

冯志强,刘嘉麒,王璞珺等. 油气勘探新领域:火山岩油气藏——松辽盆地大型火山岩气田发现的启示. 地球物理学报, 2011, 54(2):269~279, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.02.001

Feng Z Q, Liu J Q, Wang P J, et al. New oil and gas exploration field: volcanic hydrocarbon reservoirs——Enlightenment from the discovery of the large gas field in Songliao basin. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(2):269~279, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.02.001

油气勘探新领域:火山岩油气藏 ——松辽盆地大型火山岩气田发现的启示

冯志强¹, 刘嘉麒², 王璞珺³, 陈树民¹, 冯子辉¹, 童 英^{1,4}

1 大庆油田有限责任公司, 大庆 163712

2 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

3 吉林大学地球科学学院, 长春 130026

4 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

摘 要 通过观念转变和理论与技术创新, 大庆油田在松辽盆地徐家围子断陷深层火山岩天然气勘探获得重大突破, 使火山岩由原来的油气勘探“禁区”变为“靶区”, 从而带动了全国的火山岩油气勘探, 促使国内油气储量的不断增长. 研究表明, 各类火山岩均有可能成为良好的储层. 与沉积岩相比, 火山岩在盆地深层具有体积大、储层物性受埋深影响小、孔渗条件好等三大优势. 火山岩主要出现在盆地发育早期, 旋回性火山作用多与快速沉降的非补偿型沉积序列互层, 可形成多套有效的生储盖组合, 且火山岩油气来源具多样性, 因此深层火山岩必然是油气勘探的有利目标. 虽然我国东、西部具有形成两个万亿方火山岩大气区的地质条件, 但探明率偏低. 就全球而言, 火山岩油气勘探的程度普遍很低, 火山岩油气资源潜力以往被大大低估了, 因此火山岩油气藏必将成为未来油气勘探的重要领域.

关键词 火山岩油气藏, 松辽盆地, 油气勘探, 大型气田

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.02.001

中图分类号 P631

收稿日期 2010-10-06, 2010-12-28 收修定稿

New oil and gas exploration field: volcanic hydrocarbon reservoirs —— Enlightenment from the discovery of the large gas field in Songliao basin

FENG Zhi-Qiang¹, LIU Jia-Qi², WANG Pu-Jun³, CHEN Shu-Min¹, FENG Zi-Hui¹, TONG Ying^{1,4}

1 Daqing Oil Field Corporation Ltd. of China Petroleum, Daqing, Heilongjiang 163712, China

2 Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3 College of Earth Sciences of Jilin University, Jilin 130026, China

4 Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

Abstract Based on the new insight into the volcanic sequence coupled with associated theory and technique innovation, large volcanic gas fields were successfully found in the Songliao basin NE China. Volcanic rocks have thus been changed from the “forbidden zone” to the “target” in oil and gas exploration for the first time there. This has promoted the volcanic exploration of China and brought rapid growth of petroleum reserves in recent years. Compared with sedimentary rocks, volcanics in deep of the basin have three major advantages including large volume, little

基金项目 国家重点基础研究发展计划项目(2009CB219300)资助.

作者简介 冯志强,男,1964年生,教授级高级工程师,1985年毕业于大庆石油学院石油地质专业,2000年获得英国里丁大学博士学位,一直从事石油地质研究和油气勘探开发工作,现任大庆油田有限责任公司副总经理. E-mail: fengzhiqiang@petrochina.com.cn

change of reservoir space with depth of burial, better porosity and permeability. Various volcanic rocks can become effective reservoirs. Volcanic successions developed mainly in early stage of the basin evolution and interbedded with non-compensated sedimentary sequence of rapid subsidence, which could form different kind of combination of petroleum system. In addition, volcanic reservoirs have more chance to receive gases from multi-sources. Therefore, deep basin volcanics will inevitably become favorable exploration targets for oil and gas. Although there are geologically the potential for forming the two trillion square sized volcanic gas regions in the eastern and western of China, a lot of work left to be done. Volcanic oil and gas exploration is just at the preliminary step globally. Their resource potential has been greatly underestimated up to now. We therefore believe that volcanic reservoirs will certainly become important field of oil and gas exploration in the near future.

Keywords Volcanic hydrocarbon reservoirs, Songliao basin, Oil and gas exploration, Large gas field

1 引言

在传统油气地质理论认识中,火山岩往往被认为不生不储不盖,且其形成时的高温会破坏成藏,因而在勘探中要尽量避免,甚至将其视作“禁区”,排除在油气勘探的重点目标之外.即使自 19 世纪末以来的 100 多年里,世界上 100 多个国家在 300 多个盆地或区块的火山岩中发现了一些油气藏或油气田,也多属偶然钻遇^[1~3],未能引起足够的重视.截至 2007 年,世界探明油气可采储量约 5600 亿吨,但在火山岩中发现的油气储量所占比例却不足 1%.我国的情况也是如此,20 世纪 50 年代,在准噶尔盆地火山岩中发现了油气,并于 80 年代至 90 年代探明了一些储量,但未形成持续储量增长(图 1),火山岩油气藏的勘探潜力没有被很好的认识到.

近年来,通过技术进步和转变思想观念,大庆油田将深层火山岩作为目的层,有针对性的布置钻探.2002 年在松辽盆地徐家围子断陷早白垩世营城组火山岩中获得天然气勘探重大突破,已探明几千亿方天然气储量,使之成为中国东部迄今为止最大的火山岩气田——庆深气田,展示出火山岩油气勘探的广阔前景^[4,5],进而推动了全国性的火山岩油气勘探,在三塘湖、塔里木、下辽河和渤海湾等盆地又新探明了一大批火山岩油气田,充分证实了火山岩的巨大勘探潜力^[6~8],火山岩已成为一个方兴未艾的油气勘探新领域.本文以松辽盆地大型火山岩气田的发现为基础,结合全球盆地火山岩油气勘探的新进展,着重论述火山岩油气藏将成为未来油气勘探的重要领域.

2 区域地质及松辽盆地概况

松辽盆地是中国东北最大的中-新生代陆相含油气盆地^[9~11],总面积约 $26 \times 10^4 \text{ km}^2$,呈北东向展布,是蒙古—鄂霍茨克洋构造域和太平洋构造域叠加在古亚洲洋构造域基础上形成的一个陆内裂谷盆地^[12],东西分别距太平洋和蒙古—鄂霍茨克缝合带约 600 km(图 2 中小图).盆地以白垩系沉积为主,上覆少量新生代地层,沉积总厚度大于 7000 m^[10].具有下部断陷、上部拗陷的二元结构^[13].拗陷期为一套河湖相砂泥岩含油地层,包括泉头组、青山口组、姚家组、嫩江组、四方台组,在该套地层中发现了中国最大的油田——大庆油田,油气资源量超过 100 亿吨;断陷期地层为一套含煤沉积和火山岩交互的含气地层,自下而上包括火石岭组、沙河子组、营城组,分布在三十几个断陷中,其中面积大于 1000 km^2 的断陷有 15 个,如徐家围子断陷、古龙断陷和长岭断陷等(图 2).火石岭组顶面现今埋深一般在 4000 m 左右,在齐家—古龙断陷内最深可达 8000 m 以上,东南隆起区则仅为 2000~3000 m;营城组顶面埋深一般大于 3000 m,古龙地区局部埋深大于 7000 m,双城徐家围子局部埋深大于 4000 m.盆地基底由古生代沉积岩和前中生代变质岩、岩浆岩以及早中生代花岗岩组成^[14].

