

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

唐华风¹, 王璞珺¹, 姜传金², 边伟华¹, 黄玉龙¹

(1. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061; 2. 大庆油田勘探开发研究院, 大庆 163712)

摘 要 将火山机构分为火山口-近火山口相(CNCF)、近源相(PF)和远源相(DF)三个相带. 露头揭示这三个相带的倾向范围为: CNCF-40~70°, PF-25~45°, DF-20~35°. 这三个相带的裂缝线密度为: CNCF-10~30条/m, PF-3~25条/m, DF-2~11条/m. 这三个相带的相干值的关系为: CNCF<PF<DF. 优选地层倾向和相干体两种方法识别松辽盆地营城组隐伏火山机构. 在XS8井-XS4井区营城组火山岩旋回一中, 两种方法均识别出14个火山机构. 经钻井验证其准确率为100%. 将火山机构预测成果应用于庆深气田勘探方案, 使钻井成功率达到90%.

关键词 松辽盆地, 白垩系营城组, 地层倾向, 相干体, 隐伏火山机构, 物理模型, 火山岩储层

中图分类号 P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2007)02-0530-07

Physical model and seismic recognition of concealed volcanic edifices of Yingcheng Formation in Songliao Basin, Cretaceous, NE China

TANG Hua-feng¹, WANG Pu-jun¹, JIANG Chuan-jin², BIAN Wei-hua¹, HUANG Yu-long¹

(1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China;

2. Daqing Exploration & Development Institute, Daqing 163712, China)

Abstract Volcanic edifice is divided into three facies belts which are crater-near crater facies (CNCF), proximal facies (PF) and distal facies (DF). The dip ranges of the three facies belts in outcrops are listed: CNCF-40~70°, PF-25~45°, DF-20~35°. The liner density of fracture of the three facies belts are listed: CNCF-10~30 fractures per meter, PF-3~25 fractures per meter, DF-2~11 fractures per meter. The coherent value relation of the three facies belts is CNCF<PF<DF. Both dip angle and coherence cube methods are selected to recognize the buried volcanic edifices in Songliao Basin. Fourteen volcanic edifices are recognized in both two methods in the first volcanic cycle of Yingcheng Formation and the prediction perfectly corresponds to the drilling results in well XS8-well XS4 area. Successful ratio of wells attains 90% when the prediction results are employed in the exploration of Qingshen gas field.

Keywords Songliao Basin, Yingcheng Formation of Cretaceous, dip angle, coherence cubes, concealed volcanic edifices, physical model, volcanic reservoirs

0 引 言

火山机构(volcanic edifice)又称火山体、火山堆积物.指火山喷发时在地表形成的各种火山地形,如火山锥、火山穹丘、火山口、破火山口、熔岩高原等.有时还涉及火山颈、火山通道等地下结构^[1].文中的火山机构主要是指地面部分的火山锥和岩被(图

1),划分为火山口-近火山口相(crater-near crater facies -CNCF)、近源相(proximal facies -PF)和远源相(distal facies -DF)三个相带.

目前,松辽盆地深层火山岩探井布在CNCF区域的产能高,布在PF区域的产能低,布在DF区域的少有油气突破.为了提高火山岩勘探的成功率,火山机构的各个相带的识别是火山岩勘探的首要任

收稿日期 2006-11-10; 修回日期 2007-02-20.

基金项目 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2006CB701403)和国家自然科学基金面上项目(40372066号)联合资助.

作者简介 唐华风,男,1979生,四川泸县人,博士研究生,主要从事油气地质-地球物理研究.(E-mail: tanghfc@163.com)

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

务.松辽盆地火山机构的识别起于对火山岩体的识别^[2,3]和有井地区火山机构描述和储层建模^[4~7].随后根据火山机构的外部形态特征,采用构造趋势面方法^①成功的识别出无井区火山口明显的火山机构,这些研究有力的推动了松辽盆地火山岩气藏的勘探开发进程.

