

文章编号: 0253-9985(2007)05-0590-07

松辽盆地北部深层火山岩天然气勘探实践

齐井顺

(中国地质大学, 北京 100083)

摘要: 大庆探区发现的徐深气田储量规模超 $1\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$, 是我国迄今为止发现的最大的火山岩气藏。徐深气田的发现经历了探索阶段、小型构造气藏发现阶段、大型岩性气藏突破阶段。徐家围子断陷具备好的烃源岩条件, 火山岩发育, 烃源岩、火山岩储层、区域盖层在纵向上形成了良好的生储盖组合条件, 有利于大气藏的形成。

关键词: 深层天然气; 勘探历程; 松辽盆地北部

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

Natural gas exploration in deep volcanic rocks in the northern Songliao Basin

Q i Jingshun

(China University of Geosciences Beijing 100083 China)

Abstract Geological reserves of Xushen gas field discovered in Daxing exploration area exceed 100 bcm, the biggest among the volcanic gas reservoirs in China so far. The discovery of Xushen gas field had experienced several stages including initial exploration, discovery of small structural gas reservoirs and discovery of large lithologic gas reservoirs. Xujiaweizi fault depression has ideal source rocks and well-developed volcanic reservoirs, which together with regional seals form vertically excellent source-reservoir-cap rock combinations, thus is quite favorable for the formation of large gas fields.

Key words deep natural gas; exploration history; Songliao Basin

大庆油田对深层的研究和探索始于 20 世纪 70 年代中期, 由于深层地质结构复杂, 断隆相间、地层埋藏深、地温高、成岩作用强, 导致了勘探目标找不准, 岩石可钻性差, 特殊岩性储层定名评价困难, 增产改造难度大, 使深层天然气勘探成为世界级的难题。因此, 先后有两家跨国石油公司对大庆深层勘探诊断给出了否定性结论, 或撤出大庆深层勘探。截止 2000 年底, 只找到了不足 $200 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的探明天然气储量。

然而, 大庆油田的勘探工作者并没有畏惧, 通过系统深入的地质规律研究, 逐步认识到深层巨大的勘探潜力。层序地层学、含油气系统理论、火山岩地质学等地质理论的应用开拓了视野, 促进了地质认识的深化, 勘探思路从构造圈闭向火山岩岩性圈闭勘探转变, 勘探目标从常规砂岩储层

向砂砾岩、火山岩等特殊储层勘探转变, 一再突破深度和物性下限。通过勘探技术、工艺技术的攻关, 攻克了制约勘探进展的瓶颈技术。

2005 年, 在徐家围子断陷中部的火山岩隆起带, 发现了一个 $1\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 规模的徐深气田。该气田储量丰度高、天然气品质好、产量高, 试采效果较好。

1 徐家围子火山岩天然气藏的勘探历程

大庆深层勘探自 20 世纪 70 年代中期开始至今, 勘探历程大体可分为探索阶段 (1985 年以前)、小型构造气藏发现阶段 (1986—2000 年) 和大型岩性气藏突破阶段 (2001 年以来) 3 个阶段。

1.1 探索阶段 (1976—1985 年)

大庆油田发现之后, 在进行外围中浅层油气藏勘探时发现来自深层煤系源岩的天然气。1976 年开始了深部油气藏勘探, 并明确把下白垩统泉头组二段及其以下地层称为深层。至 1985 年, 物探资料主要有重磁和“五一”型光点地震和 2.32×10^4 km (其中数字地震测线 0.38×10^4 km) 多次覆盖二维地震测线, 钻井除盆地边部浅钻和内部隆起部位基准井的钻探外, 在构造高部位完成深层探井 15 口。实现了对松辽盆地北部深层构造格局、地层展布、烃源岩发育和储层特征的初步了解, 并且发现了肇州西基岩风化壳气藏。

1.2 小型构造气藏发现阶段 (1986—2000 年)

“七五”到“九五”之间的 15 年, 为认识一实践一再认识的勘探阶段。经过多轮的刻苦攻关研究, 对深层天然气地质条件有了较为系统的认识, 基本上厘定了深层地层层序, 落实深层各断陷的分布及规模, 确定了构造演化历史, 认识到深层火山岩和砾岩可以作为储层, 并确定徐家围子断陷为深层天然气的最有利勘探区。