松辽盆地演化经历了 3 个大的时期,即断陷期、拗陷期和构造反转-萎缩期.3 个成盆期的盆地充填和构造演化特征为:

(1)火山-断陷成盆期(J-K₁,火石岭组、沙河子组和营城组);

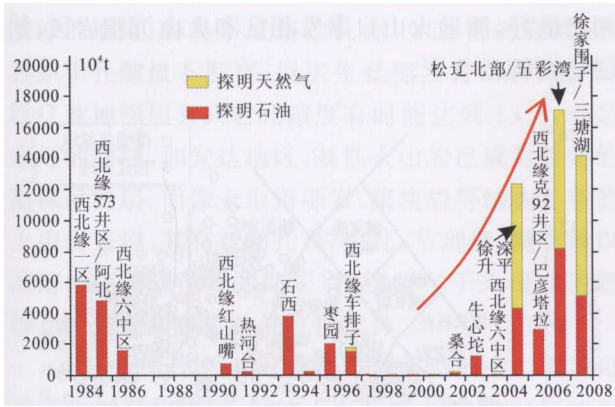


图1 1984~2008年间中国在火山岩储层中探明的油气储量

Fig. 1 Proved oil and gas reserves in volcanic of China from 1984 to 2008

(2) 挠曲-拗陷成盆期(登娄库组、泉头组、青山口组、姚家组和嫩江组);

(3) 构造反转期(四方台组、明水组, 依安组、大安组、泰康组)^[15, 16].

三个充填序列之间有两个明显的区域性不整合面, 分别对应于营城组顶面的 T4 反射层和嫩江组顶面的 T03 反射层^[17]. T4 反射层上下构造样式、盆地充填等方面具有显著差异, 反映松辽盆地是一个典型的复合成因盆地(或叠合盆地)^[18], 应是在不同的构造背景和成盆机制下形成的, 有学者认为与(古)太平洋俯冲关系密切^[19, 20], Feng et al(2010)根据地球物理勘探成果提出了蒙古-鄂霍茨克洋和古太平洋双向俯冲模式, 解释了松辽盆地大型拗陷湖盆的成因, 以及东北地区火山岩较其它环太平洋构造带更为发育的原因, 并对盆地的构造演化和沉积建造作了较详细的论述^[11].

3 松辽盆地深层火山岩气藏特征

从大型陆相油田发现以来几十年间, 松辽盆地的油气勘探和研究工作主要集中在中浅层, 即泉头

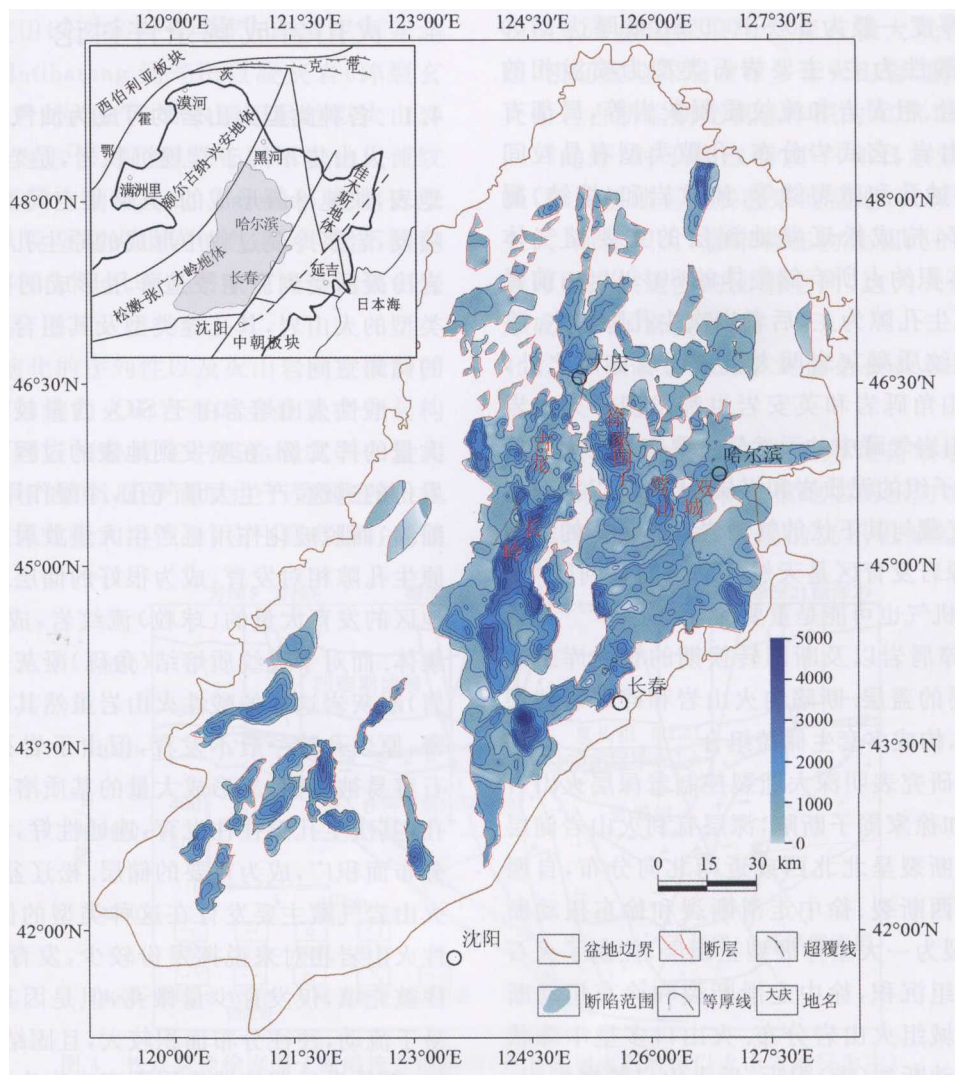


图2 松辽盆地深层断陷地层厚度图

Fig. 2 Deep rift stratum thickness graph of Songliao basin

组至嫩江组. 深层勘探始于 20 世纪 70 年代, 集中在断陷边部的砂砾岩, 受“火山岩不利于油气生成”观念的影响, 火山岩起初被当作油气勘探的“禁区”, 是钻探尽量避开目标, 在深层钻遇火山岩即停钻. 21 世纪初随着思路的转变, 深层天然气勘探获得重大突破, 2002 年徐家围子断陷徐深 1 井深层火山岩储层成功钻探, 获日产 118 万方无阻流量的高产工业气流, 进而在徐家围子断陷中部升平-兴城构造带发现了大型火山岩气田—庆深气田^[4,21], 之后在松辽盆地深层断陷期地层相继获得突破.

