

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, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.02.029

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, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.02.029

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

陈树民,张元高,姜传金

大庆油田有限责任公司勘探开发研究院,大庆 163712

摘 要 随着庆深气田勘探开发工作的不断深入,揭示出火山岩气藏以孤立火山机构控藏的特征,火山岩地层的非均质性特征非常明显,为提高火山岩气藏的综合研究程度,实现认识上的飞跃.在松辽盆地北部徐家围子断陷密井网-三维地震工区,开展了地质先验模型约束下的地震火山机构解剖.识别出层状、穹窿和漏斗形三种火山机构;它们的叠置方式有串珠、上叠和镶嵌式三种.火山机构类型及其叠置方式均受控于断裂系统.在走滑型深大断裂带中,火山机构以层状为主.在深大断裂的两侧,靠近断陷的边部以熔岩穹窿火山机构为主;而在两套火山层序发育中心区域以漏斗形塌陷火山机构为主.火山机构沿走滑型断裂构造线方向呈串珠状排列,在断裂交叉点上以镶嵌式为主,在断裂转折点上以上叠式为主.区域沉积夹层和与之可对比的不同源火山岩界面是划分火山岩期次重要的标志,在本区两套火山岩层序中分别识别出两期重要的火山机构建造.火山作用的纵横向多期叠置的地质特征决定了火山岩地层的非均质性.为实现火山机构模型的数字化建模和数值模拟,设计了具有两期叠置的复合火山机构模型.利用钻井和取芯资料,建立了不同岩性的声学特征充填参数.

关键词 徐家围子断陷,火山机构,叠置关系,喷发期次,模型参数

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.02.029

中图分类号 P542

收稿日期 2010-06-28,2011-01-22 收修定稿

The analysis of volcanic edifice superimposition and its digital model parameters establishment

CHEN Shu-Min, ZHANG Yuan-Gao, JIANG Chuan-Jin

Exploration and Development Research Institute of Daqing Oilfield Company Ltd., Daqing 163712, China

Abstract With the deepening of exploration and development, volcanic gas shows the feature of separate reservoir of volcanic edifice. The non-homogeneous characteristics of volcanic rocks formation are obvious. For meeting the need of meticulous study of exploration and development, improving the level of volcanic gas reservoir comprehensive study and achieving a leap in understanding, in the Xujiaweizi depression dense well pattern-three dimensional seismic work area of Songliao basin, the authors research the seismic volcanic edifice anatomy under the geological prior model constraint. Three kinds of volcanic edifices can be identified as layered, dome, and funnel-shaped. The overlying mode is in three kinds of shoestring, superimposed and mosaic type. Volcanic edifice type and overlying mode are controlled by fault systems. In the

基金项目 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2009CB219307)资助.

作者简介 陈树民,男,1962年生,博士,教授级高工,中国石油天然气集团公司高级技术专家,973项目首席科学家.

E-mail: chenshumin@petrochina.com.cn

strike-slip discordogenic fault zone, the type of volcanic edifice is mainly layered. In the both sides of strike-slip discordogenic fault and close to the edge of depression area, the main type of volcanic edifice is lave dome. In the regional centers of two volcanic sequences, the main type of volcanic edifice is funnel-shaped. Volcanic edifices mainly arranged in beads along strike-slip faults structural line, in the fracture intersection as mosaic, at the fracture transition location as superimposed. Regional depositional sandwich and corresponding interface of different source volcanic rocks are important indicators to divide volcanic effusive period. In this area, there are two volcanic construction periods identified in different volcanic sequence. The heterogeneity of volcanic rocks is determined by the geological characteristics of volcanism of multi-period stacking in vertical and horizontal directions. In order to achieve digital modeling and numerical simulation of volcanic edifice model, a two-phase superimposed composite volcanic edifice model is designed. Using drilling and core data, the acoustic characteristics of different lithological digital parameters are established.

Keywords Xujiaweizi depression, Volcanic edifice, Superimposition, Eruption times, Model parameter

1 引言

松辽盆地北部发育 30 多个断陷盆地,其中徐家围子断陷是规模较大的重要断陷之一^[1].徐家围子断陷发育的断陷期地层有:火石岭组、沙河子组、营城组^[2,3].自 2002 年徐深 1 井营城组火山岩储层获得高产工业气流以来,徐家围子断陷营城组地层气藏的发现日益增多,具有满凹含气的勘探前景^[4].已经成为火山岩研究的热点地区.随着勘探开发工作的不断深入,无论是在酸性还是中基性火山岩中,火山岩气藏横向突变,即使是在井距 500 m 的开发区块,火山岩气藏横向依然是不连通的,呈现出火山机构孤立成藏的特征,揭示出火山岩地层的强非均质性特点.

