

辽河盆地古近系水下喷发粗面岩相模式 及其储层意义

黄玉龙¹, 单俊峰², 刘海波¹, 张 斌², 冯玉辉³, 郎洪亮⁴

(1. 吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061; 2. 中国石油辽河油田分公司勘探开发研究院, 辽宁盘锦 124010;
3. 沈阳师范大学古生物学院, 辽宁沈阳 110034; 4. 中国石油集团长城钻探工程有限公司录井公司, 辽宁盘锦 124010)

摘要:以辽河盆地东部凹陷古近系水下喷发粗面岩为例,研究粗面岩岩相分类、相序与相模式,分析其优质储层控制因素与分布规律;通过单井相分析和连井岩相对比,将粗面岩划分为 5 相 11 亚相,建立粗面岩火山机构的相模式。结果表明:火山口—近火山口相带以侵出相发育为标志,过渡相带以爆发相火山碎屑流亚相为主,边缘相带主要由爆发相空落亚相和火山沉积相构成,纵向相序以爆发相→侵出相、火山通道相→侵出相两类为主,自中心向边缘的平面相序为火山通道相与侵出相→溢流相与爆发相→火山沉积相;水-岩浆反应产生的淬火和爆发作用是水下喷发粗面岩岩相空间分布和储层有效性的关键影响因素;与角砾状粗面岩类的岩石结构相关的粒内溶孔和残余粒间孔-填隙物溶孔构成有效孔隙的主体,粒内斑晶溶孔和基质溶孔对储集性能贡献最大,合计占 53.2%,构造裂缝对渗透性能起控制作用;侵出相外带亚相、爆发相火山碎屑流亚相和火山通道相火山颈亚相是粗面岩发育的 3 类优质储层,其平均孔隙度大于 10.3%,渗透率大于 $0.35 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,应作为粗面岩油气藏勘探的首要目标。

关键词:粗面岩;火山岩相;相模式;水下喷发;火山岩储层;辽河盆地

中图分类号:TE 122.2 **文献标志码:**A

引用格式:黄玉龙,单俊峰,刘海波,等.辽河盆地古近系水下喷发粗面岩相模式及其储层意义[J].中国石油大学学报(自然科学版),2019,43(1):1-11.

HUANG Yulong, SHAN Junfeng, LIU Haibo, et al. Facies architecture of Paleogene subaqueous trachytes and its implications for hydrocarbon reservoirs in Liaohe Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2019, 43(1): 1-11.

Facies architecture of Paleogene subaqueous trachytes and its implications for hydrocarbon reservoirs in Liaohe Basin

HUANG Yulong¹, SHAN Junfeng², LIU Haibo¹, ZHANG Bin², FENG Yuhui³, LANG Hongliang⁴

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

2. Research Institute of Liaohe Oilfield, CNPC, Panjin 124010, China;

3. College of Paleontology, Shenyang Normal University, Shenyang 110034, China;

4. CNPC Great Wall Mudlogging Company, Panjin 124010, China)

Abstract: The Paleogene trachytes in the Eastern Sag of Liaohe Basin were dominantly erupted and emplaced in subaqueous settings. Borehole data and seismic profiles were used to study the facies classification, sequence and architecture of these trachytic rocks, and to reveal the distribution of high-quality reservoirs and their controlling factors. Five principal volcanic facies and eleven sub-facies can be identified in the trachytic successions by means of facies analysis on both boreholes and cross-sections. A representative facies model was proposed for volcanic facies analysis and prediction, which reveals three volcanic facies associations corresponded to the proximity to volcanic conduit. Respectively, the central-proximal facies association is dominated by extrusive lava rocks, while the medial facies association is characterized by pyroclastic flow deposits,

and the distal facies association is composed of water-settled fall deposits and volcanoclastic deposits. Two vertical facies sequences from bottom to top are explosive to extrusive facies and volcanic conduit to extrusive facies, respectively. Lateral facies sequence from volcanic center to edge can be described as the volcanic conduit and extrusive facies combination, the effusive and explosive facies combination, and the volcanoclastic facies. Quenching fragmentation and volcanic explosion resulted from mingling of magma and water are considered to be the key influencing factors to the characteristics of volcanic facies and reservoirs of subaqueous trachytes in the study area. Intra-particle dissolution pores, residual inter-particle pores and the related inter-particle cement dissolution pores are proven to be the most important valid porosities in trachytic reservoirs. The intra-particle phenocrystal and matrix dissolution pores, especially, make the major contribution to reserve capacities which account for 53.2% in total, while the permeability is determined by tectonic fractures. Three principal types of high-quality reservoirs with average porosity larger than 10.3% and permeability larger than $0.35 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ are developed in outer extrusive sub-facies, pyroclastic flow sub-facies and volcanic diatreme sub-facies, which should be taken as the major exploration targets of the subaqueous trachytic successions.

Keywords: trachyte; volcanic facies; facies architecture; subaqueous eruption; volcanic reservoir; Liaohe Basin

含油气盆地的火山活动及其产物在油气成烃、成储和成藏等方面都具有重要作用^[1-2]。渤海湾盆地中—新生界地层中已发现大量火山岩油气藏,其北部辽河拗陷发育的古近系粗面岩油藏是国内外具有代表性的火山岩油气藏之一^[3-4]。自20世纪70年代至今,东部凹陷陆续探明了热河台、欧利坨子和黄沙坨等高产火山岩油气藏^[5],其中90%以上的油气储量赋存在粗面岩储集层之中。但目前已探明储量区面积仅约占粗面岩发育区总面积的40%,且主要集中在烃源岩发育区和构造优势部位,尚有大面积的相对低勘探程度区有待进一步挖潜油气储量。火山岩相分析和相模式的建立在与火山岩相关矿产勘查中具有重要指导意义^[6-7]。油气勘探和研究表明辽河盆地古近系粗面岩形成于水下环境^[8],其岩相和储层发育特征与陆上喷发的火山岩具有显著差异。对于辽河盆地古近系粗面岩产状存在喷出相和次火山岩相两种认识,前者认为粗面岩由喷发成因的粗面质熔岩和火山碎屑岩构成^[9],后者将其解释为次火山岩成因的粗面斑岩和粗面质隐爆角砾岩^[10]。随着近年来钻井数量与取心资料的增加以及测井和地震资料更新与分辨率提高,证实两种成因的产物均有发育,其中以喷发相占主体,而次火山岩相(包括次火山岩和隐爆角砾岩两类)所占比例很小。通过与国内外水下喷发火山岩发育特征进行对比分析^[11-12],显示东部凹陷沙三段粗面岩主体上由水下侵出岩穹和水汽-岩浆爆发作用形成的火山碎屑堆积两部分构成。对水下喷发就位火山岩的岩相分布模式和储层主控因素认识不足,制约了研究区勘探范围拓展和油气储量突破。为了进一步厘清粗面岩岩相与亚相分类、空间展布及其对储层的控

