

# 松辽盆地庆深气田营城组火山地层格架特征 及储层地质意义

唐华风<sup>①</sup> 张元高<sup>②</sup> 刘仲兰<sup>①③</sup> 丁日新<sup>①②</sup> 徐岩<sup>②</sup> 高有峰\*<sup>④</sup>

(<sup>①</sup>吉林大学地球科学学院,吉林长春 130061; <sup>②</sup>大庆油田勘探开发研究院,黑龙江大庆 163712; <sup>③</sup>北京大学地球与空间科学学院造山带与地壳演化教育部重点实验室,北京 100871; <sup>④</sup>吉林大学地层与古生物研究中心,吉林长春 130026)

唐华风,张元高,刘仲兰,丁日新,徐岩,高有峰. 松辽盆地庆深气田营城组火山地层格架特征及储层地质意义. 石油地球物理勘探,2015,50(4):730-741.

**摘要** 以庆深气田密井网区营城组火山岩为例,开展火山地层精细地层格架地质—地球物理综合研究,分析火山地层界面和充填单元的特征。XS1-XS6井区火山地层界面系统由3个喷发间断不整合界面、数十个喷发不整合和少量喷发整合界面构成。在XS1-XS6井区识别出5个火山机构和13个冷却单元。总体上该区火山地层具有由南向北、由东向西再向东迁移的特征。早期形成了厚度大、范围小的锥状火山机构1和2,以熔岩型冷却单元充填为主;中后期形成厚度中等、分布面积大的席状—盾状火山、喷发中心不明显的火山机构3、4和5,以碎屑岩型冷却单元为主。界面、流动单元或堆积单元共同控制高孔隙带分布位置,流动单元和堆积单元还控制储层的类型和规模;总体上火山地层界面可为油气勘探提供重要线索。

**关键词** 松辽盆地 营城组 火山地层格架 界面 地层单元 储层分布规律

**中图分类号**:P631 **文献标识码**:A **doi**: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2015.04.022

## 1 引言

如同沉积岩地层格架是油气地质研究的重要基础一样,火山岩精细地层格架是火山岩油气地质研究的基础。火山地层与沉积地层的本质区别主要在于似层状地层结构与层状地层结构之间的差别<sup>[1,2]</sup>,这与火山地层建造特征密切相关。火山建造具有脉冲活动、喷发物体积和分散堆积形式差异大的特点,导致火山地层界面复杂、火山地层单元厚度与形成时间的相关性不好。多中心喷发的火山机构更加剧了火山地层复杂性。因此,火山地层格架的建立首先要关注火山地层界面,在界面特征的基础上进行充填单元特征的刻画,以便更加合理地认识火山地层充填规律。

前人对火山地层界面类型和特征的研究已取得了一些认识。如火山地层中不整合界面称为喷发不整合面<sup>[3,4]</sup>。按照火山地层接触界面的特征可划分

为4类,分别为喷发不整合、侵出不整合、嵌入喷发不整合和模糊侵入接触界面<sup>[5]</sup>。根据成因和动力学特征将火山地层界面划分为喷发整合、喷发不整合、喷发间断不整合、构造不整合、侵入接触界面5类,并细划为9种<sup>[6]</sup>,并建立起界面的相关识别标志<sup>[7]</sup>。通过大西洋两岸和澳洲西海岸大陆边缘盆地的火山地层成因研究识别出火山地层的16种构成单元<sup>[8,9]</sup>;通过大陆边缘盆地研究将火山地层划分为五级:一级为火山岩省、二级为地震相单元、三级为火山岩相和相组合、四级为可用于剖面尺度加以研究的最小单元、五级为显微镜下可观察的特征<sup>[10]</sup>。火山地层的基本单元是流动单元和堆积单元,在该单元内岩性和产状是连续变化的<sup>[11]</sup>;由流动单元和堆积单元可组成冷却单元,在冷却单元内岩性和产状呈韵律性变化<sup>[4,12]</sup>;围绕同一个主喷发口的流动单元、堆积单元或冷却单元组合形成火山机构<sup>[13~15]</sup>;火山机构的横向迁移和纵向叠置形成喷发旋回或期次<sup>[16,17]</sup>,同样旋回或期次叠置构成地层的

\* 吉林省长春市西民主大街938号吉林大学地层与古生物研究中心,130026. gaoyf\_1982@163.com

本文于2014年5月23日收到,最终修改稿于2015年6月15日收到。

本研究受国家“973”计划项目(2012CB822002,2009CB219303)和国家自然科学基金青年基金项目(41002038)联合资助。

组或段。在旋回研究的基础上进行充填类型识别,可见垂向加积、侧向前积、披盖沉积、造丘和穿切 5 类<sup>[18]</sup>。针对松辽盆地深层火山地层研究,建立了火山地层格架<sup>[4,12]</sup>,为该区火山岩油气勘探提供了良好的基础<sup>[19~21]</sup>。存在的问题及不足在于对火山格架的认识主要基于岩性、岩相和几何形态,从火山地层界面成因探讨火山地层格架方面还没有引起足够的重视。

本文以具有密井网和高精度地震资料的庆深气田为例,进行火山地层界面类型和成因分析,并进行充填单元级次的识别,建立火山岩精细地层格架。在格架约束下进行孔隙度和渗透率分布特征分析,以期对火山岩油气藏高效开发提供依据。

## 2 地质概况

研究区位于松辽盆地北部的徐家围子断陷(图 1a)。断陷期发育地层为火石岭组、沙河子组和营城组,其中火石岭组二段、营城组一段和三段发育火山岩<sup>[22]</sup>。断陷走向为近南北向,西边界受徐西断裂控制,东边界主要为地层超覆边界;断陷中东部发育徐中和徐东两个走滑断裂带,其大规模走滑期为营城期<sup>[23~25]</sup>。本文研究区是 XS1-XS6 井区,该区属于徐家围子断陷中部的庆深气田(图 1b)。研究区东侧为徐中走滑断裂,东北部与升平凸起相邻, XS1-XS6 井区气藏内部断层不发育。该区发育营

