

文章编号: 0253-2697(2013)05-0896-09 DOI:10.7623/syxb201305010

辽河盆地东部凹陷火山岩储层特征与主控因素

王岩泉¹ 胡大千¹ 蔡国刚² 王璞珺¹ 于小健¹

(1. 吉林大学地球科学学院 吉林长春 130061; 2. 中国石油辽河油田公司勘探开发研究院 辽宁盘锦 124010)

摘要:基于 21 口钻井的地质与测井资料和 193 块岩石样品的物性测试结果,结合火山岩构造-岩相图和产能资料分析,研究了辽河盆地东部凹陷沙河街组三段火山岩储层特征及其主控因素。结果显示,本区发育 11 种火山岩,其中粗面岩为主要储集岩类;岩相分为 5 大类 14 亚类,有利储层多见于侵出相;发育 5 个火山岩旋回,成藏主要集中在中部的粗面岩旋回;储集空间分为 2 大类 9 种类型,其中裂缝是渗透率的主控因素。有效储层主要受断裂、喷发旋回、岩相、岩性 4 方面控制。沿大型走滑断裂,尤其主断裂与派生断裂交汇部位,火山岩储层集中发育,断裂控制火山岩体的空间展布和次生裂缝发育程度;喷发旋回控制储层的纵向分布;岩相控制储层的规模和原生孔隙发育带;岩性决定储集空间类型及后期蚀变改造程度。

关键词:辽河盆地;沙河街组;火山岩储层;主控因素;断裂;火山喷发旋回;火山岩岩相

中图分类号:TE112.23 文献标识码:A

Characteristics and controlling factors of Cenozoic volcanic reservoirs in Liaohe Basin, NE China

WANG Yanquan¹ HU Daqian¹ CAI Guogang² WANG Pujun¹ YU Xiaojian¹

(1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina Liaohe Oilfield Company, Panjin 124010, China)

Abstract: A database involved in the present research includes well-logs and corresponding geological description of 21 boreholes, analytical results of porosity and permeability of 193 rock samples, 3D seismic data of the region and structure-lithofacies mapping of Cenozoic volcanic reservoirs in the eastern depression of the Liaohe Basin. Based on these data, 11 types of volcanic rocks are recognized, among them trachyte is the best for reservoir development. 5 lithofacies and 14 sub-facies are classified, of which the extrusive facies is the most favorable one of effective volcanic reservoirs. 5 cycles are identified in the volcanic rock and the reservoir formation mainly are developed in cycle 3, which is in the middle of the volcanic cycles. The reservoir space can be grouped into 2 types, primary and secondary ones, which can be subdivided into 9 sub-types and 14 species. Fractures of tectonic origin are a main controlling factor on the permeability of these reservoirs. In fact, effective reservoirs are an optimized combination of the four factors, i. e. fracture, eruption cycle, lithofacies and lithology. Volcanic reservoirs here concentrate within or around large-scale strike-slip fault zones, especially at a conjunction of main faults and induced faults. Furthermore, faults control spatial distribution of volcanic rocks and development of secondary fractures, while eruption cycles dominate vertical distribution of effective volcanic reservoirs; lithofacies controls reservoir scale and development of primary pores, while lithology determines types of reservoir space and intensity of alteration that results in the secondary porosity.

Key words: Liaohe Basin; Shahejie Formation; volcanic reservoir; controlling factors; fault; cycle of volcanic eruption; volcanic lithofacies

1 研究背景

辽河盆地是中国火山岩研究开展较早的地区,在

20 世纪 70—80 年代,就已认识到火山岩是本区重要的储层岩类型^[1-2]。作为典型的裂谷盆地,辽河盆地的火山岩分布受郯庐断裂的控制,断裂的周期性活动及

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目(2009CB219303)和吉林大学科学前沿与交叉学科创新项目(201103032)资助。

第一作者:王岩泉,男,1988 年 11 月生,2011 年获中国地质大学学士学位,现为吉林大学博士研究生,主要从事矿物学和火山岩储层方面的研究。Email:wang_yan_quan@126.com

通信作者:王璞珺,男,1959 年 10 月生,1982 年获长春地质学院学士学位,1994 年获长春地质学院博士学位,现为吉林大学地球科学学院教授、博士生导师,主要从事盆地火山岩和油气地质勘查研究与教学。Email:wangpj@jlu.edu.cn

左行走滑致使西部凹陷北侧和整个东部凹陷发育多期、累计厚度达千米的火山岩^[3-5]。

火山岩自上白垩统,古近系房身泡组、沙河街组和东营组,至新近系馆陶组均有发育。有效储层主要集中在东部凹陷沙河街组三段(简称沙三段)(图 1)。火山岩有效储层控制因素的研究是本区油气藏勘探开

发的基础^[6-9],前人研究显示,火山岩储集性能与岩性、岩相、构造应力、压实作用等有关^[10-14]。在此基础上,笔者着重研究本区沙三段火山岩储层的喷发旋回、岩性、岩相和断裂等 4 个方面,探讨其与火山岩储层物性的量化关系,以期总结提升理论认识和指导油气勘探。

