

王力圆,唐华风,王璞珺,等. 松辽盆地长岭断陷火山岩相地震特征及其响应关系. 地球物理学进展, 2012, 27(1):0271-0278, doi:10.6038/j.issn.1004-2903.2012.01.030.

Wang L Y, Tang H F, Wang P J, *et al.* The seismic reflection characteristics and response relationship of volcanic rocks lithofacies in Changling fault depression, Songliao basin. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2012, 27(1):0271-0278, doi:10.6038/j.issn.1004-2903.2012.01.030.

松辽盆地长岭断陷火山岩相地震特征及其响应关系

王力圆^{1,2}, 唐华风^{1*}, 王璞珺¹, 杨波^{1,3}

(1. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061; 2. 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074;

3. 中国地质大学(北京)海洋学院, 北京 10083)

摘 要 火山岩储层发育受岩性岩相的控制, 为了提高岩性岩相地震识别的精度, 选择松辽盆地南部长岭断陷营城组和火石岭组典型钻井火山岩进行井旁地震相分析, 分别建立了酸性和中基性火山岩的岩相识别的模版. 酸性与中基性火山岩最明显的差别为爆发相和喷溢相之间的差异, 酸性岩爆发相具有席状、板状、平行—亚平行反射, 连续性好、局部中等、强振幅、低频的特征; 酸性岩喷溢相具有楔状、局部透镜、波形反射特征, 连续性中—差, 中弱振幅、见中强振幅, 中高频特征. 中基性岩爆发相具有板状、楔状、蠕虫形反射、偶见亚平行反射, 中高振幅, 中高频, 连续性差、见连续性中—好的特征; 中基性岩喷溢相具有板状、楔状、平行—亚平行反射、局部波形反射, 连续性中等、局部较差, 中强振幅, 中频、局部高频的特征. 根据酸性、中基性火山岩不同的电性特征, 结合火山岩段表现的地震内部反射结构、几何形态等地震相特征. 总结出不同火山岩之间地震相与测井相的对应关系, 为新区识别火山岩相、预测火山岩储层, 划分有利储集相带提供依据.

关键词 松辽盆地南部, 营城组, 火石岭组, 火山岩, 地震相

doi:10.6038/j.issn.1004-2903.2012.01.030

中图分类号 P631

文献标识码 A

The seismic reflection characteristics and response relationship of volcanic rocks lithofacies in Changling fault depression, Songliao basin

WANG Li-yuan^{1,2}, TANG Hua-feng^{1*}, WANG Pu-jun¹, YANG Bo^{1,3}

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

2. Faculty of Earth Resources, China university of Geosciences, Wuhan 430074, China;

3. School of ocean sciences, China university of Geosciences, Beijing 10083, China)

Abstract The volcanic reservoir is predominantly controlled by lithology and lithofacies, in order to improve the seismic identification precision of lithology and lithofacies, well-neighboring seismic facies of typical drilling volcanic rocks from the Yingcheng Formation and Huoshiling Formation in the Changling fault depression, the South of the Songliao basin are analysed. Relevant recognition models for acidic and intermediate—basic volcanics facies are set up, among which there is the most significantly difference; the former is explosive facies and the latter is effusive facies. The former is characterized by sheet drape, slaty, parallel-subparallel reflection structure, good continuity, strong amplitude and low frequency, whose distribution range is bigger than the latter. The latter is characterized by slatywedge—shaped, parallel-subparallel reflection structure, partial vermicular reflection structure, middle continuity, middle-strong amplitude and middle frequency, whose distribution is bigger than the former. Based on

收稿日期 2011-05-10; 修回日期 2011-10-11. 投稿网址 <http://www.progeophys.cn>

基金项目 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2009CB219303)、东北亚生物演化与环境教育部重点实验室和吉林大学“211”工程三期建设项目及 2009 年教育部基本科研业务费(“吉林大学创新团队发展计划”)联合资助.

作者简介 王力圆,男,1985 年 8 月生,博士研究生,矿产普查与勘探专业(E-mail:wangliyuan030101@163.com)

* 通讯作者 唐华风,男,主要从事油气地质—地球物理研究.(E-mail:tanghfhc@jlu.edu.cn)

their distinct features of the electric logging responses, internal seismic reflection structures and geometric shape of the volcanic rocks, the corresponding relation of the different connection between seismic facies and logging facies is summed up, which provides a basis for identifying volcanic facies, predicting volcanic reservoirs and dividing favorable reservoir facies belts for a new area.