当火山锥体明显的火山机构勘探实践结束后,勘探目标转向寻求隐伏火山机构.对于隐伏的和遭受严重剥蚀的火山机构,应该寻求反映火山机构内部特征的识别方法.据火山机构物理特征,优选地层倾角和相干两种属性来识别隐伏火山机构.地层倾角属性反映地质体的外部形态和内部结构,相干属性反映地质体内部构造.利用上述两种方法准确识别出火山机构各个相带,为火山岩气藏勘探布井方案提供科学依据.

1 火山机构物理模型

在松辽盆地火山机构研究过程中,火山机构定义为一定空间和时间范围内,火山通道及其附近各种堆积物及其构造的总称,包括火山颈、火山口及火山口周围的火山岩相^[9].本文将理想火山机构分为火山口-近火山口相(CNCF)、近源相(PF)和远源相(DF)三个相带.CNCF由外形丘状、内部杂乱的熔岩构成,特征岩相为火山通道相、侵出相、具变形流纹构造的喷溢相和含火山弹的爆发相.PF由楔状和块状熔岩构成,特征岩相为具高角度流纹构造的喷溢相,假流纹构造的爆发相.DF由层状火山碎屑岩和沉火山碎屑岩构成,特征岩相为见层理的爆发相和交错层理的火山沉积相.上述三个相带的地层倾角、岩性和裂缝具有明显的差别(图1,表1),现分述如下.

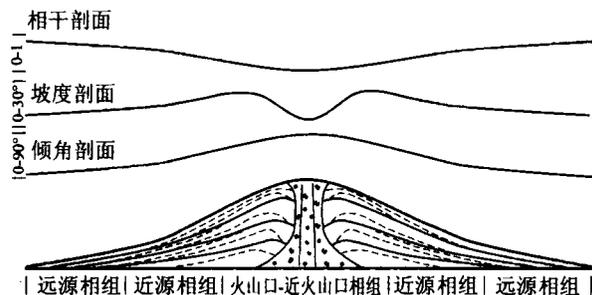


图1 火山机构物理模型

Fig. 1 Physical model of volcanic edifice

火山机构的坡度和倾角具有如下特征:由DF向PF过渡时坡度表现为缓慢增大,到了近火山口相区域坡度较快增大,到火山口地区坡度先增大后迅速变小(接近 0°).松辽盆地东南隆起区营城组火山岩露头测量结果显示,火山机构最小坡度为 $5\sim 10^\circ$,最大坡度为 $18\sim 30^\circ$.而地层倾角从DF向火山口是持续变大,越接近火山口地区地层倾角变化越快.露头测量结果表明:CNCF的地层倾角在 $40\sim 70^\circ$ 之间;而PF的地层倾角在 $25\sim 45^\circ$ 之间,以 $30\sim 40^\circ$ 居多;DF地层倾角在 $20\sim 35^\circ$ 之间,以 $20\sim 30^\circ$ 居多.各相带之间的倾角关系是:CNCF>PF>DF.

当岩性、岩石组构单一和孔缝不发育时,地质体速度和密度变化小,波形相似性好,所以相干性好,相干值大.当岩性、岩石组构复杂和孔缝发育时,地质体速度和密度变化大,波形相似性差,相干性差,相干值小.CNCF地区岩性最复杂,裂缝线密度最大(表1),所以相干性最差,相干值最小.DF由于裂缝不发育、岩性单一,所以相干性最好,相干值最大.而PF的岩性复杂程度和裂缝发育程度介于CNCF与DF之间,相干性较好,相干值较大.

当火山机构遭受剥蚀后,仅利用外部形态的方法无法识别出火山机构的各个相带.根据火山机构的内部结构和构造不随火山锥体遭受剥蚀而改变的特征,可知残留的古火山机构仍是倾角向火山口方向变大,相干值向火山口方向变小.所以利用倾角和相干属性可以识别遭受严重剥蚀的隐伏火山机构的各个相带.

2 火山机构地震识别方法

选用反映火山机构外部形态和内部结构的倾角属性和反映火山机构内部结构的相干体进行火山机构各相带的预测,下面分别介绍两种属性方法的特点.

