

# 松辽盆地营城组火山岩储层流动单元特征和控制因素\*

唐华凤<sup>1</sup> 徐正顺<sup>2</sup> 吴艳辉<sup>1</sup> 吴颜雄<sup>1</sup>

TANG HuaFeng<sup>1</sup>, XU ZhengShun<sup>2</sup>, WU YanHui<sup>1</sup> and WU YanXiong<sup>1</sup>

1. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061

2. 大庆油田勘探开发研究院, 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

2009-07-01 收稿, 2009-11-08 改回.

Tang HF, Xu ZS, Wu YH and Wu YX. 2010. Characteristics and controlling factors of volcanic reservoir flow units of Yingcheng Formation in the Songliao Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 26(1): 55-62

**Abstract** Volcanic reservoir flow units were classified based on four parameters, namely porosity, permeability, RQI and FZI, using cluster analysis on 388 samples of the Cretaceous volcanic rock of Yingcheng Formation ( $K_1y$ ) in the area of well XS1 in central of the Songliao Basin. The flow units can be subdivided into four classes by comparing the cluster analysis results with the gas production of corresponding wells, ranking decreasingly from type I, II, III to type-IV. Frequency of different level flow units show as follows, type-III (39.2%), type-II (33.2%), type-I (25.0%) and type-IV (2.6%). Type-I, the best of the flow units is composed mainly of the volcanic reservoirs with combination of high-porosity and high-permeability, or high-porosity and medium-permeability, or medium-porosity and high-permeability, and with a thickness between 10 to 20m. Type-II is predominantly medium-porosity and high-permeability, or high-porosity and medium-permeability, or low-porosity and high-permeability, and with a thickness varying from 10 to 47m. Type-III is mainly medium-porosity and high-permeability, or medium-porosity and low-permeability, or low-porosity and medium-permeability, and with a thickness of ca. 11 to 86m. Type-IV, the worst of the flow units is generally composed of low porosity and low permeability, or ultra-low porosity and ultra-low permeability reservoirs, and shows thickness less than ten meters. Characteristics and distributions of the volcanic flow units are controlled by both volcanic edifices and subfacies. It is the fact that crater-near crater facies belt have the best potential to form type-I and type-II flow units, while proximal facies belt type-II and type-III and distal facies belt type-III and type-IV. The upper-effusive and the pyroclastics subfacies are most likely to develop flow unit of type-I, because the former is rich in vesicle and the latter is rich in intergranular pore. Ash fall and lower-effusive subfacies are most likely to develop flow units of type-III and type-IV, because their primary pores and fractures are generally not well developed. Description and recognition of volcanic reservoir flow units are also presented. The work provides a foundation for 3-D modeling of the volcanic reservoir flow units.

**Key words** Songliao Basin; Cretaceous Yingcheng Formation( $K_1y$ ); Volcanic reservoir flow units; Volcanic edifices and subfacies

**摘要** 根据孔隙度、渗透率、储层品质指数(RQI)、流动层带指数(FZI)4个参数对XS1井区白垩系营城组火山岩的388个样品进行聚类分析,通过对聚类结果与各井产气情况的对比将储层流动单元划分为4类,所占比例依次为39.2%(Ⅲ类)、33.2%(Ⅱ类)、25.0%(Ⅰ类)、2.6%(Ⅳ类)。Ⅰ类储层流动单元多为高孔高渗、高孔中渗和中孔高渗储层,厚度范围为10~20m;Ⅱ类储层流动单元多为中孔高渗、高孔中渗和低孔高渗储层,厚度范围为10~47m;Ⅲ类储层流动单元多为中孔高渗、中孔低渗和低孔中渗储层,厚度范围为11~86m;Ⅳ类储层流动单元为低孔低渗和特低孔特低渗储层,厚度小于10m。火山岩储层流动单元发育和分布受火山机构相带和火山岩亚相的控制,表现为火山口-近火山口相带成为Ⅰ、Ⅱ类储层流动单元的机率最大,近源相带成为Ⅱ、Ⅲ类储层流动单元的机率最大,远源相带成为Ⅲ类和Ⅳ类储层流动单元的机率最大。原生气孔发育

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

第一作者简介:唐华凤,男,1979年生,博士,副教授,主要从事火山岩储层地质-地球物理研究, E-mail: tanghf@jlu.edu.cn

的上部亚相和粒间孔发育的热碎屑流亚相形成 I 类储层流动单元的机率最大,原生孔隙不发育的空落亚相和下部亚相形成 III 类储层流动单元的机率大。实现了火山岩储层流动单元的单井识别,为其三维模型的建立提供依据。

**关键词** 松辽盆地;白垩系营城组;火山岩储层流动单元;火山机构和亚相

**中图法分类号** P618.13

## 1 引言

我国已在松辽盆地、渤海湾盆地、准噶尔盆地等诸多盆地发现火山岩油气藏,累计探明储量已达数亿吨油和万亿方天然气,显示出巨大的勘探前景,正在成为我国能源接替的重要新领域(贾承造等,2007;Feng,2008)。目前火山岩油气藏勘探开发过程中还沿用碎屑岩油气藏理论,在岩心和单井描述时具有适应性(操应长等,1999;孙先达等,2005),而在井间和三维建模方面火山岩与碎屑岩存在本质差别。所以火山岩油气藏研究在勘探开发过程中遇到了储量计算误差大、在预测的油气藏含油气面积内的评价井和开发井成功率偏低。究其原因就是对储层流动单元的类型、特征和分布规律认识还不清,为此需要开展相应研究。