在此期间, 勘探工作量主要集中在徐家围子断陷带周边, 相继发现了昌德气藏、汪家屯-升平深层气藏、昌德东气藏、汪家屯东气藏, 并提交了各级天然气地质储量 288.38×10^8 m³。同时, 在古中央隆起带、常家围子-古龙断陷带、莺山-双城断陷带和滨北的较大断陷 (图 1) 进行了评价性钻探, 共完钻深层探井 73 口, 完成二维地震勘探 $9\,021.8$ km², 三维地震勘探 803.53 km²。

1.3 大型岩性气藏突破阶段 (2001 年以来)

“十五”以来, 以徐家围子断陷为重点, 进行区带评价和砂砾岩、火山岩岩性圈闭的识别评价。完成针对深层三维地震勘探 $1\,947.56$ km², 完成深层探井 43 口, 其中卫深 5 井、徐深 1 井相继获超百万方无阻流量的高产工业气流, 尤其是徐深 1 井的成功钻探, 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藏, 成为深层天然气勘探进入战略突破阶段的标志。在深层地层层序、构造、火山岩储层、烃源岩等方面的攻关研究也取得了突破性进展, 为今后天然气勘探方向的确定和天然气储量持续增长奠定了良好的基础。

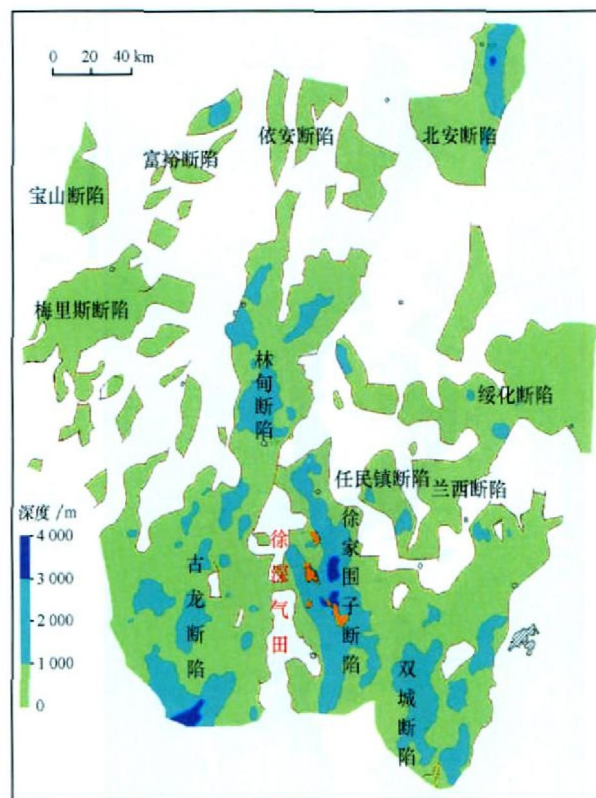


图 1 松辽盆地北部断陷分布

Fig. 1 Distribution of fault depressions in the northern Songliao Basin

2 徐家围子断陷深层基本地质规律

徐家围子断陷位于松辽盆地北部东南断陷区, 勘探面积 $5\,350$ km² (图 2)。它是西断东超型箕状断陷, 从西向东发育陡坡带、隆起带、缓坡带^[1]; 深层发育断陷期和坳陷期 2 类 3 套烃源岩, 主要是下白垩统火石岭组一段、沙河子组、营城组二段等湖相泥岩和煤层; 天然气以煤型气为主, 兼有油型裂解气和深源无机气, 资源丰富。根据 3 轮资源评价结果, 其总资源量为 $6\,772 \times 10^8$ m³, 具备形成大气田的资源基础; 深层存在致密砂岩、砂砾岩、火山岩、变质岩等多种储层, 勘探领域广阔, 其中, 火山岩、砂砾岩是深层重要的储层, 火石岭组二段、营城组一段和营城组三段火山岩是徐家围子断陷 3 套主要储层; 具有泉头组一、二段和登娄库二段两套区域性盖层, 对深层天然气运聚和保存起重要作用; 烃源岩与储层垂向上间互, 空间上交错分布, 形成了断陷复杂的储盖组合配置^[2]。深层具有构造、地层、岩性等多种圈闭类型, 形成反转构造气藏、基岩凸起气藏、砂砾岩地层超覆气藏、火山岩岩性气藏、断陷期早期构造气藏和无机

