

文章编号: 1000-0747(2016)02-0228-09 DOI: 10.11698/PED.2016.02.08

中基性火山岩井约束地震岩相刻画方法

冯玉辉¹, 边伟华¹, 顾国忠², 黄玉龙¹, 仇劲涛², 孙昂¹, 王璞珺¹

(1. 吉林大学地球科学学院; 2. 中国石油辽河油田公司勘探开发研究院)

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2012CB822002); 国家自然科学基金项目(41472304, 41202085); 中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目“辽河油田原油千万吨持续稳产关键技术研究”(2012E-3001)

摘要: 基于渤海湾盆地辽河坳陷东部凹陷红星地区 112.5 km² 三维地震和 8 口钻遇古近系沙三段火山岩探井资料, 应用火山地层学原理, 通过单井和连井的地质、测井、地震综合研究, 识别中基性火山岩三级火山地层界面(期次→机构→岩相), 揭示有利勘探相带。沙三段火山岩序列依据期次界面可分为 3 期, 期次内可分为 1 个或多个火山机构-地震相单元, 火山机构内可进一步划分火山岩相-地震相单元。以单井点为基础, 通过连井地震剖面刻画火山机构-岩相分布模式, 以期次为单元提取相干属性识别火山岩体(叠置火山机构), 提取波形分类属性识别火山机构及火山岩相, 建立点-线-面火山岩相-地震相单元关系, 实现火山岩相平面识别与刻画。结果显示本区中基性火山岩相主要发育 2 种平面相序: 火山通道相→侵出相(→爆发相)→溢流相→火山沉积相; 火山通道相(→爆发相)→溢流相→火山沉积相, 其中近火山口相组合(火山通道、侵出和爆发相)油气显示较好, 可作为后续勘探靶区。图 8 表 1 参 19

关键词: 中基性火山岩; 火山岩岩相; 地震相; 火山岩地层; 火山岩期次; 辽河坳陷

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

A drilling data-constrained seismic mapping for intermediate-mafic volcanic facies

FENG Yuhui¹, BIAN Weihua¹, GU Guozhong², HUANG Yulong¹, QIU Jintao², SUN Ang¹, WANG Pujun¹

(1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China; 2. Research Institute of PetroChina Liaohe Oil Company, Panjin 124010, China)

Abstract: Based on 112.5 km² of 3-D seismic data and data of 8 prospecting wells drilled volcanic rocks in the 3rd member of the Paleogene Shahejie Formation in Hongxing area of the Eastern Sag of the Liaohe Depression, Bohai Bay Basin, three levels of volcanic interfaces (stage→edifice→lithofacies) of the intermediate-mafic volcanic formation are identified to reveal favorable prospecting facies through comprehensive studies on geology, well logging and seismic data in single well and multiple wells following the seismic volcano stratigraphy principle. According to stage interfaces, three volcanic stages were identified in the 3rd member of Shahejie Formation. One or more volcanic edifice-seismic facies were identified in each volcanic stage and volcanic facies-seismic facies were identified in each volcanic edifice-seismic facies. Based on single well points, we described volcanic edifices on well-tie seismic sections; identified volcanic bodies by extracting coherent seismic attribute (superimposed volcanic edifices) taking the volcanic stages as the units; then identified volcanic edifices and volcanic lithofacies by extracting waveform classification properties. Volcanic facies mapping were completed by constituting the relationship between the volcanic facies and the seismic facies in drilling wells, seismic cross sections and mappings. There are two types of plane volcanic facies sequences in the intermediate-mafic volcanic facies of this study area: volcanic conduit facies→extrusive facies (→explosive facies)→effusive facies→volcanic sedimentary facies, volcanic conduit facies (→explosive facies)→effusive facies→volcanic sedimentary facies. Among them, the near crater assemblage (volcanic conduit, extrusive and explosive facies) has better hydrocarbon shows and is the most favorable target of hydrocarbon exploration.

Key words: intermediate-mafic volcanic rock; volcanic facies; seismic facies; volcanic stratigraphy; volcanic stage; Liaohe Depression

0 引言

中国除松辽盆地火山岩储集层以酸性岩为主外^[1-2], 渤海湾盆地、准噶尔盆地等火山岩储集层均以中基性岩为主, 并显示出良好的油气勘探潜力^[3-5]。火山岩油气勘探的核心是火山岩储集层的识别与刻画^[6-7], 而目

前现有的火山岩储集层识别与刻画方法主要针对古隆起构造明显的酸性火山岩, 其可直接借助于倾角、方位角和波形分类等地震属性来直接识别^[8]。与酸性火山岩相比, 中基性火山岩具有熔浆黏度低、喷发期次多、纵向相变较快等特点, 其在钻井上多呈薄(互)层产出, 且岩体多呈低平火山岩隆起, 火山机构中心不明

显^[9-11]，因此直接识别中基性火山机构往往难度较大。另外，目前国内大多数含油气盆地已处于勘探中期阶段^[12]，勘探方向逐渐向精细勘探阶段过渡，现有火山岩储集层刻画方法已难以满足目前精细勘探的需求。松辽盆地研究结果显示酸性火山岩储集层物性及含油气性受火山岩相控制^[13]，而中基性火山岩成藏与岩相关系尚不清晰，制约着本区火山岩勘探进程。本文以渤海湾盆地辽河拗陷东部凹陷为例，应用火山地层学原理，通过单井和连井的地质、测井、地震综合研究，

识别中基性火山岩三级火山地层界面（期次→机构→岩相），进行火山岩相纵向展布及叠置关系刻画，并结合火山岩储集层物性及录井含油产状统计，揭示研究区中基性火山岩的有利勘探相带。

