

文章编号: 0253-2697(2008)06-0841-05

# 松辽盆地白垩系营城组火山机构储层定量分析

唐华凤<sup>1</sup> 庞彦明<sup>2</sup> 边伟华<sup>1</sup> 王璞珺<sup>1</sup> 闵飞琼<sup>1</sup> 叮新<sup>2</sup>

(1 吉林大学地球科学学院 吉林长春 130061; 2 大庆油田勘探开发研究院 黑龙江大庆 163712)

**摘要:** 根据火山岩形态和内部结构, 将松辽盆地白垩系营城组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。基于304个钻井岩样的孔隙度、渗透率和压汞法毛细管压力曲线资料, 对火山机构3个相带的储层特征分析结果表明, 火山口—近火山口相带的储层具有大孔隙、宽长裂缝、孔喉半径大、孔喉分选好的特征, 实测孔隙度为2%~25%, 平均为7.74%, 实测渗透率为 $(0.01\sim 100)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ , 平均为 $1.99\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ , 属于中孔高渗储层, 局部为高孔高渗储层。近源相带的储层具有中等孔隙、窄小裂缝、孔喉半径较大、孔喉分选较好的特征, 实测孔隙度为1%~15%, 平均为7.47%, 实测渗透率为 $(0.01\sim 20)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ , 平均为 $0.95\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ , 属于中孔中渗储层, 局部为中孔高渗储层。远源相带的储层具有中小孔隙、宽长裂缝、孔喉半径小、孔喉分选差的特征, 实测孔隙度为1%~10%, 平均为6.95%, 实测渗透率为 $(0.02\sim 1)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ , 平均为 $0.13\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ , 属于中低孔低渗储层。目前火山岩勘探的有利目标为火山口—近火山口相带。

**关键词:** 松辽盆地; 火山机构相带; 火山岩储层; 宏观特征; 微观结构

中图分类号: TE112.23

文献标识码: A

## Quantitative analysis on reservoirs in volcanic edifice of Early Cretaceous Yingcheng Formation in Songliao Basin

TANG Huafeng<sup>1</sup> PANG Yanming<sup>2</sup> BIAN Weihua<sup>1</sup> WANG Pujun<sup>1</sup> MIN Feiqiong<sup>1</sup> DING Rixin<sup>2</sup>

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

2. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Daqing Oilfield Company Limited, Daqing 163712, China)

**Abstract** According to occurrence, lithological association of volcanic rocks and volcanic facies composition in the Early Cretaceous Yingcheng Formation of Songliao Basin, the volcanic edifice was classified into three kinds of crater-near crater facies belt, proximal facies belt and distal facies belt. The reservoir characteristics in each facies belt of volcanic edifice were analyzed using the parameters of porosity, permeability and mercury-injection capillary pressure curve from 304 drilling samples. The reservoir in the crater-near crater facies belt is characterized by big pore, wide and long fracture, big pore-throat radius and pore-throat well-sorted. The measured porosity ranges from 2% to 25%, and the average value is 7.74%. The range of permeability is from  $0.01\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$  to  $100\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ , and the average value is  $1.99\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ . In the crater-near crater facies belts, most reservoir is characterized by middle porosity and high permeability, the local parts are the reservoir with high porosity and high permeability. The reservoir in the proximity facies belt is of the properties of middle pore, narrow and small crack, middle pore-throat radius and pore-throat slightly well-sorted. The range of porosity is from 1% to 15%, and the average value is 7.47%. The range of permeability is from  $0.01\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$  to  $20\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ , and the average value is  $0.95\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ . The proximal facies belt mostly is the reservoir with middle porosity and permeability. Some part of the belt is the reservoir with middle porosity and high permeability. The distal facies belt is the reservoir with middle-small pore, wide and long crack, small pore-throat radius and pore-throat bad-sorted. The range of porosity is from 1% to 10%, and the average value is 6.95%. The range of permeability is from  $0.02\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$  to  $1.0\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ , and the average value is  $0.13\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ . The distal facies belt is the reservoir with middle-small porosity and low permeability. The crater-near crater facies belt is the preferable target for volcanic reservoir exploration.