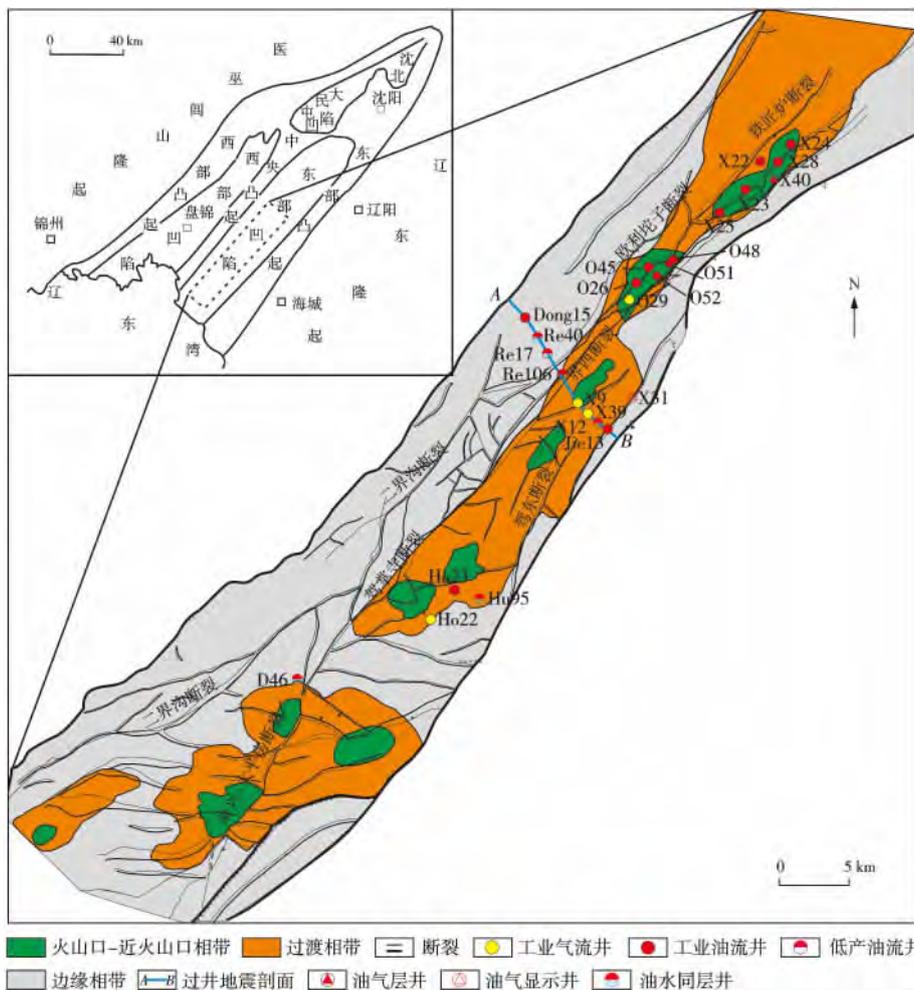


图 1 Volcanic facies associated with faults and oil production of the third member of Shahejie Formation in eastern depression of Liaohe Basin

2 火山岩的岩性、岩相和喷发旋回

2.1 岩性和岩相

根据对研究区 21 口井长度共计 27 793.8 m 钻遇火山岩井段的统计,辽河盆地东部凹陷主要火山岩类型共有 11 种,包括玄武岩、角砾化玄武岩、安山岩、粗面岩、角砾化粗面岩、玄武质角砾/凝灰熔岩、粗面质角砾/凝灰熔岩、玄武质角砾/凝灰岩、粗面质角砾/凝灰岩、凝灰质泥岩/砂岩和辉绿岩。其中以玄武岩、粗面岩为主,合计占全部岩性的 60% 以上(图 2)。本区火山岩在侧向上可分为 3 个相带:火山口-近火山口相

带、过渡相带、边缘相带,不同岩相以特定的规律分布于各相带中(图 3、表 1)。

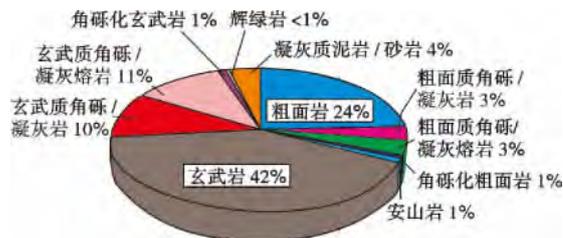


图 2 辽河盆地东部凹陷火山岩岩石类型及其发育比例
Fig. 2 Volcanic rock types and their corresponding proportion in eastern depression, Liaohe Basin