Keywords the southern of Songliao basin, Yingcheng formation, Huoshiling formation, volcanic rock; seismic facies

0 引言

火山岩作为一种特殊的储集层逐渐成为油气勘探的重要目标,勘探潜力受到油气勘探界的广泛重视.已经成为油气勘探的新领域和油气储量增长的突破口^[1],松辽盆地断陷层火山岩广泛发育,断陷层具有形成大型天然气藏的地质条件.火山岩获得了油气勘探的重大突破,揭示了松辽盆地深层火山岩具有良好的油气勘探前景^[2].火山岩的储层类型和物性受岩性岩相的控制^[3-5],熔岩以气孔和裂缝为主,碎屑岩以角砾间孔、溶蚀孔和裂缝为主.所以利用地震资料识别出火山岩相对

勘探开发具有重要指导意义,利用属性分析技术实现火山机构-岩相带的空间识别^[6-11],目前对于松辽盆地火山岩已开展了火山岩相地震识别的研究^[12-15],并取得了丰富的成果.加深了对火山机构相带地震响应的认识^[16-18],对于火山岩相地震响应特征研究还需要加强,为此本文以松辽盆地南部长岭断陷营城组和火石岭组火山岩为例进行酸性岩和中基性岩地震响应特征研究,建立其地震识别模版,为火山岩勘探提供依据.

1 火山岩岩性岩相特征

根据火山岩分类方案及火山岩相分类方案^[3,19]

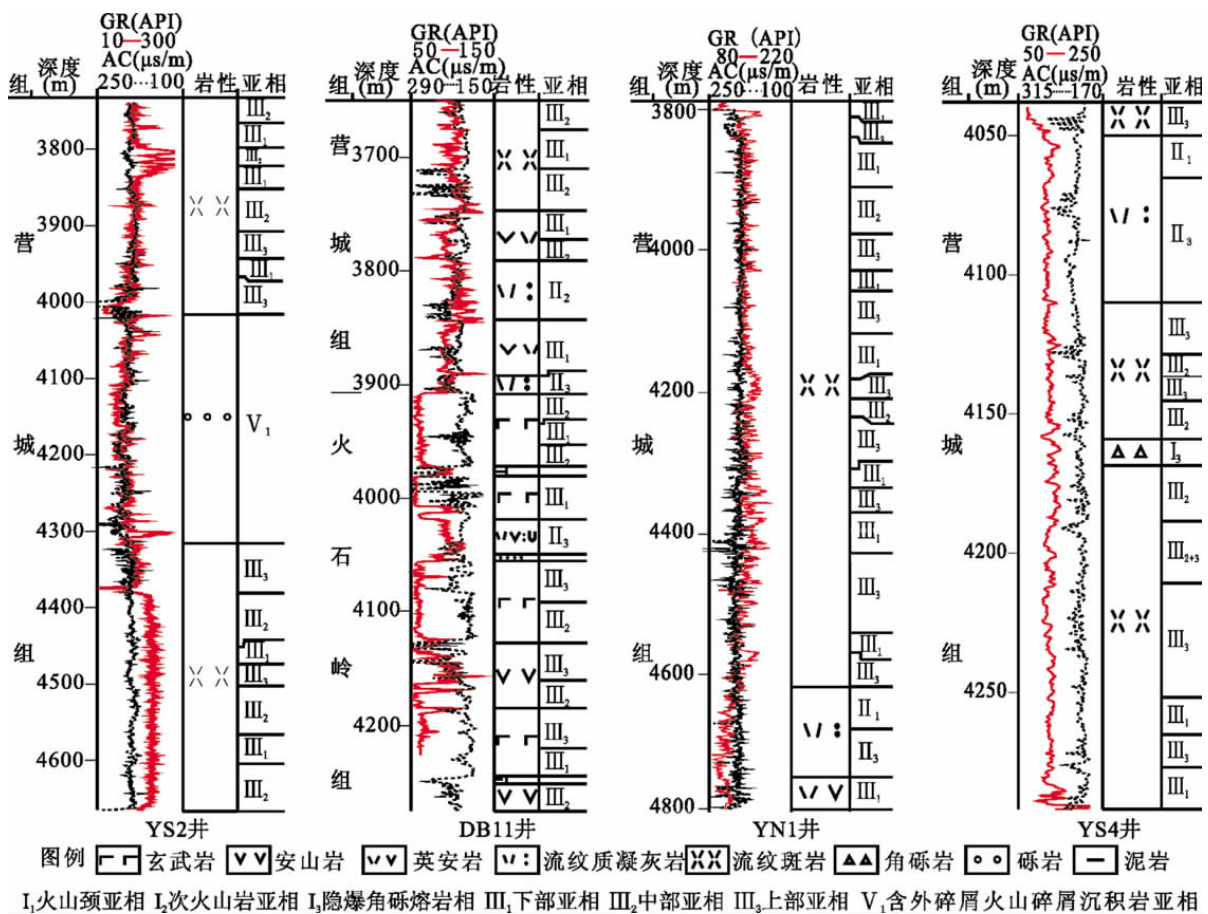


图 1 松辽盆地长岭断陷典型钻井岩性岩相特征

Fig. 1 the lithology and lithofacies characteristics of typical drilling in changling fault depression, Songliao basin