火山岩储层构成松辽盆地断陷期地层的主体部分, 主要分布于三个层位段, 即火石岭组二段、营城组一段、营城组三段. 火石岭组火山岩以中性为主, 主要为安山岩、安山质角砾岩和安山质火山岩碎屑岩等, 也发育一定量的玄武岩等基性火山岩, 孔隙类型则以裂缝、溶蚀孔为主. 营城组是断陷期地层的主要含气层, 火山岩普遍发育, 具有分布广泛、喷发期次多的特点, 厚度一般为 50~1000 m, 最厚达 2700 m. 岩性以中-酸性为主, 主要岩石类型为喷溢相的流纹岩、英安岩、粗安岩和流纹质凝灰岩等, 局部有中-基性的安山岩、玄武岩分布, 孔隙类型有晶间孔隙、气孔、溶蚀孔和微裂缝等. 流纹岩和(熔结)凝灰岩物性较好, 构成松辽盆地深层的主要储气体(图 3), 两者体积约占所有储集体的 80% 以上, 前者储集空间以原生孔隙为主, 后者以次生孔隙为主. 除了流纹岩和流纹质凝灰岩两大类火山岩储层之外, 在安山岩、火山角砾岩和英安岩也都发现了火山岩气藏. 深层火山岩气藏中的天然气主要来源于火石岭组一段和沙河子组的泥质岩和煤层, 天然气以垂向向上运移为主, 气藏与其下伏的气源岩具有良好的空间配置关系, 气源岩发育区是天然气勘探的有利区^[21], 另外深部的无机气也可能是重要的气源之一^[22,23]. 营二段、营四段碎屑岩以及断凹转换期的登娄库组砂岩、泥岩是重要的盖层. 断陷内火山岩和碎屑岩地层纵向多次叠置, 构成多套生储盖组合^[5,21].

井震结合研究表明深大断裂控制着深层火山岩气藏分布. 如徐家围子断陷, 深层有利火山岩储层主要沿着 3 条断裂呈北北西或近南北向分布, 自西向东分别为徐西断裂、徐中走滑断裂和徐东扭动断裂带. 徐西断裂为一大型伸展型正断层, 控制了火石岭组沙河子组沉积, 徐中走滑断裂和徐东扭动断裂带控制了营城组火山岩分布. 火山口多呈串珠状分布在两大扭动断裂(带)附近, 近火山口的爆发相、喷溢相和火山通道相等多种岩相叠合区的储层物性

相对最好, 而远火山口爆发相区和火山沉积岩区, 储层物性较差^[24,25].

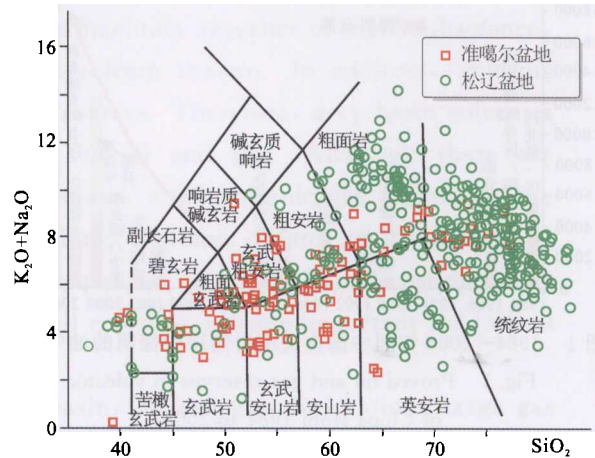


图 3 中国东西部典型火山岩油气藏的火山岩 TAS 图解
Fig. 3 Volcanic TAS diagram of the typical volcanic hydrocarbon reservoirs in western and eastern China

4 火山岩成藏条件讨论

4.1 各种类型火山岩均可成为油气有效储层

火山岩不同于常规沉积岩, 是岩浆直接喷发到地表, 快速冷凝形成的, 其储集空间不仅包括在火山喷发、岩浆冷凝过程中形成的原生孔隙, 还有在火山岩冷凝后受到后期改造作用形成的次生孔隙. 不同类型的火山岩, 其孔隙类型及其组合不同, 构成不同的储集空间.

酸性火山熔岩由于 SiO_2 含量较高, 同时也含有大量的挥发份, 在喷发到地表的过程中, 由于这些挥发份的逃逸, 产生大量气孔, 冷凝作用形成大量的收缩缝, 而脱玻化作用也产生大量放射状微孔, 因而其原生孔隙相对发育, 成为很好的储层. 松辽盆地升平地区的发育大量的(球粒)流纹岩, 成为重要气藏储集体. 而对于流纹质熔结(角砾)凝灰岩和流纹质(晶屑)凝灰岩这样的酸性火山岩虽然其粒度小, 结构致密, 原生孔隙一般不发育, 但由于岩石偏酸性, 且长石容易被溶蚀, 易形成大量的基质溶孔、长石晶屑溶孔, 其次生孔隙往往发育, 连通性好, 渗透率高, 加上分布面积广, 成为重要的储层. 松辽盆地兴城地区的火山岩气藏主要发育在这种类型的储集空间中. 基性火山岩相对来说挥发份较少, 发育的原生气孔往往被充填, 仅发育少量微孔, 但是因其岩浆粘度小、易于流动, 往往分布面积较大, 且固结后脆性比较大的, 更易受后期构造作用而产生次生构造裂缝, 而这种构造裂缝连通性较好, 为流体的溶蚀作用提供了

很好的通道,容易形成溶蚀孔隙,如致密的玄武岩,其原生孔隙极不发育,但次生孔隙发育,钻井揭示,松辽盆地深层玄武岩孔隙度有时能达到 13%,也是很好的储层,如安达地区,基性火山岩已成为重要的勘探目的层.而像火山角砾岩、集块岩等结构复杂的火山岩来说,其有粒间孔、粒内孔、节理缝、微裂缝以及溶蚀孔构成很好的储层,特别分布于火山口的隐爆角砾岩是很重要的油气储集体.

以上分析表明松辽盆地不同类型的火山岩都可以成为很好的储层,而这一点在国外内火山岩油气勘探中得到了很好的证实.如三塘湖盆地、准噶尔盆地以玄武岩、玄武安山岩等中基性火山岩为主要储层^[26~28];辽河油田以粗面岩、安山岩和次火山岩为储层^[29];济阳坳陷下第三系火成岩以辉绿岩、玄武岩、安山质玄武岩为特征,上第三系火成岩以橄辉玄武岩为特征^[30];塔北隆起火山岩呈现基性与酸性并存的双峰式特点^[31].澳大利亚西北部 Browse 盆地 Scott Reef 油气田以玄武岩为主^[32],印度尼西亚北爪哇盆地西部 Jatibarang 油气田以凝灰岩(碎裂玄武岩、安山凝灰岩)为主^[33],日本新泻盆地以火山岩碎屑岩、安山岩为主^[34],阿根廷 Austral 盆地以流纹岩和安山岩为主^[35],新西兰北 Taranaki 盆地以安山岩为主^[36].纵观全球火山岩油气藏,尽管不同盆地、不同区块有各自特点,但几乎所有类型的火山岩都可以成为储层(图 3).

由于岩浆演化的序列性以及火山岩喷发的旋回性,不同成分和结构的火山岩有时会叠置在一起构成岩相组合,不同岩相叠置在一起会构成一个岩相叠合区.一个岩相的顶、底界面层由于受到溶蚀、风化等作用,形成风化壳和溶蚀孔,往往具有很好的储

集性;岩相的顶、底界面层在组成储层的同时,也是热液的良好通道,有利于溶蚀作用的发生,从而进一步改善储集性能.多种岩相叠合区涉及的层位多、岩性丰富,相变也多,即使个别岩性(相)带储层不发育,其整体往往可以形成很好的油气储集体.显然,火山口附近多种岩相叠合区,以及近火山口爆发相和喷溢相叠合相区储层物性较好,是寻找火山岩油气藏的良好目标.