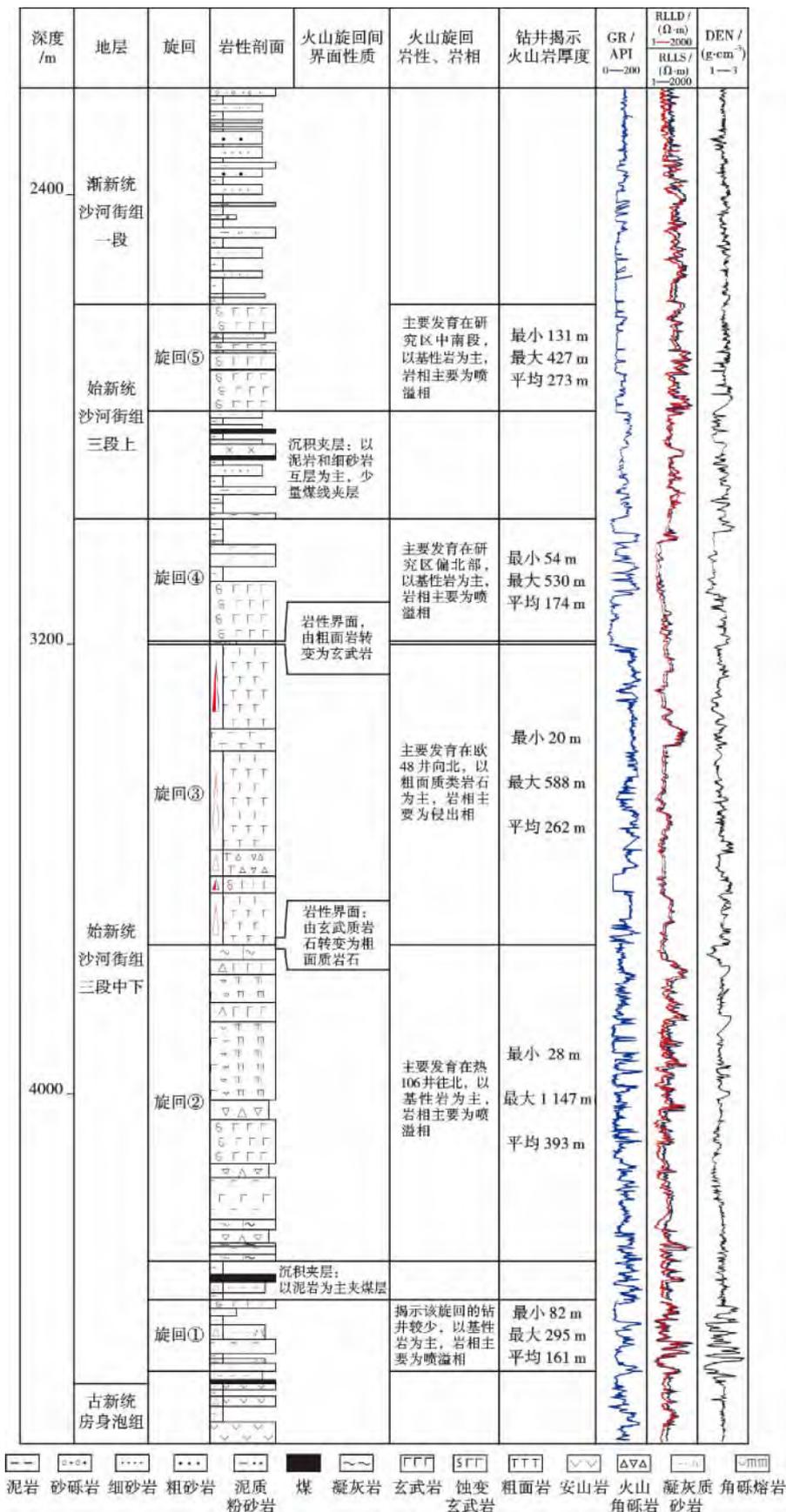


图3 辽河盆地东部凹陷火山岩旋回综合柱状图

Fig. 3 Lithologic column showing volcanic cycles of the Cenozoic in Liaohe Basin

表 1 辽河盆地新生代中基性火山岩相分类及发育比例

Table 1 Intermediate-basaltic volcanic lithofacies and their corresponding percentage in the Cenozoic of Liaohe Basin

相	亚相	出现频数 比例/%	发育厚度 比例/%	火山机构-相带
火山沉积相 V	含外碎屑火山沉积 V ₂	12.2	8.2	边缘相带
	再搬运火山碎屑沉积 V ₁	1.7	0.8	
喷出相 IV	外带亚相 IV ₃	6.2	3.6	火山口-近火山口相带
	中带亚相 IV ₂	7.7	7.4	
	内带亚相 IV ₁	4.6	8.7	
喷溢相 III	复合熔岩流 III ₃	14.4	16.1	火山口-近火山口相带 或过渡相带
	板状熔岩流 III ₂	23.7	19.9	
	玻质碎屑岩 III ₁	10.6	16.8	
爆发相 II	火山碎屑流亚相 II ₃	10.1	9.6	三相带均可出现
	热基浪亚相 II ₂	1.2	0.5	火山口-近火山口相带
	空落亚相 II ₁	4.6	2.6	三相带均可出现
火山通道相 I	隐爆角砾岩亚相 I ₃	0.1	0.2	火山口-近火山口相带
	次火山岩亚相 I ₂	1.5	2.4	
	火山颈亚相 I ₁	1.5	3.3	

2.2 火山喷发旋回划分和连井对比

基于松辽盆地中新世火山岩研究结果^[15],对火山岩序列进行旋回划分通常要在组内划段、段内划分旋回,同一旋回在盆地乃至区域范围内往往是对比的。东部凹陷自下而上划分为 5 个喷发旋回:①下部基性火山碎屑岩旋回;②下部基性熔岩旋回;③中部粗面岩旋回;④上部基性火山熔岩旋回;

⑤顶部基性熔岩旋回(图 3)。旋回与旋回之间普遍见沉积岩或凝灰岩夹层,其中旋回②和旋回③分布最广且厚度大,见于整个东部凹陷;旋回⑤也较厚但分布范围较小,旋回①和④则厚度较小且分布局限。在内部岩性组合、岩相序列、测井曲线变化特征和连井地震剖面上都可以很好地实现旋回的划分和对比(图 4)。