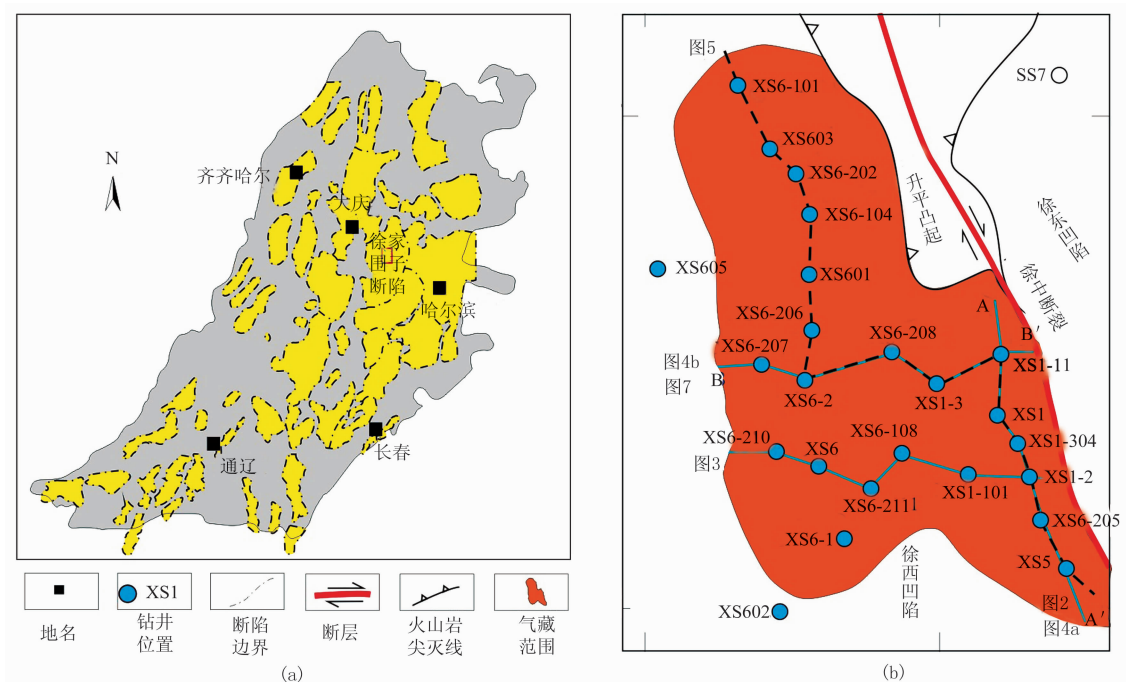


图 1 研究区位置图

(a) 松辽盆地断陷分布; (b) 庆深气田 XS1-XS6 井区位置图

城组一段火山岩,岩性以流纹质碎屑熔岩、流纹岩和流纹质凝灰岩为主,发育少量的沉积岩夹层(图 2、图 3)。连井对比分析可知,该段火山岩属于营城组一段上部火山岩,有文献将其划分为营城组一段旋回三<sup>[17,26,27]</sup>。营城组一段火山岩与上覆营城组四段不整合接触,与下伏沙河子组角度不整合接触。

## 3 界面识别标志和系统

本文采用 5 类 9 种的火山岩地层界面划分方

案<sup>[6]</sup>。通过井震对比研究,在 XS1-XS6 井区营城组一段火山岩内部识别出喷发整合、喷发不整合、喷发间断不整合和侵入接触 4 种界面,具体特征如下。

### 3.1 界面识别标志

#### 3.1.1 喷发间断不整合

该类界面是火山长期间歇形成的,所以火山地层会遭受改造,特别是正地形区火山岩会遭受剥蚀,形成风化壳。在低洼处会接受沉积形成再搬运火山沉积岩或正常沉积岩。该类界面通常是由上凸的风化壳顶面和下凹的沉积岩底面组合形成的波状起伏

界面,主要有以下两种识别标志。一是如图 2a、图 2b所示的岩层顶部存在明显的侵蚀,发育风化壳,表明存在火山活动的间歇期;风化壳在测井上通常表现为相对高伽马、低密度和低阻的特征,在成像测井上可表现为低阻带一斑点低阻过渡带向正常电阻率变化的特征。二是如图 2a、图 2c、图 2d 火山岩中的沉积岩夹层,指示了火山活动的间歇;通常表现为低密度和低阻的特征、伽马曲线变化不定,成像测井表现为低阻层。该类界面在 seismic 剖面上一般具有连续、强振幅的反射特征。

### 3.1.2 喷发不整合

该类界面成因主要是在火山脉动喷发过程中形成的,界面上下地层单元并没有明显的时间间断,所以不存在大范围的显著侵蚀现象;可在不同流向的流动单元、堆积单元或冷却单元间形成,也可在局部有掀斜改造的流动单元、堆积单元或冷却单元间形成,界面上下地层单元产状不协调。识别标志可以是特殊岩性,如玻璃质岩石和松散细颗粒火山碎屑岩;也可以是熔岩与碎屑岩的接触界面。在庆深气田该类界面主要有两种表现。第一种是图 2a、图 2e、图 2f 显示的碎屑熔岩与熔岩的接触,在界面处未见明显的侵蚀,但产状不协调;当界面上下的岩性相同时,该类界面在密度、伽马和电阻率测井上的响应不明显,在成像测井上通常可见一层厚约 0.2m 的相对低阻层;如果界面上下岩性不相同,密度、伽马和电阻率测井曲线上可见明显的台阶,成像测井图像上可见突变界面。第二种是图 4a 中的珍珠岩,它的存在多数情况下可暗示该区火山地层经过短暂的间歇且未经受明显的侵蚀,再结合产状不协调则可确定为喷发不整合界面;该类界面在声波、电阻率曲线上存在明显的台阶,成像测井图像上可见不规则界面。

### 3.1.3 喷发整合

该类界面成因主要是在火山脉动喷发过程中形成的,界面上下地层单元并没有明显的时间间断。需要平缓的地形条件和稳定喷发方式才能形成,界面上下地层单元产状协调。其岩性和电性标志与喷发不整合界面一致。

### 3.1.4 侵入接触

该类界面往往形成于后期喷发通道对先期火山地层的改造,典型特征是次火山岩与围岩间的接触界面。在研究区该类界面未见钻井揭示,通过钻井和地震资料的联合对比,认为该类界面在 XS1-2 井

与 XS1-304 井之间发育,整体上呈高角度齿状。齿状界面围限区地震反射特征呈筒状或管状,连续性差、杂乱;齿状界面围限区两侧地震反射特征相似,地层在产状上变化具有一致性。