制作用,笔者以勘探程度较高、井网密度大的黄沙坨-欧利坨子-热河台地区为例,依据钻井岩心、岩屑和测井以及地震资料,通过单井相分析和连井岩相对比,开展水下喷发粗面岩火山岩相划分、相序分析和相模式研究,总结不同火山机构相带的岩相和亚相组合及相序特征,并结合储层与岩相关系分析,探讨水下喷发环境对粗面岩优质储层发育的控制作用,研究储层成因及分布规律。

1 地质背景

辽河盆地位于渤海湾盆地东北角,是中—新生代发育起来的陆内裂谷盆地。自古近纪开始,在太平洋板块NNW向强烈俯冲和印度板块向NE方向不断推压的区域应力场共同作用下^[13],区内构造活动强烈,尤其始新统沙河街组三段时期盆地发生强烈断陷,沉降和沉积速率大,火山活动频繁且规模较大^[8]。沙河街组三段中亚段沉积时期,断裂活动强度有所减弱,岩浆上涌速度大幅度减慢,玄武质岩浆在上升过程中经历了橄榄石、辉石、斜长石和钾长石等分离结晶作用而形成粗面质岩浆^[14],沿北东向主干断裂系发育多个喷发中心,表现为受断裂控制的中心式喷发,相邻火山岩体之间存在侧向叠置并沿断裂延伸方向连续分布,整体上受渐新世东营期断裂走滑改造移位而呈现出现今沿断裂单侧分布的格局(图1(b))。沙河街组三段时期为东部凹陷水深最大、水体范围最广的主成盆期^[8],粗面质岩浆喷发就位以水下环境为主^[14],在岩浆喷发的同时亦沉积形成了大套优质烃源岩,火山岩储集层与烃源岩的近源配置关系形成了辽河盆地古近纪极具特色的火山岩油气藏。

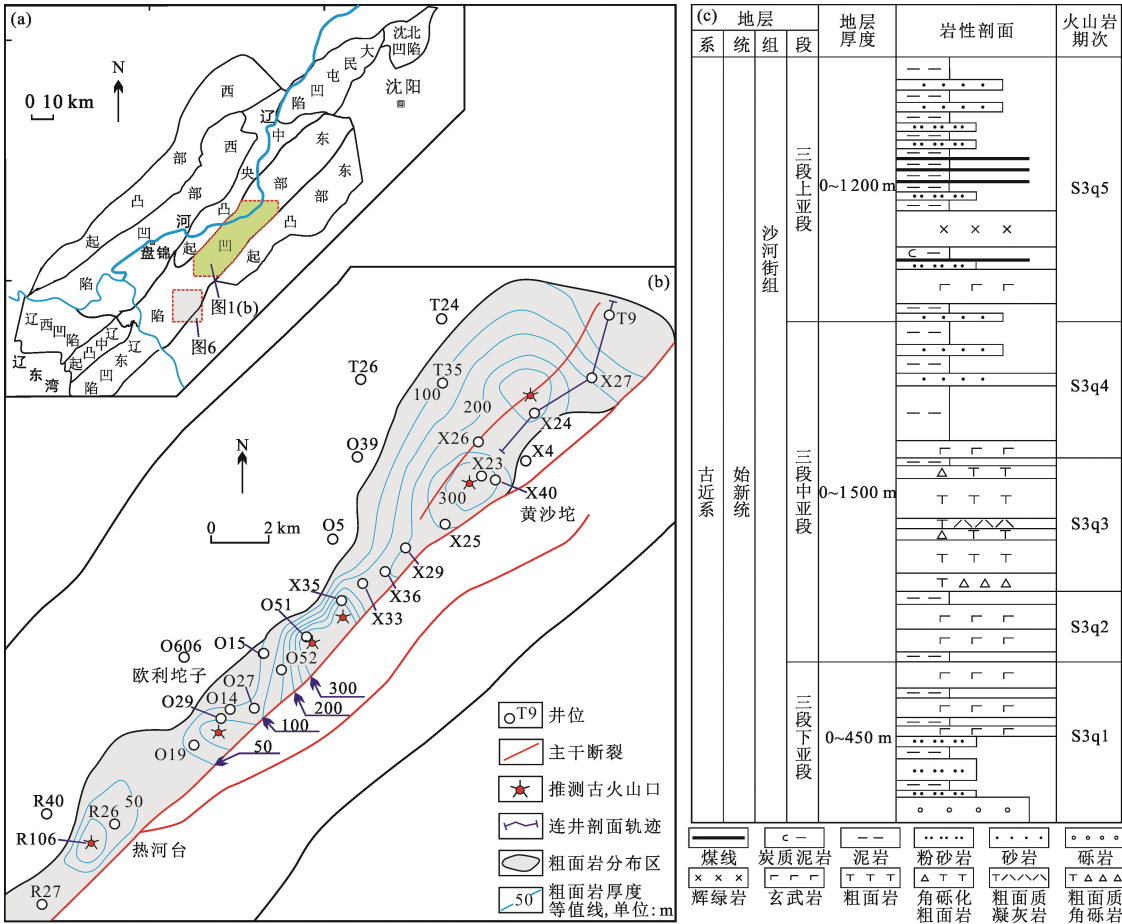


图 1 辽河盆地东部凹陷构造位置与古近系粗面岩分布及地层柱状剖面

Fig. 1 Tectonic location and distribution of Paleogene trachytes in the Eastern Sag of Liaohe Basin

2 埋藏火山岩岩相分析方法

盆地内部作为油气储层的火山岩一般分布在深度 2.5 ~ 4.5 km, 由于无法直接观察和描述埋藏火山岩体的外部形态和内部结构, 主要依据钻井、测井和地震资料所反映的不同尺度的地质信息, 对其埋藏火山岩岩相进行综合识别、分类描述与预测。

通过对钻井获取的岩心、井壁取心和岩屑等实物标本进行观察, 结合对应的薄片显微镜下岩矿鉴定, 确定一系列深度所对应岩层的岩性、结构和构造等反映岩石成因的地质信息, 建立钻井岩性柱状图。油气田探井岩心和井壁取心主要位于含油气目的层的局部井段, 数量较少, 而钻井岩屑标本由于个体小 (以毫米级为主), 对于角砾级以上火山碎屑岩类难以准确判定, 因此需要地质和测井相结合实现对单井火山岩相类型划分和纵向相序分析, 并开展相邻钻井之间火山岩层序-岩相的连井对比。埋藏火山岩岩相空间展布特征的剖面和平面对分析是在单井相分析和连井对比的基础上, 再结合地震剖面解释并

