

松辽盆地营城组中基性火山岩储层特征及成储机理^{*}

黄玉龙¹ 王璞珺^{1**} 舒萍² 张彦玲¹

HUANG YuLong¹, WANG PuJun^{1**}, SHU Ping² and ZHANG YanLing¹

1. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061

2. 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 大庆 163712

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

2. Exploration and Development Institute of Daqing Oilfield Company Ltd., Daqing 163712, China

2009-07-08 收稿, 2009-11-08 改回.

Huang YL, Wang PJ, Shu P and Zhang YL. 2010. Characteristics and formation mechanism of the Cretaceous intermediate and mafic volcanic reservoirs in Songliao Basin, NE China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(1):82–92

Abstract Numerous intermediate and mafic volcanic rocks of the Cretaceous Yingcheng Formation (K_1y) are revealed by drill holes in Anda-Wangjiatun area of northern Songliao Basin and have been yielding commercial gas productions. Eight lithology types are indicated by alkali versus silica (TAS) diagram and they are further categorized to six reservoir rock types. Basalt and trachyte provided the most of effective reservoirs that amount to over 80% of the total. This paper summarizes four categories and eleven subcategories of reservoir spaces and their characteristics, considering that primary pore spaces and fractures are determined by volcanic eruption types and emplacing environment while their distribution was controlled by volcanic facies, and secondary porosity and permeability are effected by in-filling, dissolution, weathering, leaching and tectonic fracturing. Cooling units which are composed of single or several lava flow units have better reservoir properties in the top and bottom due to primary porosity distributions. Each of the cooling units behaves as a relatively independent reservoir unit. Favorable reservoirs are developed in the upper part of volcanic sequences, near vent facies and proximal facies as well as adjacencies to faults. Basaltic lava is characterized as widely extended with length of 10 to 22km and thin layered with thickness of 7 to 39m for each reservoir unit, which indicates that petroleum exploration in basalt should firstly aim at the reservoir unit on top of volcanic sequences. Comparatively, trachytic lava is featured with short extension (3.1 to 6.3km) and thick layered (100 to 200m), so that exploration should tend to look for reservoir rock bodies with favorable source and seal conditions.

Key words Songliao Basin; Cretaceous Yingcheng Formation; Intermediate and mafic volcanic rock; Reservoir space; Porosity and permeability; Reservoir unit

摘要 松辽盆地北部安达-汪家屯地区钻井大量揭示营城组中基性火山岩,并在其中获得了工业气流。TAS图解可划分出8种岩性,储层研究中归纳为6大类岩石类型,逾80%的有效储层分布于玄武岩和粗面岩之中。总结了4类11种储集空间类型及其特征,原生储集空间类型由喷发方式和喷发环境决定、其分布受火山岩岩相控制,次生储集空间发育程度受充填作用、溶解作用、风化淋滤作用和构造作用等影响。熔岩冷凝单元由单个或多个岩流单元组成、储层发育于其顶部和上部,每个冷凝单元构成相对独立的储层单元。火山岩旋回和期次顶部、近火山口和近源相带、靠近断裂等位置是储层发育的有利部位。玄武岩具有延伸范围广(10~22km)、储层厚度小(7~39m)等特点,储层勘探应优先寻找位于火山岩旋回和期次顶部的储层单元;粗面岩延伸范围小(3.1~6.3km)、储层厚度大(100~200m),储层勘探应以寻找具备有利烃源和盖层条件的储集岩体为目标。

关键词 松辽盆地;白垩系营城组;中基性火山岩;储集空间;储层物性;储层单元

中图法分类号 P618.13

^{*} 本文受国家“973”项目(2009CB219303和2007CB209507)资助。

第一作者简介: 黄玉龙,男,1982年生,博士研究生,矿产普查与勘探专业,E-mail: hyl1982@yahoo.cn

**** 通讯作者:** 王璞珺,男,1959年生,博士、教授,博士生导师,从事盆地火山岩和油气地质勘查研究与教学,E-mail: wangpj@jlu.edu.cn

1 引言

在全球已发现的火成岩油气藏中,总计约50%的油气产于中基性火山岩储层中(玄武岩30%、安山岩18%和粗面岩5%)(Petford and McCaffrey, 2003; Schutter, 2003)。在2002年松辽盆地庆深大气田火山岩气藏勘探取得突破之前,国内绝大部分火山岩油气藏发现于新生界和古生界的中基性火山岩之中(邹才能等, 2008; Huang *et al.*, 2009)。典型中基性火山岩油气藏有:四川盆地川西地区周公山构造上二叠统玄武岩气藏(黄籍中和苟学敏, 1994; 宋文海和庞家黎, 1994),三塘湖盆地上石炭统玄武岩油气藏(熊琦华等, 1998; 刘为付等, 2000),准噶尔盆地上石炭-下二叠统火山岩油气藏(王仁冲等, 2008; 李军等, 2008),渤海湾盆地古近纪玄武岩和粗面岩油藏(操应长等, 1999; 罗静兰和张成立, 2002)以及苏北盆地古近纪玄武岩油藏(陶奎元等, 1998; 冀国盛等, 2002)等。上述表明,中基性火山岩无疑可以成为油气聚集的优良储集体。然而,松辽盆地内以往钻井揭示和气藏产出的火山岩绝大多数是以流纹岩和流纹质熔结凝灰岩为代表的酸性火山岩(王璞珺等, 2003; Feng, 2008),而中基性火山岩由于钻井揭示相对较少、分布局限、产能偏低,曾一度引起困惑并且未受重视。

松辽盆地中基性火山岩发育于断陷层的火石岭组和营城组(Wang *et al.*, 2002),亦见于拗陷层的青山口组(王璞珺等, 2009),储层主要发育于营城组。营城组中基性火山岩在盆缘剖面有详细描述(贾军涛等, 2007; 闵飞琼等, 2007),而对于断陷内钻遇的营城组中基性火山岩的储层特征仅在论述酸性火山岩储层时有所提及(蒙启安等, 2002; 冯子辉, 2008)。近年来,越来越多的钻井揭示储层主体岩性为中基性火山岩,尤其在安达-汪家屯地区,中基性火山岩储层中产出的天然气量占深层产能总量的60%左右,而此时在储集性能、储层特征和发育规律等方面的地质认识已凸现不足,加强针对性的基础研究显得十分必要。

在前面提到的国内其它盆地中,构成储层的中基性火山岩形成于古生界和新生界、储油为主,而松辽盆地中基性火山岩形成于中生界、储气为主,各个盆地在盆地性质和火山岩形成的构造背景等方面也具有差异性,因而火山岩储层的形成和改造过程势必会有所不同。因此,本文在研究过程中,一方面借鉴了国内学者在其它盆地中针对中基性火山岩储层实例的研究思路和工作方法,另一方面侧重研究区的实际情况,通过开展钻井岩心观察描述,运用偏光显微镜进行常规和铸体薄片观察和描述,对关键钻井采样进行电子探针和全岩分析,进而总结了中基性火山岩岩石类型和分布,阐述了储集空间类型、特征和成因,结合岩心孔渗测试和钻井试气结果分析了储层物性特征和有效储层,探讨了中基性火山岩储层的发育规律。

2 中基性火山岩特征

中基性火山岩在松辽盆地北部徐家围子断陷全区均有钻井揭示,主要集中在断陷北部安达-汪家屯地区。火山岩归属下白垩统营城组(勘探上目前划归营城组三段 K_1y^3), K-Ar 法测年结果为 $131.3 \pm 5.9\text{Ma}$ 、 $133.5 \pm 6.1\text{Ma}$ (黄清华等, 1999)。目前共有20口井钻遇中基性火山岩,埋藏深度2950~3750m,揭示总厚度4317m,单井揭示厚度为15~550m。

2.1 火山岩平面分布

区内发育一系列北西向和北北东向(部分为近南北向)的断层,控制了火山岩和火山喷发中心的分布(图1)。火山岩主要由受断裂控制的中心式喷发形成,玄武岩分布面积广、占据研究区面积的2/3以上,安山岩以共生形式局部发育于玄武岩之上;粗面岩沿北西向断裂局部发育,分布范围相对较小,形成时间晚于玄武岩。研究区南部以流纹岩为主,在SS井区玄武岩与流纹岩叠加,形成双峰式火山岩组合。