2.1 地层倾角属性

倾角定义为时间梯度的大小,即在x和y(主测线与联络测线)方向分别检测倾角,然后由其梯度得到该点倾角值^[8],见式(1).

$$dip = \sqrt{\left(\frac{dtx}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dty}{dy}\right)^2}, \quad (1)$$

单位为毫秒/道(线).在同一工区内计算结果值越

① 大庆油田有限责任公司, 2005. 11. 徐深气田兴城地区深层构造精细刻画及储层预测研究. 徐兴气田营城组气藏新增天然气探明储量报告附件II.

表1 松辽盆地火山机构各相带特征

Table 1 Characters of each facies belts of volcanic edifice in Songliao basin

火山机构相带	岩相	形态	厚度 (m)	平面延伸 (km)	现地层 倾角	岩石类型	岩石结构	岩石构造	裂缝密度 (条/m)
火山口-近 火山口相 (CNCF)	火山通道 相、侵出 相、喷溢相 和爆发相	丘状和穹隆状	100~200	0.5~1.5	40~70°	珍珠岩, 隐爆 角砾岩, 熔 岩, 角砾熔 岩, 凝灰熔 岩, 集块岩	隐爆角砾结 构, 堆砌结 构, 集块结 构, 熔结角 砾结构, 球粒 结构	岩球构造, 岩枕 构造, 高角度流 纹构造, 假流纹 构造, 变形流纹 构造, 块状构 造, 气孔杏仁构 造, 粒序层理	10~30
近源相 (PF)	喷溢相和 爆发相	楔状和块状	50~100	1~3	30~45°	晶屑、岩屑熔 岩, 浆屑凝灰 熔岩	熔结角砾结 构, 熔结凝灰 结构, 碎斑结 构, 球粒结构	高角度流纹构 造, 假流纹构 造, 气孔杏仁构 造, 粒序层理	3~25
远源相 (DF)	爆发相和 火山沉积 相	层状	20~50	1~2	25~30°	凝灰岩, 沉火 山碎屑岩	凝灰结构, 碎 屑结构	平行层理, 交错 层理	2~11

注: 为松辽盆地东南隆起区营城组火山岩露头测量值

大表示倾角越大; 线间距或道间距不同的工区, 当具有相同计算结果值, 道间距或线间距小的工区实际倾角值大。

火山岩层中形成高倾角值的因素主要有四个: (1)火山喷出物在近火山口厚度大, 远离火山口厚度小, 形成坡降; (2)在火山机构中发育高角度下超的岩层; (3)火山岩的块断作用产生高角度断层; (4)区域运动使地层倾斜, 如果倾斜方向与地层倾向相同, 地层倾角就变大, 反之则变小。前三个因素是火山机构固有的特征, 第四个因素是引起误差的主要原因。

倾角方法能较为准确的识别出隐伏火山机构的 CNCF、PF 和 DF 的范围。

2.2 相干体

相干技术是一种量化计算波形相似性的一种方法, 由 Bahorich 于 1995 年提出^[9], 经过 Marfut^[10,11] 与 Gersztenforn^[12] 等人的改进, 使之成为断层自动解释的有效方法。目前相干体技术在国内得到了广泛应用和发展, 如利用相干技术识别出裂缝和断层^[13~17], 利用小波变换的相干算法得以实现高频相干体反映受大断裂控制的小断裂的信息^[18]。这些研究使利用相干体技术识别火山机构中的微小断层和裂缝的方法成为可能, 同时使根据裂缝特征利用地震资料划分埋藏火山机构各相带的方法成为可能。

笔者利用基于本征结构算法得到的相干体来识别火山机构, 下面简要介绍本征结构算法的基本原理^[12]: 在三维数据体中取一小的数据体 d_i , i 表示道数, j 表示采样点数, 则

$$D = d_{ij} \quad (2)$$

计算小数据体 D 的协方差矩阵

$$C = D^T D = \sum_{n=1}^N d_n d_n^T \quad (3)$$

则本征结构相干计算 (E_c) 可以定义为

$$E_c = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^j \lambda_j} \quad (4)$$