划分地震相单元, 圈定火山岩体轮廓并刻画其内部界面^[15], 同时确定火山口和火山通道的分布位置, 在单井相约束下对剖面火山岩相进行标定和解释。

3 粗面岩岩相发育特征

3.1 粗面岩岩相分类

单井火山岩相分析表明, 东部凹陷古近系沙河街组三段粗面岩发育 5 相 11 亚相 (表 1)。依据欧-黄-热地区 22 口井 4440 m 井段火山岩相划分结果统计, 显示侵出相发育厚度最大 (约占 51.60%), 其次为爆发相 (约占 25.82%), 余下依次为火山沉积相、溢流相和火山通道相。

从粗面岩岩石类型及厚度的空间分布特征可以看出, 形成粗面岩层系的岩浆活动为受断裂控制的中心式喷发 (图 1(b))。火山通道相在剖面上表现为近直立状穿切围岩地层, 呈向下收敛的筒状或漏斗状, 结合岩性混杂所反映出的地震杂乱反射特征^[15], 在地震剖面上识别出火山机构中心, 对于进一步分析火山机构内部各相带及其岩相展布规律具

有重要意义。

表 1 辽河盆地新生界粗面岩岩相分类
Table 1 Lithofacies classification of Cenozoic trachytes in Liaohe Basin

岩相	亚相(代号)	代表性岩石类型	厚度百分比/%
火山通道相	火山颈(Ⅰ ₁)	粗面岩、粗面质火山碎屑熔岩/熔结火山碎屑岩	6.64
	次火山岩(Ⅰ ₂)	粗面斑岩	1.36
	隐爆角砾岩(Ⅰ ₃)	粗面质隐爆角砾岩	0.54
爆发相	空落(Ⅱ ₁)	粗面质凝灰岩	7.48
	火山碎屑流(Ⅱ ₃)	粗面质角砾岩/角砾熔岩/熔结角砾岩	18.34
溢流相	板状熔岩流(Ⅲ ₁)	块状粗面岩、角砾化粗面岩	4.51
侵入相	内带(Ⅳ ₁)	块状粗面岩、粗面斑岩	20.71
	中带(Ⅳ ₂)	微晶粗面岩	17.94
	外带(Ⅳ ₃)	角砾化粗面岩、粗面质角砾/集块熔岩	12.95
火山沉积相	再搬运火山碎屑沉积(V ₁)	粗面质沉凝灰岩/沉火山角砾岩	4.70
	含外碎屑火山沉积(V ₂)	凝灰质泥岩/砂岩/砾岩	4.83

侵入相在粗面岩岩相中所占比例最大,是区内粗面岩最具代表性的岩相类型^[16]。侵入岩穹具圈层状结构,由内向外依次划分为内带、中带和外带3类亚相,三者呈渐变过渡关系(图2)。内带亚相位于岩穹核部,形成时冷却速度相对缓慢,岩石以多斑-聚斑结构、块状构造和柱状节理发育为特征;外带亚相由角砾化粗面岩和粗面质角砾/集块熔岩组成,因位于岩穹外部接触水体而冷却速度相对较快,岩石表现为具角砾状构造,角砾为原位淬碎堆积,边缘多发育浅化冷凝边,其内部基质为隐晶质-玻璃质结构。中带亚相为内带和外带之

间的过渡部分,其岩石特征介于上述两者之间。
爆发相为水汽-岩浆作用产物,包括火山碎屑流和空落两类亚相,由于喷发和堆积环境以水下为主,因而低密度的蒸汽涌流堆积(热基浪亚相)不发育。爆发相在纵向上表现出火山碎屑成分组成的差异,第一套爆发相(下部)中多见下伏玄武岩的角砾(或岩屑),而第二套爆发相(上部)几乎全部由粗面质火山碎屑组成(图3)。对于同一套爆发相,其平面上主要表现出粒度和分选性的差异,整体上自火山口向远端粒度减小,分选变好。

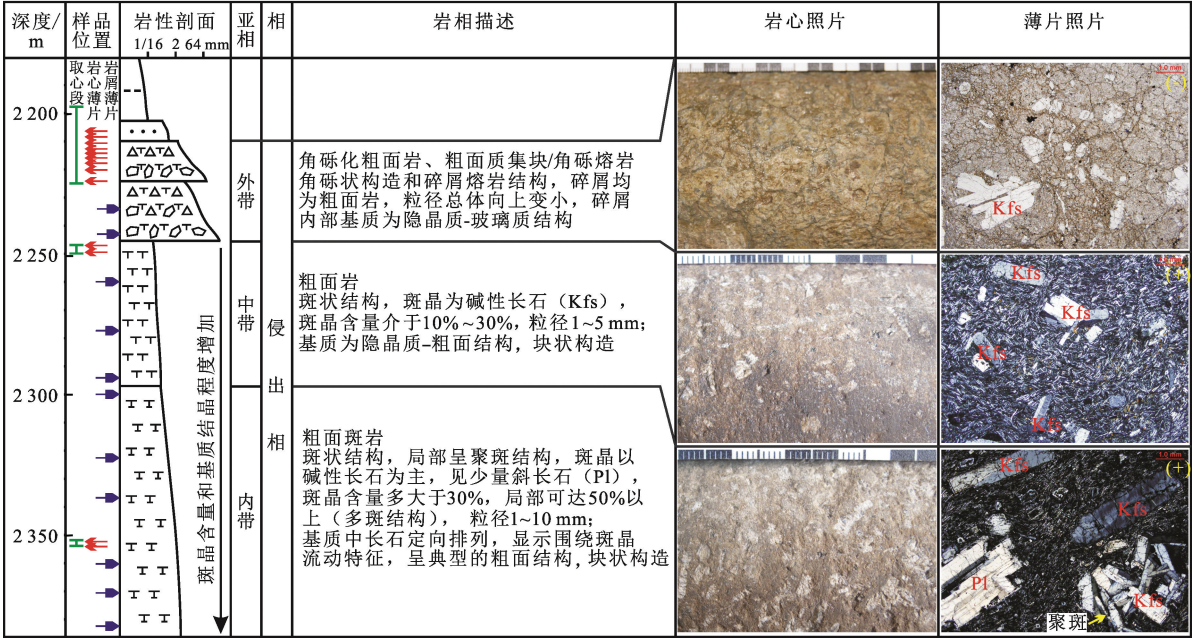


图 2 O29 井侵入相三层结构及其内部各亚相岩矿特征
Fig. 2 Lithological and mineralogical characteristics of triple-layered extrusive facies and its internal three sub-facies of well O29