2.2 岩石学特征

对收集整理和本次测试的49个常量元素分析数据进行TAS图解投点(图2),结果显示中基性火山岩包含碱玄岩、粗面玄武岩、玄武粗安岩、粗安岩、粗面岩、玄武岩、玄武安山岩和安山岩,共计8种岩性。然而,岩心录井和测井划分中基性火山岩时尚达不到化学分类的精度,仅能区分出玄武岩、玄武安山岩、安山岩、粗面岩4种成分类型的熔岩,与凝灰岩和火山角砾岩构成6种主要储层岩石类型,具体描述如下:

玄武岩类:包含TAS图解中的碱玄岩、粗面玄武岩和玄武岩,是发育厚度最大、分布面积最广的岩石类型。灰黑色、深灰色、灰绿色,具斑状结构和玻基斑状结构,斑晶为斜长石、透长石、辉石和橄榄石。基质呈间粒结构和间隐结构,常见气孔构造、杏仁构造和块状构造。

玄武安山岩类:包含玄武粗安岩和玄武安山岩,是介于玄武岩和安山岩之间的过渡类型,岩石特征同玄武岩或安山岩。

安山岩类:包含粗安岩和安山岩,深灰色、灰色、浅灰色、灰绿色,具斑状结构,基质常见交织结构和玻晶交织结构;具气孔-杏仁构造和块状构造,熔岩流顶部可见自碎角砾结构。主要是与玄武岩共生,发育于玄武岩上部。

粗面岩:灰色、褐灰色,斑状结构,基质常见粗面结构,主要为透长石和钠长石;具气孔构造、块状构造和流动构造。粗面岩的原生孔缝呈未充填-半充填、极少被全充填,充填矿物主要为石英和方解石。

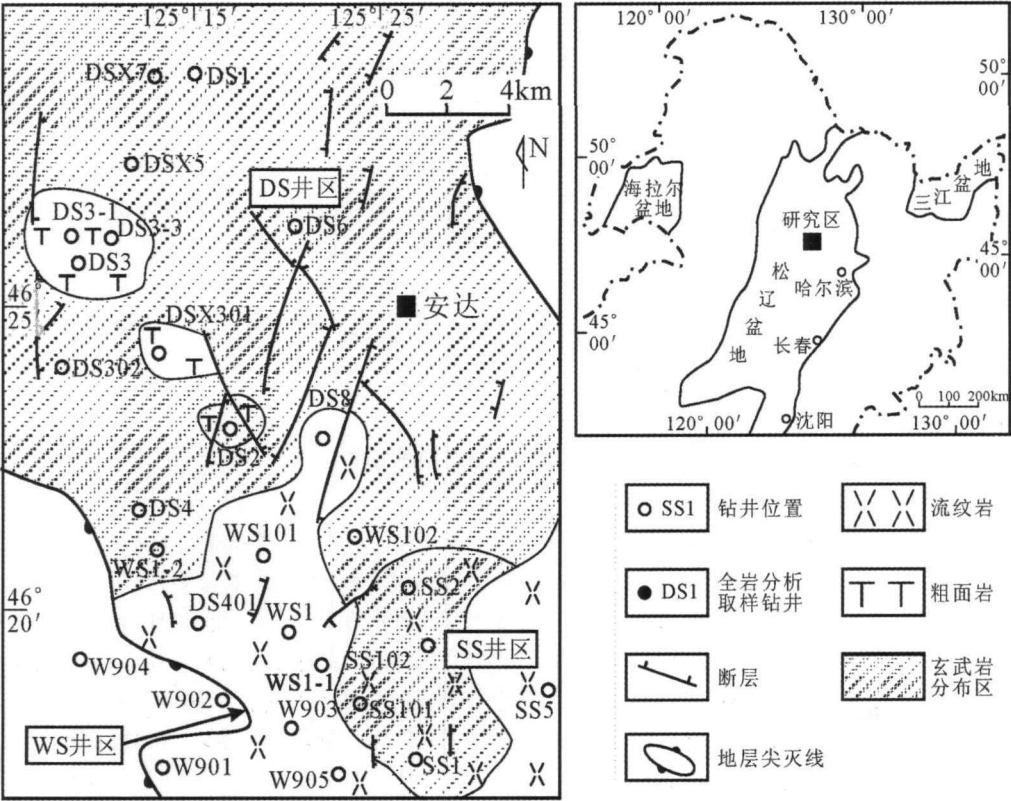


图1 研究区平面位置与火山岩分布简图

Fig. 1 Sketch map showing the location of study area and distribution of volcanic rocks

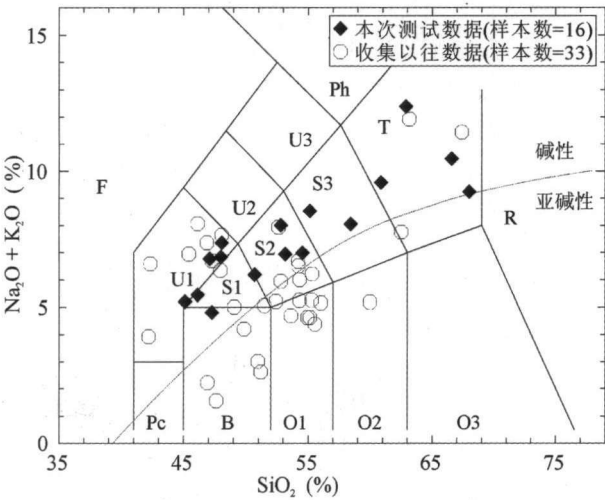


图2 安达-汪家屯地区营城组中基性火山岩 TAS 图解 (据 Le Maitre et al., 1989, fig. B13)

① 本次测试数据在吉林大学测试科学实验中心完成;② 收集的以往数据来源于大庆油田有限责任公司勘探开发研究院实验分析报告(2003~2005年);③ 测试样品均来自于安达-汪家屯地区深层钻井岩心(井深3000m左右)

Fig. 2 Chemical classification of the Cretaceous volcanic rocks in AW area of Songliao Basin using the total alkali versus silica (TAS) diagram (after Le Maitre et al., 1989, Fig. B13)

凝灰岩:颜色杂乱,以暗色为主;凝灰结构,含岩屑和晶屑,岩屑见有玄武岩、安山岩和少量流纹岩,晶屑主要为斜长石和辉石,主要为粗面质、安山质、玄武质凝灰岩;中厚层状、形成于火山喷发初期,或呈薄夹层状发育于熔岩之间。

火山角砾岩:颜色杂乱,以暗色为主;角砾成分较杂,主要有玄武岩、安山岩、粗面岩和流纹岩,其次为变质岩和沉积岩,综合定名为安山质、英安质角砾岩。

对安达-汪家屯地区20口钻井揭示的中基性火山岩岩石类型及其厚度统计的结果显示(图3),熔岩厚度比例大(合计78%),包括玄武岩、玄武安山岩、安山岩和粗面岩;火山碎屑岩仅占22%,包括中基性火山角砾岩和凝灰岩。

3 中基性火山岩储层特征和有效储层

3.1 储集空间类型、特征与成因

通过20口钻井岩心观察和薄片鉴定,结合电子探针等分析手段,总结出中基性火山岩储层发育的4类11种储集空间类型及其基本特征(表1)。

原生孔隙 中基性火山岩的原生孔隙包括原生气孔、粒间孔和晶间孔。

原生气孔广泛发育于中基性熔岩中(图版1,2),在火山角砾岩的角砾内部也比较常见,面孔率可达25%左右。气孔多呈圆状、椭圆状、拉长扁平状(位于岩流底部)和不规则状

表 1 安达-汪家屯地区中基性火山岩储集空间类型和特征

Table 1 Classification and characteristics of reservoir spaces of intermediate and mafic volcanic rocks in the study area