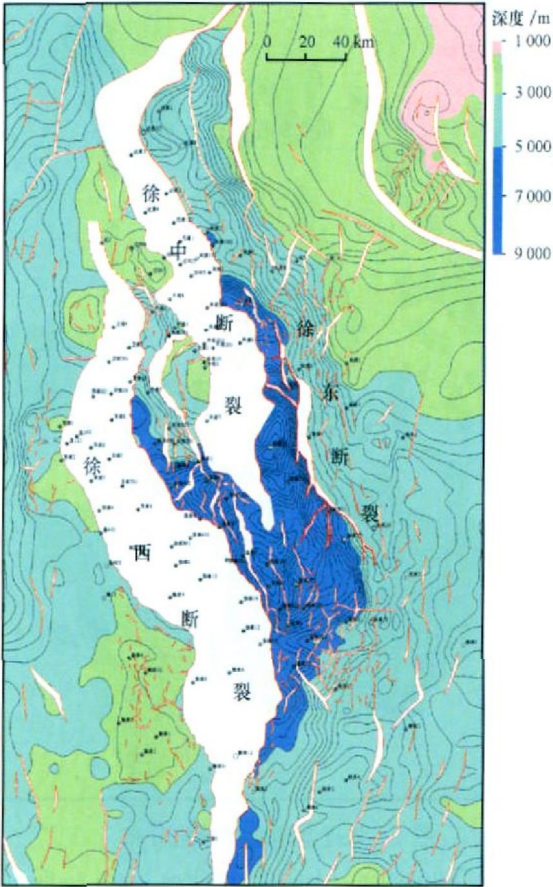


图 2 徐家围子断陷基岩顶面构造
Fig. 2 Structural map showing the top of basement rocks in the Xujiawazi fault depression

气藏 6 种基本气藏类型, 近气源区是最有利的勘探地区。徐家围子断陷中部兴城地区发育的大型鼻状隆起“凹中隆”是深层天然气聚集的最有利地区。

3 大型气田发现的实践经验

世界上没有完全相同的沉积盆地 (或凹陷), 更没有相同的成油规律, 必须坚持具体盆地具体分析, 加强综合地质研究, 加深对地质规律的认识, 重视实践, 勇于探索, 才能不断开拓新领域。面对探区复杂的地质条件, 经过科学合理的组织, 攻克地质规律认识、工艺技术等重重困难, 确保了大气田的发现。

深层天然气勘探对象主要为火山岩、砂砾岩等特殊岩性储层气藏, 存在 3 大难题: 一是没有可借鉴的勘探经验, 没有现成的理论指导, 没有成型的工艺配套技术; 二是与砂岩油气藏相比, 火山岩储层识别难、预测难, 气藏勘探难度大; 三是与国内其他气田相比, 松辽深层地温高、岩石硬度大、

岩性复杂, 气藏地质条件特殊, 钻井、压裂、试气等施工难度大。

针对上述难题, 采用边攻关、边实践的方法, 创新了资源、储层、成藏 3 个认识、发展了目标、岩性、气层 3 个识别技术, 完善了地震、钻井、增产改造 3 项配套工艺技术, 为 $1\,000 \times 10^8$ t 探明储量任务的完成提供了理论和技术支撑。

3.1 徐深气田发现的基础

3.1.1 徐家围子断陷资源潜力

徐家围子断陷钻井揭示, 沙河子组地层的暗色泥岩厚度最大, 在 87~ 381 m 之间; 其次为营城组, 在 12~ 117 m 之间; 火石岭最薄, 在 8~ 110 m 之间 (图 3)。此外, 徐深 1 井区和升平- 宋站地区沙河子组地层中发育比较厚的煤层, 厚度在 14~ 105 m 之间, 火石岭组在少数井见到了煤层。从暗色泥岩和煤层的平面分布看, 徐家围子断陷沙河子组泥质烃源岩分布范围较大, 营城组二段泥质烃源岩分布集中在徐深 1 井以东, 火石岭组暗色泥岩零星分布。沙河子组煤层主要分布在升平、宋站及徐深 1 井周围地区, 火石岭组煤层发育局限。

