

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. 地球物理学报, 2011, 54(2): 620~627, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.02.041

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, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.02.041

## 火山地层结构特征及其对波阻抗反演的约束

唐华风<sup>1</sup>, 李瑞磊<sup>2</sup>, 吴艳辉<sup>1</sup>, 冯晓辉<sup>2</sup>, 王力圆<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 吉林大学 地球科学学院, 长春 130061

<sup>2</sup> 中石化东北油气分公司 勘探开发研究院, 长春 130062

**摘要** 火山地层是由似层状、层状和块状结构组成的复合体,其地层结构的拟合是火山岩储层地震预测的难点所在,火山地层结构模型的建立是火山岩勘探开发中首先需要解决的关键问题.通过对九台和大屯典型火山岩地层结构的解剖,分析似层状结构和层状结构特征.似层状结构地层内部的岩层倾向和倾角变化大,与地层顶底面表现为斜交.从火山机构喷发中心到远端的同一方向的岩层具有同倾向、倾角逐渐变小的趋势,据此沿其顶面或底面的趋势进行内插可以得到火山机构准确的地层结构模型.以YS2井营城组火山岩为例,在其他条件相同的情况下分别用层状模型和似层状模型拟合地层结构约束波阻抗反演.结果表明二者间的低波阻抗分布范围和厚度均存在较大的差异,其后果是导致储层地震预测的偏差,所以用层状模型不适用于似层状结构火山岩储层刻画、同样反推也不妥.解决的方法是在火山机构的限定下进行储层反演,即在明确各个火山机构的地层结构的基础上,通过对内部结构的插值得到地层结构模型,才能使储层反演结果更加逼近真实情况.该研究可为火山岩油气藏高效勘探开发提供理论依据.

**关键词** 松辽盆地,白垩系营城组,火山地层学,结构模型,波阻抗反演

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.02.041

中图分类号 P631

收稿日期 2010-04-06,2010-05-28 收修定稿

### Textural characteristics of volcanic strata and its constraint to impedance inversion

TANG Hua-Feng<sup>1</sup>, LI Rui-Lei<sup>2</sup>, WU Yan-Hui<sup>1</sup>, FENG Xiao-Hui<sup>2</sup>, WANG Li-Yuan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

<sup>2</sup> Northeast Branch, SINOPEC, Changchun 130062, China

**Abstract** Volcanic strata have pseudostratified, stratified and massive textures which are more complex than sedimentary rocks. Thus, it should not simply be simulated with stratified models, and it results in a difficulty in volcanic reservoir prediction with seismic data. A primary key point for volcanic reservoir exploration and development is to build up proper volcanostratigraphic models. Both pseudostratified and stratified models are built up based on typical volcanostratigraphic textures of outcrops of Jiutai and Datun area in the southeastern Songliao Basin. The internal beds of pseudostratified strata show great changes in dipping direction and angles, and contact obliquely with the top and bottom strata. The dip angle of volcanic rock bed decreases from central to distal parts along a given edifice's limb, and the exact stratigraphic textural model is built up by interpolation following the top and/or bottom surface trends. A borehole named as Well YS2 is selected to perform impedance inversion constrained by stratified and pseudostratified models respectively. As a result, both the dimension and thickness of low-impedance show

**基金项目** 国家973项目(2009CB219303)、国家自然科学基金青年基金(41002038)和吉林大学科学前沿与交叉学科创新项目(200903027)资助.

**作者简介** 唐华风,男,1979年生,四川泸县人,2001年毕业于吉林大学,主要从事火山岩储层地质-地球物理研究. E-mail: tanghfhc@jlu.edu.cn

significant differences between the stratified model and the pseudostratified model. Therefore, the stratigraphic texture of volcanic edifice should be precisely characterized before impedance inversion, and then the stratigraphic textural model is built up with internal interpolation to ensure the inversion reliability. This study offers a theoretical basis for effective exploration of volcanic petroleum reservoirs.

**Keywords** Songliao Basin, Yingcheng Formation Lower Cretaceous, Volcanostratigraphy, Textural model, Impedance inversion

## 1 引言

近年来在松辽盆地、渤海湾盆地和准噶尔盆地等诸多盆地发现了火山岩油气藏,显示出了巨大的勘探前景,正成为我国能源接替的重要新领域<sup>[1]</sup>。火山岩储层分布规律受火山机构相带—岩性—岩相的控制<sup>[2,3]</sup>,火山机构相带—岩性—岩相组成了火山岩地层结构。火山岩地层结构有似层状、层状和块状结构,其结构远比沉积岩复杂,这正是火山岩和沉积岩储层分布规律上的本质差别。