其中, λ_j 为协方差矩阵 C 的第 j 个本征值, λ_i 为 λ_j 中的最大值。

火山岩层中形成低相干值的因素主要有以下四个方面: (1)断层、裂缝; (2)岩性岩相的变化; (3)高倾角的地层; (4)低信噪比的地震资料。前三个因素反映火山机构的固有特征, 第四个因素为导致误差的主要原因。

相干体方法能较为准确划分出 CNCF、PF 和 DF 的范围。

上述两种方法从不同的角度均能识别出 CNCF、PF 和 DF。在实际应用中将两种属性结合起来使识别结果更加可靠。具体方法是将相干值小、倾角值大的区域划分为 CNCF, 将相干值小、倾角值较小或相干值较大、倾角值较大的区域划分为 PF, 将相干值大、倾角小的区域划分为 DF。

3 松辽盆地隐伏火山机构地震识别

隐伏火山机构指完成火山建造之后, 经受剥蚀改造失去原来的外部形态, 最后在差异性块断作用下被埋藏的火山机构。XS8 井-XS4 井区发育两个旋回的火山岩, 旋回一的火山机构遭受严重剥蚀, 并且埋藏于旋回二之下(图 2), 所以旋回一火山机构属

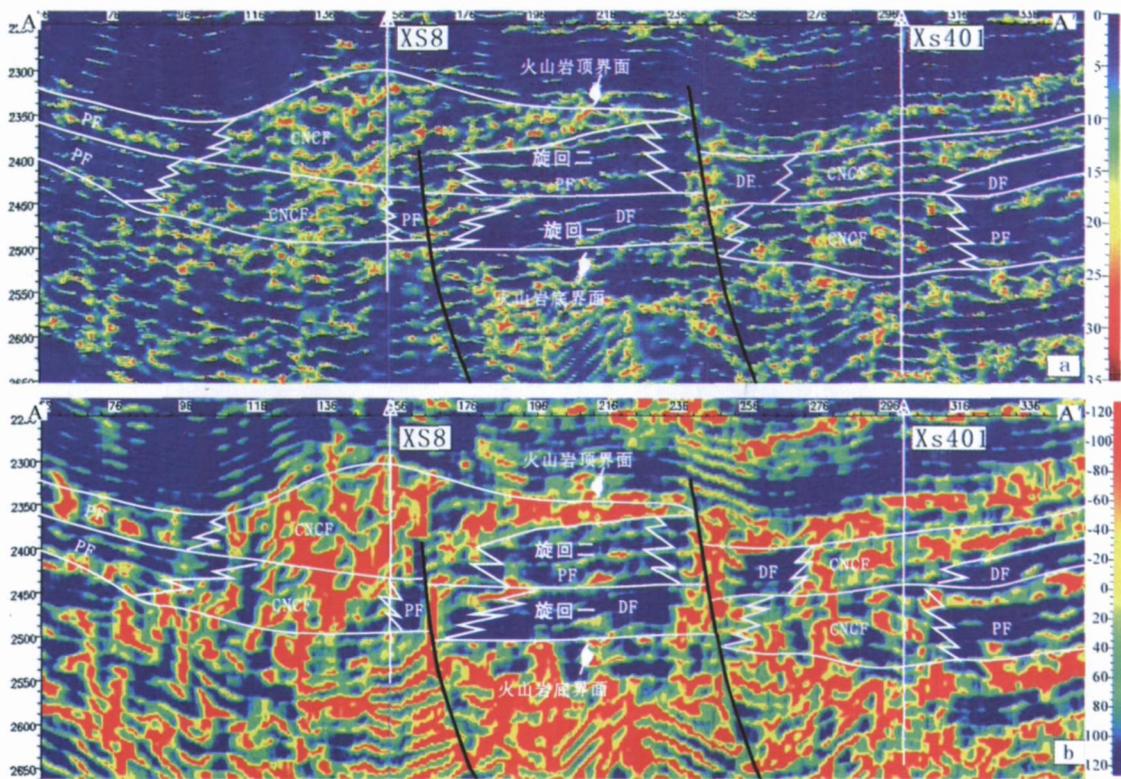


图2 XS8-XS401井区A→A'线地层倾角值剖面(a)和相干剖面(b)

