

# 准噶尔盆地西北缘二叠系佳木河组火山岩有效储层特征与定量评价

何辉<sup>1</sup>, 李顺明<sup>1</sup>, 孔垂显<sup>2</sup>, 蒋庆平<sup>2</sup>, 周体尧<sup>1</sup>, 贾俊飞<sup>2</sup>, 杜宜静<sup>1</sup>

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 新疆油田公司勘探开发研究院, 新疆克拉玛依 834000)

**摘要:**通过地质、测井及生产动态资料综合分析,对准噶尔盆地西北缘金龙2井区二叠系佳木河组火山岩储层特征进行研究。结果表明:佳木河组火山岩有效储层岩性主要为安山质(熔结)角砾岩、安山质/玄武质角砾熔岩及安山岩等,储集空间类型以气孔、溶蚀孔为主,其次为晶间孔及砾间孔,总体表现为中低孔、低渗特低渗特征;火山岩有效储层微观孔喉特征主要表现为单峰粗态、偏粗态及双峰偏粗态的细孔喉型;应用聚类分析方法与典型 Fisher 判别方法将火山岩有效储层进一步定量细分为3类;依据火山岩有效储层定量评价方法,优选试验部署区域,现场实际应用效果显著,为火山岩油藏高效开发部署提供了有力的技术支撑。

**关键词:**准噶尔盆地; 金龙2井区; 火山岩; 有效储层; 分类评价

**中图分类号:**TE 121.1 **文献标志码:**A

**引用格式:**何辉,李顺明,孔垂显,等. 准噶尔盆地西北缘二叠系佳木河组火山岩有效储层特征与定量评价[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(2):1-12.

HE Hui, LI Shunming, KONG Chuixian, et al. Characteristics and quantitative evaluation of volcanic effective reservoir in Jiamuhe Formation of Permian, northwestern margin of Junggar Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016,40(2):1-12.

## Characteristics and quantitative evaluation of volcanic effective reservoir in Jiamuhe Formation of Permian, northwestern margin of Junggar Basin

HE Hui<sup>1</sup>, LI Shunming<sup>1</sup>, KONG Chuixian<sup>2</sup>, JIANG Qingping<sup>2</sup>, ZHOU Tiyaoyao<sup>1</sup>, JIA Junfei<sup>2</sup>, DU Yijing<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China;

2. Xinjiang Oilfield Company Research Institute of Exploration and Development, Karamay 834000, China)

**Abstract:**Based on a comprehensive analysis of geological, well-logging and production data, this paper summarized the characteristics of volcanic effective reservoir of Permian Jiamuhe Formation in Jinlong2 area, the northwestern margin of Junggar Basin. The lithology of volcanic effective reservoir mainly includes andesitic (welded) breccia, andesitic/basaltic brecciated lava and andesite. The reservoir spaces are mainly composed of stomata and dissolution pore, followed by intercrystalline pore and intergranular pore. The volcanic reservoir is totally characterized by low-medium porosity and low-extra low permeability. Using capillary pressure curves which represent different types of volcanic rock, it can be shown that the characteristics of the microscopic pore throat in effective reservoirs mainly express in fine pore type with unimodal coarse state, partial coarse state and bimodal partial coarse state. Based on the analysis and evaluation of macroscopic physical characteristics as well as microscopic pore structure, this paper further optimizes K-means clustering analysis method and typical Fisher discriminant method to set up quantitative classification and evaluation criteria and discriminant functions, which divide the volcanic effective reservoir into three types accordingly. This quantitative evaluation classification method was applied to the development test area, and yielded remarkable results. The method may provide strong technical supports for the efficient development of volcanic reservoir.

收稿日期:2015-11-15

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05010-001)

作者简介:何辉(1982-),男,工程师,博士,研究方向为油气田开发。E-mail:hui\_he@petrochina.com.cn.

**Keywords:** Junggar Basin; Jinlong2 area; volcanic; effective reservoir; classification and evaluation

在世界石油勘探与开发历程中,碎屑岩与碳酸盐岩储层常常是油气藏勘探与开发的主要对象,而埋藏相对较深的火山岩储层,因其复杂的岩性岩相特征,储层识别与分布预测存在较大难度,往往被忽视。自20世纪初以来,随着石油工业的发展与勘探开发技术不断提高,国内外火山岩油气藏勘探与开发不断获得成功,如美国、古巴、日本、加纳等国,国内大港、辽河、新疆、大庆等油田,火山岩油气藏逐步成为油气勘探开发重要领域,其储层特征成为特殊岩性储层研究的重点。目前国内外学者在火山岩岩性岩相识别、储集空间及火山岩储层测井解释模型等方面取得了极大的进展<sup>[1-16]</sup>与广泛的共识,但在储层分类方面前人研究对象多针对碎屑岩油藏,偶见火山岩气藏有效储层分类,如黄玉龙等<sup>[17]</sup>对松辽盆地徐家围子火山岩气藏开展了有效储层研究。针对火山岩油藏,在对有效储层分类评价并进一步定量预测产能方面,目前仍欠缺成熟且行之有效的方法与技术,制约了该类油藏优质储层的高效开发。针对这一难点,笔者对准噶尔盆地西北缘佳木河组火山岩储层进行研究,综合火山岩岩性岩相及其电性响应参数、微观特征、裂缝参数及生产动态,建立研究区火山岩油藏有效储层分类标准,并优选聚类分析与典型判别方法,对有效储层进行定量评价,现场实施效果显著。探索建立的火山岩油藏有效储层分类评价技术,旨在为进一步为该类油藏高效开发部署提供技术支撑,为火山岩油藏有效储层分类评价标准与技术体系的完善提供有力借鉴。

## 1 地质背景

金龙油田金龙2井区位于克拉玛依油田五区南部,距克拉玛依市东偏南约41 km。区域构造位于准噶尔盆地西北缘中拐凸起东斜坡带。中拐凸起长约80 km,宽约40 km,面积约3200 km<sup>2</sup>,总体形态为一个向东南倾没的宽缓巨型鼻状构造,东面与玛湖凹陷、达巴松凸起相连,北面与克百断裂带相邻,西面与红车断裂带相接,南面与盆1井西凹陷、沙湾凹陷相连(图1)。根据钻井及地震资料,研究区在石炭系基底之上自下而上发育的地层为:二叠系佳木河组(P<sub>1j</sub>)、上乌尔禾组(P<sub>3w</sub>);三叠系百口泉组(T<sub>1b</sub>)、克拉玛依组(T<sub>2k</sub>)、白碱滩组(T<sub>3b</sub>);侏罗系