储层流动单元是油气藏描述和表征的基本单元,它的提出为储层非均质性的定量刻画和油气藏动态研究提供重要理论依据。储层流动单元(Reservoir flow units)由 Hearn 较早提出(Hearn *et al.*, 1984),他在研究美国 Wyoming 砂岩油藏时指出,流体流动受储集岩属性控制,流动单元可以精确描述储层属性变化。根据火山岩储层与碎屑岩储层之间的差异特征,借用碎屑岩的成熟研究方法在识别取心段火山岩储层流动单元的类型方面具有合理性。在单一的成因条件下,可利用地质属性参数和渗流参数进行类型划分和识别。如根据地质属性(渗透率、孔隙度、粒度中值)划分流动单元(Bhattacharya *et al.*, 2008),利用流动层带指数(FZI)可定量划分储层流动单元(Desouky, 2005)。仅根据流动层带指数划分储层流动单元,划分结果可能会使储层物性存在显著差别的储层划分为一类,所以结合地质属性参数和渗流参数划分储层流动单元(Ti *et al.*, 1995;谭成钊等,2002),如在沉积微相(Kramers, 1994; Hamlim *et al.*, 1996; 田冷等, 2005)、高分辨率层序地层格架和沉积体系(胡文瑄等,2006)的约束下进行储层流动单元研究,取得了较好效果。此外,还可利用产能参数识别储层流动单元(陈程等,2003)。

本文以松辽盆地庆深气田 XS1 井区火山岩气藏为例(图 1),根据孔隙度、渗透率、储层品质和流动层带指数进行取心段火山岩储层流动单元类型识别及其参数变化规律分析,并进行控制因素探讨,为火山岩储层流动单元三维模型建立提供依据。

## 2 储层流动单元类型

储层流动单元实质上是以渗流特征为主导所精细描述

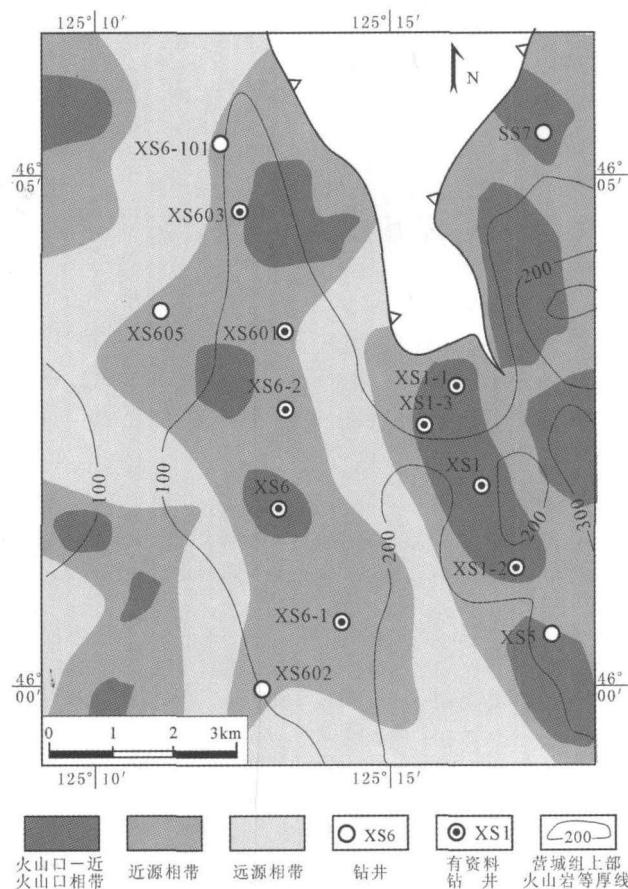


图 1 XS1 井区火山机构相带分布特征

Fig. 1 Well location and facies belt distribution of the volcanic edifices in the north-central Songliao Basin

的储层非均质单元,是对储层结构模型的进一步细化和定量表征。每个流动单元都是具有一定物性变化范围和相似结构的相对均质单元,各自具有相对独立的地质特征和导流能力(赵翰卿,2001)。储层流动单元类型研究中应该综合考虑储层参数和渗流参数所产生的效应。储层参数包括孔隙度、渗透率、孔喉半径等,渗流参数包括储层品质指数(RQI)和流动层带指数(FZI)。

$$\text{其中 } RQI = 0.0314 \sqrt{k/\phi} \quad (1)$$

$$FZI = RQI/\phi_2 \quad (2)$$

$$\phi_2 = \phi/(1 - \phi) \quad (3)$$

$k$  为渗透率,  $\phi$  为孔隙度,  $\phi_2$  为标准化孔隙度。

RQI 值越大表示储层渗流条件越好;FZI 是把岩石矿物特征、孔喉特征及结构特征综合起来的判定孔隙几何相的一个参数,可以比较准确地描述储集层的非均质特征,如具有相似数值表示为同一类型的储层流动单元。

本文选取孔隙度、渗透率、储层品质指数和流动层带指数4个参数对大庆气田XS1井区营城组火山岩的388个样品进行聚类分析,通过对聚类结果与产气情况的对比将储层流动单元划分为4类。

分别为I类储层流动单元(储集性能好)、II类储层流动单元(储集性能中)、III类储层流动单元(储集性能差)和IV类储层流动单元(储集性能极差)。其中划分为III类储层流动单元最多( $n=152$ ),II类储层流动单元次之( $n=129$ ),I类储层流动单元排第三( $n=97$ ),IV类的样品最少( $n=10$ )。