作为储层研究,在单井方面参照已有的研究方法具有可行性,而井间和三维研究时套用现有的研究方法则存在不适应性。如在取芯段利用激光共聚焦扫描技术进行储层微观特征可视化研究,可直观地对储层微观特征进行刻画<sup>[4]</sup>;针对火山岩储层裂缝发育的特点,利用剩磁特征确定取芯段裂缝方向,为火山岩油气藏开发提供了依据<sup>[5]</sup>;利用偶极横波资料和三重孔隙解释模型对火山岩储层流体性质进行预测,取得了较好的效果<sup>[6]</sup>。在井间和三维研究时需要考虑到复杂地层结构带来的影响,这一点在地震资料处理时就发现了,为此也进行了一些资料特殊采集和特殊处理的尝试<sup>[7,8]</sup>,进行火山岩综合地球物理识别方法研究<sup>[9~11]</sup>,推动了火山岩勘探开发进程。但随着研究的深入,火山岩的特殊结构对火山岩储层地震预测准确率的制约愈加明显。

储层地震预测的一个重要方法就是储层反演。储层反演是在明确储层分布规律后,利用数学方法根据钻井地震资料去模拟和逼近储层的真实分布规律。储层分布规律与地层结构密切相关,在相同资料的情况下储层反演结果取决于数学算法,所以地层结构和数学算法是储层反演的两个关键因素。关于数学算法已有大量的成果,如模拟退火算法<sup>[12]</sup>、改进的模拟退火算法<sup>[13]</sup>、迭代算法<sup>[14]</sup>和非线性算法<sup>[15]</sup>等为反演计算提供了依据,并取得了良好的效果。关于地层结构则是以层状结构模型为基础,可满

足多数沉积岩储层反演的需求,对于火山岩复杂地层结构则存在巨大的不适应性。主要原因是火山岩的层形态、层结构变化多样、岩层产状变化迅速,与单纯的层状结构存在显著差别<sup>[16~20]</sup>。这也是目前火山岩储层预测和描述过程中需要解决的关键问题。所以火山地层结构模型的建立对其储层地震预测具有重要的指导意义。

为此以九台和大屯典型露头和松辽盆地南部钻井火山岩为研究对象,开展火山岩地层结构特征研究。对典型火山机构分别以层状模型和似层状模型来拟合其地层结构,用两种地层结构模型约束井震联合波阻抗反演,据此探讨不同地层结构模型对储层预测的差别,并进行机理分析。以期为提高火山岩储层预测精度提供理论基础。

## 2 火山地层构成特征

本文以松辽盆地断陷层火山岩为例,其火山地层主要有三段,分别是火石岭组上段、营城组一段和三段。火石岭组上段以中基性火山岩为主,营城组一段以酸性岩为主,而营城组三段为酸性岩和中基性岩互层。

层状结构地层具有四个特征:①岩层呈层状,原始产状多为水平或近水平;②内部岩层与地层顶底界面多为平行-近平行关系;③地质体等时界面在横向上可追踪性好<sup>[21]</sup>;④改造后的产状变化主要受构造控制。从图 1a、1c 可知,整体上该区营城组的区域倾向主体方位是 270°,从图 1b、1c 中可知,营城组内部的地层倾向是多方向的,与构造改造方向有一致和不一致的区域。一致的区域表现为层状结构的特征。不一致的区域在整体上火山岩产状变化与喷发中心有较好的对应关系,即以喷发中心作圆周或扇形规律的变化;地层内部岩层的倾角变化较快,范围为 20°~60°;整体上岩层产状与营城组顶底面产状常常为规律性斜交,从单个火山机构来看,从中心向远端的任一方向上倾向具有一致性、倾角均具有由