八道湾组(J<sub>1b</sub>)、三工河组(J<sub>1s</sub>)、西山窑组(J<sub>2x</sub>)、头屯河组(J<sub>2t</sub>)和白垩系吐谷鲁群(K<sub>1tg</sub>)。其中白垩系与下伏侏罗系、三叠系与二叠系、二叠系上乌尔禾组与佳木河组为区域性地层不整合接触。侏罗系齐古组缺失,二叠系在中拐凸起高部位,缺失下乌尔禾组(P<sub>2w</sub>)、夏子街组(P<sub>2x</sub>)及风城组(P<sub>1f</sub>)等地层(图2)。

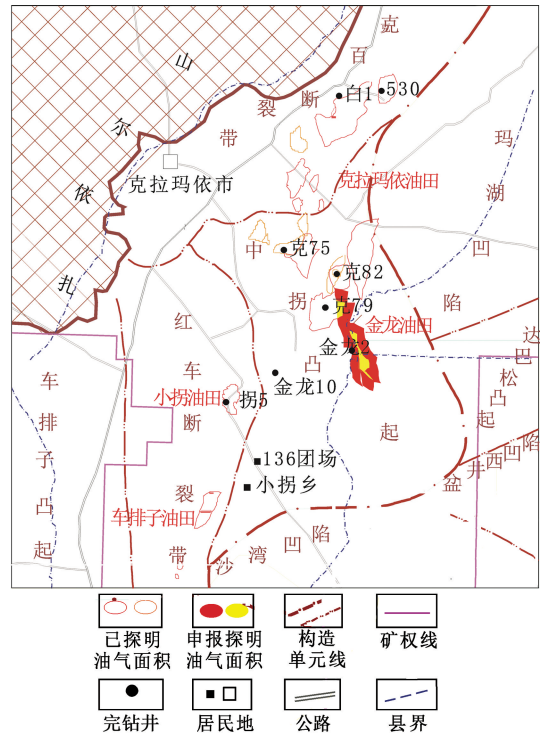


图1 区域地理位置

Fig. 1 Location map of Jinlong Oilfield

金龙2井区佳木河组(P<sub>1j</sub>)为火山岩储层,是二叠系主要含油层段,其埋藏较深,平均深度达4000 m,目前已完钻井钻遇佳木河组火山岩体厚度为22~286 m,平均为145.3 m,地震剖面显示目前评价井仅钻遇佳木河组火山岩顶部旋回地层。根据岩性及电性特征,佳木河组顶部旋回自下而上划分3个期次,第一期发育爆发相→溢流相,岩性主要为中性英安岩、安山岩、安山质熔结角砾岩、火山角砾岩;第二期以溢流相为主,局部爆发相及火山沉积相,岩性主要为中酸性流纹岩、英安岩;第三期发育溢流相→爆发相→溢流相,局部见火山沉积相,岩性主要为中性熔结角砾岩、火山角砾岩、安山岩和凝灰岩。

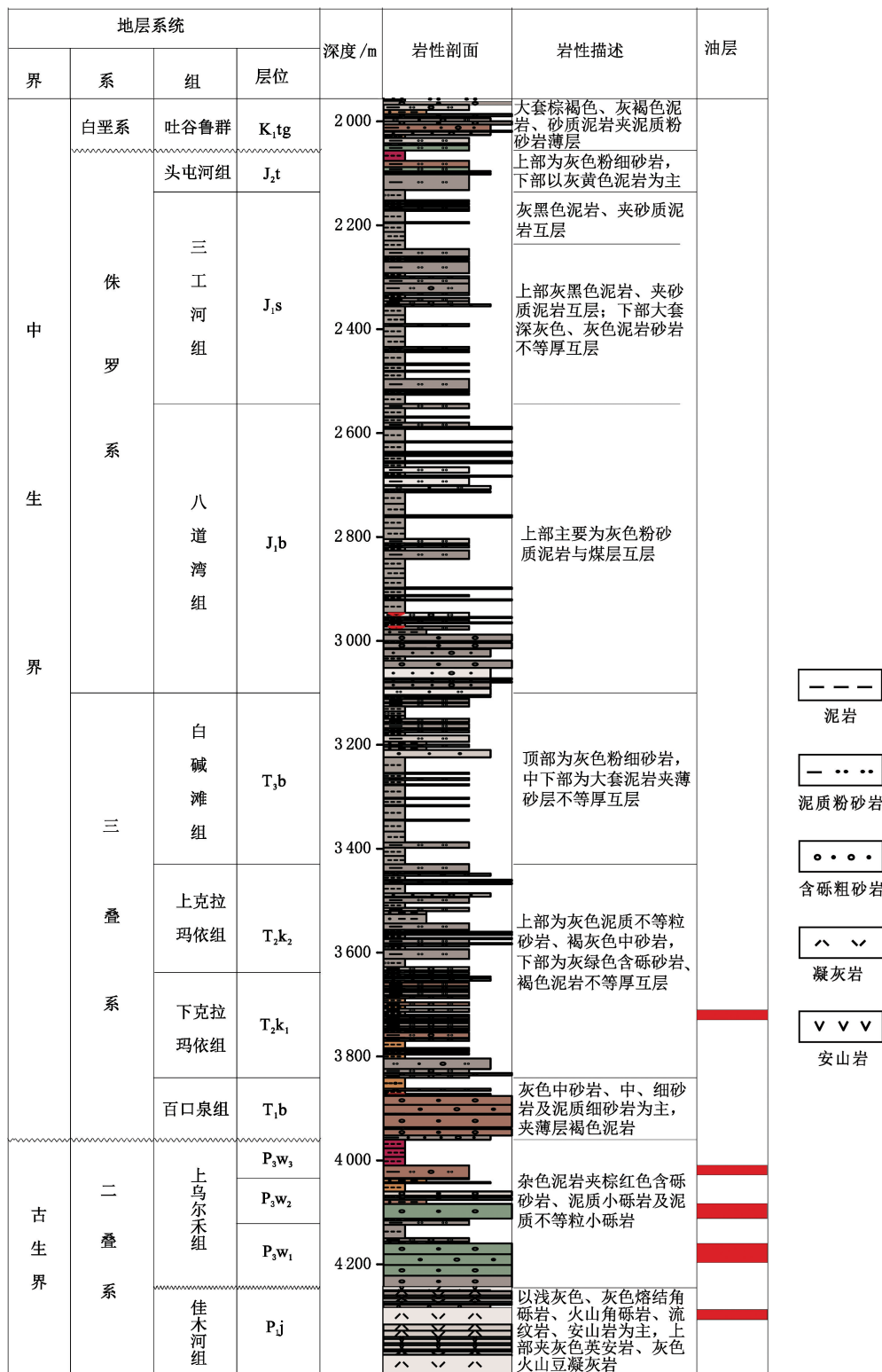


图 2 区域地层层序

Fig. 2 General stratigraphic column of study area

## 2 佳木河组火山岩有效储层特征

### 2.1 有效储层内涵

从一般意义来说,有效储层就是指具备储集与

渗流可动流体(以烃类流体为主)能力,在现阶段工艺技术及经济条件下具有工业开采价值的储集层<sup>[12,18-19]</sup>,即埋深普遍大于 3 000 m,现阶段工业油气流标准为单井下限油量 5 m<sup>3</sup>/d,气产量 10 000

