

文章编号: 0253-2697(2020)07-0809-12 DOI:10.7623/syxb202007003

# 侵出式火山机构储层的分布模式

——以伊通火山群为例

唐华风<sup>1,2,3</sup> 戴岩林<sup>3</sup> 郭天婵<sup>1,2,3</sup> 刘钊<sup>3</sup> 何贤培<sup>3</sup> 张一弛<sup>3</sup>

(1. 东北亚生物演化与环境教育部重点实验室 吉林长春 130061; 2. 自然资源部东北亚矿产资源评价重点实验室 吉林长春 130061;  
3. 吉林大学地球科学学院 吉林长春 130061)

**摘要:**松辽盆地的侵出式火山机构中可赋存气藏,其储层特征明显有别于爆发式或喷溢式火山机构。为了明确侵出式火山机构的储层分布特征,以伊通火山群为例,根据野外露头调查、岩石组构特征、压氦法孔隙度测量和图像法宏观面缝率测量,分别对代表侵出式火山机构下部、中部和上部的西尖山火山、大孤山火山和东小山火山开展了储层分布模式分析,并讨论了柱状节理几何形态与裂缝密度和地层渗透性的关系。侵出式火山机构的储层为裂缝-孔隙型,发育丰富的冷凝收缩缝(柱状节理缝)、少量的气孔和杏仁孔以及微量的构造裂缝,具有低—中孔隙度、高渗透率的特征。受火山岩冷凝收缩作用和挥发份逸出作用控制,整个侵出式火山机构的储层可以通过柱状节理沟通。有利储层多分布在火山机构的顶部,厚度为数十米,中心相带的储层物性相对较好,向边部变差。整体上储层与地层的厚度比较小。针对未遭受剥蚀的侵出式火山机构,可采用揭示其火山中心相带上层的方法,而对于遭受剥蚀严重的侵出式火山机构,可采用揭示其翼部上层的方法寻找有利储层位置。

**关键词:**伊通火山群;中新世;火山岩;柱状节理;侵出式火山机构;储层分布模式

**中图分类号:**TE122.2

**文献标识码:**A

## Distribution pattern of reservoirs in the extrusive volcanic edifice: a case study of the Yitong volcanoes

Tang Huafeng<sup>1,2,3</sup> Dai Yanlin<sup>3</sup> Guo Tianchan<sup>1,2,3</sup> Liu Zhao<sup>3</sup> He Xianpei<sup>3</sup> Zhang Yichi<sup>3</sup>

(1. Key-Lab for Evolution of Past Life and Environment in Northeast Asia, Ministry of Education, Jilin Changchun 130061, China;  
2. Key Laboratory of Mineral Resources Evaluation in Northeast Asia, Ministry of Natural Resources, Jilin Changchun 130061, China;  
3. College of Earth Sciences, Jilin University, Jilin Changchun 130061, China)

**Abstract:** Gas reservoirs can occur in the extrusive volcanic edifice of Songliao Basin, whose reservoir characteristics are clearly different from those of explosive or effusive volcanic edifices. To clarify the reservoir distribution characteristics of the extrusive volcanic edifice, taking the Yitong volcanoes as an example, based on field outcrop survey, rock fabric characteristics, porosity measurement with helium injection method and macroscopic surface fracture ratio measurement with image method, the paper analyzes the distribution patterns of reservoirs in the Xijianshan volcano, Dagushan volcano and Dongxiaoshan volcano representative of the lower, middle and upper part of the extrusive volcanic edifice, respectively, and also discusses the relationship between the geometry of columnar joints and fracture density, formation permeability. The reservoirs of the extrusive volcanic edifice are classified as fracture-pore type, with the development of abundant condensed shrinkage joints (columnar joints), a small number of vesicles and amygdalae, and a little amount of tectonic fractures, characterized by low-medium porosity and high permeability. Controlled by the condensation and shrinkage of volcanic rocks and the escape of volatile matter, the reservoirs of the entire extrusive volcanic edifice can be communicated through columnar joints. Favorable reservoirs are mostly distributed in the top of the volcanic edifice, with a thickness of about tens of meters. The physical properties of the reservoir in the central facies are relatively good, and become worse toward the edges. Overall, the thickness ratio of the reservoir to formation is small. For the extrusive volcanic edifice uneroded, the method revealing the upper layer of the facies of the volcanic focus can be used to find the reservoirs, but for the extrusive volcanic edifice severely eroded, the method revealing the upper layer of its limbs can be used to find the favorable reservoirs.

**Key words:** Yitong volcanoes; Miocene; volcanic rock; columnar joints; extrusive volcanic edifice; distribution pattern of reservoirs

**引用:**唐华风,戴岩林,郭天婵,刘钊,何贤培,张一弛. 侵出式火山机构的储层分布模式——以伊通火山群为例[J]. 石油学报, 2020, 41(7): 809-820.

**Cite:** TANG Huafeng, DAI Yanlin, GUO Tianchan, LIU Zhao, HE Xianpei, ZHANG Yichi. Distribution pattern of reservoirs in the extrusive volcanic edifice: a case study of the Yitong volcanoes[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(7): 809-820.

**基金项目:**国家自然科学基金重大项目(No. 41790453)、国家科技重大专项(2016ZX05026-004)和吉林省自然科学基金项目(20170101001JC)资助。  
**第一作者及通信作者:**唐华风,男,1979年6月生,2001年获吉林大学学士学位,2007年获吉林大学博士学位,现为吉林大学地球科学学院教授,主要从事火山地层和火山岩储层综合研究。Email: tanghfhc@jlu.edu.cn

火山机构根据其岩性和外形可划分为3种类型：熔岩型(席状、板状、盾状、丘状和穹窿状等)、碎屑岩型(席状、丘状和锥状等)和复合型(丘状等)<sup>[1]</sup>。不同类型火山机构的岩性构成和叠置关系不同,其储层分布模式也存在显著差别<sup>[2]</sup>。目前,盆地内发现的火山岩油气藏多赋存于丘状复合型、丘状/盾状熔岩型和席状/丘状/锥状碎屑岩型火山机构中,这些火山机构的储层多数为孔隙型和孔隙-裂缝型。单一火山机构内可以分布多层有利储层,其厚度从几米至几十米,空间延伸特征受地层基本单元、界面(主要为喷发间断不整合和构造不整合界面)约束<sup>[3-7]</sup>。火山口附近储层的孔渗条件通常优于远离火山口区域<sup>[8-12]</sup>。孔渗条件与埋深密切相关,埋深小于3 km时火山碎屑岩储层的物性往往好于熔岩和碎屑熔岩,而当埋深大于3 km时有利岩性可能反转<sup>[13]</sup>。不同盆地中火山岩的岩性不同、埋深不同、储层形成过程不同,这可导致盆地内的优势相带也不同<sup>[14-17]</sup>。火山机构储层的储集空间多为挥发份逸出形成的气孔<sup>[18-20]</sup>、碎屑颗粒支撑形成的粒间孔、冷凝收缩缝、深埋过程中形成的溶蚀孔、风化淋漓形成的溶蚀孔或溶蚀缝以及构造活动

形成的次生裂缝等<sup>[21-24]</sup>。

上述认识对火山岩油气藏的勘探开发有一定指导作用,但尚不能解决松辽盆地南部王府断陷和德惠断陷的穹窿状熔岩型火山机构储层面临的勘探问题。依照以往的经验,厚层火山地层多数情况下应由多个火山机构叠置而成,发育多套储层,但在松辽盆地南部穹窿状熔岩型火山机构中,钻井(如DS17井)揭示其顶部仅发育1套储层<sup>[25]</sup>。该套火山地层的岩性为英安质/粗安质、由单次喷发形成、发育丰富的冷凝收缩缝和微量气孔,表明其火山机构属于侵出式喷发。受取心资料限制,目前侵出式火山机构储层的分布规律及成因尚缺少全面认识。笔者以吉林伊通火山群为例,开展侵出式火山机构的储层研究,以期类似火山岩油气藏勘探提供储层地质依据。

### 1 地质概况

#### 1.1 伊通火山群特征

伊通火山群位于吉林省伊通盆地,其分布受郯庐断裂带北段西半支的佳木斯-伊通断裂带控制[图1(a)],由16座火山构成<sup>[26-27]</sup>。火山群形成于中新世一早更