根据岩心样品的储层流动单元类型划分结果标定声波时差曲线单元、密度曲线单元和亚相单元,并对邻近的相同类型储层流动单元进行合并,完成全取心段的储层流动单元识别。图2为营城组火山岩段全取心井XS1-2井的划分结果。该井划分出22个储层流动单元,其中以III类储层流动单元为主(占58.6%),II类储层流动单元次之(占26.2%),IV类储层流动单元排第三(占8.2%),I类储层流动单元仅占7%,总体上该井的储渗条件为差。

### 3 储层流动单元特征

各类储层流动单元孔隙度、渗透率、储层品质指数和流动层带指数特征如表1和图3。I类储层流动单元的孔隙度变化范围大,孔隙度最大的样品包含在该类储层流动单元之中,且最小值和平均值较II类储层流动单元大;III、IV类储层流动单元的孔隙度要明显比I、II类的差。IV类渗透率的最小值要比III类中的大,但均值和最大值要较III类中的小。I、II类储层流动单元渗透率较大,III、IV类储层流动单元的渗透率较小。

根据孔渗资料的分布特征将储层划分为高孔( $\phi \geq 9\%$ )、中孔( $4\% \leq \phi < 9\%$ )、低孔( $2\% \leq \phi < 4\%$ )、特低孔( $\phi < 2\%$ ),高渗( $k \geq 0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )、中渗( $0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \leq k < 0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )、低渗( $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \leq k < 0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )、特低渗( $k < 0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )。总体看来I类储层流动单元孔渗条件最好,多为高孔高渗、高孔中渗和中孔高渗储层;II类储层流动单元孔渗条件次之,多为中孔高渗、高孔中渗和低孔高渗储层;III类储层流动单元孔渗条件中等,多为中孔高渗、中孔低渗和低孔中渗储层;IV类储层流动单元孔渗条件最差,为低孔低渗和特低孔特低渗储层。

从图3a中可知,孔隙度对储层流动单元类型的影响比渗透率更大。从图3b储层品质指数显示I、II类储层单元的渗流能力较好,II类单元中发育渗流能力最好的储层,III类储层单元的渗流能力稍差,IV类储层单元的渗流能力较好;整体上火山岩储层单元的均质性较碎屑岩差,就火山岩而言II类储层单元的均质性最差,I类储层单元差,III类储层单元较好,IV类储层单元最好。

根据XS1-2井单井储层流动单元识别结果可知I类储层流动单元厚度范围为10~20m,II类储层流动单元厚度范

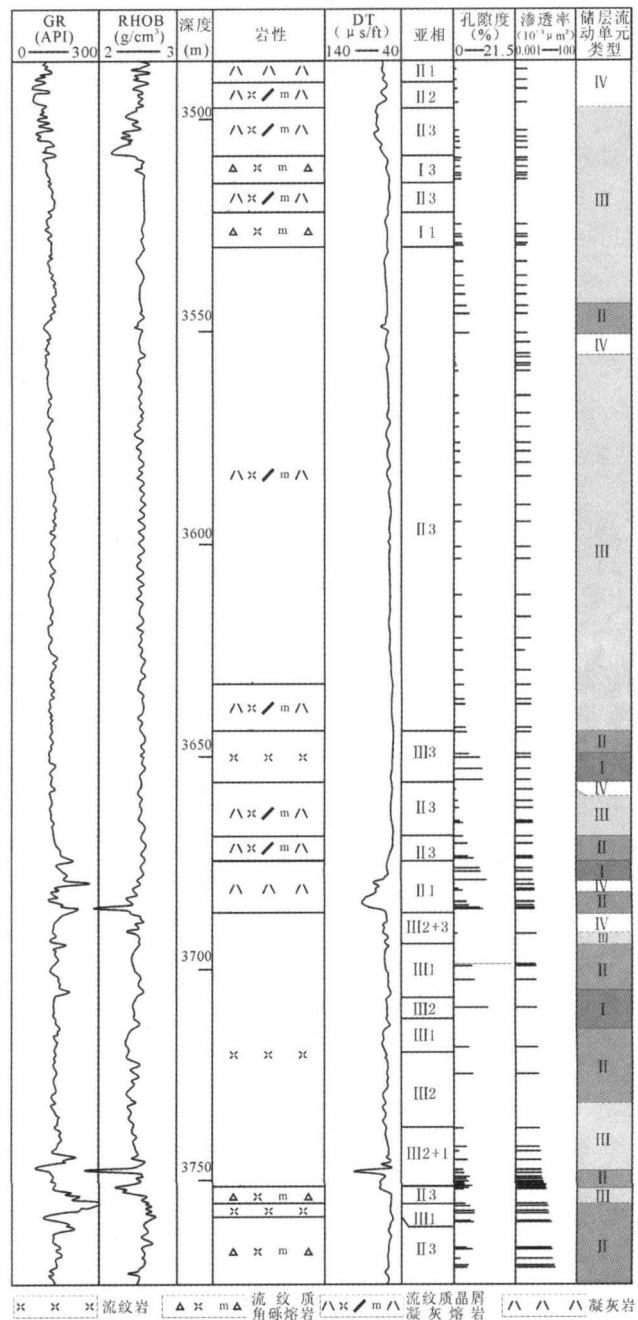


图2 XS1-2井营城组火山岩储层流动单元类型

I 1-火山颈亚相; I 3-隐爆角砾岩亚相; II 1-空落亚相; II 2-热基浪亚相; II 3-热碎屑流亚相; III 1-下部亚相; III 2-中部亚相; III 3-上部亚相

