

松辽盆地南部张强凹陷义县组火山岩储层特征及成藏规律

张斌

(中国石油辽河油田分公司勘探开发研究院,辽宁盘锦124010)

摘要:松辽盆地南部辽河外围探区的义县组广泛发育中-基性火山岩,并在张强凹陷获得了工业油流。依据岩心观察和薄片分析,可将义县组火山岩归纳为14种岩石类型,安山岩类揭示厚度最大、分布范围最广。火山岩主要发育3类岩相7种亚相,喷溢相约占84%。研究区共发育6类主要的原生、次生储集空间类型,4种主要的孔隙组合方式。岩性、岩相和断裂共同控制了储层的平面分带和纵向展布,成岩作用和构造作用决定了储层的储集空间类型、储集性、渗透性和连通性。物性和油藏资料分析表明,火山碎屑熔岩、气孔杏仁状熔岩和火山通道相(火山颈亚相、隐爆角砾岩亚相)、喷溢相上部亚相是最有利的储集岩性、岩相带。在靠近或紧邻生烃洼陷和靠近大断裂的构造高部位,寻找火山口-近火山口相带、以及火山岩喷发旋回的上部和顶部,火山岩油气成藏几率最大。

关键词:成藏规律;储层特征;岩性-岩相;火山岩;义县组;辽河外围

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Characteristics and hydrocarbon accumulation patterns of volcanic rocks in the Yixin Formation Zhangqiang depression, southern Songliao Basin

Zhang Bin

(Exploration and Development Research Institute, Liaohe Oilfield Company, PetroChina, Panjin, Liaoning 124010, China)

Abstract: Mafic-intermediate volcanic rocks are widely developed in the Cretaceous Yixian Formation (K_{1y}) in the periphery of Liaohe oilfield in southern Songliao Basin, and commercial oil flow has been tested in these volcanic rocks in Zhangqiang depression. Based on core observation and slice analysis, 14 different rock types have been recognized in the Yixian Fm volcanic rocks. Among them, andesitic lava and andesitic volcanoclastic rocks have the greatest thickness and most extensive distribution. The volcanic lithofacies can be divided into 3 lithofacies and 7 subfacies, of which effusive lithofacies accounts for about 84%. The volcanic reservoirs have 6 main types of primary and secondary reservoir spaces and 4 kinds of pore associations. The plane and vertical distribution of reservoirs are jointly controlled by lithology, lithofacies and faults. The reservoir space types, reservoir capacity, permeability and connectivity are determined by diagenesis and tectonism. According to analyses of physical property and reservoir data, the most favorable reservoir facies belts include the pyroclastic lava, vesicular mandelstone lava, volcanic conduit facies (volcanic neck lithofacies or concealed explosion breccia lithofacies) and the upper effusive lithofacies. It is highly possible for the hydrocarbons to accumulate in the vent and proximal vent lithofacies, as well as the upper and top of volcanic eruption cycle/stage in areas adjacent to hydrocarbon kitchen and/or the structural high of deep large faults.

Key words: hydrocarbon accumulation pattern, reservoir characteristics, lithology and lithofacies, volcanic rock, Yixin Formation, periphery of Liaohe oilfield