(a) 暖色调表示倾角值大, 冷色调表示地层倾角值小, 倾角单位-毫秒/道;

(b) 暖色调表示相干性差, 冷色调表示相干性好; CNCF-火山口-近火山口相, PF-近源相, DF-远源相

Fig. 2 Dip angle(a) and coherence (b) sections of A→A' line crossing area of well XS8 well XS401

于隐伏火山机构. 火山岩层埋深在 2200 ~ 2600 ms, 主频为 30 Hz, 平均层速度为 5000 m/s. 区域地层倾角在 3 ~ 4° 之间. 以 XS8 井-XS4 井区营城组旋回一火山岩为例, 进行倾角和相干属性处理. 本次工作采用的纯波数据, 地震面元为 25 × 25 m, 采样率为 1 ms.

工区内共有 6 口钻井. XS2、XS201、XS401 井均揭示旋回一火山岩相有火山通道相或侵出相, 指示这三口井处在火山口位置. XS8 井也在旋回一火山岩中识别出厚度薄的火山口标志相-侵出相外带亚相, 属近火山口相. XS4 井揭示的岩性为具高角度流纹构造的流纹岩夹砾熔岩, 也说明 XS4 井属近火山口相. XS801 井缺失旋回一火山岩.

3.1 地层倾角属性计算结果分析

为了更好的反映火山机构的各相带之间倾角的微小变化, 以计算道为中心, 以 1 道为半径, 共 3 道来计算平均倾角. 图 2-a 为过 XS8 井-XS401 井的倾角剖面, 图上暖色调表示地层倾角值大, 冷色调表示地层倾角值小. XS8 井处在在大倾角值区域的边缘. XS401 井在大倾角值区域, 说明大倾角值区域可能

是火山口相-近火山口相. 因为在有断层的地区, 倾角值也明显变大. 此外在火山岩下伏地层中也出现倾角值较大的区域, 这与下伏地层中掀斜构造发育, 使地层发生倾斜有关.

由于 XS8 井-XS4 井区营城组区域地层倾角只有 3 ~ 4°, 属于小幅度构造, 对火山机构的倾角计算结果影响较小. 提取层段平均倾角来识别火山机构, 图 3-a 为旋回一火山岩平均倾角分布图. 大倾角值呈团块状和条带状分布. XS2、XS201、XS4、XS401 均处在在块状和条带状分布的大倾角值的区域. XS8 井处在在倾角大的区域的边缘. 所以将呈块状分布的大倾角平均值的区域划分为 CNCF. 呈条带状分布的大倾角平均值区域与断层在平面组合特征一致, 所以划分为断层.

3.2 相干属性计算结果分析

为了更好的反映由岩性和火山机构形成过程中产生的微断裂引起的不相干, 选取小时间孔径和小空间孔径来计算火山岩的相干值. 具体参数为: 平面上以计算道为中心, 以 2 道(50m)为半径的矩形空间孔径, 纵向上以计算点为中心, 以 2 个采样点(不