徐家围子断陷营城组火山岩岩石类型多样,岩相较为齐全.按“国际地科联火成岩分类学分委会”推荐的火山岩岩性分类方法^[5],徐家围子地区火山岩的岩性可划分为 47 种之多.野外露头 and 钻井揭示,徐家围子断陷的火山机构具有多期建造的特征^[6].学者们更多的是利用岩芯和野外露头资料,研究火山岩储集空间类型^[7]、孔隙微观特征^[8]、孔隙发育演化及控制因素^[9~12]等,开展了在三维空间上对典型火山岩体特征的详细刻画及其在三度空间变化规律的研究,以期实现对火山岩地层的三维可视化动态表述和展示^[13].并从不同研究角度提出了类型多样的火山机构模型^[14~17],期望获得对火山岩研究具有普遍意义的地质模型.

近两年来,学者们加大了对营城组火山岩的成因研究,明确了徐家围子断陷“两凹夹一隆、东西分带、南北分块”构造格局的动态演化过程及其控制因素^[18,19].重新将营城组地层,划分为上部沉积岩段(营四段),下部火山岩段.火山岩地层可进一步划分为上下两个火山岩层序.两期火山活动和分布主要受两条大型走滑断裂带,徐中断裂带和徐东断裂带所控制^[20].营城组一段以酸性火山岩发育为主,岩性为深灰色及黑灰色晶屑凝灰岩、灰色及灰白色流纹岩及杂色火山角砾岩,局部发育基性玄武岩;营城组三段火山岩,在徐东、汪家屯、升平地区以酸性岩为主,安达地区以基性玄武岩、中性安山岩及中基性岩相对发育.然而,目前的研究成果,对营城组广泛分布的火山岩地层的非均质性,并没有给出合理的地质解释,亟待建立火山岩非均质性与地质特征的关联,指导油气的勘探开发工作,提高火山岩气藏的勘探开发效益.

本文旨在通过对徐家围子断陷营城组火山岩地层的解剖,寻找影响火山岩非均质性的地质因素,建立地质属性与非均质性的关联.构建稳定的地质框架模型和合理的火山机构架构模型,使火山作用模式和非均质性的地质逻辑关系在空间上得到统一,实现对强非均质性火山岩地质体的构造形态、拓扑结构和物理属性的综合表达^[21].丰富的钻井资料和高精度的三维地震资料为实现这一目标提供了研究基础,利用地震纹理特征^[22~24]和井-震联合地质解释技术^[25],可以确定古火山中心及不同火山机构的边界,圈定火山机构的范围.剖析不同火山机构相互

间的叠置关系,解析火山机构建造的期次,建立火山机构的时空演化序列,从而实现在火山机构的尺度范围内,研究火山岩气藏的特征及其控制因素,实现多种地质认识和观点的合理融合,准确表达火山岩地层的特殊地质属性,研究火山岩地层的地球物理响应特征建立基础,为对火山岩地层的地震-地质专属特征的数字化建模表达^[26~29],本文在构建火山机构地质模型的基础上,以地质统计学的方法,按不同相带的特征岩性,建立了火山机构的地球物理参数充填数据库,为开展数值模拟研究提供基础,这对于约束地球物理成像,进行更小尺度的建模有重要意义。

2 火山机构地质—地震特征

徐家围子断陷营城组火山岩厚度的变化与构造高低不完全匹配,其厚度主要受火山喷发中心的影响,沿走滑断裂带形成多期次、多喷口、横向叠置、条带状分布的特征。

2.1 火山机构的赋存特征

高精度的三维地震资料中蕴藏着极其丰富的火山作用信息,依据火山作用的特点和机理,利用地震分析技术可以基本确定火山口的位置,圈定火山机构,从营城组巨厚的火山岩地层中解体出独立的火山机构。现代火山机构有盾状、锥状和穹状等形态。已在松辽盆地周缘剖面及其徐家围子断陷识别出 4 类火山机构:盾状火山机构、层火山机构、火山碎屑锥、熔岩穹丘^[30]。