1 地质背景

松辽盆地南部的辽河外围探区在下白垩统义县组中广泛发育有中基性火山岩,其年龄大致介于135~

120 Ma^[1-2]。近年来在该区众多凹陷的油气勘探过程中,共发现20余口探井在义县组火山岩中见不同级别的油气显示,并在张强凹陷获得了工业油流,展示了该区火山岩油气藏具有较大的勘探潜力和良好的勘探前景。

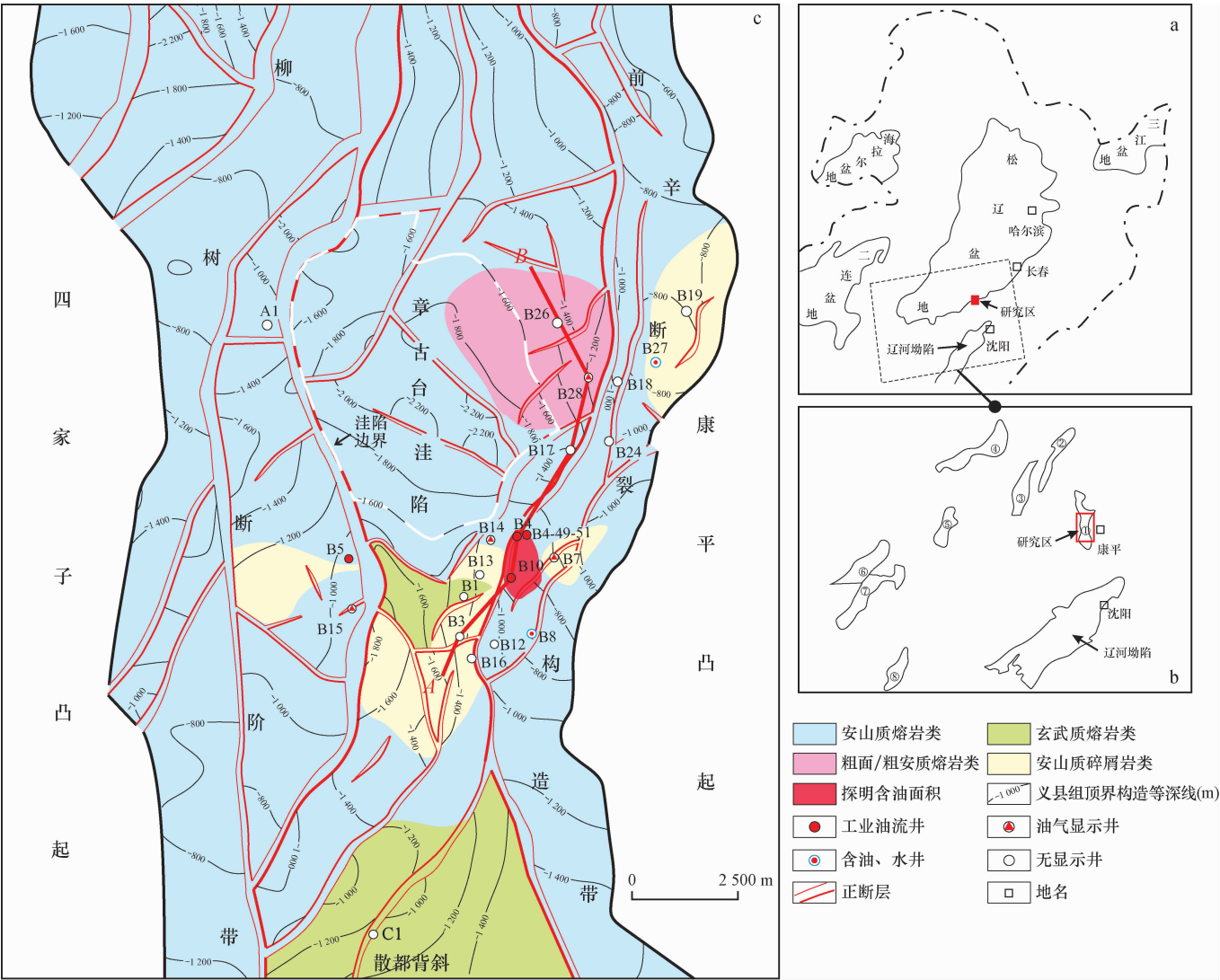


图1 张强凹陷义县组火山岩岩性与顶界构造及主干断裂叠合图

Fig. 1 Superimposition map showing volcanic lithology, top structure and main faults of the Yixian Formation in Zhangqiang depression (图 a 中虚线框与图 b 为辽河油田探区范围。图 b 中:①张强凹陷,②钱家店凹陷,③龙湾筒凹陷,④陆家堡凹陷,⑤奈曼凹陷,⑥元宝山凹陷,⑦平庄凹陷,⑧建昌凹陷。图 c 为张强凹陷研究区范围,分别对应于图 a 中的红色方块和图 b 中的红线框;图 c 中白色虚线为章古台洼陷边界。辽河外围探区指图 b 中①—⑧。)

张强凹陷位于松辽盆地南部(图 1a),行政区位于辽宁省康平县和内蒙古自治区科尔沁左翼后旗境内,是辽河外围探区的一个中生代凹陷(图 1b)。在大地构造位置上处于内蒙地轴和东北地槽交汇地带^[3]。前人对张强凹陷火山岩储层和油藏研究较少。陈全茂等(1997)^[4]采用板块构造理论和火山岩地球化学分析方法,研究了张强凹陷及邻区大洼昌图凹陷的火山岩地球化学特征,认为该区火山岩均为大陆裂谷活动的产物。周新桂等(1998)^[5]在岩心裂隙观察和油田应力场模拟的基础上,利用 F 指标法对张强凹陷碎屑岩和火山岩储层裂缝的发育程度和发育规律做了预测研究。田晓玲等(2001)^[6]对张强凹陷火山岩的分布、火山活动期次、火山岩储层等方面进行了总结。

张强凹陷乃至辽河外围针对火山岩的油气勘探尚处于初始研究阶段,其勘探程度大致相当于松辽盆地

20 世纪 90 年代下白垩统营城组火山岩气藏的初始勘探期。文中通过岩心观察、薄片鉴定、测试资料分析,结合钻井、测井和地震资料,详细研究了火山岩的岩性、岩相、储集空间和储层物性特征,并对火山岩油气藏的成藏规律作了分析,研究认识对张强凹陷以及辽河外围探区火山岩的油气勘探具有一定的实际指导和借鉴意义。

2 岩性 - 岩相特征

2.1 火山岩岩石类型

根据钻井岩心观察、薄片鉴定、井壁取心等资料,采用松辽盆地深层火山岩岩性分类方案^[7],该区义县组火山岩主体发育安山质火山熔岩、安山质火山碎屑

岩、粗安质/粗面质火山熔岩、玄武安山质火山熔岩、玄武安山质火山碎屑岩、玄武质火山熔岩约 14 种岩石类型。岩性以安山岩和气孔杏仁安山岩为主(72.0%),其次为安山质凝灰岩(9.1%)、玄武岩和气孔杏仁玄武岩(8.0%),粗面岩类、粗安岩类、玄武安山岩类相对较少(图 1c)。

2.2 火山岩岩相特征

火山岩岩相的划分主要采用松辽盆地火山岩 5 相 15 亚相划分方案^[8]。从火山岩的成岩方式、岩性、结构、构造特征等方面分析认为,该区火山岩大致可划分为喷溢相上部亚相、下部亚相,爆发相空落亚相、热碎屑流亚相,火山通道相火山颈亚相、隐爆角砾岩亚相、次火山岩亚相,约 3 相 7 种亚相。岩相以喷溢相上部亚相(51.3%)和下部亚相(32.8%)为主,其次为爆发相空落亚相(10.7%)和热碎屑流亚相(3.4%),火山