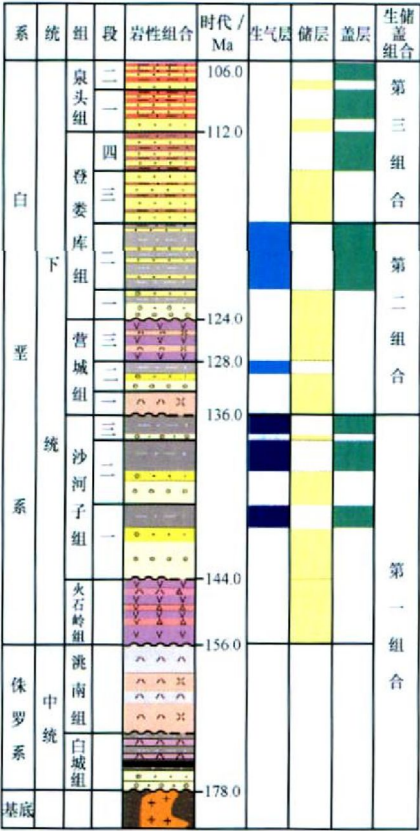


图 3 徐家围子断陷地层柱状图
Fig. 3 Stratigraphic column of the Xujiawazi fault depression

徐家围子断陷烃源岩分布广泛,沙河子组和火石岭组有机质丰度较高,营城组次之,登娄库组最低。登娄库组的有机碳含量为 0.369% ~ 0.550%,火石岭组的有机碳含量为 0.934% ~ 0.996%,有机质类型以 II_1 型为主,少部分为 IV 型和 III_1 型,成熟度高,生烃潜力较大。从实测镜质体反射率统计结果看,火石岭组地层平均值达到 3.10%,达到过成熟阶段;沙河子组地层热演化程度差异比较大, R_o 从 1.70% 到 3.56%,处于高成熟-过成熟阶段;营城组烃源岩处于高成熟-过成熟阶段^[3]。

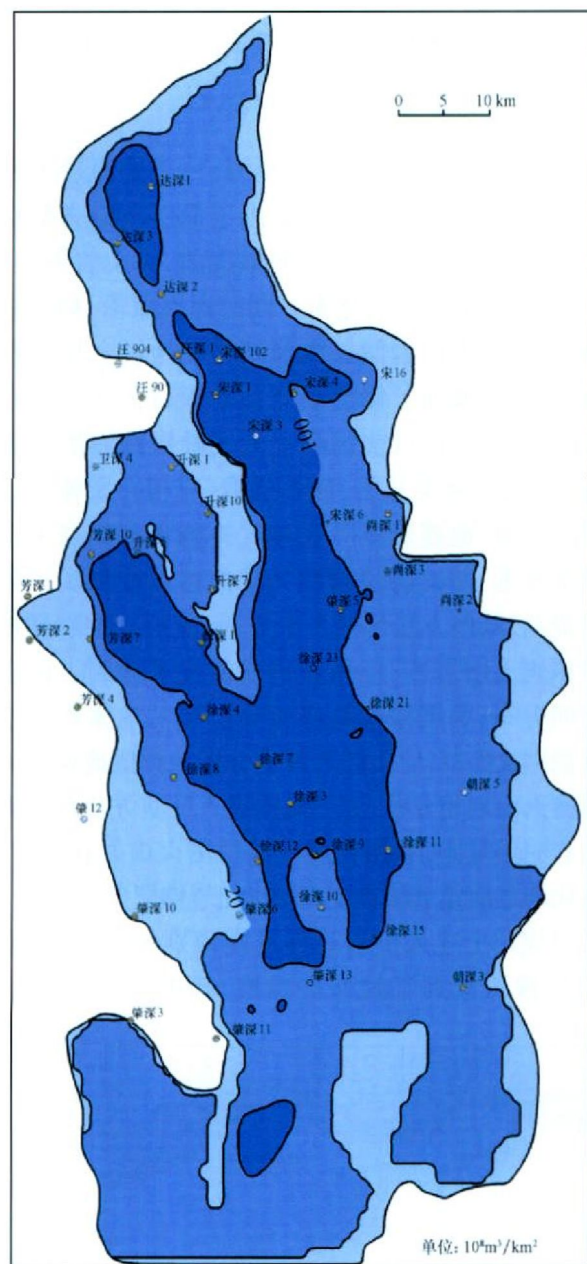


图 4 徐家围子断陷烃源岩总生气强度

Fig. 4 Total hydrocarbon-generating intensity of source rocks in the Xujiaweizi fault depression