储集空间类型	成因	特征	分布
原生气孔	岩浆达到地表后因压力降低,所含挥发分逸出而形成的孔洞	圆状、拉长状、不规则状,半充填-全充填,部分为不连通的独立孔	冷凝单元上部和底部、火山角砾内部
原生孔隙	晶间孔 长石晶体格架间孔隙未被铁镁矿物和火山玻璃充填	常充填次生矿物构成似杏仁体,经溶解作用可形成有效孔隙	冷凝单元中部
	粒间孔 火山碎屑颗粒间经过压实固结成岩后所形成的孔隙	形态不规则,受碎屑粒度和分选程度影响	凝灰岩、火山角砾岩
原生裂缝	收缩缝 岩浆冷凝固晶过程中快速冷却或脱水形成	宽度和形态均不规则,张裂缝	熔岩中广泛发育,中部居多,顶、底部次之
	碎裂缝 因压力骤增或骤降、淬火冷却或拉伸及重力作用等造成矿物或岩石的破碎	碎块(屑)间位移不大,同一视域范围内可拼接复原	火山口-近火山口部位,熔岩流顶、底部及边缘相
次生孔隙	晶体溶蚀孔 斑晶(或晶屑)在酸性流体作用下部分或全部溶解形成	主要为长石溶孔,溶解作用首先沿解理缝和晶体边缘发生	裂缝发育部位、渗透性能好的火山岩中
	基质溶蚀孔 组成基质的微晶或玻璃质被溶解直接形成,或基质先期蚀变形成的次生矿物进一步溶解形成	呈细小的筛孔状,通常晚于斑晶(或晶屑)溶解作用发生	裂缝发育部位、渗透性能好的火山岩中
	杏仁体溶孔 孔隙中充填的铝硅酸盐和碳酸盐矿物经溶解作用形成	杏仁孔有裂隙连通,溶孔分布不均匀,首先沿杏仁孔边缘和充填矿物的解理发生溶解	裂缝发育部位、孔缝连通性好的熔岩
次生裂缝	构造裂缝 岩石在构造应力作用下发生破碎形成	产状近直立或高角度,边缘规则,张裂缝,延续性好	致密熔岩,邻近断裂的火山岩体中常见
	风化裂缝 原生裂缝因表生作用发生破坏并进一步扩大	形态不规则的张裂缝,多呈倒灌脉状充填	火山岩旋回、期次顶部(火山作用间歇期)
	溶蚀缝 在流体作用下,沿裂缝边缘发生矿物溶解或裂缝充填物的再次溶解	延展方向上缝宽不一,具有不规则溶蚀边缘	原生裂缝发育的岩石中常见

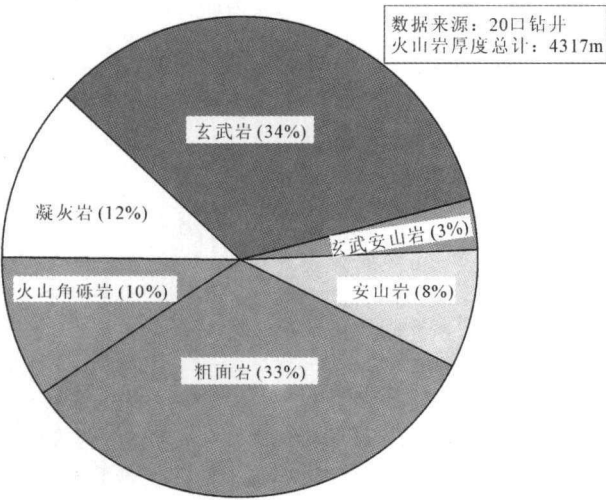


图 3 安达-汪家屯地区中基性火山岩钻井揭示类型及厚度比例

Fig. 3 Pie chart showing six categories of intermediate and mafic volcanic reservoir rocks and their proportion according to 20 boreholes with volcanic thickness amounts to 4317m

(多位于岩流上部);部分气孔由裂缝连通呈串珠状,多数未连通而呈孤立状。

晶间孔是全晶质或半晶质火山岩的矿物晶体之间未被充填的孔隙。晶间孔常被后期热液蚀变产生的石英、方解石和绿泥石等充填,形成似杏仁体(图版3)。

粒间孔是火山碎屑岩的碎屑颗粒之间经过压实固结成岩后所形成的残留孔隙(图版4)。火山碎屑岩的孔隙度测试结果显示,粒间孔的发育程度与火山碎屑的粒度和分选程度有关:火山角砾岩的孔隙度明显高于凝灰岩,角砾凝灰岩由于角砾间孔隙被凝灰质颗粒充填、孔隙度通常很小(仅为2%左右)。

原生裂缝 包含固结成岩过程中形成的各类收缩缝和碎裂缝。

收缩缝是岩浆冷凝固晶过程中形成的张裂缝,包括熔岩流顶部的表壳收缩缝(图版2),厚层熔岩流中、下部发育的节理缝(图版5),以及熔岩流之间的层间缝。收缩缝有利于增加原生孔隙的连通性,同时也是后期溶解作用所需流体进入和次生矿物带出的主要通道。

碎裂缝包括炸裂缝、淬火缝和自碎缝。炸裂缝是由于挥

发分在次火山岩体的某一部位聚集,造成局部压力剧增而发生隐蔽爆炸,或到达地表的岩浆由于压力突然释放而产生的矿物晶体炸裂缝(图版6),以及岩浆期后原岩在高压热液流体作用下形成的隐爆角砾缝(图版7)。淬火缝是熔岩流进入地表水体或接触含水沉积物,迅速淬火冷却发生碎裂而形成,主要分布于岩流单元的下部。自碎缝是由于熔岩流表壳与内部冷却速率存在差异,先凝固结的表壳受下部岩流的扭张作用或自身重力作用下破碎形成,大多分布在熔岩流顶部和边缘相带。

次生孔隙 由矿物的溶解作用所形成的各类溶蚀孔,包括斑晶/晶屑溶蚀孔(图版8,9)、基质溶蚀孔(图版9)和杏仁体溶孔(图版10)。溶解作用首先沿矿物的解理缝、杏仁体的边缘(或气孔壁)发生。

次生裂缝 主要指构造作用、风化作用和溶解作用所形成的新生裂缝和对原生裂缝的叠加改造。

构造裂缝的形成与岩石的力学性质密切相关,其中杨氏模量越大,岩石越不容易发生形变,表现为在构造应力作用下越容易发生破碎。从测井获取的数据来看,致密火山岩杨氏模量明显高于多孔火山岩和火山碎屑岩,岩心上见到构造裂缝在岩流中部致密带最为发育,大多为充填程度较低的张裂缝(图版5)。

火山岩在暴露地表的过程中,原生裂缝在地表水、大气和温差等因素的作用下发生破坏并进一步扩大形成风化裂缝。在露头区可见玄武岩表面的原生裂缝经受长期风化淋滤作用后所形成的裂缝宽度显著增大,如五大连池第四纪玄武岩所见风化裂缝宽达1m左右。尽管垂向的宏观裂缝在后期难以避免会被风化产物和沉积碎屑所充填(图版11),从而难以保存下来;而近水平方向上的风化裂隙可改善孔隙之间的连通性,具体表现在熔岩流顶部,火山岩的基质水平渗透率大多高于垂向的。

在酸性流体参与作用下,沿裂缝边缘发生矿物的溶解作用,使得原有裂缝进一步扩大。由于溶解作用程度的差异,沿裂缝延伸方向缝宽大小不一,常具有不规则溶蚀边缘(图版10),并且在裂缝交叉部位易形成溶蚀孔洞(图版12)。

3.2 储层物性与有效储层

利用 CoreDBMS 岩心图像分析软件对中基性火山熔岩进行了面孔率统计分析,并对相应位置的样品进行孔隙度测试得到其有效孔隙度,然后将两种方法所得出的分析结果进行对比分析。从图4中可以看出,实测孔隙度与面孔率分析结果整体相关性较差,样品分布具有4个不同的区带:I区样品原生气孔发育,测试孔隙度与面孔率值都比较大,两者呈正相关;II区和III区样品的气孔含量均小于5%,不同的是II区样品实测孔隙度高达10%~20%,而III区样品则不足5%,通过样品手标本观察发现II区样品裂缝发育,而III区样品大都呈致密块状、气孔和裂缝均不发育。IV区样品测试孔隙度与面孔率比值为2.8~4.2,样品表面见少量孤立气孔,