1 资料准备及研究步骤

井资料：包括录井综合柱状图，岩心、井壁取心、岩屑及测井资料。本文对辽河拗陷东部凹陷红星地区8口钻遇火山岩较全的井进行分析，井位分布见图1。

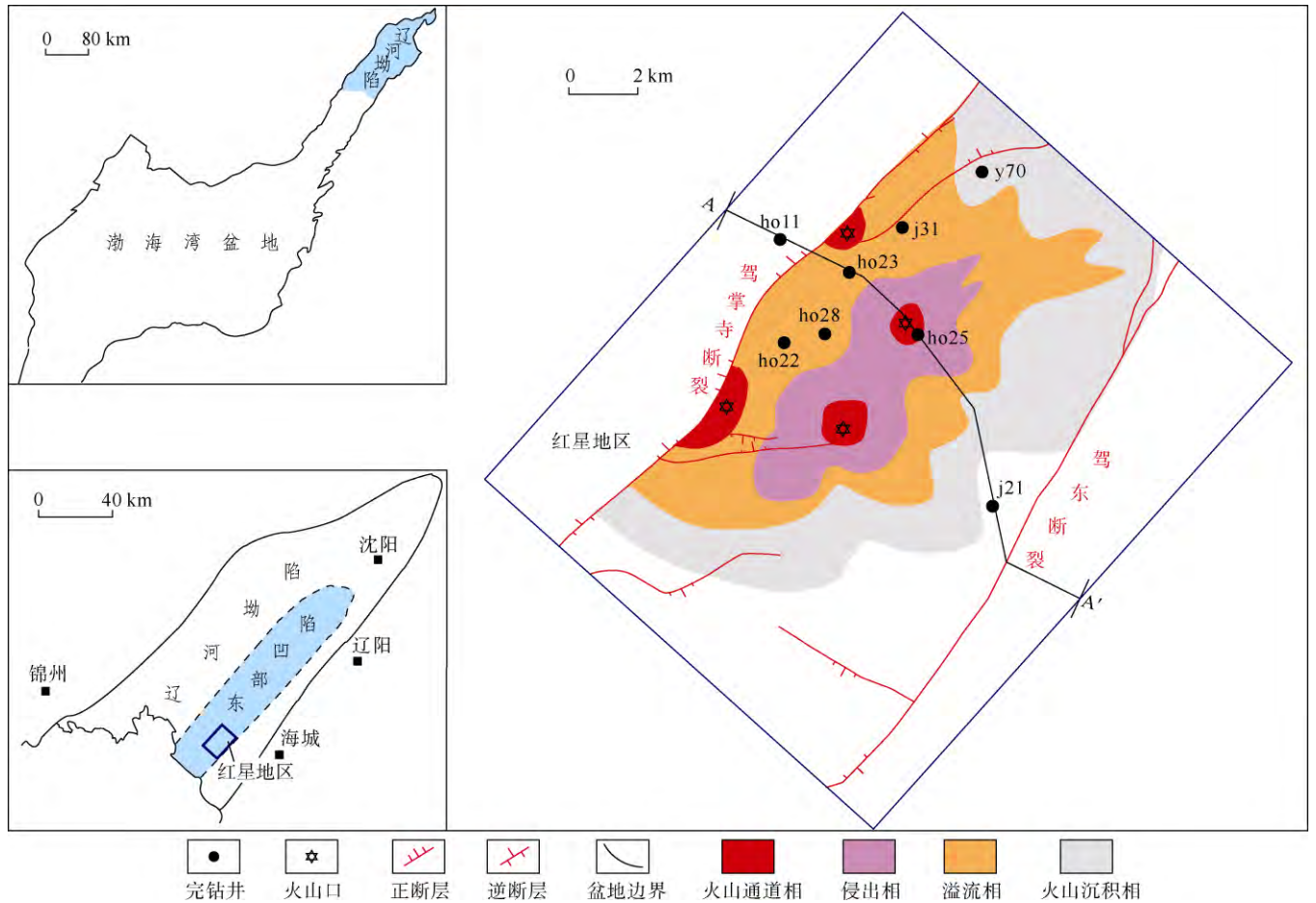


图1 辽河拗陷东部凹陷红星地区沙三段（期次1）火山岩相平面展布和研究区位置

地震资料：东部凹陷红星地区三维地震工区面积共 112.5 km²，沙三段火山岩埋深通常大于 3 000 m，该深度段地震数据主频较低，仅为 13~16 Hz，而火山岩地震波平均速度为 4 557 m/s（ho25 井）。以主频 15 Hz 计算，该层段火山岩地震纵向分辨率为 76 m（1/4 波长），而单井单层火山岩相厚度通常为 10 m 左右，远小于地震纵向分辨率。

火山岩相地震识别方法和流程可概括为以下 5 步：
 ①单井火山地层界面（期次、岩相）识别；
 ②单井火山地层界面（期次、岩相）合成记录标定，建立井震联系；
 ③地质连井剖面火山地层界面（期次、岩相）

对比；
 ④地震连井剖面三级火山地层界面（期次→机构→岩相）识别，并以此为基础，建立火山机构-岩相分布模式；
 ⑤在单井、地震连井火山岩相解释标定下，以期次为单元提取相干属性识别火山岩体（叠置火山机构），提取波形属性识别火山机构及火山岩相，单井、连井、平面三者相互约束和印证，实现火山岩相平面展布刻画，具体流程如图 2 所示。