综合分析,深层天然气为混源气,以煤型气为主。发育多套烃源岩,其中沙河子组泥质烃源岩有机质丰度高、母质类型好,具有较强的生烃潜力,暗色泥岩厚度大于 50 m 的分布面积 3 291 km²,生气强度大于 $20 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 的面积为 1 460 km² (图 4)。根据 3 轮资源评价结果,天然气资源量为 $6 772 \times 10^8 \text{ m}^3$,比原深层资源量 $1 030 \times 10^8 \text{ m}^3$ 有较大增长,具有形成大型气田的基本条件,坚定了发现大气田的信心。

3.1.2 火山岩储层特点

储层认识创新,明确了寻找大气田的主攻目标。

徐深 1 井的钻探,代表着深层天然气的勘探思路由寻找构造圈闭转变为寻找大规模的火山岩岩性圈闭,勘探目的层也由常规的砂岩储层转变为砂砾岩和火山岩等特殊岩性储层。

常规的砂岩、砾岩储层,由于受到强烈的成岩作用,在松辽盆地北部深层一般超过 3 200 m 就很难成为有利储层,而火山岩储层受成岩作用影响小,一般在 3 200 m 以下也可以成为好的储层,并且火山岩在徐家围子断陷大面积分布,对火山岩储层的认识拓宽了深层的勘探领域。

深层火山岩储层主要分布于侏罗系火石岭组上部和早白垩系营城组一段,在部分地区营城组三段也有分布,构造上主要分布在控陷的大断裂附近。依据岩石薄片、化学成分分析和测井解释等手段,确定火石岭组岩性主要为基性、中性和中酸性火山岩,岩石类型主要有玄武质安山岩和流纹岩、安山岩、英安岩和安山质火山岩碎屑岩等;营城组一段岩性主要为中酸性火山岩,岩石类型主要有流纹岩、英安岩和酸性火山碎屑岩等;营城组三段岩性主要为中基性火山岩,岩石类型主要有玄武岩和安山质玄武岩等。通过大量的野外勘测和岩心观察,宏观微观特征研究,划分出火山岩的 5 个大相、15 个亚相 (图 5)。火山岩储层物性与岩性、岩相的关系密切,深层火山岩储层绝大多数工业气流井岩性为酸性火山岩,而火山岩相,特别是火山岩亚相,与火山岩的物性也密切相关。不同的亚相,其物性参数值可能会有天壤之别。喷溢相上部亚相和爆发相热碎屑流亚相的孔隙度与渗透率相对略高,物性较好;喷溢相中部亚相、爆发相热基岩亚相的孔隙度与渗透率相对略低^[4~12]。

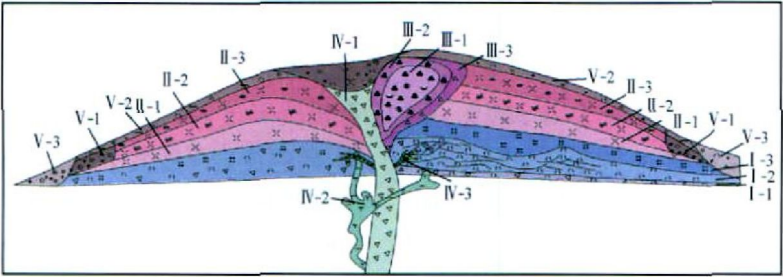


图 5 火山岩相划分模式

Fig. 5 Model chart showing the division of volcanic rock facies

iv. 火山通道相; ㊦. 爆发相; ㊧. 喷溢相; ㊨. 侵出相; ㊩. 火山-沉积岩相

3.1.3 火山岩气藏成藏规律

松辽盆地深层主力烃源岩为沙河子组湖相泥岩和煤层, 其次为登娄库组二段、火石岭组一段、营城组二段; 储集层包括火石岭组一段、营城组一段、营城组三段 3 套火山岩和营城组四段砂砾岩; 区域盖层为登娄库组二段、登娄库组四段、泉头组一、泉头组二段和青山口组一段大面积分布的厚层泥岩。4 套烃源岩和 4 套储层间互, 形成了有利的生、储、盖组合条件。