m<sup>3</sup>/d。储层物性差,没有产液能力或者低于干层标准的储集层,则为无效储层。有效储层特征及其分类评价研究直接关系到油气勘探与开发决策<sup>[12]</sup>。金龙2井区火山岩油藏不同类型(基性→中性→酸性)火山岩均有发育,其储层特征存在较大差异,因此在合理确定佳木河组有效储层物性下限基础上才能对火山岩有效储层有客观的认识和评价,进而制定合理的火山岩油藏开发技术政策。

## 2.2 火山岩有效储层特征

### 2.2.1 储层岩性与物性特征

火山岩在特定的环境与条件下,各类岩性均有成为有效储层的可能性,从而造成储层较强的非均质性 & 有效储层分布的复杂性。准噶尔盆地西北缘

金龙2井区火山岩类型涵盖基性至酸性多种岩性,依据岩心观察与薄片鉴定结果,可按岩性结构分出3大类,即火山熔岩类、火山碎屑熔岩类及火山碎屑岩类。进一步按成分可细分出10种岩性,熔岩类识别出具熔岩结构的玄武岩、杏仁玄武岩、玄武安山岩、安山岩、英安岩以及流纹岩、气孔流纹岩、球粒流纹岩等;碎屑熔岩类主要识别出具熔结结构的玄武质熔结角砾岩、安山质熔结角砾岩/角砾熔岩等;火山碎屑岩类主要识别出具火山碎屑结构的安山质集块岩/角砾岩及英安质凝灰岩、流纹质晶屑凝灰岩等。此外,研究区还发育少量火山沉积岩,主要为凝灰质砂砾岩和凝灰质泥岩(图3)。

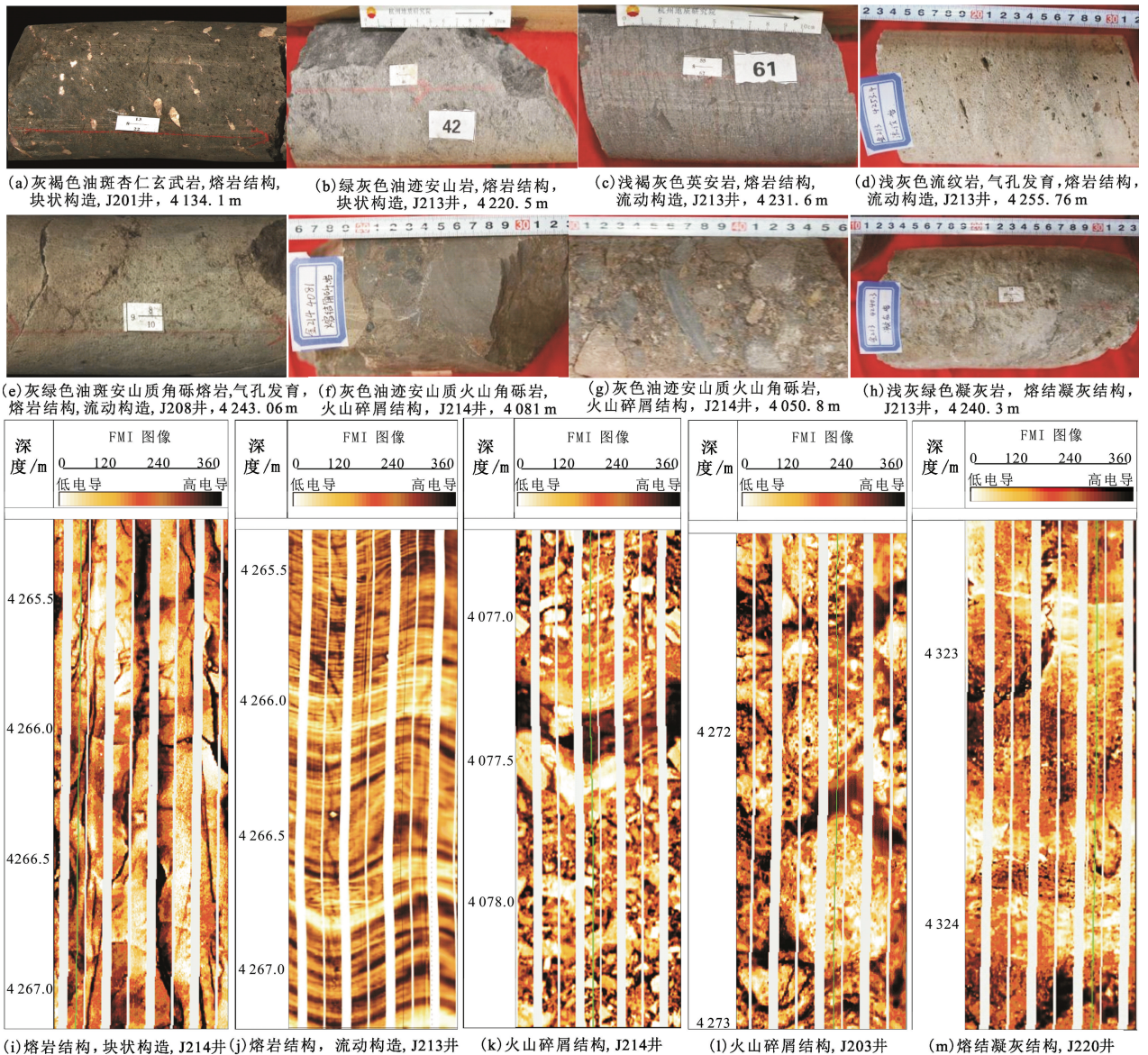


图3 金龙2井区佳木河组火山岩岩性及其结构类型

Fig.3 Volcanic lithology and its structure types of Jiamuhe Formation in Jinlong2 block

根据岩心含油性显示及试油情况,具备储集能力及工业产出标准的有效储层岩性主要为安山质(熔结)角砾岩及安山岩等(表1),其次为火山角砾岩。此外,统计研究区140块火山岩样品孔隙度分析数据,佳木河组火山岩有效储层的孔隙度一般为8%~15%,平均为11.19%。统计127块火山岩样品渗透率分析数据,有效储层渗透率一般为(0.01