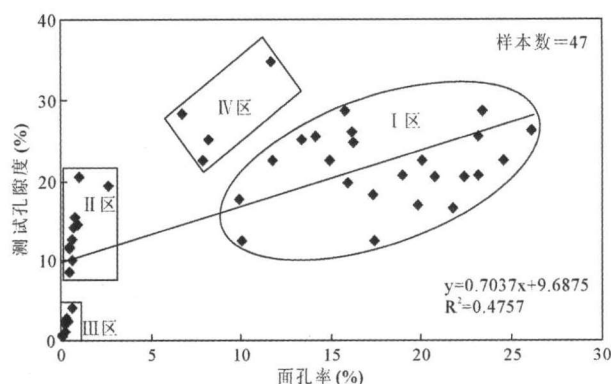


图4 中基性火山熔岩面孔率与实测孔隙度对应关系

Fig. 4 Correlation between porosity calculated by image analyses and core determination of intermedial and mafic volcanic lava rocks

发育近直立构造裂缝和不规则炸裂缝。由此可见,中基性火山熔岩的孔隙度在很大程度上受控于原生气孔和裂缝的发育程度。

中基性火山岩储层总体上属于中-低孔、低渗透储层类型①。5类储集岩中,火山角砾岩的孔隙度和渗透率最大,安山岩次之,但两者分布局限,在有效储层中所占比例小;玄武岩和粗面岩尽管总体上属于低孔、低渗储层,但其分布规模大、局部发育宏观孔缝,是构成有效储层的主体(表2)。

对20口钻井中基性火山岩井段储层流体性质解释资料统计分析,结果表明超过80%的有效储层分布在玄武岩和粗面岩中,安山岩、火山角砾岩和凝灰岩中仅占不到20%(表2)。从试气结果看,玄武岩和粗面岩的天然气产能总量占85%,与有效储层的分布比例基本一致。粗面岩产能总量和单井平均产能(大于80000m³/d)均为最高,尤其钻遇粗面岩的4口井均获得了工业气流;玄武岩的单井平均产能相对较低,目前产能难以取得突破,单井最高产能仅略高于工业气层界限值(40000m³/d)。

4 中基性火山岩储层发育规律

上述表明,中基性火山岩储层在空间分布上具有较强的非均质性,其储集性能主要取决于两方面因素:首先是原始火山岩储集体的分布,主要指受控于岩浆成分和喷发方式的不同所形成的原生储集空间的分布和储集体的规模;其次是岩浆期后的成岩作用对储层的改造,不仅包括对原生储集空间的改造,更重要的是决定了次生孔隙的发育程度和储集空间的有效性。

① 参照中华人民共和国石油天然气行业标准 SY/T 5830—93,1994年实施

表2 中基性火山岩岩性与物性和有效储层分布的对应关系

Table 2 Porosity, permeability and productivity according to lithology

岩性	孔隙度 (%)		渗透率 ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)		有效储层 分布比例	试气产能 ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	
	算术均值	分布范围	几何均值	分布范围		总量	单井平均
玄武岩	4.7	2.0 ~ 6.0	0.12	0.01 ~ 1.00	30%	173122	17312
安山岩	8.3	4.0 ~ 14.0	0.06	0.01 ~ 1.00	5%	21443	21443
粗面岩	5.0	4.0 ~ 7.0	0.02	0.01 ~ 0.04	52%	330753	82688
火山角砾岩	17.7	14.0 ~ 20.0	0.80	0.20 ~ 1.50	6%	56017	56017
凝灰岩	5.2	2.0 ~ 7.0	0.13	0.01 ~ 0.70	7%	8382	8382

注:孔隙度和渗透率统计数据样本 = 153 个;试气产能数据来源于 16 口钻井

4.1 原生储集空间分布

营城组中基性火山岩由陆上喷发形成,火山作用以喷溢方式为主,原生储集空间发育程度和类型组合与其纵向上在熔岩流内部所处位置相关。中基性火山熔岩由多期喷发的岩流叠加形成,单个岩流单元由下而上由上部厚层气孔带、中部厚层致密带和下部薄层气孔带 3 个部分组成 (Walker, 1993),原生孔隙和裂缝在不同分带的发育情况有着显著差别。岩流单元上部原生储集空间最为发育,以原生气孔、表壳收缩缝和自碎缝组合为主;中部以晶间孔和节理缝组合为主,气孔少见;下部组合为原生气孔、晶间孔和淬火缝。此外,爆发作用形成火山角砾岩和凝灰岩,火山角砾岩的原生储集空间组合为角砾间孔隙和角砾内原生气孔(和晶间孔),凝灰岩中仅发育粒间孔。

玄武岩岩流单元内部分带性表现的尤为明显:上部气孔含量为 10% ~ 25%、裂缝面孔率为 0.2% ~ 16%,中部气孔含量为 0.4% ~ 4%、裂缝面孔率为 4% ~ 22%,下部气孔含量为 6% ~ 12%、裂缝面孔率为 1% ~ 6%,三者厚度比例约为 4 : 5 : 1。

4.2 次生孔隙发育的影响因素

充填作用 手标本和显微镜下观察发现,中基性火山岩中普遍发育杏仁构造(图版 2, 10),裂缝充填现象也很常见(图版 5, 7, 11),孔缝以半充填—全充填居多,充填方式有单一充填、也有多期充填,充填矿物主要有皂石、绿泥石、沸石、方解石和石英。充填作用使储集性能变差,减少有效孔隙度并降低储层渗透性能。统计出储集空间因被充填而减少的部分可达 70% 以上(如图版 2 玄武岩气孔面孔率为 19.6%,而实测有效孔隙度仅为 4.5%)。

溶解作用 主要表现为物质的带出过程,形成的溶蚀孔缝可以有效改善储集性能,在本区起主导作用的是长石溶孔(图版 8, 9)和杏仁体溶孔(图版 10)。碱性火山岩对溶解作用尤为敏感,是该类火山岩可能形成优质储集层的决定因素(雷天柱等, 2008)。研究区中基性火山岩中碱性岩占有较大比例,相对钙碱性岩而言,含有较多的强活动性碱金属离

子 K^+ 、 Na^+ ,在酸性环境下碱性长石极易发生溶蚀。此外,斜长石的选择性溶蚀(赵海玲等, 2009)的结果是钙长石被溶解,钠长石被保留下来,同时产生长石溶孔。通过电子探针分析发现本区高产气层段的中基性火山岩中几乎完全缺失中基性斜长石,而以大量纯净的钠长石 ($\text{Ab} > 98 \text{ mole\%}$) 为主,可见长石的次生变化对于能否形成有利储层具有重要影响。

风化淋滤作用 风化淋滤作用不仅可以使岩石破碎,也可以使岩石的化学成分发生显著变化(如溶解、水解等),从而既增加了岩石孔隙度,也促进了原生孔隙之间的连通性;表现为火山岩序列顶部孔缝连通性好、成储几率加大。风化淋滤作用对玄武岩储层的改善作用尤为明显,在准噶尔和三塘湖盆地玄武岩风化壳型储层已成为寻找油气的有利目标(张年富等, 1998; 李森明等, 2007)。在安达-汪家屯地区,玄武岩喷发的多期性决定其受风化淋滤作用改造更为强烈,火山岩旋回和期次的顶部成为储层发育的有利部位。

构造作用 研究区火山机构总体上沿断裂分布,火山口-近火山口部位受构造活动影响最大,形成的构造裂缝最为发育。构造裂缝不仅是一种重要的储集空间类型,同时也是深部酸性流体和油气运移的主要通道,从而成为深层火山岩成储、成藏的重要因素。尤其对玄武岩而言,多期喷发形成的每个岩流单元都是一个相对独立的储渗单元,远离断裂或火山机构中心的部位,有效储层通常仅发育在喷发旋回的顶部,厚度小于 40m;而在靠近断裂或火山机构中心的部位,纵向上相邻的各个储渗单元经垂向裂缝连通,可以形成整体的、厚度达 140m 的储集体。