2 单井火山地层界面识别及地震标定

2.1 单井火山地层界面识别

单井火山地层界面识别包括单井火山岩相界面识

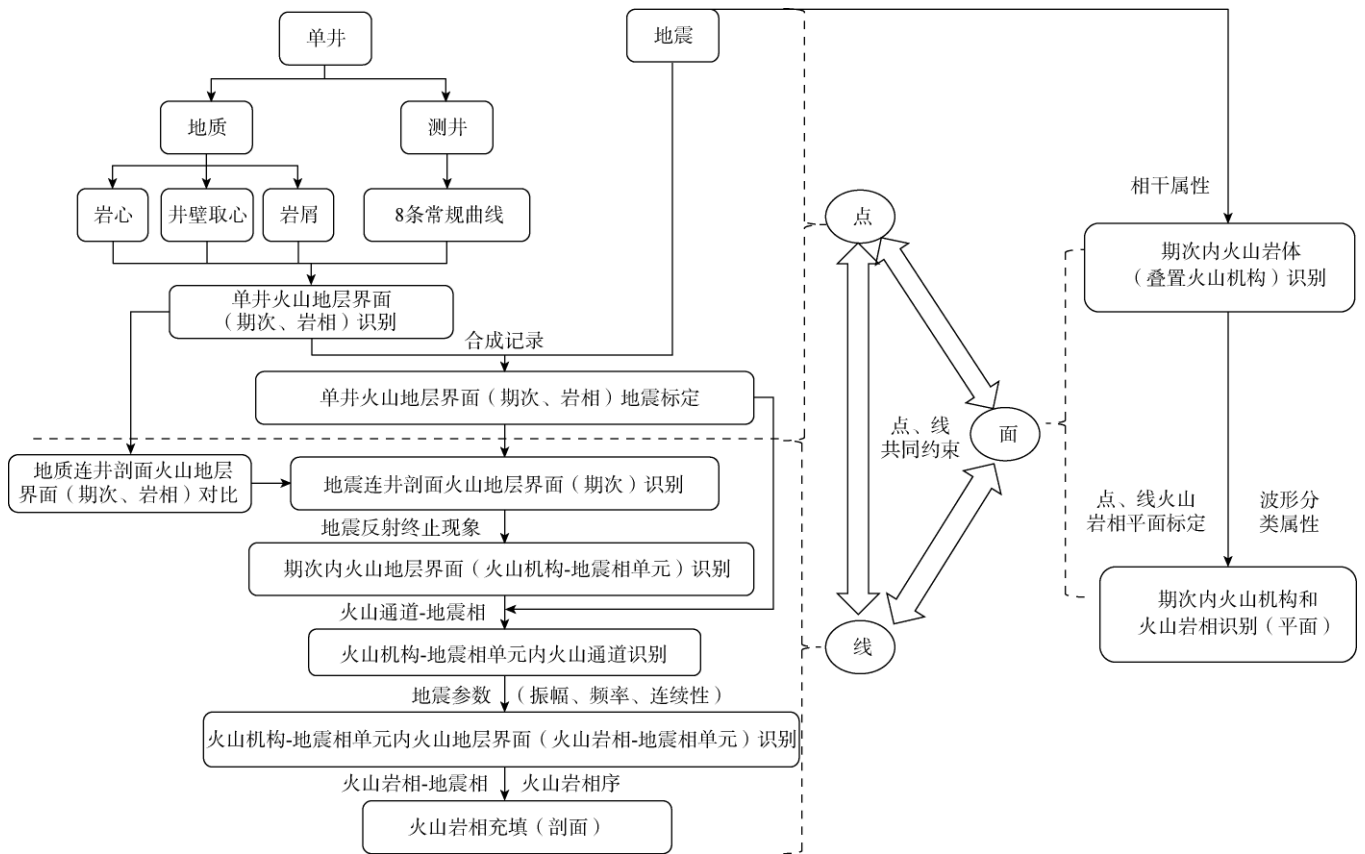


图2 中基性火山岩井约束地震岩相识别流程图

别和火山岩期次界面识别。单井火山岩相界面识别主要依据岩心、井壁取心和岩屑样品（薄片）资料，同时结合火山岩相-测井相分析^[14]。单井火山岩期次识别的核心是期次界面的识别，期次界面识别的主要标识有地层不整合界面、沉积夹层、岩性/岩相组合突变界面等^[15]。需要指出的是，与酸性火山岩相比，中基性火山岩具有喷发频率高、多与沉积岩互层产出的特点，仅以火山岩内沉积夹层来识别火山期次存在困难。本文期次界面识别主要依据厚度较大且分布范围较广的区域性沉积地层，由于不同位置钻井揭示区域性沉积地层厚度存在差异，因此期次界面需要通过地震连井对比来最终确定。按上述步骤方法在研究区沙三段火山地层中共识别出3个火山期次（见图3）。

2.2 单井火山地层界面地震标定

通过合成记录对单井划分期次和火山岩相界面进行地震标定。合成记录标定的关键是通过井震对比选取标准层及标准界面，主要依据以下5个原则：选取单井波阻抗曲线相对稳定段（如厚层泥岩段等）；选取单井波阻抗曲线相对稳定段上下界面台阶处（如厚层泥岩与上部厚层火山岩或下部厚层火山岩界面）；选取单井波阻抗曲线相对稳定段中间夹层（如厚层沉积岩中煤层夹层或火山岩夹层）；选取分布范围尽量广的地

层（如煤层、泛流玄武岩等，以便于井间对比）；选取尽量靠近目的层的标准层（见图4）。

3 连井剖面火山地层界面识别

3.1 地质连井剖面火山地层界面对比

地质连井剖面火山地层界面对比包括地质连井剖面期次界面对比和火山岩相界面对比。地质连井剖面期次界面对比主要依据单井期次界面识别结果，通过单井期次界面井间对比确定期次界面。地质连井火山岩相对比是在期次界面的限定下进行的，主要是对相同期次火山岩相进行对比。由于不同火山岩相具有不同的喷发就位方式，而不同的喷发就位方式控制各个火山岩相空间分布特征。如溢流相、火山沉积相通常分布范围较广，而火山通道相、侵出相和爆发相分布范围相对较局限。因此在进行期次界面限定下的火山岩相井间对比时，应先进行分布范围较广的溢流相和火山沉积相的对比，之后再在溢流相和火山沉积相的限定下，进行其他岩相/亚相的对比，实现火山岩连井对比（见图5）。