## 3.2 界面系统

依据上述界面的识别标志,进行火山地层界面系统井震联合识别。首先根据沉积岩夹层和风化壳的组合关系,共识别出 3 个喷发间断不整合界面,界面具有波状起伏的特征(图 3、图 4)。喷发不整合界面 1(EIUB-1)分布在研究区东南部,起伏幅度较大,在 XS1-2 井和 XS1-304 井之间被侵入接触界面分割出一块空缺区。喷发不整合界面 2(EIUB-2)分布范围在 EIUB-1 的基础上向西向北扩大,起伏幅度也较大,在 XS1-1 井附近该界面连通了营城组一段火山岩的顶底界面。喷发不整合界面 3(EIUB-3)分布范围在 EIUB-2 的基础上向北扩展,但在东部有萎缩,EIUB-3 与 EIUB-2 闭合于 XS1 井一侧。其次是在喷发不整合界面约束下进行喷发整合和喷发不整合界面的井震联合对比识别,从图 3、图 4 可知,火山地层发育丰富的喷发不整合界面和少量的喷发整合界面。喷发不整合界面通常具有波状起伏的特征,分布范围较大;喷发整合界面通常较为光滑,分布范围一般较小。综上所述,火山地层界面系统是由少数关键喷发间断不整合、众多交错叠置的喷发不整合、少数喷发整合和侵入接触界面构成的网状系统。

## 4 充填单元类型和特征

### 4.1 充填单元类型

本文研究重点是营城组一段内幕的火山地层充填,所以重点分析精细单元构成。按照目前对火山地层单元的认识,可用流动单元或堆积单元、冷却单元、火山机构单元来表征火山地层构成<sup>[4,12]</sup>。流动单元和堆积单元都是具有相似时间属性的最小火山地层单元。流动单元通常是指同一个喷出口单次喷发的熔岩流,沿着一定的方向流动分散形成的地质体;其岩层倾向和倾角变化通常是连续的,充填时往往具有填平补齐特征。堆积单元通常是指同一个喷出口单次喷发的碎屑流沿着一定的方向快速移动分散堆积形成的地质体,如热碎屑流和热基浪堆积;其岩层倾向和倾角变化通常是连续的,充填时往往具有填平补齐或席状披覆特征。冷却单元通常是指相