4.3 中基性火山岩储层形成机理

4.3.1 储渗单元

中基性火山熔岩由多期喷发的岩流叠加形成,多个岩流快速叠加时作为一个整体凝固结形成冷凝单元(即复合流动单元, Walker, 1972),整体上其内部分带性与单个岩流单元一致。每一个冷凝单元都是一个相对独立的层状储集体(可类比为碎屑岩的储层流动单元)。玄武岩冷凝单元的多期性和内部分带性尤为明显,钻探揭示单井发育 6 ~ 12 个冷

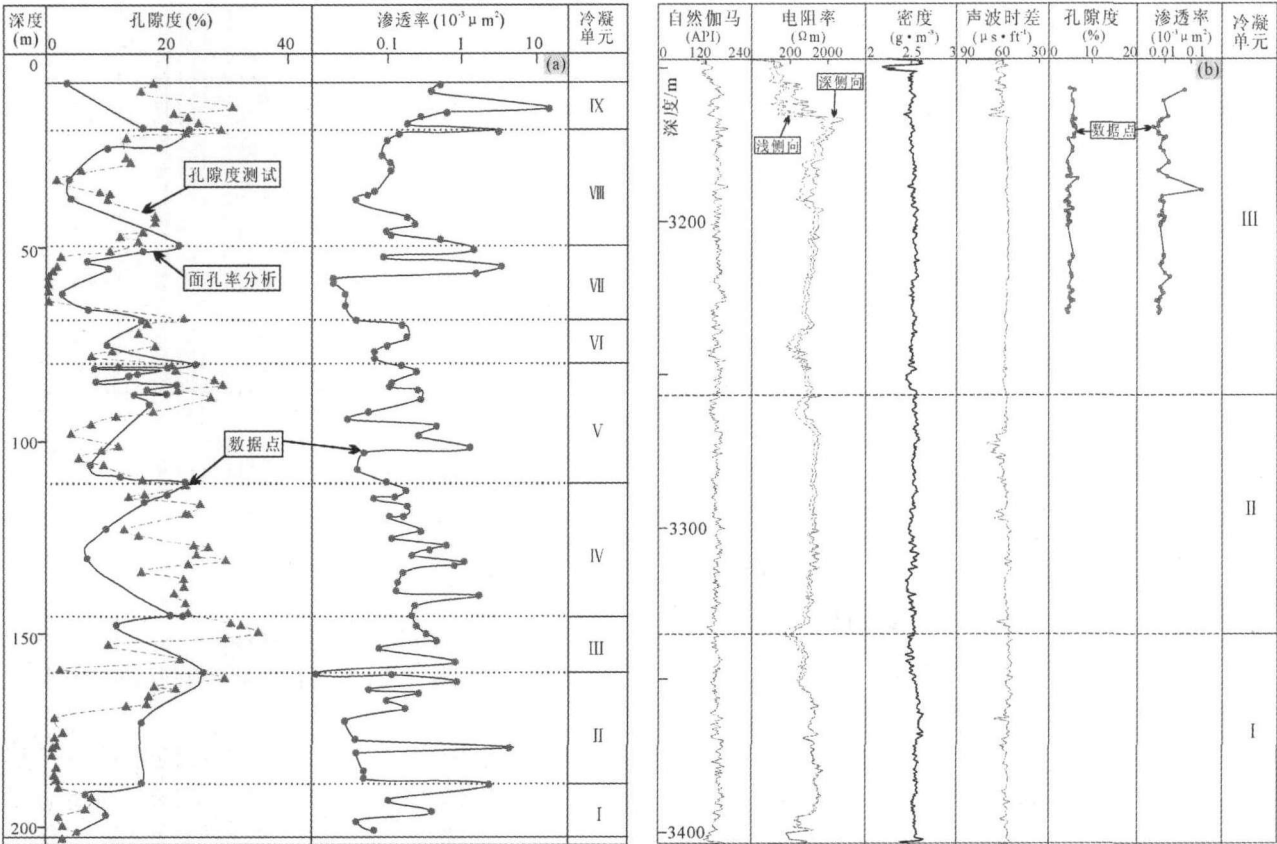


图5 钻井揭示玄武岩(a)和粗面岩(b)储集物性的垂向变化特征
Fig. 5 Profiles showing vertical change characteristics of porosity and permeability according to basalt (a) and trachyte (b) by respective borehole with continuous drill cores

凝单元,单层平均厚度 16m;储层有效厚度为 7 ~ 39m,占熔岩总厚度的 6% ~ 23%。粗面岩主要以集中喷溢/侵出方式形成短而厚的熔岩流(或熔岩穹),由于喷发间歇时间很短或无明显间断,单井仅揭示 1 ~ 3 个冷凝单元,其内部孔、渗垂向变化差异小,均质性相对强,形成的储集体厚度大,储层发育厚度可达 100 ~ 200m,占熔岩流总厚度的 45% ~ 60%。

图 5a 为剖面钻井营三 D1 井,8.0 ~ 205.7m 为玄武岩,总厚度 197.7m,可划分出 9 个冷凝单元,单层平均厚度约 22m,面孔率分析点 44 个,常规物性分析点 97 个;可以看出,面孔率与实测孔隙度具有较好的对应关系,冷凝单元顶部和底部具有高孔隙度,中部孔隙度(尤其面孔率)值偏低、而渗透率相对较大。图 5b 为盆内深层钻井 DS3-1 井,3148 ~ 3404m 钻遇粗面岩,总厚度 256m,划分 3 个冷凝单元,单层平均厚度约 85m,3156 ~ 3230m 井段连续取心并进行了全直径物性分析(总计 52 个数据点);在 74m 的取心井段内孔隙度和渗透率变化幅度很小,且整个火山岩段的电阻率、密度和声波时差的曲线变化也比较稳定,显示粗面岩的储层物性相对均质。

4. 3. 2 储层规模

玄武岩和粗面岩由于岩浆粘度的显著差异(相差达 10⁵ 数量级, Walker, 1973),形成的火山岩体的形态和规模截然

不同。玄武岩岩浆粘度低、喷溢速率大,形成薄而广的熔岩流;而粗面岩岩浆粘度高、喷溢速率小,则形成短而厚的熔岩流或熔岩穹。

火山岩地震相特征与现有钻井资料相结合,揭示出玄武岩和粗面岩储层的分布规模与空间展布特征。依据 20 口钻井资料和 9 条地震剖面的综合分析(表 3),玄武岩钻井揭示厚度 100 ~ 250m、平面延伸约 10 ~ 22km,地震剖面上外部形态表现为由中心向两侧减薄的楔状体,内部呈平行-亚平行反射结构、局部波形反射结构特征,连续性较好,中强振幅(图 6a);粗面岩钻井揭示厚度为 250 ~ 460m、平面延伸 3.1 ~ 6.3km,地震剖面上外部形态表现为丘形、透镜状和不规则状,内部多见杂乱反射,中弱振幅,连续性差—中等,中弱振幅(图 6b)。

4. 3. 3 储层分布

纵向上,中基性火山岩储层发育的有利位置为冷凝单元顶部和上部、喷发旋回和期次顶部。现有钻井产能测试结果和测井综合解释资料证实,60% 以上的气层分布在火山岩旋回的顶部(同时也是每个冷凝单元的顶部),70% 以上的气藏产能来自于全井段火山岩序列的顶部旋回。

平面上,远源相火山岩厚度小,后期充填作用占主导,成储几率小;火山口-近火山口相和近源相火山岩厚度大,储层

表3 松辽盆地北部安达-汪家屯地区中基性火山岩体规模统计表

Table 3 Dimension statistics of intermediate and mafic volcanic bodies in the study area