通道相相对较少(1.8%)。

3 储层特征及影响因素

3.1 储集空间类型

火山岩储层是一种裂缝、孔洞双孔隙介质的非均质性储层^[9-11]。根据岩心、铸体薄片、扫描电镜分析,张强凹陷火山岩储集空间主要有 6 种成因类型。

3.1.1 原生气孔

原生气孔是成岩过程中气体膨胀溢出所形成,是 该区主要的原生孔隙。岩心中安山岩、玄武岩和粗面岩中均有发育(图 2a,b),在火山角砾岩的角砾中也 比较常见。气孔多呈圆状、椭圆状、拉长扁平状和不规则 状,局部可见气孔被绿泥石、方解石、沸石等矿物部分 - 全部充填。

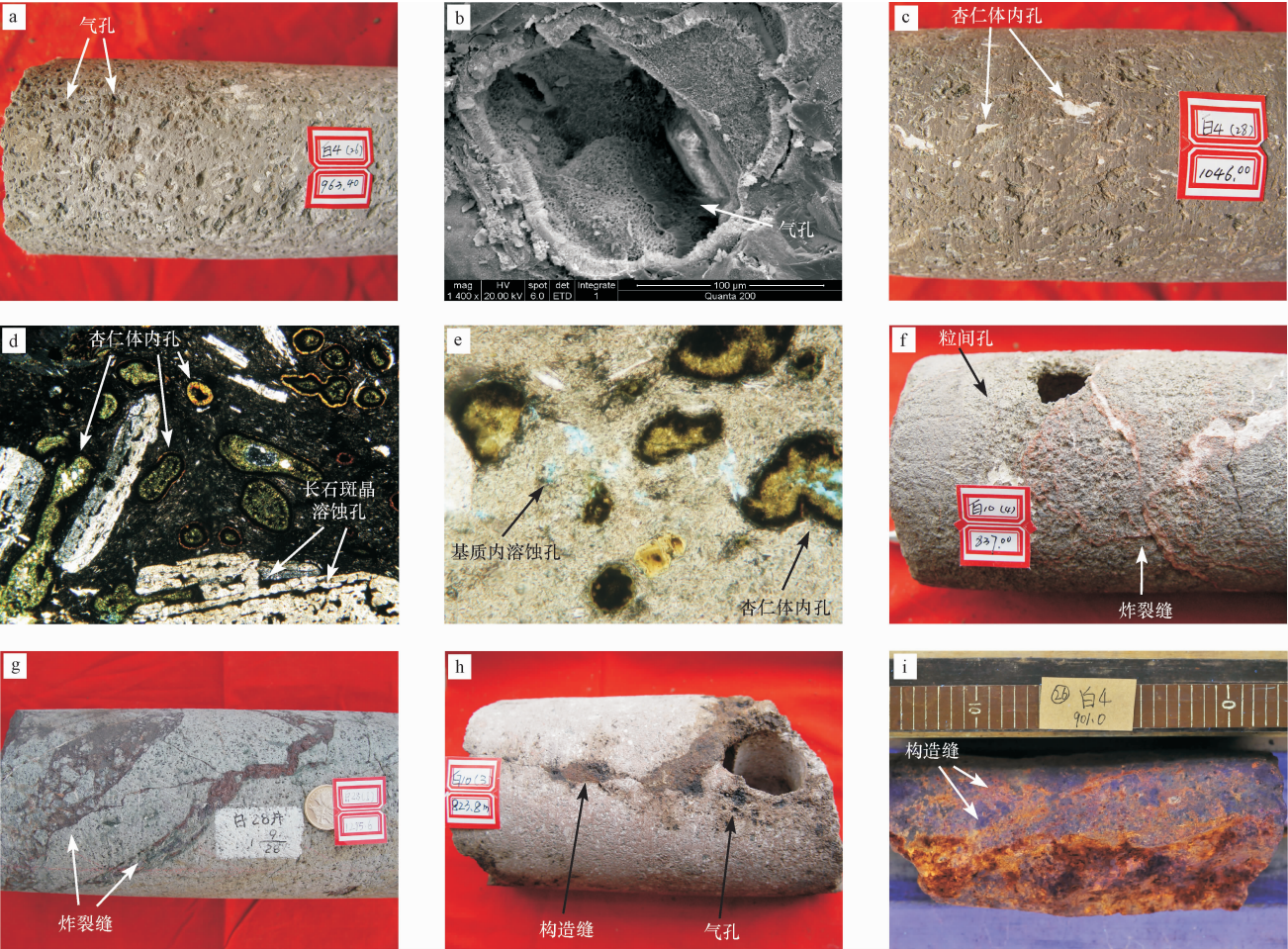


图 2 张强凹陷义县组火山岩储层储集空间类型

Fig. 2 Volcanic reservoir space types in Yixian Formation of Zhangqiang depression