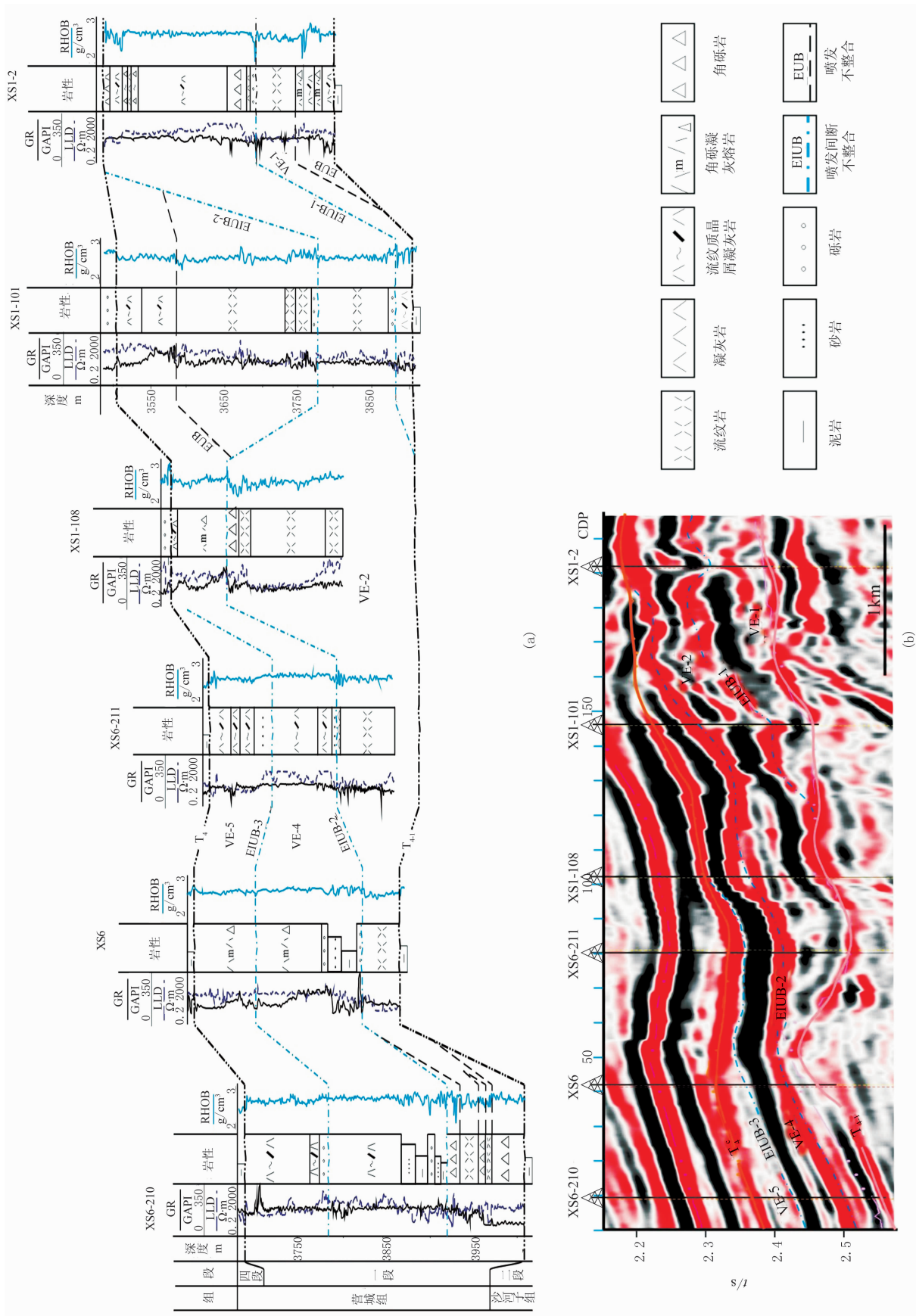


图3 松辽盆地庆深气田XS1-XS6井区营城组火山地层界面井震对比

(a)井—井对比特征; (b)井—震对比特征

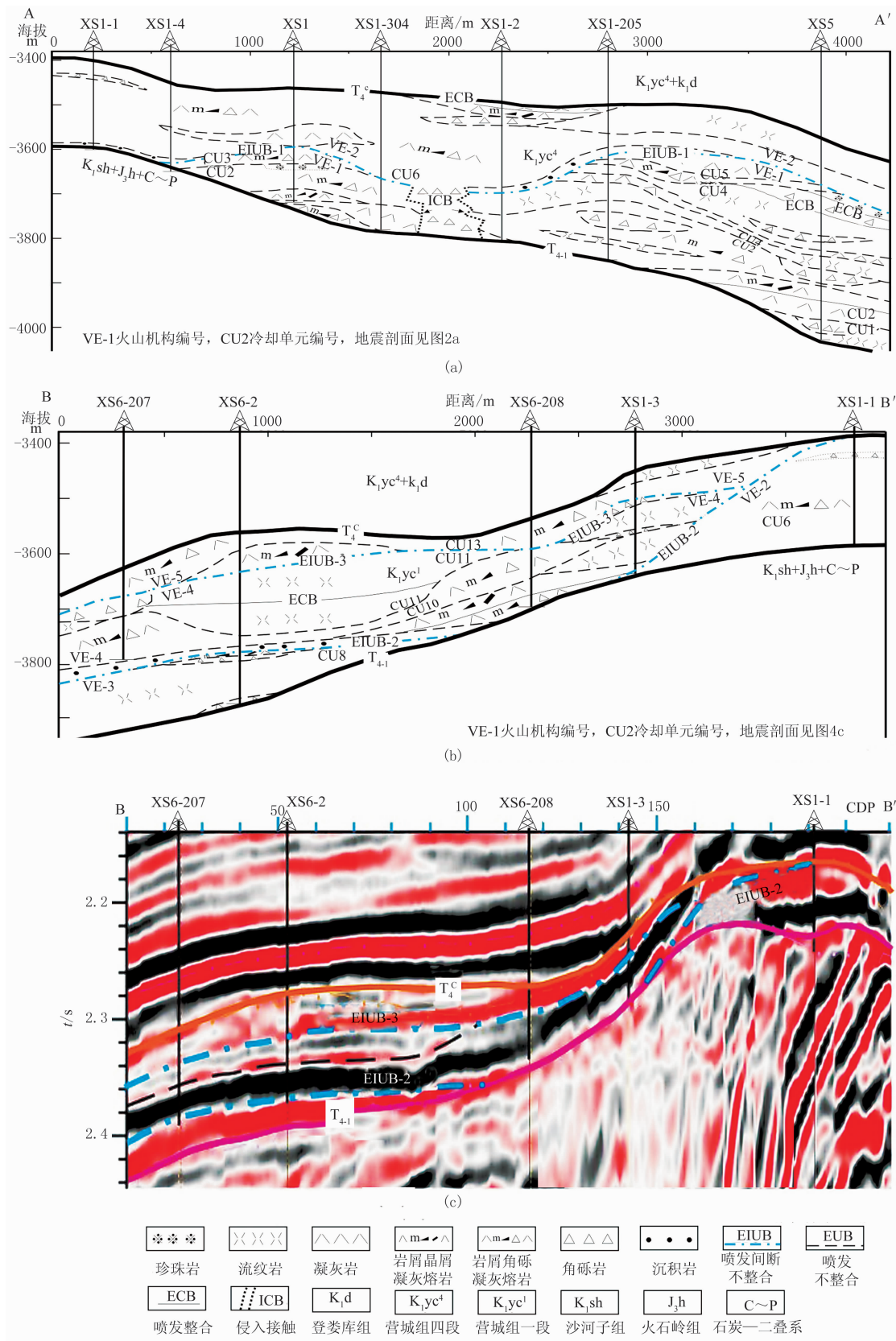


图 4 松辽盆地庆深气田 XS1-XS6 井区营城组火山地层界面和充填单元特征  
(a)A-A'地质剖面; (b)B-B'地质剖面; (c) B-B'地震剖面

对连续喷发的流动单元或堆积单元叠置组合形成的一个整体冷却成岩的地质体;其产状变化与流动单元或堆积单元相似,但岩性则可能会存在较大差别;冷却单元也可只包含一个流动单元或堆积单元;冷却单元按其构成可划分为熔岩型、复合型和碎屑岩型<sup>[12]</sup>。火山机构往往是由围绕同一主火山口的多个冷却单元的叠置排列构成,特殊情况时也可能由一个冷却单元构成;可具有一个或多个岩性—岩相变化序列;通常从喷发中心向远源区域地层倾角呈变小趋势。

#### 4.2 充填单元特征

根据上述各类界面围限地质体岩性和地层产状变化特征可知,喷发间断不整合界面围限地质体通常表现为沿着喷发中心向两侧减薄尖灭,可与火山机构对应,据此识别出5个火山机构,自下而上分别为火山机构 VE-1、VE-2、VE-3、VE-4、VE-5;喷发不整合和喷发整合界面多围限冷却单元、流动单元或堆积单元,进一步根据地层产状要素和特征岩性划分出冷却单元,最后根据岩性特征划分流动单元或堆积单元(图4)。表1是分火山机构进行简要描述的统计表。

表1 松辽盆地庆深气田 XS1-XS6 井区营城组火山地层充填单元特征

火山机构	界面		终止方式	形态	最大厚度 m	冷却单元/个			流动单元或 堆积单元/个	备注
	顶	底				碎屑岩型	复合型	熔岩型		
VE-5	T <sub>4</sub> <sup>o</sup>	EIUB-3	超覆	席状	100	1			2/7	
VE-4	EIUB-3	T <sub>i+1</sub> /EIUB-2	超覆	席状	150	1	2	1	7/10	
VE-3	EIUB-2	T <sub>i+1</sub>	下超	盾状	120	7	8		1/4	
VE-2	T <sub>4</sub> <sup>o</sup>	EIUB-2	下超	锥状	250		1		1/5	穿切改造 VE-1
VE-1	EIUB-1	T <sub>i+1</sub>	下超	锥状	300	3		2	4/11	

## 5 火山地层格架

庆深气田 XS1-XS6 井区火山地层整体上由火山机构横向迁移、纵向叠置而成(图5)。在该区域

内先是形成了厚度大但范围较小的火山机构,形似补丁状(造锥),火山地层均为下超终止,以火山机构 VE-1 和 VE-2 为代表;然后形成了厚度中等、但分布面积较大的火山,具席状披覆特征,机构中心不明显,火山地层均为向东超覆终止于火山机构 VE-2 古