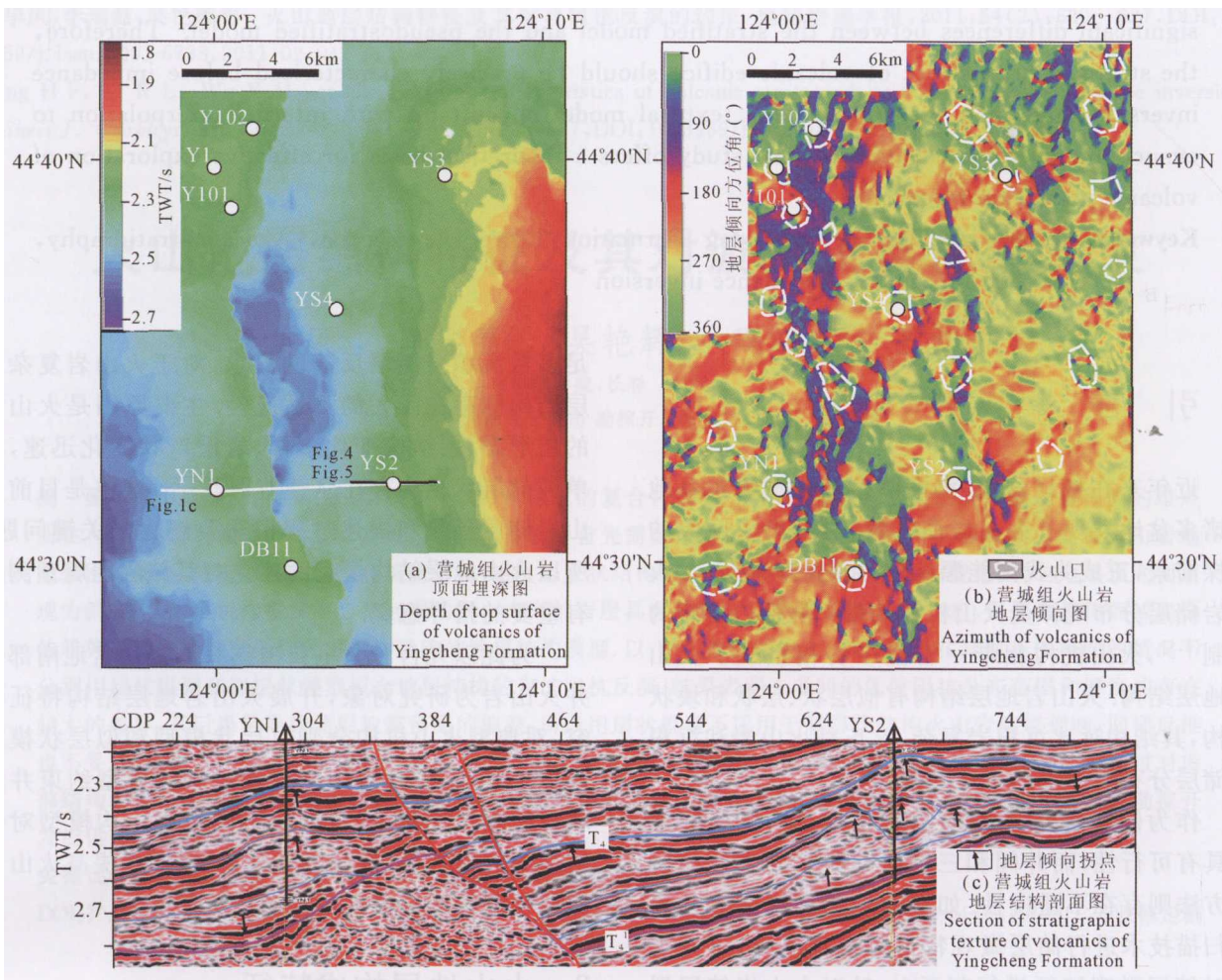


图1 YYT地区营城组火山岩地层结构特征

Fig.1 Characteristic of volcanostratigraphic texture of Yingcheng Formation (K<sub>1y</sub>) in YYT area

大逐渐变小的规律;表现为似层状结构的特征.

所以火山岩地层具有似层状结构和层状结构的特征.从露头 and 钻井火山地层揭示来看,这种变化与岩性组合类型存在密切关系,酸性火山岩常见似层状结构和块状结构,中基性岩常见层状结构.

### 3 火山地层结构特征

松辽盆地断陷层火山岩整体上以似层状结构为主,部分为层状结构,少量块状结构.下面分别以九台和大屯火山岩为例介绍似层状结构和层状结构.

#### 3.1 似层状结构特征

图 2a、2b 是大比例尺地质填图成果.两个掌子面所处位置是近源相带,掌子面中部揭示的方向多为火山岩流动方向的横截面、掌子面两端与流动方向平行,掌子面是采石场人工剖面,掌子面的顶部是经过长期剥蚀后的残余部分.图 2c 所示火山岩体是经过多期多中心喷发叠加而成.从图 2a、2b 可知,在

横向上岩层厚度变化大,并且形状与层状结构的透镜、席状、板状、楔状、丘状等均有差异,岩层外表面的产状变化范围大、变化迅速,特别是倾角变化尤为明显,九台露头区测量的倾角变化范围为 25°~70°,与该区营城组的区域地层倾角 15°相差较大,可形成大角度斜交的关系.虽然似层状结构的岩层倾角变化大,但属于同一喷发中心的堆积物从中心向远端过渡过程中其倾角多呈逐渐变小的趋势,所以根据其顶面或底面的趋势进行内插可以得到其地层结构模型,这为似层状地层的结构模拟提供了依据.