- a. 原生气孔,气孔直径 1~3 mm,安山岩,B4 井,埋深 963.4 m(岩心);b. 原生气孔,气孔被伊利石、绿泥石半充填,安山岩,B5,埋深 950.3 m (扫描电镜);c. 杏仁体内孔,杏仁体为方解石,安山岩,B4,埋深 1 046.0 m(岩心);d. 杏仁体内孔、长石斑晶溶蚀孔,杏仁体为绿泥石,安山岩,B10,埋深 849.9 m(显微薄片);e. 杏仁体内孔、基质内溶蚀孔,杏仁体为绿泥石,安山岩, B4,埋深 914.6 m(铸体薄片);f. 间孔+炸裂缝,裂缝充填方解石和红色岩汁,安山质含角砾凝灰岩,B10,埋深 837.0 m(岩心); g. 炸裂缝,裂缝中充填红色岩汁,玄武安山质隐爆角砾岩,B28,埋深 1 285.6 m(岩心);h. 构造缝+气孔,安山岩,B10,埋深 823.8 m(岩心); i. 构造缝,裂缝中见油斑和荧光,安山岩,B4,埋深 901.0 m(岩心,荧光)

3.1.2 杏仁体内孔

杏仁体内孔是绿泥石、方解石、沸石等矿物充填气孔未充填形成的残余孔隙,属于原生孔隙。该区主要发育于安山岩和玄武岩中(图 2a,d,e)。

3.1.3 溶蚀孔

溶蚀孔是斑晶或基质被溶蚀形成的孔隙,形状不规则,是该区主要的次生孔隙。这种溶蚀孔在该区普遍存在,主要表现为长石、辉石斑晶和基质的溶蚀形成的孔隙(图 2d,e)。

3.1.4 砾-粒间孔隙

该孔隙是火山碎屑快速堆积时,砾石、颗粒间相互支撑,后经过压实固结成岩后形成的残留孔隙,也可以是火山碎屑熔岩经熔浆充填胶结未充填完全形成的残留孔隙,形状不规则,通常沿碎屑边缘分布(图 2f),是该区主要的原生孔隙。

3.1.5 炸裂缝

炸裂缝是由于挥发分在次火山岩体的某一部位聚集,造成局部压力剧增而发生隐蔽爆炸,或到达地表的岩浆由于压力突然释放而产生的矿物晶体炸裂缝,以及岩浆期后原岩在高压热液流体作用下形成的隐爆角砾缝^[12]。该区主要表现为长石、角闪石、辉石的炸裂缝和隐爆角砾岩中的隐爆角砾缝(图 2f,g),连通性较好。

3.1.6 构造裂缝

构造裂缝是火成岩成岩后受构造应力作用产生的裂缝,致密熔岩构造裂缝发育程度要高于多孔火山岩和火山碎屑岩。构造裂缝经常连通已有的储集空间,不仅是深层油气运移的主要通道,也是研究区重要的储集空间(图 2h,i)。该区构造裂缝发育,普遍被后期方解石和沸石等矿物充填,形成充填残余构造缝。

3.2 孔隙结构特征

储层的各种储集空间不是单独存在的,而是以某种组合方式或多种组合方式出现,张强凹陷火山岩储层中的储集空间组合大致有以下 4 种类型。

3.2.1 气孔-裂缝型

主要分布在气孔发育的安山岩和玄武岩段,裂缝在孔隙间起连通和储集的作用,储集空间以矿物充填的残余气孔和裂缝为主(图 2a,b,h),是该区最主要、最有效的储集空间组合。

3.2.2 砾/粒间孔-晶间孔-裂缝型

主要分布在火山碎屑岩、火山碎屑熔岩中,储集空间以角砾、碎屑颗粒、晶粒间残余孔隙为主,连通性通常较好(图 2f,g),是该区主要的储集空间组合之一。

3.2.3 溶蚀孔-裂缝型

主要分布在火山熔岩、火山碎屑熔岩中,储集空间为斑晶或基质内的溶蚀孔隙,该区主要表现为长石斑晶和基质的溶蚀孔(图 2d,e),当有裂缝发育时,能形成较好的储层。

3.2.4 裂缝型

主要分布于致密的火山熔岩中,储集空间以裂缝间充填残余的缝隙为主,各类孔隙为辅。该区发育有高角度裂缝、低角度裂缝和网状裂缝(图 2h,i),大部分裂缝都有被方解石、沸石等矿物充填现象。裂缝通常是主要的运移通道,当足够发育时,能成为较好的储层。

3.3 储层影响因素

中基性火山岩储层在空间分布上具有较强的非均质性,其储集性能与岩性、岩相密切相关,成因上受成岩作用和构造作用多期改造的联合影响。

3.3.1 岩性

不同的岩性具有不同的硬度、密度、成分、结构、构造等属性,导致不同类型的火山岩具有不同的物性特征^[13]。一般来说,火山岩要比沉火山碎屑岩储集性能好,酸性岩要比中性岩储集性能好,基性岩相对较差^[13-14]。值得注意的是,不同地区、不同类型的火山岩储层物性的好坏并不是绝对的,还与后期成岩的改造作用有关。

3.3.2 岩相、相带组合

火山岩储层物性、储集空间类型、特征和变化主要受到火山岩亚相控制,同岩相的不同亚相储层特征可能差别很大^[9]。勘探实践表明,松辽盆地深层火山岩,储层类型最好的岩相为火山通道相火山颈亚相、爆发相热碎屑流亚相、喷溢相上部亚相和侵入相内带亚相^[15];储层物性最好的相带为火山口-近火山口相带,其次为近源相带,远源相带物性最差^[16]。

