

松辽盆地营城组火山地层单元和地震地层特征

唐华风*^① 赵密福^② 单玄龙^① 王璞珺^①

(^①吉林大学地球科学学院,吉林长春 130061; ^②中石化东北油气分公司,吉林长春 130062)

唐华风,赵密福,单玄龙,王璞珺. 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

摘要 本文依据对松辽盆地营城组火山岩地层界面特征、构成单元和地震相单元的分析,探讨了火山岩地震、地质特征,得到以下认识:①松辽盆地营城组火山岩地层常见角度不整合和火山不整合界面(由喷发物的堆积方式的差异形成的“角度不整合”),少见平行不整合和整合界面;②根据火山岩的形成过程和岩石界面特征,可将火山岩地层单元由小到大依次分为冷却单元、冷却单元组合、火山机构、火山机构群4级,在现今地震资料分辨率情况下可达到对火山机构群、火山机构的有效刻画;③在营城组一段、三段火山岩地层中可识别出席状、席状披盖、盾状、丘状、透镜状、楔状、扇状、碟状/盘状和筒状等9种基本地震相单元,每种地震相单元可与某种火山机构对应,在同一地震相单元内岩层或岩层组产状从喷发中心向远端倾向相同、倾角变小,根据其叠置关系可建立火山地层(冷却单元组合)的相对地质年代格架。上述成果为火山岩地层的地震刻画提供了理论依据。

关键词 松辽盆地 下白垩统营城组 火山岩地层单元 火山不整合 地震相单元 火山岩地层格架
中图分类号:P631 **文献标识码**:A

1 引言

国内外已对火山岩地层的有效刻画方法进行了诸多研究。Planke 等^[1]和 Berndt 等^[2]研究了大西洋两岸和澳洲西海岸大陆边缘盆地的火山地层成因后,归纳出火山岩地层的16种构成单元;Single 等^[3]通过研究大陆边缘盆地的玄武岩建造后,依次将火山岩地层划分为火山岩省、地震相单元、火山岩相和相组合、剖面尺度研究的最小单元、显微镜下观察特征单元等五级。马金清等^[4]、谢家莹^[5]在1:5万的地质填图时采用火山活动旋回(火山机构)—组(火山机构演化阶段)—岩相(火山喷发类型)—层的四级单元表征火山岩^[4,5];谢家莹^[6]认为火山喷出物基本单元为“流动单元”或“堆积单元”,统称为冷却单元。孟宪锋等^[7]认为,在1:25万地质填图时可根据火山岩系组内的相序岩石组合划分岩性段,并作为填图单元;刘庆宏等^[8]利用岩石地层—火山岩

相—火山构造法进行地质填图。

随着松辽盆地深层火山岩油气勘探、开发的深入,发现火山岩地层与沉积地层在地震、地质特征方面存在本质差别。已有资料证实该区断陷层主要存在三套火山岩,从下到上分别是火石岭组二段、营城组一段和二段^[9];在段划分的基础上又开展了火山旋回期次的研究,根据岩性、岩相和电性特征将营城组一段划分为三个旋回^[10,11],每个旋回中根据沉积岩夹层和风化壳等标志又可划分为若干个期次^[12];在旋回研究的基础之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^[13]。近年对松辽盆地火山岩地层研究时多侧重于火山机构的刻画,并建立了火山机构储层和物理模型^[14,15],开展火山机构叠置关系、火山机构相带及其储层—气藏的地球物理刻画^[16~20]。上述研究为火山地层刻画和火山岩油气精细勘探提供了地质依据。

如何进行不同断陷/地区之间火山岩地层的有效对比一直困扰着火山岩露头区地质填图和盆地勘

* 吉林省长春市建设街2199号鸽子楼吉林大学地球科学学院,130061。Email: tanghfhc@jlu.edu.cn

本文于2011年04月29日收到,最终修改稿于2012年1月31日收到。

本研究由国家“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)联合资助。

探,这与火山岩地层的特殊成因有关:①火山岩建造速度、改造速度与沉积过程区别显著,而且不同的火山岩地层的建造速度、改造速度也存在巨大差异;②火山岩建造时期不同的堆积方式造成了火山岩地层中界面复杂,增加了对比难度。因此对火山岩地层的合理划分、建立火山岩地层地质单元与地震相单元的对应关系是火山岩油气勘探的关键。为此,本文对松辽盆地营城组火山岩进行火山岩地层界面特征、构成单元和地震相单元分析,探讨火山岩的地震、地质特征,以期对火山岩的油气勘探、开发提供地震、地质依据。