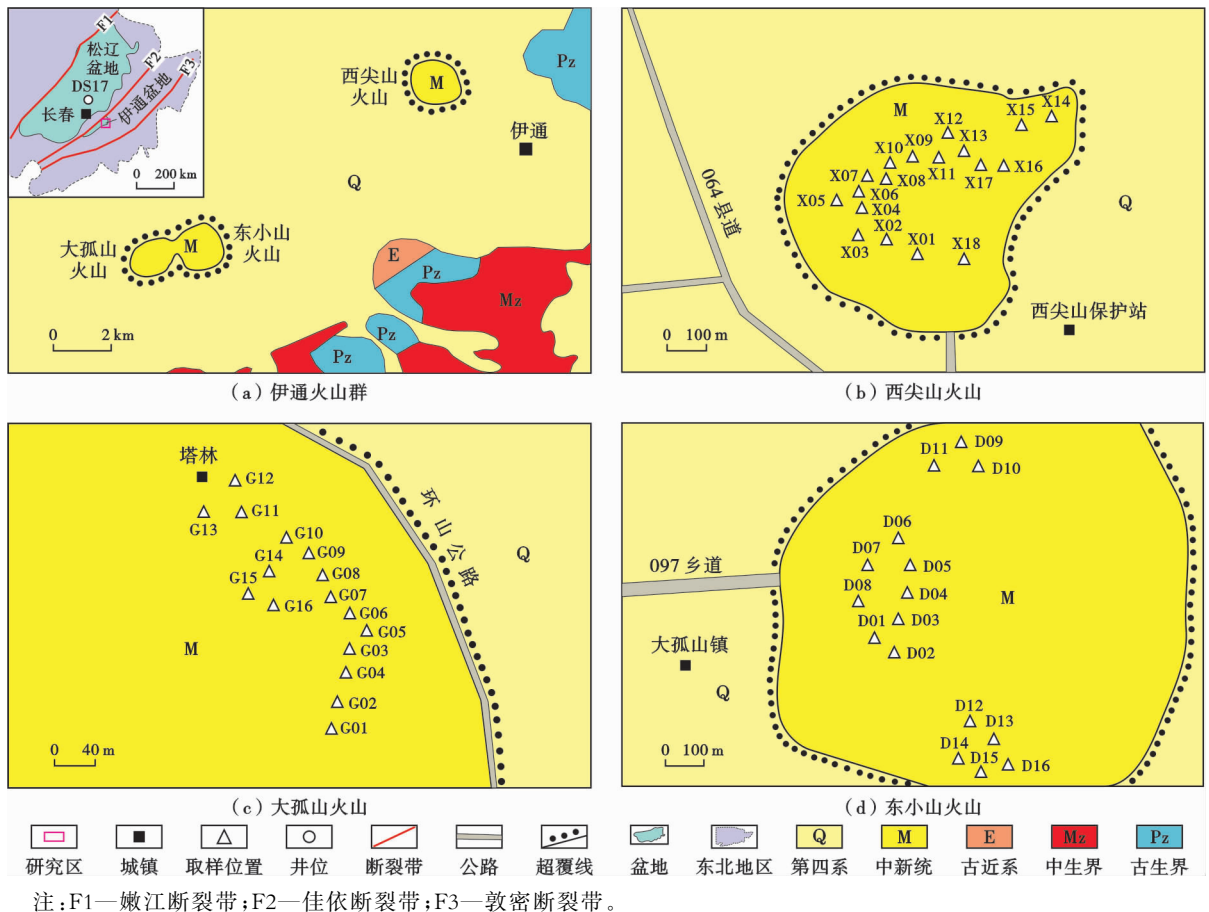


图1 伊通火山群的地理位置及取样信息  
Fig. 1 Geographical location and sampling information of the Yitong volcanoes

新世,其残余形态为锥状、穹窿状,相对高差为几十米至百余米。西尖山火山岩 K-Ar 年龄为  $(20.8 \pm 0.9)$  Ma, 大孤山火山岩 K-Ar 年龄为  $11.5 \sim 11.9$  Ma, 东小山火山岩 K-Ar 年龄为  $(5.46 \pm 0.32)$  Ma<sup>[28-30]</sup>。与伊通盆地的沉积地层相比,火山岩的形成晚于伊通盆地中新统岔路河组,从时、空关系来看,火山岩属于盆地沉积充填后火山活动的产物。火山岩的岩性多为灰黑色致密块状粗面玄武岩,主要矿物成分为斜长石、橄榄石和辉石,含少量磁铁矿和磷灰石等副矿物。西尖山地区发育碱性橄榄玄武岩,东小山地区发育碧玄岩并见尖晶石辉石橄榄岩包裹体<sup>[31-33]</sup>。

## 1.2 火山喷发类型

按照 Geze<sup>[34]</sup> 的火山喷发类型的分类方案,可将火山划分为侵出式、溢流式、爆发式和混合式 4 类。

侵出式喷发指高黏度的熔浆在火山通道及附近区域堆积,其熔浆具有低挥发分、低温度和难流动的特征,通常呈缓慢冷却固结成岩。侵出式喷发火山岩的纵向分层性差、横向延展性差、结晶好、柱状节理发育,其典型产物为熔岩穹丘和岩针。

溢流式喷发指低黏度的熔浆自火山通道溢出,在重力驱动下沿着地表流动,汇聚于低洼地形,其熔浆具有中等挥发份含量、温度高和易流动的特征。溢流式喷发火山岩的纵向分层好、横向延展性好、结晶差,其熔岩流通常可划分为底部管状气孔带、中部致密带和顶部气孔带 3 部分,典型代表为夏威夷式火山。

爆发式喷发指高挥发份熔浆在上升到地表之前就已碎屑化,产生大量火山灰和浮岩碎屑,并以热碎屑流、热基浪或空落的形式搬运。爆发式喷发的火山通常具有较强的喷发能量、极快的冷却速度,其产物为广泛分布的凝灰岩和熔结凝灰岩,纵向分层性和横向延展性好,典型代表为普林尼式和亚普林尼式火山。

混和式喷发为上述 3 类火山喷发的过渡类型,其产物为凝灰岩/角砾岩/集块岩、富含气孔/致密块状的熔岩、柱状节理发育的熔岩、再搬运的火山碎屑岩等,典型代表为乌尔干火山和斯通朗博利式火山<sup>[34]</sup>。

伊通火山群的西尖山地区、大孤山地区和东小山地区的火山岩具有纵向分层性差、横向延展性差、纵横比较大、发育柱状节理、零星发育气孔、未见火山碎屑的特点。对比上述 4 类火山喷发类型可知,西尖山、大孤山和东小山 3 个火山机构的喷发特征与侵出式喷发相似性更高,可认为由侵出式喷发形成。3 个火山机构中发育宏观柱状节理、缺少微小冷凝收缩缝和玻璃质组构的特征代表了侵出式火山机构的内部特征。

## 1.3 火山的典型特征

西尖山火山、大孤山火山和东小山火山属于残余

的侵出式喷发火山。

西尖山火山的海拔为 354 m、相对高度为 79 m、直径为 330 m,火山锥的坡度较大。其火山岩体发育规则柱状节理,柱体直径为 30~40 cm 并呈向上收敛和向下散开的形状。火山岩呈致密块状,其中的斜长石晶体直径达 1 mm。

大孤山火山是伊通火山群中最高大的火山穹丘,海拔为 430.5 m,相对高度为 150 m。其火山岩体的柱状节理发育、产状多变,柱体的视长度较小、直径为 10~25 cm。火山岩呈致密块状,其中的斜长石晶体直径达 0.5 mm。

东小山火山呈低平丘形,其火山岩体的柱状节理发育、产状多变,柱体直径为 10~20 cm。火山岩呈致密块状,发育少量杏仁构造、气孔构造,其中的斜长石晶体的直径达 0.3 mm。

根据现代火山岩体的研究揭示,完整的侵出式熔岩穹丘的下部发育规则柱状节理,柱体直径大、岩石结晶相对好,中部—上部发育不规则状柱状节理,柱体直径小、岩石结晶相对差,在熔岩流的顶部还可发育气孔构造、杏仁构造<sup>[19]</sup>。将西尖山、大孤山、东小山地区火山岩的岩石组构与完整的侵出式熔岩穹丘的岩石组构相对比可知,3 座火山分别揭示侵出式火山机构的下部、中部和上部特征。3 座火山的出露条件好,其储层特征基本可代表完整侵出式火山机构主体部分的特征。

## 2 火山岩体的储集空间类型

依据储层的形成过程,可将储集空间划分为原生孔隙、原生裂缝、次生孔隙、次生裂缝 4 类<sup>[35-37]</sup>。研究区的火山岩体包含 3 类储集空间:原生裂缝(规则/不规则冷凝收缩缝(柱状节理缝)、原生孔隙(气孔、杏仁孔)和次生裂缝(构造节理和断层)。

### 2.1 西尖山火山

西尖山火山岩体以发育冷凝收缩缝为主,见少量构造缝(构造横节理和断层)。冷凝收缩缝的缝面平直,缝宽为 0.5~2.0 mm,充填程度达 5%~10%、充填物为方解石,缝间距为 25~40 cm,视长度为 10~50 m[图 2(a)中的 I]。在山顶处可见冷凝收缩缝受物理风化扩宽的现象,缝宽可达 5 cm[图 2(a)中的 II]。构造横节理缝的缝面平直、多与冷凝收缩缝垂直相交,宽度为 0.5~2.0 mm,缝间距为 5~15 cm,几乎无充填,视长度小于 30 cm。断层表现为破碎带、网状缝发育特征,缝宽为 0.5~2.0 mm,缝间距为 10~30 cm,充填程度达 20%、充填物为断层泥和角砾,视长度可达 10 m[图 2(a)中的 III]。整体上,该火山的裂缝以向东倾为主,还可见 NE、NW、SE 和 SW 倾向的裂缝[图 2(b)];从节理缝的倾角统计来看,以近垂直裂缝为主[图 2(c)]。