3.3.3 成岩作用

冷凝固结成岩的火山熔岩,其物性随埋深的增加变化不大,压实固结成岩的火山碎屑岩,物性随埋深增

加逐渐变差^[8,17-18]。早期成岩过程中,由于岩石物理化学性质的差异和成岩环境的不同,所形成的原生孔隙和裂缝也会不同,决定了成岩初期岩石物性的好坏,主要包括原生气孔、收缩缝和自碎炸裂缝。次生成岩作用的充填作用、溶解作用、风化淋滤作用等,其既可以充填孔隙使储层物性变差,也可以在溶解作用 and 风化淋滤作用控制下开启部分次生孔隙。

3.3.4 构造作用

构造运动使得非常致密的火山岩产生了许多构造裂缝。火山岩越致密、脆性越强,构造裂缝越容易形成和保存^[19]。这些裂缝将各种孔隙连通起来形成有效的储集空间^[20]。研究区构造作用对储集空间发育主要有 3 方面影响:①裂缝提高了气孔、杏仁发育段的连通程度;②溶解作用沿裂缝加强,促使溶蚀孔隙形成;③致密火山岩段裂缝发育时,可形成裂缝型储层。

4 储层物性

4.1 物性与岩性关系

火山岩岩性对储层物性影响较大,安山质凝灰岩储层物性最好,属于特高孔、中渗储层^①;其次为气孔杏仁状安山岩和安山质角砾/集块(熔)岩,属于高孔、低渗储层;致密块状安山岩和玄武岩储层物性最差,属于低孔、特低渗储层,但是在局部构造裂缝发育的熔岩段,亦能形成良好的裂缝型储层(图 3)。

安山质角砾/集块(熔)岩的储集空间主要为角砾间孔和缝,常规物性测试值多为“原岩”角砾的储层物性,因此物性测试值通常低于真实值。可采用面孔率分析与常规孔、渗测试相结合的方法,综合分析其储集物性特征。火山角砾/集块(熔)岩的储层物性受砾间

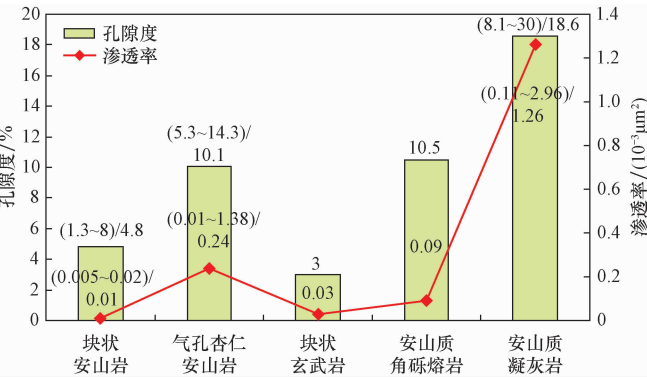


图 3 张强凹陷义县组火山岩岩性-物性关系直方图
Fig. 3 Histogram of volcanic lithology and physical properties of the Yixian Formation in Zhangqiang depression
[图上数据为:(最小值~最大值)/平均值。样品数共 34 块。]

孔缝充填程度的影响,储层物性变化较大,未充填或充填程度低其储层物性好,充填程度高或完全充填其储层物性变差。

辽河外围探区与松辽盆地凝灰岩的储层物性有所不同。松辽盆地深层火山岩埋深普遍大于 3 000 m,凝灰岩成岩作用与沉积岩相似,以压实成岩作用为主,因此在埋深较大时,成岩作用强,粒间孔隙被压实,储层物性相对要差于随埋深增加储层物性变化不大的火山熔岩;而辽河外围探区义县组火山岩埋深较浅,其火山岩埋深普遍在 1 000 ~ 2 000 m,压实成岩作用弱,岩心观察绝大部分凝灰岩较疏松、粒间孔隙发育,储层物性相对要好于同一地区的火山熔岩。

4.2 物性与岩相关系

储层物性受火山岩岩相、亚相影响,不同地区、不同构造背景下其同种岩相/亚相的储层物性也可能不同。研究区爆发相空落亚相的岩性主要为安山质凝灰岩,物性测试值最高(图 4),属于特高孔中渗储层;其次为喷溢相上部亚相,岩性主要为气孔杏仁状熔岩,属于高孔低渗储层;火山通道相火山颈亚相的储层物性与喷溢相上部亚相当,岩性主要为火山角砾/集块(熔)岩,储集空间主要为砾间孔缝,储层物性受砾间孔缝充填程度的影响;喷溢相下部亚相岩石致密,储层物性最差,属于低孔特低渗储层,但在构造裂缝发育段能够形成良好的裂缝型储集。

5 油气成藏规律

5.1 近油源是成藏关键

油源控制油气的分布范围。研究区烃源岩主要为义县组上覆下白垩统九佛堂组(K₁f)和沙海组(K₁sh)

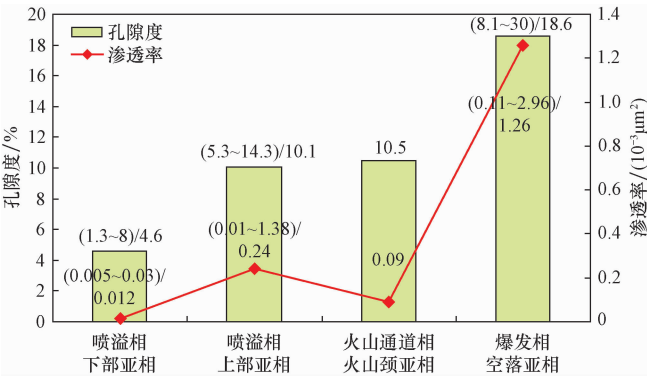


图 4 张强凹陷义县组火山岩岩相-物性关系直方图
Fig. 4 Histogram of volcanic lithofacies and physical properties of the Yixian Formation in Zhangqiang depression
[图上数据为:(最小值~最大值)/平均值。样品数共 34 块。]

① 中华人民共和国石油天然气行业标准 SY/T 6285 - 1997.