$\sim 1.28) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,平均为 $0.196 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。从表2可以看出,中→基性火山碎屑熔岩(玄武质/安山质熔结角砾岩/角砾熔岩)孔渗相对较好,均值较高,火山碎屑岩类(火山角砾岩)次之,而熔岩类孔渗相对较差。总体上佳木河组火山岩有效储层表现为中—低孔、低渗—特低渗特征。

表1 金龙2井区佳木河组试油结果

Table 1 Statistic results of formation testing of Jiamuhe Formation in Jinlong2 block

井号	产油量/ ( $\text{t} \cdot \text{d}^{-1}$ )	产气量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	产水量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	试油结论	射孔层段主要岩性
J215	20.61	5260	10.25	油水同层	火山角砾岩
J215	0.18		3.40	含油水层	火山角砾岩
J301	10.60	41184		气层	安山质熔结角砾岩
J214			2.47	含油水层	火山角砾岩
JL2010	15.34	1760		油层	安山质熔结角砾岩
J208	18.38	2760		油层	火山角砾岩
J219	32.54	4430		油层	安山质熔结角砾岩
JL2002	24.17	5150	15.81	油水同层	安山质熔结角砾岩
JL2008	55.47	30610		油层	安山质火山角砾熔岩
J209	10.50	1240		油层	安山质熔结角砾岩
J209			14.30	水层	火山角砾岩
J212	14.47	1000	11.19	油水同层	安山质熔结角砾岩
J201	17.93	78319		气层	玄武质角砾熔岩
J213	18.47	3200		油层	安山质熔结角砾岩
J204			37.73	水层	火山角砾岩
JL2011	33.90	8090	6.00	油层	火山角砾岩
KE102	10.06	7858		油层	安山岩

表2 佳木河组有效储层不同岩性孔隙度与空气渗透率统计

Table 2 Statistics of porosity and permeability in different types of lithology in effective reservoir

物性	岩性						平均
	安山岩	流纹岩	英安岩	安山质熔结角砾岩/角砾熔岩	玄武质熔结角砾岩/角砾熔岩	火山角砾岩	
孔隙度 $\varphi/\%$	$\frac{3.2 \sim 11.6}{7.1}$	$\frac{6.4 \sim 13.9}{10.6}$	$\frac{3.2 \sim 9.4}{5.6}$	$\frac{2.3 \sim 22.3}{11.9}$	$\frac{8.9 \sim 20}{13.8}$	$\frac{6 \sim 14.5}{9.1}$	10.55
渗透率 $k/$ ( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	$\frac{0.01 \sim 79.6}{0.08}$	$\frac{0.01 \sim 22.6}{0.06}$	$\frac{0.01 \sim 29.5}{0.08}$	$\frac{0.01 \sim 79.6}{0.27}$	$\frac{0.03 \sim 460}{3.1}$	$\frac{0.01 \sim 425}{0.8}$	0.26

注:表中数据为  $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{平均值}}$ 。

### 2.2.2 储集空间类型与孔隙结构

佳木河组火山岩储层表现出双重介质特征,其储集空间类型以及孔隙结构的多样性也决定了火山岩储层具有较强的非均质性,影响了有效储层的分布。依据岩心描述及薄片观察,研究区火山岩储层储集空间类型包括原生孔隙、次生孔隙和裂缝3类。其中原生孔隙主要为气孔、杏仁体内孔、晶间孔和砾间孔,气孔、杏仁体内孔主要发育在熔岩流顶部的熔结角砾岩/角砾熔岩、火山角砾岩及玄武岩、安山岩内,占样品总孔隙的37%,晶间孔常见于角砾熔岩中杏仁体内沸石,分布较少;次生孔隙有溶蚀孔和晶间微孔,其中溶蚀孔主要为杏仁体内溶孔,占样品总孔隙的42%。总体来看,气孔与杏仁溶蚀孔是研究

区佳木河组火山岩储层主要孔隙类型(图4)。

依据岩心及FMI成像测井解释结果,佳木河组裂缝按成因分类主要为构造缝,且主要发育裂缝倾角大于 $45^\circ$ 的高角度裂缝,其次是溶蚀缝和冷凝收缩缝。受构造应力控制形成的高角度构造裂缝是控制研究区有效储层分布的重要影响因素,可沟通孔隙做为油气运移的主要通道。同时裂缝发育强度也严格受控于岩性,金龙2井区佳木河组裂缝主要发育在第三期次,岩性以熔结角砾岩、安山岩为主,裂缝密度 $0.5 \sim 3.8$ 条/m,裂缝宽度 $0.0028 \sim 0.11$ cm,以中等缝宽为主,裂缝发育平均层厚达到26.5m,为储层纵向与平面的有效连通提供了有利条件,扩展了有效储层及部分潜力储层的有效性(表3)。

通过试油验证,第三期油层产量普遍较高,日产油量 10.06 ~ 55.47 t,平均可达 20.4 t。第二期与第一期储层岩性以流纹岩、英安岩为主,埋藏较深,相对致密,构造应力作用减弱,裂缝相对欠发育,对储层连

通性贡献较小,试油证实以干层为主,抽汲不出或产水,基本为无效储层,因此裂缝发育特征参数可以作为评价储层有效性的标准之一。

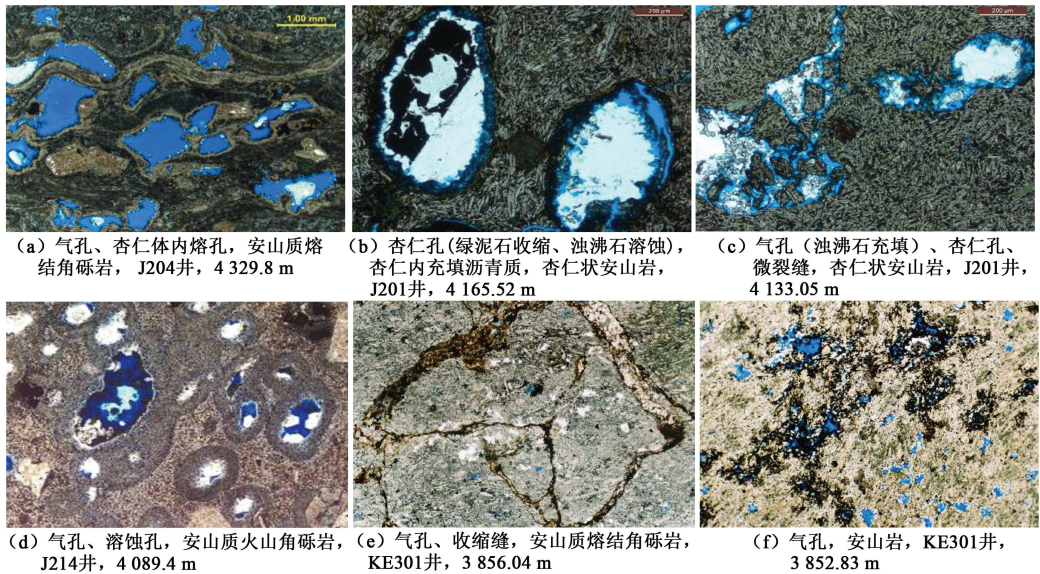


图4 金龙2井区佳木河组油层储集空间类型

Fig. 4 Different types of reservoir space of Jiamuhe Formation in Jinlong2 block

表3 金龙2井区佳木河组火山岩储层裂缝发育特征

Table 3 Characteristics of fractures in volcanic reservoirs of Jiamuhe Formation in Jinlong2 block