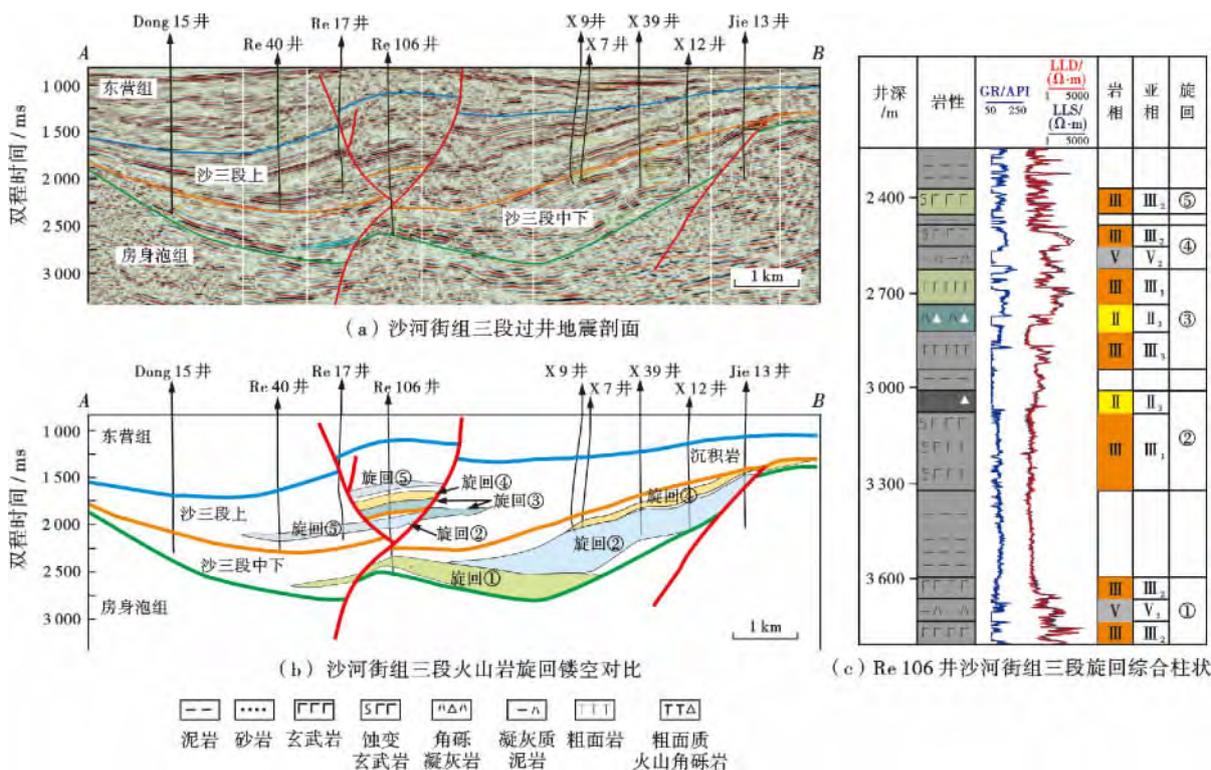


图 4 辽河盆地东部凹陷沙河街组三段火山岩旋回划分与连井对比

Fig. 4 The five volcanic cycles and their inter-borehole correlations of Shahejie Formation in eastern depression of Liaohe Basin

3 火山岩储层特征

3.1 储集空间类型

火山岩储层是一种由孔隙、裂缝及晶洞构成的双孔或多孔介质非均质性储层。根据岩心和岩石薄片观察与分析,该区火山岩储集空间类型分为原生孔隙、次生孔隙两类(表2)。原生孔隙指火山熔岩在凝固结

的半封闭系统中,于早期成岩作用阶段形成的各种孔、缝、洞,多与挥发份逸出、岩浆冷凝收缩、岩石矿物颗粒由于温压剧变引起的炸裂、火山碎屑不规则堆砌等因素有关。次生孔隙指形成于火山岩凝固结之后,由于温度压力的改变、流体作用和构造应力,使原有孔隙发生改造(充填、溶蚀等)和/或产生的新生储集空间(如构造裂缝等)^[16]。

表2 辽河盆地东部凹陷火山岩储集空间类型

Table 2 Volcanic reservoir spaces in eastern depression of the Cenozoic in Liaohe Basin

成岩阶段	类型	亚类	分布情况	岩相	典型照片
原生	气孔	气孔、砾内气孔	熔岩与火山角砾岩的角砾内部常见	喷溢相、爆发相	图5(a)
	格架孔	砾间孔、粒间孔 晶间孔	粗面岩、玄武岩中常见	爆发相	图5(b)
	收缩缝	基质收缩缝	熔岩及熔结凝灰岩中常见	喷溢相	图5(c)
	碎裂缝	斑晶炸裂缝 自碎缝 淬碎缝	粗面岩、角砾化粗面岩中常见	侵出相	图5(d)
	溶蚀孔	晶内溶蚀孔 基质溶蚀孔 杏仁体溶蚀孔	不同类型的火山岩、火山碎屑岩中普遍发育	喷溢相、火山沉积相、火山通道相、侵出相、爆发相	图5(e)
次生	隐爆缝	热液角砾缝	隐爆角砾岩中发育	侵出相	图5(f)
	风化缝	风化裂缝	熔岩顶部常见	喷溢相	图5(g)
	溶蚀缝	溶蚀缝	发育于各种火山岩中,火山角砾岩中尤为常见	喷溢相、火山沉积相	图5(h)
	构造缝	构造缝	火山构造带	侵出相	图5(i)

3.1.1 原生孔隙

原生孔隙主要包括原生气孔、格架孔、收缩缝和碎裂缝。原生气孔:气孔多呈圆状、椭圆状、拉长扁平状和不规则状[图5(a)],直径一般不超过1cm,气孔的定向排列显示了熔浆的原始流动状态和方向。格架孔:指岩石骨架颗粒之间的孔隙,包括砾间孔(粒间孔)和晶间孔[图5(b)],其单个孔隙大小与火山碎屑的粒度和分选程度有关,大粒度如火山角砾岩孔隙明显高于粒度较小的凝灰岩。收缩缝:指与岩浆冷凝作用有关的缝隙[图5(c)],其裂缝多具开张式,呈面状裂开,开度多在1mm以下,裂开部分只拉开而不发生错动,多呈规则且相互近于平行的线状,连续或断续分布。宏观尺度上,火山岩的柱状节理和板状节理,均属典型的冷凝收缩缝^[17]。碎裂缝:包括斑晶炸裂缝[由于温压骤变形成的自碎斑,图5(h)中的长石斑晶]或岩石遭受机械撞击、挤压、释压而形成的各类角砾间缝隙[图5(d)],其特征是单个碎屑并无明显位移,在本区玻质碎屑岩中广泛发育。