**Key words:** Songliao Basin; Facies belts of volcanic edifice; volcanic reservoirs; macroscopical characteristics; micro structure

营城组火山岩是松辽盆地北部深层的主要储层, 其探明天然气储量约占松辽盆地北部深层总储量的90%, 展示了火山岩勘探的良好前景。目前, 在火山岩

储集空间类型、孔缝组合特征<sup>[1-2]</sup>、孔隙微观特征<sup>[3]</sup>和孔隙发育演化及控制因素<sup>[4-7]</sup>等方面取得了丰富的研究成果, 为松辽盆地深层火山岩勘探提供了一定的理

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2006CB701403)和国家自然科学基金项目(No. 40372066)联合资助。

作者简介: 唐华凤, 男, 1979年6月生, 2007年获吉林大学博士学位, 现为吉林大学讲师, 主要从事火山岩储层地质地球物理识别研究。

E-mail: tanghfhc@163.com

©1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

论支持。在早期勘探中总结出的寻找有利岩性和岩相区带的成功经验<sup>[8-11]</sup>被应用于火山岩有利区带预测和评价中,加快了火山岩勘探开发进程<sup>[12-13]</sup>。

近年来的勘探又发现,钻井位置离火山口越近成藏的几率越大,越远成藏的几率就越小。这为火山岩勘探提供了一个重要线索,即寻找火山机构中心相带<sup>[14-15]</sup>,这与北海盆地寻找火山口的勘探经验相同<sup>[16]</sup>。但目前对于火山机构各相带之间成藏效益的差异还不清楚,所以需要开展火山机构成藏机理研究,其中火山机构相带划分和各相带储层定量分析是其研究基础。

笔者从九台地区营城组火山岩野外露头火山机构的形态、地层产状、岩性、岩相、孔隙裂缝特征入手,

结合钻井资料揭示盆地内火山机构的形态特征,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。在此基础上,进行了各相带的储层宏观和微观特征的定量分析。

## 1 火山机构相带的岩性和岩相特征

火山口—近火山口相带的特征岩性为角砾/集块熔岩、隐爆角砾岩和珍珠岩,特征岩相为火山通道相、侵入相(表1),该相带的火山岩具有厚度大、倾角大、延伸距离小的特征。近源相带的特征岩性为晶屑、岩屑、浆屑凝灰熔岩,特征岩相为楔状和块状喷溢相(具高角度流纹构造)、爆发相(具假流纹构造),该相带火山岩厚度中等、倾角大、延伸较远。远源相带的特征岩

表1 松辽盆地火山机构各相带岩性岩相特征

Table 1 Characteristics of each facies belt of volcanic edifice in Songliao Basin

火山机构相带	岩石类型	特征岩石结构	特征岩石构造	特征岩相	形状	厚度/m	平面延伸/km
火山口—近火山口相带	珍珠岩, 隐爆角砾岩, 熔岩, 角砾熔岩, 凝灰熔岩, 集块岩	隐爆角砾结构, 堆砌结构, 集块结构	岩球构造, 岩枕构造, 高角度流纹构造, 假流纹构造, 变形流纹构造, 块状构造, 气孔杏仁构造, 粒序层理	火山通道相, 侵入相	丘状和穹隆状	100~200	0.5~1.5
近源相带	晶屑、岩屑、浆屑凝灰熔岩	熔结角砾结构, 熔结凝灰结构	高角度流纹构造, 假流纹构造, 气孔杏仁构造	喷溢相、爆发相	楔状和块状	50~100	1~3
远源相带	沉火山碎屑岩, 凝灰岩, 凝灰熔岩	碎屑结构, 凝灰结构	平行层理, 交错层理	火山沉积相, 爆发相	层状和块状	20~50	1~2

注: 据文献<sup>[15]</sup>修改。

性有层状火山碎屑岩、沉火山碎屑岩和平缓层状凝灰熔岩,特征岩相为具层理的火山沉积相和爆发相,该相带的火山岩厚度薄、倾角小、延伸范围大。总体而言,火山口—近火山口相带火山岩在横向和纵向变化快,远源相带火山岩在横向和纵向上分布较稳定。