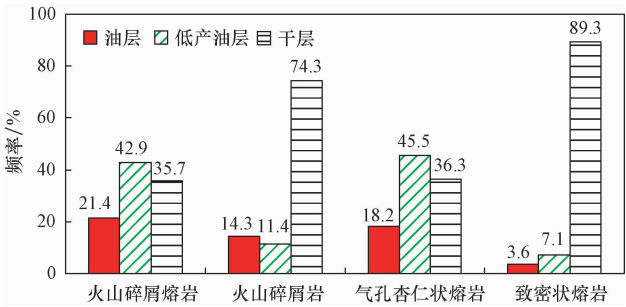


图5 张强凹陷火山岩不同岩性油气级别频率直方图

Fig. 5 Frequency histogram of hydrocarbon accumulation levels in different volcanic lithologies in the Zhangqiang Depression

的暗色泥岩,油藏类型为新生古储型。张强凹陷目前已知的火山岩油井和油气显示井,大多围绕章古台生烃洼陷周边分布(距离洼陷边界 < 3 km),而远离油源的火山岩则难以成藏(图 1c)。辽河外围各凹陷的生烃洼陷小、生烃能力有限,因此火山岩能够成藏,必须靠近或紧邻生油洼陷,确保有充足的油源供给。充足的油源供给是火山岩成藏的必要条件^[21-22],对于中小型凹陷/洼陷而言,油源问题是火山岩油气成藏的最关键因素。

5.2 火山碎屑熔岩、气孔杏仁状熔岩成藏几率最大

通过对研究区具代表性的 4 口探井(B4 井、B5 井、B10 井、B28 井)义县组全井段火山岩(合计 812 m)油气级别的频率统计,所有类型的火山岩均能够成藏,但是油气富集的程度不同。在油源条件相同的情况下,火山碎屑熔岩和气孔杏仁状熔岩成藏几率最大(能够达到 2/3),其次为火山碎屑岩(约为 1/4),致密状火山熔岩成藏几率最低(约为 1/10)(图 5)。

脆性比较大的火山岩,更易受后期构造作用而产生次生构造裂缝^[23]。火山熔岩脆性大于凝灰岩,前者裂缝发育程度要大于后者,裂缝是油气运移和聚集的重要条件。因此在成藏时,即使火山碎屑熔岩和气孔杏仁状熔岩储层物性都低于凝灰岩,而成藏几率却相对较高。

5.3 火山通道相、喷溢相上部亚相成藏几率最大

火山岩岩性与岩相密切相关,岩性与油气级别频率的关系,在一定程度上也反映了岩相/亚相的油气富集程度。统计分析表明(图 6):喷溢相上部亚相(即气孔杏仁状火山熔岩)和火山通道相(火山颈亚相+隐爆角砾岩亚相)油气成藏几率最大,其次为爆发相(空落亚相、热碎屑流亚相),喷溢相下部亚相(即致密火山熔岩)成藏几率最低。

5.4 火山岩喷发旋回的上部和顶部储层条件好

在盆地火山岩的勘探阶段,火山喷发旋回主要指

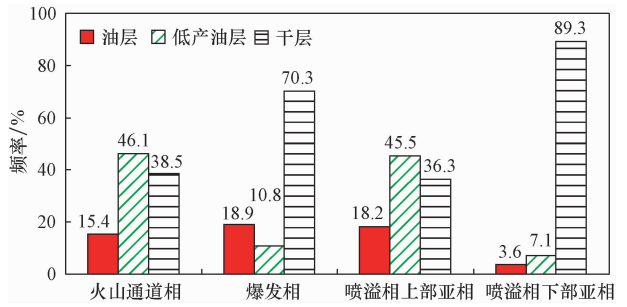


图6 张强凹陷火山岩不同岩相油气级别频率直方图

Fig. 6 Frequency histogram of hydrocarbon accumulation levels in different volcanic lithofacies in the Zhangqiang Depression

火山喷发过程中岩浆成分和喷发强度彼此有所区别的变化阶段,旋回之间存在喷发间歇^[24]。火山喷发旋回之间可以存在沉积夹层和风化壳等喷发间断面。松辽盆地徐家围子地区 60% 以上的气层分布在火山岩旋回的顶部,70% 以上的气层产能来自于全井段的火山岩序列的顶部旋回^[12]。

与松辽盆地深层气田成藏特征相似,张强凹陷火山岩油藏主要位于火山岩旋回的顶部。图 7 所示,张强凹陷的 B10 井、B4-49-51 井油气主要富集于义县组旋回 II(狭义)的上部和顶部,B28 井油气主要富集于义县组旋回 I(狭义)的顶部。旋回/期次的上部和顶部遭受风化的几率较大,岩石的破碎作用和溶蚀作用相对较强,储层条件较为有利。