4.2 火山岩是盆地深层油气勘探的重要目标

4.2.1 盆地深层火山岩作为储集层在体积上占有优势

火山岩是盆地早期充填的重要组成部分,体积约占 25%^[37].就我国东部裂谷系盆地而言^[38,39],盆地深部地层形成于盆地发育早期,这个时期构造活动强烈,火山活动频繁,喷发期次多,规模相对较大,火山岩累计厚度大,因而整个火山岩体在盆地深层所占比例较大.现有的勘探结果也证实了这一点,在我国东部盆地深层均发育有较大规模的火山岩地层,松辽盆地深层发育多套火山岩,期次多,厚度大,火山岩占断陷期充填总体积的 50%以上(图 4).

此外,对于像三塘湖^[40]和日本新泻^[34]等在岛弧、弧后基础上发展起来的盆地,其深层火山岩体积更大.而体积大,意味着在物性相同的情况下,火山岩可以提供更多的储集空间,这为火山岩油气藏的形成提供了必要条件.

4.2.2 在深层火山岩成储条件往往好于常规的沉积岩

随着盆地的发育,沉积厚度持续增厚,深度不断增加,地层的温度和上覆地层的压力也不断增加,受压实作用的影响,常规的沉积岩储层,由于其可塑

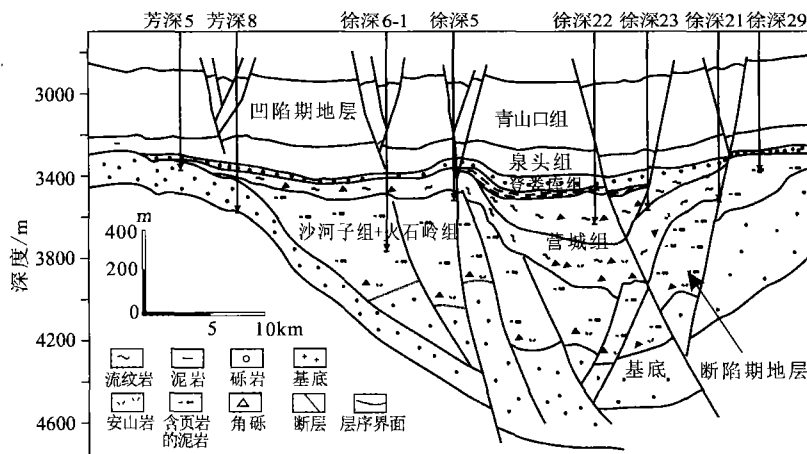


图 4 松辽盆地徐家围子断陷连井剖面图(营城组和火石岭组以火山岩地层为主)

Fig. 4 Even well profile of Xujiaweizi rift in Songliao basin (main part of Yingcheng and Huoshiling formation are volcanic)

性, 体积不断缩小, 孔隙度和渗透率也不断降低, 在多数沉积盆地中当埋深超过 3000 m 时, 孔隙度和渗透率会降至很低, 往往会失去储集性能(图 5). 而来源于岩浆冷却产物的深层火山岩, 结构支撑强度大, 抗压性好, 可塑性小, 能够很好地保存原生孔隙, 加之火山岩的脆性大, 受后期构造活动改造期次多, 有利于裂隙的形成和保存, 而这些原生孔隙和构造裂缝也是后期热液改造作用必要通道, 为次生孔隙的形成提供了必要的条件. 由于火山岩活动, 特别岩浆活动晚期, 地球深部高温富碱流体也不断涌出地表, 加速溶蚀作用的发生, 产生大量的次生孔隙, 因此, 在盆地深层, 火山岩的储集性能往往要优于常规沉积岩, 是相对有利的储层. 因此, 火山岩整体上表现出孔隙大, 储层物性受埋深影响小的特征, 在深层仍具有很好的储集性能(图 5).

4.2.3 火山岩在盆地深层多于常规沉积岩组成良好的生、储、盖组合

盆地演化早期, 特别裂谷盆地, 不仅是火山活动最活跃的时期, 也是盆地快速沉降期, 非补偿沉积时可行成良好的烃源岩. 盆地伸展、火山喷发、快速沉降、烃源岩沉积交互进行, 多期喷发的火山岩与快速沉降的泥岩、煤层、砂砾岩相匹配, 在垂向上可形成多套有利生、储、盖组合, 相互叠置. 而对于具有很好储集性能的近源火山岩, 显然是一个理想的充注对

象. 松辽盆地发育初期, 形成了自下而上由火石岭组一段(生)、火石岭组二段(火山岩、储)和沙河子组(盖、生)、营城组一段(火山岩、储)、营城组二段(盖、生)、营城组三段(火山岩、储)、营四段碎屑岩以及断凹转换期的登娄库组砂岩、泥岩(盖)构成的多套生、储、盖组合. 在准噶尔、三塘湖、渤海湾等盆地的深层也是存在多套有利生、储、盖组合^[6]. 这些都说明了火山岩在盆地深层可以作为很好的储层存在, 与常规沉积岩组成良好的生、储、盖组合.

4.2.4 深层火山岩油气藏的油气来源多样, 包括有机成因以及无机成因

深层火山岩中的油气不仅可以来源于有机烃源岩, 同时, 在火山岩岩浆上升过程或期后, 大量的幔源无机气从地幔逃逸, 尤其是 CO₂ 气体, 可以通过深大断裂、火山通道, 充注到火山岩孔隙之中, 形成无机成因气藏^[22, 23, 11], 松辽盆地南部吉林探区近年来发现了多个高含 CO₂ 气藏就很好地说明了这一点. 同时, 火山作用发生时的热效应对围岩中的烃类也有一定的催熟作用^[12].

不同类型的火山岩都可以成为很好的储层, 而无论是从储集岩体积、成储条件, 还是从生、储、盖组合, 以及油气来源来说, 深层火山岩都具有明显的优势, 是盆地深层油气勘探的有利目标.

5 火山岩的勘探潜力被严重低估, 火山岩油气勘探方兴未艾

美国著名石油地质学家华莱士说: “不管怎么说, 首先找到石油的地方在地质家脑海里”. 我国的油气勘探很好地诠释了这句在国际石油界广为流传的名言. 只有转变思想, 才会有油气勘探的重大突破. 20 世纪 50 年代末, 我们的石油先驱们通过思想的转变, 突破了“海相生油”的理论框架, 创立了自己的“陆相生油理论”, 并在这一理论的指导下, 于松辽盆地中浅层中发现了特大型油田(大庆油田). 这一重大突破不仅甩掉了“中国贫油”的帽子, 而且在这一创新理论和实践的推动下, 中国相继开发了渤海湾、江汉、南阳、苏北、北部湾、二连等陆相含油气盆地, 奠定和发展了中国的石油工业. 同时, “陆相生油理论”也是今天我国走向世界, 在陆相油气勘探中具有明显国际竞争优势的根基所在.