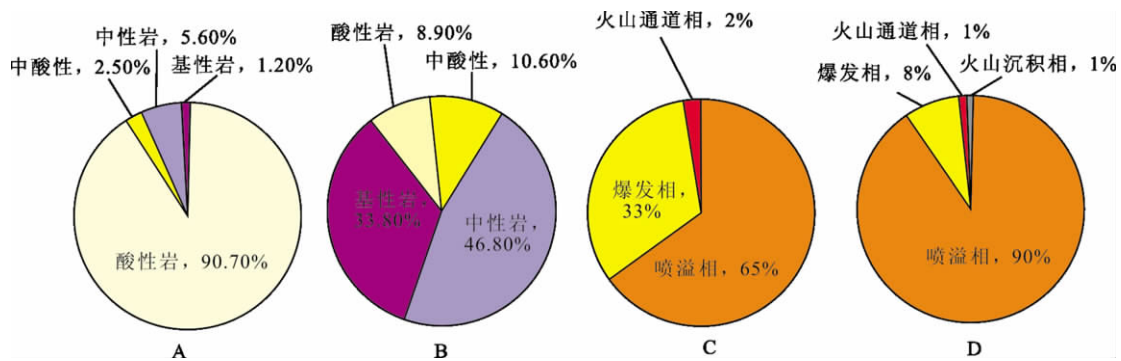


图 2 长岭断陷营城组(A,C)与火石岭组(B,D)火山岩岩性岩相特征

注:据长岭断陷 120# 全井段岩性统计结果

Fig. 2 the characteristics of Yingcheng Formation and huoshiling Formation volcanic rocks lithology and lithofacies in changling fault depression

对长岭断陷火山岩进行研究,火山岩在长岭断陷主要分布在两个层位:营城组和火石岭组.营城组以中酸性为主,火石岭组以中基性为主.

1.1 营城组

营城组钻遇岩性从下往上岩石序列为:中基性岩,包括安山岩、安山玄武岩、玄武岩、安山质角砾/集块岩;酸性岩,以流纹质碎屑岩、碎屑熔岩为主,见少量流纹岩.根据全井段火山岩统计,营城组火山岩主要发育酸性、中酸性、中性、基性 4 类 14 种岩石类型图 1. 根据目前钻井揭示情况,全井段火山岩统计,长岭断陷酸性岩约占 90.7%,主要为流纹岩;中酸性岩约占 2.5%,主要为英安质凝灰岩和英安岩;中性岩约占 5.6%,主要为安山岩;基性岩约占 1.2%,主要为玄武岩.营城组火山岩相以 3 相 8 种亚相为主图 2,主要为火山通道相隐爆角砾岩亚相、火山颈亚相;爆发相热碎屑流亚相、热基浪亚相、空落亚相,喷溢相上部亚相、中部亚相、下部亚相.

1.2 火石岭组

火石岭组火山岩岩性以中基性岩为主(图 2B),跟火石岭组建组剖面(长春石碑岭)岩性特征相似.长岭断陷中性岩约占 46.8%,主要为安山岩;基性岩约占 33.8%,主要为玄武岩;酸性岩约占 8.9%,中酸性岩约占 10.6%.火石岭组火山岩发育有 4 相 9 种亚相(图 2D):火山通道相火山颈亚相、次火山岩亚相;爆发相空落亚相、热基浪亚相、热碎屑流亚相;喷溢相下部亚相、中部亚相、上部亚相;火山沉积相再搬运火山碎屑沉积亚相.

2 火山岩相地震反射特征

火山岩地层的地震反射特征可通过地震参数、反射结构与地震相、地震地层结构进行解释^[20-22],松辽盆地长岭断陷火山岩营城组和火石岭组火山岩极为发育,DB11 井以中基性岩为主,喷溢相和爆发相热碎屑流亚相为主,具有多期次多火山口的喷发特征,YS2 井在地震剖面上可见四个喷发期次,相互叠加,各个相带都发育,中部夹一套沉积岩层,YN1 井火山口相带分布集中,喷发期次连续性好,流纹岩分布广泛,YS4 井中部发育火山沉积相组合,下部喷溢相和上部爆发相特点明显,分布连续性较好.