期次	岩性	裂缝密度/(条·m <sup>-1</sup> )	裂缝宽度/cm	平均裂缝厚度/m
第三期	熔结角砾岩、安山岩、英安岩、火山角砾岩	0.5 ~ 3.8	0.0028 ~ 0.1123	26.5
第二期	熔结凝灰岩、流纹岩、英安岩	0.8 ~ 3.6	0.0021 ~ 0.0649	18.0
第一期	熔结角砾岩、英安岩、流纹岩	0.4 ~ 3.7	0.0021 ~ 0.0253	15.3

应用压汞资料对储层微观孔隙结构特征进行分析,金龙2井区佳木河组火山岩储集层以微细—细喉道为主,最大孔喉半径为 0.3 ~ 4.7 μm,平均为 1.85 μm,排驱压力为 0.3 ~ 2.8 MPa,平均为 1.141 MPa,中值压力 4.1 ~ 17.9 MPa,平均为 10.6 MPa。总体上,佳木河组火山岩储层具有排驱压力较高,中值半径较小,分选中等—差,孔隙结构相对较差的特征。

根据研究区二叠系火山岩储层不同类型火山岩毛管压力曲线特征,可进一步分出 3 种孔隙结构类型,有效储层主要分布在 A、B 类单峰粗态型、偏粗态型及双峰偏粗态型的细孔喉型火山岩中,岩性主要为安山质/玄武质熔结角砾岩、角砾熔岩;而具有单峰偏细态极细孔喉型特征的火山岩试油结果多为干层,岩性主要为熔结凝灰岩及沉凝灰岩等(图 5),具体分类如下:

(1) A 类:单峰粗态、双峰偏粗态—细孔喉型,孔喉分布呈单峰或双峰且孔喉以细喉为主,双峰态特

征表明裂缝相对发育。平均孔喉半径 0.5 ~ 1 μm,排驱压力小于 0.5 MPa。主要岩性为火山爆发相中的安山质/玄武质熔结角砾岩、角砾熔岩及玄武安山质火山角砾岩,渗透率大于  $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,这部分孔喉对应的储层试油结果证实为有效储层。

(2) B 类:单峰偏粗态或微偏细态—细微孔喉型,孔喉分布呈单峰且偏微孔喉,平均孔喉半径一般为 0.1 ~ 0.5 μm,排驱压力小于 3 MPa。此类储层岩性主要为火山爆发相和喷溢相的安山质/英安质/凝灰角砾岩、流纹岩等,渗透率在  $(0.1 \sim 0.5) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,此类型既存在有效储层,也有潜力储层。

(3) C 类:单峰偏细态—微孔、极细微孔喉型,平均孔喉半径一般小于 0.1 μm,主要为爆发相的流纹质/安山质熔结凝灰岩及火山沉积相的沉火山碎屑岩,渗透率小于  $0.03 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。毛管压力曲线总体偏向右上方,显示歪度较细,以微—极细微孔喉为主,表明岩石结构相对致密,基质孔隙欠发育,此类岩性储层多为无效储层。

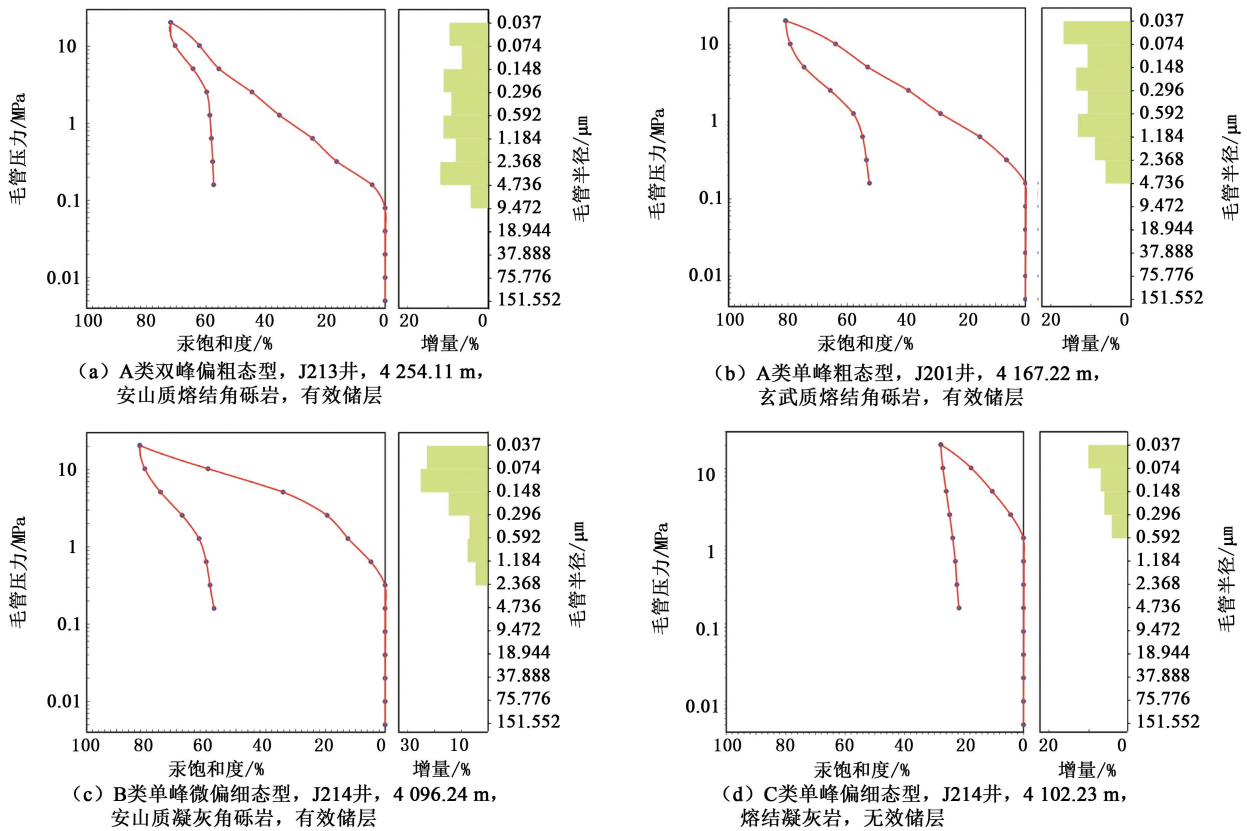


图5 金龙2井区佳木河组火山岩储层微观孔喉分布特征

Fig.5 Characteristics of microscopic pore throat distribution in volcanic reservoir of Jiamuhe Formation