火山喷发的独特性,决定了其走向通常环绕火山口展布,地层倾向及倾角的规律性变化则反映了火山机构的类型。本文应用连片三维地震资料和三维可视化技术,在徐家围子断陷解析出火山机构的三种不同赋存状态。在火山喷发中心区,即深大走滑断裂带上,火山机构以层状火山(复合火山)为主(图 1);在深大断裂的两侧,靠近断陷的边部,火山机构受古地形控制,以熔岩穹隆火山机构为主(图 2);在 Xs22 井区,营城组两套火山岩叠置发育区,火山机构以漏斗形塌陷火山机构为主(图 3)。

2.2 火山机构的地震响应特征

火山机构位置地震相呈现上凸下平的外形特征(破火山口除外),顶部反射特征依火山机构形态特征不同而不同。顶面一般为强振幅,横向随相带的变化而发生变化。内部为低频、强弱相间的断续反射,具有斜交、空白、杂乱反射结构;岩层倾角随距离火

山口由近及远减小,岩层由陡变缓。火山口、近火山口所处位置地震反射特征与周围地层有着较大的差异,在火山锥的上部常出现两翼地层上超的披覆构造和地堑结构,在火山岩体下部存在基底断裂,由于岩浆侵入出现杂乱反射。

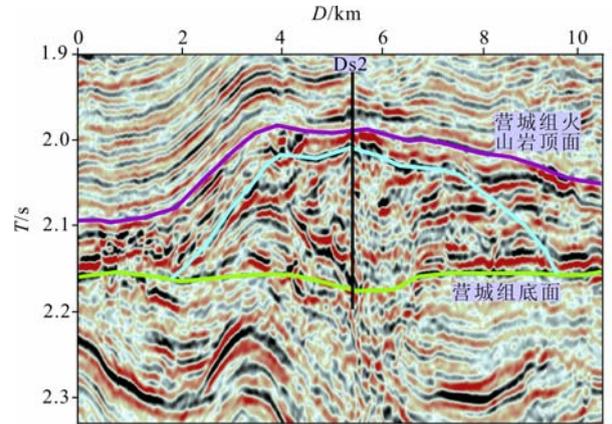


图 1 徐家围子断陷层状火山机构的地震反射特征
Fig. 1 The seismic reflection characteristics of layered volcanic edifice in Xujiaweizi depression

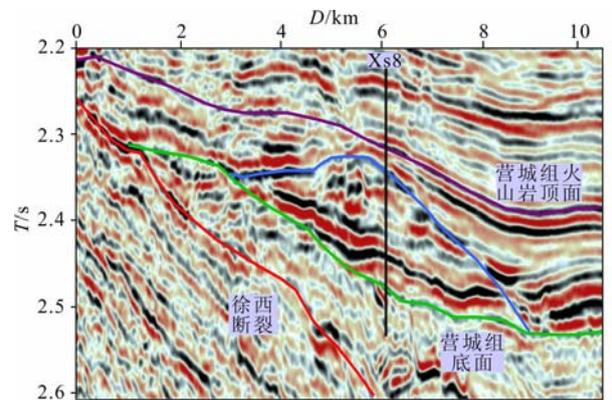


图 2 徐家围子断陷熔岩穹隆火山机构的地震反射特征
Fig. 2 The seismic reflection characteristics of lava dome volcanic edifice in Xujiaweizi depression

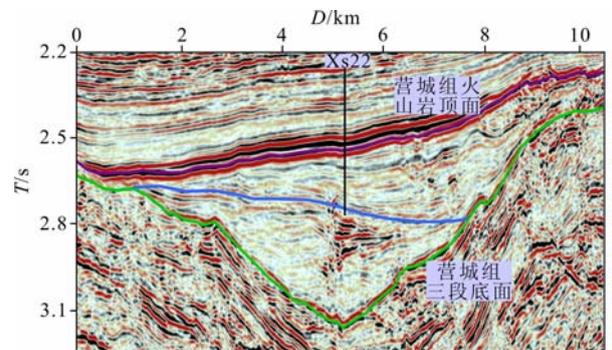


图 3 徐家围子断陷漏斗形塌陷火山机构的地震反射特征
Fig. 3 The seismic reflection characteristics of funnel-shaped collapse volcanic edifice in Xujiaweizi depression

在振幅水平切面上,火山喷发中心具有圆形或椭圆形相带,相干体切片特征是火山口处相干性差,随着远离火山口,相干性逐渐增强(图 4).但这种手段还不能很好地识别隐伏火山口,如 Xs22 井西侧的火山机构,在相干体上就没有弱相干性出现.因此需要从火山机构的叠置关系上识别隐伏火山机构,从而实现全区火山机构喷发中心的识别(图 5).