尽管火山岩油气藏发现在国外已超过百年, 在我国也有半个多世纪. 但 2001 年以前的我国火山岩油气勘探主要是偶遇或兼探, 总体处于火山岩油气

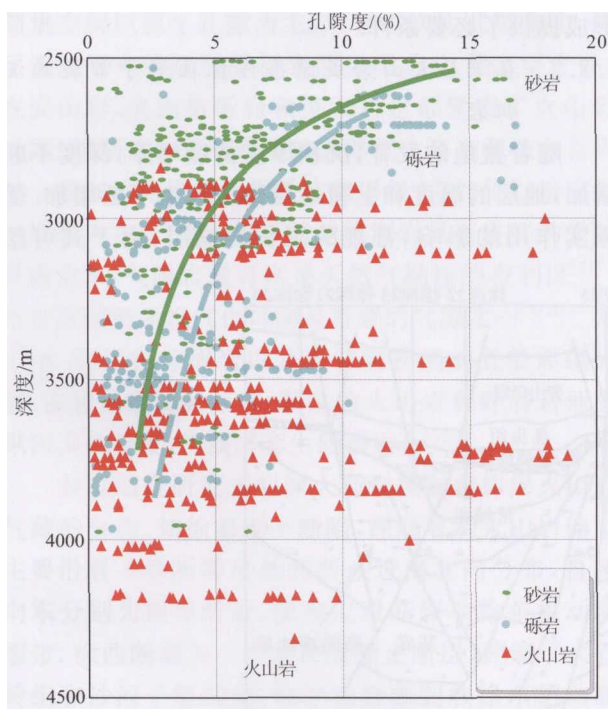


图 5 松辽盆地储层孔隙度随深度变化关系图

Fig. 5 The relational graph of reservoir porosity and depth of Songliao basin

藏勘探的早期^[6],我国火山岩油气勘探进入新的阶段,迈入跨越式发展道路还主要是在近十几年。

20 世纪末到 21 世纪初,大庆油田在主力油层勘探取得重大阶段性成果,尤其是大型构造油气藏多数被发现以后,通过转变勘探思路,将以往常被看做“禁区”的深层火山岩作为目的层,提出了“到火山岩中去找油气”的新目标,进行有针对性的研究和钻探,在徐家围子深层断陷期地层营城子组火山岩中发现了我国东部最大的火山岩气田(庆深气田),取得深层天然气勘探的重大突破,实现了“大庆下面找大庆”的跨越式进步,为打造“百年油田”打下了坚实的基础。近年来,随着勘探技术,特别是深层火山岩预测、识别技术的发展^[43],截至 2009 年底,在徐家围子探明天然气地质储量 $2457 \times 10^8 \text{ m}^3$,在松辽盆地南部的长岭断陷火山岩中探明天然气储量超过 $700 \times 10^8 \text{ m}^3$,整个松辽盆地已探明天然气储量超过 $4000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。而像徐家围子和长岭这样的断陷在整个松辽盆地还有很多(图 2)。整个盆地展现出超万亿方的储气前景,一个特大型(油)气田的蓝图已经形成,这将成为我国经济快速发展的重要能源保障。松辽盆地的突破,进一步推动了全国的火山岩油气勘探的突破。近几年,在准噶尔、三塘湖、渤海湾、海拉尔和辽河等多个盆地的深层火山岩中又取得油气勘探的重要突破^[44]。新疆油田在准噶尔盆地石炭系火山岩中探明了第一个千亿方大气田-克拉美丽气田(2008 年,克拉美丽气田被评为“中国十大地质找矿成果”之一),目前该气田已实现向乌鲁木齐供气^[45]。吐哈油田在三塘湖盆地探明石油储量已超亿吨。中国东北和西北已展现出形成两个万亿方火山岩大气区的可喜前景。

从已探明油气的构成和勘探发现与储量增长的关系看,我国乃至全球的火山岩油气勘探潜力都被大大低估。国外火山岩油气勘探历程也能够说明这一点,如阿根廷 Neuquen 盆地,尽管自 1960 就开始生产,但只是近 10 年来才将火山岩作为勘探目标,仅 Medanito-25 de Mayo 油田就新增石油储量 $0.7 \times 10^8 \text{ m}^3$,而 1962~2001 年间,Neuquen 盆地原油总产量才为 $0.65 \times 10^8 \text{ m}^3$;又如在 Austral 盆地,把原来只按“兼探”对待的火山岩作为主要目的层后,油气储量短期增加了近 5 倍,火山岩储层单井累计产量达 $0.395 \sim 1.440 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[35]。而像松辽、准噶尔以及 Neuquen 这样的盆地在全球大量分布,尤其是与准噶尔盆地处于同一构造域(古亚洲洋构造域)的盆地,如哈萨克斯坦的斋桑盆地。在这些具有

相似演化背景的盆地中火山岩大量发育,同样也可能具有广阔的前景。由此看来,全球火山岩勘探潜力巨大显然已被低估。

火山岩油气藏勘探潜力被低估的重要原因在于深层火山岩埋深大,勘探难度大,受资料限制难以对资源潜力形成全面的客观认识^[5]。勘探经验证明,对一种新型油气藏研究和勘探技术的些许进步,往往就会带来储量的较快增长。因此,油气勘探的出路归根到底还是在于理论和勘探技术的创新。可喜的是目前我国的火山岩油气勘探已经初具规模,相关理论研究和技术研发已经为业内人士广泛重视,针对火山岩储层及其油气藏识别评价开展了关键理论和核心技术方面的系统研究,并取得了一系列重要进展。例如,采用重磁电剥层处理、沿层延拓信号增强反演方法有效预测了西部盆地地区火山岩分布^[46];应用趋势面分析和相干体切片相结合技术^[47]、以及支持向量机模型^[48]等进行火山岩储层预测;利用 PP、PS 联合反演技术进行了纵、横波速度比弹性参数反演,较好的解决了多解性难题,有效地预测了松辽盆地深层火山岩含气储层^[49];通过正则化下延和弱信号增加技术,提高了同类火山岩体岩性识别的准确性,根据重磁电震等资料综合预测了准噶尔盆地火山岩油气藏目标^[50];以地震反射特征和地震属性特征为依据,结合钻井、测井资料,并震结合从三维空间上精细识别和刻画火山岩体,通过利用神经网络算法建立多种地震属性与测井参数的定量关系,实现了火山岩体内部多种地质属性的定量表征,建立的三维可视化地质模型比较真实地反映了火山机构及其内部属性空间发育和分布特征^[51]。还包括火山机构、岩性岩相地震、测井的相应之间的技术开发^[52~56]等。

火山岩勘探既是构造问题,又是岩性和油气问题;既与浅层构造存在状态有关,又与深层构造配制有关^[57]。所以我们应该站在盆外,从区域地球物理入手,研究区域构造背景^[58],开展盆地构造和火山地层学研究^[59],进而给出盆地整体面貌和资源潜力。目前已形成一套从区域分布到火山岩储层预测,再到流体、火山岩油气藏预测、识别、评价技术,这些为火山岩油气勘探的进一步突破提供重要的基础。

全球主要含油气盆地多数已进入高勘探程度期,国际油气勘探总体趋势是向低(储层渗透率低)、深(油气埋藏深)、难(目标发现难)领域拓展,特别是盆地的深层,更是重中之重。火山岩作为盆地深层的主体,必将成为今后相当长时期内油气勘探的重要

领域. 为实现油气储量的不断增长, 火山岩油气藏必然要成为重要资源接替领域. 目前我国的火山岩油气勘探已可谓处于世界的前列, 坚持产学研相结合^[60], 立足于我国东西两个各具特点、区别十分明显(构造背景不同、形成时代、代表火山岩岩性不同、储集空间不同, 等等), 并且具有全球代表性的含火山岩盆地群, 在火山岩油气勘探领域不断加强理论技术创新和勘探实践, 在有技术保障的条件下开展针对火山岩目的层的工业化勘探, 这将为我国在火山岩油气勘探开发上建立国际竞争优势.