Fig. 2 Types and vertical sequence of the volcanic reservoir flow unit of K<sub>1</sub>y of well XS1-2

I 1-diatreme subfacies; I 3-hydrothermal breccia subfacies; II 1-air fall subfacies; II 2-base surge subfacies; II 3-pyroclastic flow subfacies; III 1-lower effusive subfacies; III 2-middle effusive subfacies; III 3-upper effusive subfacies

围为10~47m,III类储层流动单元厚度范围为11~86m,IV类储层流动单元厚度小于10m。

表1 XSI井区营城组火山岩储层流动单元特征

Table 1 Characteristics of volcanic reservoir flow unit of  $K_1y$  of well XSI and surrounding area

类型	主要岩相	主要岩性	储集空间 主要类型	孔隙度 (%)	渗透率 ( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	储层品质 指数-RQI	流动层带 指数-FZI	样品 个数
I	爆发相热碎屑 流亚相, 喷溢相上 部亚相	流纹质晶屑凝 灰熔岩, 流纹质角 砾熔岩, 气孔流 纹岩	原生气孔 + 粒 间孔 + 溶蚀孔 + 构造缝	$17.2 \sim 5.10$ 9.98	$13.60 \sim 0.020$ 1.060	$0.33 \sim 0.01$ 0.07	$6.21 \sim 0.12$ 0.68	97
II	爆发相热碎屑 流亚相, 喷溢相 上、中部亚相	流纹质凝灰熔 岩, 流纹质角砾熔 岩, 流纹构造流 纹岩	原生气孔 + 粒 间孔 + 构造缝	$8.1 \sim 1.60$ 5.71	$8.30 \sim 0.010$ 0.410	$0.61 \sim 0.01$ 0.07	$27.11 \sim 0.06$ 1.9	129
III	爆发相空落亚 相, 喷溢相下部 亚相	流纹质凝灰岩, 流纹质角砾岩, 块 状流纹岩	微孔 + 粒间孔 + 冷凝收缩缝 + 构造缝	$4.7 \sim 0.50$ 2.61	$0.454 \sim 0.002$ 0.065	$0.15 \sim 0.01$ 0.04	$12.50 \sim 0.36$ 2.15	152
IV	爆发相空落 亚相	流纹质凝灰 (熔)岩	裂缝 + 溶蚀孔 + 粒间微孔	$0.6 \sim 0.10$ 0.31	$0.120 \sim 0.010$ 0.04	$0.14 \sim 0.06$ 0.1	$99.20 \sim 19.05$ 44.18	10

注:  $\frac{a \sim b}{c} = \frac{\text{最大值} - \text{最小值}}{\text{平均值}}$

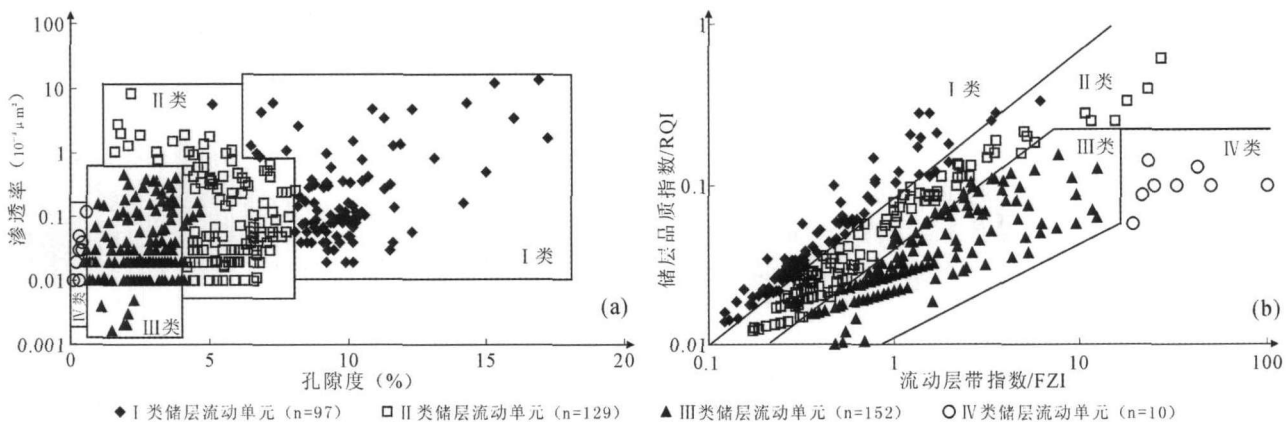


图3 XSI井区营城组火山岩储层流动单元特征

Fig. 3 Characteristics of volcanic reservoir flow unit of  $K_1y$  of well XSI and surrounding area

## 4 储层流动单元控制因素

### 4.1 储层流动单元与火山机构相带的关系

根据岩性岩相组合特征、岩层产状和储集空间特征将火山机构划分为火山口-近火山口相带、近源相带和远源相带(唐华风等, 2008), 火山口近火山口相带的特征岩相为火山通道相、侵出相、具有高角度变形流纹构造的喷溢相和含火山弹的爆发相。近源相带特征岩相为低角度流纹构造的喷溢相和爆发相, 远源相带特征岩相为层状爆发相(空落亚相)和火山沉积相。