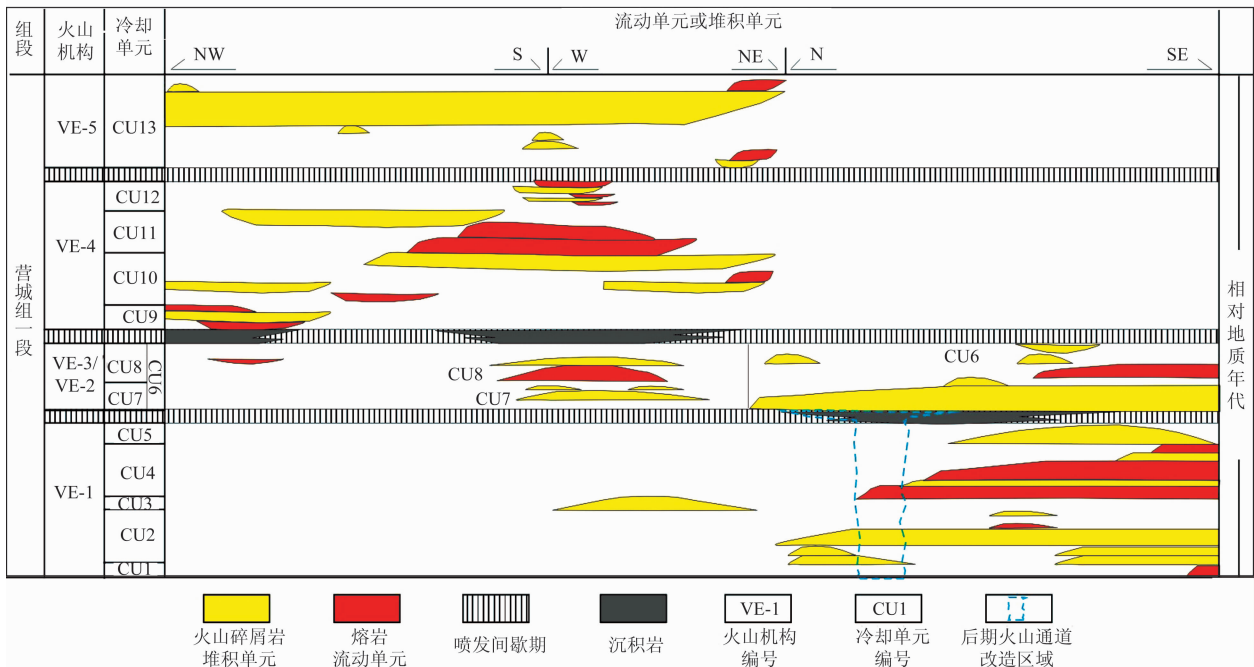


图5 松辽盆地庆深气田 XS1-XS6 井区营城组精细火山地层格架

斜坡,以火山机构 VE-4 和 VE-5 为代表。充填单元纵向序列为:下部熔岩型比例较大,中部熔岩型比例变小,上部过渡为碎屑岩型。充填单元横向展布特征为南部熔岩型为主,向北部过渡为碎屑岩型。此外需要指出的是该格架为相对地质年代的概念。

## 6 讨论

### 6.1 火山地层格架时间属性

从具有完备历史记录的现代火山来看,火山地层具有短暂建造和长期改造的时间特征。由图 6 可知,多数火山喷发建造持续时间小于 6 个月,42% 的火山主体喷发期更是小于 1 天。在此期间熔岩流动单元或碎屑岩堆积单元建造时间短的只有几分钟,长的也只有几天;火山机构主体建造时间可能只有短暂的数月、数年或数百年。如黑龙江五大连池的老黑山火山机构形成时间只有 14 个月,火烧山火山机构则只有 1 个月<sup>[29]</sup>。

由此可见,火山机构建造的时间在地质年代时间中应该属于一些离散的点,如果简单地将测试结

果归结为一个活动时间范围不能客观地反映火山地层的建造历史。同时对比老黑山和火烧山的建造时间与目前的同位素年代测试的误差,可以得出火山机构建造时间可能远远小于测试误差,所以要想得到古火山地层精确的年代格架应该十分困难。与建造过程相对应的喷发间歇期却较长,如五大连池火山群的老黑山与下伏笔架山火山机构具有 0.07~0.08 Ma 的间歇,二者之间可见明显的风化土壤层,其他火山机构之间也具有显著的间歇,最长的为 0.5Ma<sup>[30]</sup>。图 3 显示 XS6-210 井在喷发间断不整合界面 2 之上发育 55.5m 厚的沉积岩,包括泥岩 18.5m、砾岩 9m 和细砂岩 28m,如果按照常规盆地沉积速率换算形成间歇时间约 0.5Ma,表明该喷发间断界面时间跨度约 0.5Ma,还不包括喷发间断期内遭受剥蚀或未接受沉积的时间。所以如果将图 5 中的年代坐标换成绝对年代,该格架中的沉积岩夹层应该占据绝大多数的时间延伸,而火山地层则只能表现为离散的水平线段。这样不利于描述火山地层序列,应该采用相对地质年代坐标轴进行火山地层格架的研究,突出地层的物质和空间特征。

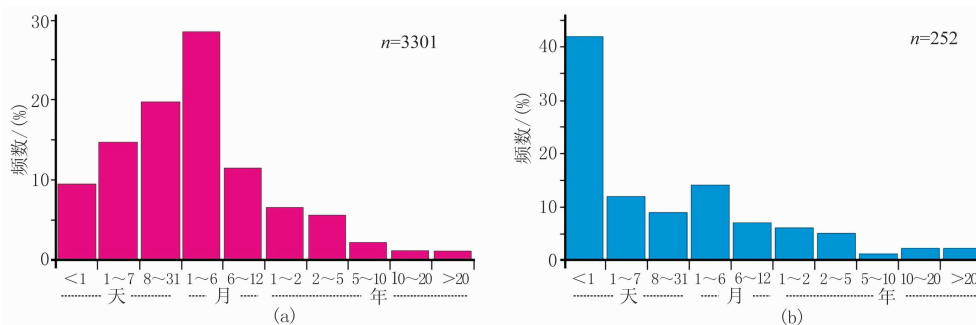


图 6 火山地层建造时间属性<sup>[28]</sup> ( $n$  为样本数)

(a) 火山喷发持续时间; (b) 从火山喷发开始到高峰期的时间

### 6.2 地层格架与储层的关系

图 7 是在火山地层格架的约束下,利用测井解释孔隙度和渗透率编制的剖面图,图中所示火山岩孔隙度和渗透率等值线纵向和横向变化复杂,等值线间隔距离并不均匀。对比图 4 和图 7 可知,高孔渗带的分布规律主要受界面、流动单元或堆积单元的共同约束。相比较而言,熔岩流动单元的孔隙度要比碎屑岩堆积单元高,横向延伸范围更大;碎屑岩堆积单元的渗透率要稍高于熔岩流动单元。下面以孔隙度为例阐述地层格架与储层关系。