2 火山岩地层界面及单元构成特征

2.1 界面特征

按照地层产状来看,松辽盆地营城组火山岩地层常见角度不整合和火山不整合,少见平行不整合和整合。火山岩地层的角度不整合由喷发间歇期或喷发过程对同期已固结围岩的改造而形成,火山不整合表现为“角度不整合”,是由喷发物的堆积方式的差异而形成,不需要时间间断和构造改造。如冷却单元之间、冷却单元组合之间产状出现不一致即可形成火山不整合面,该类界面的分布范围较小,上述两类不整合界面往往呈组合出现。

五大连池老黑山是一个外形呈丘状的玄武质火山机构,该类机构在松辽盆地营城组也占一定的比例,其结构特征与营城组火山岩也具有可比性,因此选择该火山机构作为对比参照。图1为五大连池笔架山—老黑山—火烧山火山岩地层剖面,展示了火山岩地层结构和地层界面特征。由图中可见:老黑山火山岩与嫩江组(K_2n)接触部分,是长期喷发间断和构造改造形成的不整合面,可大面积分布;火山

锥处的堆积物与下伏熔岩流之间在形成时间上是没有间断的,但两者之间却存在一个角度不整合界面——火山不整合面,该界面延伸范围小,难以在平面上大范围追踪。老黑山火山机构就是受上述两类不整合界面组合的围限。

2.2 地层单元构成特征

图2为五大连池老黑山和火烧山火山岩冷却单元及其组合特征平面图,从图2可知五大连池老黑山和火烧山的火山岩堆积方式:总体上可划分为5个喷溢口的火山产物,每个喷溢口的堆积物还可分为若干个不同的流动单元(冷却单元);各个喷溢口火山产物的产状具有连续变化的特征,且由若干个冷却单元组成,可称为冷却单元组合;由上述5个冷却单元组合构成了老黑山火山机构;由老黑山、火烧山和其他火山机构组成了五大连池火山机构群。据此可将营城组一段、三段火山岩地层划分为冷却单元、冷却单元组合、火山机构和火山机构群四级(表1)。下面分别介绍各级单元特征。

(1) 冷却单元

指冷凝成岩的同一流动单元或堆积单元内的火山岩,近似为岩性—岩相/亚相单元。岩层界面是由火山喷发的短暂间歇形成的,界面上、下的岩石可以一致,也可不一致,最大厚度通常为几米至几十米。同一冷却单元的岩性应该具有相似的结构、构造,如同时发育流纹构造、层理或粒序层理等,但横向上存在变化,如碎屑颗粒或气孔的大小、形状和数量等会发生变化。

(2) 冷却单元组合

是由特征相似或具成因联系的冷却单元构成,通常为岩性—岩相/亚相组合单元,可具有一个或多个相似的岩性—岩相/亚相变化序列,结构、构造也可具有一个或多个相似的变化序列,最大厚度通常