## 2 火山机构各相带储层宏观特征

### 2.1 火山口—近火山口相带

该相带主要发育大气孔[图1(a)]、气孔被充填后的残余孔、杏仁体内孔和角砾间孔。气孔中充填物常为自形石英或方解石,气孔直径最大为30cm,面孔率为20%(表2)。气孔常具有拉长特征,沿高角度流纹理定向分布。发育的裂缝主要为炸裂缝、构造缝和脱玻化产生的微裂缝,少量溶蚀缝,裂缝线密度为10~30条/m,面缝率可达15%,裂缝方向杂乱[图1(b)]。其中炸裂缝有两种:①隐爆角砾岩中的枝杈状、放射状、脉状裂缝,该类裂缝具有延伸长度大(数米)、宽度大(最宽达10cm)、充填程度高的特征;②角砾熔岩中不规则裂缝,该类裂缝延伸长度小、宽度小、充填程度低。前者成为良好运移通道的可能性更大。

### 2.2 近源相带

该相带主要发育小气孔和晶间孔,气孔直径为2mm[图1(c)],分布较均匀,形状为近圆状或拉长状,充填程度低,沿低角度流纹分布,面孔率为15%。发育的裂缝主要为构造缝、炸裂缝和溶蚀缝,裂缝线密度为3~25条/m,面缝率可达5%,裂缝方向较杂乱。其中,构造缝延伸差、形状不规则、密度小、分布不均且充填程度中等;炸裂缝常见于长石和石英晶屑中,具有延伸长度极小、缝宽极小、充填程度低的特征。

### 2.3 远源相带

该相带发育少量微气孔和溶蚀孔,面孔率一般为2%~3%,局部可达10%。主要发育高角度构造裂缝,裂缝线密度为2~11条/m,面缝率可达5%,方向为东西向和近东西向[图1(d)]。裂缝具有延伸长度大(30m)、宽度大、充填程度低的特征,在垂向上具有良好的导通性能,可能是火山岩中的重要运移通道。

## 3 火山机构各相带储层微观特征

本次研究的样品采集于SP-XC地区(图2)。根据取样井位置、样品岩性岩相特征分析可知,所采集的

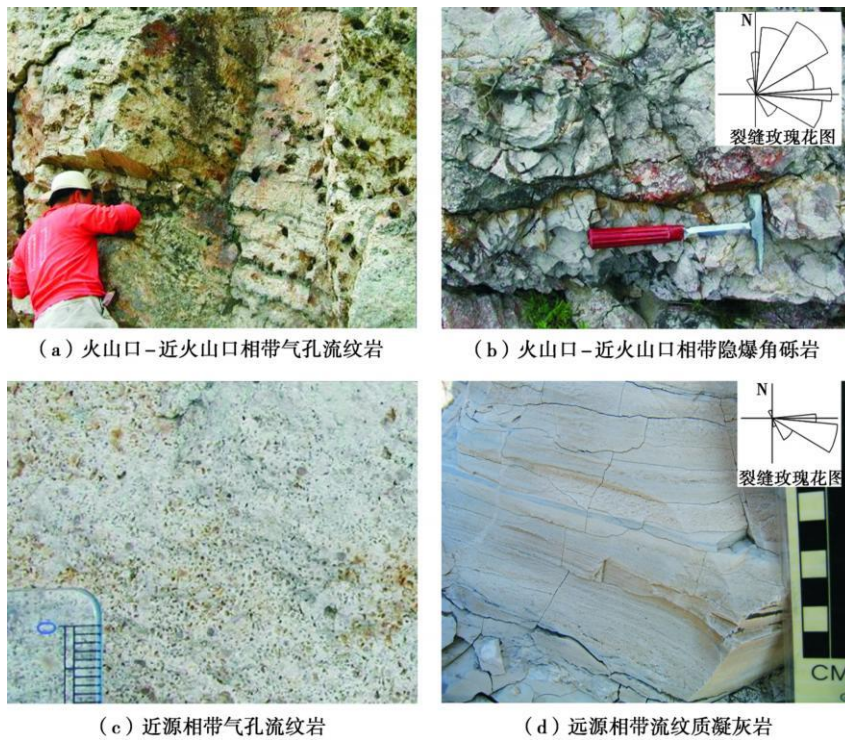


图 1 火山机构各相带储层典型特征

Fig. 1 Typical characteristics of reservoirs in each facies belt of volcanic edifice