对研究区营城组、火石岭组 12 口钻井的火山岩相并旁地震反射特征的横向和纵向的精细刻画及 65 条地震剖面的分析.并结合钻井资料及顶底界面的岩石物理特征研究可以发现酸性火山岩和中基性火山岩岩相在特定层位限定下的不同地震反射特征.

2.1 酸性火山岩相地震反射特征

火山通道相:丘型,透镜状,形态多不规则,多见杂乱反射,中弱振幅,连续性差—中等,中高频,偶见低频;爆发相:席状,板状,平行—亚平行反射结构,连续性好,局部中等,强振幅,低频,分布范围较中基性岩爆发相大图 3C. 喷溢相:楔状,局部透镜,波形反射特征,连续性中差,见连续性中好.中弱振幅,见中强振幅,中高频;火山沉积相:席状,板状,平行反射结构,连续性好,局部中差,强振幅,中高频,见低频.横向上与喷溢相中下部亚相及爆发相空落亚相组合.(图 3B、图 3D)

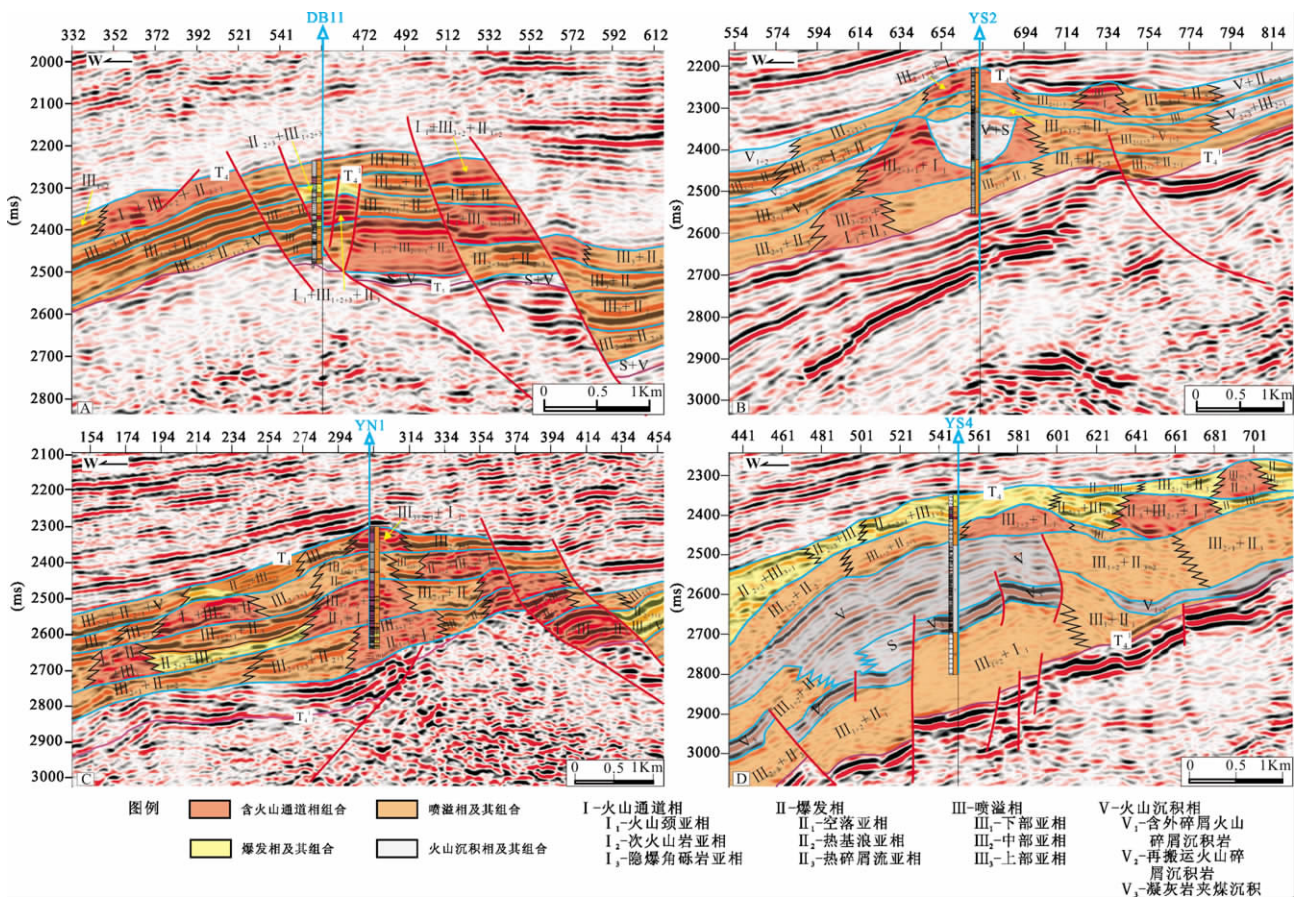


图 3 松辽盆地长岭断陷 DB11 井(A)、YS2 井(B)、YN1 井(C)、YS4 井(D)火山岩相并旁地震反射特征

Fig. 3 Seismic reflection characteristics of volcanic facies cross Well DB 11, Well YS 2, Well YN 1 and Well YS 4, Changling fault depression, Songliao basin