6 结 论

以上分析表明:

(1) 尽管不同类型的火山岩孔隙类型不同, 储集性能也不一样, 但各种类型的火山岩都可以成为储层.

(2) 在盆地深层, 火山岩作为储集层不仅体积上占有优势成储条件也好于常规沉积岩, 同时也多与常规沉积岩组成良好的生、储、盖组合, 并且其油气来源也往往多样, 火山岩是重要的油气勘探目标.

(3) 火山岩的勘探潜力目前被严重低估, 因此必将成为今后的重要资源接替领域.

致 谢 与贾承造和戴金星两位院士的相关探讨使作者受益匪浅; 感谢中国石油天然气股份有限公司以及相关油田的领导、专家的支持和帮助!

参考文献(References)

- [1] 张子枢, 吴邦贵. 国内外火山岩油气藏研究现状及勘探技术调研. 天然气勘探与开发, 1994, **16**(1): 1~26
Zhang Z S, Wu B G. Research status and exploration technology of oil and gas in volcanic rock at home and abroad. *Natural Gas Exploration and Development* (in Chinese), 1994, **16**(1): 1~26
- [2] Petford N, McCaffrey K J W. Hydrocarbons in crystalline rocks. The Geological Society of London, 2003, London
- [3] Schutter S R. Occurrences of hydrocarbons in and around igneous rocks. *Geol. Soc. Lon. Spec. Pub.*, 2003, 214: 35~68
- [4] 冯志强. 松辽盆地庆深大型气田的勘探前景. 天然气工业, 2006, **26**(6): 1~5
Feng Z Q. Exploration potential of large Qingshen gas field in the Songliao basin. *Natural Gas Industry* (in Chinese), 2006, **26**(6): 1~5
- [5] Feng Z Q. Volcanic rocks as prolific gas reservoir: A case study from the Qingshen gas field in the Songliao basin, NE China. *Marine and Petroleum Geology*, 2008, **25**: 416~432
- [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. 石油勘探与开发, 2008, **35**(3): 257~15
Zou C N, Zhao W Z, Jia C Z, et al. Formation and distribution of volcanic hydrocarbon reservoirs in sedimentary basins of China. *Petroleum Exploration and Development* (in Chinese), 2008, **35**(3): 257~15
- [7] 赵文智, 邹才能, 李建忠等. 中国陆上东、西部地区火山岩成藏比较研究与意义. 石油勘探与开发, 2009, **36**(1): 1~11
Zhao W Z, Zou C N, Li J Z, et al. Comparative study on volcanic hydrocarbon accumulations in western and eastern China and its significance. *Petroleum Exploration and Development* (in Chinese), 2009, **36**(1): 1~11
- [8] 刘嘉麒, 孟凡超, 崔岩等. 试论火山岩油气藏成藏机理. 岩石学报, 2010, **26**(1): 1~13
Liu J Q, Meng F C, Cui Y, et al. Discussion on the formation mechanism of volcanic oil and gas reservoirs. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 2010, **26**(1): 1~13
- [9] 杨万里, 李永康, 高瑞祺. 松辽盆地陆相石油的形成与演化. 长春地质学院学报, 1982, **1**: 69~80
Yang W L, Li Y K, Gao R Q. Formation and evolution of nonmarine petroleum in the Songliao basin, China. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 1982, **1**: 69~80
- [10] 高瑞祺, 蔡希源等. 松辽盆地油气田形成条件与分布规律. 北京: 石油工业出版社, 1997. 12~173
Gao R Q, Cai X Y, et al. Formation and distribution of large-scale oil field in the Songliao basin. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997. 12~173
- [11] Feng Z Q, Jia C Z, Xie X N, et al. Tectonostratigraphic units and stratigraphic sequences of the nonmarine Songliao basin, northeast China. *Basin Research*, 2010, **22**: 79~95
- [12] 吴福元, 曹林. 东北地区的若干重要基础地质问题. 世界地质, 1999, **18**(2): 1~13
Wu F Y, Cao L. Some important problems of geology in northeastern Asia. *World Geology* (in Chinese), 1999, **18**(2): 1~13
- [13] 刘和甫, 梁慧社, 李晓清等. 中国东部中生代裂陷盆地与伸展山岭耦合机制. 地学前缘, 2000, **7**(4): 477~486
Liu H F, Liang H S, Li X Q, et al. The coupling mechanisms of Mesozoic-Cenozoic rift basins and extensional mountain system in eastern China. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2000, **7**(4): 477~486
- [14] 高福红, 许文良, 杨德彬等. 松辽盆地南部基底花岗质岩石锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年; 对盆地基底形成时代的制约. 中国科学(D辑), 2007, **37**(3): 331~335
Gao F H, Xu W L, Yang D B, et al. LA-ICP-MS Zircon U-Pb dating from granitoids in southern basement of Songliao basin: Constraints on ages of the basin basement. *Science in China (Series D: Earth Sciences)* (in Chinese), 2007, **37**(3): 331~335
- [15] 王璞珺, 刘万洙等. 事件沉积: 导论·实例·应用. 长春: 吉林科技出版社, 2001
Wang P J, Liu W Z, et al. Depositional events: Introduction·Example·Application (in Chinese). Changchun: Jilin Science