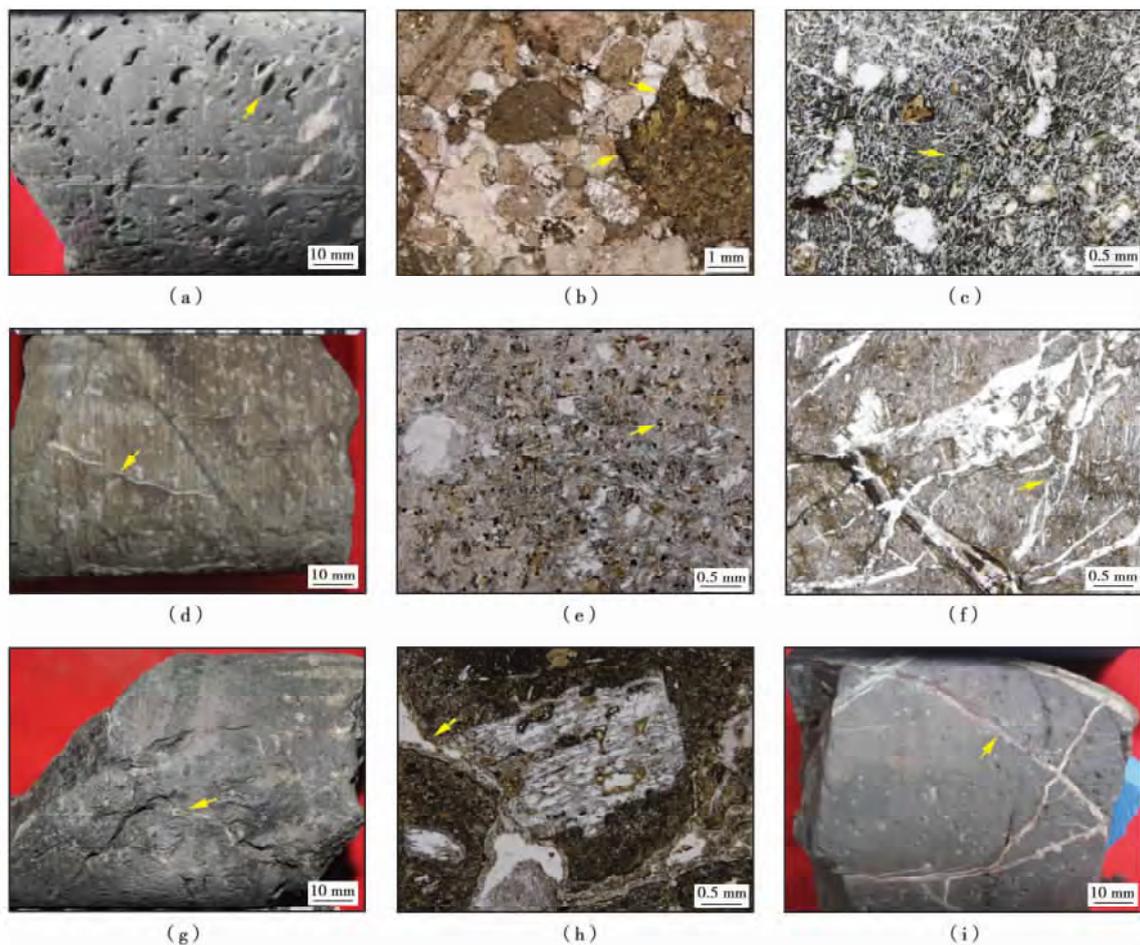
3.1.2 次生孔隙

次生孔隙主要包括溶蚀孔、隐爆缝、风化缝、溶蚀缝和构造缝。溶蚀孔[图5(e)]:多发育于矿物的解理缝、杏仁体的边缘或气孔壁处。本区粗面岩的斑晶和

基质都普遍遭受溶蚀,致使岩石密度降低,呈现千疮百孔的显微蜂窝状,是本区最主要的储集空间类型。隐爆缝[图5(f)]:见于引爆角砾岩中,为枝杈状、不规则网脉状裂缝;相关的角砾常具有锯齿状可拼合的特点。隐爆缝主要见于火山机构中心部位,通常认为是高压流体向上运移过程中使先期岩石炸裂—再充填或部分充填所致^[18]。风化缝[图5(g)]:一种不规则、延续性较差的裂缝,多表现为同种岩性的不规则碎裂、且棱角略见圆化,多见于火山岩序列之中的风化壳附近。通常认为是火山岩暴露地表期间岩石遭受长期风化和表生淋滤的结果。溶蚀缝[图5(h)]:与风化缝不同,溶蚀缝往往表现出流体沿着裂缝与岩石相互作用的痕迹。溶蚀缝可表现为对原有裂缝的溶蚀改造,也可见于角砾间和角砾内部,缝宽一般在0.05~0.2mm,缝长变化较大。构造缝[图5(i)]:本区多为高角度-近直立的规则裂缝或低角度断口不规则的张裂缝,延续性通常较好,多呈脉状或拖网状成组出现,常切穿原生层理,在致密火山岩段尤为发育。构造缝是改善火山岩储集性能、使火山岩中孤立孔隙连通的主要因素。

3.2 储层物性特征

通过对该区193块岩心和井壁取心的样品物性测试结果显示(图6),区内储集层平均孔隙度为10.8%,

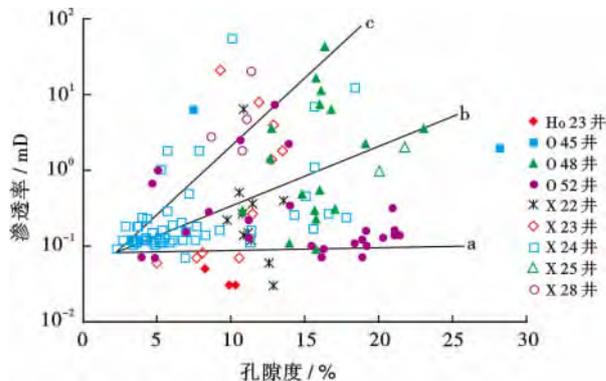


(a)原生气孔,玄武岩,喷溢相,旋回⑤, Ho22 井, 3 685. 4 m; (b)火山角砾岩,爆发相,旋回③, O51 井, 3 192. 68 m, 格架孔; (c)收缩缝,玄武岩,喷溢相,旋回④, X31 井, 1 716. 35 m; (d)碎裂缝,粗面岩,侵出相,旋回③, O29 井, 2 220. 8 m; (e)溶蚀孔,玄武岩,喷溢相,旋回④, Hu95 井, 2 652. 1 m; (f)隐爆缝,粗面岩,侵出相,旋回③, O26 井, 2 193. 3 m; (g)风化缝,玄武安山岩,喷溢相,旋回①, O45 井, 3 519. 33 m; (h)溶蚀缝,玄武岩,喷溢相,旋回②, O52 井, 2 772. 9 m; (i)构造缝,玄武岩,喷溢相,旋回②, X39 井, 2 636. 69 m。

图 5 辽河盆地东部凹陷沙三段火山岩储层储集空间类型

Fig. 5 Volcanic reservoir spaces showing different types and their associations in eastern depression of Liaohe Basin