2.2 中基性火山岩相地震反射特征

火山通道相:丘型,透镜状,强振幅,连续性中一差,分布范围广;爆发相:板状,楔状,见蠕虫形反射结构,偶见亚平行反射结构,中高振幅,中高频,连续性差,见连续性中一好;喷溢相:板状,楔状,见平行—亚平行反射结构,局部波形反射结构特征,连续性中等,局部较差,中强振幅,中频,局部高频,分布范围较酸性岩广;火山沉积相:席状,板状,平行—亚平行反射结构,连续性好—中,多中频,见低频。(见图 3A)

3 火山岩相地震响应关系

分析研究单井的火山岩岩性、岩相、旋回、结构构造、裂缝及孔隙特征,然后利用地震、测井资料对比研究火山岩的这些地质属性,归纳总结其响应综合特征^[23-28]。本文分析了松辽盆地南部长岭断陷 11 口井火山岩测井相特征(表 1),依据岩心资料及对测井参数分析,建立火山岩亚相—测井识别模式,归纳总结出长岭断陷层火山岩 4 相 10 亚相岩相和

测井曲线的对应关系(图 4)。

结合九台地区营城组野外露头及实测剖面资料,可知酸性岩喷溢相的规模为延伸范围 1.3~2.7km,厚度为 10~130m,出露高度 40~140m,外形多为楔状形、丘状、馒头状,可与酸性火山岩相的楔状、透镜地震反射外形对应。酸性岩爆发相延伸范围 1~4km,厚度为 50~200m,呈平坦状局部丘状,可与其席状、板状的地震反射外形对应。中基性岩喷溢相延伸范围小于 3km,厚度 4~15m,呈平坦至缓坡状,可与其板状、楔形地震反射外形对应。中基性岩爆发相延伸范围 3~3.5km,厚度 25~30m,呈多锥状,可与丘形、楔形地震反射外形对应。

酸性岩喷溢相的自然伽马(GR)曲线形态呈低幅度齿形,声波时差(AC)曲线形态呈低幅齿化、微齿化,取心段的测井曲线值为 GR 最大值为 190API,最小值为 135API,平均值为 141API—160API;AC 最大值为 205 μ s/m,最小值为 174 μ s/m,平均值为 187 μ s/m~192 μ s/m,该特征与中弱振幅,中高频,连续性中一好的地震反射特征对应。酸