表 2 松辽盆地火山机构各相带储层特征

Table 2 Reservoir characteristics of each facies belt of volcanic edifice in Songliao Basin

火山机构相带	储集空间类型	孔隙直径/cm	裂缝特征	裂缝线密度/(条·m <sup>-1</sup> )	孔隙度/%	渗透率/(10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup> )	孔喉半径最大值/μm	孔喉半径平均值/μm	分选系数
火山口-近火山口相带	大气孔、气孔被充填后的残余孔、杏仁体内孔和砾间孔, 炸裂缝、构造缝和脱玻化产生的微裂缝, 少量溶蚀缝	30	枝杈状、放射状、脉状裂缝, 密度大、延伸长-短、宽度大-小, 充填程度高-低, 方向杂乱	10~30	$\frac{2}{7.74} \sim \frac{25}{7.74}$	$\frac{0.01}{1.99} \sim \frac{100}{1.99}$	$\frac{0.02}{1.49} \sim \frac{20.8}{1.49}$	$\frac{0.09}{0.38} \sim \frac{6.03}{0.38}$	$\frac{0.34}{1.81} \sim \frac{3.88}{1.81}$
近源相带	小气孔和晶间孔, 构造缝、炸裂缝和溶蚀缝	0.2	形状不规则, 密度小、充填程度中-低, 方向杂乱	3~25	$\frac{1}{7.47} \sim \frac{15}{7.47}$	$\frac{0.01}{0.95} \sim \frac{20}{0.95}$	$\frac{0.02}{0.55} \sim \frac{15.0}{0.55}$	$\frac{0.01}{0.19} \sim \frac{4.57}{0.19}$	$\frac{0.38}{1.5} \sim \frac{3.52}{1.5}$
远源相带	微气孔、溶蚀孔和高角度构造裂缝	< 0.1	形状规则, 密度小、延伸长、宽度大、充填程度低, (近) 东西向	2~11	$\frac{1}{6.95} \sim \frac{10}{6.95}$	$\frac{0.02}{0.13} \sim \frac{1}{0.13}$	$\frac{0.02}{0.5} \sim \frac{6.2}{0.5}$	$\frac{0.018}{0.16} \sim \frac{1.6}{0.16}$	$\frac{0.63}{1.47} \sim \frac{2.7}{1.47}$

注: 表中分数的分子表示范围值, 分母表示平均值。

304 个样品中, 火山口-近火山口相带样品为 201 个, 近源相带为 80 个, 远源相带为 23 个。样品的孔隙度、渗透率在大庆油田有限责任公司勘探开发研究院中心化验室测定, 执行中华人民共和国石油天然气行业标准—SY/T 5336-199《岩心常规分析方法》, 测试仪器是 QYS-II 型全直径岩心渗透率测定仪和电子天平, 检验环境温度为 25 °C, 环境湿度为 65%。压汞法毛管压力曲线在大庆油田有限责任公司勘探开发研究院流体力学实验室测定, 执行中华人民共和国石油天然气行业标准—SY/T 5346-2005《岩石毛管压力曲线的测

定》, 测试仪器是 AutoPore III 9405 水银孔隙仪和电子天平, 检测环境温度为 21 ~ 22 °C, 环境湿度为 35% ~ 40%。

### 3.1 孔隙度和渗透率特征

由表 2 和图 3 可知, 火山口-近火山口相带属于中孔高渗储层, 局部为高孔高渗储层, 储层物性最好; 近源相带属于中孔中渗储层, 局部为中孔高渗储层, 储层物性较好; 远源相带属于中、低孔低渗储层, 储层物性较差。