3.2 地震连井剖面期次界面识别

地震火山岩期次界面识别主要有两方面依据：一方面是地震反射特征，由于期次界面通常是不整合界

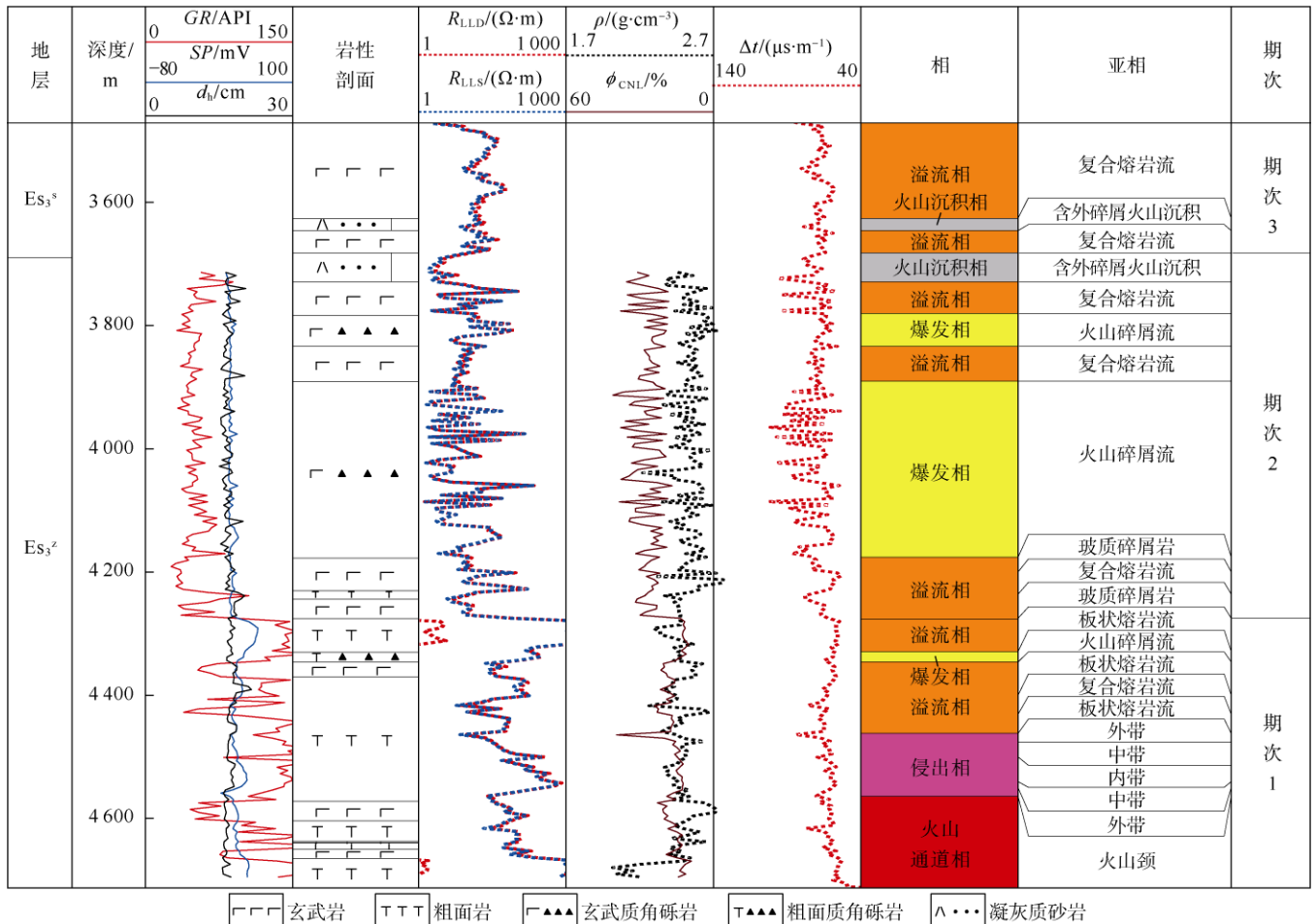


图3 ho25井火山岩期次、岩相划分 (GR—自然伽马; SP—自然电位; d_h —井径; R_{LLD} —深侧向电阻率; R_{LLS} —浅侧向电阻率; ρ —密度; Δt —声波时差; ϕ_{CNL} —中子孔隙度; Es_3^3 —沙三段上亚段; Es_3^2 —沙三段中亚段)

面、稳定沉积界面、岩性/岩相组合突变界面，因此期次界面在地震上多呈连续性好的强反射界面，通常为同一个地震同相轴；另一方面是单井期次界面地震标定结果，在对单井识别火山岩期次界面进行地震井间对比时，由于同一岩体内不同钻井火山岩揭示厚度及井资料完备程度等不同，因此需要首先选取标准井，通过标准井期次界面地震井间对比来确认期次界面，通常一个岩体内部尽量选取不少于3口标准井。标准井的选取主要依据以下4点：钻井深度及揭示火山岩厚度最大；岩心、井壁取心、岩屑及测井曲线等井资料完备；钻井资料与地震剖面期次界面特征确定性较高；合成记录标准层明显，标定较确定。井震结合最终确定地震资料上期次界面位置。

3.3 期次内火山机构-地震相单元界面识别

期次内火山机构-地震相单元界面识别主要是利用地震火山地层学方法^[16]，在期次界面的限定下，对同一期次火山岩，依据底超（上超、下超）、顶超、削截等地震反射终止现象识别地震反射界面^[17]，并在此基础上，依据地震反射界面识别火山机构-地震相单元，

火山机构-地震相单元通常相当于火山机构或火山机构复合体。图6a中，在期次界面内，依据上超、下超等地震反射终止现象，共识别出3个地震反射界面，划分出6个火山机构-地震相单元。

3.4 火山机构-地震相单元内火山通道识别

由于无探井控制区火山岩相刻画主要是通过地震相分析和火山岩相序地质模型进行约束，而通过火山岩相序进行火山岩相刻画需预先确定火山通道具体位置，因此火山通道识别是火山岩相刻画的关键环节。火山通道通常由3部分组成：顶部塌陷火山口、中部火山颈窝状体和下部脉管状供给岩墙。在切割位置较好的地震剖面上才能同时识别出火山通道2~3个基本构成单元。但是由于中基性火山岩体的古火山穹窿建造不很明显，只依据地震反射隆起特征识别火山机构中心往往难度较大，因此本文依据钻井资料标定火山岩相组合，通过分析火山机构的火山岩相叠置模式以及断裂与火山通道的关系，确定地震相单元内火山通道的相对位置；并在此基础上，依据火山通道地震相特征确定其具体位置，由于火山通道位置识别是在火山机