3 非均质性的地质影响因素解析

3.1 火山机构的组合叠置方式

在详细剖析营城组不同火山机构喷发物分布范围、产物叠置关系的基础上,确定火山喷发的起止先后.营城组火山机构有三种组合叠置方式:串珠状组合叠置、上叠式组合叠置、镶嵌式组合叠置(图 6).

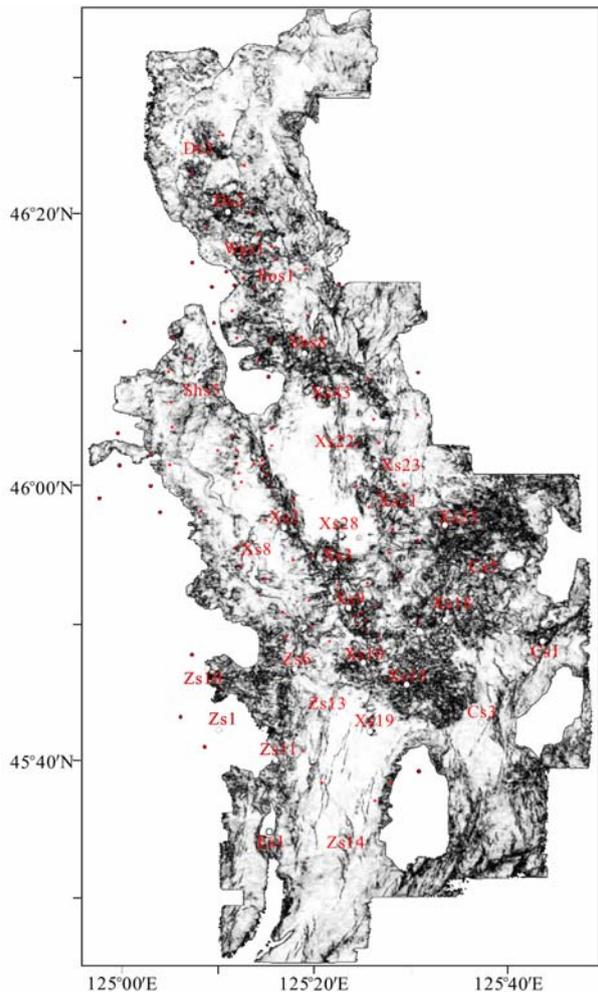
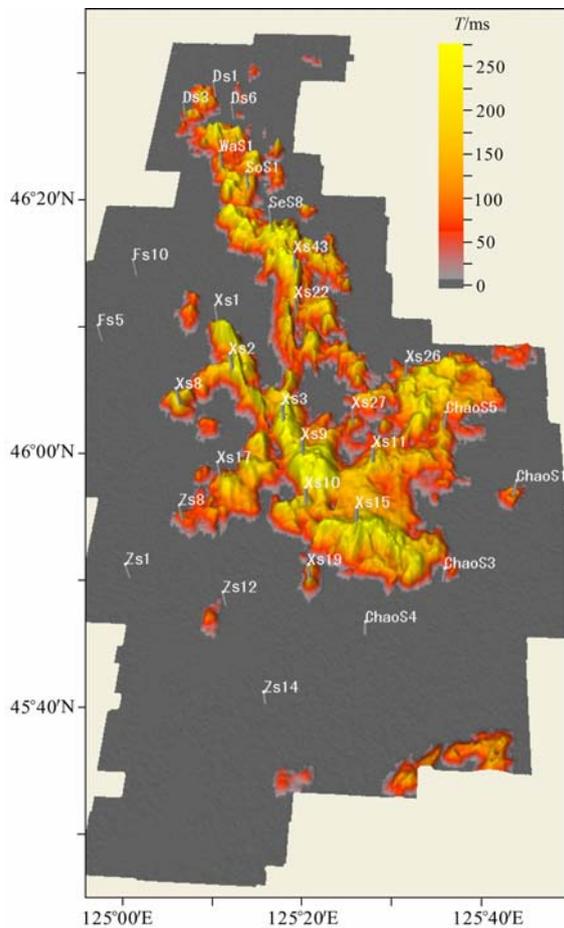


图 4 徐家围子断陷营城组火山岩趋势面层相干切片图

Fig. 4 The trend surface coherence slice figure of Yingcheng formation volcanic rocks



(1)串珠状组合叠置方式:同时代火山机构沿着一定构造线方向呈串珠状排列.火山锥侧向上叠置常与沿断裂喷发中心迁移相关.平行断裂的剖面可以揭示这种叠置关系.图 5 中,在营一段火山岩 Xs1-Xs3-Xs15 构造线,火山机构从北向南串珠状叠置;在营三段火山岩 Xs22-Xs43-Ds3 井构造线,火山机构从南向北串珠状叠置.

