

长岭断陷东部下白垩统火山岩储层特征及 油气勘探潜力

姜慧超^{1,2}, 雷敏², 刘汝强²

(1. 同济大学海洋与地球科学学院, 上海 200092; 2. 中石化胜利油田有限公司, 山东 东营 257015)

摘要: 火山岩是长岭断陷东部深层的主要勘探目标, 但火山岩岩相、岩性变化快, 储层非均质性强, 有利储集相带预测难度大。根据该区最近火山岩研究成果, 探讨了火山岩储层特征、分布规律及油气成藏主控因素, 并分析其油气勘探潜力。长岭断陷深层火山岩主要沿深大断裂呈带状分布, 在垂向上则表现为多期次喷发序列的叠置。火山岩主要发育爆发相、溢流相、火山沉积相和次火山岩相4种火山岩岩相及9种亚相, 其中以爆发相的热碎屑流亚相、溢流相上部亚相为主。爆发相凝灰岩和溢流相流纹岩储层气孔、溶孔和裂缝发育, 储集物性最好。长岭断陷深层勘探程度低, 油气资源丰富, 火山岩分布面积大, 且油气成藏条件好, 具有很大的油气勘探潜力。

关键词: 火山岩; 储集层; 波阻抗反演; 勘探潜力; 长岭断陷

中图分类号: TE122.2⁺22; P588.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2009)01-0069-09

Volcanic reservoir characteristics and hydrocarbon exploration potential of Changling depression

JIANG Hui-chao^{1,2}, LEI Min² and LIU Ru-qiang²

(1. School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Shengli Oilfield Co. Ltd., SINOPEC, Dongying 257015, China)

Abstract: Volcanic rocks constitute the main deep exploration target in eastern Changling depression. Drastic changes in volcanic lithofacies and lithology as well as strong reservoir heterogeneity make it difficult to predict favorable reservoir belts. Based on volcanic exploration results in the depression, the authors studied the volcanic features, distribution, main controlling factors for the formation of reservoirs and the exploration potential. The volcanic rocks in the depression are mainly distributed along big deep faults and superimposed by many times of volcanic eruption in the vertical direction. There exist four kinds of volcanic lithofacies and nine sorts of subfacies. Explosive tuff and overflow rhyolite reservoirs have many gas pores, solution pores and fractures, and possess the best physical properties. The deep formation in the depression has experienced a low exploration degree but possesses abundant hydrocarbon resources, and volcanic rocks are distributed extensively there and have good reservoir-forming conditions, suggesting a very promising hydrocarbon exploration potential.

Key words: volcanic rocks; reservoir; seismic impedance inversion; exploration potential; Changling depression

2002年以来,火山岩油气勘探在松辽盆地徐家围子断陷和长岭断陷等地区不断取得新的突破,其中徐家围子断陷的升深2井、卫深5井、徐深1井和

长岭断陷的长深1井分别在营三段火山岩、登一段砂砾岩、营一段火山岩及营城组火山岩获得无阻流量超百万立方米的高产气流(郭占谦,1998;唐建仁

等,2001;宋维海等,2003;贾承造,2004;杨辉等,2006),显示了深层火山岩油气勘探的巨大潜力,火山岩油气藏已成为新的油气储量增长点,引起了石油地质学界广泛的关注。长岭断陷是松辽盆地南部最大的断陷之一,它是一个断-拗叠置的中生代沉积盆地,盆地面积约 $7\,240\text{ km}^2$ (蒙启安等,2002;朱又红等,2003) (图1)。该断陷深层(下白垩统)具有良好的生烃能力,预测石油资源量 $4.95 \times 10^8\text{ t}$ 油当量,因此具有很大的油气勘探潜力(邓玉胜等,2003)。而中生代火山岩广泛发育,是本区良好的储集层,但岩相、岩性变化快,且非均质性强,储集空间类型及成因复杂,因此有利储集相带预测难度大。本文根据区域地质资料、地球物理技术及长岭断陷火山岩勘探和研究成果,探讨火山岩储层特征、分布规律及油气成藏主控因素,综合分析火山岩油气勘

探潜力。

1 火山岩特征

1.1 火山岩岩性岩相特征

长岭断陷东部钻井资料揭示,该区深层火石岭组 and 营城组均有火山岩分布,尤以营城组最为发育。邱家骧(1991)将火山岩相定义为“在一定环境下火山活动产物特征的总称”,“环境”一词在火山岩石学中是指火山喷发环境和火山产物堆积的环境(陆上、水下、地表、近地表)。该区主要发育4种火山岩岩相及9种亚相,岩相类型有爆发相、溢流相、火山沉积相和次火山岩相,尤以爆发相凝灰岩和溢流相流纹岩最为发育,且储集性能好。