深层天然气主要来源于断陷内的沙河子组、火石岭组的煤层和泥岩。天然气以垂向运移为主、侧向运移为辅。凹陷内是有利源岩发育区, 也是寻找大气田的主要目标区。

火山岩气藏以构造-岩性气藏为主, 纵向多套气层叠置, 总体为上气下水, 没有统一的气水界面; 构造高部位气柱高度大, 低部位气柱高度小, 气柱高度超出构造幅度; 平面上气层连通性差, 受不同火山机构控制 (图 6)。砂砾岩储层物性决定含气性, 为典型岩性气藏。气层在断陷中部呈厚层块状, 向边部变为薄互层, 非均质性强。营城组砾岩、火山岩储层分布与主要生烃区空间叠置, 有利于形成大气田。徐中构造带、徐西伸展断裂带、徐东斜坡带、丰乐低隆起和宋站低隆起等区带为

天然气聚集的有利场所。成藏认识创新, 展现了大气田的勘探远景。

3.2 识别技术的发展是大气田发现的关键

3.2.1 火山岩目标地震识别技术

火山岩储层地震识别预测, 一直是深层天然气勘探的瓶颈技术, 主要是由于深层火山岩是由多期次、多个火山口爆发而形成的, 火山岩岩性、岩相在纵、横向上变化大。同时因埋藏深、构造幅度大, 使得火山岩储层内部结构在地震上反射特征不明显, 增加了储层预测和勘探目标优选的难度。为此, 应用目前国际上油气勘探领域的主流技术-波形聚类分析、频谱成像、双相介质弹性波油气检测、地震衰减吸收油气检测和模拟退火反演等技术, 使储层预测和气藏描述精度得到了明显提高, 具体方法包括 7 个方面: 应用岩性解释技术识别火山岩体; 应用频谱成像技术预测火山岩空间分布; 利用构造趋势面分析和三维体切片技术识别火山口; 应用波形聚类分析和频谱成像技术预测火山岩相分布; 应用模拟退火反演方法预测火山岩储层分布; 利用密度反演预测火山岩孔隙度; 应用地震能量衰减梯度检测火山岩储层含气性。

应用上述火山岩目标地震识别技术, 火山岩储层预测达到了较高的精度, 探井成功率达到

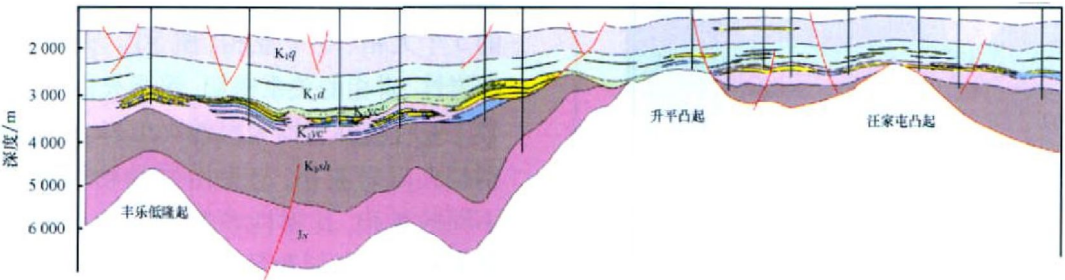


图 6 徐家围子断陷纵向气藏剖面

Fig. 6 Vertical profile of gas reservoirs in the Xujiaweizi fault depression

60%以上, 开发井成功率达到 90%以上, 提高了钻探成功率。

3.2.2 火山岩岩性测井识别技术

火山岩岩性的识别是火山岩及圈闭识别和评价的基础。对已知钻井岩心进行详细的观察、薄片鉴定和全岩化学成分分析; 利用常规测井确定各种岩性的电性、放射性等物理响应; 利用 ECS 测井确定岩石成分, 成像测井等确定岩石结构, 核磁测井等确定岩石孔隙, 最后, 应用主要成分分析法和神经网络法确定岩性。

营城组火山岩地层岩性复杂, 主要有流纹岩、凝灰岩、火山角砾岩、火山集块岩、安山岩和玄武岩, 用常规测井曲线进行分析, 流纹岩和凝灰岩典型测井曲线响应特征为低密度; 火山角砾岩和火山集块岩测井响应特征为相对高的密度、相对低的声波时差和中子孔隙度; 安山岩基本特征为低伽马 40~80 API 高密度 2.70~2.75 g/cm³, 高中子 5~10 PU, 钍、钾值低, 铁、镁矿物含量高, 电阻率相对低; 玄武岩特征与安山岩相近, 但密度和中子值较安山岩更高, 约 2.70~2.85 g/cm³, 中子 8~10 PU, 伽马更低, 约 20~50 API。