2.2.3 有效储层物性下限

有效储层物性下限是储层研究与评价的重点,国内外对于有效储层下限的确定方法主要包含储层参数交会分析与经验统计法、试油与生产测试法、最小孔喉半径法等<sup>[16-18]</sup>,需要通过多种方法对比确定最终较为合理的物性下限值。结合研究区火山岩储层特征与实际测试资料,选用储层参数交会分析及试油法2种方法,对比确定有效储层物性下限标准值。

应用储层参数交会法分析,含油性较好的样品普遍集中在孔隙度大于7.5%、渗透率大于 $0.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的范围内。结合压汞分析数据所得J函数分布图,确定有效储层孔隙度下限7.98%,渗透率下限为 $0.03 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

试油法是根据现有技术经济条件下试油结果确定有效储层物性下限标准,通常确定的物性下限相对偏高,属于工业下限。分析佳木河组试油结果,确定有效储层电阻率大于 $16 \Omega \cdot \text{m}$ ,有效孔隙度下限为8%,渗透率下限为 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图6)。结合孔隙结构分类渗透率界限值(C类渗透率小于 $0.03 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ),最终确定金龙2井区佳木河组火山岩有

效储层物性下限为 $\varphi \geq 8\%$ ,  $k \geq 0.03 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。低于此物性界限的火山岩不具备形成有效储层的物性条件。

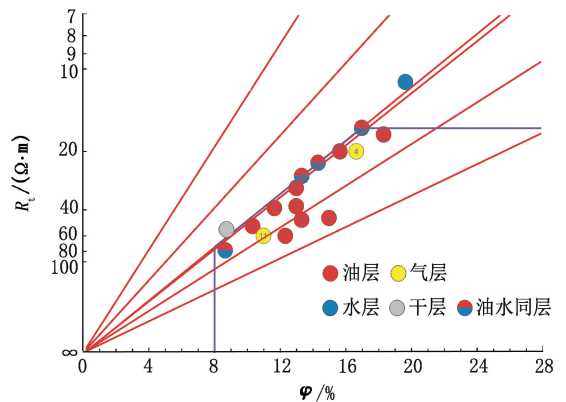


图6 金龙2井区佳木河组火山岩储层孔隙度与电阻率交会图

Fig.6 Crossplot of porosity and resistivity in volcanic reservoir of Jiamuhe Formation

3 火山岩有效储层分类与定量评价

3.1 有效储层分类方法选择及分类标准

在认识了火山岩有效储层特征基础上,如何对

储层分类与定量评价成为储量分类计算与油藏高效开发部署的关键所在。前人提出了许多储层分类评价的方法<sup>[20-22]</sup>,如基于划分聚类算法的聚类与判别分析法、BP神经网络法、灰色关联法等。BP神经网络在多参数拟合数据时,对属性参数低值区域的误差估计会出现不稳定,导致低值区域数据拟合误差增大,判别精度降低。灰色关联法与传统的多因素分析方法(相关聚类、回归等)近似,计算过程中无量纲化处理(初值化、均值化、标准化等)的明显缺陷是不具有数据保序性且计算公式对各样本参数采用权重平权处理,影响了原有参数数列稳定性及权重排序,随机性较高。笔者调研对比后认为采用分割聚类与典型判别分析方法相结合的定量分类算法可保证数据有序性及稳定性,从而对储层进行快速的分类评价。

聚类分析方法是数据挖掘中的一种有效的非监督机器学习算法,其算法分类包括层次聚类、分割聚类、密度型聚类及网格型聚类等,其中分割聚类算法中的K-means聚类为常用的快速聚类划分算法,在给出先验认识分类数K的前提下,可快速处理密集数据集,其中心点算法改进了离散与连续数值属性的混合聚类,对于庞杂的地质数据聚类划分效果较好,且该方法受奇异值、相似测度和不合适的聚类变量的影响较小,对于不合适的初始分类可以进行反复调整。

判别分析主要是在聚类分析基础上,拟合聚类参数特征值的判别函数关系式,具体包括距离判别、贝叶斯判别、逐步判别与典型判别4种应用较广泛的分类方法。距离判别法简单实用但对于每个研究总体的先验概率缺乏考虑,错判概率较高影响分类精度。贝叶斯判别在距离判别的基础上进一步考虑了判别总体的先验概率及错判损失,判别效果相对理想,但其缺陷是总体分布须符合正态分布且协方差矩阵不等无法检验正确性。逐步判别法每一步均需检验,将判别分类能力最强的变量引入判别函数,如果判别变量个数太多,会影响估计的精度,且迭代运算量要求较高。典型判别法以多总体的Fisher判别法应用较为广泛,其判别思想是根据方差分析的思想建立一种能较好区分各个总体的线性判别法,不需要数据集必须服从正态分布,集中寻找

一个最能反映数据分组间差异的投影方向,实质是寻找线性判别函数 $Y(x) = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$ ,在聚类分析得出K个总体对应中心向量 $\mu_1, \dots, \mu_k$ ,应用线性判别函数满足同一数据分组内方差最小,不同类数据组间方差最大,即“类内紧凑、类间分离”原则,该判别方法简化了判别计算迭代过程,可对未知数据集形成最佳定量分类。