爆发相:系指火山喷发形成不同高度的喷发柱,

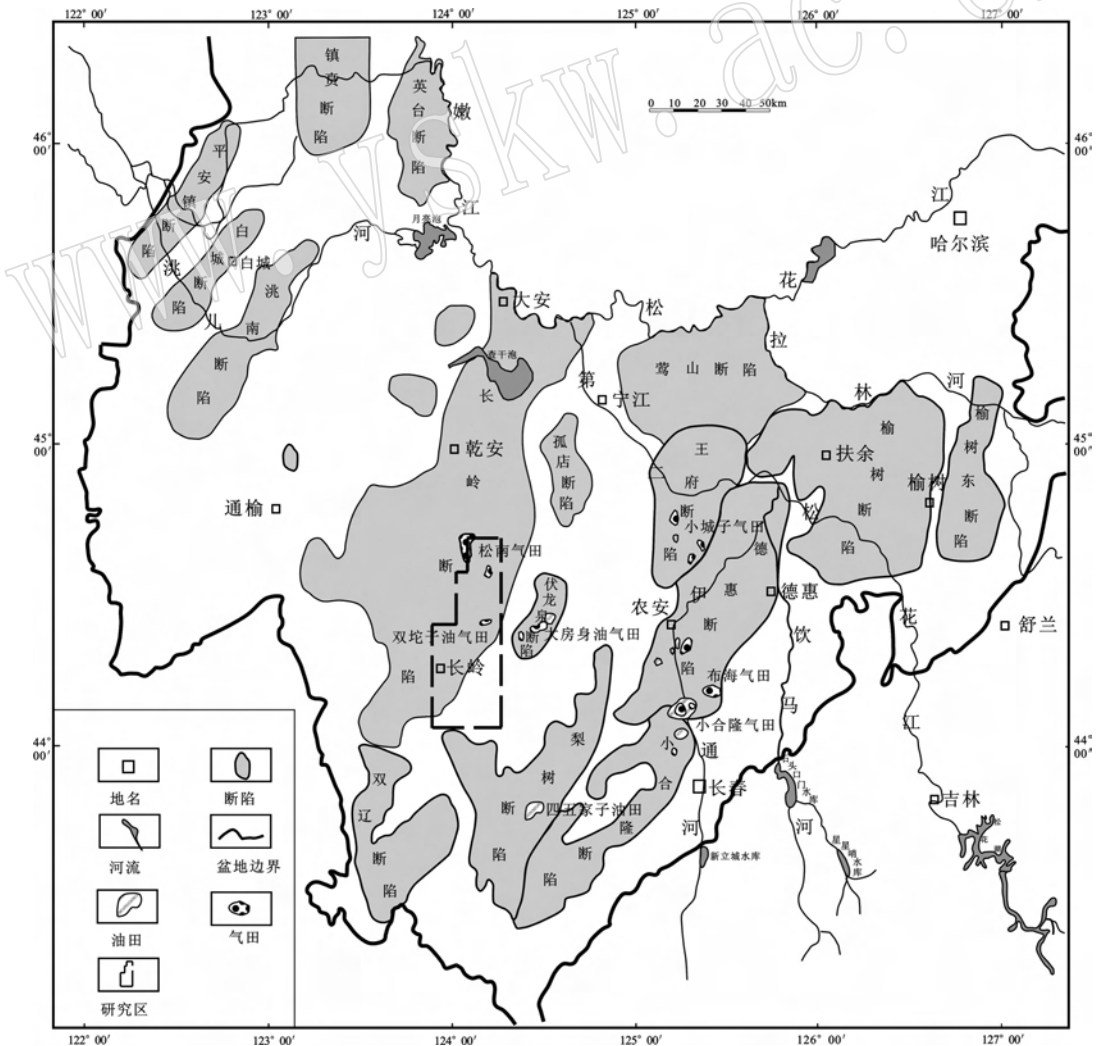


图1 长岭断陷地理位置图

Fig. 1 Geological map and location of Changling depression

最初受到喷发气流,而后受到大气气流以及风力支撑,在空气介质中搬运的火山碎屑,当初始动能和风速改变,由于重力作用而下落到地表的堆积物(邓玉胜等,2003)。爆发相又进一步划分为热碎屑流亚相、热基浪亚相和空落亚相。研究区爆发相见于 YS1、YS101、YS102、YS2、YN1、DB10、DB11、DB12、DB14、SN109 等井,其岩石类型通常有凝灰岩、火山角砾岩和角砾岩。YS1 井见爆发相热碎屑流亚相的熔结凝灰岩、角砾凝灰岩,也钻遇空落亚相的薄层熔结凝灰岩,共有 3 层 48 m 凝灰岩含气(图 2)。YS101 井上部见爆发相热碎屑流亚相的熔结凝灰岩

和角砾凝灰岩,共有 4 层 109.2 m 凝灰岩含气。

溢流相:是粘度低的液态玄武质岩浆或挥发后饱和的岩浆平静地从火山口溢出,在地表有较强移动能力的熔岩。熔岩具有各种形态和内部构造。溢流相又分为上部亚相、中部亚相和下部亚相。营城组溢流相很发育,见于 YS1、YS101、YS102、YN1、DB10、DB11、DB12、DB14、SN101、SN108、SN109 等井,岩性主要有流纹岩、英安岩、安山岩和玄武岩。如 YS1 井钻遇多旋回溢流相流纹岩,共有 3 层 160 m 流纹岩含气(图 2);YS101 井钻遇溢流相上部亚相流纹岩和中部亚相凝灰熔岩,共有 9 层 128.6 m 流纹岩