利用元素俘获测井技术识别火山岩岩性的方法, 寻找直接通过元素含量判别火山岩岩性的途径, 应用元素俘获测井 ECS 技术得到的二氧化硅、氧化钠、氧化钾、氧化铝、氧化铁的百分含量, 建立交会图来识别火山岩类型是比较有效的方法之一。由于火山岩命名有以矿物成分和岩石结构分类两种, ECS 只是识别地层矿物成分, 更精细的分类应结合 FM I 图像特征综合分类。利用核磁孔隙度与孔隙度测井曲线、电阻率曲线与孔隙度交会确定岩石骨架参数, 电阻率趋近于无穷大、孔隙度趋近于零时所对应的孔隙度测井值为骨架参数。

利用矿物分析鉴定 144 块火山岩样品, 在 TAS 图上分出 33 种岩性, 根据不同岩性对应的 12 种测井曲线响应数据, 采用 Q 型聚类分析方法, 按照“测井特征相近, 地质意义相同”的原则, 大致可以归为 8 类, 再通过 R 型因子分析和聚类分析, 掌握了不同测井响应之间的相关关系以及对岩性分类的贡献大小, 最后, 从 12 种测井响应中优选出 8 种指标, 做出了 6 张判别图版, 采用多元判别的方式进行岩性识别。采用上述图版和判别流程划分了 16 口井的岩性剖面, 根据可对比的资料来看,

精度达到了 80%以上。火山岩岩性测井识别技术, 提高了储层评价准确率。

3.2.3 火山岩气水层识别技术

针对火山岩储层的特殊性, 开展了综合气测录井和测井资料的储层综合评价技术, 建立了一系列气水层综合解释方法。在开展气测录井资料环境影响因素校正的基础上, 利用气测录井信息与试气结果相结合, 求取钻井液含气量、地面含气量、储层含气饱和度等项参数, 利用地层孔隙度等相关参数建立了 4 种气水层解释方法。结合试气成果, 应用常规测井资料建立了火山岩岩性识别与气水层快速解释图版。

与斯伦贝谢公司合作, 首次应用 ECS、成像、核磁等先进测井技术建立了判别火山岩岩性、求取火山岩骨架密度、计算孔隙度、缝洞孔隙度等储层参数的方法。应用核磁测井计算含气饱和度, 实现了定量评价气水层的目的。

火山岩气水层识别技术应用于生产实践, 气水层解释符合率达到 91%, 提高了解释符合率。

3.3 工程技术的完善是大气田发现的保障

3.3.1 完善地震技术, 为准确识别勘探目标打下基础

随着叠前偏移处理技术的日趋完善, 从 2005 年开始, 在徐家围子断陷全面推广了叠前时间偏移技术, 目前已完成 2 567.98 km² 三维资料的叠前时间偏移处理, 效果明显。在叠前时间偏移处理基础上, 开展构造解释、反演及火山岩识别工作, 使火山机构及其分布范围得到准确识别。在徐家围子识别优选火山岩、砂砾勘探目标 26 个, 面积 284 km² (图 7)。

3.3.2 完善钻井技术, 提高钻井时效性

为提高钻井时效性, 采取了优化设计, 改进工艺流程; 优选钻头, 试验高效钻井方式, 推进钻井速度加快; 强化参数, 提高钻头使用效果; 强化控制, 加强工程监测, 预防复杂和事故等措施。在开展钻井提速的同时, 持续不断地改进有机硅钻井液性能, 满足近平衡钻井保护油气层需要。

通过采用上述配套技术, 见到了明显钻井提速和气层保护效果, 所钻探井均有发现。2004 年,

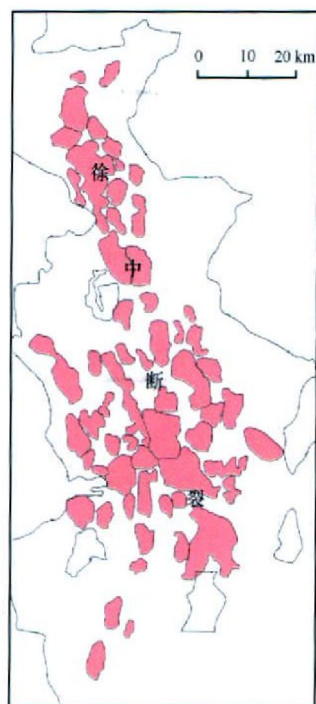


图 7 徐家围子断陷火山岩圈闭分布

Fig. 7 Distribution of volcanic traps in the Xujiaweizi fault depression

11口深探井平均井深 4 332 m, 平均机械钻速 3.28 m/h, 平均建井周期为 167.7 d, 比以往平均建井周期缩短 20 d。2005年, 钻井周期进一步缩短, 已完井 6口统计, 平均井深 3 967 m, 平均机械钻速 3.52 m/h, 平均建井周期 141.5 d, 从而保证了深井施工进度按时完成, 为完井后试气争取了时间。