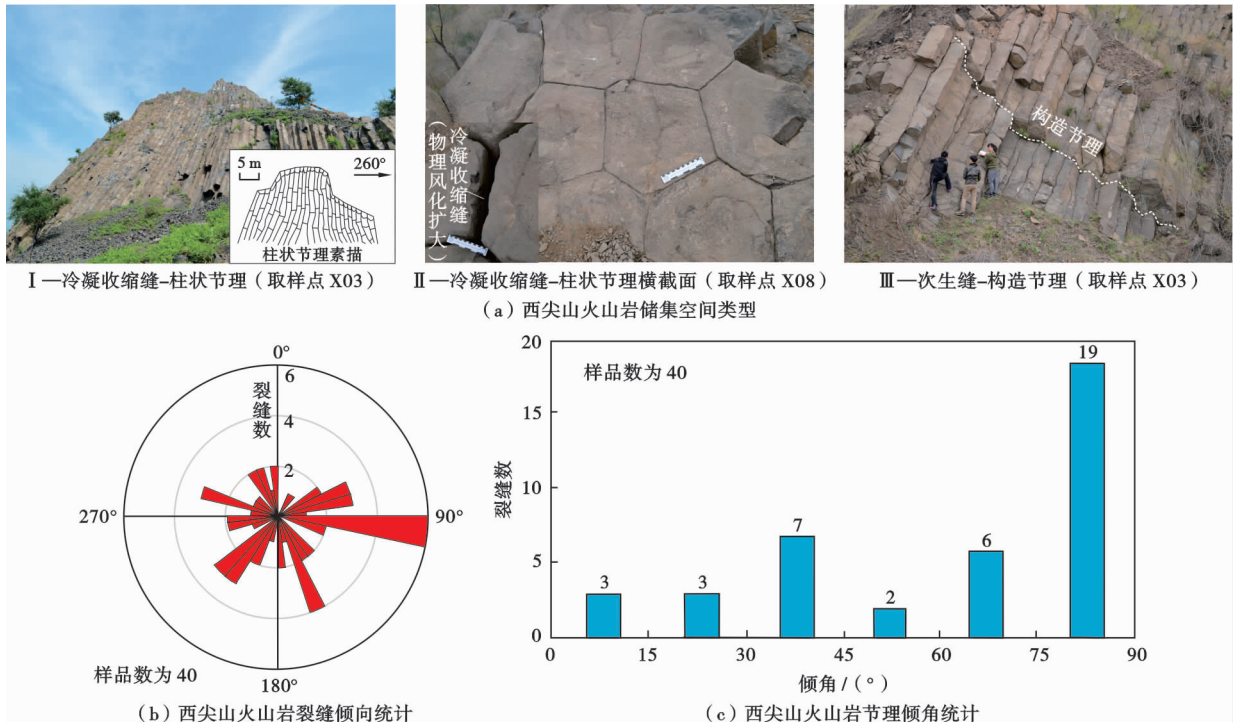


图2 西尖山火山的储集空间类型及裂缝产状

Fig. 2 Reservoir space types and fracture attitudes in the Xijianshan volcano

2.2 大孤山火山

大孤山火山岩体以发育冷凝收缩缝为主,部分地区发育少量构造缝。冷凝收缩缝的缝面呈平直—弯曲状,缝宽为1.5~4.0 mm,几乎无充填,缝间距为10~

25 cm,视长度为10~30 m,可见受物理风化扩宽的现象[图3(a)]。构造缝主要分布在塔林地区,缝面平直,缝宽为1.5~2.0 mm,几乎无充填,缝间距为5~15 cm,视长度为5~15m[图3(b)、图3(c)]。整体上,

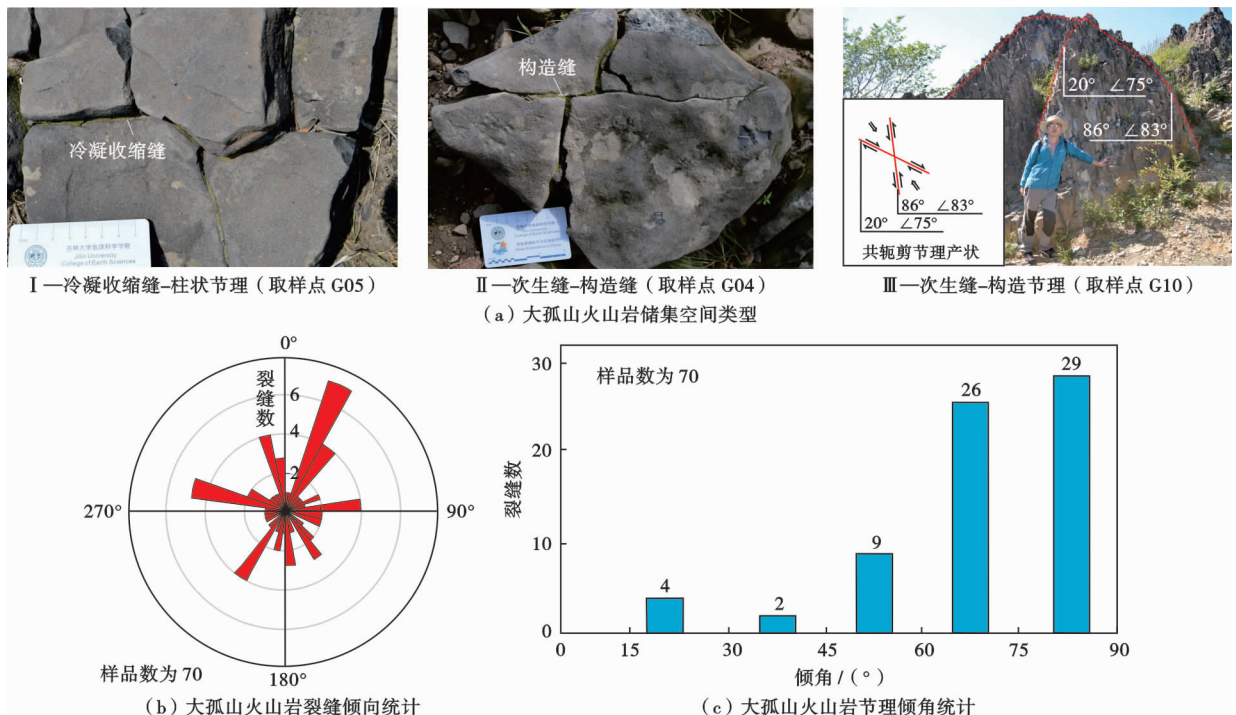


图3 大孤山火山的储集空间类型及裂缝产状

Fig. 3 Reservoir space types and fracture attitudes in the Dagushan volcano



该火山的裂缝倾向多变,见7个方向的倾向,以NE倾向为主,还见NW、NNW、SW、SE、SEE和向南的倾向[图3(d)];从节理缝的倾角统计来看,以高角度近垂直裂缝为主[图3(e)]。

### 2.3 东小山火山

东小山火山岩体以发育冷凝收缩缝为主,有少量气孔、杏仁孔和构造缝,含有橄榄岩包体。冷凝收缩缝的缝面呈平直—一弯曲态,缝宽为1~3 mm,充填程度达5%~10%,充填物为方解石,缝间距为5~20 cm,

视长度为5~20 m[图4(a)]。气孔、杏仁孔呈圆状—椭圆状,孔径为5~10 mm,杏仁体的充填程度达80%,充填物为沸石[图4(b)]。二辉橄榄岩包体的直径可达10 cm,经风化后较为疏松[图4(c)],可能含有次生孔隙。整体上,该火山岩体的裂缝倾向多变,见7个方向的倾向,以NE倾向为主,还见NNE、NW、SWW和SE等倾向[图4(d)];从节理缝的倾角统计来看,裂缝从中—低倾角至近垂直均有发育[图4(e)]。

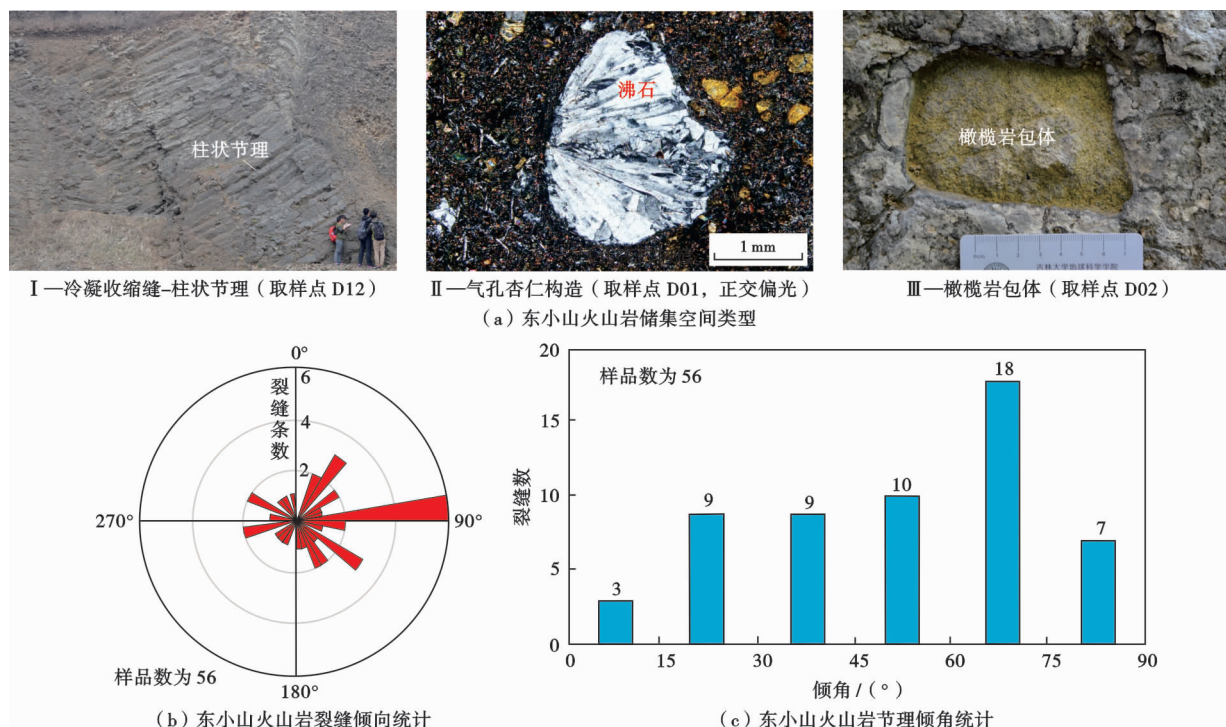


图4 东小山火山的储集空间类型及裂缝产状

Fig. 4 Reservoir space types and fracture attitudes in the Dongxiao volcano

## 3 孔隙度及分布特征

### 3.1 孔隙度

在50件样品的孔隙度测试中,由于压氦法的测试结果主要反映小直径气孔、杏仁孔和各类微孔的孔隙度[图5(a)],不包括充填程度低的裂缝,因此各个火山岩体中的宏观裂缝不在测试范围内,如冷凝收缩缝(柱状节理缝)。宏观裂缝可利用图像分析方法计算的面缝率反映孔隙度特征。为了能真实反映火山岩的储层特征,孔隙度计算需要将二者结合起来:

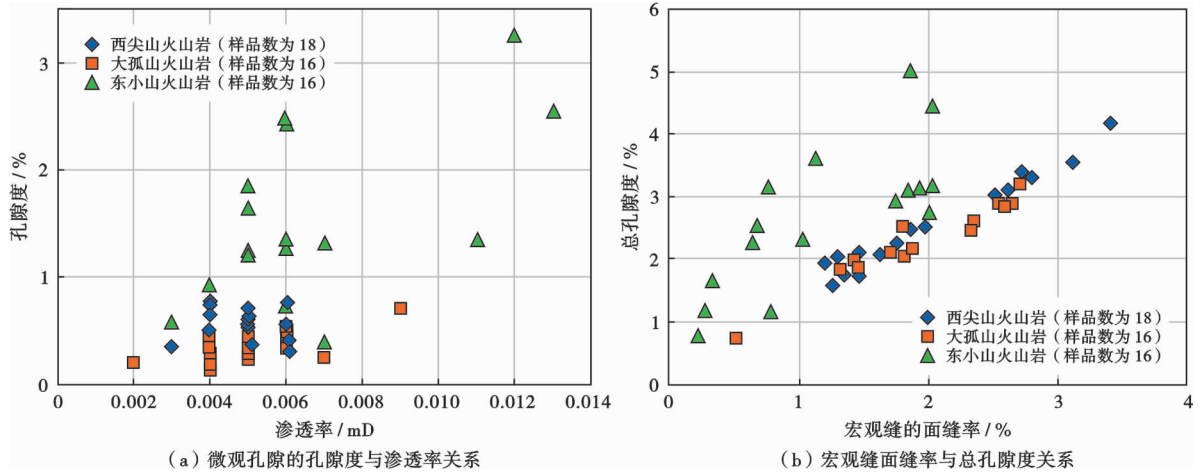
$$\phi_{\text{tot}} = \phi_{\text{mac}} + \phi_{\text{mic}}(1 - \phi_{\text{mac}}) \quad (1)$$

从岩石的面缝率与总孔隙度的关系[图5(b)]可知,研究区该类火山机构的面缝率在0.26%~2.79%,总孔隙度在1.2%~5.04%,总渗透率未做估算,整体应属于低孔型储层。从图5(a)来看,西尖山

和大孤山火山岩的实测微观孔隙度和渗透率均较小,而东小山火山岩的测试结果相对较大。从图5(b)来看,宏观缝的面缝率在大孤山火山岩中为1.44%~2.59%、平均为1.95%;在西尖山火山岩中为1.20%~2.79%、平均为1.78%;在东小山火山岩中为0.26%~2.02%、平均为1.47%。总孔隙度在东小山火山岩中为1.17%~5.04%、平均为2.99%;在大孤山火山岩中为1.95%~2.85%、平均为2.34%;在西尖山火山岩中为1.78%~3.32%、平均为2.32%。

### 3.2 分布特征

从宏观缝的面缝率和岩体总孔隙度的平面分布特征(图6)来看,3座火山中岩石的裂缝和孔隙整体上均呈中心部位多、边缘部位变少,并围绕中心呈环状分布的特征。其中,面缝率在大孤山和西尖山火山岩中较高,在东小山火山岩中较小;总孔隙度在东小山火山岩中大,在大孤山和西尖山火山岩中较小。



(a) 微观孔隙的孔隙度与渗透率关系 (b) 宏观缝面缝率与总孔隙度关系

图5 伊通火山群侵出式火山机构的储层物性特征

Fig. 5 Reservoir physical characteristics of extrusive volcanic edifice in the Yitong volcanoes

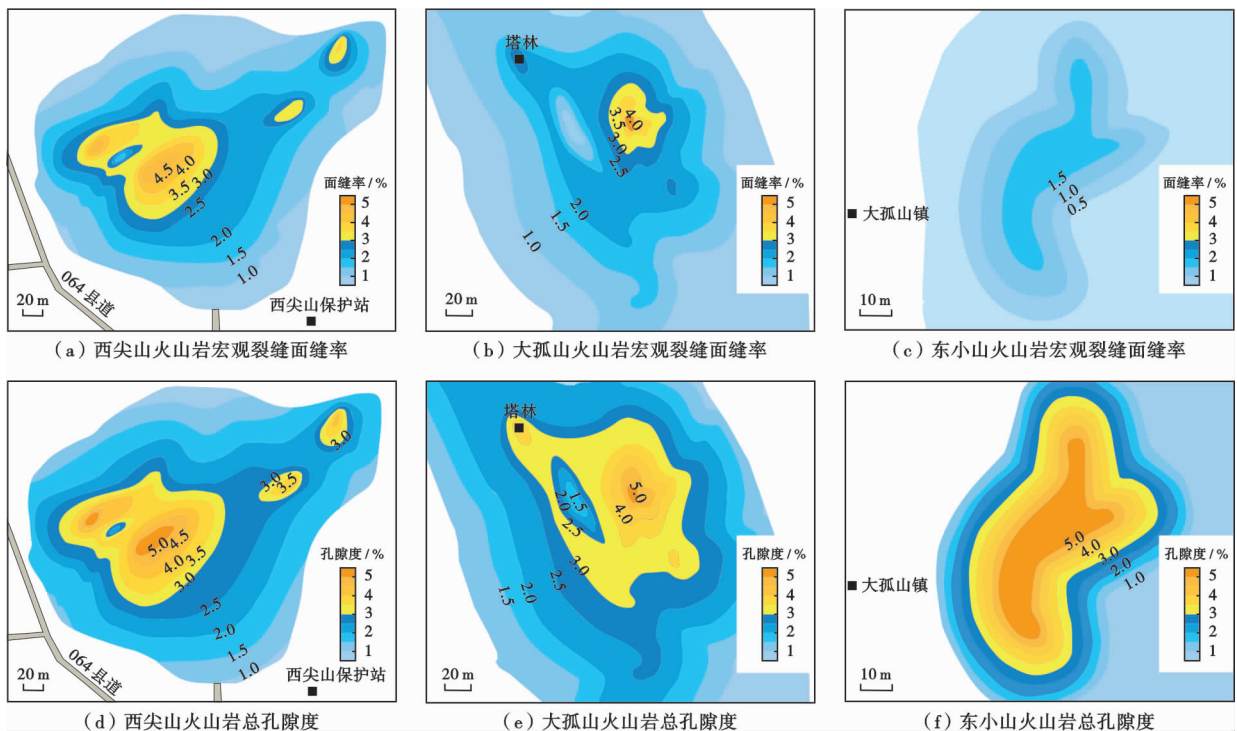


图6 伊通火山群侵出式火山机构的储层特征

Fig. 6 Reservoir characteristics of extrusive volcanic edifice in the Yitong volcanoes

### 4 讨论

#### 4.1 侵出式火山机构的储层分布模式

由于西尖山、大孤山、东小山3座火山的火山岩分别揭示了侵出式火山机构下部、中部和上部的岩石结构特征,综合分析3座火山的储层特征可获得侵出式火山机构中储集空间[图7(a)]和储层的分布模式[图7(b)]。

侵出式火山机构在原始状态下,其上部(顶部)发育少量气孔和冷凝收缩缝、孔隙度较高。从东小山火山可知,气孔和杏仁孔对该火山岩体孔隙度的贡献较

大,储层为孔隙-裂缝型,其中,冷凝收缩缝的缝面呈平直一弯曲状、缝宽较宽、缝间距小。

侵出式火山机构的中部主要发育冷凝收缩缝,孔隙度中等。从大孤山火山可知,冷凝收缩缝对该火山岩体孔隙度的贡献较大,储层为裂缝型,其中,冷凝收缩缝的缝面呈平直一弯曲状、缝宽中等、缝间距中等。

侵出式火山机构的下部主要发育冷凝收缩缝,孔隙度较低。从西尖山火山可知,冷凝收缩缝对该火山岩体孔隙度的贡献大,储层为裂缝型,其中,冷凝收缩缝的缝面平直、缝宽较小、缝间距大。