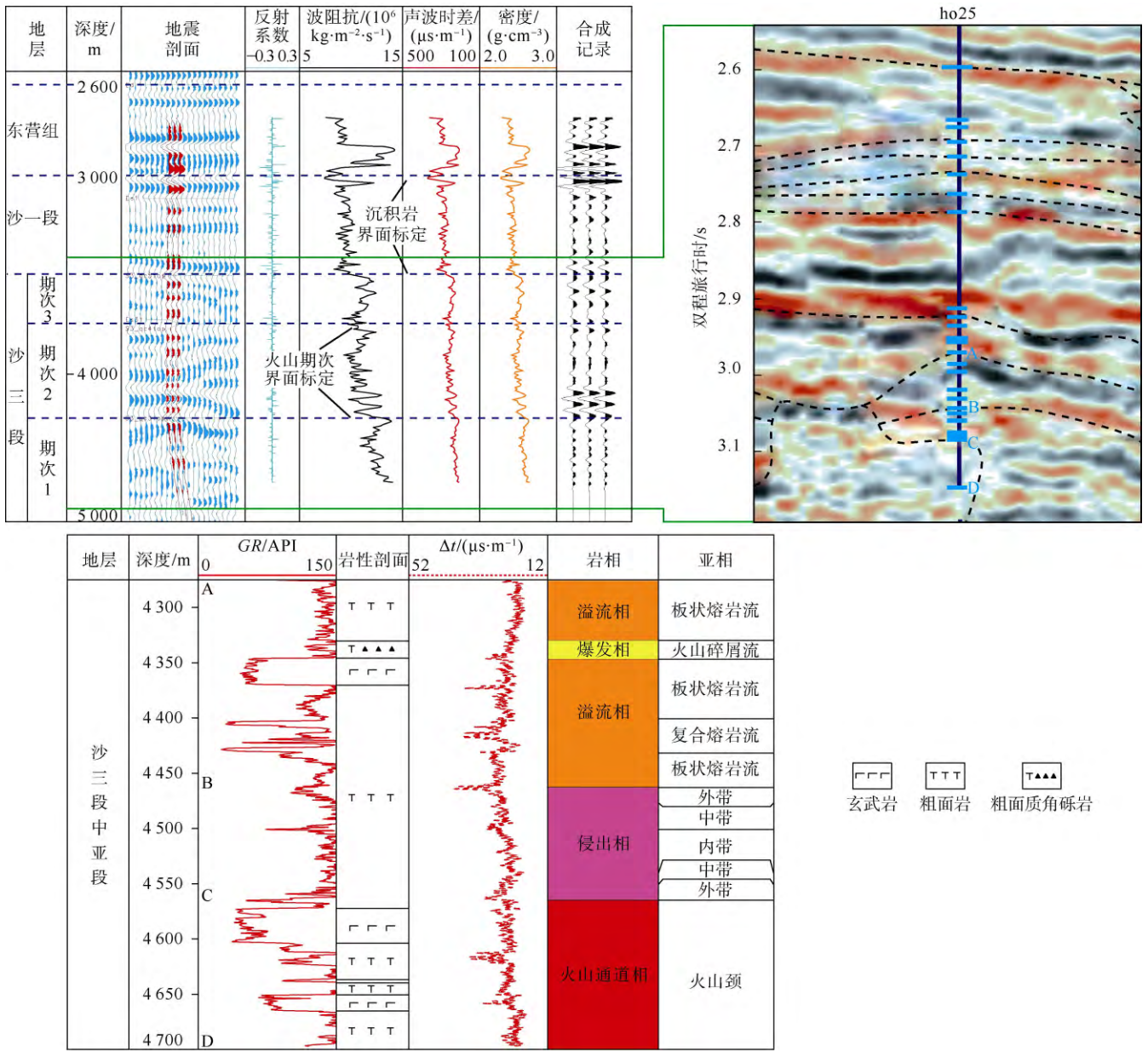


图4 单井火山岩相地震合成记录标定

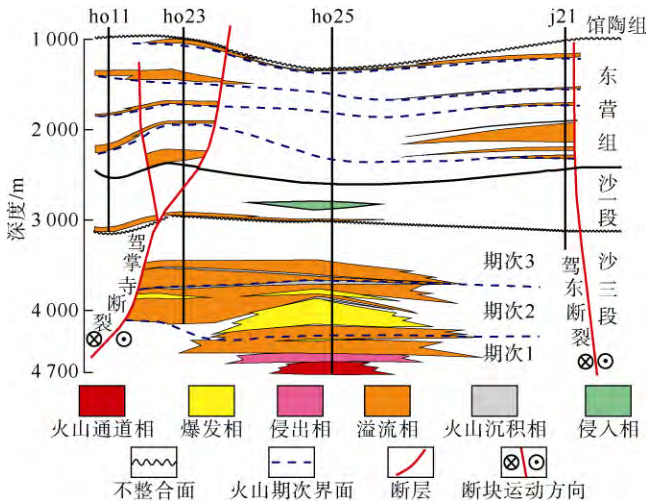


图5 火山岩期次、岩相/亚相连井对比剖面(剖面位置见图1)

构地震相单元内部进行, 并且有井资料进行约束, 因此解释结果较可靠。

地震相单元内火山通道相对位置主要根据火山机构的火山岩相叠置模式和断裂确定。火山机构的火山岩相叠置模式方面, 由于火山机构按距火山口远近可划分为火山口—近火山口、近源和远源 3 个相带, 且火山机构相带与火山岩相存在对应关系^[18], 对中基性火山岩而言, 火山通道相、侵入相和爆发相通常位于火山口—近火山口相带, 火山沉积相通常位于远源相带, 溢流相则在 3 个火山机构相带均较发育。因此可以依据单井火山岩相序列, 确定钻井位置与火山通道相对位置关系。断裂方面, 由于火山喷发中心主要发育在主干断裂与共生断裂交会处, 因此火山机构地震

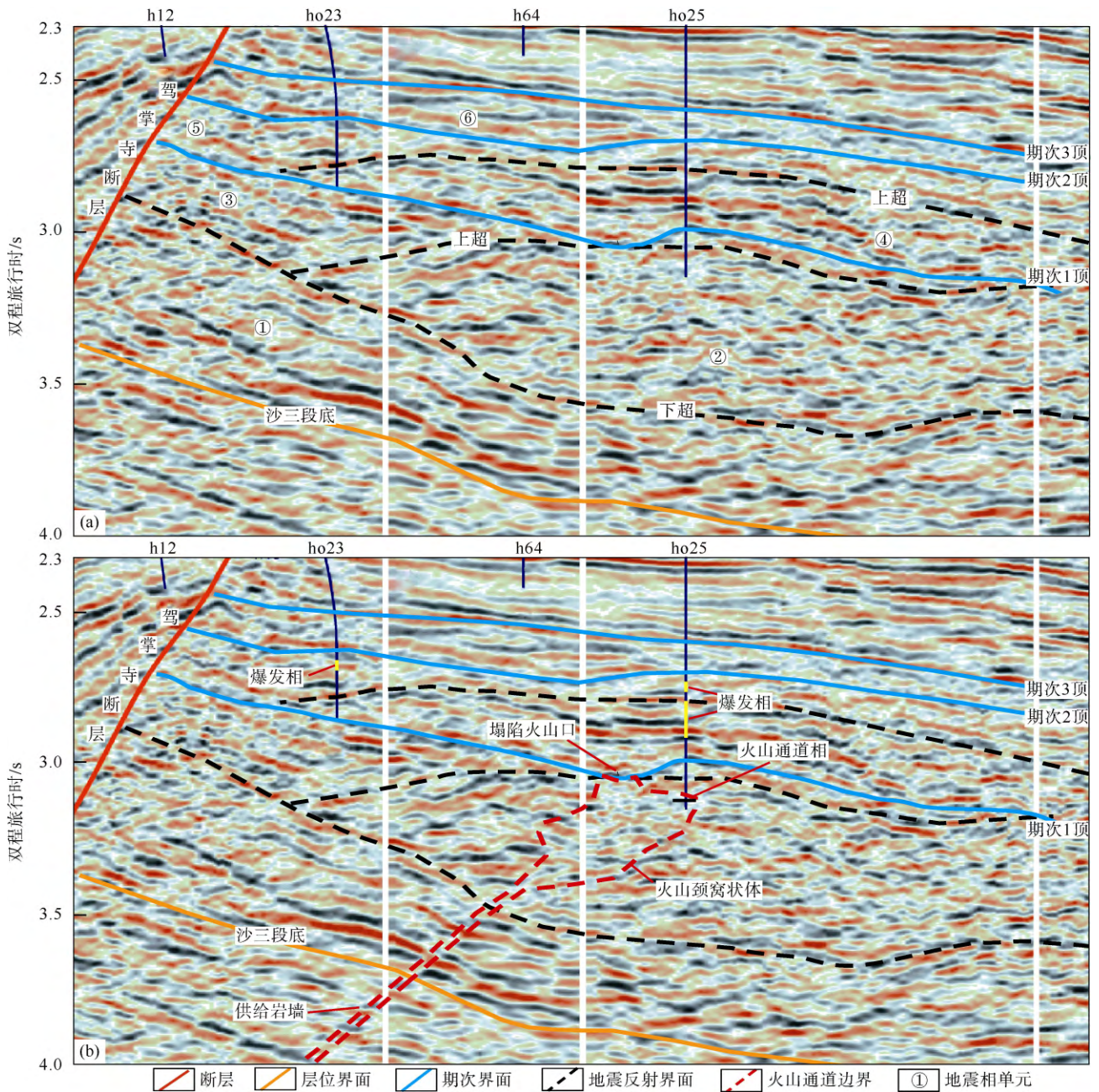


图6 地震剖面地震反射终止现象及火山机构-地震相单元内火山通道地震识别

相单元内部有断裂存在，断裂附近可能发育火山通道。在地震相单元内火山通道相对位置确定的基础上，进行火山通道-地震相单元分析，依据地震相特征识别火山通道，其在地震剖面上主要有以下3个识别标志：①通道顶部多见古火山口塌陷、下伏地层内多见供给岩墙、中部多呈火山颈窝状；②地震相内部多呈杂乱、波状反射结构，中—弱振幅、中—低频、连续性中—差；③通道两侧地层产状通常倾向相反（见图6b）。