5.5 火山口-近火山口相带控制油气富集程度

火山口-近火山口相带控制了油气的富集程度。火山口-近火山口相带不仅构造位置高(图 7 中 B10 井—B4-49-51 井、B28 井为火山口-近火山口相带),同时也是火山角砾/集块(熔)岩、气孔杏仁状熔岩、火山通道相和喷溢相上部亚相等优势岩性、岩相集中发育的地区,这一区域受构造活动影响最大,形成的构造裂缝最为发育,利于形成厚度大、物性高、连通性好的油气藏,由火山口-近火山口相带向远源相带,储集性能逐渐变差,裂缝发育程度也逐渐降低。远离火山机构中心相带,有效储层通常仅发育在火山喷发旋回/期次的上部和顶部。

5.6 靠近大断裂、构造高部位

断裂控制了油气运移和聚集的方向。靠近大断裂的构造高部位,不仅供油窗口大,有利于油气的垂向和侧向运移(图 7),同时也是古火山口相对较发育的地区。勘探实践表明,古火山口具有沿大断裂及其两侧呈串珠状分布的规律^[25]。因此,在近油源、靠近大断裂的火山岩构造高部位,易于成储成藏。

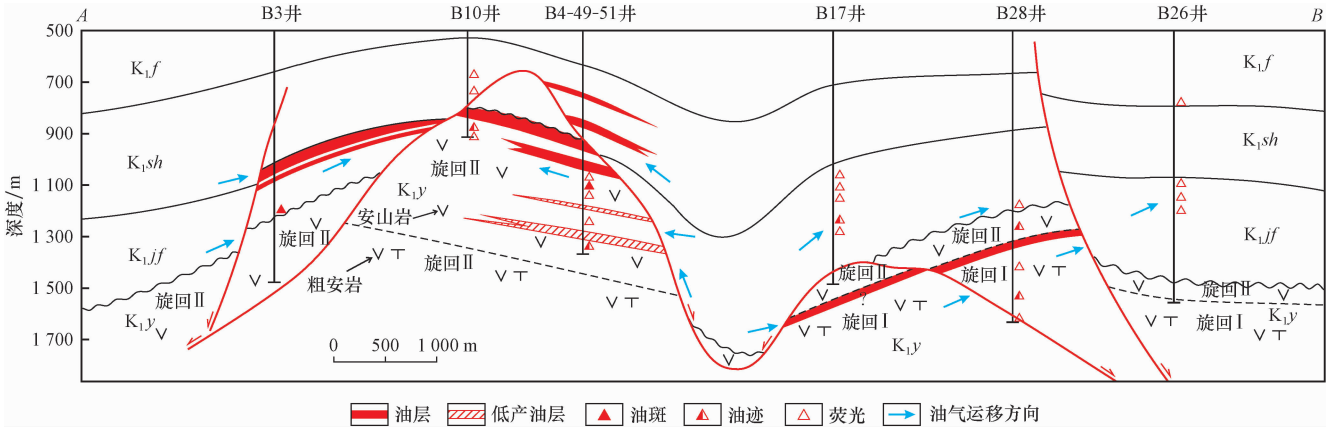


图 7 张强凹陷义县组火山岩油气成藏模式(剖面位置见图 1)

Fig. 7 Hydrocarbon accumulation patterns of volcanic reservoirs in the Yixian Formation of Zhangqiang depression(see Fig. 1 for the profile location)

6 结论

- 1) 张强凹陷义县组发育 14 种火山岩岩石类型,以安山质火山熔岩和火山碎屑岩为主。发育喷溢相上部亚相、下部亚相,爆发相空落亚相、热碎屑流亚相,火山通道相火山颈亚相、隐爆角砾岩亚相、次火山岩亚相,约 3 相 7 种亚相,以喷溢相为主。
- 2) 主要发育 6 类原生和次生储集空间,发育 4 种孔隙结构组合方式,气孔-裂缝型、砾/粒间孔-溶蚀孔-裂缝型最有利。岩性、岩相和断裂共同控制了储层的平面分带和纵向展布,成岩作用和构造作用决定了储层的储集空间类型、储集性、渗透性和连通性。
- 3) 火山角砾/集块(熔)岩、气孔杏仁状熔岩、凝灰岩,火山通道相、喷溢相上部亚相、爆发相,储层物性最好,成藏几率最大。
- 4) 火山岩储层在空间分布上具有较强的非均质性,火山岩油藏受烃源、岩性、岩相、火山岩旋回/期次、火山机构相带、断裂等诸多因素共同控制。在靠近或紧邻生烃洼陷、靠近大断裂的构造高部位,优先考虑火山口-近火山口相带、以及火山岩喷发旋回/期次的上部和顶部,这一探区的火山岩成藏几率大、钻探成功率高。
- 致谢 本文获辽河油田公司科技项目“辽河外围盆地火山岩分布规律及成藏特征研究”支持。张学武、田晓玲、田崖参与了义县组顶界构造解释。李伦鸿参与了岩心取样和岩心照片采集工作。张凤莲、冉波、官振超等对本文的成藏研究给予了帮助。在此一并表示诚挚的谢意。

参 考 文 献

[1] 彭艳东,张立东,陈文,等. 辽西义县组火山岩⁴⁰Ar/³⁹Ar、K-Ar 法年龄测定[J]. 地球化学,2003,32(5):427-435.

[2] 张宏,柳小明,陈文,等. 辽西北票-义县地区义县组顶部层位的年龄及其意义[J]. 中国地质,2005,32(4):596-603.

[3] 张宏,柳小明,陈文,等. 辽西北票-义县地区义县组顶部层位的年龄及其意义[J]. 中国地质,2005,32(4):596-603.