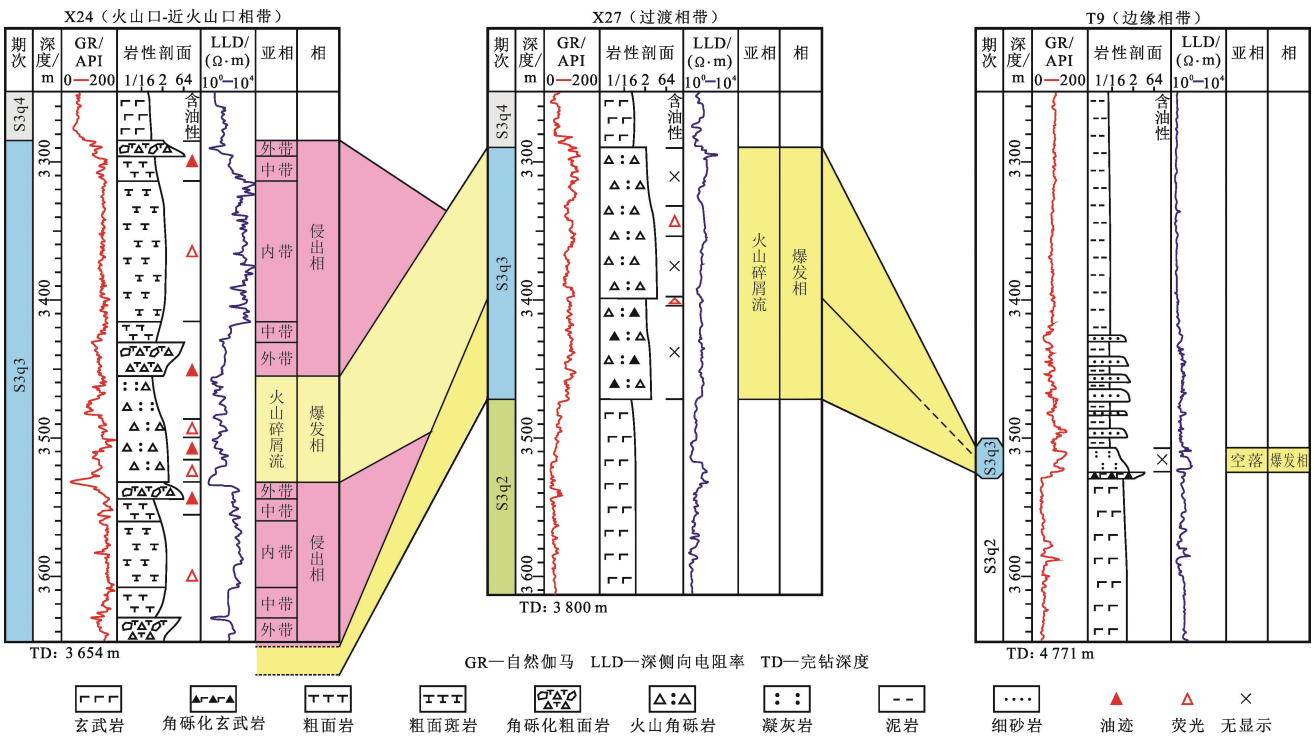


图 3 粗面岩火山机构不同相带的岩相序列及组合特征 (X24-X27-T9 连井对比剖面)

Fig. 3 Facies sequences and assemblages of different facies associations of Paleogene trachytic volcanic edifices (correlation profile of well X24-X27-T9)

3.2 不同火山机构相带的岩相序列和岩相组合

横向上,按照距离火山口由近及远将粗面岩火山机构依次划分出火山口—近火山口相带、过渡相带和边缘相带 3 个岩相组合单元。火山口—近火山

口相带发育火山通道相和侵出相,过渡相带主要由溢流相和爆发相构成,边缘相带以火山沉积相为主 (图 3、4)。相邻两个相带之间的岩性和岩相构成在横向上呈渐变过渡关系。

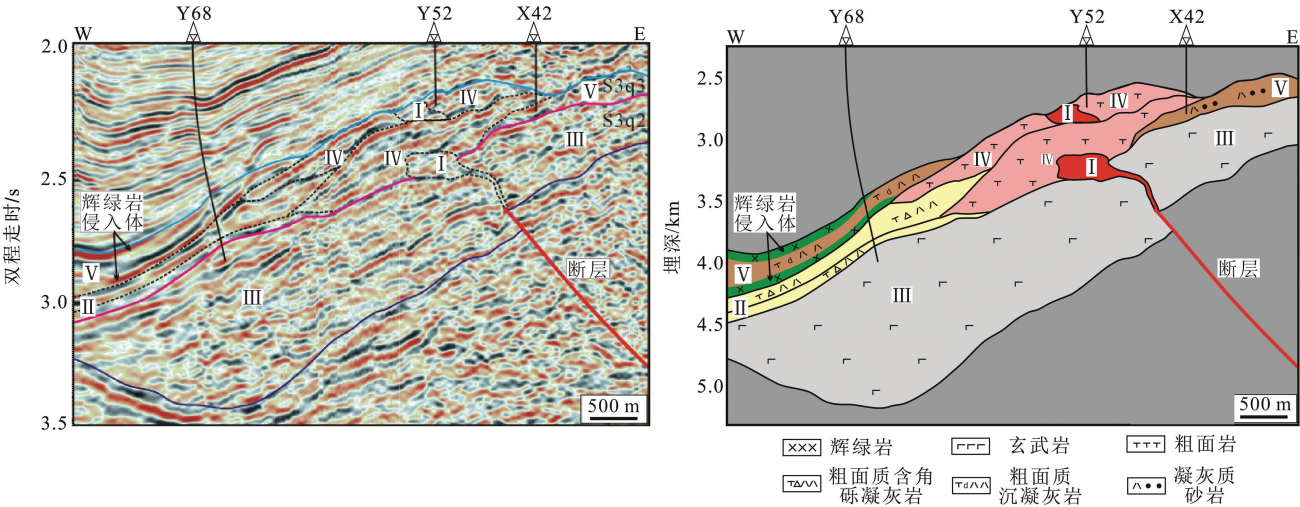


图 4 井约束下沙河街组三段期次 3 粗面岩火山机构-岩相地震解释结果

Fig. 4 Seismic profile interpretation of trachytic volcanic edifice and lithofacies of stage three in third member of Shahejie Formation constrained by borehole data

3.2.1 火山口—近火山口相带

火山口—近火山口相带由多种岩相叠合构成,除火山沉积相以外的其他 4 类岩相均有发育。岩相

组合以火山通道相和侵出相为主,也发育由粗粒火山碎屑物构成的爆发相。纵向上发育两种岩相序列:一类相序为爆发相→侵出相,发育在靠近火山口

的火山锥体斜坡部位,钻井未揭示到火山通道相产物如 X24 井(图 3);另一类相序为火山通道相→侵出相(图 4),钻井位于火山口部位,在岩心标本上常见堆砌结构和隐爆角砾结构,可作为识别火山通道相的重要标志^[16]。

3.2.2 过渡相带

过渡相带的相序和相组合一般较为单一,主要发育爆发相和溢流相两类岩相,如 X27 井(图 3)。爆发相由角砾级及其以下的火山碎屑物组成,与近火山口相带的爆发相相比,其组成岩石的粒度变细、分选更好、层理相对发育。溢流相与侵出相在成因上有密切联系,是粗面岩岩穹向远端逐渐减薄尖灭的产物,两者呈过渡关系。溢流相厚度介于 10~50 m,整体上岩性均一,以块状构造的粗面岩为主,顶部可见角砾状构造,因角砾化作用和结晶程度差异所表现出的纵向分带性相对不明显。