#### 3.2 层状结构特征

图 3a、3b 是大比例尺地质填图成果.其中图 3a 所示的掌子面位于火山口-近火山口相带,揭示的方向为火山岩流动方向的横截面;图 3b 所示掌子面位于火山机构近源相带,揭示的方向为火山岩流动方向的纵截面;两个掌子面均是采石场人工剖面,该火山未经严重的构造改造.图 3c 揭示该火山也是由多期次多中心喷发叠加而成,两个掌子面揭示了不同

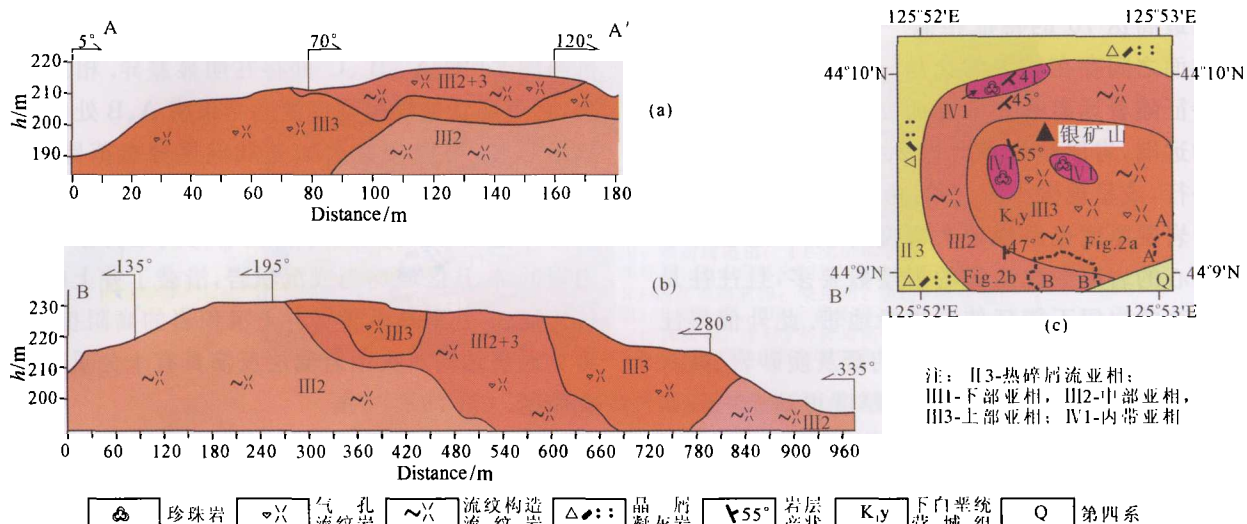


图2 松辽盆地东南隆起区九台市营城煤矿地区营城组火山岩似层状结构特征  
 (a) 银矿山 A-A' 掌子面地层结构; (b) 银矿山 B-B' 掌子面地层结构; (c) 银矿山营城组火山岩岩性岩相分布图。  
 Fig. 2 Characteristic of pseudostratified texture of volcanic rock of Yingcheng Formation (K<sub>1y</sub>) of Jiutai city in uplift area, SE Songliao basin  
 (a) Stratigraphic texture of section A-A' of Yinkuangshan; (b) Stratigraphic texture of section B-B' of Yinkuangshan; (c) Distribution of lithology and facies of Yingcheng Formation of Yinkuangshan.

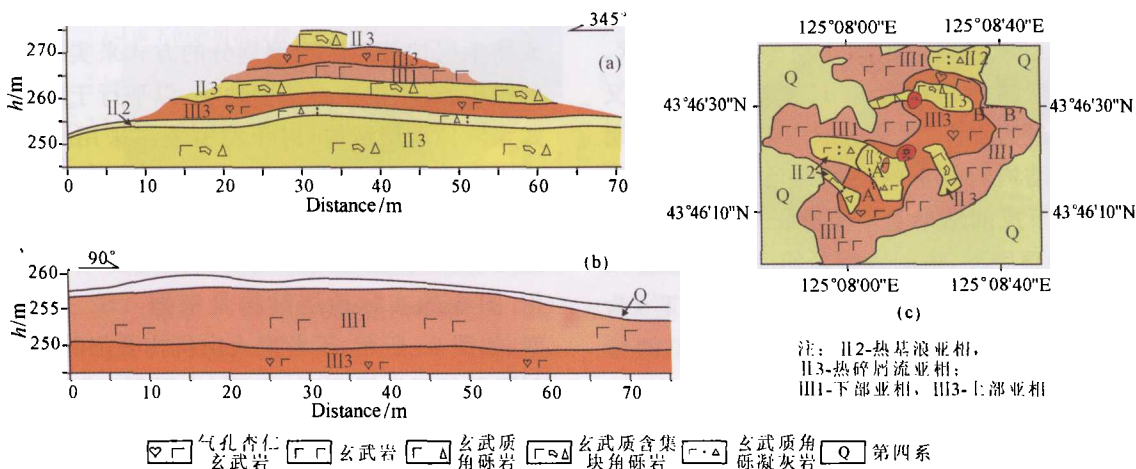


图3 松辽盆地东南隆起区长春大屯富峰山组火山岩层状结构特征  
 (a) A-A' 掌子面地层结构; (b) B-B' 掌子面地层结构; (c) 大屯富峰山组岩性岩相分布图。  
 Fig. 3 Characteristic of stratified texture of volcanic rock of Fufengshan Formation (E<sub>1f</sub>) of Changchun city in uplift area, SE Songliao basin  
 (a) Stratigraphic texture of section A-A'; (b) Stratigraphic texture of section B-B'; (c) Distribution of lithology and facies of Fufengshan Formation of Datun.