熔岩流动单元的多数高孔隙度带分布在喷发间断不整合界面之下,如 VE-4 中的 XS1-3 井上部和

XS6-2 井的上部、VE-3 中的 XS6-2 井处;少量高孔隙度带分布在喷发不整合或喷发整合界面之下,如 VE-4 中的 XS1-3 井上部熔岩流动单元。这与熔岩流动单元的原生气孔主要分布在上部有关,加上喷发间断不整合和喷发不整合界面是流体通过的良好通道,也造成该处的岩石易遭受流体溶蚀改造形成次生孔隙,上述两个因素共同促成了喷发间断不整合和喷发不整合界面之下的高孔隙带<sup>[6]</sup>。

碎屑岩堆积单元的高孔隙度带的分布在喷发间断不整合界面之下,如 XS1-1 井的堆积单元;也可在充填单元中部或下部,如 XS6-2 井的 VE-4 和 VE-5 中的碎屑岩堆积单元。这与碎屑岩堆积单元



的原生粒间孔受火山碎屑颗粒大小控制有关,颗粒大有利于粒间孔的发育。如图 8 所示,火山角砾岩中粒间孔小;火山集块岩中发育粒间孔较大,填隙物发生了溶蚀使粒间孔扩大。而碎屑堆积单元中可发育多种层理,如粒序层理、逆粒序层理和复合层理,

所以火山碎屑堆积单元的原生孔隙可以分布在顶部、中部和底部。同熔岩流动单元一样,喷发间断不整合界面之下的碎屑堆积单元顶部也可发育次生孔隙。所以堆积单元的层理和喷发不整合界面共同控制着高孔隙带的发育。

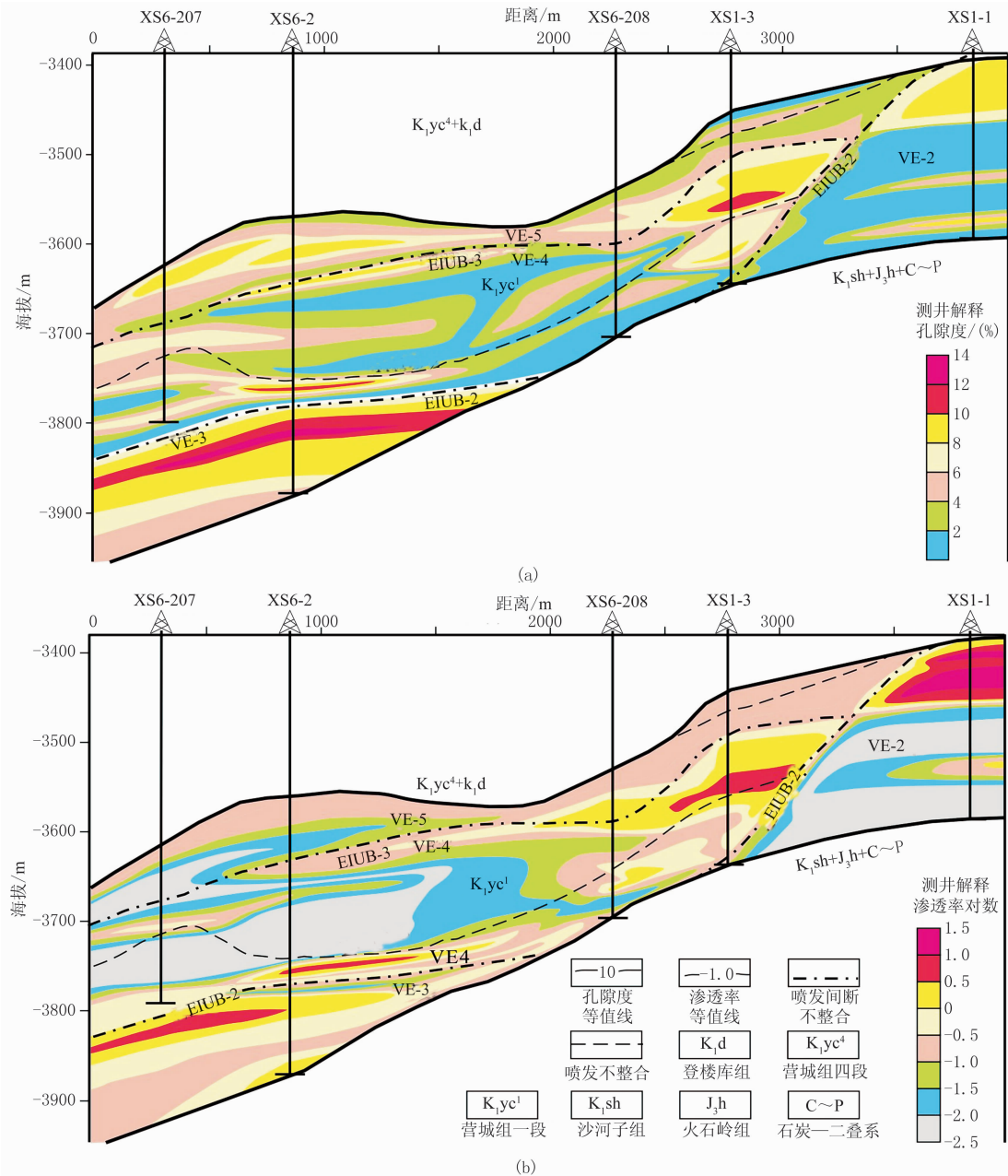


图 7 松辽盆地庆深气田 XS1-XS6 井区营城组孔隙度渗透率特征

(a) 孔隙度等值线剖面图; (b) 渗透率对数等值线剖面图

图 7 显示本区渗透率与孔隙度的分布规律相似,上述孔隙度的变化特征基本适用于渗透率。综上所述,地层界面、流动单元和堆积单元共同控制高孔渗带的分布位置,流动单元和堆积单元还控制储