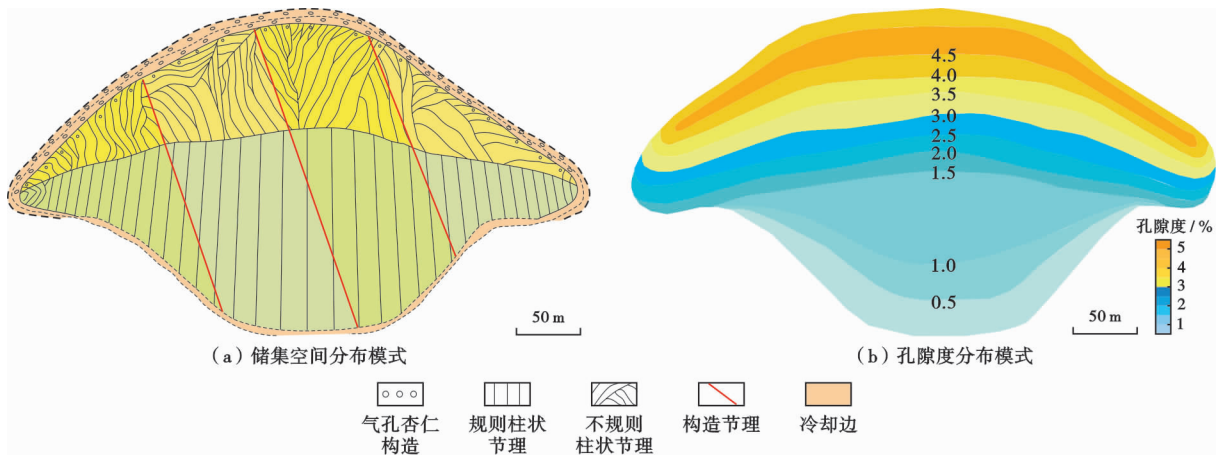


图 7 侵出式火山机构的储层分布模式

Fig. 7 Reservoir distribution pattern of extrusive volcanic edifice

综合分析东小山地区、大孤山地区和西尖山地区的火山岩储层特征表明,在火山机构的上部可发育 1 套有利储层,而中、下部储层与上部储层可通过视长度大的柱状节理缝沟通[图 7(a)]。

侵出式火山机构多呈穹窿状产出,在地形上多形成一个坡度较大的山丘且存在较大的相对高差,因此通常会遭受剥蚀。结合原型模式的特征可知,首先剥蚀掉的是火山中心的顶部,其上部好储层可能会被移除,而边部的好储层由于有上伏地层覆盖可以免于被剥蚀,并在经历风化淋滤后可进一步提升储层孔隙度<sup>[38]</sup>。由此可知,火山在经受改造后可形成“秃顶”模式。在西尖山火山或大孤山火山被埋藏的边缘部位可能存在储层较好的区域。

#### 4.2 侵出式火山机构储层发育的主控因素

储层的建设性成岩作用主要包括原生挥发分逸出、冷凝收缩、炸裂和碎屑颗粒支撑作用等,以及次生重结晶作用、构造改造、大气水-地层水-深部热液溶蚀作用等;储层的破坏性成岩作用主要包括充填作用、压实作用和胶结作用<sup>[39-43]</sup>。伊通火山群的储层形成机理为火山岩冷凝收缩、挥发份逸出、构造作用和风化作用,其中,风化作用主要发生在火山岩出露的表层,所形成的残积层厚度较小且未成岩,对储层改造的贡献估计不大且估算有一定困难。为了探讨冷凝收缩、挥发份逸出、

构造作用和溶蚀作用对储层孔隙度的贡献,笔者选取了伊通火山群的 50 件样品和 DS17 井的 12 件样品进行分析(图 8),其中对面孔缝率贡献大的即为主控因素。

大孤山火山和西尖山火山的岩石组构特征分别对应侵出式火山机构的中、下部,二者储层空间的构成类似,冷凝收缩缝对储层的贡献率可超过 90% [图 8(a)、图 8(b)],故火山岩的冷凝收缩作用是火山机构中、下部储层的主控因素。东小山火山的岩石组构特征对应侵出式火山机构的上部,气孔-杏仁孔、柱状节理、构造缝对储层的贡献率分别占 54.8%、30.9%、14.3% [图 8(c)];故挥发份逸出作用和冷凝收缩作用是侵出式火山机构上部储层的主控因素。考虑到有利储层分布在顶部,所以地表的侵出式火山机构的储层主要受挥发份逸出作用和冷凝收缩作用共同控制。火山在埋藏过程中还可能产生丰富的溶蚀孔,其储层孔隙的贡献率可达 45.7%,而埋藏条件下冷凝收缩缝的贡献率为 33.7% [图 8(d)],因此,在埋藏的侵出式火山机构中,储层的主控因素包括溶蚀作用、挥发份逸出作用和冷凝收缩作用。

#### 4.3 柱状节理几何特征与裂缝密度、地层渗透性的关系

柱状节理是侵出式火山岩储层孔渗性的重要贡献者之一,特别是对于岩石渗透率的贡献。柱状节理的形态按柱体是否平直可分为规则状和不规则状 2 类;

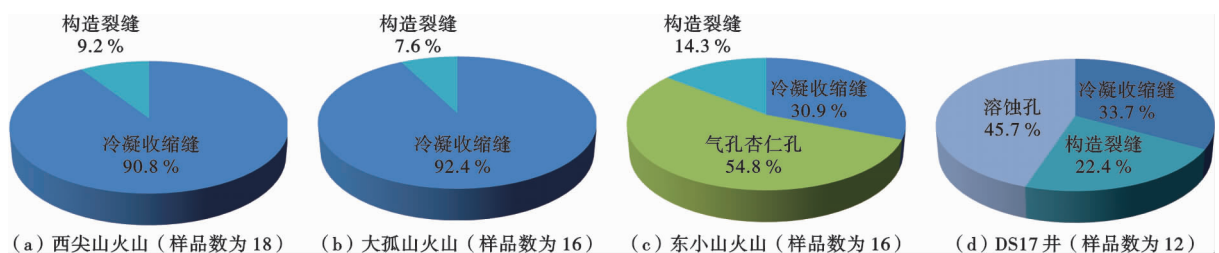


图 8 侵出式火山机构的储集空间类型及其面孔缝率的贡献

Fig. 8 Reservoir space types and their porosity contributions in extrusive volcanic edifice



按柱体横截面多边形的形态可从四边形至七边形依次划分,其中六边形是理想的横截面发育模式;柱体的直径也有较大的差别,在伊通火山群中,火山岩柱体的直径为数厘米至数十厘米。

柱状节理缝的裂缝密度主要受柱体横截面多边形的形态和柱体大小控制。例如,在考虑多边形面积大致相等的情况下对比正四边形与正六边形柱状节理的裂缝密度,正四边形的边长可取 8 cm,正六边形的边长可取 5 cm。在正四边形柱状节理中,平行节理方向的线密度为 13 条/m,而在与节理呈 45°切割方向上的线密度为 18 条/m;平行节理方向 1 m<sup>2</sup> 内的裂缝长度为 26 m,即面密度为 26.00 m/m<sup>2</sup>,而在与节理呈 45°方向上的面密度则为 25.64 m/m<sup>2</sup>。在正六边形柱状节理

中,平行节理方向的线密度为 14 条/m,在与节理呈 45°切割方向上的线密度仍为 14 条/m;平行节理方向 1 m<sup>2</sup> 内的裂缝长度为 24 m,即面密度为 24 m/m<sup>2</sup>。由此可见,在横截面积相等时,正四边形柱状节理较正六边形柱状节理的面密度高。

柱状节理的大小对裂缝的面密度也有直接影响。图 9(a)为在大范围统计横截面的条件下得到的柱状节理边长与裂缝面密度的关系。柱状节理的边长从 5 cm 变化到 100 cm,正四边形柱状节理的裂缝面密度从 42.00 m/m<sup>2</sup> 下降到 2.20 m/m<sup>2</sup>,正六边形柱状节理的裂缝面密度从 24.00 m/m<sup>2</sup> 下降到 1.20 m/m<sup>2</sup>,表现出非线性减少的关系。根据统计结果可以建立多边形柱状节理的裂缝面密度与柱状节理边长的关系。