喷发中心的地层结构。从图 3a、3b 可知该类火山岩的岩层产状变化较小,岩层呈席状或板状产出;倾角测量结果为 1°~4°,多为 2°,呈水平-近水平产出;岩层的厚度在横向上变化小,且岩层倾角和厚度的变化多与下伏岩层形态或地形相关。整体上该类火山岩从火山喷发中心向远端过渡的同一方向上各岩层厚度变化小,倾角变化微小,各岩层与地层顶底面多为平行关系或微小角度的斜交。该类地层结构与沉积岩的结构具有良好的可比性,其地层结构模型

可沿用沉积岩的研究方法。

## 4 应用实例

### 4.1 地层结构单元解译

YS2 井钻遇营城组酸性火山岩,以喷溢相为主,火山沉积相次之,还见少量的火山通道相。从图 4 可知 YS2 火山岩明显为复合丘形,丘形中心的岩层平均倾角可达 60°,与在露头区营城组实测的岩

层倾角最高达  $70^\circ$  的特征相似<sup>[16]</sup>, 与营城组火山岩顶底界面之间存在较大的交角. 这种高角度的岩层倾角特征随着远离喷发中心而变得不明显, 在火山喷发物远端, 岩层倾角最大为  $20^\circ$ , 基本与营城组顶底面平行, 或呈现微小的交角. 由中心向边缘过渡的过程中岩层厚度也出现较大幅度的减少, 这会导致喷发中心的岩层数比边缘的岩层数要多, 且往往是孔隙发育的岩层不能延伸到边缘地带. 此外值得注意的是 YS2 还钻遇了厚 300 m 的凝灰质砂岩、凝灰质砾岩和泥岩, 其中砂砾岩单层厚度可达 70 m, 如果按正常沉积岩的纵横比, 该岩层在横向上至少可延伸 10 km. 而在该井旁地震相单元的横向延伸仅为 1 km, 表现为块状的特征. YS2 井火山岩具有似层状结构的特征, 图 4 是按照似层状结构模型解译的地层结构单元, 各地层单元与岩相组合单元基本一致, 处于同一火山机构中的地层结构单元之间的变化可看成渐变过程, 这为地层结构的模拟提供了依据.

#### 4.2 地层结构对波阻抗反演的约束

火山岩与沉积岩地层结构主要差别是似层状、块状结构与层状结构的差别, 松辽盆地火山岩中又以似层状结构最为发育. 本文选取 YS2 井进行似层状结构与层状结构约束下的波阻抗反演, 探讨两种结构模型约束下反演结果的差异特征. 其中图 5a 是以  $T_4$  和  $T_4^1$  为顶底界, 中间以解释的  $T_h^1$ 、 $T_h^{2'}$  ( $T_h^{2'}$  是以  $T_h^2$  为基础, 在与  $T_h^3$  交叉部分用  $T_h^3$  替换  $T_h^2$ ) 为内部控制界面为基础进行层状地层结构模拟的结果; 图 5b 是以  $T_4$  和  $T_4^1$  为顶底界, 内部以解释的  $T_h^1$ 、 $T_h^2$ 、 $T_h^3$ 、 $T_h^4$  为控制界面为基础进行似层状结构模拟的结果; 模拟约束条件详见表 1. 图 5c 和图 5d 分别是图 5a 和图 5b 为基础进行稀疏脉冲波阻抗

反演的结果. 可明显地看出图 5c 的 A、B、C 处波阻抗与图 5d 的 A'、B'、C' 处存在明显差异. 相比较而言, 利用层状地层模型反演的结果将 A、B 处的波阻抗缩小了, 可能会夸大该处的储层分布范围; 而 C 处情况则正好与 A、B 处相反, 可能会缩小该处的储层分布范围. 这都是因为层状结构模型将原本是火山岩的 A、B 区域均当成沉积岩, 沿袭了井上的低阻抗特征. C 处则是沿袭了井上沉积岩的高阻抗特征. 可见地层结构对火山岩储层反演具有十分重要的约束作用.