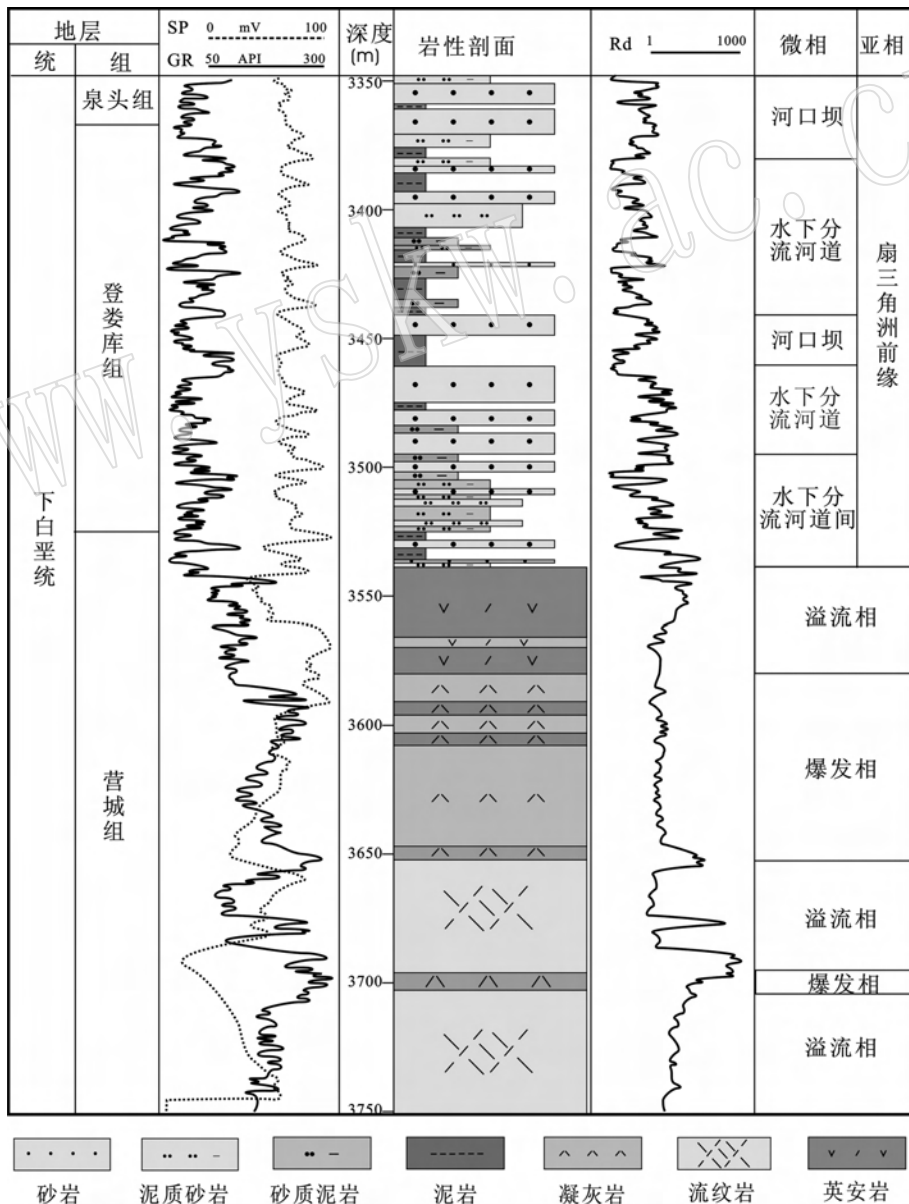


图 2 长岭断陷东部腰深 1 井单井相图

Fig. 2 Single well facies of Yaoshen 1 well in Changling depression

含气;DB II井钻遇1层91.5 m流纹岩、3层82.5 m英安岩、9层91.9 m安山岩和2层124.5 m玄武岩;DB10井也在安山岩和玄武岩中见气。

火山沉积相:是经常与火山岩共生的一种岩相,可出现在火山活动的各个时期,碎屑成分中含有大量火山岩岩屑,主要为火山岩穹隆之间的碎屑沉积体。火山沉积相可分为含外碎屑亚相和再搬运亚相,在本区只见到再搬运火山碎屑沉积亚相。再搬运火山碎屑沉积亚相主要为火山角砾岩、凝灰岩沉积。可见层理构造,岩石序列中有明显的反映再搬运的沉积构造特征,如具有粒序层理和平行层理的浊积岩透镜体、波状层理凝灰岩层等。它们是各种粒级的火山碎屑(>90%),经过再搬运后在一定的沉积环境中沉积的。搬运过程中很少有外碎屑加入,搬运距离一般较近,但也有搬运很远的火山灰沉积在静水环境中保持很纯的成分。砂砾级颗粒有磨圆、具层理、不含外碎屑是其主要鉴定标志。

次火山岩相:是与火山岩同源但为侵入产状的岩体。它与喷出岩同时间但一般较晚,同空间但分布范围较大,同外貌但结晶程度较好,同成分但变化范围及碱度较大。次火山岩以熔岩状岩石为主,也有角砾状岩石,除岩浆机械贯入捕虏形成者外,多为隐爆的结果(邱家骧等,1996)。该区有2口井钻遇

此种岩相。DB11井钻遇次火山岩相辉绿岩2层62 m,斜长花岗岩2层12 m;腰深2井在营城组下部钻遇大段花岗斑岩,在营城组上部火山岩(3 830 ~ 3 846 m)中经压裂后日产74 444.7 ~ 108 330.8 m³的工业气流,无阻流量达20.96 × 10⁴ m³/d,上报天然气预测量284.58 × 10⁸ m³。

1.2 火山岩地球物理特征

相对沉积岩而言,火山岩具有地震波速度高、密度高、磁化率高、电阻率大、地震波吸收能量大的特点,不同火山岩的地球物理特征存在差异。本次研究通过井震联合解释,在地质剖面上追踪和识别火山岩体,具有以下地球物理特征(图3):