需要说明的是, 由于测试方法的限制, 宽大的构造

裂缝不能出现在被测试的样品中, 因此渗透率测试结果只能代表岩石本身的渗透性, 不代表含裂缝地层的

能破碎, 无法取到反映真实孔隙的测试样品, 也不能反映岩石真实孔隙度。所以, 在火山口—近火山口相带应该存在孔隙度更大的储层。

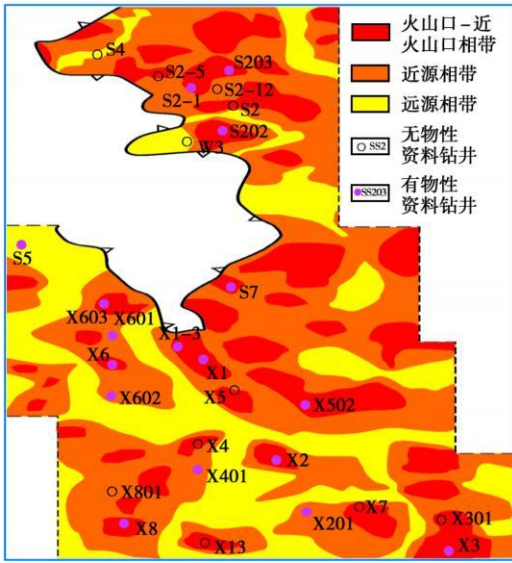


图2 SP-XC地区火山机构分布

Fig. 2 Distribution of volcanic edifices in SP-XC area

渗透性。在火山口—近火山口相带和远源相带存在宽大构造裂缝, 即在这2个相带应存在渗透性极好的区域, 所以在远源相带应该存在中、低孔极高渗的储层。同时, 具有大气孔的火山岩[图1(a)]在取心时岩心可

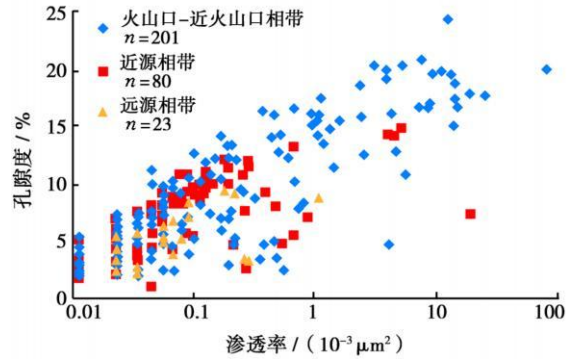


图3 火山机构各相带孔隙度和渗透率特征

Fig. 3 Characteristics of porosity and permeability in each facies belt of volcanic edifice

### 3.2 孔喉特征

从表2和图4(a)可知, 火山口—近火山口相带主要为小孔喉型, 仅局部地区存在大孔喉型; 近源相带以小孔喉型为主; 远源相带以微孔喉型为主, 偶见大孔喉型。根据孔喉半径最大值可知, 火山口—近火山口相带的渗透性能好于近源相带, 而远源相带最差。

从表2和图4(b)可知, 火山口—近火山口相带的

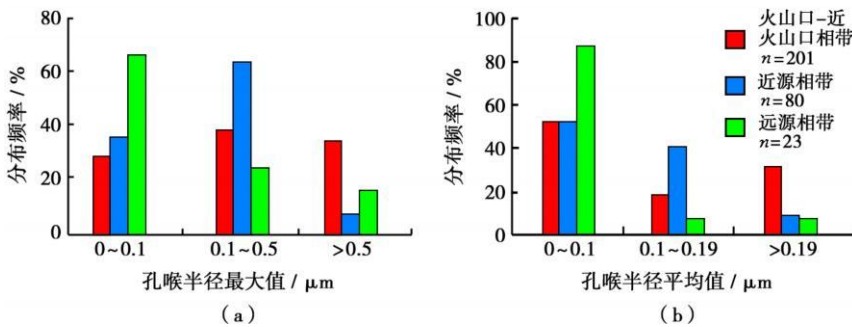


图4 火山机构各相带孔喉特征

Fig. 4 Characteristics of pore-throat radius in each facies belt of volcanic edifice