从图 4a 可以得知火山机构各相带成为各类储层流动单元的概率不同, 火山口-近火山口相带成为 I、II 类储层流动

单元的概率最大, 近源相带成为 II、III 类储层流动单元的概率最大。远源相带成为 III 类储层流动单元的概率最大。

火山机构各相带样品比例及其形成各类储层流动单元的概率不同, 导致各相带对各类储层流动单元的贡献不同。从图 4b 可知火山口-近火山口相带对 I、II 类储层流动单元的贡献最大, 近源相带的贡献主要集中在 II、III 类储层流动单元, 远源相带对 III 类、IV 类储层流动单元的贡献最大。

综上所述, 火山机构相带控制着储层流动单元类型的发育和分布。

### 4.2 储层流动单元与岩相的关系

松辽盆地深层火山岩相划分方案为 5 相 15 亚相, 从火山岩相储层特征和与储层的定量关系来看, 各亚相的渗流条

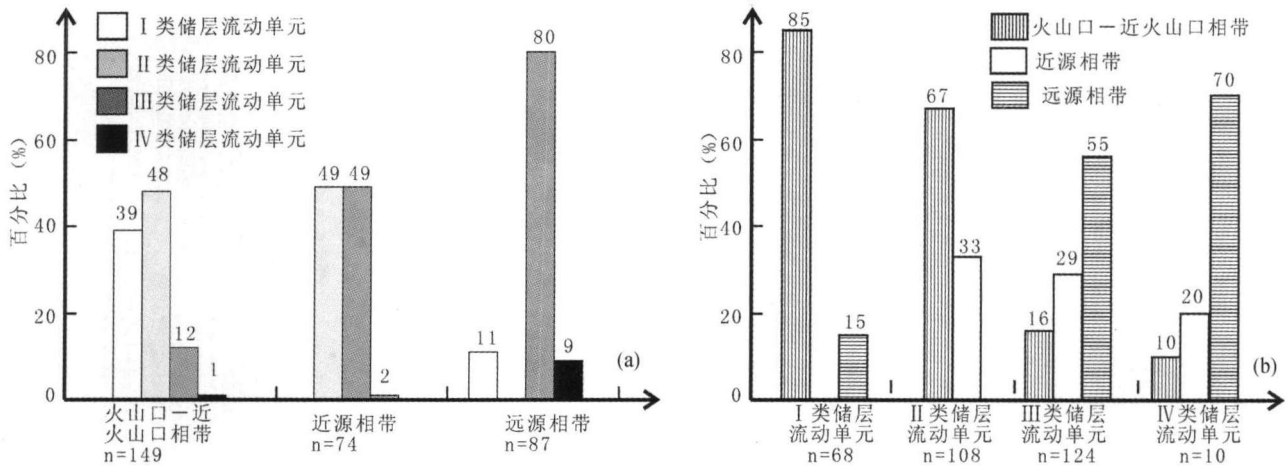


图4 XS1井区火山岩储层流动单元火山机构相带特征 (a)-火山机构相带储层流动单元类型构成;(b)-储层流动单元的火山机构相带构成

Fig.4 Characteristics of volcanic edifices belts of reservoir flow unit of well XS1 and surrounding area

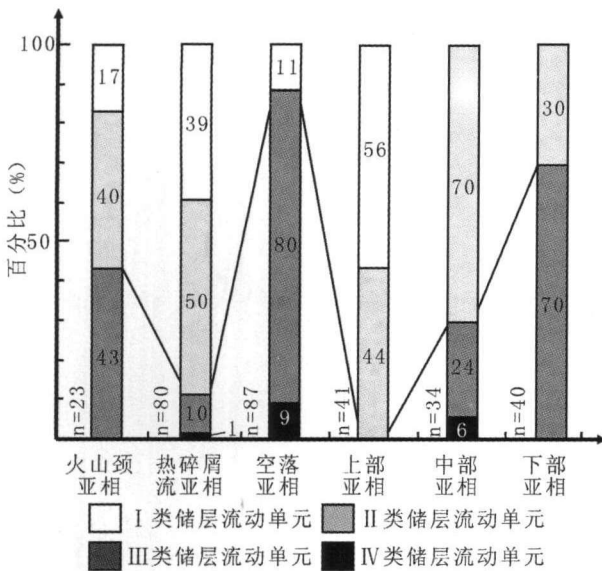


图5 XS1井区火山岩亚相的储层流动单元类型构成 Fig.5 Proportion of volcanic reservoir flow units types of subfacies in well XS1 and surrounding area

件存在较大的差别(王璞珺等,2006)。从图5可以得知不同亚相中各类储层流动单元的比例存在较大差别,上部亚相成为I类的机率最大,中部亚相成为II类储层流动单元的机率最大,空落亚相成为III类和IV类储层流动单元的机率均最大。因为I类和II类储层流动单元的储集性能好,所以上部亚相形成好储层流动单元的机率最高,热碎屑流亚相次之。

各亚相的样品比例及其形成各类储层流动单元的机率不同,导致各亚相对各类储层流动单元的贡献不同。从图6可以得知成为I类储层流动单元的岩相主要是爆发相热碎屑流亚相和喷溢相上部亚相,成为IV类储层流动单元的岩相主要为爆发相空落亚相,II、III类储层流动单元由多种岩相组成。