(1)爆发相在地震剖面上常表现为丘状外型,内部多为杂乱状反射,顶部为强反射,内部反射弱。电阻率曲线表现为薄层、尖齿化,内部响应特征不稳定。

(2)溢流相在地震剖面上表现为中-强反射,呈间断性连续。电阻率曲线外形表现为厚层、微齿化,中高电阻率,内部响应特征稳定。

(3)次火山岩相在地震剖面上呈丘状外形,中高频,连续性中等。电性标志显示高伽玛、中阻,曲线形态为高振幅齿形或峰状。

(4)火山沉积相在地震剖面上为强反射、连续、稳定。测井曲线外型常表现出韵律特征,薄厚不等,曲线内部响应特征不稳定。

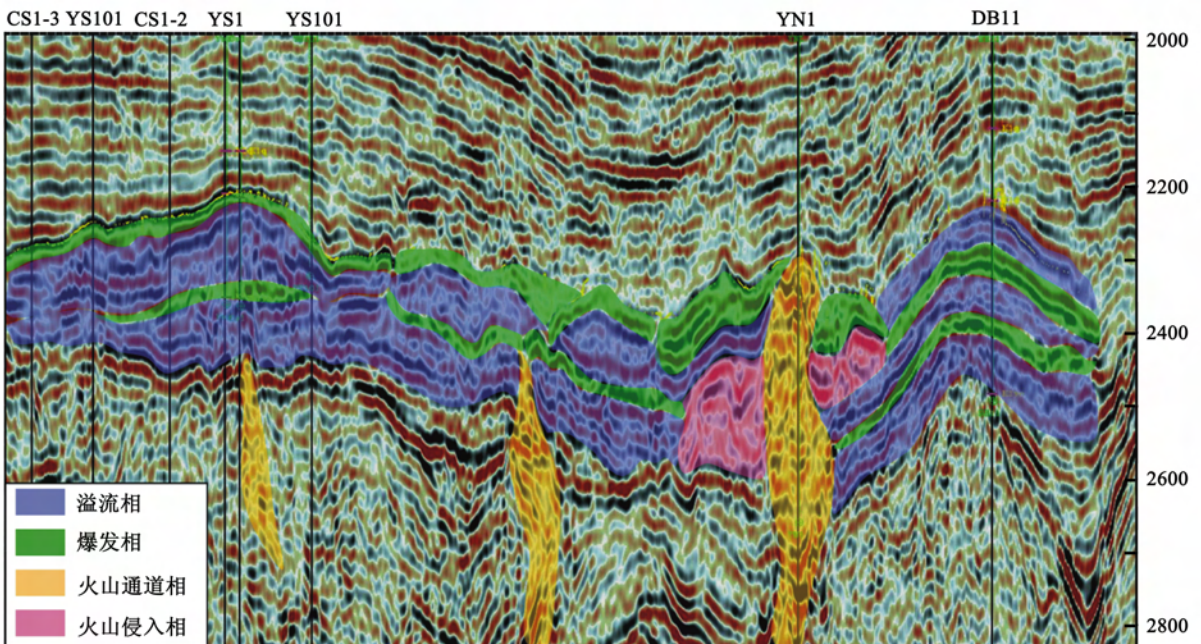


图3 腰深1井区地震-测井解释火山岩岩相图

Fig. 3 Seismic-logging interpretation volcanic lithofacies map of the Yaoshen 1 well area

1.3 火山岩分布规律

长岭断陷东部火山岩主要沿深大断裂成带状分布,分布面积大;在垂向上则表现为多期次喷发火山岩的叠置,深层火石岭-营城组存在3个旋回4个喷发期次(陆建林等,2006)。通过地震相、测井相和单井相综合解释,建立了长岭断陷火山岩岩相模式(图4)。横向上相序为火山通道-侵出相、溢流相、爆发相、火山沉积相。垂向上相序下部为溢流相,中部为爆发相,上部为溢流相-爆发相。溢流相横向宽约3~3.5 km,纵向厚约200~400 m。爆发相横向宽约2~3 km,纵向厚约100~200 m。火山通道相和侵出

相仅分布在火山口附近,横向宽约1 km,纵向厚约50~200 m。火山沉积相分布在低洼地区,横向宽约2~3 km,纵向厚约50~150 m。

利用地震剖面、水平切片、三瞬剖面可以识别火山口的分布。长岭断陷东部火山口主要沿达尔罕断裂及次级断裂分布,有多个反映火山口的局部“高点”,火山口在平面上呈“圆形或椭圆形”特征。在地震剖面上,火山口总体外形呈锥形,内部反射结构零乱。火山口分复合式和独立式两种,独立式火山口由单个火山口形成,分布范围小;复合式火山口由主火山口和其周围寄生火山口共同形成,分布范围大。