3.2.3 边缘相带

边缘相带位于整个火山机构的末端,由薄层细粒火山灰构成的爆发相空落亚相产物或火山碎屑与外碎屑混杂形成的火山沉积相组成,如 T9 井(图 3)。火山沉积相占主体,其岩石结构、构造与碎屑

岩相似,但碎屑成分中火山碎屑物占有一定比例(介于 10%~90%),且因搬运距离近而表现出分选和磨圆相对较差的特征。

从火山机构不同相带的相序和相组合来看,自中心向外缘的横向相变整体上呈现为火山通道相与侵出相→溢流相与爆发相→火山沉积相。

3.3 粗面岩岩相模式及其建造机制

通过单井相分析和连井岩相对比研究,建立粗面岩岩相分布模式(图 5)。古近系沙河街组三段粗面岩形成于玄武岩建造之上,主体由两套爆发相→侵出相的喷发序列叠加构成。

由于粗面岩喷发堆积以水下环境为主,水体沿开启的活动断裂下渗,与上升的粗面质岩浆接触后使其挥发分含量增加,并发生水汽-岩浆作用,从而形成强烈爆发。爆发作用产物一部分沿先期玄武质火山岩体斜坡以重力流方式形成以粗粒火山碎屑为主的火山碎屑流堆积,主要发育在火山口—近火山口相带及过渡相带,火山集块和角砾的比例较大,其间充填物为细粒火山灰,呈集块(或角砾)凝灰结构;另一部分喷射到空中之后回落水体并沉积形成以细粒火山碎屑为主的空落堆积,主要发育在边缘相带。

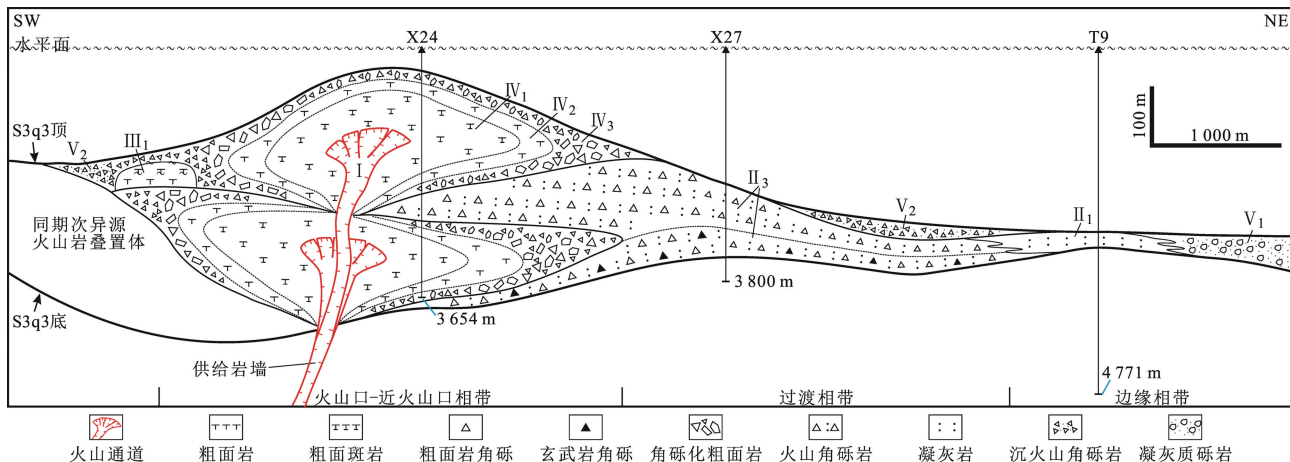


图 5 辽河盆地古近系水下喷发粗面岩岩相分布模式

Fig. 5 Representative facies model of Paleogene subaqueous trachytic successions in Liaohe Basin

爆发相发育在每个喷发单元的初期,纵向上位于侵出相之下(图 3),截面形态呈楔状、板状,爆发相底部形态受古地貌影响表现为披覆状堆积(图 4),局部呈反丘状充填于负向构造之中,单层厚度自火山口向外先增后减,向远端逐渐尖灭并相变为火山沉积相(图 5)。

随着爆发作用之后火山喷发能量减弱,贫挥发分且富含斑晶的粗面质岩浆由于其黏度大,且受上覆水体压力以及外壳遇水快速冷凝固结等因

素共同影响,火山作用转变为缓慢的侵出方式,形成侵出岩穹(图 4、5)。侵出相发育在火山口之上,围绕火山通道堆积,截面形态多呈透镜状、丘状等,内部具圈层状结构,表现为岩石角砾化程度和基质结晶程度的差异性,由内向外基质结晶程度渐差,外带角砾化明显(图 2);平面上呈近于圆形至椭圆形(图 6),侧向覆盖于爆发相之上,厚度自中心向边缘减薄并尖灭。

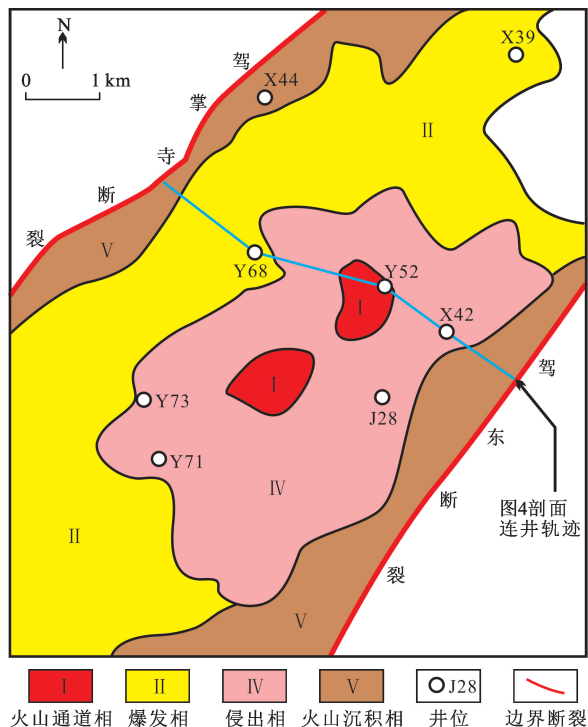


图6 东部凹陷南段小龙湾地区粗面岩岩相分布预测平面图

Fig. 6 Lithofacies distribution forecasting map of trachytes in Xiaolongwan of the southern part of Eastern Sag