平均渗透率为 0. 46 mD, 整体上为中高孔-低渗储层。在所有数据都参加统计的情况下孔隙度和渗透率的相关系数为 0. 103 5, 二者相关性差, 总体上, 本区火山岩孔隙度与渗透率关系表现为 3 种情况(图 6): ①渗透率不随孔隙度变化, 二者无显著相关性, 主要见于离断裂带较远和/或不处在火山中心岩相带上的钻井(如 X22 井和 O52 井等), 其储集空间的连通性差 ($R^2 = 0. 34$); ②渗透率随孔隙度增加而快速增加, 二者表现为显著正相关, 主要见于位于靠近断裂带且位于火山中心相带的钻井(如 X24 井和 O48 井等), 其原生和构造裂缝发育、储集空间连通性好 ($R^2 = 0. 526$); ③代表所有样品的平均统计结果, 渗透率随孔隙度增加而平稳增加, 但由于样品点离散, 使得统计结果的可信度较低 ($R^2 = 0. 118$)。



(a; $K = 0. 004 1\phi + 0. 134 5, R^2 = 0. 34$; b; $K = 0. 177 1\phi + 0. 399 1, R^2 = 0. 118$; c; $K = 0. 820 7\phi - 3. 439 7, R^2 = 0. 526$)

图 6 辽河盆地东部凹陷火山岩孔隙度与渗透率关系 (样品数 193 个)

Fig. 6 Relationship between porosity and permeability of the volcanic rocks in eastern depression, Liaohe Basin

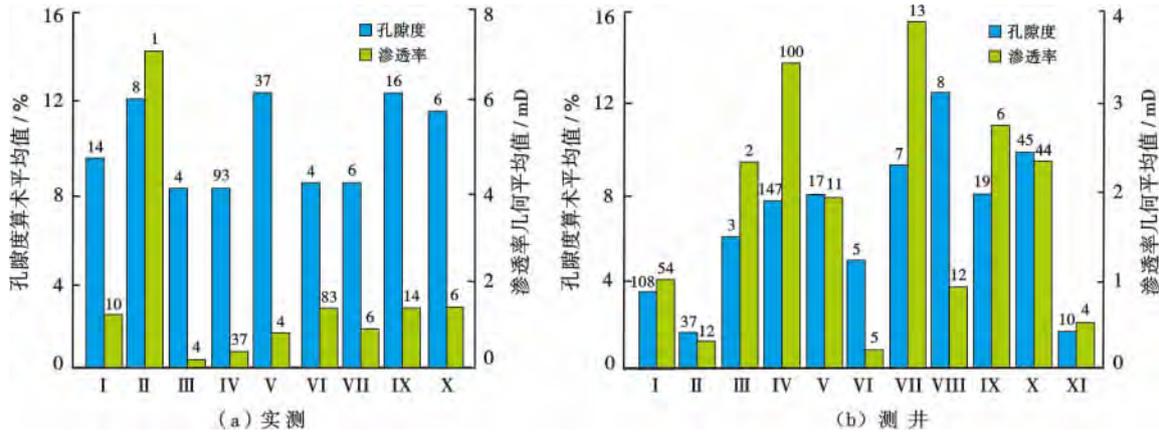
4 有效储层分布规律

火山岩有效储层指具备储集和渗滤流体能力,并且在现有工艺技术和经济效益条件下能够采出具有工业价值产液量的储集层。

4.1 岩性与储层物性关系

实测孔隙度与渗透率精度高,但受取心所限,样本量少;测井资料能够获取全井段的孔隙度与渗透率值,可作为有效补充。为此,从实测和测井两方面入手,对各个不同岩性的对应物性进行统计(图7)。实测数据涵盖9种岩性,结果显示,粗面质角砾熔岩、玄武质角砾熔岩、角砾岩化粗面岩、角砾岩化玄武岩、玄武岩及

凝灰质砂岩的实测孔隙度和渗透率条件总体较好。测井数据比实测结果反映的岩性类型更全、共11种岩性,孔隙度、渗透率与岩性关系的总体趋势与实测结果相似。其中粗面质角砾熔岩/火山角砾岩、角砾岩化粗面岩和凝灰质砂岩与实测结果相同,孔隙度与渗透率条件好;此外,粗面岩也显示出较高的测井孔隙度与渗透率值。综合以上统计结果,同时考虑到样本数并结合产能情况,可把本区的岩性具体分为3类:①粗面质火山角砾岩、角砾化粗面岩、粗面质角砾熔岩、粗面岩、凝灰质砂岩为形成有效储层优势岩性;②玄武质火山角砾岩、玄武质角砾熔岩和角砾化玄武岩次之;③安山岩、玄武岩和辉绿岩则较难形成有效储层。



I—玄武岩; II—角砾化玄武岩; III—安山岩; IV—粗面岩; V—角砾化粗面岩; VI—玄武质角砾熔岩; VII—粗面质角砾熔岩; VIII—玄武质火山角砾岩; IX—粗面质火山角砾岩; X—凝灰质砂岩; XI—辉绿岩