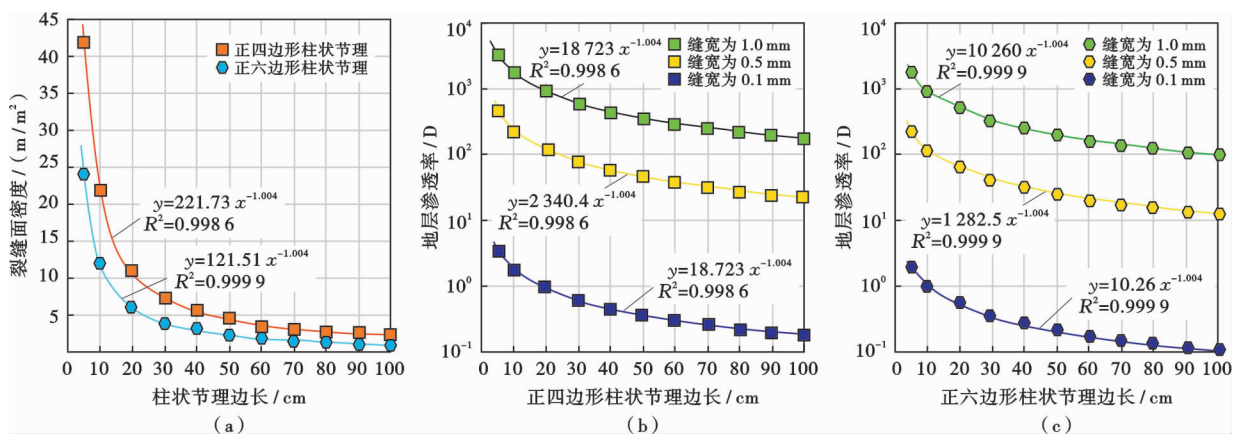


图 9 柱状节理边长与裂缝面密度、渗透率的关系

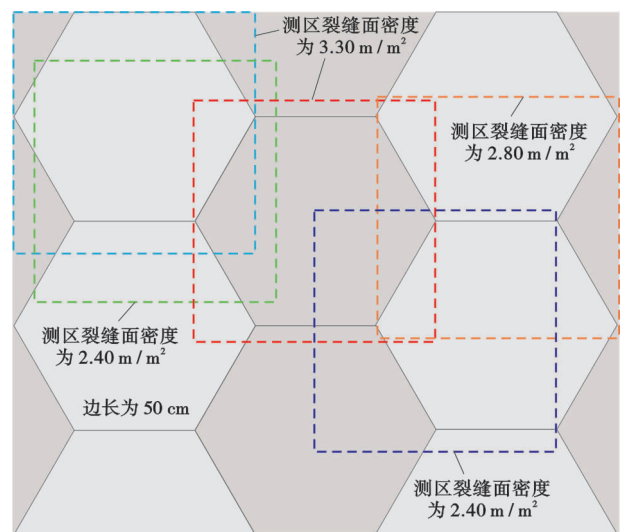
Fig. 9 Relationship of side length of columnar joint with fracture surface density and permeability

在裂缝型地层中,当裂缝的面密度已知,可根据经验关系式<sup>[44]</sup>,利用假设的缝宽来讨论地层的渗透性:

$$K_f = \phi_f b^2 / 12 \quad (2)$$

假设缝宽分别为 0.1 mm、0.5 mm 和 1.0 mm,图 9(b)和图 9(c)分别展示了横截面为正四边形和正六边形的不同边长柱状节理的渗透率计算结果。分析表明,火山岩的柱状节理对其储层的渗透率贡献较大。其中,正四边形柱状节理的渗透性好于同等边长的正六边形柱状节理;相同形状的柱状节理,其渗透率随边长的增加基本呈非线性降低。据此可知,火山岩底部的渗透性差于中、上部,这是由于火山底部柱状节理的边长大于中、上部。柱状节理的边长通常都小于 30 cm,因此柱状节理发育的岩石不论其孔隙度怎样,多属于(极)高渗的储集岩类型。

值得指出的是,野外测量柱状节理的裂缝密度最好不要采用线密度,使用面密度更合理。如果岩体出露的面积小而柱体较大,可能会导致统计结果失真,夸大裂缝的发育程度。图 10 为正六边形柱状节理不同裂缝面密度的测量结果,当受出露条件影响而不能进



注:虚线框的面积为 1 m<sup>2</sup>;不同颜色虚线框指示不同测区裂缝面密度的测量方式;边长为 50 cm 的正六边形柱状节理横截面的裂缝面密度为 2.40 m/m<sup>2</sup>。

图 10 野外调查中裂缝面密度统计的可能误区

Fig. 10 Possible errors in fracture surface density statistics measuring fractures in field survey



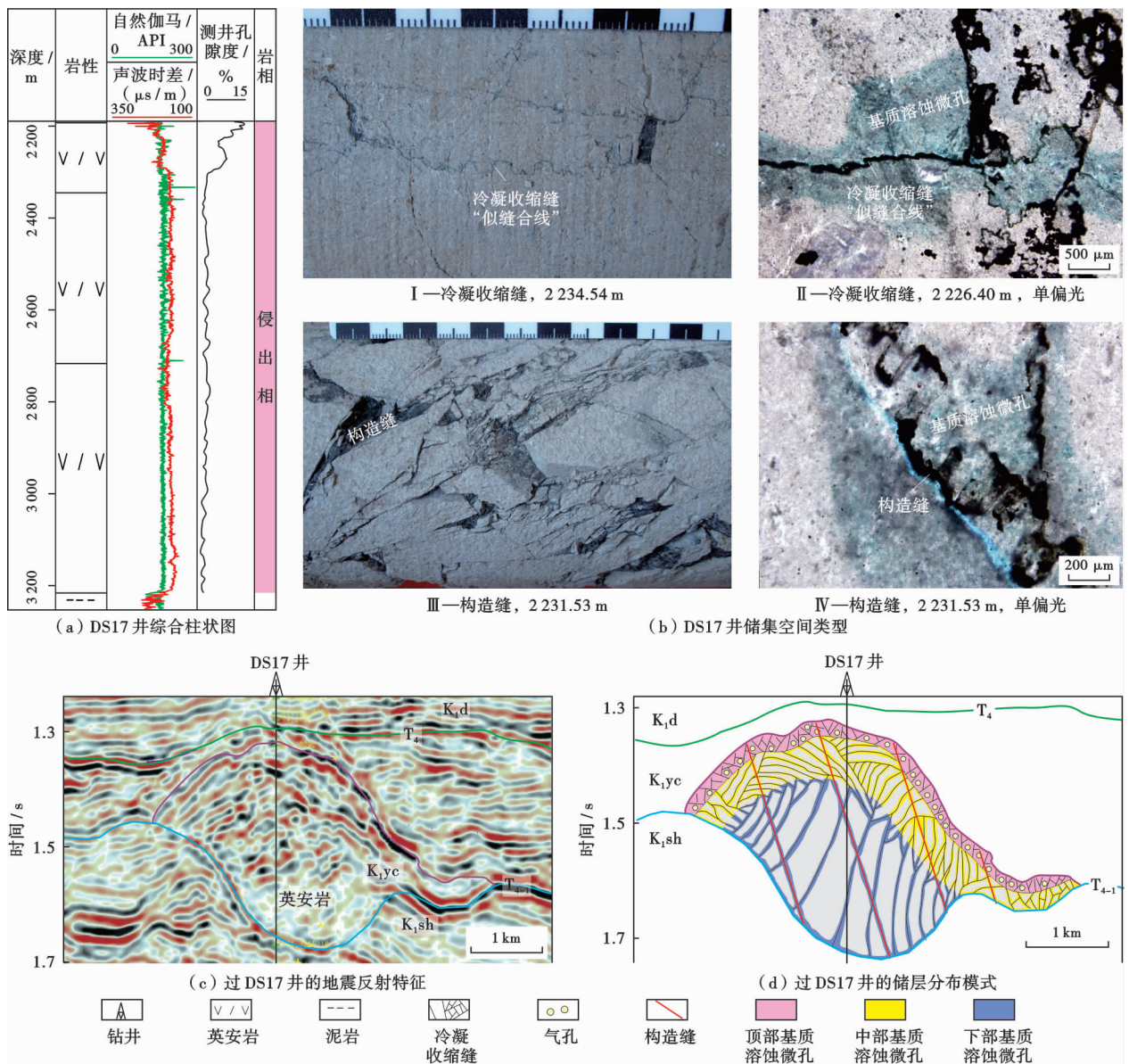
行全面测量时, 5 种方式中有 3 种方式的裂缝面密度测量结果大于实际值(2.40 m/m<sup>2</sup>), 可较实际值高出 37.5%。

#### 4.4 埋藏侵入式火山机构的有利储层及其揭示方式

侵入式火山机构的储层多为低孔—中孔型, 由于高角度裂缝发育, 其渗透率通常非常高, 从下到上, 储层可通过冷凝收缩缝系统沟通。通常情况下, 侵入式火山机构的有利储层只有 1 层, 其厚度可达到数十米。未遭受剥蚀时, 有利储层可以分布于整个火山机构的顶部; 当遭受强烈剥蚀时, 有利储层可能只分布在火山机构的边缘部位。

松辽盆地南部德惠断陷 DS17 井钻遇英安岩类火山机构, 其测井曲线表现为箱形、微齿化, 表明岩性较为单一[图 11(a)]; 取心段揭示冷凝收缩缝和构造

缝较为发育[图 11(b)]; 地震剖面上表现为穹窿状, 同相轴的连续性为差—中等, 振幅为中—弱、低频[图 11(c)]。上述特征表明, DS17 井的火山机构与侵入式火山机构的特征一致。从储集空间类型来看, DS17 井的储层分布模式[图 11(d)]与伊通火山群可对比, 如 DS17 井火山岩的冷凝收缩缝“似缝合线”[图 11(b)的 I 和 II]与伊通火山群的冷凝收缩缝(柱状节理缝)可对应, DS17 井中构造角砾岩的网状构造缝[图 11(b)的 III 和 IV]与伊通火山群的构造节理缝可对应, 而不同之处在于, DS17 井中储层的后期改造过程更复杂、更强烈, 岩石裂缝遭受溶蚀作用, 发育海绵状或筛状孔[图 11(b)的 IV], 可进一步提升总孔隙度和次生孔隙的占比。DS17 井火山岩的铸体薄片显示, “似缝合



注: K<sub>1d</sub>—下白垩统登娄库组; K<sub>1yc</sub>—下白垩统营城组; K<sub>1sh</sub>—下白垩统沙河子组; T<sub>4</sub>—营城组顶面; T<sub>4-1</sub>—沙河子组顶面。

图 11 松辽盆地德惠断陷 DS17 井侵入式火山机构储层模型

Fig. 11 Reservoir model of extrusive volcanic edifice of Well DS17 in the Dehui faulted sag, Songliao Basin