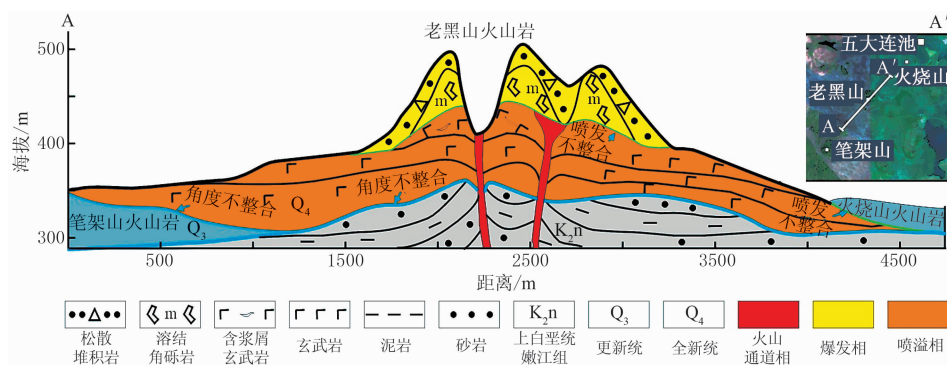


图1 五大连池笔架山—老黑山—火烧山火山岩地层剖面

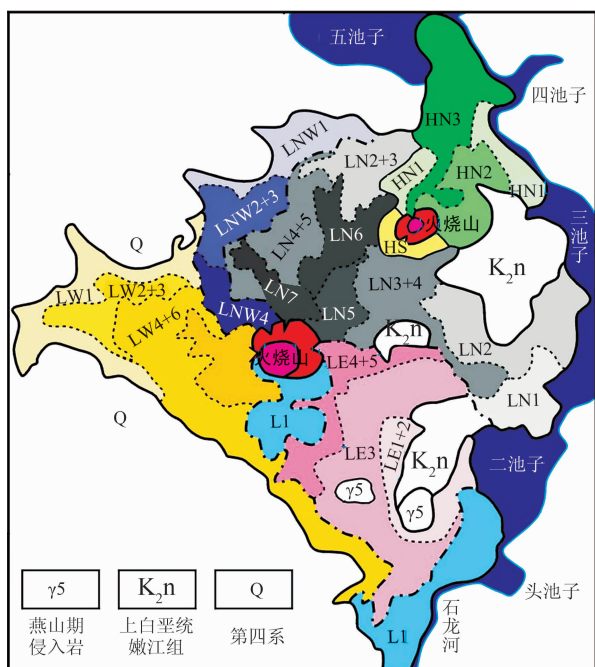


图 2 五大连池老黑山和火烧山火山岩冷却单元及其组合特征平面图^[21]

L1—老黑山早期熔岩; LE—老黑山东溢出口熔岩; LW—老黑山西溢出口熔岩; LNW—老黑山东北溢出口熔岩; LN—老黑山北溢出口熔岩; HS—火烧山南溢出口熔岩; HN—火烧山北溢出口熔岩

为数十米至 200m。界面是在火山喷发的较长间歇期构成的,界面上、下的岩层在产状上可存在较大差别。物质来源于同一喷发中心。

(3)火山机构

是由沿同一主火山口分布的冷却单元组合的排列、叠置而成,通常是岩性—岩相组合单元,可具有一个或多个岩性—岩相变化序列,最大厚度通常为 100~400m。界面往往是长期间歇形成的,可见小型的风化壳和薄层沉积岩夹层。同一机构内的岩石化学成分和岩石结构变化不大,物质来源于同一主喷发中心(可发育一个或多个侧翼喷发中心),其形态可为扇状、丘状、透镜状、盾状、席状等。

(4)火山机构群

是由特征相似或具成因联系的火山机构叠加形成,界面往往是大规模火山喷发间歇形成的,可见大型的风化壳和厚层沉积岩夹层。不同火山机构群之间的岩石化学成分可存在较大差异,同一火山机构群中岩石化学成分变化不大,但岩石结构可存在较大变化,物质来源于同一岩浆房。横向上邻近的火山机构群在岩石化学成分和岩石结构方面可能存在较大差别。

表 1 火山地层单元特征

地层单元	岩相特征	岩性特征	来源	界面特征
冷却单元	同一亚相	单成分、单结构、构造	同一喷出口,同一时间	火山不整合或整合
冷却单元组合	同相不同亚相组合	单成分、复杂结构、构造	同一喷出口,不同时间	
火山机构	不同相组合	成分基本相同、复杂结构、构造	同一主火山口,不同喷出口,不同时间	火山不整合、角度不整合
火山机构群	不同相组合	成分基本相似、复杂结构、构造	同岩浆来源、迁移的不同火山口	角度不整合

3 火山岩地层地震相单元特征

按照地层界面组合特征和地震相特征,在营城组一段、三段的火山岩地层中可识别出席状、席状披盖、盾状、丘状、透镜状、楔状、扇状、碟状/盘状和筒状等 9 种基本地震相单元(图 3),每种地震相单元一般可与某种火山机构对应,火山岩地层就是由上述地震相单元叠置构成,在同一地震相单元内岩层或岩层组产状变化具有规律性,即从喷发中心向远端倾向相同、倾角变小。下面详细介绍各基本单元特征。

(1)席状 从中部与四周厚度几乎没有变化或变化非常小,顶、底界面为平行或近平行的平面,其水平面投影为扇形或团块状,顶面原始坡度角小于 2°。该类地震相单元的顶、底界面多呈整合接触,内部常具平行结构,也可是发散结构。该类地震相可解释为由在相对平缓的古地形上火山喷发形成的堆积物,岩性常为玄武岩或颗粒极细的凝灰岩。

(2)席状披盖 外形与席状地震相单元相似,平滑地披盖在先前地质体表面上,形成披覆背斜和向斜,其水平面投影为扇形或团块状。向斜与背斜的核部厚度可能相等,也可出现向斜核部厚度较背斜核部厚度大的情况。该单元的顶界面多为割截或整