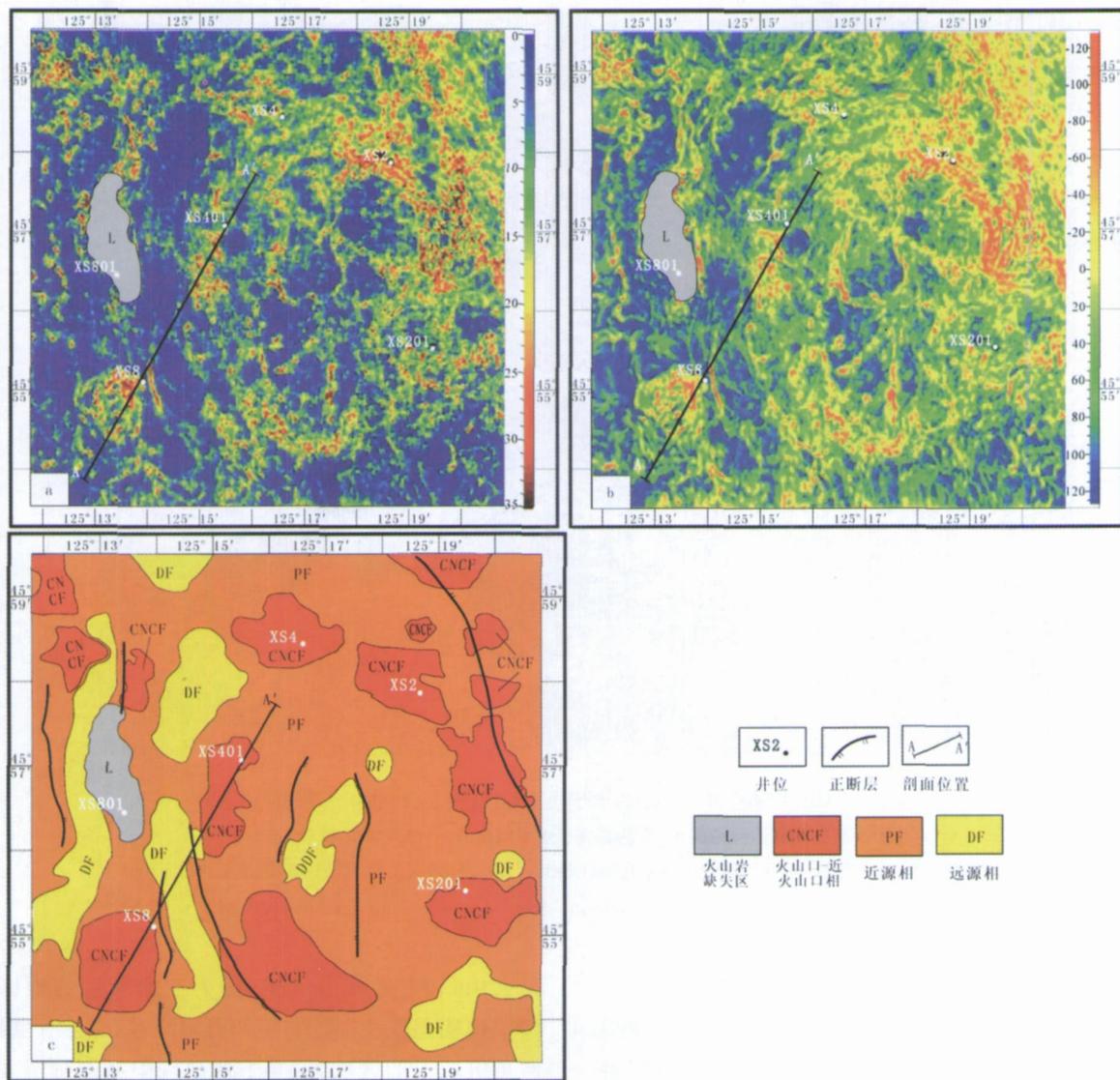


图3 XS8-XS4井区营城组火山岩旋回一平均倾角(a)、平均相干值(b)和火山机构(c)分布图
 Fig. 3 Distribution of average dip angle(a), average coherence value(b) and volcanic edifices(c) of first volcanic cycle of Yingcheng Formation in area of well XS8- well XS4

包括计算点)为半径(4ms, 约 10m)的时间孔径. 图 2b 为过 XS8 井-XS401 井的相干剖面, 图上暖色调表示相干性差的区域, 冷色调表示相干性好的区域. 在 CNCF 和断层的地区, 相干值明显变小. 此外在火山岩下伏地层中也出现相干值较小的区域, 这与下伏地层中掀斜构造发育有关. 图 3b 为平均相干值平面图, 小相干值呈块状和条带状分布. XS2、XS201、XS4、XS401 井均处于相干值低的区域. 此外 XS8 井处在小相干值区域的边缘. 证明块状相干值低的地区为 CNCF. 此外将条带状分布的低相干值区域解释为断层.

综上所述, 倾角值最大和相干值最低的区域为 CNCF, 倾角值较大和相干值较高的区域为 PF, 而

倾角值最小和相干值最高的区域为 DF. 综合倾角和相干两种属性方法, 在 XS8-XS401 井区识别出 14 个火山机构(图 3c). 与倾角属性方法相比, 相干方法反映的断层形态更为清楚.