3.5 火山机构-地震相单元内火山岩相-地震相单元界面识别

火山机构-地震相单元内火山岩相-地震相单元界面识别主要依据地震参数。火山机构由火山岩相组成，

不同的火山岩相由于岩石组成存在差异，在地震剖面上显示为不同的地震特征（振幅、频率和连续性）。因此可以在火山机构-地震相单元内，依据地震参数区别进行火山岩相-地震相单元识别（见表1）^[19]。并在此基础上，依据火山岩相-地震相对应关系以及火山岩相序分析^[14]，对火山岩相-地震相单元进行界面识别。

4 “点-线”约束下期次内井-震火山岩相识别

4.1 期次内相干属性识别火山岩体（叠置火山机构）

在期次界面的限定下，依据相干属性识别火山岩

表 1 辽河拗陷东部凹陷火山岩相地震参数

相	亚相	外部几何形态	内部反射结构	频率	振幅	连续性
火山通道相	火山颈	团块状、管状	波状、杂乱	中—低频	中—弱	中—差
	次火山岩	板状—透镜状	平行—亚平行	高—中频	强	好—中
爆发相	火山碎屑流	板状、席状、楔状	平行—亚平行	高—中频	强—中	好
溢流相	玻质碎屑岩	充填状	杂乱、波状/亚平行	中—低频	中—弱	好、中—差
	板状/复合熔岩流	席状	平行—亚平行	高—中频	强	好
侵出相	内带	透镜状、丘状	杂乱、波状	中—低频	中—弱	中—差
	中带					
	外带					
火山沉积相	含外碎屑火山沉积 再搬运火山沉积	席状	平行—亚平行	高—中频	中—强	好—中

体(见图7)。东部凹陷沙三段火山活动频繁,发育由多个相互叠置火山机构组成的火山岩体,由于火山岩体整体非均质性强,使岩体所在位置的三维地震数据相邻道之间地震信号整体相似性小,因此相干属性无法对火山岩体内部各个火山机构边界进行识别。图7b深色区域为相干性小区域,代表火山岩体区域,深色区域为一个整体,其内部无法进行进一步刻画,只能识别到火山岩体,深色与浅色交界处为火山岩体边界。应该指出的是,由于火山岩不同岩相具有不同的地震相特征,既有相干性较小的杂乱反射地震相(如火山通道相等),也有相干性较大的平行—亚平行反射地震相(如溢流相等),因此相干性较小的深色区域只能代表火山岩体的最小范围,而相干性较大的浅色区域既可以是溢流相、爆发相、火山沉积相等火山地层,也可以是沉积岩地层,具体的岩体边界应依据火山岩相解释剖面火山岩相标定位置确定。另外,由于东部凹陷驾掌寺断裂和驾东断裂均在东营组沉积期发生不同程度走滑,使断裂附近的地震剖面多呈杂乱反射,因此在平面图上驾掌寺断裂和驾东断裂附近均出现相干性小且沿断裂方向展布的深色条带。

4.2 期次内波形分类属性识别火山机构及火山岩相

在期次界面的限定下,通过单井和地震连井火山岩相平面标定,依据波形分类属性进行火山机构和火山岩相平面刻画。波形分类属性在一定程度上可以反映地震相特征(外部形态、内部反射结构和地震参数),同时火山岩相刻画主要依据地震相特征,因此以地震相为桥梁可以建立火山岩相与波形分类属性的对应关系,从而利用火山岩相解释剖面对波形分类属性进行标定,进行火山岩相平面解释。由于火山机构是由火山岩相组成的,因此可进一步进行火山机构平面识别。但由于火山地层交切叠置关系复杂,侧向相变快,且属性提取通常为沿层进行切片,因此其属性特征除受地震相控制外,还受剖面地震相内部反射结构与沿层切片交切关系的影响,因此在利用波形分类属性进行火山岩相识别时,应当充

分考虑由交切关系影响造成的波形分类属性的变化。

以沙三段期次1为例(见图7a),黄色实线标示位置为沿层切片与地震剖面相交的位置,火山通道相内部为杂乱反射,由于杂乱反射通常与任意方向切片相交后,平面仍为杂乱,因此火山通道相不受交切关系的影响,在波形分类属性上多呈多种波形杂乱分布特征(呈多种颜色杂乱分布);侵出相(位于火山通道相左右两侧)内部为前积反射,同相轴与相交线低角度穿切,因此受交切关系的影响,剖面上为连续性中—好的前积反射,在波形分类属性上多呈环形特征;溢流相内部为平行—亚平行反射,通常其内部同相轴与相交线平行,因此在波形分类属性上多呈一种或两种相似波形(呈一种或两种颜色)连片分布特征;火山沉积相内部为乱岗反射,其内部同相轴与相交线平行,在波形分类属性上表现为多种波形杂乱分布;沉积岩地层内部为平行—亚平行反射,由于其内部同相轴与相交线平行,因此在波形分类属性上表现为一种或两种相似波形连片分布的特征(见图7c、7d)。

4.3 火山岩相识别与勘探应用

松辽盆地研究结果显示酸性火山岩储集层物性及含油气性受火山岩相控制^[12],而辽河拗陷中基性火山岩储集层物性及含油气性是否受岩相控制目前尚不明确。据辽河拗陷东部凹陷38口钻井467个实测物性数据,24口井的514个测井解释段(共6285m)测井物性数据,以及108口井、共计38638m火山岩井段不同油气显示级别统计分析(见图8),结果显示储集层物性、含油气性与火山岩相具有明显的相关性,火山通道相、侵出相、爆发相的储集层物性及含油气性较好,而火山沉积相、溢流相则相对较差。需要指出的是,火山通道相和爆发相的实测物性数据多测的是集块或角砾的基质物性,从而导致其测量值偏低,因此应参考测井物性数据。在确定中基性火山岩相与储集层物性及含油性分布关系的基础上,利用本文中基性火山岩相刻画方法,对辽河盆地中基性火山岩进行