综上所述,火山岩亚相控制着储层流动单元类型的发育和分布。

## 5 讨论

### 5.1 储层流动单元类型的孔隙特征

从储层流动单元与火山机构相带、亚相关系可知储层流动单元类型的分布和规模受火山机构相带和亚相的控制,这与各火山机构相带、亚相发育的孔隙类型和组合特征有关。I类储层流动单元中往往具有大孔隙(气孔)、宽长裂缝的特征,属于孔隙-裂缝型储层,以原生大气孔-杏仁、粒间孔、溶蚀孔、成岩缝和构造缝为主,主要分布在火山口-近火山口相带;II类储层流动单元具有中孔隙、窄小裂缝的特征,属于孔隙-裂缝型和裂缝-孔隙型储层,以原生小气孔-杏仁、粒间孔、溶蚀孔和成岩缝为主,主要分布在近源相带;III类储层流动单元具有微小孔隙、局部发育宽长裂缝的特征,属于裂缝-孔隙型储层,以构造缝、冷凝收缩缝、微粒间孔、微溶蚀孔为主,主要分布在远源相带。远源相带的原生储集空间不发育,后期改造对它的影响比较大,如XS1-2井3676m处的空落亚相经过后期改造发育裂缝,使该井段形成了中孔高渗储层,发育I类储层流动单元。

本文中的IV类储层流动单元的储层品质参数值大(渗流条件好),这是因为当孔隙度低、渗透率低时根据计算方法依然能得到储层品质参数高值,导致该类单元具有这样的渗流特征(与样品中存在微裂缝相关),但该类单元在岩层中由于排驱压力大,往往不能形成渗流层,而成为隔挡层。此外,本文提及IV类单元的样品数量少,当样品数量增加时其特征应该有所变化。

### 5.2 储层流动单元的含气特征

从图7中可以看出,当I类、II类单元含量超过60%时

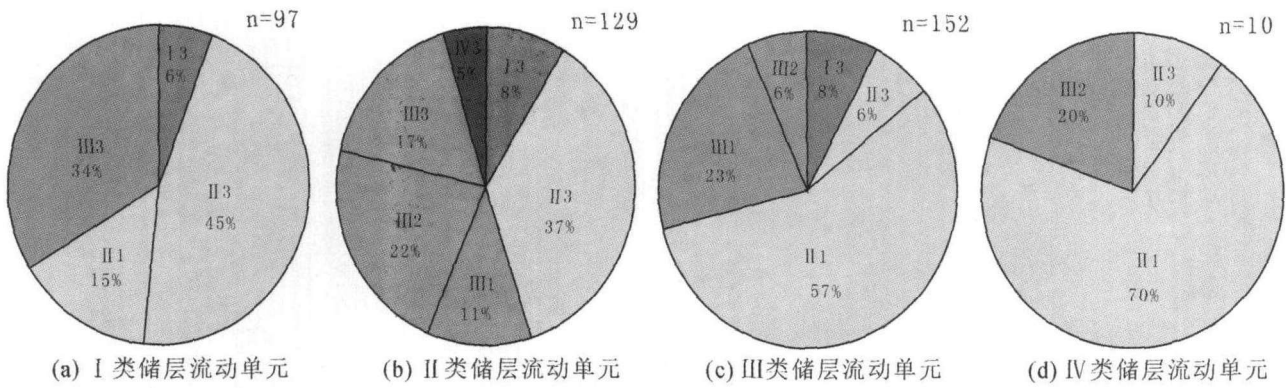


图6 火山岩储层流动单元岩相特征

IV3-外带亚相,其它同图2

Fig. 6 Characteristics of volcanic facies of reservoir flow unit of well XS1-2 and surrounding area

IV3-outer extrusive subfacies, the other subfacies see Fig. 2

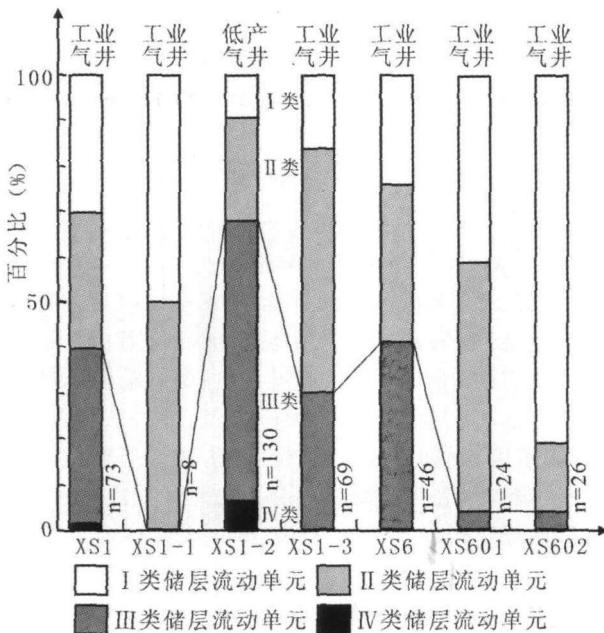


图7 XS1井区火山岩储层流动单元类型与产气情况对比

Fig. 7 Comparison between different types of volcanic reservoir flow units and gas productive in well XS1 and surrounding area

该井就可能成为工业气井,当其含量低于30%时该井就可能成为低产气井。图7中各井样品仅是岩心样本,对于储层钻井取心主要针对孔隙条件较好的层段,所以除了全取心XS1-2井外,其它井的I类、II类单元当前比例可能比实际比例要大。根据XS1-2井可知当位于气水界面之上的I类、II类单元少于30%时其储层和渗流条件较差,成为工业气井的机率变小。