## 5 讨论

上述实验结果表明当火山岩具有似层状结构和块状结构时, 利用层状结构去代替进行反演, 其结果会与实际结果存在巨大的差异. 该差异主要表现为低波阻抗分布的纵向和横向位置偏差. 目前储层反演时对地层结构的刻画, 可满足整合和不整合沉积地层, 对整合地层主要根据平行于顶面、平行于底面或将地层按等厚度比例划分的方式来实现地层结构的模拟. 对于削截不整合地层, 以平行于底界面的方式来模拟地层结构; 对于超覆地层采用平行于顶面或水平面的方式来模拟地层结构<sup>[22]</sup>. 对于具有层状结构火山岩, 利用上述方法进行火山岩地层结构模拟是可以的. 但遇到火山岩复杂地层结构时就不适用. 图 6 的实际地层结构是根据 YS2 井建立的模型, 如图 6a 所示, 不考虑火山机构叠加的影响, 单纯利用平行于地层顶面、底面(水平层)或顶底面的拟合方式均不能有效地逼近真实情况, 模拟地层结构与实际地层结构不具可比性, 如果以此为基础进行储层预测就会出现上述偏差. 这种差别在火山岩勘

表 1 YS2 井火山岩地层结构模拟条件

Table 1 Simulation conditions of volcanostratigraphic texture of well YS2

层状模型的地层结构模拟约束条件				似层状模型的地层结构模拟约束条件				
地层界面序号	层界面	插值方式	趋势界面	地层界面序号	层界面	插值方式	主趋势界面	次趋势界面
3	$T_4$	平行于顶底面	无	5	$T_4$	平行于顶底面	$T_h^2$	$T_h^3$
				4	$T_h^1$	平行于底面	无	无
				3	$T_h^2$	平行于顶底面	无	无
2	$T_h^{2'}$	平行于顶底面	无	2	$T_h^2$	平行于底面	无	无
1	$T_h^1$	平行于顶底面	无	1	$T_h^1$	平行于顶面	无	无
0	$T_4^1$	平行于顶底面	无	0	$T_4^1$	平行于顶面	无	无

注:  $T_h^{2'}$  是以  $T_h^2$  为基础, 在与  $T_h^3$  交叉部分用  $T_h^3$  替换  $T_h^2$ .

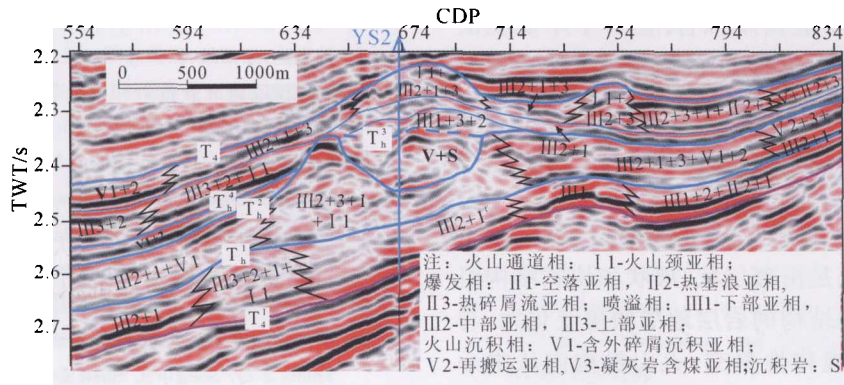


图 4 YYT 地区 YS2 井营城组火山岩地层结构单元解译

Fig. 4 Stratified texture units interpretation of volcanic rock of Yingcheng Formation ( $K_1y$ ) of well YS2 in YYT area

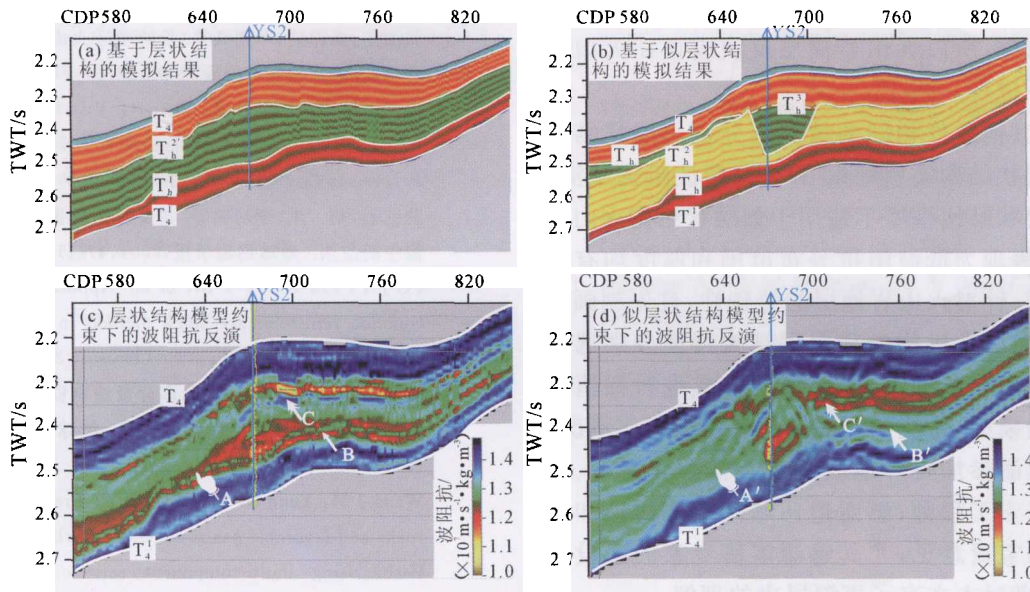


图 5 YS2 井层状地层结构模型和似层状结构模型约束下的波阻抗反演结果对比

Fig. 5 Comparison of impedance inversion results of well YS2 with stratified textural model and pseudostratified textural model