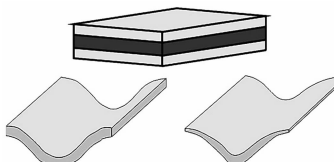
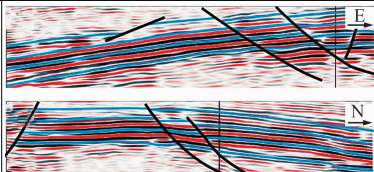

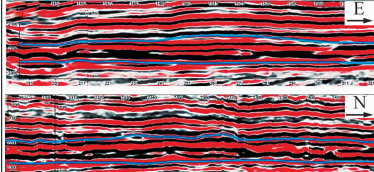
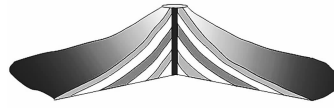
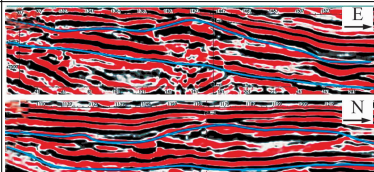
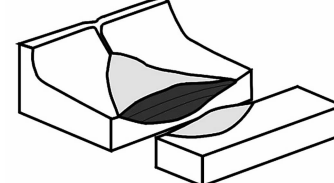
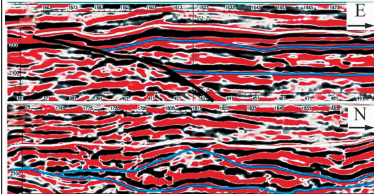
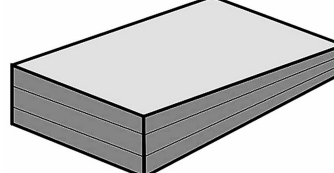
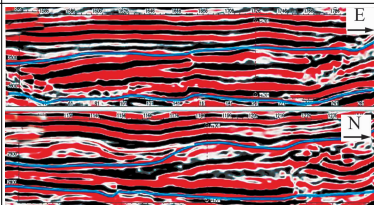
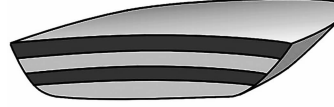
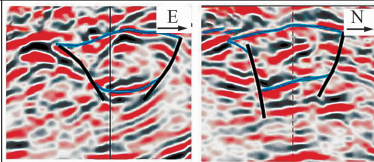

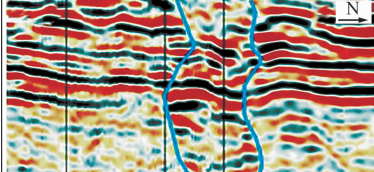
类型	外部形态素描	可能岩性—岩相组合特征	典型地震相图板
席状/ 席状披盖		<ol style="list-style-type: none"> 玄武岩, 喷溢相下部亚相。块状结构 火山碎屑岩, 爆发相空落亚相、热碎屑流亚相、火山沉积相, 发育粒序层理、平行层理、斜层理, 可表现出前积 	
盾状		玄武岩, 喷溢相下部亚相, 中部亚相或上部亚相, 规模通常较大。发育低角度流纹构造、变形流纹构造或似流纹构造, 气孔、杏仁构造	
丘状		以流纹岩、流纹质碎屑(熔)岩为主, 英安岩、安山岩、英安质/安山质碎屑(熔)岩次之, 喷溢相、爆发相、火山通道相的各亚相均发育。发育高角度流纹构造、变形流纹构造或似流纹构造, 方向多变。气孔、杏仁构造发育	
扇状		以流纹岩、流纹质碎屑(熔)岩为主, 英安岩、安山岩、英安质/安山质碎屑(熔)岩次之, 喷溢相、爆发相、火山通道相和火山沉积相的各亚相均可发育。发育高角度流纹构造、变形流纹构造或似流纹构造, 方向多具一致性。气孔、杏仁构造发育。可形成叠瓦状构造	
楔状		以流纹岩、流纹质碎屑(熔)岩为主, 英安岩、安山岩、英安质/安山质碎屑(熔)岩次之, 喷溢相、爆发相、火山通道相和火山沉积相的各亚相均可发育。发育高角度流纹构造、变形流纹构造或似流纹构造, 方向多具一致性。气孔、杏仁构造发育。可表现为前积	
碟状/ 盘状		<ol style="list-style-type: none"> 珍珠岩, 侵出相各亚相均发育。发育变形流纹构造。岩球构造发育。 沉火山碎屑岩—沉积岩, 火山沉积相各亚相均可发育。发育斜层理、平行层理、水平层理、粒序层理等 	
筒状		<ol style="list-style-type: none"> 次火山岩, 火山通道相次火山岩亚相。岩石具有似斑状结构、致密块状 角砾岩, 火山通道相火山颈亚相, 岩石具有堆砌结构, 角砾大小差别大, 成分较单一 	

