成的重要阶段。深埋藏阶段是生烃后期,有机酸的来源减少,深部幔源 CO₂ 和地下水相互作用形成含 CO₂ 酸性水,可以造成基质中玻璃质微晶的溶蚀。

3.4 溶蚀作用主控因素

原生孔隙系统、断裂与裂缝、火山岩顶底不整合面对溶蚀作用的发生与发育程度起到了关键作用,容易形成酸性流体的运移通道。本区原生孔隙体系是一种重要的酸性流体运移通道,特别是在裂缝不太发育的地区。这种溶蚀比较均匀,颗粒内外与基质均被溶蚀,形成斑晶或岩屑粒内溶孔、基质溶孔(图 4c)。盆地构造运动中形成的断裂可以沟通幔源或地表,作为酸性流体的主要运移通道。在平面上也很容易发现这种规律:靠近断裂的凝灰岩内长石斑晶可以被彻底溶蚀形成铸模孔(图 4b),而远离断裂的凝灰岩溶蚀作用则显得微弱(图 4c),这也说明断裂对于酸性流体运移极为重要。火山活动后期至停止期,火山岩顶部的喷溢相流纹岩多形成原生气孔、冷凝收缩缝和火山角砾粒间孔等^[14-17]。这类储层进入表生阶段,火山岩顶部的大气水淋滤溶蚀强烈,原生储集空间作为酸性流体的运移通道,即在原生储集空间的基础上又可以形成了大量的溶蚀孔、

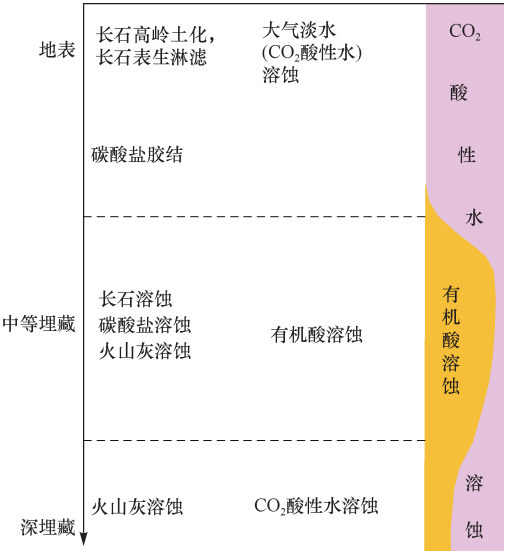


图 5 徐家围子断陷营城组火山岩储层溶蚀作用模式

Fig. 5 Dissolution model for volcanic reservoirs in the Yingcheng Formation, Xujiaweizi Fault Depression

洞、缝。而本区营城组一段和三段火山岩形成后,都曾长期出露地表(营城组二段和四段发育火山岩沉积间断期的砂砾岩沉积),火山岩顶部的沉积间断面可以为酸性流体的运移创造有利条件。沉积间断面附近的各类火山岩中的溶蚀现象常见,如流纹岩中的溶蚀孔隙且长石普遍严重高岭土化,以及晶屑凝灰岩里长石斑晶溶蚀明显等。

4 结论

- 1) 徐家围子断陷火山岩储层的岩石类型包括流纹岩、流纹质角砾熔岩、晶屑凝灰岩、火山角砾岩和熔结凝灰熔岩。储集空间包括原生气孔、残余气孔、长石溶孔、基质溶孔、基质微孔和裂缝。
- 2) 火山岩的形成经历过多期演化阶段(冷凝阶段、热液阶段、表生阶段、早期埋藏、中期埋藏、晚期埋藏)和多种成岩作用(热液充填、胶结、溶蚀、交代、重结晶),流纹岩储层和晶屑凝灰岩储层具有各自的成岩作用特征和孔隙演化规律。
- 3) 本区存在有机酸溶蚀和含 CO₂ 酸性水溶蚀两种类型。前者发生在中等埋藏深度段,后者发生在地表表生成岩阶段和深埋藏成岩阶段。有机酸溶蚀酸性火山岩形成的次生孔隙最发育。原生孔隙发育层段、断裂与裂缝发育区、火山岩顶底不整合面发育层段的溶蚀作用更强烈,是有利的次生孔隙发育层段。