孔喉半径均值小, 仅局部地区均值大; 近源相带的孔喉半径平均值更小, 偶见高值; 远源相带的孔喉半径平均值最小。根据孔喉半径平均值参数可知: 火山口—近

火山口相带的渗透性能好于近源相带, 远源相带最差。

### 3.3 喉道分选特征

从表2和图5(a)可知, 火山岩储层的孔喉大小不

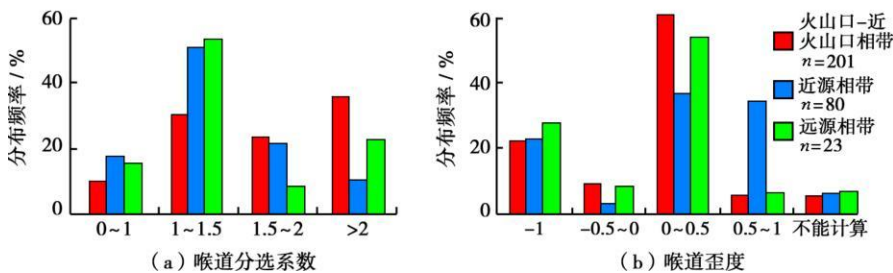


图5 火山机构各相带喉道分选特征

Fig. 5 Characteristics of pore-throat sorting in each facies belt of volcanic edifice

均一。相比较而言, 火山口—近火山口相带的孔喉大小均一性好, 渗透性能好; 近源相带和远源相带的孔喉大小均一性较差, 渗透性能较差。

由图 5(b)可知, 统计数据中歪度  $Sk_p > 0$  的比例较大, 表明火山岩储层喉道偏粗。相比较而言, 近源相带喉道最粗, 火山口—近火山口相带次之, 远源相带的喉道最细。所以, 近源相带储集性能最好, 火山口—近火山口相带储集性能较好, 远源相带储集性能较差。

从图 6 可知, 火山口—近火山口相带有利于成藏。从其储层特征和运移通道来看, 该相带具有良好的储集空间, 尤其是渗透性能好使之成为有效储层的几率变大。同时, 该区域由于存在火山通道, 往往发育丰富的基底断层和构造裂隙, 将下伏烃源岩层与有利储层导通, 有利于成藏。近源相带和远源相带则可能是由于渗透性能较差和缺少与烃源岩连通的断层或裂隙使其成藏几率变小。

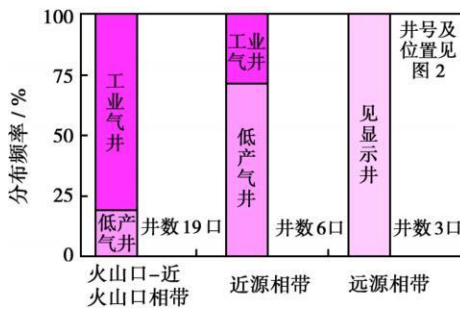


图 6 火山机构各相带钻井天然气产能特征

Fig. 6 Characteristics of gas productivity in each facies belt of volcanic edifice

## 4 结论

(1) 火山口—近火山口相带的储层具有大孔隙、宽长裂缝、孔喉半径大、孔喉分选性好的特征, 属于中孔高渗储层, 局部为高孔高渗储层; 近源相带的储层具有中等孔隙、窄小裂缝、孔喉半径较大、孔喉分选性较好的特征, 属于中孔中渗储层, 局部为中孔高渗储层; 远源相带的储层具有中小孔隙、宽长裂缝、孔喉半径小、孔喉分选差的特征, 属于中低孔低渗储层。

(2) 火山机构 3 个相带相比较: 火山口—近火山口相带储层物性最好, 可作为火山岩勘探的首选目标; 近源相带储层物性较好, 可作为备选目标; 远源相带多属于低孔低渗储层, 目前是勘探的高风险区。

### 参考文献

[1] 刘为付. 松辽盆地徐家围子断陷深层火山岩储层特征及有利区预测[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(1): 115-119.

prediction of favorable areas in Xujiaweizi fault depression in Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(1): 115-119.