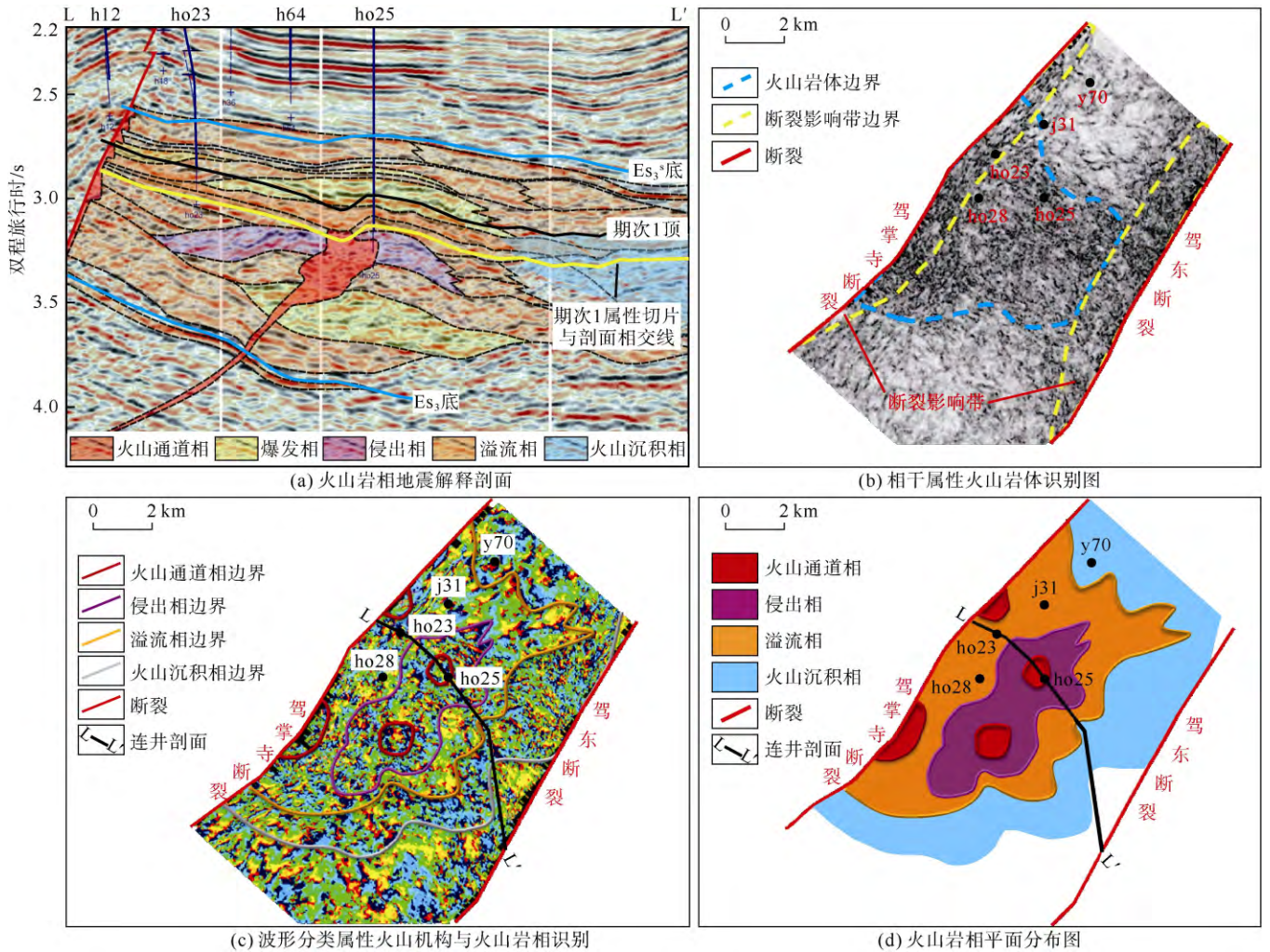


图7 沙三段火山岩相（期次1）平面分布识别流程

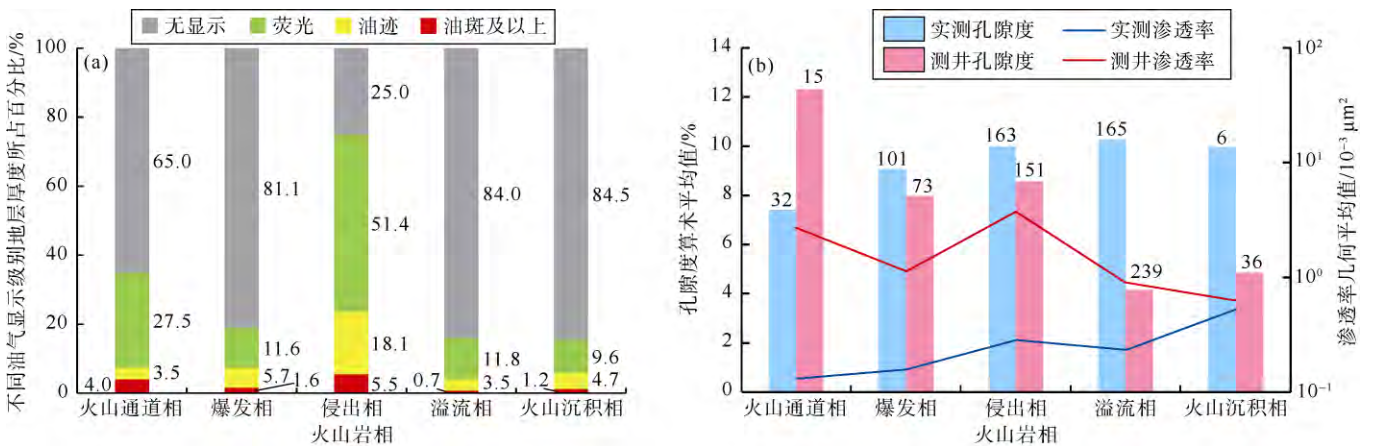


图8 火山岩相与储集层物性以及含油气性关系 (b图中数据为样品数)

火山岩相剖面和平面对刻画,结果显示辽河盆地中基性火山岩相主要发育2种相序:火山通道相→侵出相(→爆发相)→溢流相→火山沉积相;火山通道相(→爆发相)→溢流相→火山沉积相(见图7a、7d),由于中基性火山岩岩浆黏度较低,因此完整喷发相序爆发相可不发育。两种相序的近火山口相组合(火山通道相、