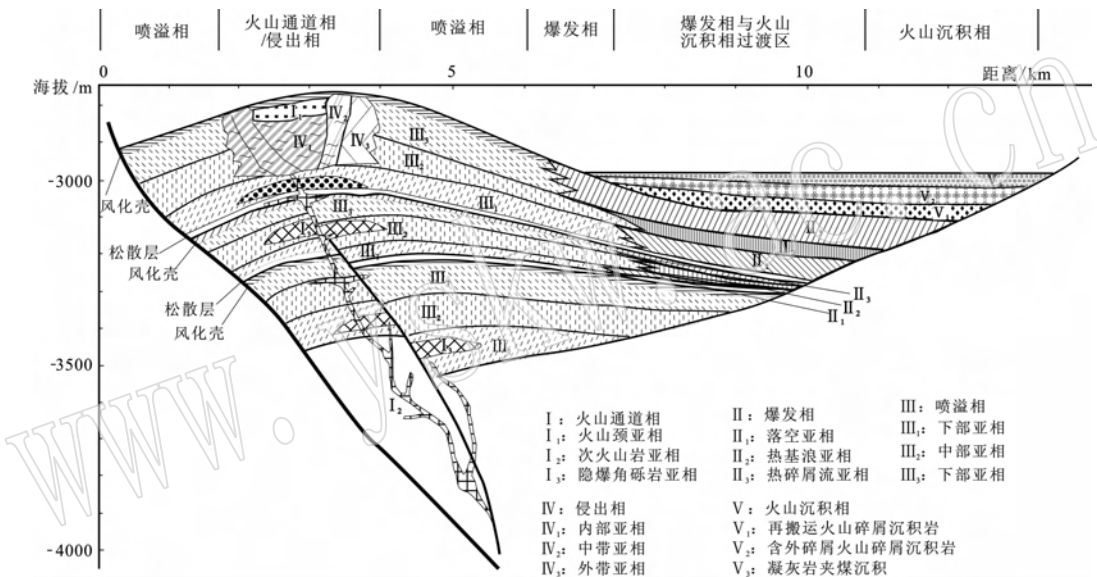


图4 火山岩岩相分布模式

Fig. 4 Distribution model of volcanic lithofacies

2 火山岩储层及预测

2.1 储层岩石学特征

岩心、薄片、岩心核磁 T_2 谱、X光 CT 扫描等资料分析表明,腰深1井区营城组爆发相火山岩储层主要为熔结凝灰岩、熔结角砾凝灰岩,火山岩碎屑物含量30%~55%,填隙物45%~70%。主要矿物为石英或钾长石晶屑,偶见黑云母晶屑,碎屑物大小1.0~2.5 mm,分选好至中等,外形不规则,常呈棱角状,石英边缘伴溶蚀。具凝灰、梳状边、球粒、镶嵌等脱玻结构,块状构造,假流纹构造等,常被碳酸盐交代。填隙物偏酸性,多为隐晶长英质(图5a)。

溢流相火山岩储层为流纹岩,薄片分析资料显示,矿物成分石英约30%~50%,碱性长石50%~70%。可见个别透长石斑晶。基质已强烈脱玻化,呈显微等粒细粒结构,形成不规则粒状长英质集合体,常呈扇状、放射状、球粒状等。斑状结构,球粒结构发育,霏细结构,气孔构造次之,常见次生细晶石英(图5b)。

2.2 储层孔隙结构及储层物性

营城组火山岩储集空间分为原生储集空间和次生储集空间,主要为气孔、溶孔和裂缝。火山岩普遍含有气孔构造,具有一定的原生气孔。构造运动使岩体产生了裂缝,这些裂缝不但将独立存在的原生气孔互相连通,还增大了火山岩的储集空间,改善了

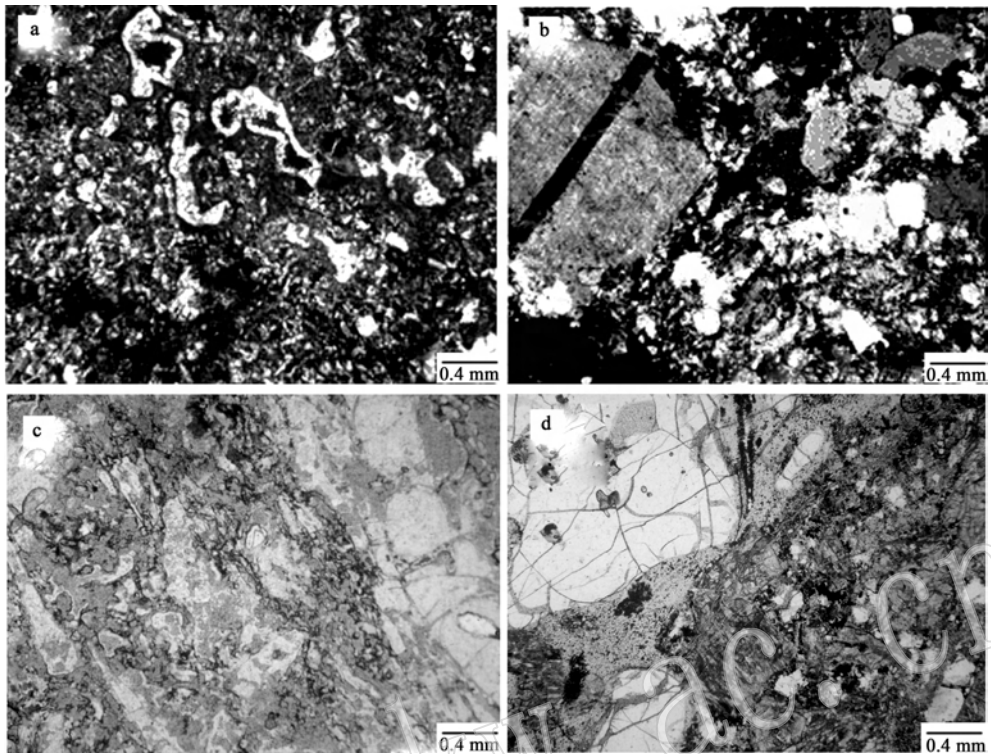


图5 长岭断陷 YS1-YS101-YS102 井火山岩储层岩石学特征

Fig. 5 Petrological characteristics of volcanic reservoir for YS1-YS101-YS102 wells

a—腰深 1 井,部分气孔里充填了微晶石英;b—腰深 102 井,营城组流纹岩类;c—腰深 101 井,3 647.62 m,粒内溶孔,面孔率 25%;d—腰深 101 井,3 647.62 m,裂缝,面孔率 6%

a—microcrystalline quartz of well Yaoshen 1 well; b—overflow rhyolite of Yaoshen 102 well; c—dissolved pores in grains of Yaoshen 101 well; d—fissure of Yaoshen 101 well

火山岩储层的储集物性。据薄片和 FMI 成像测井分析,营城组火山岩发育有构造缝、高导缝、高阻缝等裂缝,主要起到连通气孔、溶孔和溶洞的作用(图 5d)。另外,成岩作用深埋阶段各种酸性流体的溶蚀作用,使火山岩中的部分物质发生溶解,形成一些溶蚀孔、洞、缝(图 5c),从而提高了火山岩储层的储集性能。