注:直方柱上数字为样品数,实测总样品数:孔隙度188个,渗透率165个;测井总样品数:孔隙度406个,渗透率263个。

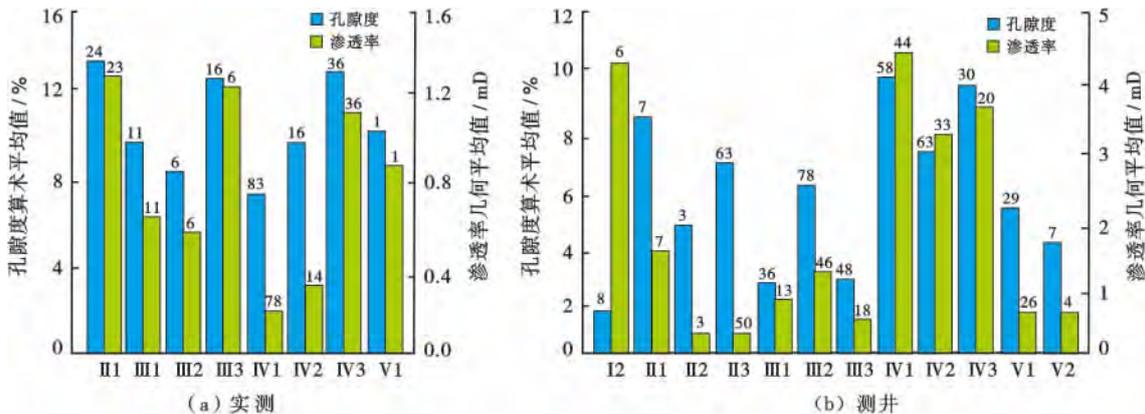
图7 辽河盆地东部凹陷火山岩实测、测井孔隙度、渗透率与岩性对应关系

Fig. 7 Measured and logging porosity and permeability versus lithology of the Cenozoic volcanic rocks in eastern depression of Liaohe Basin

4.2 火山岩岩相与储层物性关系

统计东部凹陷火山岩不同岩相的物性发现,孔隙度、渗透率和岩相也有明显的相关性。按岩相序列,物性从侵入相、爆发相、喷溢相、火山沉积相到火山通道

相显示出一定的变差趋势,但各个岩相的亚相之间往往显示出较大差别。储层物性按亚相大体可分为3类(图8):①爆发相火山碎屑流亚相、侵入相的外带、内带和中带等4种亚相的储层物性最好;②火山沉积相



注:直方柱上数字为样品数,实测总样品数:孔隙度193个,渗透率175个;测井总样品数:孔隙度430个,渗透率270个。

图8 辽河盆地东部凹陷火山岩实测、测井孔隙度、渗透率与岩相对应关系(亚相符号同表1)

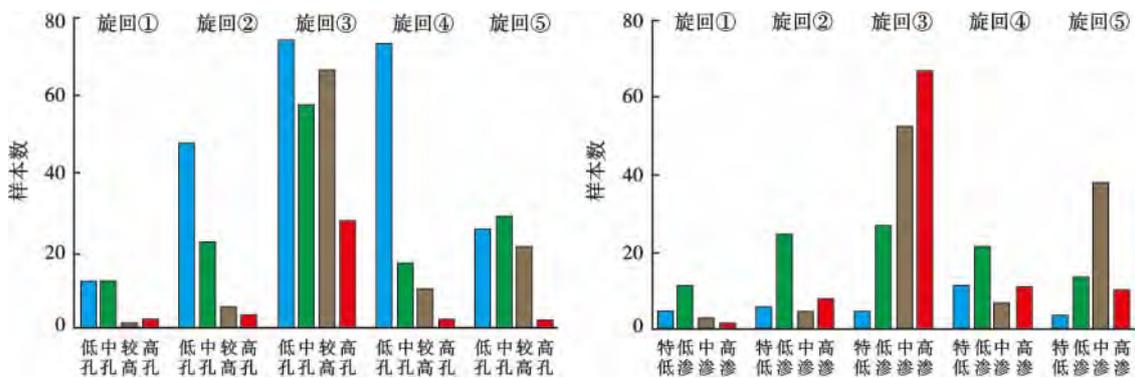
Fig. 8 Measured, logging porosity and permeability versus lithofacies of the Cenozoic volcanic rocks in eastern depression, Liaohe Basin

的再搬运火山沉积亚相、喷溢相的复合熔岩流和板状熔岩流亚相次之;③爆发相玻质碎屑流亚相、火山沉积相的含外碎屑火山沉积亚相、爆发相的空落和热基浪亚相、火山通道相之次火山岩 5 个亚相的物性较差。

4.3 火山喷发旋回与储层物性的关系

采用赵澄林等火山岩储层孔隙度和渗透率分级方案^[19],将辽河盆地火山岩储层孔隙度和渗透率分为 4

级,分别为低孔、中孔、较高孔和高孔及特低渗、低渗、中渗和高渗。结果显示,中部的粗面岩旋回,即旋回③孔隙度、渗透率条件最好,其中较高孔和高孔占 42%,中渗和高渗占 79%;顶部基性熔岩旋回次之,较高孔、高孔和中高渗所占比例分别为 39%和 75%;其他旋回有利孔隙度、渗透率所占比例很低,不具备形成有效储层的条件(图 9)。



注:孔隙度级别为低孔($\leq 5\%$)、中孔($5\% \sim 10\%$)、较高孔($10\% \sim 15\%$)、高孔($\geq 15\%$);渗透率级别为特低渗(≤ 0.1 mD)、低渗($0.1 \sim 1$ mD)、中渗($1 \sim 5$ mD)、高渗(≥ 5 mD)。孔隙度样品数 458 个,渗透率样品数 288 个。

图 9 辽河盆地东部凹陷沙三段火山岩实测孔隙度、渗透率与旋回对应关系

Fig. 9 Measured porosity and permeability versus volcanic cycles of the Cenozoic in eastern depression, Liaohe Basin

4.4 断裂-火山机构-储层关系

三者之间的关系主要体现在 3 个方面(图 1):①表现为火山岩体受深大断裂控制,沿大型走滑断裂呈串珠状分布;②古火山口或火山机构中心相带主要呈 NE 向分布;③主干断裂往往控制了生油洼陷^[20],实际的勘探成果也表现为靠近主干断裂的工业油气井较多,而随着离主干断裂距离的增加,含油/气的水井尤其是干井出现几率增大,这也表明了断裂活动对油气藏的形成、改造有重要的影响。

5 结论及建议

(1) 本区的火山岩储层控制因素可分为三级:①一级大尺度或宏观特征指岩体和旋回;②二级(中等尺度)指岩相或岩性组合;③三级(微观特征)指储集空间。

(2) 辽河盆地作为典型的裂谷盆地,岩体分布明显受到大型走滑断裂(驾掌寺-界西断裂)控制,较厚火山岩体沿主干断裂呈串珠状分布。火山喷发旋回受区域构造背景及壳幔作用过程控制,表现在勘探方面就是有效储层集中发育在中部的粗面岩旋回(旋回③)。