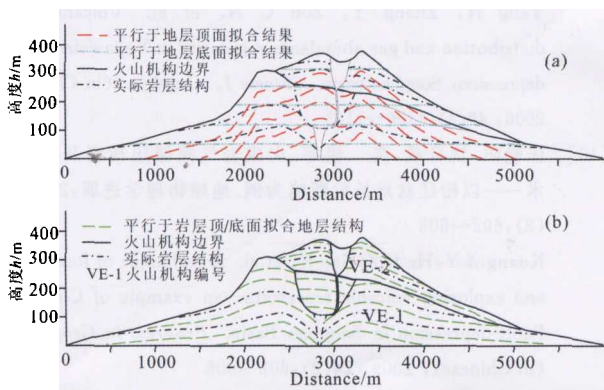


图 6 火山岩似层状地层结构的拟合效果对比

(a) 基于层状地层结构的拟合模型; (b) 基于火山机构似层状结构的拟合模型.

Fig. 6 Comparison of fitting effect of pseudostratified texture of volcanic rocks

(a) Fitting model base on stratified structure of stratigraphy; (b) Fitting model base on pseudostratified structure of volcanic edifices.

探阶段矛盾还不是十分突出,在开发阶段会带来不可挽回的损失.因为在勘探阶段钻井的目标层深度范围大,预测储层在深度上虽有错误,只要钻遇到真正的油气层在录井和测井方面有响应就可以进行补救,从而发现油气层.而在开发阶段钻井只针对油气层,预测的油气层如果比实际埋深浅,就会导致开发井失利率高的后果.这也是目前松辽盆地火山岩气藏开发过程中遇到的难题,究其根本原因是对火山岩地层结构认识不清,导致储层空间分布规律不明确.这也提出了火山岩储层地震预测需要在正确的地层结构约束下进行的要求.解决的办法是首先刻画出火山机构,然后在机构内部根据结构特征分别选取平行于顶面或/和底面的方式进行插值得到地层结构模型(图 6b).如对于下部未被改造的火山机构以平行于顶面来拟合,对于上部遭受不均匀改造

的火山机构以平行于底面来拟合.但对于小规模  
的岩墙或次火山岩体(岩浆通道)的模拟该方法还存在  
一定的局限性,还需要探索其他方法.

## 6 结 论

(1)火山岩地层是由似层状、层状和块状结构组  
成的复合体,似层状结构的岩层地层倾角变化大,与  
地层顶底面常常为规律性斜交.火山机构内从中心  
向远端过渡的任一方向上具有倾向相同、倾角逐渐  
变小的趋势,根据其顶面或底面的趋势进行内插可  
以得到其地层结构模型,这为似层状地层的结构模  
拟提供了依据.所以火山岩储层反演应该在火山机  
构的控制下进行.

(2)在其他条件相同的情况下分别用层状结构  
模型和似层状结构模型约束 YS2 井旁波阻抗反演.  
结果表明层状结构模型不适用于似层状结构火山岩  
储层刻画,表现为低波阻抗分布范围和厚度均有比  
较大的偏差.针对火山岩地层的特殊性,首先刻画出  
火山机构,然后在机构内部根据结构特征分别选取  
平行于火山机构顶面或/和底面的方式进行插值得  
到地层结构模型,才能使反演结果更接近真实情况.  
**致 谢** 感谢参加野外地质调查工作的白雪峰、王  
加强和张海宏工程师;感谢边伟华博士在讨论和交  
流中提出的宝贵意见,尤其感谢审稿专家的建设性  
建议,使作者对本文有了更深层次的理解.