4 讨论

4.1 相模式在低勘探区岩相分布预测中的应用

在井网密度不大的低勘探程度区块,井间岩相对比和井旁岩相外推更多地依赖于相模式的约束。东部凹陷火山岩油气勘探主要集中于凹陷中段(图1(b)),近年来逐步向南北两端拓展。由于油气富集的优势储层主要分布在埋深大于3000 m的深层,因此对于深层钻井相对较少、勘探程度相对较低的凹陷南、北段,岩相分布预测需要结合钻井岩相划分、连井剖面解释与岩相对比、相模式约束外推等进行综合分析。通过钻井岩相分析,确定各井点的优势岩相,并根据岩相组合及其比例,分析其所处火山机构相带。通过连井地震剖面解释和井间岩相对比,确定火山机构中心相带和岩相边界(图4)。在相模式约束下,可以减少剖面解释和井间对比过程中的不确定性,进而实现火山岩相的平面分布预测(图6)。

4.2 水下喷发环境对粗面岩有效孔隙形成与分布的控制作用

在22口井总长430 m岩心观察描述的基础上,结合偏光显微镜对55件铸体薄片进行孔隙类

型分析与各类孔隙出现频数统计,识别出残余粒间孔-填隙物溶孔(约占8.5%)、斑晶溶孔(约占21.3%)、基质溶孔(约占31.9%)、冷凝收缩缝(约占6.4%)和构造缝(约占31.9%)5类有效孔隙。分析表明,次生溶蚀孔隙和构造缝分别对粗面岩储集和渗透性能起决定性作用;原生孔隙对储层贡献不大,仅约占10%,主要由残余粒间孔和冷凝收缩缝构成。粗面岩储集空间的形成与其喷发就位的水下环境有着密切联系。一方面水体覆压和淬火快速冷却等因素抑制了岩浆中挥发分逸出,导致粗面岩缺少原生气孔。另一方面水-岩浆反应产生的淬火和爆炸导致冷凝收缩缝和粒间孔隙发育,构成进一步改造形成有效孔隙的必要前提条件。

优质储层分布的3类亚相主要由角砾状粗面岩类(即角砾化粗面岩、粗面质角砾熔岩和粗面质火山角砾岩)构成,其原生粒间孔隙发育。一方面受压实和充填作用后的残余粒间孔隙构成有效孔隙的重要组成部分(图7(a))。另一方面与角砾状粗面岩类的岩石组构相关的各类次生溶蚀孔隙对有效孔隙起主要贡献(图7(b)、(e)、(f))。原生粒间孔隙发育有利于外界溶蚀流体进入,并与碱性长石、沸石和方解石等易溶组分充分接触,以及其后被溶解物质的排出。溶蚀孔隙由粒内溶孔和粒间溶孔两部分组成。粒内溶孔占全部有效孔隙的50%以上,包括斑晶溶孔和基质溶孔(图7(b)、(f)),由构成粗面岩角砾内部斑晶和基质的碱性长石经溶解作用形成。粒间溶孔是由各类填隙物(以方沸石和方解石为主)溶解形成,在浅埋藏阶段,压实作用尚未造成原生砾间孔隙显著减少之前,在准同生期低温热液作用下^[17-18],粒间孔隙被方沸石和方解石充填而抑制了沉降埋藏过程中压实作用的影响,并经过后期溶解作用改造形成有效的粒间溶蚀孔隙(图7(a)、(f))。

4.3 粗面岩储集物性和含油性与岩相关系

对不同亚相的孔隙度和渗透率对比分析可以看出,火山颈、火山碎屑流和外带3亚相的储集物性最好,其次为中带和再搬运火山碎屑沉积2类亚相,余下6类亚相的储集物性较差(图8)。粗面岩发育的11类亚相中有5类亚相的平均孔隙度相对较高,包括火山通道相火山颈亚相、爆发相火山碎屑流亚相、侵出相中带和外带亚相以及火山沉积相再搬运火山碎屑亚相,其共同特点是粒间孔隙和溶蚀孔隙发育。隐爆角砾岩亚相渗透率最高

(平均值为 $1.12 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 属于中渗级别), 与隐爆角砾化作用形成网状裂隙对岩石渗透性能产生显著的改善作用有关; 其次为发育碎屑结构的火

山碎屑流、再搬运火山碎屑沉积和含外碎屑火山沉积3亚相, 渗透率平均值达到 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以上, 与其粒间孔隙发育有关。