(3) 火山岩相控制有效储层在火山机构内的发育部位和规模,中心相带的侵出相是本区有效储层集中发育的岩相带。岩性作为储层的直接载体,对储集空间的形成演化起到最直接的控制作用,表现为不同岩

性的原生和次生孔缝形成与保存能力不同。粗面岩类由于其原生粒间孔发育、裂缝容易形成和保存、斑晶(碱性长石)及基质易于溶蚀产生次生孔隙,因而成为有效储层的最有利岩性。

(4) 建议将位于断裂交汇部位、中部粗面岩旋回的火山口-近火山口相带中粗面岩类及凝灰砂岩作为下一步勘探的主要方向。

参 考 文 献

[1] 陈振岩,李军生,张戈,等. 辽河凹陷火山岩与油气关系[J]. 石油勘探与开发,1996,23(3):1-5.
Chen Zhenyan, Li Junsheng, Zhang Ge, et al. Relationship between volcanic rocks and hydrocarbon within Liaohe Depression of Bohai Gulf Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 1996, 23(3): 1-5.

[2] 张占文,陈振岩,蔡国刚,等. 辽河拗陷火山岩油气藏勘探[J]. 中国石油勘探,2005,4:16-23.
Zhang Zhanwen, Chen Zhenyan, Cai Guogang, et al. Exploration of volcanic oil and gas reservoirs in Liaohe Depression[J]. China Petroleum Exploration, 2005, 4: 16-23.

[3] 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.

[4] 崔勇,栾瑞乐,赵澄林. 辽河油田欧坨子地区火山岩储集层特征及有利储集层预测[J]. 石油勘探与开发,2000,27(5):47-52.

- Cui Yong, Luan Ruile, Zhao Chenglin. Volcanic rock reservoir characteristics and prediction in Oulituozi region, Liaohe basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2000, 27(5): 47-52.
- [5] 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.
- [6] 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 Chengzao, et al. Formation and distribution of volcanic hydrocarbon reservoirs in sedimentary basins of China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2008, 35(3): 257-271.
- [7] 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.
- [8] 罗静兰, 邵红梅, 张成立. 火山岩油气藏研究方法 with 勘探技术综述[J]. *石油学报*, 2003, 24(1): 31-38.
- Luo Jinglan, Shao Hongmei, Zhang Chengli. Summary of research methods and exploration technologies for volcanic reservoirs[J]. *Acta Petroli Sinica*, 2003, 24(1): 31-38.
- [9] 朱如凯, 毛治国, 郭宏莉, 等. 火山岩油气储层地质学——思考与建议[J]. *岩性油气藏*, 2010, 22(2): 7-13.
- Zhu Rukai, Mao Zhiguo, Guo Hongli, et al. Volcanic oil and gas reservoir geology: thinking and forecast[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2010, 22(2): 7-13.
- [10] 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 Petroli Sinica*, 2011, 32(5): 749-756.
- [11] 蔡周荣, 夏斌, 郭峰, 等. 松辽盆地北部徐家围子断陷营城组火山岩受控机制分析[J]. *石油学报*, 2010, 31(6): 941-951.
- Cai Zhourong, Xia Bin, Guo Feng, et al. Controlling mechanism on volcanic rocks of the Yingcheng Formation of the Xujiaweizi rift depression in the northern Songliao Basin[J]. *Acta Petroli Sinica*, 2010, 31(6): 941-951.
- [12] 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.
- [13] Sruoga P, Rubinstein N. Processes controlling porosity and permeability in volcanic reservoirs from the Austral and Neuquen basins, Argentina[J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91: 115-129.
- [14] 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 Yanmin, Bian Weihua, et al. Reservoirs quantitative analysis of volcanic edifice of Yingcheng Formation in Songliao Basin, Early Cretaceous, NE China[J]. *Acta Petroli Sinica*, 2008, 29(6): 841-845.
- [15] 黄玉龙, 王璞珺, 门广田, 等. 松辽盆地营城组火山岩旋回和期次划分——以盆缘剖面和盆内钻井为例[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2007, 37(6): 1183-1191.
- Huang Yulong, Wang Pujun, Men Guangtian, et al. Division of volcanic cycles and stages of the Yingcheng Formation of the Songliao Basin: take the cross sections at the margin and the boring holes as examples[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2007, 37(6): 1183-1191.
- [16] 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.
- [17] 李金龙, 王璞珺, 郑常青, 等. 松辽盆地东南隆起区营城组柱状节理流纹岩特征和成因[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2007, 37(6): 1131-1138.
- Li Jinlong, Wang Pujun, Zheng Changqing, et al. Characteristics and genesis of rhyolite with columnar joints from the Yingcheng Formation in Southeastern Uplift of the Songliao Basin[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2007, 37(6): 1131-1138.
- [18] 王璞珺, 陈树民, 李伍志, 等. 松辽盆地白垩纪火山期后热液活动的岩石地球化学和年代学及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2010, 26(1): 33-46.
- Wang Pujun, Chen Shumin, Li Wuzhi, et al. Chronology, petrology and geochemistry of the Cretaceous crypto-explosive breccia-bearing volcanic rocks: implications for volcanic reservoir and tectonics of the Songliao Basin, NE China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(1): 33-46.
- [19] 赵澄林, 孟卫工, 金春爽, 等. 辽河盆地火山岩与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999.
- Zhao Chenglin, Meng Weigong, Jin Chunshuang, et al. Volcanic rocks and hydrocarbon in Liaohe Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999.
- [20] 陈振岩, 陈永成, 仇劲涛, 等. 辽河盆地新生代断裂与油气关系[J]. *石油实验地质*, 2002, 24(5): 407-412.
- Chen Zhenyan, Chen Yongcheng, Qiu Jintao, et al. Relationship between the Cenozoic faults and hydrocarbon in the Liaohe Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2002, 24(5): 407-412.

(收稿日期 2013-01-08 改回日期 2013-03-29 责任编辑 熊 英)