岩体编号	厚度(m)	延伸长度(m)	岩石类型	火山机构类型
T1	390	5400	粗面岩	熔岩穹
T2	440	5800	粗面岩	熔岩穹
T3	440	3140	粗面岩	熔岩穹
T4	400	3630	粗面岩	熔岩穹
T5	460	6260	粗面岩	熔岩穹
B1	208	10620	玄武岩、安山岩	熔岩被
B2	250	12540	玄武岩	熔岩被
B3	200	14300	玄武岩	熔岩被
B4	240	21920	玄武岩、安山岩	熔岩锥+熔岩被

注:① 火山岩体厚度是基于单井揭示的火山总厚度,结合地震剖面读取的火山岩发育厚度最大值;
② 延伸长度是在通过地震剖面解释出火山机构的基础上测量得到的火山岩体平面展布距离值

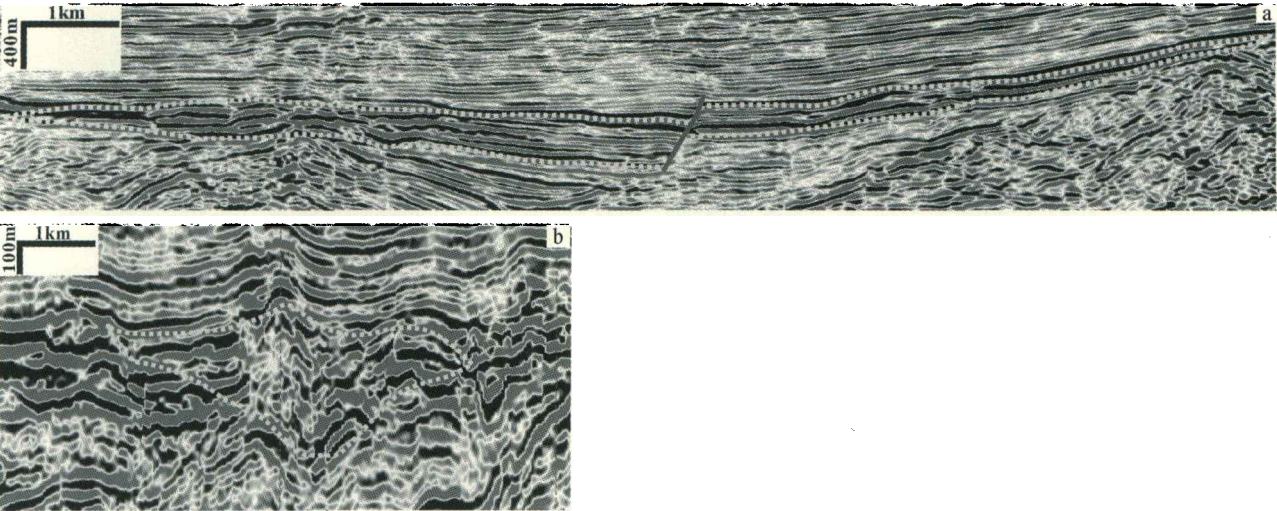


图6 玄武岩(a)和粗面岩(b)的横向展布与形态特征

Fig. 6 Dimension and morphology of basalt (a) and trachyte (b) shown by seismic sections

发育厚度也相对较大,而且受溶解作用、构造作用等多期改造,易于形成良好的孔隙和裂缝配置,成储几率大。试气结果显示,火山口-近火山口相和近远相的气藏产能分别占总量的57%和38%,而远源相仅占5%,并且呈现出距离火山口越远、单井产能越低的趋势。

5 结论

(1)主量元素显示松辽盆地北部安达-汪家屯地区营城组中基性火山岩包括8种成分类型;可归纳为6大类岩石类型储层,即玄武岩、玄武安山岩、安山岩、粗面岩、火山角砾岩和凝灰岩;玄武岩和粗面岩是本区的主要储集岩。

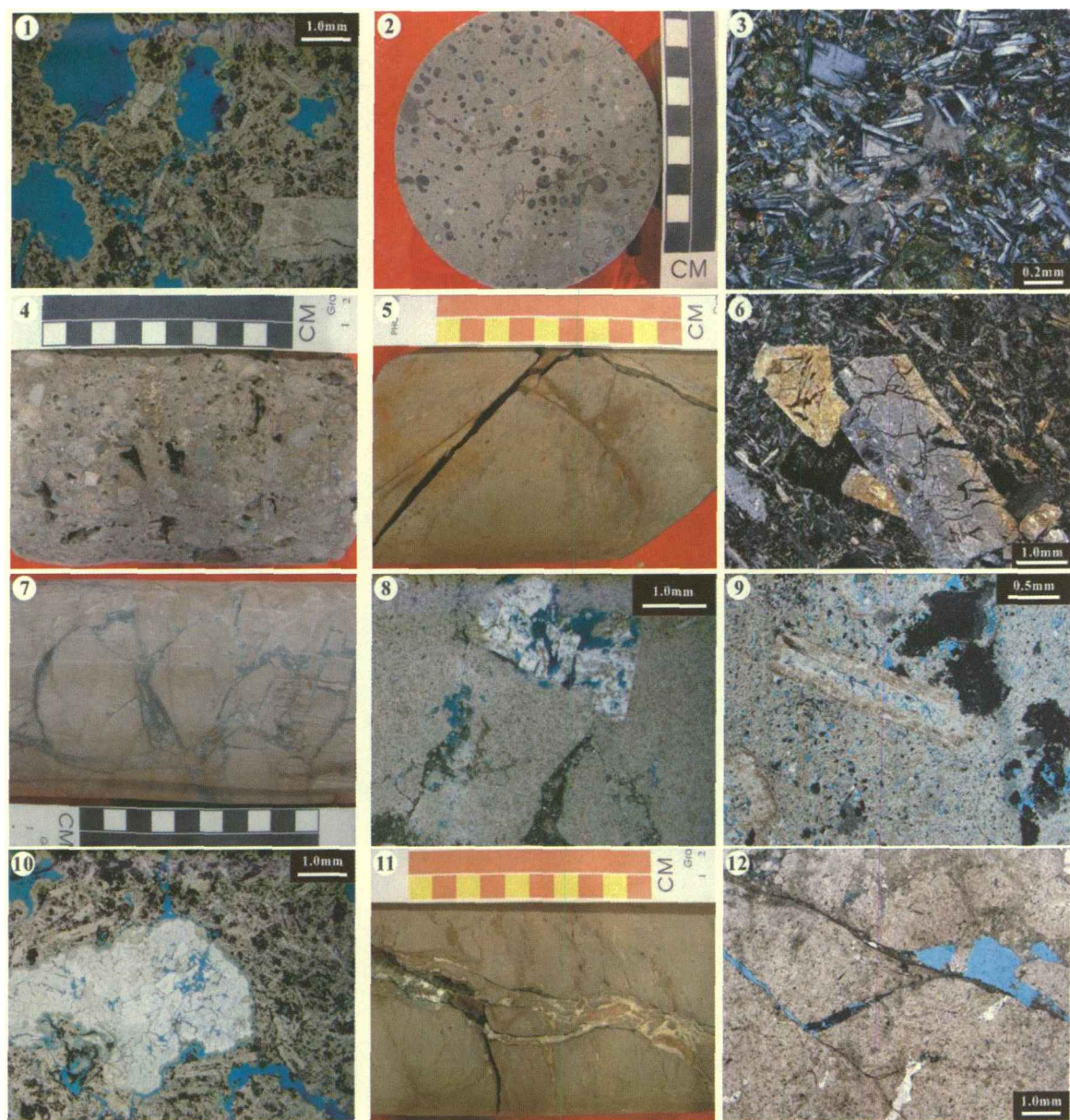
(2)中基性火山岩发育5类原生储集空间和6类次生储集空间;原生储集空间类型由喷发方式和喷发环境决定,其

分布对于熔岩而言主要受控于岩流内部分带性;次生储集空间的发育程度受充填作用、溶解作用、风化淋滤作用和构造作用等因素影响。

(3)喷发间歇期的风化淋滤作用和溶解作用有利于改善孔缝的连通性和有效性,纵向上寻找有利火山岩储层应优先考虑火山岩序列的顶部旋回,进而是位于各个火山岩旋回/期次顶部和上部的储层单元。