图 3c 显示在右侧只识别出 CNCF 和 PF, DF 没有识别出来, 这与火山口个数多, 各个火山机构之间的 DF 与 PF 相互叠合, 由于 DF 厚度薄, PF 厚度大, 所以优势相为 PF, 倾角和相干属性表现为倾角较大、相干值较大. 左侧识别出火山机构的三个相带, 这与火山口个数少, 火山机构之间相互叠置的部位少, 优势相为 DF, 倾角和相干属性表现为大相干值和小倾角值. 此外, CNCF 主要沿着断裂呈串珠状分布, 反映了火山机构的分布受断裂的控制.

4 讨论与结论

露头揭示火山机构三个相带的倾角特征为: CNCF— $40 \sim 70^\circ$, PF— $25 \sim 45^\circ$, DF— $20 \sim 35^\circ$. 三个相带的相干值关系为: CNCF < PF < DF. 孔隙度和渗透率的特征为: CNCF > PF > DF, 表明 CNCF 是目前最有利的勘探目标区. 在 XS8 井—XS4 井区营城组火山岩旋回一中, 利用地层倾角和相干体两种属性均识别出 14 个火山机构. 经钻井验证其火山机构相带预测的准确率为 100%. 将火山机构预测成果应用于庆深气田勘探方案, 使钻井成功率达到 90%(表 2).

表 2 火山机构相带预测准确率和火山岩产气情况统计表

Table 2 Statistics of prediction accuracy of volcanic edifices belt and gas productivity of volcanic rocks

钻井	火山机构		火山岩产气情况
	预测相带	实际相带	
XS1—2	PF	PF	低产气流
XS13	CNCF	CNCF	工业气流
XS1—3	PF	PF	工业气流
XS3	CNCF	CNCF	工业气流
XS301	CNCF	CNCF	工业气流
XS4	CNCF	CNCF	工业气流
XS5	CNCF	CNCF	工业气流
XS6	CNCF	CNCF	工业气流
XS701	PF	PF	工业气流
XS9	CNCF	CNCF	工业气流

注: CNCF—火山口-近火山口相, PF—近源相, DF—远源相

利用地层倾角属性方法预测火山机构, 需要校正区域构造造成的倾角误差. 具体方法是当火山机构地层倾角与区域地层倾角同向时, 将倾角计算结果减去区域地层倾角就为真实倾角值; 反之, 将倾角计算结果加上区域地层倾角就为真实倾角值. 如果不进行误差校正, 在区域地层倾角大的地区倾角方法识别出的 CNCF、PF 和 DF 的位置与真实位置发生偏差.

由于不同规模火山机构的倾角和相干值存在差别, 如果利用同一个门槛值解释不同规模的火山机构, 将会遇到下面的问题. 当门槛值大的时候将会漏掉规模小的火山机构. 当门槛值小的时候虽然不漏掉小规模火山机构, 但大规模的火山机构将无法分辨出 DF, 所以针对不同规模的火山机构采用不同

的门槛值.

此外, 营城组厚度小于 50 米的火山机构, 虽然在钻井中发现火山口指示相-侵出相和火山通道相. 受地震资料精度的限制, 该方法还不能有效的识别.

致谢 论文在撰写过程中得到了吉林大学地球探测科学与技术学院杨宝俊教授和刘财教授的悉心指导, 在此深表谢意.

参 考 文 献 (References):