此外, XS1井区的火山机构是流纹质碎屑岩类型,而松辽盆地营城组中还发育流纹质复合火山机构、流纹岩火山机

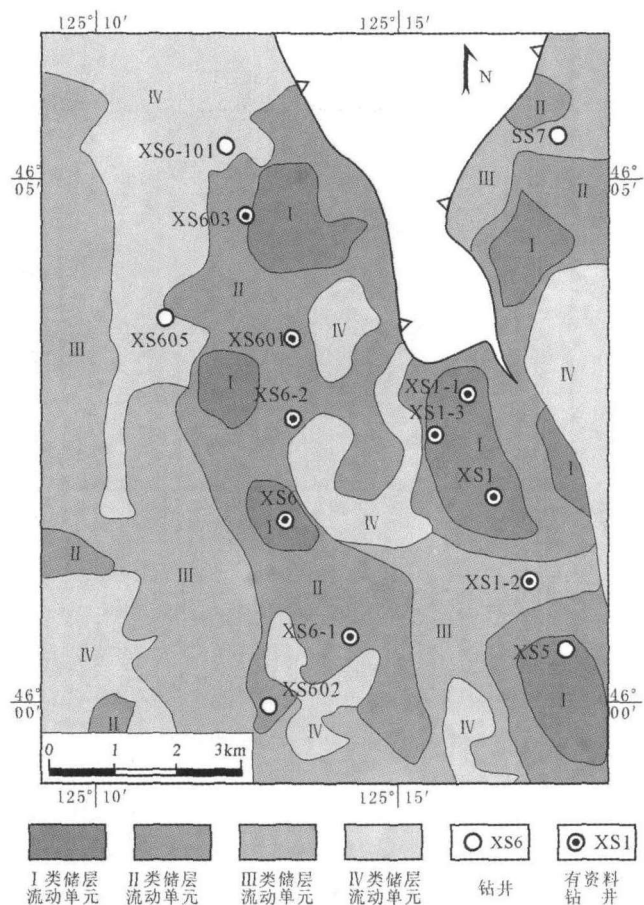


图8 XS1井区营城组上部火山岩储层流动单元分布特征

Fig. 8 Distribution characteristics of volcanic reservoir flow unit of upper K<sub>1y</sub> of well XS1 and surrounding area

构和玄武岩火山机构(王璞珺等,2007;唐华风等,2007),这些火山机构的孔隙特征与流纹质碎屑岩火山的孔隙特征存在较大差别,它们的储层流动单元特征应该与XS1井区存在一定差别。



### 5.3 储层流动单元的平面分布特征

根据火山岩相、火山机构与储层流动单元的关系,利用岩相、火山机构和有效储层地震属性识别成果进行储层流动单元半定量判别。图8表明XS1井区营城组上部火山岩气藏存在多套流动单元组合。横向上常存在储层流动单元类型不连续的变化关系,说明火山岩储层在横向上储层非均质性较强。与取心段储层流动单元类型相比,图8中IV类的比例要高出一个量级,这与取心目的有关,因为取心段多集中在孔渗条件较好的层段,所以孔渗条件不好的IV类储层流动单元的比例偏低,而孔渗条件好的比例偏高。

## 6 结论

(1)根据孔隙度、渗透率、储层品质、流动层带指数4个参数进行聚类分析,通过对聚类结果与各井产气情况的对比将储层流动单元划分为4类。I类、II类、III类、IV类储层流动单元所占比例分别为25.0%、33.2%、39.2%、2.6%。

(2)I类储层流动单元多为高孔高渗、高孔中渗和中孔高渗储层,厚度范围为10~20m;II类储层流动单元多为中孔高渗、高孔中渗和低孔高渗储层,厚度范围为10~47m;III类储层流动单元多为中孔高渗、中孔低渗和低孔中渗储层,厚度范围为11~86m;IV类储层流动单元为低孔低渗和特低孔特低渗储层,厚度小于10m。

(3)火山机构各相带和火山岩各亚相成为各类储层流动单元的机率不同,对各类储层流动单元的贡献也不同。所以火山岩储层流动单元发育和分布受火山机构相带和火山岩亚相的控制。表现为火山口-近火山口相带成为I、II类储层流动单元的机率最大,近源相带成为II、III类储层流动单元的机率最大。远源相带成为III类储层流动单元的机率最大。原生气孔发育的上部亚相和粒间孔发育的热碎屑流亚相形成I类储层流动单元的机率最大,原生孔隙不发育的空落亚相和下部亚相形成III类储层流动单元的机率大。