8. Technology Press, 2001
- [16] 王璞珺,程日辉,王洪艳等. 松辽盆地滨北地区油气勘探方向探讨. 石油勘探与开发,2006,**33**(4):426~431
Wang P J, Cheng R H, Wang H Y, et al. Strategy of next step oil & gas exploration in the northern Songliao basin (NE China). *Petroleum Exploration and Development* (in Chinese), 2006, **33**(4):436~441
- [17] Wang P J, Xie X A, Mattern F, et al. The Cretaceous Songliao basin: volcanogenic succession, sedimentary sequence and tectonic evolution, NE China. *Acta Geologica Sinica*, 2007, **81**(6):1002~1011
- [18] Wang P J, Liu W Z, Wang S X, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and K/Ar dating on the volcanic rocks in Songliao basin, NE China: Constraints on stratigraphy and basin dynamics. *International Journal of Earth Sciences*, 2002, **91**:331~340
- [19] 李娟,舒良树. 松辽盆地中、新生代构造特征及其演化. 南京大学学报(自然科学),2002,**38**(4):525~531
Li J, Shu L S. Mesozoic-Cenozoic tectonic features and evolution of the Songliao basin, NE China. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)* (in Chinese), 2002, **38**(4):525~531
- [20] 舒良树,慕玉福,王伯长. 松辽盆地含油气地层及其构造特征. 地层学杂志,2003,**27**(4):340~347
Shu L S, Mu Y F, Wang B C. The oil-gas-bearing strata and the structural features in the Songliao basin, NE China. *Journal of Stratigraphy* (in Chinese), 2003, **27**(4):340~347
- [21] 冯子辉,印长海,齐景顺等. 大型火山岩气田成藏控制因素研究——以松辽盆地庆深气田为例. 岩石学报,2010,**26**(1):21~32
Feng Z H, Yin C H, Qi J S, et al. Main factors controlling hydrocarbon accumulation in large volcanic gas fields: A case study of the Qingshen gas field in the Songliao basin. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 2010, **26**(1):21~32
- [22] 郭占谦,刘文龙,王先彬. 松辽盆地非生物成因气的成藏特征. 中国科学 D 辑:地球科学,1997,**27**(2):143~148
Guo Z Q, Liu W L, Wang X B. Reservoir-forming features of abiogenic gas in Songliao basin. *Science in China (Series D: Earth Sciences)* (in Chinese), 1997, **27**(2):143~148
- [23] 戴金星,邹才能,张水昌等. 无机成因和有机成因烷烃气的鉴别. 中国科学 D 辑:地球科学,2008,**38**(1):1329~1341
Dai J X, Zou C N, Zhang S C, et al. Distinguish between inorganic origin gas and organic origin gas. *Science in China (Series D: Earth Sciences)* (in Chinese), 2008, **38**(1):1329~1341
- [24] 王璞珺,冯志强等. 盆地火山岩:岩性·岩相·储层·气藏·勘探. 北京:科学出版社,2008
Wang P J, Feng Z Q, et al. Volcanic rocks in petroliferous basins: Petrography · Facies · Reservoir · Pool · Exploration (in Chinese). Beijing: Science Press, 2008
- [25] 冯子辉,邵红梅,童英. 松辽盆地庆深气田深层火山岩储层储集性控制因素研究. 地质学报,2008,**82**(6):760~768
Feng Z H, Shao H M, Tong Y. Controlling factors of volcanic gas reservoir property in Qingshen gas field, Songliao basin. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 2008, **82**(6):760~768
- [26] 谢庆宾,韩德馨,朱筱敏等. 三塘湖盆地火成岩储集空间类型及特征. 石油勘探与开发,2002,**29**(1):84~86
Xie Q B, Han D X, Zhu X M, et al. Reservoir space feature and evolution of the volcanic rocks in the Santanghu basin. *Petroleum Exploration and Development* (in Chinese), 2002, **29**(1):84~86
- [27] 余淳梅,郑建平,唐勇等. 准噶尔盆地五彩湾凹陷基底火山岩储集性能及影响因素. 地球科学—中国地质大学学报,2004,**29**(3):303~308
Yu C M, Zheng J P, Tang Y, et al. Reservoir properties and effect factors on volcanic rocks of basement beneath Wucaiwan depression, Junggar basin. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)* (in Chinese), 2004, **29**(3):303~308
- [28] 毛治国,邹才能,朱如凯等. 准噶尔盆地石炭纪火山岩岩石地球化学特征及其构造环境意义. 岩石学报,2010,**26**(1):207~212
Mao Z G, Zou C N, Zhu R K, et al. Geochemical characteristics and tectonic settings of Carboniferous volcanic rocks in Junggar basin. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 2010, **26**(1):207~212
- [29] Luo J L, Morad S, Liang Z G, et al. Controls on the quality of Archean metamorphic and Jurassic volcanic reservoir rocks from the Xinglongtai buried hill, western depression of Liaohu basin, China. *AAPG Bull.*, 2005, **89**(10):1319~1346
- [30] 吴富强,鲜学福,李后蜀等. 胜利油区渤南洼陷沙四上亚段深部储层形成机理. 石油学报,2003,**24**(1):44~48
Wu F Q, Xian X F, Li H S, et al. Deep reservoir forming mechanism in the upper part of the fourth member of Shahejie formation in Bonan subsag of Shengli oil field. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 2003, **24**(1):44~48
- [31] 任康绪,潘文庆,高宏亮等. 塔北隆起西部火成岩储层特征及其勘探方向. 天然气勘探与开发,2007,**30**(2):1~4
Ren K X, Pan W Q, Gao H L, et al. Reservoir characteristics and play target of igneous rocks, western Tabei Uplift. *Natural Gas Exploration and Development* (in Chinese), 2007, **30**(2):1~4
- [32] Dutkiewicz A, Volk H, Ridley J, et al. Geochemistry of oil in fluid inclusions in a middle Proterozoic igneous intrusion: implications for the source of hydrocarbons in crystalline rocks. *Organic Geochemistry*, 2004, **35**:937~957
- [33] Benyamin. Facies distribution approach from log and seismic to identification hydrocarbon distribution in volcanic fracture. 9th SPWLA Japan Formation evaluation SYMP., 2007, **9**:25~26
- [34] Kawamoto T. Distribution and alteration of the volcanic reservoir in the Minami—Nagaoka gas field. *J. Japan. Ass. Petroleum Tech.*, 2001, **66**:46~55
- [35] Sruoga P, Rubinstein N. Processes controlling porosity and permeability in volcanic reservoirs from the Austral and Neuquen basins, Argentina. *AAPG Bull.*, 2007, **91**:115~129