线”冷凝收缩缝的缝宽为 40~50  $\mu\text{m}$ 、缝间距 1~3 cm; 岩心中构造缝的缝宽为 0.5~1.0 cm, 缝面较平直, 缝间距为 1~2 cm。孔隙度构成的分析结果表明, 溶蚀孔的贡献占 45.7%, 冷凝收缩缝中“似缝合线”的贡献占 33.7%, 构造缝的贡献占 22.4%, 次生孔隙的贡献占 68.1%。DS17 井在 1 km 进尺中仅在顶部见到 1 层优质储层, 整体上储层与地层的厚度比较小, 与伊通火山群揭示的单期火山机构的储层分布特征相似。

依据储层分布模式, 对未遭受剥蚀的单期火山机构, 可采取揭示其中心相带的方法, 即在火山中心上层钻进 100~200 m 就可完全揭示出该火山机构的有利储层位置, 而无需将整个火山机构全部揭示出来。对于剥蚀严重的单期火山机构, 可采取揭示其翼部的方法, 即在火山中心的侧翼上层钻进约 100 m 就可揭示出火山机构的有利储层位置, 然后依据层结构, 可采用斜井的钻探方式向四周扩展。

## 5 结 论

(1) 侵出式火山机构的储层为裂缝-孔隙型, 发育丰富的柱状节理缝和少量的气孔、杏仁孔和构造裂缝, 具有低孔—中孔和高渗透率的特征。整个火山机构的储层可以通过柱状节理缝沟通, 储层受火山岩冷凝收缩作用和挥发份逸出作用控制。

(2) 柱状节理缝的裂缝密度主要受柱体横截面多边形的形态和柱体大小控制。在横截面积相等时, 正四边形柱状节理较正六边形柱状节理的裂缝面密度高。柱状节理的大小控制着裂缝的面密度, 柱状节理边长的增大与其裂缝面密度基本呈非线性减少的关系。柱状节理发育的火山岩具有特高的渗透率。

(3) 火山岩油气藏的有利储层多分布在火山机构的顶部, 厚度为数十米, 储层物性在中心相带区域相对较好、向边部变差, 整体上储层与地层的厚度比较小。对于未受剥蚀的火山机构可采取揭示其火山中心相带上层的方法, 对于受剥蚀严重的火山机构可采取揭示其翼部上层的方法寻找有利储层位置。

**符号注释:**  $\phi_{\text{tot}}$ —总孔隙度;  $\phi_{\text{mac}}$ —宏观缝的面缝率, 由于样品加工时不能包含裂缝, 该数据利用图像分析方法获得;  $\phi_{\text{mic}}$ —微观孔缝的孔隙度, 利用压氦法测试获得;  $\phi_l$ —裂缝的孔隙度;  $K_f$ —地层渗透率, mD;  $b$ —缝宽, m;  $R$ —拟合相关系数。

## 参 考 文 献

[1] 唐华风, 赵鹏九, 高有峰, 等. 盆地火山地层时空属性和岩石地层单位[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2017, 47(4): 949-973.

TANG Huafeng, ZHAO Pengjiu, GAO Youfeng, et al. Spatio-temporal attributes of volcano stratigraphy and its lithostratigraphic units in a basin[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2017, 47(4): 949-973.

- [2] 唐华风, 王璞珺, 李瑞磊, 等. 松辽盆地断陷层火山机构类型及其气藏特征[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2012, 42(3): 583-589. TANG Huafeng, WANG Pujun, LI Ruilei, et al. Classification of volcanic edifices and its characteristics of gas pool in faulted sequence of the Songliao Basin, NE China[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2012, 42(3): 583-589.
- [3] 衣健, 王璞珺, 唐华风, 等. 火山地层界面的地质属性、地质内涵和储层意义——以中国东北地区中生代—新生代火山岩为例[J]. 石油学报, 2015, 36(3): 324-336. YI Jian, WANG Pujun, TANG Huafeng, et al. Geological property, geological connotation and reservoir significance of volcanostratigraphic boundary: a case study of the Mesozoic & Cenozoic volcanic rocks in northeastern China[J]. Acta Petroli Sinica, 2015, 36(3): 324-336.
- [4] 赵然磊, 王璞珺, 赵慧, 等. 火山地层界面的储层意义——以松辽盆地南部火石岭组为例[J]. 石油学报, 2016, 37(4): 454-463. ZHAO Ranlei, WANG Pujun, ZHAO Hui, et al. Reservoir significance of volcanostratigraphic boundary: a case study of Huoshiling Formation, Southern Songliao Basin[J]. Acta Petroli Sinica, 2016, 37(4): 454-463.
- [5] 唐华风, 孙海波, 高有峰, 等. 火山地层界面的类型、特征和储层意义[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2013, 43(5): 1320-1329. TANG Huafeng, SUN Haibo, GAO Youfeng, et al. Types and characteristics of volcanostratigraphic boundary and its significance of reservoirs[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2013, 43(5): 1320-1329.
- [6] 侯连华, 王京红, 邹才能, 等. 火山岩风化体储层控制因素研究——以三塘湖盆地石炭系卡拉岗组为例[J]. 地质学报, 2011, 85(4): 557-568. HOU Lianhua, WANG Jinghong, ZHOU Caineng, et al. Controlling factors of weathering volcanic reservoir: an example from the Carboniferous Kalagang Formation in Santanghu Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(4): 557-568.
- [7] 王君, 朱如凯, 郭宏莉, 等. 火山岩风化壳储层发育模式——以三塘湖盆地马朗凹陷石炭系火山岩为例[J]. 岩石学报, 2010, 26(1): 217-226. WANG Jun, ZHU Rukai, GUO Hongli, et al. Weathered crust volcanic reservoir: a case study on Malang depression, Carboniferous, Santanghu Basin, NW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(1): 217-226.
- [8] 王永卓, 周学民, 印长海, 等. 徐深气田成藏条件及勘探开发关键技术[J]. 石油学报, 2019, 40(7): 866-886. WANG Yongzhuo, ZHOU Xuemin, YIN Changhai, et al. Gas accumulation conditions and key exploration & development technologies in Xushen gas field[J]. Acta Petroli Sinica, 2019, 40(7): 866-886.
- [9] 罗静兰, 侯连华, 蒋宜勤, 等. 陆东地区火成岩形成时代与构造背景及火山岩储层成因[J]. 石油学报, 2012, 33(3): 351-360. LUO Jinglan, HOU Lianhua, JIANG Yiqin, et al. Chronology and