侵出相和爆发相)均有良好的油气显示,是未来中基性火山岩油气勘探重点靶区。

5 结论

火山地层界面识别是火山岩相地震识别的基础,通过单井和连井的地质-测井-地震综合对比,识别出中

基性火山岩三级火山地层界面(期次→机构→岩相),实现火山岩相纵向展布及叠置关系刻画。点-线-面逐级约束是火山岩相刻画的关键,在期次内提取相干属性识别火山岩体,提取波形属性识别火山岩相,建立点-线-面火山岩相-地震相单元关系,实现分期次的火山岩相平面识别与刻画。本区中基性火山岩相主要发育2种平面相序:火山通道相→侵出相(→爆发相)→溢流相→火山沉积相;火山通道相(→爆发相)→溢流相→火山沉积相,其中近火山口相组合(火山通道、侵出和爆发相)油气显示较好,可作为后续勘探靶区。

参考文献:

- [1] SCHUTTER S R. Occurrences of hydrocarbons in and around igneous rocks[M]. London: Geological Society, Special Publications, 2003, 214(1): 35-68.
- [2] 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[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2003, 33(4): 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.
- [3] 朱如凯, 毛治国, 郭宏莉, 等. 火山岩油气储层地质学: 思考与建议[J]. 岩性油气藏, 2010, 22(2): 7-13. ZHU Rukai, MAO Zhiguo, GUO Hongli, et al. Volcanic oil and gas reservoir geology: Thinking and forecast[J]. Lithologic Reservoir, 2010, 22(2): 7-13.
- [4] 刘嘉麒, 孟凡超, 崔岩, 等. 试论火山岩油气藏成藏机理[J]. 岩石学报, 2010, 26(1): 1-13. LIU Jiaqi, MENG Fanchao, CUI Yan, et al. Discussion on the formation mechanism of volcanic oil and gas reservoirs[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(1): 1-13.
- [5] 赵海玲, 刘振文, 李剑, 等. 火成岩油气储层的岩石学特征及研究方向[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(6): 609-613. ZHAO Hailing, LIU Zhenwen, LI Jian, et al. Petrologic characteristics of igneous rock reservoirs and their research orientation[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(6): 609-613.
- [6] LUO J L, SADOON M, ZHI G L, et al. Controls on the quality of Archean metamorphic and Jurassic volcanic reservoir rocks from the Xinglongtai buried hill, western depression of Liaohe basin, China[J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(10): 1319-1346.
- [7] 王岩泉, 胡大千, 蔡国刚, 等. 辽河盆地东部凹陷火山岩储层特征与主控因素[J]. 石油学报, 2013, 34(5): 896-904. WANG Yanquan, HU Daqian, CAI Guogang, et al. Characteristics and controlling factors of Cenozoic volcanic reservoir in Liaohe Basin, NE China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 34(5): 896-904.
- [8] 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.
- [9] SINGLE R T, JARRAM D A. The 3D facies architecture of flood basalt provinces and their internal heterogeneity: Examples from the Palaeogene Skye Lava Field[J]. Journal of the Geological Society, 2004, 161(6): 911-926.
- [10] SPITZER R, WHITE R S, CHRISTIE P A F, et al. Seismic characterization of basalt flows from the Faroes margin and the Faroe-Shetland Basin[J]. Geophysics Prospect, 2008, 56(1): 21-31.
- [11] 唐华风, 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[J]. 地球物理学报, 2011, 54(2): 620-627. TANG Huafeng, LI Ruilei, WU Yanhui, et al. Textural characteristics of volcanic strata and its constraint to impedance inversion[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(2): 620-627.
- [12] 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. ZOU 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.
- [13] WANG Pujun, CHEN Shumin. Cretaceous volcanic reservoirs and their exploration in the Songliao Basin, northeast China[J]. AAPG Bulletin, 2015, 99(3): 449-523.
- [14] 黄玉龙, 单俊峰, 边伟华, 等. 辽河拗陷中基性火成岩相分类及储集意义[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(6): 671-680. HUANG Yulong, SHAN Junfeng, BIAN Weihua, et al. Facies classification and reservoir significance of the Cenozoic intermediate and mafic igneous rocks in Liaohe Depression, East China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(6): 671-680.
- [15] 冯玉辉, 于小健, 黄玉龙, 等. 辽河盆地新生代火山喷发旋回和期次及其油气地质意义[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 39(5): 50-57. FENG Yuhui, YU Xiaojian, HUANG Yulong, et al. Eruption cycles and stages of Cenozoic volcanic rocks and their significance to hydrocarbon accumulations in Liaohe Basin[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2015, 39(5): 50-57.
- [16] 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[J]. 地球物理学报, 2011, 54(2): 597-610. WANG Pujun, ZHANG Gongcheng, MENG Qi'an, et al. Applications of seismic volcano stratigraphy to the volcanic rifted basins of China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(2): 597-610.
- [17] 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[J]. 地球物理学报, 2011, 54(2): 611-619. CHENG Rihui, LI Fei, SHEN Yanjie, et al. The seismic reflection features of volcanic stratum and the seismic-geological interpretation: The case study in Xujiaweizi faulted depression, Songliao Basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(2): 611-619.
- [18] 唐华风, 庞彦明, 边伟华, 等. 松辽盆地白垩系营城组火山机构储层定量分析[J]. 石油学报, 2008, 29(6): 841-845. TANG Huafeng, PANG Yanming, BIAN Weihua, et al. Quantitative analysis on reservoirs in volcanic edifice of Early Cretaceous Yingcheng Formation in Songliao Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 29(6): 841-845.
- [19] 冯玉辉, 黄玉龙, 丁秀春, 等. 辽河盆地东部凹陷中基性火山岩相地震响应特征及其机理探讨[J]. 石油物探, 2014, 53(2): 206-215. FENG Yuhui, HUANG Yulong, DING Xiuchun, et al. Relationship between intermediate-mafic volcanic facies and their corresponding seismic reflections: A case study from eastern depression of Liaohe Basin, NE China[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2014, 53(2): 206-215.

第一作者简介: 冯玉辉(1987-), 男, 辽宁大连人, 现为吉林大学在读博士研究生, 从事油气地质与地球物理方面的研究。地址: 吉林省长春市建设街2199号, 吉林大学地球科学学院, 邮政编码: 130061。E-mail: here2009feng@126.com

联系作者: 边伟华(1976-), 男, 河北藁城人, 博士, 吉林大学地球科学学院副教授, 从事石油与天然气地质方面的研究与教学工作。地址: 吉林省长春市建设街2199号, 吉林大学地球科学学院, 邮政编码: 130061。E-mail: WeihuaBian@jlu.edu.cn

收稿日期: 2015-05-22 修回日期: 2016-01-23

(编辑 黄昌武)