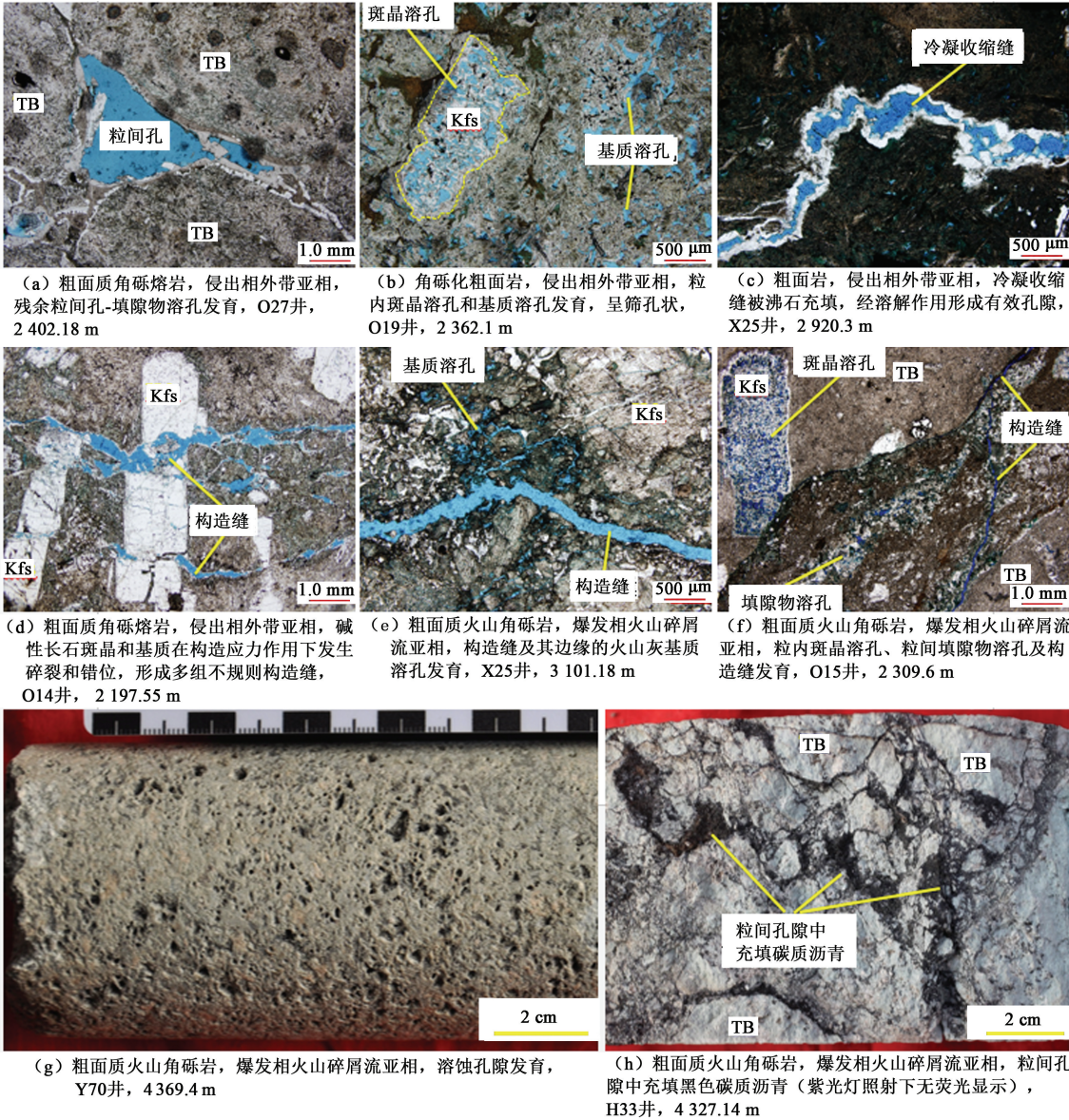


图7 粗面岩优质储层的孔隙发育特征显微及岩心照片

Fig. 7 Characteristics of pore spaces of three principal high-quality reservoirs of trachytic rocks

粗面岩各类亚相储集物性的差异性决定了并非所有亚相都能够构成油气的有利储集体。录井含油气性、气测显示以及试油结果综合显示, 粗面岩优质储层集中发育在侵出相外带亚相、火山通道相火山颈亚相和爆发相火山碎屑流亚相之中(图7(g)、(h)), 主要表现为整体含油气性显示较好, 含油级别达到油迹、油斑及以上(图3), 气测全烃含量明显高于相邻层段, 试油结果也显示90%以上的工业油层集中发育在其中。从储层物性角度而言, 这3类亚相的储层孔隙度平均值均

大于10%, 为高孔储层; 尽管粗面岩储层渗透率的平均值整体上属于低渗级别(渗透率 $k < 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$), 但优质储层发育的3类亚相中渗透率达到中渗及以上级别(渗透率 $k \geq 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)的样品所占比例显著高于其他亚相。此外, 这3类亚相的发育规模相对较大, 并处于火山机构中心及近火山口部位, 构造位置相对较高, 且围绕侵出相形成背斜形态, 易于油气圈闭与富集, 因此对于油气成藏及其勘探的意义更大。

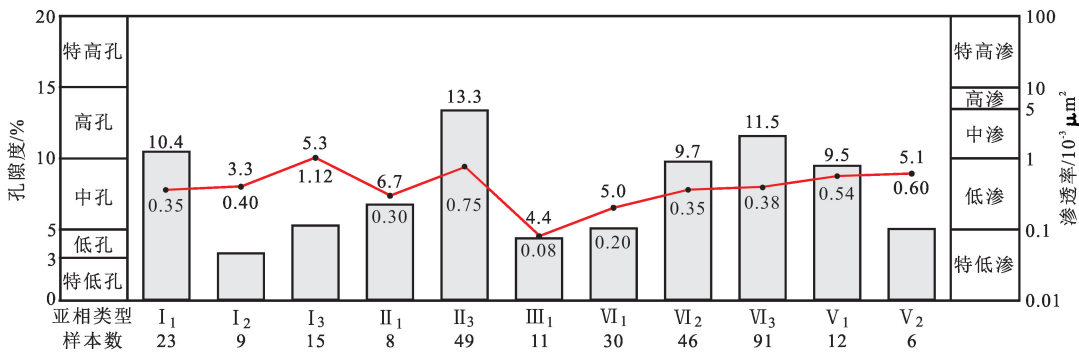


图 8 粗面岩各亚相的平均孔隙度和渗透率对比

Fig. 8 Comparison of average porosity and permeability of trachytic sub-facies

4.4 水下喷发粗面岩优质储层形成机制及其勘探意义

辽河盆地新生界粗面岩形成于盆地发生强烈断陷的沙河街组三段时期,即沉降幅度最大和沉积速率最快的主成盆期,在此期间内同时也形成了大套厚层富含有机质的暗色泥岩,是有效烃源岩集中发育的主要层段^[8]。粗面岩形成于水下喷发就位环境^[14],岩浆遇水发生淬火碎裂和爆炸形成角砾状粗面岩类,构成了火山通道相火山颈亚相、爆发相火山碎屑流亚相和侵出相外带亚相等 3 类储层优势亚相的主体岩性,其发育的火山碎屑结构特征对于原生粒间孔隙的大量形成具有重要意义。粗面岩喷发的多期性以及其后持续的火山活动^[19],提供了准同生期热液沉淀的物质来源,有利于早期热液充填并促成粒间孔隙的间接保存。大规模火山岩与烃源岩在同一时期发育,在空间上形成了烃源岩环绕火山岩分布或火山岩夹裹于烃源岩之中的格局。火山活动的热效应以及火山物质的催化作用促进了有机质成熟生烃^[20],而在有机质生烃过程中排出的有机酸被证实是储集岩中长石类和沸石类等硅酸盐矿物发生溶解作用形成各类溶蚀孔隙的关键外在因素^[21]。辽河盆地古近系粗面岩储层溶蚀改造与泥岩有机质生烃的相互促进,以及储层与烃源岩在空间上的近源配置关系,对于粗面岩储集性能改善以及油气富集成藏起到了决定性作用。

5 结 论

(1) 辽河盆地古近系粗面岩发育 5 相 11 亚相,其中侵出相(约占 51.60%)比例最大,爆发相(约占 25.82%)次之。火山口—近火山口相带以侵出相为主,纵向相序为火山通道相→爆发相→侵出相或爆发相→侵出相;过渡相带以爆发相火

山碎屑流亚相为主;远源相带主要由爆发相空落亚相和火山沉积相构成。自中心向外缘的平面相序为火山通道相与侵出相→溢流相与爆发相→火山沉积相。

(2) 辽河盆地古近系粗面岩喷发堆积以水下环境为主,水-岩浆反应产生的爆发和淬火作用是粗面岩原生粒间孔隙发育的必要基础。与角砾状粗面岩类的岩石组构相关的粒内溶孔和残余粒间孔-填隙物溶孔是粗面岩储集层有效孔隙的主要构成,粒内斑晶溶孔和基质溶孔对储集性能贡献最大。原生粒间孔隙发育,以及溶蚀作用与构造作用的次生改善,是决定粗面岩储层有效性的主控因素。

(3) 沙河街组三段粗面岩储集层与烃源岩在空间分布上紧密相邻,具备源-储有利匹配的天然优势。由角砾状粗面岩类为主要岩性构成的侵出相外带亚相、爆发相火山碎屑流亚相和火山通道相火山颈亚相是粗面岩发育的 3 类优质储层,应作为粗面岩油气藏勘探的首要目标。