- tectonic settings of igneous rocks and origin of volcanic reservoirs in Ludong area, eastern Junggar Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(3): 351-360.
- [10] 文龙, 李亚, 易海永, 等. 四川盆地二叠系火山岩岩相与储层特征[J]. *天然气工业*, 2019, 39(2): 17-27.  
WEN Long, LI Ya, YI Haiyong, et al. Lithofacies and reservoir characteristics of Permian volcanic rocks in the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(2): 17-27.
- [11] 蔡东梅, 孙立东, 齐景顺, 等. 徐家围子断陷火山岩储层特征及演化规律[J]. *石油学报*, 2010, 31(3): 400-407.  
CAI Dongmei, SUN Lidong, QI Jingshun, et al. Reservoir characteristics and evolution of volcanic rocks in Xujiaweizi fault depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(3): 400-407.
- [12] 鲜本忠, 牛花朋, 朱筱敏, 等. 准噶尔盆地西北缘下二叠统火山岩岩性、岩相及其与储层的关系[J]. *高校地质学报*, 2013, 19(1): 46-55.  
XIAN Benzong, NIU Huapeng, ZHU Xiaomin, et al. Early Permian volcanic lithology, lithofacies and their relations to reservoir in northwestern margin of the Junggar Basin[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2013, 19(1): 46-55.
- [13] WANG Pujun, CHEN Shumin. Cretaceous volcanic reservoirs and their exploration in the Songliao Basin, northeast China[J]. *AAPG Bulletin*, 2015, 99(3): 499-523.
- [14] 侯启军. 松辽盆地南部火山岩储层主控因素[J]. *石油学报*, 2011, 32(5): 749-756.  
HOU Qijun. Main controlling factors of volcanic reservoirs in the southern Songliao Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(5): 749-756.
- [15] 唐华风, 庞彦明, 边伟华, 等. 松辽盆地白垩系营城组火山机构储层定量分析[J]. *石油学报*, 2008, 29(6): 841-845.  
TANG Huafeng, PANG Yanming, BIAN Weihua, et al. Quantitative analysis on reservoirs in volcanic edifice of Early Cretaceous Yingcheng Formation in Songliao Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(6): 841-845.
- [16] 李启涛. 惠民凹陷商河地区沙一段火山岩储层成因及分布[J]. *断块油气田*, 2012, 19(1): 80-83.  
LI Qitao. Genesis and distribution of volcanic reservoir of the first member of Shahejie Formation in Shanghe region, Huimin sag[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2012, 19(1): 80-83.
- [17] 孙中春, 蒋宜勤, 查明, 等. 准噶尔盆地石炭系火山岩储层岩性岩相模式[J]. *中国矿业大学学报*, 2013, 42(5): 782-789.  
SUN Zhongchun, JIANG Yiqin, ZHA Ming, et al. Lithology-lithofacies model of Carboniferous volcanic reservoirs in the Junggar Basin, NW China[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2013, 42(5): 782-789.
- [18] 张勇, 查明, 陈中红, 等. 准噶尔盆地石西油田火山岩原生气孔分布序列及其成因[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2013, 44(1): 251-256.  
ZHANG Yong, ZHA Ming, CHEN Zhonghong, et al. Volcanic primary pore distribution sequence and its causes in Shixi oilfield of Junggar Basin[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2013, 44(1): 251-256.
- [19] 黄玉龙, 王璞珺, 舒萍, 等. 松辽盆地营城组中基性火山岩储层特征及成储机理[J]. *岩石学报*, 2010, 26(1): 82-92.  
HUANG Yulong, WANG Pujun, SHU Ping, et al. Characteristics and formation mechanism of the Cretaceous intermediate and mafic volcanic reservoirs in Songliao Basin, NE China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(1): 82-92.
- [20] 聂保锋, 于炳松, 李正科, 等. 新疆三塘湖盆地牛东区块晚石炭世一二叠纪火山岩相及储层特征[J]. *岩性油气藏*, 2009, 21(3): 18-22.  
NIE Baofeng, YU Bingsong, LI Zhengke, et al. Lithofacies and reservoir characteristics of Late Carboniferous-Permian volcanic rocks in Niudong block, Santanghu Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2009, 21(3): 18-22.
- [21] 唐华风, 杨迪, 邵明礼, 等. 火山地层就位环境对储集层分布的约束——以松辽盆地王府断陷侏罗系火石岭组二段流纹质火山岩层为例[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(4): 573-579.  
TANG Huafeng, YANG Di, SHAO Mingli, et al. Constraint of volcano-stratigraphic emplacement environment on the reservoir distribution: a case analysis of rhyolitic volcanic strata in the 2nd member of Jurassic Huoshiling Formation in Wangfu fault depression, Songliao Basin, East China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(4): 573-579.
- [22] 冯冲, 王清斌, 谭忠健, 等. 富火山碎屑地层复杂岩性测井分类与识别——以KL16油田为例[J]. *石油学报*, 2019, 40(增刊2): 91-101.  
FENG Chong, WANG Qingbin, TAN Zhongjian, et al. Logging classification and identification of complex lithologies in volcanic debris-rich formations: an example of KL16 oilfield[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(S2): 91-101.
- [23] 唐华风, 孔坦, 刘祥, 等. 松辽盆地下白垩统沉火山碎屑岩优质储层特征和形成机理[J]. *石油学报*, 2016, 37(5): 631-643.  
TANG Huafeng, KONG Tan, LIU Xiang, et al. Characteristics and formation mechanisms of high quality reservoir of volcaniclastic sedimentary rocks of Early Cretaceous in Songliao Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(5): 631-643.
- [24] 杨笑, 王志章, 周子勇, 等. 基于参数优化 AdaBoost 算法的酸性火山岩岩性分类[J]. *石油学报*, 2019, 40(4): 457-467.  
YANG Xiao, WANG Zhizhang, ZHOU Ziyong, et al. Lithology classification of acidic volcanic rocks based on parameter-optimized AdaBoost algorithm[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(4): 457-467.
- [25] 唐华风, 胡佳, 李建华, 等. 松辽盆地断陷期火山岩典型地震相的地质解译[J]. *石油地球物理勘探*, 2018, 53(5): 1075-1084.  
TANG Huafeng, HU Jia, LI Jianhua, et al. Geological significances of typical seismic facies of volcanic rocks of the rifted period in Songliao Basin, NE China[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2018, 53(5): 1075-1084.
- [26] 刘纯青, 刘富呈, 张甲. 吉林省近代火山的特征及成因讨论[J]. *吉林地质*, 2009, 28(1): 12-17.  
LIU Chunqing, LIU Fucheng, ZHANG Jia. Characteristics and genesis of the recent volcanoes in Jilin Province[J]. *Jilin Geology*, 2009, 28(1): 12-17.
- [27] 王振中. 吉林省伊通火山群[J]. *吉林地质*, 1994, 13(2): 29-35.  
WANG Zhenzhong. The Yitong volcanic cluster of Jilin Province[J]. *Jilin Geology*, 1994, 13(2): 29-35.



- [28] 邹瑜,陈振林,苗洪波,等.伊通盆地基底火成岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J].岩性油气藏,2011,23(6):73-78.  
ZOU Yu, CHEN Zhenlin, MIAO Hongbo, et al. LA-ICP-MS U-Pb dating of zircon from basement igneous rocks in Yitong Basin and its significance[J]. Lithologic Reservoirs, 2011, 23(6): 73-78.
- [29] 王慧芬,杨学昌,朱炳泉,等.中国东部新生代火山岩 K-Ar 年代学及其演化[J].地球化学,1988(1):1-12.  
WANG Huifen, YANG Xuechang, ZHU Bingquan, et al. K-Ar geochronology and evolution of Cenozoic volcanic rocks in eastern China[J]. Geochimica, 1988(1): 1-12.
- [30] 刘嘉麒.中国东北地区新生代火山岩的年代学研究[J].岩石学报,1987,3(4):21-31.  
LIU Jiaqi. Study on geochronology of the Cenozoic volcanic rocks in northeast China[J]. Acta Petrologica Sinica, 1987, 3(4): 21-31.
- [31] 张辉煌,徐义刚,葛文春,等.吉林伊通-大屯地区晚中生代-新生代玄武岩的地球化学特征及其意义[J].岩石学报,2006,22(6):1579-1596.  
ZHANG Huihuang, XU Yigang, GE Wenchun, et al. Geochemistry of Late Mesozoic-Cenozoic basalts in Yitong-Datun area, Jilin Province and its implication [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(6): 1579-1596.
- [32] 武殿英.吉林伊通新生代玄武岩的岩浆起源[J].岩石学报,1989(2):65-75.  
WU Dianying. Magma origin of Cenozoic basalts in Yi Tong county, Ji Lin Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 1989(2): 65-75.
- [33] 付长亮,孙德有,魏红艳,等.伊通新生代玄武岩地球化学成分差异性研究[J].吉林大学学报:地球科学版,2009,39(3):446-454.  
FU Changliang, SUN Deyou, WEI Hongyan, et al. Research on the geochemical difference of the Cenozoic basalts in Yitong area[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2009, 39(3): 446-454.
- [34] GÈZE B. Sur la classification des dynamismes volcaniques[J]. Bulletin Volcanologique, 1964, 27(1): 237-257.
- [35] 王仁冲,徐怀民,邵雨,等.准噶尔盆地陆东地区石炭系火山岩储层特征[J].石油学报,2008,29(3):350-355.  
WANG Renchong, XU Huaimin, SHAO Yu, et al. Reservoir characteristics of Carboniferous volcanic rocks in Ludong area of Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(3): 350-355.
- [36] 赵澄林.火山岩储层储集空间形成机理及含油气性[J].地质论评,1996,42(增刊1):37-43.  
ZHAO Chenglin. Formation mechanism of reservoir space and oil possibility of volcanic reservoirs[J]. Geological Review, 1996, 42(S1): 37-43.
- [37] 何登发,陈新发,况军,等.准噶尔盆地石炭系油气成藏组合特征及勘探前景[J].石油学报,2010,31(1):1-11.  
HE Dengfa, CHEN Xinfu, KUANG Jun, et al. Characteristics and exploration potential of Carboniferous hydrocarbon plays in Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(1): 1-11.
- [38] 张兆辉,杜社宽,陈华勇,等.基于电成像测井的火山岩裂缝分布定量表征——以准噶尔盆地滴西地区石炭系为例[J].石油学报,2018,39(10):1130-1140.  
ZHANG Zhaohui, DU Shekuan, CHEN Huayong, et al. Quantitative characterization of volcanic fracture distribution based on electrical imaging logging: a case study of Carboniferous in Dixi area, Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(10): 1130-1140.
- [39] 高有峰,刘万洙,纪学雁,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):1251-1258.  
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): 1251-1258.
- [40] 罗静兰,邵红梅,杨艳芳,等.松辽盆地深层火山岩储层的埋藏-烃类充注-成岩时空演化过程[J].地学前缘,2013,20(5):175-187.  
LUO Jinglan, SHAO Hongmei, YANG Yanfang, et al. Temporal and spatial evolution of burial-hydrocarbon filling-diagenetic process of deep volcanic reservoir in Songliao Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(5): 175-187.
- [41] 邱隆伟,姜在兴,席庆福.欧利坨子地区沙三下亚段火山岩成岩作用及孔隙演化[J].石油与天然气地质,2000,21(2):139-143.  
QIU Longwei, JIANG Zaixing, XI Qingfu. Diagenesis and pore evolution of lower Es<sub>3</sub> volcanic rocks in Oulituozhi region[J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(2): 139-143.
- [42] 高有峰,吴艳辉,刘万洙,等.松辽盆地南部英台断陷营城组火山岩晶间微孔特征及储层效应[J].石油学报,2013,34(4):667-674.  
GAO Youfeng, WU Yanhui, LIU Wanzhu, et al. Intercrystalline micropore characteristics and reservoir effect of Yingcheng Formation volcanic rock in Yingtai fault depression, southern Songliao Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(4): 667-674.
- [43] TANG Huafeng, ZHAO Xinying, SHAO Mingli, et al. Reservoir origin and characterization of gas pools in intrusive rocks of the Yingcheng Formation, Songliao Basin, NE China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, 84: 148-159.
- [44] ZIMMERMAN R W, BODVARSSON G S. Hydraulic conductivity of rock fractures[J]. Transport in Porous Media, 1996, 23: 1-30.

(收稿日期 2019-07-05 改回日期 2019-12-04 编辑 雷永良)