(2)上叠式组合叠置方式:火山活动结束早的被火山活动结束稍晚的形成的产物嵌叠而显得不完整.早晚期火山机构上下叠置或截切,常为喷发不整合接触.在营一段和营三段两套火山岩共同发育区(Xs22 区域)最为典型.

(3)镶嵌式组合叠置方式:形成时间相近的火山机构,其喷发物相互交接、边部互有覆盖.如图 5 中北西向和北东向火山岩带的交汇处,这种叠置方式最为发育.

3.2 火山机构组合形式的主控因素

断裂控制了火山机构发展及喷发.营城组火山岩,在平面上按火山主体走向,可分为东西两个火山带.西部火山带的火山机构呈北北西排列,与徐中断裂走向一致;东部火山带火山机构以近南北向排列,与徐东断裂走向一致.

在平行主干走滑断裂上,火山机构横向迁移造成两翼不对称,迁移方向上翼部加长.在横切主干断裂方向的地震、地质剖面上,显示多重火山机构垂向叠置如 Xs1 井.另外,火山机构也受断陷内的次级断裂控制如 Xs7 井等.断裂分叉或转折点也是火山重要的通道,在 Xs9 附近的多重火山机构出现于地垒上,并出现熔岩穹隆. Xs10 井双层结构的层状火山、见于断裂转折点上.

徐家围子断陷营城组不同类型、不同规模、不同叠置方式的火山机构的多种组合,是形成火山岩地层横向非均质性特征的基本地质因素,也是形成丘状或楔状外形,短轴或蠕虫状断续反射,反射结构杂乱或亚平行的火山岩地球物理响应场的物质基础.

3.3 火山机构的期次建造特征

徐家围子断陷的火山机构具有多期建造的特点,形成多旋回的岩性组合特征.火山喷发间歇期存在广泛发育的沉积夹层,因此以区域性沉积夹层作为火山重要喷发期次划分依据是可以实现的.因为区域性的沉积夹层代表了区域性的火山活动间歇期,是最明显的期次界面标志.一期火山活动的末期,不可能在所有的火山岩顶部都有沉积产生,所以沉积夹层是区域性的但并不覆盖全区.例如: Xs4-

Xs2-Xs14-Xs12 均存在一个沉积夹层,可以进行区域性的对比.

在沉积夹层缺失的地区,可以把不同源火山岩的界面(能与区域性沉积夹层对比),作为火山喷发期次的界面.一般来说在同一个火山活动周期之内所喷发的火山岩具有同源性,而不同周期内的火山岩一般是不同源的,这可以通过其岩性特征表现出来.如: Xs8-Xs13-Xs14-Xs9-Xs11 之间不存在可以区域对比的沉积夹层,但每口井的下部都以中酸性的英安岩为主,而上部以酸性的流纹岩为主;在其南部地区相对较深的火山岩以中酸性、酸性为主,而较浅的火山岩以酸性为主;在北部安达地区,如 Ds2 井,下部为基性火山岩、上部为中性火山岩,两部分火山岩必然为不同源的.可见无论是在营城组一段还是三段的火山岩中,都存在两期特征明显的火山机构建造.

同一火山机构在纵向上的多期发育以及晚期火山作用对早期火山的破坏改造,是影响火山岩非均质性的又一重要地质因素.而火山机构内部多种相带的存在及其横向和纵向延伸尺度的差异,更进一步增强了火山岩地层的非均质性.

4 火山机构数字化模型声学参数的建立

4.1 火山机构模型的建立

为了更好地描述火山岩地层的非均质性特征,作者基于大量的钻井资料和高分辨率的三维地震资料,从古火山机构的赋存状态,火山机构的叠置关系,火山机构的建造期次等方面着手,力图建立合理的火山机构地质模型,实现多学科、多种类型数据的有效交流,用于数值模拟.因此本文所建立的模型为两期叠置的复合火山机构模型(图 7).