(4)近火山口和近源相火山岩厚度大、受构造活动影响明显,构造裂缝使得相邻的储层单元得以连通,同时断裂是溶解作用所需深部酸性流体上升和油气充注的主要通道,因而平面上需确定火山机构相带,并开展断层解译,优先考虑近火山口和近源相带、邻近断裂发育部位。

(5)玄武岩具有发育多期储层单元、单层厚度小、延伸范围大等特点,勘探过程中应优先寻找位于火山岩旋回/期次顶部的有利储层单元,适宜采用水平井或斜井进行开发,有



图版

1-原生气孔、基质溶蚀孔,孔隙之间有裂缝连通,玄武岩(铸体薄片,单偏光);2-原生气孔被石英、方解石和皂石充填,经收缩缝连通呈串珠状,玄武岩(岩心);3-斜长石搭成的三角形格架空隙被方解石完全充填,玄武粗安岩(岩心薄片,正交偏光);4-角砾间孔被溶蚀扩大、边缘不规则,基质中沸石被溶解形成基质溶蚀孔,安山质角砾岩(岩心);5-两组裂缝近垂直相交,原生节理缝被后期构造裂缝切割,粗安岩(岩心);6-长石斑晶炸裂形成不规则裂纹,碱玄岩(岩心薄片,正交偏光);7-隐爆角砾缝被准同期热液和炸碎的角砾所充填,呈破碎角砾状,粗安岩(岩心);8-长石斑晶沿解理缝和边缘发生溶解形成斑晶溶蚀孔,粗面岩(铸体薄片,单偏光);9-粗面岩中构成斑晶和基质的碱性长石普遍发生溶解形成斑晶溶蚀孔和基质溶蚀孔(铸体薄片,单偏光);10-原生气孔中充填的沸石发生溶解形成杏仁体溶蚀孔,碱玄岩(铸体薄片,单偏光);11-风化残积物和后期热液流体沿风化裂隙灌入充填,另见一组近水平裂隙,粗安岩(岩心);12-角砾间缝隙被溶蚀扩大,在裂缝交叉部位形成溶蚀孔洞,粗面岩(铸体薄片,单偏光)

Photo plate

1-Vesicles and groundmass dissolution pores in basalt; 2-Vesicles filled by quartz, calcite and saponite and threaded by cooling fissures; 3-Intercrystalline porosity filled by calcite; 4-Interbreccia pores enlarged by dissolution and groundmass zeolite dissolved to form dissolution pores; 5-Primary joints intersected by tectonic fracture; 6-Intracrystalline quench cracks in tephrite; 7-Interbreccia porosity filled by hydrothermal fluids and fragmented breccias; 8-Feldspar phenocryst dissolved to form intracrystalline moldic porosity; 9-Both phenocryst and groundmass alkali feldspars in trachyte dissolved to form secondary spongy porosity; 10-Pore-filling zeolite dissolved to form secondary porosity; 11-Weathering cracks and fissures mostly filled by secondary products and subsequent hydrothermal fluids; 12-Interbreccia fractures enlarged by dissolution and form voids in their junction

望提高产能、实现少井高效开发。粗面岩分布局限,但成储几率大,单井产能相对较高,具有储集体厚度大、延伸范围小等特点,勘探过程中应以寻找具备有利烃源和盖层配置的储集岩体为目标,适宜采用直井或斜井进行开发。

致谢 本文获“东北亚生物演化与环境教育部重点实验室”、吉林大学“211”工程三期建设项目和2009年教育部基本科研业务经费(“吉林大学创新团队发展计划”)支持。样品采集和资料收集得到了大庆油田勘探开发研究院孙先达、丁日新、纪学雁、刘春生和曲立才等人的大力帮助。杨帝和吴艳辉参与了样品的面孔率分析工作。张艳、唐华凤、高有峰等对文稿修改提出了宝贵意见。在此一并表示诚挚的谢意。

References

- Cao YC, Jiang ZX and Qiu LW. 1999. Study on the type and origin of the reservoir space of igneous oil reservoir in Shang 741 block, Huimin depression. *Acta Petrologica Sinica*, 15(1): 129 - 136 (in Chinese with English abstract)
- Feng ZH, Shao HM and Tong Y. 2008. Controlling factors of volcanic gas reservoir property in Qingshen Gas Field, Songliao Basin. *Acta Geologica Sinica*, 82(6): 760 - 768 (in Chinese with English abstract)
- Feng ZQ. 2008. Volcanic rocks as prolific gas reservoir: A case study from the Qingshen gas field in the Songliao Basin, NE China. *Marine and Petroleum Geology*, 25: 416 - 432
- Huang JZ and Gou XM. 1994. Analysis of gas source and exploration potential of Permian basalt unconventional gas reservoir in Sichuan basin. *Natural Gas Industry*, 14(5): 16 - 19 (in Chinese with English abstract)
- Huang QH, Tan W and Yang HC. 1999. Stratigraphic succession and chronostrata of Cretaceous in Songliao Basin. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 18(6): 15 - 17 (in Chinese with English abstract)
- Huang YL, Wang PJ and Chen SM. 2009. Distribution and characteristics of volcanic reservoirs in China. *Global Geology*, 12(2): 64 - 79
- Ji GS, Dai JS, Ma XB and Wang ZY. 2002. Reservoir characteristics of volcanic rocks from member I, II of Funing Formation in northern Minbei region in Subei basin. *Oil & Gas Geology*, 23(3): 289 - 291 (in Chinese with English abstract)
- Jia JT, Wang PJ, Shao R, Chen RH, Zhang B, Hou JT, Li JL and Bian WH. 2007. Stratigraphical sequence and regional correlation of Yingcheng Formation in the southeast of Songliao Basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 37(6): 1110 - 1123 (in Chinese with English abstract)
- Lei TZ, Shi XP, Kong YH, Zhang SC, Fang LH and Shi JA. 2008. Effect of dissolution on forming high-quality reservoir in alkaline volcanic rocks: An example from Carboniferous volcanic rocks in Luxi area in Junggar Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 29(3): 306 - 308 (in Chinese with English abstract)
- Le Maitre RW, Bateman P, Dudek A, Keller J, Lameyre MJ, Lebas MJ, Sabine PA, Schmid R, Scorensen H, Streckeisen A, Wooley AR and Zanettin B. 1989. *A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms*. London: Blackwell, 28
- Li J, Xue PH, Zhang AQ and Liu XY. 2008. Characteristics and controlling factors of Carboniferous volcanic reservoir in the middle section of the northwestern margin of Junggar basin. *Acta Petrologica Sinica*, 29(3): 329 - 335 (in Chinese with English abstract)
- Li SM, Chen FL, Qi WZ, He YQ, Zhao H and Shi LH. 2007. Relationship between weathering crust characteristics and hydrocarbon accumulation of Lower Permian in Malang sag, Santanghu basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 28(5): 554 - 556 (in Chinese with English abstract)
- Liu WF, Liu SL and Sun LX. 2000. Type and characteristics of Permian andesite reservoir in Tiaohu sag, Santanghu basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 21(6): 483 - 486 (in Chinese with English abstract)
- Luo JL and Zhang CL. 2002. Characteristics and oil source for Mesozoic volcanic pools in Fenghuadian region. *Oil & Gas Geology*, 23(4): 357 - 360 (in Chinese with English abstract)
- Meng QA, Men GT, Zhao HW, Huo FL, Jiang T and Shao ML. 2002. Characteristics of Mesozoic volcanic rocks and its controlling effect on gas reservoir in Songliao Basin. *Oil & Gas Geology*, 23(3): 285 - 288 (in Chinese with English abstract)
- Min FQ, Wang PJ, Yu SQ, Huang YL, Wu YX, Li J and Ren LJ. 2007. Meticulous depiction of lithology, lithofacies and reservoir porosity and permeability in the third & second member of Yingcheng Formation; Based on whole coring Y3D1 Well drilled in the standard section. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 37(6): 1203 - 1216 (in Chinese with English abstract)
- Petford N and McCaffrey KJW. 2003. Hydrocarbons in crystalline rocks: An introduction. In: Petford N and McCaffrey KJW (eds.). *Hydrocarbons in Crystalline Rocks*. Spec. Publ. Geol. Soc. Lond., 214: 1 - 5
- Schutter SR. 2003. Occurrences of hydrocarbons in and around igneous rocks. In: Petford N and McCaffrey KJW (eds.). *Hydrocarbons in Crystalline Rocks*. Spec. Publ. Geol. Soc. Lond., 214: 35 - 68
- Song WH and Pang JL. 1994. Gas-bearing study of P₂ basalt in the southwest part of Sichuan basin. *Natural Gas Industry*, 14(5): 11 - 15 (in Chinese with English abstract)
- Tao KY, Yang ZL, Wang LB and Yang XZ. 1998. Oil-reservoir geological model of basalt in Minqiao, northern Jiangsu Province. *Earth Science*, 23(3): 272 - 275 (in Chinese with English abstract)
- Walker GPL. 1972. Compound and simple lava flows and flood basalts. *Bulletin of Volcanology*, 35: 579 - 590
- Walker GPL. 1973. Lengths of lava flows. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 274: 107 - 118
- Walker GPL. 1993. Basaltic-volcano systems. In: Prichard HM, Alabaster T, Harris NBW and Neary CR (eds.). *Magmatic Processes and Plate Tectonics*. Spec. Publ. Geol. Soc. Lond., 76: 3 - 38
- Wang PJ, Liu WZ, Wang SX and Song WH. 2002. ⁴⁰Ar/³⁹Ar and K/Ar dating on the volcanic rocks in the Songliao basin, NE China: Constraints on stratigraphy and basin dynamics. *International Journal of Earth Sciences*, 91: 331 - 340
- Wang PJ, Chi YL, Liu WZ, Chen RH, Shan XL and Ren YG. 2003. Volcanic facies of Songliao Basin: Classification, characteristics and reservoir significance. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 33(4): 449 - 456 (in Chinese with English abstract)
- Wang PJ, Gao YF, Ren YG, Liu WZ and Zhang JG. 2009. ⁴⁰Ar/³⁹Ar age and geochemical features of mugearite from the Qingshankou Formation: Significances for basin formation, hydrocarbon generation and petroleum accumulation of the Songliao Basin in Cretaceous. *Acta Petrologica Sinica*, 25(5): 1178 - 1190 (in Chinese with English abstract)
- Wang RC, Xu HM, Shao Y, Li L and Wei LY. 2008. Reservoir characteristics of Carboniferous volcanic rocks in Ludong area of Junggar basin. *Acta Petrologica Sinica*, 29(3): 350 - 355 (in Chinese with English abstract)
- Xiong QH, Wu SH and Wei XS. 1998. Characteristics of igneous reservoir and controlling factors of reservoir development in the Permian of the Santanghu basin. *Experimental Petroleum Geology*, 20(2): 129 - 134 (in Chinese with English abstract)
- Zhang NF, Cao YH, Kuang J and Lin JF. 1998. Weathering crust model of Carboniferous volcanic rock in Hinterland, Junggar Basin.