层的类型和规模。

### 6.3 盆地火山地层格架识别精度及应用

图 4 的地震资料主频通常低于 30Hz、CDP 单元为 25m×25m。对比图 4 火山地层的地质剖面 and

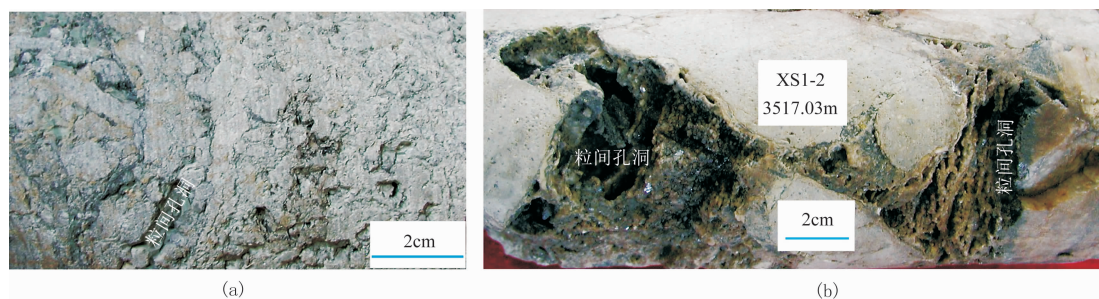


图 8 火山堆积单元储集空间特征

(a)XS1-2 井,3686.45m,流纹质角砾岩;(b)XS1-2 井,3517.13m,流纹质集块岩

地震剖面可知,现有地震资料对喷发间断不整合界面具有较好响应,但对喷发整合或喷发不整合界面多数没有响应。所以仅依靠普通三维地震资料难以实现对界面系统的精细刻画。幸运的是火山岩储层的分布与喷发间断不整合界面的关系密切,所以在只有普通三维地震资料时也可对火山岩储层分布位置进行约束。此外,现有的地震资料对充填单元——火山机构能清楚地识别,对部分冷却单元也可识别,多数冷却单元、流动单元或堆积单元超出地震分辨能力,存在识别盲区。火山机构对储层分布控制作用明显,所以在只有普通三维地震资料时也可有效约束有利储层的分布范围。如果普通三维地震资料结合高精度的录井一测井资料,则可建立合理的精细火山地层格架,为火山岩储层精细刻画提供有力的支撑。

## 7 结论

(1)通过井震对比研究,在庆深气田 XS1-XS6 井区营城组一段火山岩内部识别出喷发整合、喷发不整合、喷发间断不整合和侵入接触这四种界面。火山地层的界面是由少数关键喷发间断不整合、众多交错叠置的喷发不整合、少数喷发整合和侵入接触界面构成的网状系统。分析各类界面围限地质体岩性和地层产状变化特征可知,喷发间断不整合界面围限地质体多与火山机构对应,喷发不整合和喷发整合界面多围限流动单元或堆积单元,根据地层产状组合特征和岩性特征可划分出冷却单元。

(2)庆深气田 XS1-XS6 井区火山地层整体上由横向迁移、纵向上叠置的火山机构组成。在该区域内火山地层首先形成了厚度大但范围较小的火山机构,形如补丁状,火山地层均为下超终止;然后形成

了厚度中等、但分布面积较大的火山岩,形如席状披覆,机构中心不明显,该类机构均向东超覆终止于火山机构 VE-2 形成的古斜坡。充填单元纵向序列为:下部熔岩型比例较大,在中部熔岩型比例变小,上部过渡为碎屑岩型。充填单元横向特征为南部熔岩型为主,向北部过渡为碎屑岩型为主。

(3)庆深气田 XS1-XS6 井区熔岩流动单元的多数高孔渗带分布在喷发间断不整合界面之下,少量高孔渗带分布在喷发不整合界面之下。碎屑岩堆积单元的高孔渗带有的分布在喷发间断不整合界面之下,也可在充填单元中部或下部。所以界面和流动单元或堆积单元共同控制高孔渗带分布位置,流动单元和堆积单元控制储层的类型和规模。

(4)目前在对火山地层的研究中,通常套用沉积岩中的层状结构模式,在多数情况下不适用于火山地层,导致建立的火山地层格架与实际不符,在此基础上进行储层和气藏的研究结果可能会产生偏差。在火山岩储层研究中需要重视火山地层的特殊成因,从地层成因角度入手,争取实现单火山机构的单流动单元或堆积单元刻画。

## 参考文献

- [1] 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.  
Tang Huafeng, Li Ruilei, Wu Yanhui et al. Textural characteristics of volcanic strata and its constraint to impedance inversion. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(2): 620-627.
- [2] 唐华风,白冰,边伟华等.松辽盆地营城组火山机构地层结构定量模型.石油学报,2012,33(4):541-550.  
Tang Huafeng, Bai Bing, Bian Weihua et al. Quantitative models of strata texture within volcanic edifices of Yingcheng formation in Songliao basin, NE China. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(4): 541-550.
- [3] 傅树超,卢清地.陆相火山岩区填图方法研究新进