参 考 文 献

- [1] 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 reservoir in sedimentary basins of China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(3): 257–271.
- [2] 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.
- [3] 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): 18–27.
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): 18–27.
- [4] 黄玉龙, 刘春生, 张晶晶, 等. 松辽盆地白垩系火山岩气藏有效储层特征及成因[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(3): 420–428.
Huang Yulong, Liu Chunsheng, Zhang Jingjing, et al. Characteristics and genesis of the effective volcanic gas reservoirs of the Lower Cretaceous, Songliao Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(3): 420–428.
- [5] 韩刚, 张文婧, 任延广, 等. 松辽盆地北部徐家围子断陷火山岩储层成因机制[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(6): 2114–2121.
Han Gang, Zhang Wenjing, Ren Yanguang, et al. Volcanic rock reservoirs methanism in North Songliao Basin Xujiaweizi Fault Depression [J]. Progress in Geophys (in Chinese), 2011, 26(6): 2114–2121.
- [6] 郭振华, 王璞珺, 印长海, 等. 松辽盆地北部火山岩岩相与测井关系研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(2): 207–214.
Guo Zhenhua, Wang Pujun, Yin Changhai, et al. Relationship between lithofacies and logging facies of the volcanic reservoir rocks in Songliao Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2006, 36(2): 207–214.
- [7] 刘成林, 杜蕴华, 高嘉玉, 等. 松辽盆地深层火山岩储层成岩作用与孔隙演化[J]. 岩性油气藏, 2008, 20(4): 33–37.
Liu Chenglin, Du Yunhua, Gao Jiayu, et al. Diagenesis and porosity evolution of deep volcanic reservoirs in Songliao Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2008, 20(4): 33–37.
- [8] 赵澄林, 祝玉衡, 季汉成, 等. 二连盆地储层沉积学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996: 224–226.
Zhao Chenglin, Zhu Yuheng, Ji Hancheng, et al. Reservoir sedimentology in Erlian Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996: 224–226.
- [9] Patricia Sruoga, Nora Rubinstein. Processes controlling porosity and permeability in volcanic reservoirs from the Austral and Neuque'n basins, Argentina [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(1): 115–129.
- [10] 魏翔宇, 高有峰, 魏琴, 等. 蚀变对中性基性火山岩储层的控制作用: 以松辽盆地徐家围子断陷下白垩统营城组为例[J]. 世界地质, 2017, 36(2): 541–551.
Wei Xiangyu, Gao Youfeng, Wei Qin, et al. Controlling of alteration of intermediate and basic volcanic reservoirs: A case study of Lower Cretaceous Yingcheng Formation of Xujiaweizi fault depression, Songliao Basin [J]. Global Geology, 2017, 36(2): 541–551.
- [11] 闫林, 周雪峰, 高涛, 等. 徐深气田兴城开发区火山岩储层次生溶蚀孔隙研究[J]. 天然气工业, 2007, (08): 16–19.
Yan Lin, Zhou Xuefeng, Gao Tao, et al. The secondary dissolution pores in volcanic reservoirs of Xingcheng development area in Xushen gas field [J]. Natural Gas Industry, 2007, (08): 16–19.
- [12] 王传成, 侯贵廷, 李江海, 等. 大庆徐家围子断陷火山岩储集性控制因素分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2008, 44(6): 909–914.
Wang Chuancheng, Hou Guiting, Li Jianghai, et al. Analysis on the control factors of the reservoir capabilities of the volcanic rocks in Xujiaweizi, Daqing [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2008, 44(6): 909–914.
- [13] 李汶国, 张晓鹏, 钟玉梅. 长石砂岩次生溶孔的形成机理[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(2): 220–229.
Li Wenguo, Zhang Xiaopeng, Zhong Yumei. Formation mechanism of secondary dissolved pores in arcose [J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(2): 220–229.
- [14] 向廷生, 蔡春芳, 付华娥. 不同温度、羧酸溶液中长石溶解模拟实验[J]. 沉积学报, 2004, 22(4): 597–602.
Xiang Tingsheng, Cai Chunfang, Fu Hua'e. Dissolution of microcline by carboxylic acids at different temperatures and complexing reaction of al anion with carboxylic acid in aqueous solution [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(4): 597–602.
- [15] 刘为付, 刘双龙, 孙立新. 三塘湖盆地条湖凹陷二叠系安山岩储集层类型及参数特征[J]. 新疆石油地质, 2000, 21(6): 483–486.
Liu Weifu, Liu Shuanglong, Sunlixin. Type and characteristics of permian andesite reservoir in Tiaohu Sag, Santanghu Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2000, 21(6): 483–486.
- [16] 陈树民, 蒋传金, 刘立, 等. 松辽盆地徐家围子断陷火山岩裂缝形成机理[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2014, 44(6): 1816–1826.
Chen Shumin, Jiang Chuanjin, Lili, et al. Fracture formation mechanism of volcanic rocks in Xujiaweizi Fault Depression of Songliao Basin [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2014, 44(6): 1816–1826.
- [17] 付广, 胡明, 韩莹. 断裂对断陷盆地火山岩天然气的成藏与控制作用—以松辽盆地徐家围子断陷为例[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2012, 42(1): 1–8.
Fu Guang, Hu Ming, Han Ying. Controlling of faults to gas accumulation of volcanic rock in depression basin: An example from Xujiaweizi Depression of Songliao Basin [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2012, 42(1): 1–8.