研究区佳木河组非均质性较强的火山岩储层已具备较多的岩心分析化验与动态数据,对其有效储层特征也有了一定先验分类认识(孔隙结构分类),对数据集聚类抽样时可事先给出先验分类簇数K(如分3类好、中、差),弥补数据集对分类簇数初值不定的敏感运算缺陷。笔者首先考虑不同火山岩岩性间差异性、不同岩性类型储层的储集能力,其次考虑产出能力,综合选择分类变量指标,建立火山岩油藏有效储层分类评价标准(表4)。其中针对不同岩性的火山岩储层,选用FZI流动层指数能很好地反映储层孔隙结构特征、岩石渗流能力及不同岩性火山岩储层质量,可作为有效储层分类的有利参数,计算公式由Kozeny-carman方程变形后得出:

$$RQI = 0.0314 \sqrt{k/\varphi}, \quad (1)$$

$$\Phi_z = \frac{\varphi}{1-\varphi}, \quad (2)$$

$$FZI = \frac{RQI}{\Phi_z}. \quad (3)$$

则

$$\lg RQI = \lg FZI + \lg \Phi_z. \quad (4)$$

式中,RQI为油藏品质指数; $\Phi_z$ 为孔隙体积与颗粒体积之比;FZI为流动层指数;k为渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ; $\varphi$ 为孔隙度。

I类有效储层以安山质熔结角砾岩为主,储层质量、渗流能力极好,试油比采油指数也较高;II类有效储层以杏仁玄武岩、安山岩及火山角砾岩为主,储层物性次之,FZI值相对变小,比采油指数与I类相差不大;III类有效储层以凝灰岩、流纹岩为主,储层物性变差,但压裂后仍具有一定的渗流与产出能力,介于潜力有效与有效储层之间;低于III类分类标准的为无效储层,压裂投产基本不出或抽汲仅出水,且液量也较低。



表 4 金龙 2 井区佳木河组火山岩油藏有效储层分类标准

Table 4 Classification standard of volcanic effective reservoirs in Jinlong2 block

类型	孔隙度 $\varphi$ / %	渗透率 $k$ / $10^{-3} \mu\text{m}^2$	密度 $DEN$ / ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	平均孔隙半径 $R_p$ / $\mu\text{m}$	排驱压力 $p_d$ / MPa	裂缝密度 $n$ / ( $\text{条} \cdot \text{m}^{-1}$ )	有效厚度 / m	流动层指数 $FZI$	比采油指数 $J_{os} / (\text{m}^3 \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$	岩性	岩相	储集空间类型	聚类样本
I	5.6 ~ 19.3 (11.3)	6.2 ~ 182 (127.3)	2.05 ~ 2.5 (2.36)	0.5 ~ 4	0.28	1.5 ~ 6.2 (3)	4 ~ 18 (8)	2.64 ~ 29.16 (11.55)	0.098 ~ 0.963 (0.43)	安山质熔结角砾岩/角砾熔岩、气孔安山岩	溢流相 (上部亚相)	裂缝-孔隙型	6
II	1.3 ~ 22.3 (10.1)	0.1 ~ 62.4 (3.6)	2.14 ~ 2.6 (2.37)	0.25 ~ 0.5	0.29 ~ 1.39	1 ~ 1.5 (1.2)	3 ~ 20 (10)	0.5 ~ 24.12 (1.43)	0.098 ~ 0.392 (0.153)	杏仁玄武岩、安山岩、流纹岩、安山质火山角砾岩、角砾凝灰岩	溢流相 (下部亚相)、爆发相	孔隙型	201
III	2.1 ~ 16 (7.9)	0.1 ~ 33.7 (3.1)	2.36 ~ 2.74 (2.46)	<0.25	>1.39	<1	2 ~ 18 (6)	0.09 ~ 13.34 (0.99)	0.001 ~ 0.097 (0.026)	凝灰岩、英安岩、英安质安山岩、细晶流纹岩	爆发相 (热碎屑流亚相)、溢流相 (中部亚相,致密)	微缝-致密型	43

注:表中数据为最小值~最大值(平均值)。

### 3.2 有效储层定量分类评价

在上述已知聚类分析所得分类标准及结果的基础上,将聚类分析中可定量计算的分类参数,如有效孔隙度、基质渗透率、密度、单井裂缝密度、 $FZI$ 、比采油指数等引入分类判别变量,应用线性 Fisher 判

别方法建立分类判别函数(表 5),进行快速迭代回判分析,组判别函数计算值与聚类组质心数值方差函数值最小最接近或判别函数计算值最大的作为其判别归属属性(图 7)。

表 5 佳木河组火山岩油藏有效储层分类判别函数(Fisher)

Table 5 Discrimination functions (Fisher) of effective reservoirs classification in volcanic reservoir

分类	Fisher 线性判别函数
I	$Y_1 = 14.997\varphi + 0.982k + 0.125FZI + 0.156n + 0.5J_{os} + 650.892DEN - 917.453$
II	$Y_2 = 15.668\varphi + 0.431k + 2.76FZI + 0.088n + 0.15J_{os} + 655.948DEN - 854.879$
III	$Y_3 = 15.514\varphi + 0.403k + 2.889FZI + 0.004n + 0.03J_{os} + 654.992DEN - 864.273$

注:参数  $n$  为裂缝密度

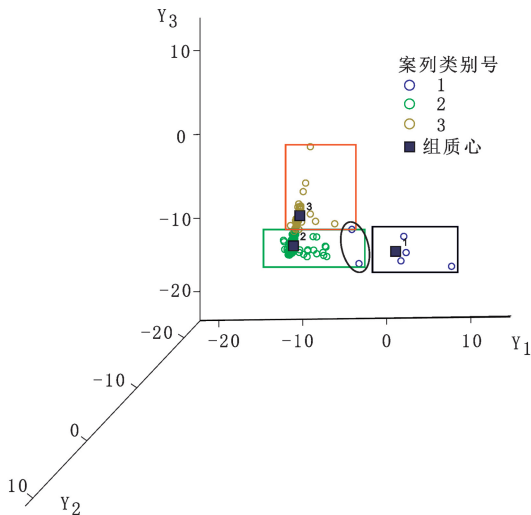


图 7 典型判别函数分类

Fig. 7 Classification results of volcanic effective reservoirs

参与聚类与判别分析的 250 个样本中,错判 5 个,正判率达到 98%,可见所得分类判别函数结果相对可靠,对非取心井根据测井解释求取相应分类参数,代入分类判别函数进行有效储层分类识别,为油田开发部署提供有力的指导(图 8,平面图为第三期次,距佳木河组顶面 40 m)。

截至 2014 年底,优先部署的 J208 井区域内共完钻 6 口直井,于 2014 年 12 月初投产 1 口开发控制井,投产初期日产油 24.4 t,含水率 22%,生产 24 d,平均单井日产油 10.3 t,日产液量与日产油量较为平稳。