[2] 刘万洙, 王璞珺, 门广田, 等. 松辽盆地北部深层火山岩储层特征[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(1): 28-31.

Liu Wanzhu, Wang Pujun, Men Guangtian, et al. Characteristics of deep volcanic reservoirs in the northern Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(1): 28-31.

[3] 庞彦明, 章凤奇, 邱红枫, 等. 酸性火山岩储层微观孔隙结构及物性参数特征[J]. 石油学报, 2007, 28(6): 72-77.

Pang Yanming, Zhang Fengqi, Qiu Hongfeng, et al. Characteristics of microscopic pore structure and physical property parameter in acidic volcanic reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(6): 72-77.

[4] 郑亚斌, 王延斌, 冉启全. 枣 35 断块火山岩储层特征研究[J]. 石油学报, 2006, 27(4): 54-58.

Zheng Yabin, Wang Yanbin, Ran Qiquan. Investigation on characteristics of volcanic reservoir in Zao35 Block[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(4): 54-58.

[5] 罗静兰, 曲志浩, 孙卫, 等. 风化店火山岩岩相、储集性与油气的关系[J]. 石油学报, 1996, 17(1): 32-39.

Luo Jinglan, Qu Zhihao, Sun Wei, et al. The relations between lithofacies, reservoir lithology and oil & gas of volcanic rocks in Fenghuadian area[J]. Acta Petrolei Sinica, 1996, 17(1): 32-39.

[6] Luo Jinglan, Zhang Chengli, Qu Zhihao. Volcanic reservoir rocks: A case study of the Cretaceous Fenghuadian suite, Huanghua Basin, Eastern China[J]. Journal of Petroleum Geology, 1999, 22(4): 397-415.

[7] 赵海玲, 刘振文, 李剑, 等. 火成岩油气储层的岩石学特征及研究方向[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(6): 609-613.

Zhao Hailing, Liu Zhenwen, Li Jian, et al. Petrologic characteristics of igneous rock reservoirs and their research orientation[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(6): 609-613.

[8] 邵红梅, 毛庆云, 姜洪启, 等. 徐家围子断陷营城组火山岩气藏储层特征[J]. 天然气工业, 2006, 26(6): 29-32.

Shao Hongmei, Mao Qingyun, Jiang Hongqi, et al. Reservoir characteristics of volcanic rock gas pool in Yingcheng Formation in Xujiaweizi fault depression[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(6): 29-32.

[9] 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): 18-23.

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): 18-23.

[10] 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.

[11] 王璞珺, 吴勇, 庞彦明, 等. 松辽盆地火山岩相序、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.