- [36] Bergman S C, Talbot J P, Thompson P R. The Kora Miocene submarine andesite stratovolcano hydrocarbon reservoir, northern Taranaki basin, New Zealand. New Zealand Oil Exploration Conference, Proceedings. Ministry of Commerce, Wellington, New Zealand, 1992. 178~206
- [37] Einsele G. Sedimentary basins: evolution facies, and sediment budget. Berlin: Springer, 2000. 749
- [38] 刘嘉麒. 论中国东北大陆裂谷系的形成与演化. 地质科学, 1989, **24**(3): 209~215
Liu J Q. On the origin and evolution of continental rift system in northeast China. *Scientia Geological Sinica* (in Chinese), 1989, **3**: 209~215
- [39] 王璞珺, 高有峰, 任延广等. 松辽盆地青山口组橄榄粗安岩: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄、地球化学及其成盆、成烃和成藏意义. 岩石学报, 2009, **25**(5): 1178~1190
Wang P J, Gao Y F, Ren Y G, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ar age and geochemical features of mugearite from the Qingshankou Formation: Significances for basin formation, hydrocarbon generation and petroleum accumulation of the Songliao basin in Cretaceous. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 2009, **25**(5): 1178~1190
- [40] 周鼎武, 柳益群, 邢秀娟等. 新疆吐一哈、三塘湖盆地二叠纪玄武岩形成古构造环境恢复及区域构造背景示踪. 中国科学(D辑), 2006, **36**(2): 143~153
Zhou D W, Liu Y Q, Xing X J, et al. Recovery of paleotectonic environment and tracer of regional structure background of Permian basalt in Turpan-Hami basin and Santanghu basin, Xinjiang. *Science in China (Series D: Earth Sciences)* (in Chinese), 2006, **36**(2): 143~153
- [41] Wang P J, Hou Q J, Wang K Y, et al. Discovery and significance of high CH_4 primary fluid inclusions in reservoir volcanic rocks of the Songliao basin, NE China. *Acta Geologica Sinica*, 2007, **81**(1): 113~120
- [42] 孟凡超, 刘嘉麒, 李明等. 火成岩油气藏的烃源、成藏机理及勘探潜力. 新疆石油地质, 2010, **31**(1): 102~106
Meng F C, Liu J Q, Li M, et al. The hydrocarbon source, accumulation mechanism and exploratory potential of igneous reservoir. *Xinjiang Petroleum Geology* (in Chinese), 2010, **31**(1): 102~106
- [43] 陈树民, 李来林, 赵海波. 松辽盆地白垩系火山岩储层岩石物理声学特征分析. 岩石学报, 2010, **26**(1): 14~34
Chen S M, Li L L, Zhao H B. Physical analysis of acoustic characteristics of Cretaceous volcanic rocks in the Songliao basin. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 2010, **26**(1): 14~34
- [44] 吴昌志, 顾连兴, 任作伟等. 中国东部中、新生代含油气盆地火成岩油气藏成藏机制. 地质学报, 2005, **79**(4): 522~530
Wu C Z, Gu L X, Ren Z W, et al. Formation mechanism of hydrocarbon reservoirs related to igneous rocks in Mesozoic-Cenozoic basin, eastern China. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 2005, **79**(4): 522~530
- [45] 匡立春, 吕焕通, 王绪龙等. 准噶尔盆地天然气勘探实践与克拉美丽气田的发现. 天然气工业, 2010, **30**(2): 1~6
Kuang L C, Lü H T, Wang X L, et al. Exploration of volcanic gas reservoirs and discovery of the Kelameili gas field in the Junggar basin. *Natural Gas Industry* (in Chinese), 2010, **30**(2): 1~6
- [46] 邹才能, 侯连华, 王京红等. 火山岩风化壳地层型油气藏评价预测方法研究——以新疆北部石炭系为例. 地球物理学报, 2011, **53**(2): 388~400
Zou C N, Hou L H, Wang J H, et al. Evolution and forecast methods of stratigraphic reservoir of volcanic weathering crust—an example from Carboniferous formation in northern Xinjiang. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, **53**(2): 388~400
- [47] 谢春临, 陈树民, 姜传金等. 趋势面分析与相干体技术在火山岩预测中的应用. 地球物理学报, 2011, **53**(2): 368~373
Xie C L, Chen S M, Jiang C J, et al. Application of a method combining trend surface analysis and coherence cube technology to volcanic prediction. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, **53**(2): 368~373
- [48] 张尔华, 关晓巍, 张元高. 支持向量机模型在火山岩储层预测中的应用——以徐家围子断陷徐东斜坡带为例. 地球物理学报, 2011, **53**(2): 428~432
Zhang E H, Guan X W, Zhang Y G. Support vector machine in volcanic reservoir forecast: East slope in Xujiaweizi depression. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, **53**(2): 428~432
- [49] 陈树民, 王建民, 王桂水等. PP-PS 协同反演技术预测大庆深层火山岩含气储层. 地球物理学报, 2011, **53**(2): 280~285
Chen S M, Wang J M, Wang G S, et al. Joint PP-PS inversion techniques and their application for predicting gas reservoir of deep volcanic in Daqing. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, **53**(2): 280~285
- [50] 杨辉, 文百红, 戴晓峰等. 火山岩油气藏重磁电震综合预测方法及应用. 地球物理学报, 2010, **53**(2): 286~293
Yang H, Wen B H, Dai X F, et al. Comprehensive prediction of hydrocarbon deposits in volcanic rock by gravity, magnetic, electrical and seismic data and its application. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, **53**(2): 286~293
- [51] 徐岩, 舒萍, 纪学雁. 松辽盆地徐深气田火山岩气藏地质约束-测井地震建模方法探讨. 地球物理学报, 2010, **53**(2): 336~342
Xu Y, Xu P, Ji X Y. A research on object-control geology modeling of volcano reservoir with seismic and logging data in Xushen gas field. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, **53**(2): 336~342
- [52] 陈树民, 张元高, 姜传金. 徐家围子断陷火山机构叠置关系解析及其数字化模型参数建立. 地球物理学报, 2010, **53**(2): 499~507
Chen S M, Zhang Y G, Jiang C J. The analysis of volcanic edifice superimposition and its digital model parameters establishment. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, **53**(2): 499~507
- [53] 冯子辉, 朱映康, 张元高等. 松辽盆地营城组火山机构-岩相

- 带的地震响应. 地球物理学报, 2010, **53**(2): 556~562
Feng Z H, Zhu Y K, Zhang Y G, et al. The seismic response of the volcanic edifice-facies zone of Yingcheng formation in the Songliao basin. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, **53**(2): 556~562
- [54] 邵 锐, 孙彦彬, 于海生等. 基于地震属性各向异性的火山机构识别技术. 地球物理学报, 2010, **53**(2): 343~348
Shao R, Sun Y B, Yu H S, et al. Identification technology of volcanic edifice based on seismic attribute anisotropy. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, **53**(2): 343~348
- [55] 单玄龙, 罗洪浩, 张洋洋等. 松南长岭断陷火山岩亚相约束下的气层测井识别评价. 地球物理学报, 2010, **53**(2): 508~514
Shan X L, Luo H H, Zhang Y Y, et al. Log identification of volcanic gas zone under volcanic facies in Changling sag, south Songliao basin. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, **53**(2): 508~514
- [56] 吴晓智, 李建忠, 杨迪生等. 准噶尔盆地陆东—五彩湾地区石炭系火山岩电性与地震响应特征. 地球物理学报, 2010, **53**(2): 481~490
Wu X Z, Li J Z, Yang D S, et al. The electric characteristics and seismic response of Carboniferous volcanic rock in Ludong-Wucaiwai area of Junngar basin. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, **53**(2): 481~490
- [57] 刘 财, 杨宝俊, 王兆国等. 松辽盆地西边界带深部构造: 地电学证据. 地球物理学报, 2010, **53**(2): 401~406
Liu C, Yang B J, Wang Z G, et al. The deep structure of the western boundary belt of the Songliao basin: the geoelectric evidence. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, **53**(2): 401~406
- [58] 孙晓猛, 刘 财, 朱德丰等. 大兴安岭西坡德尔布干断裂地球物理特征与构造属性. 地球物理学报, 2010, **53**(2): 433~440
Sun X M, Liu C, Zhu D F, et al. Geophysical features and tectonic attribute of the Derbugan fault in the western slope of Da Hinggan Ling mountains. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, **53**(2): 433~440
- [59] 王璞珺, 张功成, 蒙启安等. 地震火山地层学及其在我国火山岩盆地中的应用. 地球物理学报, 2011, **54**(3): 597~610
Wang P J, Zhang G C, Meng Q A, et al. Applications of seismic volcanostratigraphy to the volcanic rifted basins of China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, **53**(2): 597~610
- [60] 陈树民. 油储地球物理“产学研”十年研究在大庆油气勘探见到实效. 地球物理学进展, 2008, **23**(6): 1819~1832
Chen S M. Reservoir geophysical project has obtained great achievements in Daqing oil field with the decade effort of “Industry-University-Institute” cooperation. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2008, **23**(6): 1819~1832