- [1] 《地质科学大辞典》编委会. 地质科学大辞典基础学科卷[M]. 北京: 地质出版社, 2006. 996.
- [2] 邵正奎, 孟宪禄, 王璞瑜. 松辽盆地储层火山岩地震反射特征及其分布规律[J]. 长春科技大学学报, 1999, 29(1): 33~36.
Shao Z K, Meng X L, Wang P J. Seismic reflection features and distribution law of volcanic rocks in the Songliao Basin[J]. Journal of Changchun University of Science & Technology, 1999, 29(1): 33~36.
- [3] 蒙启安, 门广田, 张正和, 等. 松辽盆地深层火山岩体、岩相预测方法及应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2001, 20(3): 21~24.
Meng Q A, Men G T, Zhang Z H, et al. Prediction method and its application of deep volcanic rock body and facies in Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2001, 20(3): 21~24.
- [4] 王璞瑜, 吴河勇, 庞彦明, 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 P J, Wu H Y, Pang Y M, 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.
- [5] 陈建文, 王德发, 张晓东. 松辽盆地徐家围子断陷营城组火山岩相和火山机构分析[J]. 地学前缘, 2000, 7(4): 371~379.
Chen J W, Wang D F, Zhang X D. Facies and assemblage of the Xujiaweizi volcanic rocks of the Songliao Basin[J]. Earth Sciences Frontiers, 2000, 7(4): 371~379.
- [6] 李长山, 陈建文, 游俊, 等. 火山岩储层建模初探[J]. 地学前缘, 2000, 7(4): 381~389.
Li C S, Chen J W, You J, et al. Preliminary study on volcanic reservoir modeling[J]. Earth Sciences Frontiers, 2000, 7(4): 381~389.
- [7] 黄玉龙, 王璞瑜, 冯志强, 等. 松辽盆地改造残留的古火山机构与现代火山机构的类比分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(1): 65~72.
Huang Y L, Wang P J, Feng Z Q, et al. Analogy of physical features amongst modern, ancient and buried volcanoes: a case study from Songliao Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2007, 37(1): 65~72.

- [8] 王永刚, 李振春, 刘礼农, 等. 利用地震信息预测储层裂缝发育带[J]. 石油物探, 2000, 39(4): 57~63.
Wang Y G, Li Z C, Liu L L, *et al.* Using Seismic Data to Predict Fractured Zones of Reservoir[J]. GPP, 2000, 39(4): 57~63.
- [9] Bahorich M, Farmer S. 3-D seismic discontinuity for faults and stratigraphic features: The coherence cube[J]. The Leading Edge, 1995, 14(10): 1053~1058.
- [10] Marfurt K J, Kirilin R L, Farnmer S L, *et al.* 3-D seismic attributes using a semblance-based coherency algorithm[J]. Geophysics, 1998, 63(4): 1150~1165.
- [11] Marfurt K J, Sudhaker V, Gersztenkorn A, *et al.* Coherency calculations in the presence of structural dip[J]. Geophysics, 1999, 64(1): 104~111.
- [12] Gersztenkorn A, Marfurt K J. Eigen structure-based coherence computations as an aid to 3-D structural and stratigraphic mapping[J]. Geophysics, 1999, 64(5): 1468~1479.
- [13] 王延光, 杜启振. 泥岩裂缝性储层地震勘探方法初探[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(1): 494~501.
Wang Y G, Du Q Z. Study of seismic methods in detecting shale-fracture reservoirs[J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(1): 494~501.
- [14] 张进铎. 地震解释技术现状及发展趋势[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(2): 578~587.
Zhang J D. Present status and future trend of seismic data interpretation technique[J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(2): 578~587.
- [15] 杨勤勇. 全三维地震解释[J]. 地球物理学进展, 1999, 14(3): 128~137.
Yang C Y. Full 3D seismic interpretation[J]. Progress in Geophysics, 1999, 14(3): 128~137.
- [16] 陈国俊, 王纬, 张宏. 地震相干体软件开发及其应用效果分析[J]. 工程地球物理学报, 2004, 1(5): 399~403.
Chen G J, Wang W, Zhang H. Seismic coherence cube software development and its applied result analysis[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2004, 1(5): 399~403.
- [17] 段云卿, 覃天, 张联盟, 等. 基于体属性的地震相干技术[J]. 石油地球物理勘探, 2006, 41(4): 442~446.
Duan Y Q, Qin T, Zhang L M, *et al.* Seismic coherence technique based on volume attributes[J]. OGP, 2006, 41(4): 442~446.
- [18] 王西文, 杨孔庆, 周立宏, 等. 基于小波变换的地震相干体算法研究[J]. 地球物理学报, 2002, 45(6): 847~852.