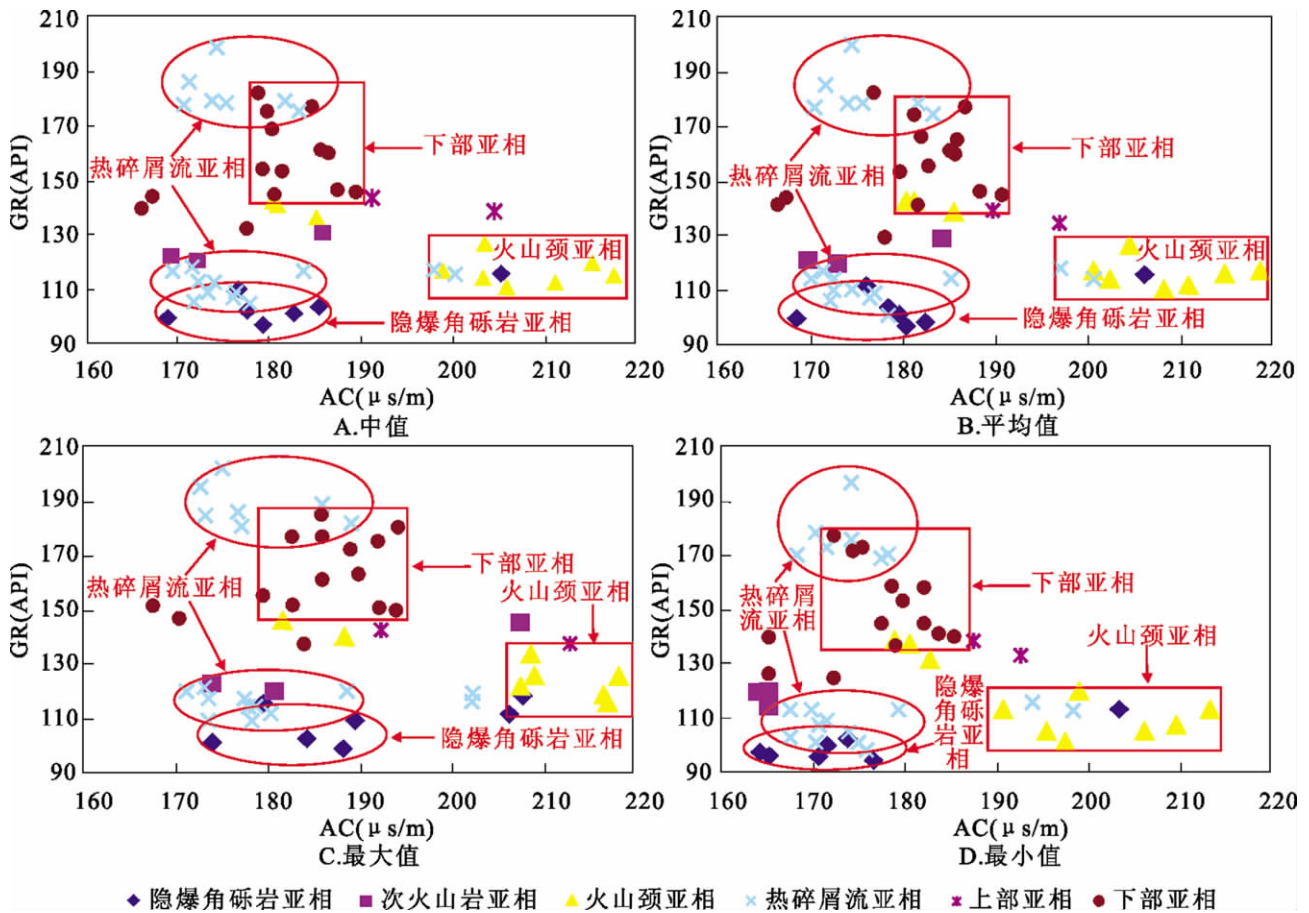


图 4 长岭断陷营城组火山岩岩相声波时差(AC)-自然伽马(GR)交会图

Fig. 4 Volcanic rock lithofacies AC—GR crossplot of Yingcheng formation in changling fault depression area

性火山岩爆发相自然伽马曲线形态低幅齿化、微齿化,声波时差曲线形态呈低幅—中高幅齿化,取心段的测井曲线值为 GR 最大值为 197API,最小值为 91API,平均值为 120API-132API; AC 最大值为 236 μ s/m,最小值为 178 μ s/m,平均值为 206 μ s/m,该特征与强振幅,低频的地震反射特征相对应。中基性火山岩喷溢相自然伽马曲线,声波时差曲线形态均呈低幅齿化;取心段的测井曲线值为 GR 最大值为 106API,最小值为 39API,平均值为 58API-77API; AC 最大值为 264 μ s/m,最小值为 182 μ s/m,平均值为 200 μ s/m~224 μ s/m,该特征与中强振幅、中高频、连续性中等的地震反射特征相对应。中基性火山岩爆发相自然伽马曲线呈中幅反向齿化,声波时差曲线形态呈微齿化,取心段的测井曲线值为 GR 最大值为 111API,最小值为 17API,平均值为 37API-85API; AC 最大值为 219 μ s/m,最小值为 178 μ s/m,平均值为 192 μ s/m~211 μ s/m,该特征与中高振幅,中高频,连续性一般较差的地震反射特征相对应。测井曲线的形态反映了地震相的内部形

态,酸性火山岩自然伽马曲线形态呈钟形—箱形,曲线近平直,声波时差曲线形态平直,在地震相上表现为席状、波状。中基性火山岩自然伽马曲线形态呈箱形—漏斗形,声波时差曲线形态呈箱形,在地震相上表现为楔状,局部透镜状。

利用了声波时差(AC)、自然伽马(GR)测井曲线,分别取了平均值、中值、最大值和最小值。根据不同的取值类型以及不同的曲线类型组合,制作了两两不同的三类交会图。在 AC-GR 交会图中(图 4),火山通道相隐爆角砾岩亚相(I 3)显示出低声波、低伽马的特征,声波时差值为 175~185 μ s/m,伽马值为 90~110 API;喷溢相下部亚相(III 1)显示出中声波、中伽马的特点,声波时差值为 180~190 μ s/m,伽马值为 130~180 API。爆发相热碎屑流亚相(II 3)在图版中的低声波低伽马和低声波高伽马区域均有出现,在低声波低伽马区域,声波时差值为 170~185 μ s/m,伽马值为 100~120 API;在低声波高伽马区域,声波时差值为 170~185 μ s/m,伽马值为 180~200 API。

表 1 松辽盆地长岭断陷营城组典型火山岩岩相测井相特征
Table 1 Typical volcanic rock lithofacies and longging facies characteristic of Yingcheng formation in Changling facies depression, Songliao basin

Table with 17 columns: 相, 亚相, 自然伽马 GR(API), 深/浅侧向电阻率 LLD/LLS(Omega * m), 声波时差 AC(us/m), 典型实例. Rows include volcanic facies like 火山通道相, 爆发相, 喷溢相, 火山沉积岩相.