- Zhao Weiyong, Liu Wenlong, Men Guangtian, et al. Prediction method for distribution area and thickness of hydrocarbon source rocks: Taking Xujiaweizi Depression in Songliao Basin as an example[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(5): 67-71.
- [17] 冯子辉, 刘伟. 徐家围子断陷深层天然气的成因类型研究[J]. *天然气工业*, 2006, 26(6): 18-20.
- Feng Zihui, Liu Wei. A study of genetic type of deep gas in Xujiaweizi fault depression[J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(6): 18-20.
- [18] 帅燕华, 邹艳荣, 刘金钟, 等. 煤成甲烷、乙烷碳同位素动力学研究和应用——以鄂尔多斯盆地上古生界煤成气为例[J]. *地质论评*, 2005, 51(6): 665-671.
- Shuai Yanhua, Zou Yanrong, Liu Jinzhong, et al. Carbon isotope modeling of coal-derived methane and ethane from the Upper Paleozoic of the Ordos Basin, China[J]. *Geological Review*, 2005, 51(6): 665-671.
- [19] 帅燕华, 邹艳荣, 彭平安. 塔里木盆地库车坳陷煤成气甲烷碳同位素动力学研究及其成藏意义[J]. *地球化学*, 2003, 32(5): 469-475.
- Shuai Yanhua, Zou Yanrong, Peng Ping'an. Kinetics modeling of stable carbon isotopes of coal-generated methane and its significance for gases accumulation in the Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. *Geochimica*, 2003, 32(5): 469-475.
- [20] 卢双舫. 有机质成烃动力学理论及其应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996: 54-121.
- Lu Shuangfang. Theory on kinetics of generate hydrocarbon of organic matter and its application[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996: 54-121.
- [21] 金晓辉, 林壬子, 邹华耀, 等. 松辽盆地徐家围子断陷火山活动期次与烃源岩演化[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(3): 349-355.
- Jin Xiaohui, Lin Renzi, Zou Huayao, et al. Volcanic activities and evolution of source rocks in Xujiaweizi fault depression, Songliao Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(3): 349-355.
- [22] 邵红梅, 毛庆云, 姜洪启, 等. 徐家围子断陷营城组火山岩气藏储层特征[J]. *天然气工业*, 2006, 26(6): 29-32.
- Shao Hongmei, Mao Qingyun, Jiang Hongqi, et al. Reservoir characteristics of volcanic rock gas pool in Yingcheng Formation in Xujiaweizi Fault Depression[J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(6): 29-32.
- [23] 杨辉, 张研, 邹才能, 等. 松辽盆地深层火山岩天然气勘探方向[J]. *石油勘探与开发*, 2006, 33(3): 274-281.
- Yang Hua, Zhang Yan, Zou Caineng, et al. Exploration scheme of gas in deep-seated volcanic rocks in Songliao Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2006, 33(3): 274-281.
- [24] 黄海平. 松辽盆地徐家围子断陷深层天然气同位素倒转现象研究[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2000, 25(6): 617-623.
- Huang Haiping. Isotopic reversal in natural gas: An example of deep-strata gases from Xujiaweizi Depression, Songliao Basin[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2000, 25(6): 617-623.

(收稿日期 2008-01-23 改回日期 2008-04-25 编辑 熊 英)

(上接第 845 页)

- 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.
- [12] 袁士义, 冉启全, 徐正顺, 等. 火山岩气藏高效开发策略研究[J]. *石油学报*, 2007, 28(1): 73-77.
- Yuan Shiyi, Ran Qiquan, Xu Zhengshun, et al. Strategy of high-efficiency development for volcanic gas reservoirs[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(1): 73-77.
- [13] 徐正顺, 王渝明, 庞彦明, 等. 大庆徐深气田火山岩气藏储集层识别与评价[J]. *石油勘探与开发*, 2006, 33(5): 521-531.
- Xu Zhengshun, Wang Yuming, Pang Yanming, et al. Identification and evaluation of Xushen volcanic gas reservoirs in Daqing [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2006, 33(5): 521-531.
- [14] 姜传金, 冯肖宇, 詹怡捷, 等. 松辽盆地北部徐家围子断陷火山岩气藏勘探新技术[J]. *大庆石油地质与开发*, 2007, 26(4): 133-137.
- Jiang Chuanjin, Feng Xiaoyu, Zhan Yijie, et al. New methodology to explore gas-bearing volcanic reservoir in Xujiaweizi Fault Depression of the northern Songliao Basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2007, 26(4): 133-137.
- [15] 唐华风, 王璞瑛, 姜传金, 等. 松辽盆地白垩系营城组隐伏火山机构物理模型和地震识别[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(2): 530-536.
- Tang Huafeng, Wang Pujun, Jiang Chuanjin, et al. Physical model and seismic recognition of concealed volcanic edifices of Yingcheng Formation in Songliao Basin, Cretaceous, NE China [J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(2): 530-536.
- [16] Stewart S A, Allen P J. 3D seismic reflection mapping of the Silverpit multi-ringed crater, North Sea[J]. *Bulletin of the Geological Society of America*, 2005, 117(2): 354-368.

(收稿日期 2008-01-12 改回日期 2008-03-13 编辑 王 秀)