**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。黄玉龙、高有峰、闵飞琼、杨帝、杨波、王力圆和袁伟参加了相关工作。

## References

Bhattacharya S, Byrnes AP, Watney WL and Doveton JH. 2008. Flow unit modeling and fine-scale predicted permeability validation in Atokan sandstones: Norcan East field, Kansas. AAPG Bulletin, 92(6):709-732  
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, Shandong. Acta Petrologica Sinica, 15(1):129-136(in Chinese with English abstract)  
Chen C, Zhang JL, Zhong AY, Guo KL and Liu X. 2003. The reservoir flow units and water flooded status in the Matouzhuang oil field, Jiangsu Province. Geoscience, 17(3):331-336(in Chinese with English abstract)  
Desouky SEM. 2005. Predicting permeability in un-cored intervals wells using hydraulic flow unit approach. Journal of Canadian Petroleum Technology, 44(7):55-58  
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  
Hamlin HS, Dutton SP and Seggie D. 1996. Depositional controls on reservoir properties in a braid-delta sandstone, Tirrawarra oil field. South Australia. AAPG Bulletin, 80(2):139-156  
Hearn CL, Ebanks WJ and Ranganath V. 1984. Geological factor influencing reservoir performance of the Hartzog Draw field, Wyoming. Journal of Petroleum Technology, 36(9):1335-1344  
Hu WX, Zhu DY, Chen QC, Wang XP and Cao XW. 2006. A new method for flow unit division and its application in Linnan oil field. Earth Science—Journal of China University of Geoscience, 31(2):191-200(in Chinese with English abstract)  
Jia CZ, Zhao WZ, Zou CN, Feng ZQ, Yuan XJ, Chi YL, Tao SZ and Xue SZ. 2007. Geological theory and exploration technology for lithostratigraphic hydrocarbon reservoirs. Petroleum Exploration and Development, 34(3):257-272(in Chinese with English abstract)  
Kramers W. 1994. Integrated reservoir characterization: Form the well to the numerical model. Proceedings - World Petroleum Congress, 14(2):287-296  
Sun XD, Suo LM, Zhang MZ and Wang PJ. 2005. Progress of reservoir research by the technology of laser confocal scanning microscope analysis in the Daqing exploration area. Acta Petrologica Sinica, 21(5):1479-1488(in Chinese with English abstract)  
Tan CQ, Song ZQ, Wu SB, Qiao M, Zhang WF and Wang ZY. 2002. Flow units of the Block Bo-21 sandstone reservoir in the Gudao oilfield, Jiyang depression. Geological Review, 48(2):330-334(in Chinese with English abstract)  
Tang HF, Xu ZS, Wang PJ, Shu P, Huang YL, Bian WH and Ding RX. 2007. Facies quantitative model and characteristics of reservoirs flow unit of buried volcanic edifice of Yingcheng Formation in Songliao Basin, Cretaceous, NE China. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 37(6):1074-1082(in Chinese with English abstract)  
Tang HF, Pang YM, Bian WH, Wang PJ, Ding RX and Min FQ. 2008. Reservoirs quantitative analysis of volcanic edifice of Yingcheng Formation in Songliao Basin, Early Cretaceous, NE China. Acta Petrologica Sinica, 29(6):841-845(in Chinese with English abstract)  
Ti GM, Inteq BH and Ogbe DO. 1995. Use of flow units as a tool for reservoir description: A case study. SPE, 10(2):122-128  
Tian L, Li J, He SL, Gu DH, Tu B and Lan CL. 2005. Application of the division method of reservoir flow unit in Sulige gas field. Natural Gas Industry, 25(10):44-46(in Chinese with English abstract)  
Wang PJ, Wu HY, Pang YM, Men GT, Ren YG, Liu WZ and Bian WH. 2006. Volcanic facies of the Songliao Basin: Sequence, model and the quantitative relationship with porosity & permeability of the volcanic reservoir. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 36(5):805-812(in Chinese with English abstract)  
Wang PJ, Pang YM, Tang HF, Huang YL and Zheng CQ. 2007. The characteristics of the paleo-volcanic edifice of Yingcheng Formation, Cretaceous, Songliao Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 37(6):1064-1073(in Chinese with English abstract)  
Zhao HQ. 2001. Recognition and advice on the study of reservoir flow unit. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 20(1):8-10(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
- 陈程,张建良,钟思瑛,郭康良,刘辛. 2003. 江苏码头庄油田储层流动单元与水淹状况分析. 现代地质, 17(3):331-336
- 胡文瑄,朱东亚,陈庆春,王秀鹏,曹学伟. 2006. 流动单元划分新方案及其在临南油田的应用. 地球科学—中国地质大学学报, 31(2):191-200
- 贾承造,赵文智,邹才能,冯志强,袁选俊,池英柳,陶士振,薛叔浩. 2007. 岩性地层油气藏地质理论与勘探技术. 石油勘探与开发, 34(3):257-272
- 孙先达,索丽敏,张民志,王璞珺. 2005. 激光共聚焦扫描显微检测技术在大庆探区储层分析研究中的新进展. 岩石学报, 21(5):1479-1488
- 谭成仟,宋子齐,吴少波,乔明全,张伟锋,王志勇. 2002. 济阳拗陷孤岛油田渤21断块砂岩油藏流动单元研究. 地质论评, 48(2):330-334
- 唐华风,徐正顺,王璞珺,舒萍,黄玉龙,边伟华,丁日新. 2007. 松辽盆地白垩系营城组埋藏火山机构岩相定量模型及储层流动单元特征. 吉林大学学报(地球科学版), 37(6):1074-1082
- 唐华风,庞彦明,边伟华,王璞珺,丁日新,闵飞琼. 2008. 松辽盆地白垩系营城组火山机构储层定量分析. 石油学报, 29(6):841-845
- 田冷,李杰,何顺利,顾岱鸿,涂彬,兰朝利. 2005. 储层流动单元划分方法在苏里格气田的应用. 天然气工业, 25(10):44-46
- 王璞珺,吴河勇,庞彦明,门广田,任延广,刘万洙,边伟华. 2006. 松辽盆地火山岩相:相序、相模式与储层物性的定量关系. 吉林大学学报(地球科学版), 36(5):805-812
- 王璞珺,庞彦明,唐华风,黄玉龙,郑常青. 2007. 松辽盆地白垩系营城组古火山机构特征. 吉林大学学报(地球科学版), 37(6):1064-1073
- 赵翰卿. 2001. 对储层流动单元研究的认识与建议. 大庆石油地质与开发, 20(1):8-10