- Xinjiang Petroleum Geology, 19(6): 450–452 (in Chinese with English abstract)
- Zhao HL, Wang C, Sun WL, Qing Z, Chen L and Zhu F. 2009. Characteristics of petrology and thermodynamics of selective dissolution of plagioclase in volcanic reservoir rocks. Geological Bulletin of China, 28(4): 412–419 (in Chinese with English abstract)
- Zou CN, Zhao WZ, Jia CZ, Zhu RK, Zhang GY, Zhao X and Yuan XJ. 2008. Formation and distribution of volcanic hydrocarbon reservoirs in sedimentary basins of China. Petroleum Exploration and Development, 35(3): 257–271 (in Chinese with English abstract)
- 附中文参考文献**
- 操应长, 姜在兴, 邱隆伟. 1999. 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. 岩石学报, 15(1): 129–136
- 冯子辉, 邵红梅, 童英. 2008. 松辽盆地庆深气田深层火山岩储层储集性控制因素研究. 地质学报, 82(6): 760–768
- 黄籍中, 苟学敏. 1994. 四川盆地二叠系玄武岩非常规气藏气源及勘探前景分析. 天然气工业, 14(5): 16–19
- 黄清华, 谭伟, 杨会臣. 1999. 松辽盆地白垩纪地层序列与年代地层. 大庆石油地质与开发, 18(6): 15–17
- 冀国盛, 戴俊生, 马欣本, 王志云. 2002. 苏北盆地闵北地区阜宁组一、二段火山岩的储集特征. 石油与天然气地质, 23(3): 289–291
- 贾军涛, 王璞珺, 邵锐, 程日辉, 张斌, 侯景涛, 李金龙, 边伟华. 2007. 松辽盆地东南缘营城组地层序列的划分与区域对比. 吉林大学学报(地球科学版), 37(6): 1110–1123
- 雷天柱, 石新璞, 孔玉华, 张顺存, 方琳浩, 史基安. 2008. 溶蚀在形成碱性火山岩优质储集层中的作用——以准噶尔盆地陆西地区石炭系火山岩为例. 新疆石油地质, 29(3): 306–308
- 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控制因素. 石油学报, 29(3): 329–335
- 李森明, 陈凤来, 漆万珍, 何燕清, 赵昊, 施兰花. 2007. 马朗凹陷下二叠统风化壳特征与油气成藏关系. 新疆石油地质, 28(5): 554–556
- 刘为付, 刘双龙, 孙立新. 2000. 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. 新疆石油地质, 21(6): 483–486
- 罗静兰, 张成立. 2002. 风化店中生界火山岩油藏特征及油源. 石油与天然气地质, 23(4): 357–360
- 蒙启安, 门广田, 赵洪文, 霍凤龙, 江涛, 邵明里. 2002. 松辽盆地中生界火山岩储层特征及对气藏的控制作用. 石油与天然气地质, 23(3): 285–288
- 闵飞琼, 王璞珺, 于世全, 黄玉龙, 吴颜雄, 李喆, 任利军. 2007. 营城组三段及二段岩性岩相和储层物性的精细刻画——基于标准剖面营三D1井全取心钻孔资料. 吉林大学学报(地球科学版), 37(6): 1203–1216
- 宋文海, 庞家黎. 1994. 四川盆地西南部上二叠统玄武岩含气性研究. 天然气工业, 14(5): 11–15
- 陶奎元, 杨祝良, 王力波, 杨献忠. 1998. 苏北闵桥玄武岩储油的地质模型. 地球科学, 23(3): 272–275
- 王璞珺, 迟元林, 刘万洙, 程日辉, 单玄龙, 任延广. 2003. 松辽盆地火山岩相: 类型、特征和储层意义. 吉林大学学报(地球科学版), 33(4): 449–456
- 王璞珺, 高有峰, 任延广, 刘万洙, 张建光. 2009. 松辽盆地青山口组橄榄粗安岩: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄、地球化学及其成盆、成烃和成藏意义. 岩石学报, 25(5): 1178–1190
- 王仁冲, 徐怀民, 邵雨, 李林, 魏凌云. 2008. 准噶尔盆地陆东地区石炭系火山岩储层特征. 石油学报, 29(3): 350–355
- 熊琦华, 吴胜和, 魏新善. 1998. 三塘湖盆地二叠系火成岩储集特征及储层发育的控制因素. 石油实验地质, 20(2): 129–134
- 张年富, 曹耀华, 况军, 林金凤. 1998. 准噶尔盆地腹部石炭系火山岩风化壳模式. 新疆石油地质, 19(6): 450–452
- 赵海玲, 王成, 刘振文, 孙文亮, 卿忠, 陈令, 朱峰. 2009. 火山岩储层斜长石选择性溶蚀的岩石学特征和热力学条件. 地质通报, 28(4): 412–419
- 邹才能, 赵文智, 贾承造, 朱如凯, 张光亚, 赵霞, 袁选俊. 2008. 中国沉积盆地火山岩油气藏形成与分布. 石油勘探与开发, 35(3): 257–271