腰深 1 井区营城组火山岩中孔洞十分发育,孔隙主要可归并为气孔(包括杏仁孔)、次生溶孔(粒间溶孔、基质溶孔和斑晶溶孔)及晶间微孔三类。凝灰岩中常见次生溶孔、晶间微孔,面孔率一般为 2% ~ 12%,最大为 25%;流纹岩中多为原生气孔,次生溶孔次之,面孔率一般为 20% ~ 30%,最大为 40%。爆发相渗透率主要分布在 $0.01 \times 10^{-3} \sim 0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,平均为 $0.14 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,溢流相渗透率主要分布在 $10 \times 10^{-3} \sim 20 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,平均为 $19.21 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。据 FMI 裂缝定量分析,火山岩中构造缝和微裂缝的裂缝密度一般在 2 ~ 7 条/m,最高达 10 条/m。综合分析认为腰深 1 井区营城组火山

岩储集类型主要为孔隙型。

腰深 2 井在 3 759.03 ~ 3 765.51m 花岗斑岩取心井段做物性分析样品 25 块,岩心实测孔隙度平均值为 4.1%,测井解释孔隙度为 4.3%;渗透率约为 $0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。在 FMI 成像测井图上,裂缝较发育,因此腰深 2 井营城组花岗斑岩储层为裂缝-孔隙型,总体上属低孔低渗储层。

总之,长岭断陷深层有利火山岩储层主要为流纹岩和凝灰岩,火山岩储层分布广、厚度大且储层物性较好,是深层天然气勘探的重点储层。

2.3 火山岩储层预测

长岭断陷火山岩储层埋藏较深,火山岩岩相岩性变化快,储层非均质性强,储集空间类型及成因复杂,因此有利储集相带难以预测,这给勘探造成了一定的困难,传统的研究方法或单一地球物理勘探方法无法满足现今火山岩勘探的需求。本文采用均方根振幅、瞬时频率、小波变换变频分析、聚类优化、波形分类和波阻抗反演等多种地球物理技术方法综合

识别和预测有利火山岩储层。

波阻抗反演技术是地球物理技术中进行储层预测最为常用和有效的方法之一。下面重点介绍波阻抗反演技术在火山岩储层预测中的应用情况。在进行波阻抗反演之前,首先要对储层进行准确层位标定,这是反演结果正确与否的关键;然后得到波阻抗反演剖面。根据火山岩地球物理特征分析,致密火山岩为高阻抗($>13\ 000\ \text{kg/m}^2\cdot\text{s}$),有利储层为低阻抗($<12\ 000\ \text{kg/m}^2\cdot\text{s}$);营城组上部火山岩地层内的

低阻抗分布(浅蓝-绿色-红色)指示出有利储层发育区(图6)。

通过波阻抗反演可得到营城组火山岩密度与声阻抗交汇图,根据钻井统计营城组火山岩储层密度一般在 $2.31\sim 2.53\ \text{g/cm}^3$,声阻抗值一般在 $9\ 900\sim 14\ 500\ \text{m}\cdot\text{g/s}\cdot\text{cm}^3$,高于该值为致密层,低于该值为沉积岩。另外,以波阻抗为约束,对井孔隙与阻抗的关系进行统计分析,进而外推产生孔隙度体,从而预测有利储层分布区。

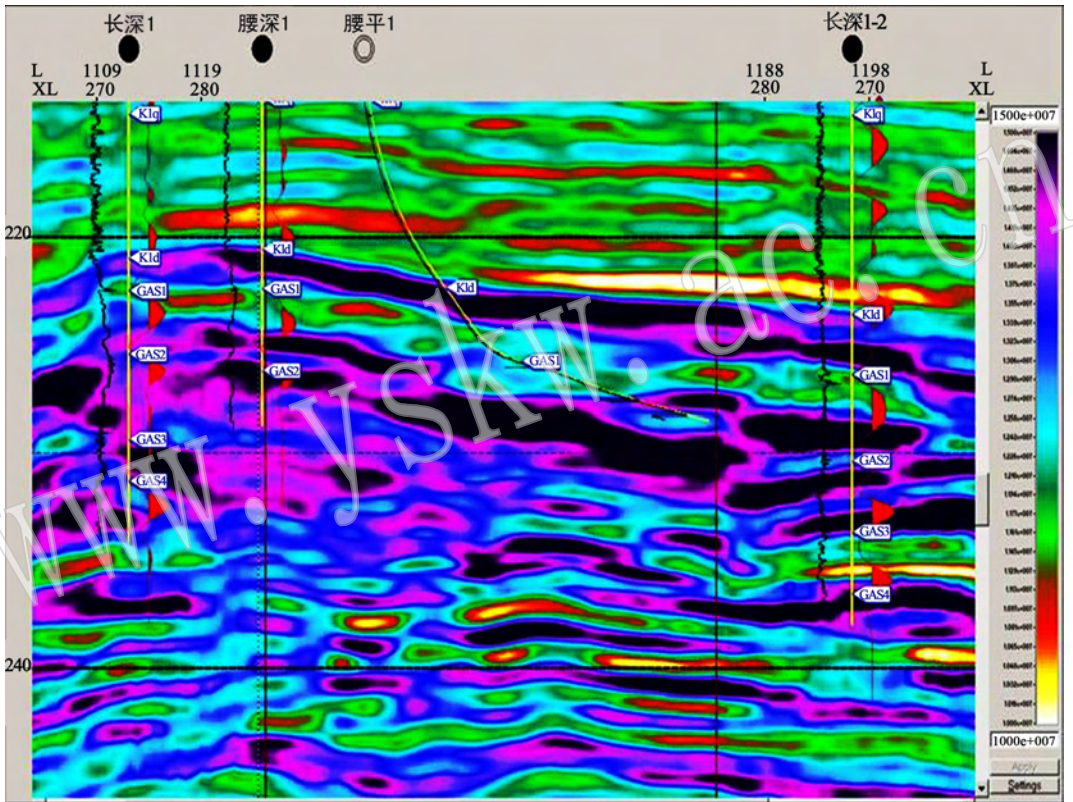


图6 通过长深1井—长深1-2井连井波阻抗反演剖面

Fig. 6 Wave impedance inversion profile passing from Changshen 1 to Changshen 1-2 well