## 参考文献(References)

- [1] 贾承造,赵文智,邹才能等.岩性地层油气藏地质理论与勘探  
技术.石油勘探与开发,2007,34(3):257~272  
Jia C Z, Zhao W Z, Zou C N, et al. Geological theory and  
exploration technology for lithostratigraphic hydrocarbon  
reservoirs. *Petroleum Exploration and Development* (in  
Chinese), 2007, 34(3): 257~272
- [2] 王璞珺,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.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
- [3] 唐华凤,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.石油学报,2008,29(6):841~845  
Tang H F, Pang Y M, Bian W H, et al. Reservoirs  
quantitative analysis of volcanic edifice of Yingcheng Formation in  
Songliao Basin, Early Cretaceous, NE China. *Acta Petrolei  
Sinica* (in Chinese), 2008, 29(6): 841~845
- [4] 孙先达,索丽敏,张民志等.激光共聚焦扫描显微检测技术在  
大庆探区储层分析研究中的新进展.岩石学报,2005,21  
(5):1479~1488  
Sun X D, Suo L M, Zhang M Z, et al. New progress of  
reservoir research by the technology of laser confocal scanning  
microscope analysis in the Daqing exploration area. *Acta  
Petrologica Sinica* (in Chinese), 2005, 21(5): 1479~1488
- [5] 章凤奇,宋吉水,沈忠悦等.松辽盆地北部深层火山岩剩磁特  
征与裂缝定向研究.地球物理学报,2007,50(4):1167~1173  
Zhang F Q, Song J S, Shen Z Y, et al. A study on fracture  
orientation and characteristic of remnant paleomagnetization  
of deep-burial volcanic rocks, north of the Songliao Basin.  
*Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, 50(4): 1167~1173
- [6] 张丽华,潘保芝,单刚义等.长岭地区火山岩储层流体性质测  
井预测.地球物理学进展,2009,24(6):2151~2155  
Zhang L H, Pan B Z, Shan G Y, et al. Fluid property  
logging prediction of volcanic reservoirs in the Changling area.  
*Progress in Geophysics* (in Chinese), 2009, 24(6): 2151~2155
- [7] 裴江云,刘洪,李幼铭等.共反射元弧叠加方法在火山岩成  
像中的应用.地球物理学报,2004,47(1):106~111  
Pei J Y, Liu H, Li Y M, et al. Application of seismic data  
common reflection arc stack method in imaging of igneous  
rocks. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(1): 106~111
- [8] 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
- [9] 杨辉,张研,邹才能等.松辽盆地北部徐家围子断陷火山岩  
分布及天然气富集规律.地球物理学报,2006,49(4):1136~1143  
Yang H, Zhang Y, Zou C N, et al. Volcanic rock  
distribution and gas abundance regularity in Xujiaweizi faulted  
depression, Songliao basin. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese),  
2006, 49(4): 1136~1143
- [10] 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
- [11] 张明学,吴杰,胡玉双.松辽盆地丰乐地区营城组火山岩储  
层预测.地球物理学进展,2009,24(6):2145~2150  
Zhang M X, Wu J, Hu Y S. Prediction of reservoirs in  
volcanic rocks of the Yingcheng formation in the Fengle area  
north of the Songliao basin. *Progress in Geophysics* (in  
Chinese), 2009, 24(6): 2145~2150
- [12] Ouenes A, Brefort B, Meunier G, et al. New algorithm for  
automatic history matching; application of Simulated Annealing

- Method (SAM) to reservoir inverse modeling. *Society of Petroleum Engineers* (No. 26297), 1993, (2): 1~29
- [13] 路鹏飞, 杨长春, 郭爱华等. 改进的模拟退火算法及其在叠前储层参数反演中的应用. *地球物理学进展*, 2008, **23**(1): 104~109  
Lu P F, Yang C C, Guo A H, et al. Modified simulated annealing algorithm and its application in pre-stack inversion of reservoir parameters. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2008, **23**(1): 104~109
- [14] Chu L F, Komara M, Schatzinger R A. Efficient technique for inversion of reservoir properties using iteration method. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 2000: 71~81
- [15] 吴 娟, 符力耘, 李维新. 高分辨率非线性储层物性参数反演方法和应用. *地球物理学报*, 2008, **51**(2): 546~557  
Wu M, Fu L Y, Li W X. A high-resolution nonlinear inversion method of reservoir parameters and its application to oil and gas exploration. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(2): 546~557
- [16] 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 Geophysics* (in Chinese), 2007, **22**(2): 530~536
- [17] Single R T, Jerram D A. The 3D facies architecture of flood basalt provinces and their internal heterogeneity: examples from the Palaeogene Skye Lava Field. *Journal of the Geological Society*, 2004, **161**: 911~926
- [18] Jerram D A. Volcanology and facies architecture of flood basalts. *Geological Society of America*, 2002, **362**: 121~135
- [19] Rey S S, Planke S, Symonds P A, et al. Seismic volcanostratigraphy of the Gascoyne margin, Western Australia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2008, **172** (1-2): 112~131
- [20] 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
- [21] 《地球科学大辞典》编委会. *地质科学大辞典基础学科卷*. 北京: 地质出版社, 2006. 996  
Editorial Committee of Geosciences Dictionary. *Geosciences Dictionary: Volume of Basic Science* (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 2006. 996
- [22] Haouesse A. Model behavior. *Oil & Gas of Middle East*, 2009, **3**(10): 54~57