在火山机构模型设计过程中,按地震剖面揭示的火山机构外部形态和火山岩相的边界,确定不同火山岩相的接触关系和几何形状.在此模型基础上,按钻井统计的岩石物理参数进行充填.采用数字化的建模技术,就可以实现火山机构模型的地球物理数字化.

4.2 火山机构的声学特征参数

徐家围子断陷营城组火山岩岩石类型多样,岩相较为齐全^[31].徐家围子地区火山岩的岩性有 40 多种.而从火山岩的地球物理参数分析来看,有些岩性如玻屑凝灰岩和晶屑凝灰岩之间并没有明显的声学特征差异,从火山机构的地球物理数字化来看,可

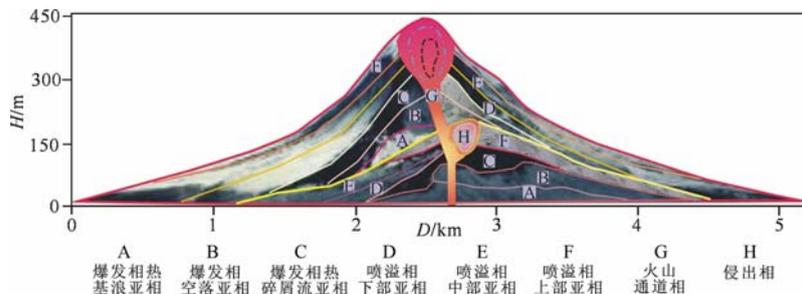


图 7 徐家围子断陷营城组火山机构模式图

Fig. 7 The modal shape of Yingcheng formation volcanic edifice in Xujiaweizi depression