## 4 结 论

(1)具备流体储集能力及工业产出标准的有效储层岩性主要为安山质(熔结)角砾岩、安山质/玄武质角砾熔岩及安山岩等,其次为火山角砾岩。有效储层储集空间类型主要为气孔、杏仁溶蚀孔,其次为基质孔,微观孔隙结构为单峰粗态型、偏粗态型及双峰偏粗态型的细孔喉型。裂缝主要发育在佳木河组第三期次,岩性以熔结角砾岩、安山岩为主,裂缝密度0.5~3.8条/m,以中等缝宽为主,为储层纵向与平面的有效连通提供了有利条件,扩展了有效储层及部分潜力储层的有效性。

(2)金龙2井区佳木河组火山岩有效储层绝对物性下限为 $\varphi \geq 8\%$ ,  $k \geq 0.03 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。低于此物性界限的火山岩不具备形成有效储层的物性条件。

(3)综合火山岩储层岩性岩相及其电性响应参数、微观特征、裂缝发育参数及生产动态参数,优选分割聚类的K-means聚类分析方法及典型Fisher线性判别分析法,动静结合建立金龙2井区火山岩油藏有效储层分类标准及定量判别函数,分类结果与现场实际应用效果符合程度高。

### 参考文献:

[1] LAJOIE J. Facies models 15: Volcaniclastic rocks. *Geoscience Canada*, 1979,6(3):129-139.

[2] SANYAL S K, JUPRASERT S, JUBASCHE J. An evaluation of rhyolite-basalt-volcanic ash sequence from well-logs[J]. *The Log Analyst*,1980,21(1):3-9.

[3] CAS R A F, WRIGHT J V. Volcanic successions: modern and ancient: a geological approach to processes, products and successions[M]. London: Allen & Unwin, 1987.

[4] VERNIK LEV. A new type reservoir rock in volcanoclastic sequences[J]. *AAPG Bull*, 1990,74(6):830-836.

[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] 罗静兰,邵红梅,张成立. 火山岩油气藏研究与勘探技术综述[J]. *石油学报*, 2003,24(1):31-37.

LUO Jinglan, SHAO Hongmei, ZHANG Chengli. Summary of research methods and exploration technologies for volcanic reservoirs [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2003,24(1):31-37.

[7] 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-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.

[8] 王璞珺,吴河勇,庞彦明,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.

[9] 高有峰,刘万洙,纪学燕,等. 松辽盆地营城组火山岩成岩作用类型、特征及其对储层物性的影响[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*,2007,37(6):1251-1257.

GAO Youfeng, LIU Wanzhu, JI Xueyan, et al. Diagenesis types and features of volcanic rocks and its impact on porosity and permeability in Yingcheng Formation, Songliao Basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2007,37(6):1251-1257.

[10] 赵文智,邹才能,冯志强,等. 松辽盆地深层火山岩气藏地质特征及评价技术[J]. *石油勘探与开发*, 2008,35(2):129-142.

ZHAO Wenzhi, ZOU Caineng, FENG Zhiqiang, et al. Geological features and evaluation techniques of deep-seated volcanic gas reservoirs, Songliao Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2008,35(2):129-142.

[11] 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 Chenzao, et al. Formation and distribution of volcanic hydrocarbon reservoirs in sedimentary basins of China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2008,35(3):257-271.

[12] 郭睿. 储集层物性下限值确定方法及其补充[J]. *石油勘探与开发*,2004,31(5):140-144.

GUO Rui. Supplement to determining method of cut-off value of net pay [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2004,31(5):140-144.

[13] 范宜仁,黄隆基,代诗华. 交会图技术在火山岩岩性与裂缝识别中的应用[J]. *测井技术*, 1999,23(1):53-56.

FAN Yiren, HUANG Longji, DAI Shihua. Application

- of crossplot technique to the determination of lithology composition and fracture identification of igneous Rock [J]. Well Logging Technology, 1999, 23(1): 53-56.
- [14] 张莹, 潘保芝, 印长海, 等. 成像测井图像在火山岩岩性识别中的应用[J]. 石油物探, 2007, 46(3): 288-293.  
ZHANG Ying, PAN Baozhi, YIN Changhai, et al. Application of imaging logging maps in lithologic identification of volcanics[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2007, 46(3): 288-293.
- [15] 朱国华, 蒋宜勤, 李娴静. 克拉玛依油田中拐—五八区佳木河组火山岩储集层特征[J]. 新疆石油地质, 2008, 29(4): 446-449.  
ZHU Guohua, JIANG Yiqin, LI Xianjing. The volcanic reservoir characteristics of Jiamuhe Formation in Zhongguai-district 5(8) area in Karamay Oilfield[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2008, 29(4): 446-449.
- [16] 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): 1-7.  
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): 1-7.
- [17] 黄玉龙. 松辽盆地白垩系营城组火山岩有效储层研究[D]. 长春: 吉林大学, 2010.  
HUANG Yulong. Characterization of effective gas reservoirs hosted in the lower cretaceous volcanic rocks of Songliao Basin [D]. Changchun: Jilin University, 2010.
- [18] 操应长, 王艳忠, 徐涛玉, 等. 东营凹陷西部沙四上亚段滩坝砂体有效储层的物性下限及控制因素[J]. 沉积学报, 2009, 27(2): 230-237.  
CAO Yingchang, WANG Yanzhong, XU Taoyu, et al. The petrophysical parameter cutoff and controlling factors of the effective reservoir of beach and bar sandbodies of the upper part of the Fourth Member of the Shahejie Formation in west part of Dongying Depression [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(2): 230-237.
- [19] 王艳忠, 操应长, 宋国奇, 等. 试油资料在渤南洼陷深部碎屑岩有效储层评价中的应用[J]. 石油学报, 2008, 29(5): 701-710.  
WANG Yanzhong, CAO Yingchang, SONG Guoqi, et al. Application of production test data to evaluation of the effective reservoir in deep clastic of Bonan Sag [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(5): 701-710.
- [20] 常桂华. 神经网络在松辽盆地深层火山岩岩性预测中的应用[J]. 海洋地质前沿, 2013, 29(7): 51-57.  
CHANG Guihua. Application of neural network to predicting deep seated volcanic rocks in the Songliao Basin [J]. Marine Geology Letters, 2013, 29(7): 51-57.
- [21] 刘为付, 旷红伟. 利用模糊数学综合评价火山岩储层[J]. 油气地质与采收率, 2003, 10(2): 9-13.  
LIU Weifu, KUANG Hongwei. Comprehensive evaluation of volcanics reservoir by fuzzy mathematics [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2003, 10(2): 9-13.
- [22] 林海明, 张文霖. 主成分分析与因子分析的异同和SPSS软件[J]. 统计研究, 2005, 3: 65-69.  
LIN Haiming, ZHANG Wenlin. The relationship between principal component analysis and factor analysis and SPSS software [J]. Statistical Research, 2005, 3: 65-69.

(编辑 徐会永)