致谢 本文研究资料来源于中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“辽河油田千万吨稳产关键技术与应用”课题“辽河探区可持续规模增储勘探关键技术研究”,相关试验分析依托于吉林大学东北亚生物演化与环境教育部重点实验室完成,在此一并表示感谢。

参考文献:

[1] 刘嘉麒,孟凡超,崔岩,等. 试论火山岩油气藏成藏机理[J]. 岩石学报,2010,26(1):1-13.
LIU Jiaqi, MENG Fanchao, CUI Yan, et al. Discussion on the formation mechanism of volcanic oil and gas reservoirs [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010,26(1):1-13.
[2] WANG P J, CHEN S M. Cretaceous volcanic reservoirs

- and their exploration in the Songliao Basin, Northeast China [J]. *AAPG Bulletin*, 2015, 99(3):499-523.
- [3] CHEN Z Y, YAN H, LI J S, et al. Relationship between Tertiary volcanic and hydrocarbons in the Liaohe Basin, People's Republic of China [J]. *AAPG Bulletin*, 1999, 83(6):1004-1014.
- [4] GU L X, REN Z W, WU C Z, et al. Hydrocarbon reservoirs in a trachyte porphyry intrusion in the Eastern depression of the Liaohe Basin, northeast China [J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(10):1821-1832.
- [5] 孟卫工, 陈振岩, 张斌, 等. 辽河坳陷火成岩油气藏勘探关键技术[J]. *中国石油勘探*, 2015, 20(3):45-57.
MENG Weigong, CHEN Zhenyan, ZHANG Bin, et al. Key technology for exploration of igneous reservoirs in Liaohe Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2015, 20(3):45-57.
- [6] CAS R A F. Submarine volcanism: eruption styles, products, and relevance to understanding the host-rock successions to volcanic-hosted massive sulfide deposits [J]. *Economic Geology*, 1992, 87(3):511-541.
- [7] MONECKE T, GEMMELL J B, HERZIG P M. Geology and volcanic facies architecture of the Lower Ordovician Waterloo massive sulfide deposit, Australia [J]. *Economic Geology*, 2006, 101(1):79-197.
- [8] 陈振岩, 仇劲涛, 王璞珺, 等. 主成盆期火山岩与油气成藏关系探讨[J]. *沉积学报*, 2011, 29(4):798-808.
CHEN Zhenyan, QIU Jintao, WANG Pujun, et al. Relationship between volcanic rocks and hydrocarbon accumulation during dominant period of basin formation in Liaohe Depression [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(4):798-808.
- [9] 邱隆伟, 姜在兴, 熊志东, 等. 辽河盆地东部凹陷火山岩油藏类型及成藏条件研究[J]. *石油实验地质*, 2003, 25(4):390-394.
QIU Longwei, JIANG Zaixing, XIONG Zhidong, et al. Study of volcanic reservoirs in the eastern depression of the Liaohe Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2003, 25(4):390-394.
- [10] 吴昌志, 顾连兴, 任作伟, 等. 辽河油田欧利坨子潜火山岩及其成藏机制[J]. *地质论评*, 2003, 49(2):162-167, 229.
WU Changzhi, GU Lianxing, REN Zuowei, et al. Subvolcanic trachyte porphyry at Oulituozi in the Liaohe Basin and its mechanism for hydrocarbon reservoir formation [J]. *Geological Review*, 2003, 49(2):162-167, 229.
- [11] STEWART A L, MCPHIE J. Facies architecture and late Pliocene-Pleistocene evolution of a felsic volcanic island, Milos, Greece [J]. *Bulletin of Volcanology*, 2006, 68(7):703-726.
- [12] 王岚, 李文厚, 林潼, 等. 陆上、水下喷发成因火山岩储层发育特征和成藏控制因素对比分析: 以三塘湖盆地石炭系火山岩油藏为例[J]. *地质科学*, 2010, 45(4):1088-1097.
WANG Lan, LI Wenhui, LIN Tong, et al. A comparative analysis of submarine eruption and subaerial eruptive volcanoclastic reservoir on characteristics of reservoir and reservoir forming dominated factors: taking Carboniferous volcanoclastic reservoir in Santanghu Basin as example [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2010, 45(4):1088-1097.
- [13] 侯贵廷, 钱祥麟, 蔡东升. 渤海湾盆地中、新生代构造演化研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2001, 37(6):845-851.
HOU Guiting, QIAN Xianglin, CAI Dongsheng. The tectonic evolution of Bohai Basin in Mesozoic and Cenozoic time [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2001, 37(6):845-851.
- [14] 蔡国刚. 辽河裂谷东部凹陷粗面岩成因机理探讨[J]. *地球学报*, 2010, 31(2):245-250.
CAI Guogang. Genetic mechanism of trachyte in the eastern depression of Liaohe Rift [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2010, 31(2):245-250.
- [15] 冯玉辉, 黄玉龙, 丁秀春, 等. 辽河盆地东部凹陷中基性火山岩相地震响应特征及其机理探讨[J]. *石油物探*, 2014, 53(2):206-215.
FENG Yuhui, HUANG Yulong, DING Xiuchun, et al. Relationship between intermediate-mafic volcanic facies and their corresponding seismic reflections: a case study from eastern depression of Liaohe Basin [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2014, 53(2):206-215.
- [16] 黄玉龙, 单俊峰, 边伟华, 等. 辽河坳陷中基性火成岩相分类及储集意义[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(6):671-680.
HUANG Yulong, SHAN Junfeng, BIAN Weihua, et al. Facies classification and reservoir significance of the Cenozoic intermediate and mafic igneous rocks in Liaohe Depression, East China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(6):671-680.
- [17] 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.

[18] 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):1-8.
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):1-8.

[19] 冯玉辉,于小键,黄玉龙,等. 辽河盆地新生界火山喷发旋回和期次及其油气地质意义[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*,2015,39(5):50-57.
FENG Yuhui, YU Xiaojian, HUANG Yulong, et al. Eruption cycles and stages of the Cenozoic volcanic rocks and their significance to hydrocarbon accumulations in the Liaohe Basin[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2015, 39(5):50-57.

[20] 金强,熊寿生,卢培德. 中国断陷盆地主要生油岩中的火山活动及其意义[J]. *地质论评*,1998,44(2):136-142.
JIN Qiang, XIONG Shousheng, LU Peide. Volcanic activity in major source rocks in faulted basins of China and its significance[J]. *Geological Review*, 1998,44(2):136-142.

[21] SURDAM R C, CROSSEY L J, HAGEN E S, et al. Organic-inorganic interactions and sandstone diagenesis [J]. *AAPG Bulletin*, 1989,73(1):1-23.

(编辑 徐会永)