- 展——“火山构造—岩性岩相—火山地层”填图方法. 地质通报, 2010, 29(11): 1640-1648.  
Fu Shucao, Lu Qingdi. New progress of mapping method in the nonmarine volcanic terrain—“volcanic construction-lithologic rock facies-volcanic strata” mapping method. Geological Bulletin of China, 2010, 29(11): 1640-1648.
- [4] 唐华风, 赵密福, 单玄龙等. 松辽盆地营城组火山地层单元和地震地层特征. 石油地球物理勘探, 2012, 47(2): 323-330.  
Tang Huafeng, Zhao Mifu, Shan Xuanlong et al. Characteristics of volcanic stratigraphy units and seismic stratigraphy of Yingcheng formation in Songliao basin, NE China. OGP, 2012, 47(2): 323-330.
- [5] 赵玉琛. 宁芜地区中生代火山岩地层划分及其特征. 地质科学, 1990, 25(3): 243-258.  
Zhao Yuchen. Stratigraphic division of Mesozoic volcanic strata and their characteristics in Nanjing-Wuhu area. Chinese Journal of Geology, 1990, 25(3): 243-258.
- [6] Tang H F, Cryton P, Gao Y F et al. Types and characteristics of volcanostratigraphic boundaries and their oil-gas reservoir significance. Acta Geologica Sinica(English Edition), 2015, 89(1): 163-174.
- [7] 张春芳, 王奖臻, 许模等. 白鹤滩峨眉山玄武岩系熔岩层界面的鉴别标志. 水土保持研究, 2008, 15(2): 217-219.  
Zhang Chunfang, Wang Jiangzhen, Xu Mo et al. The identification symbols of the Emei mountain basalt lava lay-series in Baihetan hydropower plant. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(2): 217-219.
- [8] Planke S, Symonds P A, Alvestad E et al. Seismic volcanostratigraphy of large-volume basaltic extrusive complexes on rifted margins. Journal of Geophysical Research-Solid Earth, 2000, 105(8): 19335-19351.
- [9] Berndt C, Planke S, Alvestad E et al. Seismic volcanostratigraphy of the Norwegian Margin: constraints on tectonomagmatic break-up processes. Journal of the Geological Society, 2001, 158(3): 413-426.
- [10] 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(6): 911-926.
- [11] 谢家莹. 冷却单元、流动单元与堆积单元. 火山地质与矿产, 1994, 15(1): 74-75.  
Xie Jiaying. Cool unit, flow unit and deposit unit. Volcanology & Mineral Resources, 1994, 15(1): 74-75.
- [12] 程日辉, 任延广, 沈艳杰等. 松辽盆地营城组火山岩冷却单元及地层结构分析. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(5): 1338-1337.  
Cheng Rihui, Ren Yanguang, Shen Yanjie et al. Volcanic cooling unit and analysis of stratigraphic architecture of Yingcheng formation in Songliao basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(5): 1338-1337.
- [13] 王璞, 庞颜明, 唐华风等. 松辽盆地白垩系营城组古火山机构特征. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(6): 1064-1073.  
Wang Pujun, Pang Yanming, Tang Huafeng et al. The characteristics of the Paleo-volcanic edifice of Yingcheng formation, Cretaceous, Songliao basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2007, 37(6): 1064-1073.
- [14] 黄玉龙, 王璞, 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 Yulong, Wang Pujun, Feng Zhiqiang et al. Analogy of physical features amongst modern, ancient and buried volcanoes, a case study from Songliao Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2007, 37(1): 65-72.
- [15] 唐华风, 徐正顺, 王璞等. 松辽盆地白垩系营城组埋藏火山机构岩相定量模型及储层流动单元特征. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(6): 1074-1082.  
Tang Huafeng, Xu Zhengshun, Wang Pujun et al. Facies quantitative model and characteristics of reservoirs flow unit of buried volcanic edifice of Yingcheng formation in Songliao basin, Cretaceous, NE China. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2007, 37(6): 1074-1082.
- [16] 黄玉龙, 王璞, 门广田等. 松辽盆地营城组火山岩旋回和期次划分——以盆缘剖面和盆内钻井为例. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(6): 1183-1191.  
Huang Yulong, Wang Pujun, Men Guangtian et al. Division of volcanic cycles and stages of Yingcheng formation of the Songliao basin—take the cross sections at the Margin and the boring holes as examples. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2007, 37(6): 1183-1191.
- [17] 唐华风, 边伟华, 王璞等. 松辽盆地白垩系营城组火山岩喷发旋回特征. 天然气工业, 2010, 30(3): 35-39.  
Tang Huafeng, Bian Weihua, Wang Pujun et al. Characteristics volcanic eruption cycles of Yingcheng formation in Songliao basin, early Cretaceous, NE China. Natural Gas Industry, 2010, 30(3): 35-39.
- [18] 王璞, 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 Pujun, Zhang Gongcheng, Meng Qi'an et al. Applications of seismic volcanostratigraphy to the volcanic rifted basins of China. Chinese J Geophys, 2011, 54(2): 597-610.
- [19] 李明, 邹才能, 刘晓等. 松辽盆地北部深层火山岩气藏识别与预测技术. 石油地球物理勘探, 2002, 37(5): 447-484.  
Li Ming, Zou Caineng, Liu Xiao et al. Identifying and predicting technology of deep volcanics gas reservoir in north of Songliao basin. OGP, 2002, 37(5): 447-484.
- [20] 徐颖新, 尚华, 李秀珍等. 火山岩地震解释技术在松辽盆地长岭断陷深层天然气勘探中的应用. 石油地球物理勘探, 2008, 43(增刊1): 63-68.

- Xu Yingxin, Shang Hua, Li Xiuzhen et al. Application of volcanic rock seismic interpretation technique to deep natural gas exploration in Changling fault depression of Songliao basin. *OGP*, 2008, 43(S1): 63-68.
- [21] 郭洪岩, 云美厚, 艾印双等. 松辽盆地营城组三段火山岩储层的岩石物理特性. *石油地球物理勘探*, 2012, 47(1): 74-81.
- Guo Hongyan, Yun Meihou, Ai Yinshuang et al. Study on petrophysical properties of volcanic reservoir in the third member of Yingcheng formation in Songliao basin. *OGP*, 2012, 47(1): 74-81.
- [22] Wang P J, Ren Y G, Shan X L et al. The cretaceous volcanic succession around the Songliao basin, NE China: Relationship between volcanism and sedimentation. *Geological Journal*, 2002, 37(2): 97-115.
- [23] 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 Chuanjing, Chen Shuming, Chu Lilan et al. A new understanding about the volcanic distribution characteristics and eruption mechanism of Yingchen formation in Xujiaweizi fault depression. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(1): 63-72.
- [24] 张元高, 陈树民, 张尔华等. 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 Yuangao, Chen Shumin, Zhang Erhua et al. The new progress of Xujiaweizi fault depression characteristics of structural geology research. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(1): 142-148.
- [25] 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 Erhua, Jiang Chuanjin, Zhang Yuangao et al. Study on the formation and evolution of deep structure of Xujiaweizi fault depression. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(1): 149-157.
- [26] 冯子辉, 印长海, 齐景顺等. 大型火山岩气田成藏控制因素研究——以松辽盆地庆深气田为例. *岩石学报*, 2010, 26(1): 21-32.
- Feng Zihui, Yin Changhai, Qi Jingshun et al. Main factors controlling hydrocarbon accumulation in large volcanic gas fields: A case study of the Qingshen gas field in Songliao basin. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(1): 21-32.
- [27] 杨帝, 王璞, 梁江平等. 松辽盆地白垩系营城组火山岩喷发旋回划分. *地层学杂志*, 2011, 35(2): 122-128.
- Yang Di, Wang Pujun, Liang Jiangping et al. Volcanic eruption cycles of the cretaceous Yingcheng Formation in the Songliao basin. *Journal of Stratigraphy*, 2011, 35(2): 122-128.
- [28] Sigurdsson H, Houghton B F, McNutt S R et al. *Encyclopedia of Volcanoes*[M]. New York, Academic Press, 2000, 257.
- [29] 陈洪洲, 吴雪娟. 五大连池火山 1720—1721 年喷发观测记录. *地震地质*, 2003, 25(3): 491-500.
- Chen Hongzhou, Wu Xuejuan. Observation records of the eruption of Wudalianchi volcanoes in 1720-1721 AD. *Seismology and Geology*, 2003, 25(3): 491-500.
- [30] 李齐, 陈文寄, 李大明等. 五大连池地区火山岩年代学研究. *地质论评*, 1999, 45(增刊): 393-399.
- Li Qi, Chen Wenji, Li Daming et al. Achronological research on volcanic rocks from the Wudalianchi area. *Geological Review*, 1999, 45(S): 393-399.

(本文编辑: 刘英)

## 作者简介



唐华风 副教授, 1979 年生; 2001 年毕业于吉林大学, 获学士学位; 2004 年毕业于吉林大学海洋地质专业, 获硕士学位; 2007 年毕业于吉林大学矿产普查与勘探专业, 获博士学位; 现在吉林大学地球科学学院从事石油地质教研工作。