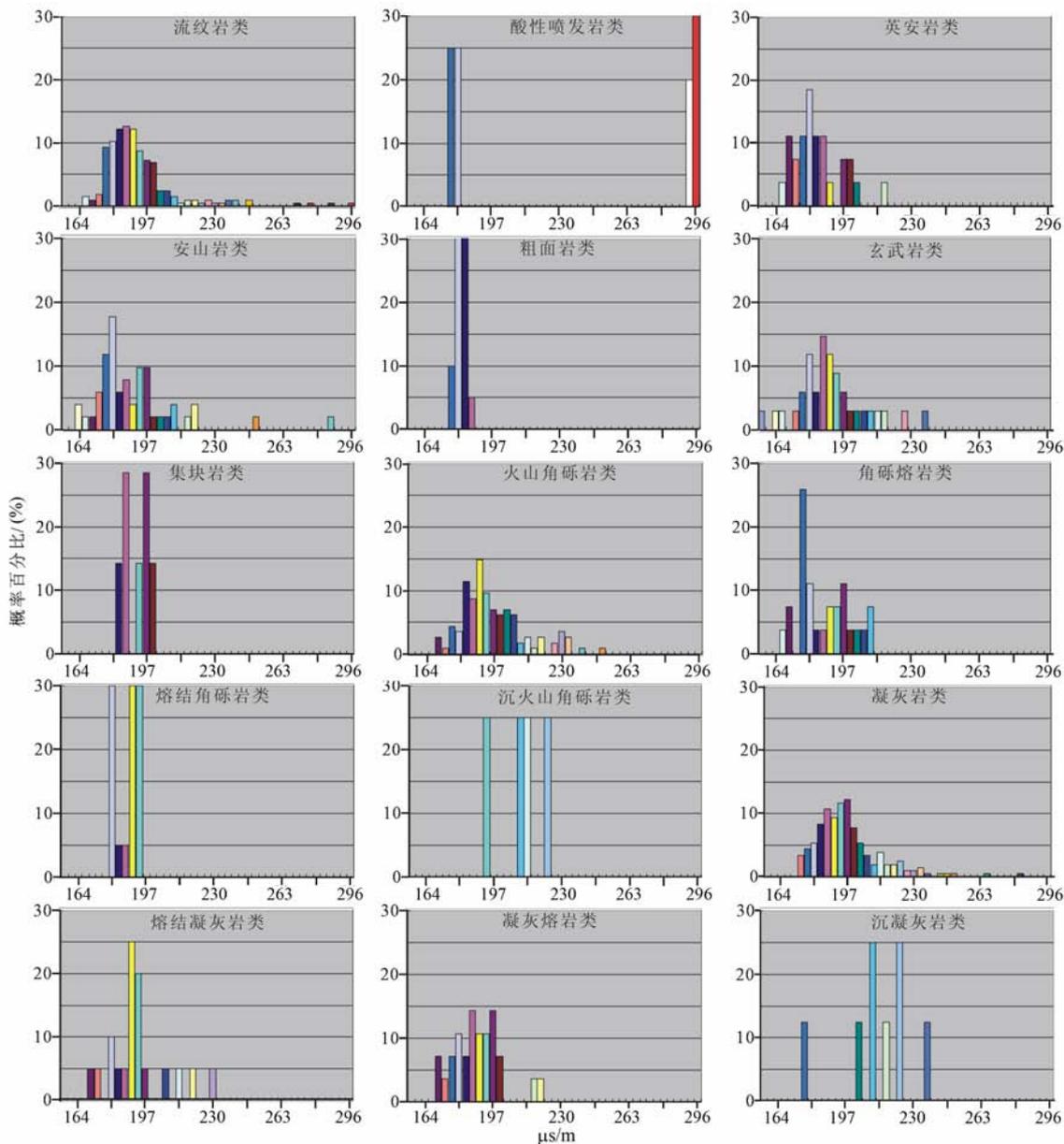


图 9 徐家围子断陷营城组火山岩不同岩性的声波测井数值变化范围及其出现概率

Fig. 9 The variation range of acoustilog value and the chance of occurrence for Yingcheng formation different lithology volcanic rocks in Xujiaweizi depression

- Zheng Y B, Wang Y B, Ran Q Q. Investigation on characteristics of volcanic reservoir in Zao35 Block. *Acta Petrolei Sinica* (in Chinese), 2006, **27**(4): 54~58
- [10] 罗静兰, 曲志浩, 孙卫等. 风化店火山岩岩相、储集性与油气的关系. *石油学报*, 1996, **17**(1): 32~39
- Luo J L, Qu Z H, Sun W, et al. The relations between lithofacies reservoir lithology and oil & gas of volcanic rocks in Fenghuadian area. *Acta Petrolei Sinica* (in Chinese), 1996, **17**(1): 32~39
- [11] 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. *石油与天然气地质*, 2004, **25**(6): 609~613
- Zhao H L, Liu Z W, Li J, et al. Petrologic characteristics of igneous rock reservoirs and their research orientation. *Oil & Gas Geology* (in Chinese), 2004, **25**(6): 609~613
- [12] 邵红梅, 毛庆云, 姜洪启等. 徐家围子断陷营城组火山岩气藏储层特征. *天然气工业*, 2006, **26**(6): 29~32
- Shao H M, Mao Q Y, Jiang H Q, et al. Reservoir characteristics of volcanic rock gas pool in Yingcheng Formation in Xujiaweizi fault depression. *Natural Gas Industry*, 2006, **26**(6): 29~32
- [13] 孙先达, 王璞珺, 索丽敏等. 松辽盆地火山岩储层三维可视化描述. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2007, **37**(6): 1272~1278
- Sun X D, Wang P J, Suo L M, et al. 3D visualization description of the volcanic rock reservoir in the Songliao Basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)* (in Chinese), 2007, **37**(6): 1272~1278
- [14] 陈建文, 王德发, 张晓东等. 松辽盆地徐家围子断陷营城组火山岩相和火山机构分析. *地学前缘*, 2000, **7**(4): 371~379
- Chen J W, Wang D F, Zhang X D, et al. Analysis of Volcanic facies and apparatus of Yingcheng formation in Xujiaweizi faulting depression, Songliao basin northeast China. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2000, **7**(4): 371~379
- [15] 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. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2007, **37**(6): 1232~1243
- Zhang B, Wang P J, Ding R X, et al. Geologic model quantification and characterization for volcanic reservoir of the Yingcheng formation in Songliao basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)* (in Chinese), 2007, **37**(6): 1232~1243
- [16] 王璞珺, 吴勇, 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
- [17] 吴颜雄, 王璞珺, 曲立才等. 营城组一段及下段岩性岩相和储层物性的精细刻画—基于标准剖面营一 D1 井全取心钻孔资料. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2007, **37**(6): 1192~1202
- Wu Y X, Wang P J, Qu L C, et al. Detailed description of lithology, lithofacies and porosity and permeability of the first and the lower member of Yingcheng Formation; based on the latest data of Ying-1 D1 well cores in standard section. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)* (in Chinese), 2007, **37**(6): 1192~1202
- [18] 张元高, 陈树民, 张尔华. 徐家围子断陷构造地质特征研究新进展. *岩石学报*, 2010, **26**(1): 142~148
- Zhang Y G, Chen S M, Zhang E H. The new progress of Xujiaweizi fault depression characteristics of structural geology research. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 2010, **26**(1): 142~148
- [19] 张尔华, 姜传金, 张元高等. 徐家围子断陷深层结构形成与演化的探讨. *岩石学报*, 2010, **26**(1): 149~157
- Zhang E H, Jiang C J, Zhang Y G, et al. Study on the formation and evolution of deep structure of Xujiaweizi fault depression. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 2010, **26**(1): 149~157
- [20] 姜传金, 陈树民, 初丽兰等. 徐家围子断陷营城组火山岩分布特征及火山喷发机制的新认识. *岩石学报*, 2010, **26**(1): 63~72
- Jiang C J, Chen S M, Chu L L, et al. A new understanding about the volcanic distribution characteristics and eruption mechanism of Yingchen formation in Xujiaweizi fault depression. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 2010, **26**(1): 63~72
- [21] 吴焱, 马殿富, 华刚. 基于体数据的三维地质属性体建模. *计算机工程与应用*, 2003, (4): 108~111
- Wu Y, Ma D F, Hua G. Modeling of 3D geological attribute body based on volume data. *Computer Engineering and Applications* (in Chinese), 2003, (4): 108~111
- [22] 马仁安, 张德华, 杨靖宇. 三维地震数据场的体快速绘制方法. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2005, **17**(5): 1008~1012
- Ma R A, Zhang E H, Yang J Y. A fast volume rendering method for 3D seismic volume data. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics* (in Chinese), 2005, **17**(5): 1008~1012
- [23] 崔世凌, 张军华, 王伟等. 地震纹理属性在 JJD 工区断层识别中的应用. *物探化探计算技术*, 2010, **32**(3): 304~309
- Cui S L, Zhang J H, Wang W, et al. Fault identification based on seismic texture attributes in the work area JJD. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 2010, **32**(3): 304~309
- [24] 陈树民. 油储地球物理“产学研”十年研究在大庆油气勘探见到实效. *地球物理学进展*, 2008, **23**(6): 1819~1832
- Chen S M. Reservoir geophysical project has obtained great achievements in Daqing oil field with the decade effort of “Industry-University-Institute” Cooperation. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2008, **23**(6): 1819~1832
- [25] 姜传金, 冯肖宇, 詹怡捷等. 松辽盆地北部徐家围子断陷火山岩气藏勘探新技术. *大庆石油地质与开发*, 2007, **26**(4): 133~137
- Jiang C J, Feng X Y, Zhan Y J, et al. New methodology to