4 结论

4.1 长岭断陷营城组火山岩主要发育酸性、中酸性、中性、基性 4 类 14 种岩石类型. 岩相以喷溢相为主, 爆发相以热碎屑流亚相为主; 火山沉积相相对较少, 火山通道相最少. 火山岩整体以中基性岩为主. 中性岩主要为安山岩; 基性岩主要为玄武岩, 岩相以喷溢相为主, 爆发相相对较少.
4.2 酸性与中基性火山岩最明显的差别为爆发相和喷溢相之间的差异, 酸性岩爆发相具有席状, 板状, 平行—亚平行反射, 连续性好、局部中等, 强振幅, 低频的特征; 酸性岩喷溢相具有楔状、局部透镜, 波形反射特征, 连续性中—差, 中弱振幅、见中强振幅, 中高频特征.
4.3 中基性岩爆发相具有板状, 楔状, 蠕虫形反射结构、偶见亚平行反射结构, 中高振幅, 中高频, 连续性差、见连续性中—好的特征; 中基性岩喷溢相具有板状, 楔状, 平行—亚平行反射、局部波形反射, 连续性中等、局部较差, 中强振幅, 中频、局部高频的

特征.

参 考 文 献 (References):

[1] 张子枢, 吴邦辉. 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.
[2] 谢晓安, 周卓明. 松辽盆地深层天然气勘探实践与勘探领域. 石油与天然气地质, 2008, 29(1): 113-119.
[3] 王璞珺, 迟元林, 刘万洙等. 松辽盆地火山岩相: 类型、特征和储层意义. 吉林大学学报 (地球科学版), 2003, 33(4): 449-456.
[4] 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. 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. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)* (in Chinese), 2006, 36(5): 805-812 .
- [5] 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. *石油与天然气地质*, 2003, 24(1): 18-23 .
Wang P J, Chen S M, Liu W Z, *et al.* Relationship between volcanic facies and volcanic reservoirs in Songliao Basin. *Oil & Gas Geology* (in Chinese), 2003, 24(1): 18-23 .
- [6] 王从镇, 龚洪林, 许多年等. 高分辨率相干体分析技术及其应用. *地球物理学进展*, 2008, 23(5): 1575-1578 .
Wang C B, Gong H L, Xu D N, *et al.* High-resolution coherency analysis technique and its application. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2008, 23(5): 1575-1578 .
- [7] 匡朝阳, 贺日政, 高锐等. 火成岩气藏储层预测及勘探技术——以松辽盆地长岭断陷为例. *地球物理学进展*, 2009, 24(2): 602-608 .
Kuang Z Y, He R Z, Gao R, *et al.* A technique of forecasting and exploring volcanic reservoirs—an example of Changling Fault-depression in Songliao Basin. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2009, 24(2): 602-608 .
- [8] 高建荣, 郭彦如, 徐旺林. 地层等时格架技术. *地球物理学进展*, 2010, 25(5): 1752-1756 .
Gao J R, Guo Y R, Xu W L. The isochronous sequence stratigraphy framework technology. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2010, 25(5): 1752-1756 .
- [9] 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*, 2011, 54(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, 54(2): 343-348 .
- [10] 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, 54(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, 54(2): 368-373 .
- [11] 段春节, 吴汉宁, 马承杰等. 基于高阶统计量的相干体算法在地震中深层构造解释中应用. *地球物理学进展*, 2009, 24(2): 640-643 .
Duan C J, Wu H N, Ma C J, *et al.* The application of higher-order statistics coherency algorithm in seismic data interpretation. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2009, 24(2): 640-643 .
- [12] 赵国连, 张岳桥. 大庆火山岩地震反射特征与综合预测技术. *石油勘探与开发*, 2002, 29(5): 44-46 .
Zhao G L, Zhang Y Q. Seismic reflection character of volcanic reservoir of Daqing and the comprehensive prediction technology. *Petroleum Exploration and Development* (in Chinese), 2002, 29(5): 44-46 .
- [13] 王建民, 杨冬, 魏修成等. 多分量地震资料预测松辽盆地兴城地区深层火山岩与有利含气带. *地球物理学报*, 2007, 50(6): 1914-1923 .
Wang J M, Yang D, Wei X C, *et al.* Predicting deep volcanic rocks and favorable gas zone near Xingcheng area in Songliao Basin using multi-component seismic data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, 50(6): 1914-1923 .
- [14] 唐华凤, 王璞珺, 姜传金等. 波形分类方法在松辽盆地火山岩相识别中的应用. *石油地球物理勘探*, 2007, 42(4): 440-444 .
Tang H F, Wang P J, Jiang C J, *et al.* Application of waveform classification to identify volcanic facies in Songliao Basin. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 2007, 42(4): 440-444 .
- [15] 杨立英, 李瑞磊. 松辽盆地南部深层火山岩、火山机构和火山岩相地质—地震综合识别. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2007, 37(6): 1083-1090 .
Yang L Y, Li R L. Integrated recognition with geologic and seismic methods on the volcanic rocks, volcanic edifices and volcanic facies in southern deep Songliao Basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)* (in Chinese), 2007, 37(6): 1083-1090 .
- [16] 吴颜雄, 王璞珺, 宋立忠等. 松辽盆地营城组火山机构相带地震—地质解译. *地球物理学报*, 2011, 54(2): 545-555 .
Wu Y X, Wang P J, Song L Z, *et al.* Seismic volcanostratigraphy of Yingcheng formation in the Songliao basin, Cretaceous, NE China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(2): 545-555 .
- [17] 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*, 2011, 54(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, 54(2): 556-562 .
- [18] 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*, 2011, 54(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, 54(2): 499-507 .
- [19] 王璞珺, 郑常青, 舒萍等. 松辽盆地深层火山岩岩性分类方案. *大庆石油地质与开发*, 2007, 26(4): 17-22 .
Wang P J, Zheng C Q, Shu P, *et al.* Classification of deep volcanic rocks in Songliao Basin. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing* (in Chinese), 2007, 26(4): 17-22 .
- [20] 程日辉, 李飞, 沈艳杰等. 火山岩地层地震反射特征和地震—地质联合解释: 以徐家围子断陷为例. *地球物理学报*, 2011, 54(2): 611-619 .
Cheng R H, Li F, Shen Y J, *et al.* The seismic reflection features of volcanic stratum and the seismic-geological interpretation: The case study in Xujiaweizi faulted depression, Songliao Basin. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(2): 611-619 .
- [21] 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(2): 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, 54(2): 597-610 .
- [22] 唐华凤, 李瑞磊, 吴艳辉等. 火山地层结构特征及其对波阻