3.3.3 完善压裂技术, 使勘探领域不断扩大

针对储层埋藏深 (3 500~4 500 m)、温度高 (140~180℃)、岩性致密 (最低渗透率 $0.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、孔隙度 4.0%、密度 2.53 g/cm^3)、储集空间复杂、地应力差异小、储层巨厚 (厚度超过 100 m, 最大单层厚度 168 m) 等难点, 我们针对耐高温地层测试工具、压裂管柱、压裂液、优化设计方法、现场实施控制方法等联合攻关, 研制了耐高温测试管柱、深井压裂管柱、新型高温压裂液, 形成了个性化压裂优化设计方法、测试压裂快速解释评价技术、压裂裂缝延伸控制技术, 基本形成了大庆深部火山岩复杂岩性储气层试气压裂增产改造技术。加砂量由 30~40 m^3 提高到 100 m^3 以上, 压后单井产量由不足 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 到超过 $100 \times 10^4 \text{ m}^3$, 砂砾岩物性下限孔隙度由 5%降低到 3%, 火山岩物性下限由 5%降低到 4%, 取得了显著效果。

4 结 语

徐家围子特殊岩性大型气田是我国第一个深层非常规火山岩天然气田, 是我国东部陆上目前发现的最大气田, 它的发现, 使大庆一举成为我国陆上第五大气区。是我国“十一五”期间油气勘探取得战略性重大突破之一。

庆深气田的发现, 翻开了松辽盆地油气勘探的新篇章, 形成了新的油气成藏理论、勘探方法及工艺技术系列, 对于石油地质理论的发展是一个新的贡献, 对于促进我国石油工业发展将发挥一定的作用。随着勘探的展开, 徐深气田将会进一步扩大规模, 它将为地方经济的发展、为百年油田建设、为东北老工业基地的振兴, 发挥不可估量的作用。

参 考 文 献

- 1 殷进根, 刘和甫, 迟海江. 松辽盆地徐家围子断陷构造演化 [J]. 石油学报, 2002, 23(2): 26~29
- 2 高瑞琪, 蔡希源. 松辽盆地油气田形成条件与分布规律 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1997. 12~40
- 3 李景坤, 刘伟, 宋兰斌. 徐家围子断陷深层烃源岩生烃条件研究 [J]. 天然气工业, 2006, 26(6): 21~24
- 4 王璞珺, 陈树民, 刘万洙. 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
- 5 张玉明, 李明, 李瑞磊. 松辽盆地南部深层系天然气成藏规律 [J]. 石油与天然气地质, 2006, 28(6): 841~848
- 6 周荔青, 雷一心. 松辽盆地断陷层系大、中型油气田形成条件及勘探方向 [J]. 石油与天然气地质, 2006, 28(6): 820~826
- 7 金晓辉, 林壬子, 邹华耀, 等. 松辽盆地徐家围子断陷火山活动期次与烃源岩演化 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 27(3): 349~355
- 8 Hawlander H M. Diagenesis and reservoir potential of volcanogenic sandstones—Cretaceous of the Surat basin, Australia [J]. Sedimentary Geology, 1990, 66(3/4): 181~195
- 9 Allen P A, Allen J R. Basin analysis principles and application [M]. Oxford London UK: Blackwell Scientific Publication, 1990
- 10 Wood D A. Relationships between thermal maturation indices calculated using Arrhenius equations and Lopation method implications for petroleum exploration [J]. AAPG Bulletin, 1988, 72(2): 115~134
- 11 Price L C. Geologic time as a parameter in organic metamorphism and vitrinite reflectance as an absolute paleothermometer [J]. Journal of Petroleum Geology, 1983, 6(1): 5~38
- 12 Sweeney J J, Burnham A K. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(10): 1 559~1 570

(编辑 高 岩)