3 油气勘探潜力

长岭断陷火山岩油气成藏条件好,临近生烃凹陷,具有良好的油气源条件,坨深6井钻遇营城组暗色泥岩171 m,暗地比70%;沙河子组暗色泥岩239 m,暗地比46%。双深1井钻遇营城组下部-沙河子组砂泥互层段260 m,其中黑色泥岩厚121 m。

在长岭断陷中,大断裂控制次级凹陷的形成和火山岩的分布,主体断陷周边的古斜坡及内部古隆起是油气运移的长期指向区;断裂和不整合提供了

有利的输导体系;登娄库组及泉头组暗色泥岩可做良好的区域性盖层。

长岭断陷火山岩分布面积大,提供了良好的储集空间。目前已在达尔罕深断裂两侧识别出营城组3个大型火山岩体,总面积约 $351\ \text{km}^2$ (图7),共发现15个火山口,存在多个构造高点。圈闭类型主要为火山岩构造-岩性圈闭和岩性圈闭。因此火山岩是该区的主要勘探目标,爆发相凝灰岩和溢流相流纹岩储集物性最好,是有利的勘探目标。

长岭断陷深层勘探程度较低,油气资源丰富,石油资源量 $4.95\times 10^8\ \text{t}$ 油当量。目前,腰深1、腰深

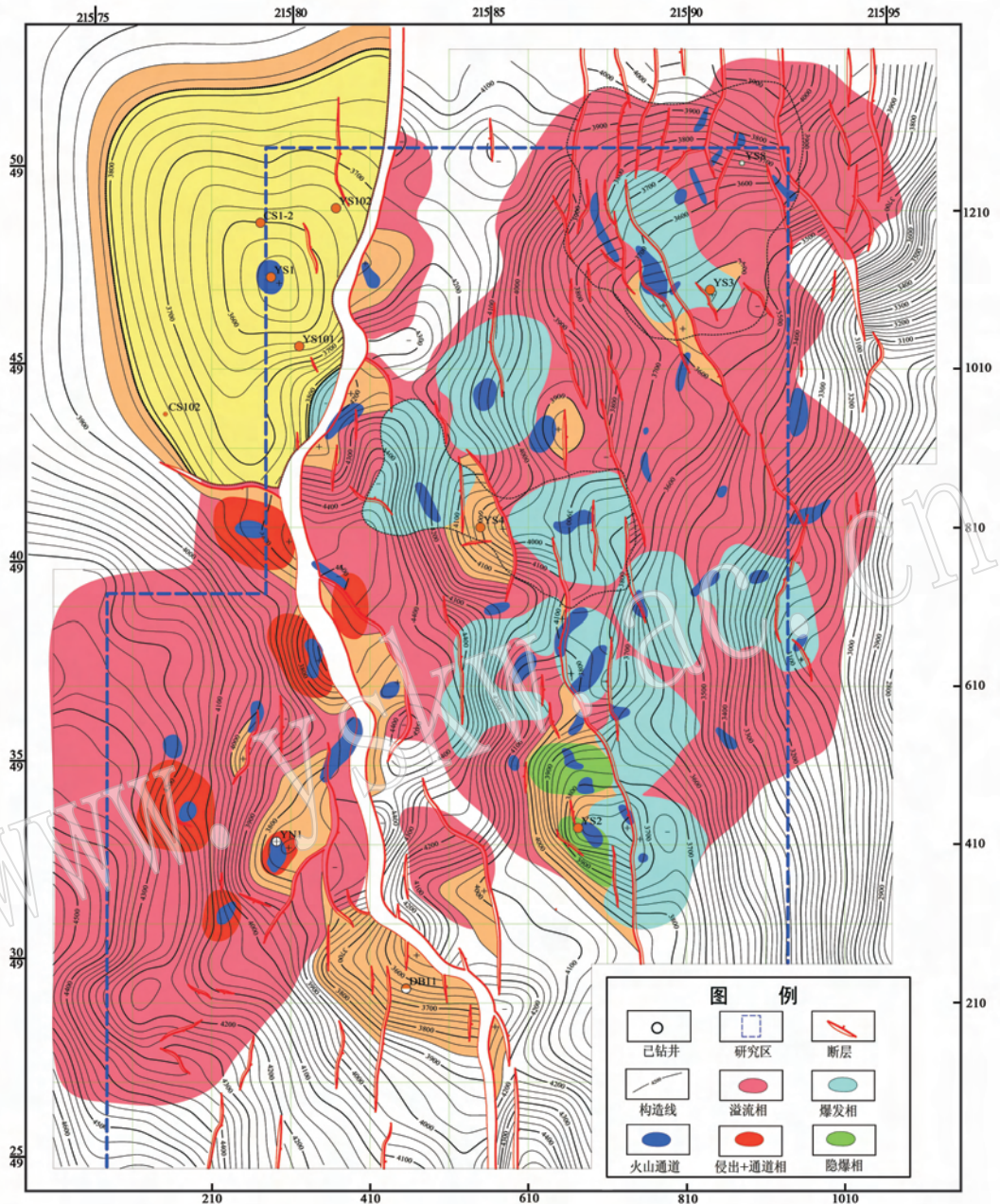


图7 长岭断陷东部腰英台工区营城组顶面构造与火山岩叠合图

Fig.7 Congruent map of volcanic rocks and top structure of Yingcheng Formation in Yaoyingtai area