- 抗反演的约束. 地球物理学报, 2011, 54(2): 620-627 .
Tang H F, Li R L, Wu Y H, *et al.* Textural characteristics of volcanic strata and its constraint to impedance inversion. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2011, 54(2): 620-627
- [23] 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. 地球物理学进展, 2007, 22(2): 530-536 .
Tang H F, Wang P J, Jiang C J, *et al.* Physical model and seismic recognition of concealed volcanic edifices of Yingcheng Formation in Songliao Basin, Cretaceous, NE China. Progress in Geophys. (in Chinese), 2007, 22(2): 530-536 .
- [24] 黄玉龙, 王璞珺, 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. 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 volcanic edifices between modern volcanoes and ancient remnant volcanoes in Songliao Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition) (in Chinese), 2007, 37(1): 65-72 .
- [25] 郭振华, 王璞珺, 印长海等. 松辽盆地北部火山岩岩相与测井相关关系研究. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(2): 207-214 .
Guo Z H, Wang P J, Yin C H, *et al.* Relationship between lithofacies and logging facies of the volcanic reservoir rocks in Songliao Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition) (in Chinese), 2006, 36(2): 207-214 .
- [26] 边伟华, 陈玉魁, 唐华风等. 火山岩相的岩屑识别——以松辽盆地南部东岭探区为例. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(6): 1104-1109 .
Bian W H, Chen Y K, Tang H F, *et al.* Volcanic facies identification with cuttings—a case study in Dongling, southern Songliao Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition) (in Chinese), 2007, 37(6): 1104-1109 .
- [27] 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, 2011, 54(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, 54(2): 508-514 .
- [28] 陶宏根, 程日辉, 赵小青等. 海拉尔盆地火山碎屑岩的测井响应与应用. 地球物理学报, 2011, 54(2): 534-544 .
Tao H G, Cheng R H, Zhao X Q, *et al.* Well logging response to the volcanoclastic rocks of Hailar Basin and application. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2011, 54(2): 534-544 .