[4] 张宏,柳小明,陈文,等. 辽西北票-义县地区义县组顶部层位的年龄及其意义[J]. 中国地质,2005,32(4):596-603.

[5] 张宏,柳小明,陈文,等. 辽西北票-义县地区义县组顶部层位的年龄及其意义[J]. 中国地质,2005,32(4):596-603.

[6] 张宏,柳小明,陈文,等. 辽西北票-义县地区义县组顶部层位的年龄及其意义[J]. 中国地质,2005,32(4):596-603.

[7] 张宏,柳小明,陈文,等. 辽西北票-义县地区义县组顶部层位的年龄及其意义[J]. 中国地质,2005,32(4):596-603.

[8] 张宏,柳小明,陈文,等. 辽西北票-义县地区义县组顶部层位的年龄及其意义[J]. 中国地质,2005,32(4):596-603.

- 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.
- [9] 王璞珺, 陈树民, 刘万洙, 等. 松辽盆地火山岩相与火山岩储层的关系[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(1): 18-23.
- Wang Pujun, Chen Shumin, Liu Wanzhu, et al. Relationship between volcanic facies and volcanic reservoirs in Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(1): 18-23.
- [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] 吴颜雄, 王璞珺, 边伟华, 等. 松辽盆地深层火山岩储集性能[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(2): 236-247.
- Wu Yanxiong, Wang Pujun, Bian Weihua, et al. Poroperm characteristics of deep volcanic reservoirs in Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(2): 236-247.
- [12] 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 of the Cretaceous intermediate and mafic volcanic reservoirs in Songliao Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(1): 82-92.
- [13] 郭齐军, 焦守诠, 万智民. 火山岩储层的岩石学评价[J]. 特种油气藏, 1995, 2(3): 6-8.
- Guo Qijun, Jiao Shouquan, Wan Zhimin. Petrology evaluation of volcanic rock reservoirs[J]. Spectal Oil & Gas Reservoirs, 1995, 2(3): 6-8.
- [14] 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: 64-90.
- Zhao Chenglin, Meng Weigong, Jing Chunshuang, et al. Volcanic rocks and hydrocarbon in Liaohe Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999: 64-90.
- [15] 王璞珺, 吴河勇, 庞颜明, 等. 松辽盆地火山岩相: 相序、相模式与储层物性的定量关系[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(5): 805-812.
- Wang Pujun, Wu Heyong, Pang Yanming, et al. Volcanic facies of the Songliao Basin: sequence, model and the quantitative relationship with porosity & permeability of the volcanic reservoir[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2006, 36(5): 805-812.
- [16] 唐华风, 王璞珺, 姜传金, 等. 松辽盆地白垩系营城组隐伏火山机构物理模型和地震识别[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(2): 530-536.
- Tang Huafeng, Wang Pujun, Jiang Chuanjin, et al. Physical model and seismic recognition of concealed volcanic edifices of Yingcheng Formation in Songliao Basin, Cretaceous, NE. China[J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(2): 530-536.
- [17] 杨满平, 郭平, 彭彩珍, 等. 火山岩储层的应力敏感性分析[J]. 大庆石油地质与开发, 2004, 23(2): 19-20.
- Yang Manping, Guo Ping, Peng Caizhen, et al. Analysis of stress sensitivity for volcanic rock reservoir[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2004, 23(2): 19-20.
- [18] 张斌, 王璞珺, 丁日新, 等. 松辽盆地营城组火山岩定量储层地质模型及其精细描述[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(6): 1232-1243.
- Zhang Bin, Wang Pujun, Ding Rixin, et al. Geologic model quantification and characterization for volcanic reservoir of the Yingcheng Formation in Songliao Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2007, 37(6): 1232-1243.
- [19] 刘万洙, 王璞珺, 门广田, 等. 松辽盆地北部深层火山岩储层特征[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(1): 28-31.
- Liu Wanzhu, Wang Pujun, Men Guangtian, et al. Characteristics of deep volcanic reservoirs in northern Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(1): 28-31.
- [20] 赵澄林. 火山岩储层空间形成机理及含油气性[J]. 地质论评, 1996, 42(增刊): 37-43.
- Zhao Chenglin. Mechanism of volcanic reservoir spaces formed and hydrocarbon-bearing characteristics[J]. Geological Review, 1996, 42(S0): 37-43.
- [21] 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.
- Zhou 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.
- [22] 王洪江, 吴聿元. 松辽盆地长岭断陷火山岩天然气藏分布规律与控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2011, 31(3): 360-367.
- Wang Hongjiang, Wu Yuyuan. Distribution patterns and controlling factors of volcanic gas pools in the Changling fault depression, the Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 31(3): 360-367.
- [23] 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[J]. 地球物理学报, 2011, 54(2): 269-279.
- Feng Zhiqiang, Liu Jiaqi, Wang Pujun, et al. New oil and gas exploration field: volcanic hydrocarbon reservoirs—enlightenment from the discovery of the large gas field in Songliao basin[J]. Chinese Journal of Geophysics. (in Chinese), 2011, 54(2): 269-279.
- [24] 唐华风, 边伟华, 王璞珺, 等. 松辽盆地地下白垩统营城组火山岩喷发旋回特征[J]. 天然气工业, 2010, 30(3): 35-39.
- Tang Huafeng, Bian Weihua, Wang Pujun, et al. Characteristics of volcanic eruption cycles of the Yingcheng Formation in the Songliao Basin[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(3): 35-39.
- [25] 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.