- explore gas-bearing volcanic reservoir in Xujiaweizi Fault Depression of the northern Songliao Basin. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing* (in Chinese), 2007, **26**(4): 133~137
- [26] 华 刚, 马殿富, 吴 焱. 基于规则子块体数据的属性几何体建模. *计算机工程与应用*, 2003, (34): 62~65
Hua G, Ma D F, Wu Y. Attribute body modeling based on regular sub-volume data. *Computer Engineering and Applications* (in Chinese), 2003, (34): 62~65
- [27] 魏 嘉. 地质建模技术. *勘探地球物理进展*, 2007, **30**(1): 1~6
Wei J. Review of geologic model building techniques. *Progress in Exploration Geophysics* (in Chinese), 2007, **30**(1): 1~6
- [28] Deutch C V. Geostatistical reservoir modeling. New York: Oxford University Press, 2002. 4~100
- [29] Mallet J L. Discrete smooth interpolation in geometric modeling. *Computer-Aided Design*, 1992, **24**(4): 177~191
- [30] 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
- [31] 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
Wang P J, Chi Y L, Liu W Z, et al. Volcanic facies of the Songliao basin: classification, characteristics and reservoir significance. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)* (in Chinese), 2003, **33**(4): 449~456
- [32] 唐华凤, 王璞珺, 姜传金等. 松辽盆地火山岩相地震特征及其与控陷断裂的关系. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2007, **37**(1): 73~78
Tang H H, Wang P J, Jiang C J, et al. Seismic characters of volcanic facies and their distribution relation to deep faults in Songliao basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)* (in Chinese), 2007, **37**(1): 73~78
- [33] 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 & Oil Field Development in Daqing* (in Chinese), 2007, **26**(4): 17~22