101 和腰深 102 等井已获高产天然气流;腰英台构造营城组火山岩已探明天然气地质储量 $433.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ (中石化探区);腰深 2 井区已上报预测天然气储量 $284.58 \times 10^8 \text{ m}^3$,说明该区具有很大的油气勘探潜力。

4 结论与建议

(1) 长岭断陷深层火山岩主要沿深大断裂成带状分布,在垂向上则表现为多期次喷发序列的叠置。

(2) 长岭断陷主要发育 4 种火山岩岩相及 9 种亚相,以爆发相的热碎屑流亚相、溢流相上部亚相为主。

(3) 爆发相凝灰岩和溢流相流纹岩储层气孔、溶孔和裂缝发育,储集物性最好。腰深 1 井区营城组火山岩储集类型主要为孔隙型;腰深 2 井营城组花岗斑岩储层为裂缝-孔隙型。

(4) 长岭断陷深层具有很大的油气勘探潜力,火山岩仍是主要勘探目标,精细解剖火山岩体并预

测有利储集相带是勘探的重点和难点。只有充分利用地质、重磁地震及井资料,综合运用多种技术和方法,才能有效地预测火山岩储层分布,确定有利勘探靶区。

References

- Deng Yusheng, Wang Yun, Zhu Guisheng, *et al.* 2003. The feature of igneous rock and its controlling on reservoir in the Changling fault-depression of the south of songliao basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 8(3): 31 ~ 37 (in Chinese with English abstract).
- Guo Zhanqian. 1998. Volcanic activity, formation and evolution of sedimentary basin [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 23(1): 59 ~ 64 (in Chinese with English abstract).
- Jia Chengzao. 2004. *Collected Works of Seminar on Deep-Seated Gas Exploration in Songliao Basin* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese with English abstract).
- Lu Jianlin, Wang Guoshou, Zhu Jianhui, *et al.* 2006. Major control factors of deep reservoirs in Changling depression and its direction of exploration [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 28(3): 26 ~ 28 (in Chinese with English abstract).
- Meng Qi'an, Men Guangtian, Zhao Hongwen, *et al.* 2002. Characteristics of Mesozoic volcanic rocks and its controlling effect on gas reservoir in Songliao basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 23(3): 285 ~ 292 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Jiaxiang. 1991. Brief introduction to classification of volcanic rocks [J]. *Geoscience*, 5(4): 457 ~ 468 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Jiaxiang, Tao Kuiyuan, Zhao Junlei, *et al.* 1996. *Volcanic Rocks* [M]. Beijing: Geology Press, 10 ~ 55 (in Chinese with English abstract).
- Song Weihai, Wang Pujun, Zhang Xingzhou, *et al.* 2003. Characteristics of Mesozoic volcanic reservoirs in Songliao basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 24(1): 12 ~ 17 (in Chinese with English abstract).
- Tang Jianren, Liu Jinping, Xie Chunlai, *et al.* 2001. Volcanic character and reservoir - formed rule for Xujiaweizi fault depression [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 36(3): 345 ~ 351 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hui, Zhang Yan, Zou Caineng, *et al.* 2006. Exploration scheme of gas in deep-seated volcanic rocks in Songliao Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 33(3): 274 ~ 281 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Youhong and Wang Jun. 2003. Resource potential in the deep of the Shiwu fault depression and the Changling depression, Songliao basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 25(2): 149 ~ 152 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 邓玉胜, 王 蕴, 朱桂生, 等. 2003. 松辽盆地南部长岭断陷火山岩特征及其对油气藏的控制 [J]. *中国石油勘探*, 8(3): 31 ~ 37.
- 郭占谦. 1998. 火山活动与沉积盆地的形成和演化 [J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 23(1): 59 ~ 64.
- 贾承造. 2004. 松辽盆地深层天然气勘探研讨会报告集 [M]. 北京: 石油工业出版社.
- 陆建林, 王果寿, 朱建辉, 等. 2006. 长岭断陷深层成藏主控因素及勘探方向分析 [J]. *石油天然气学报*, 28(3): 26 ~ 28.
- 蒙启安, 门广田, 赵洪文, 等. 2002. 松辽盆地中生界火山岩储层特征及对气藏的控制作用 [J]. *石油与天然气地质*, 23(3): 285 ~ 292.
- 邱家骧. 1991. 国际地科联火山岩分类学分会推荐的火山岩分类简介 [J]. *现代地质*, 5(4): 457 ~ 468.
- 邱家骧, 陶奎元, 赵俊磊, 等. 1996. *火山岩* [M]. 北京: 地质出版社, 10 ~ 55.
- 宋维海, 王璞琨, 张兴洲, 等. 2003. 松辽盆地中生代火山岩油气藏特征 [J]. *石油与天然气地质*, 24(1): 12 ~ 17.
- 唐建仁, 刘金平, 谢春来, 等. 2001. 松辽盆地北部徐家围子断陷的火山岩分布及成藏规律 [J]. *石油地球物理勘探*, 36(3): 345 ~ 351.
- 杨 辉, 张 研, 邹才能, 等. 2006. 松辽盆地深层火山岩天然气勘探方向 [J]. *石油勘探与开发*, 33(3): 274 ~ 281.
- 朱又红, 王 骏. 2003. 松辽盆地十屋断陷、长岭凹陷深层资源潜力分析 [J]. *石油实验地质*, 25(2): 149 ~ 152.