图3 松辽盆地营城组火山岩地层地震相单元特征

合接触, 底界面为下超或整合接触, 内部常具平行—亚平行结构。该类地震相可解释为由晚期喷发叠加在原有火山岩之上而形成的堆积物, 岩性多为火山碎屑。

(3) 盾状 地层在中部略厚向四周变薄, 厚度变化较小, 由底平、顶部呈盾形的曲面闭合形成, 其水平面投影为椭圆或盾形, 外表面原始坡度角通常

小于 10°(火山口附近可能会稍大), 上覆围岩沿外表面向上超覆。该单元的顶界面多呈整合或“削截”接触, 底界面也多呈整合接触, 内部常具有平行—亚平行结构。该类地震相可解释为由在相对平缓的古地形上火山喷发形成的堆积物, 岩性常为玄武岩夹少量的玄武质碎屑(熔)岩。

(4) 丘状 地层在中部厚向四周变薄, 厚度变化

快,由底平、顶上凸的曲面闭合形成,其水平面投影呈圆形或椭圆,外表面的坡度角通常大于 20° ,围岩沿外表面向上超覆。该单元的顶界面多呈“削截”接触,其底界面也多呈下超或整合接触,丘形中部多为乱岗—杂乱—空白结构,向四周可过渡为平行—亚平行、前积结构。该类地震相可解释为由在相对平缓的古地形上火山喷发形成的堆积物,岩性种类多样,是火山岩地层中最为常见的类型之一。

(5)透镜状 地层在中部厚向四周变薄,厚度变化快,由底面下凹、顶面上凸的曲面闭合形成,其水平面投影呈圆形或椭圆,顶面的坡度角通常大于 20° ,围岩沿外表面向上超覆。该单元的顶界面多呈“削截”接触,其底界面也多呈下超接触,透镜状中部多为乱岗—杂乱—空白结构,向四周可过渡为平行—亚平行、前积结构。该类地震相可解释为在具有负地形古地貌中喷发形成的堆积物,岩性种类多样。综上所述,透镜状外形可视为丘状的一种特殊类型,也是火山岩地层中常见的类型之一。

(6)楔状 地层一侧厚向另一侧变薄,在倾向上厚度向一个方向逐渐减薄,向相反方向增厚,在走向上厚度变化不大,顶、底面多为两个半闭合的平面构成,上覆岩层多沿顶界面向上超覆。该单元的顶界面多呈整合接触,底界面也多呈下超或整合接触,单元内部在倾向上多为发散状、亚平行或前积,在走向上则为平行或亚平行。该类地震相可解释为由断层作为边界的裂隙式喷发而形成的堆积物,岩性主要为玄武岩和玄武质碎屑(熔)岩。

(7)扇状 地层在中部厚向四周变薄,厚度变化快,由底下凹、顶上凸的曲面闭合形成,其水平面投影呈扇形或椭圆,顶、底表面的坡度角通常大于 10° ,围岩沿外表面向上超覆。该单元的顶界面多呈“削截”接触,底界面也多呈下超或整合接触。顺扇体流动方向多为不对称透镜形或丘形,一般呈亚平行或前积结构,垂直扇体流动方向多为丘形,一般呈平行—亚平行结构。该类地震相可解释为在斜坡上喷发的火山碎屑或火山泥石流堆积物。

(8)碟状/盘状 地层在中部厚向四周厚度变化不大,由不闭合的下凹底面、平顶面构成(其他围限可为断层或斜坡面),其水平面投影为圆形或椭圆形。该单元的顶界面多呈“削截”或整合接触,底界面也多呈下超或整合接触,横断面多为块状,常呈乱岗—杂乱结构。该类地震相可解释为在火山口或火

山岩地区洼地的山间盆地堆积物,岩性多为沉火山碎屑岩、珍珠岩或块状熔岩。

(9)筒状 形如直立不规则圆柱状,其直径变化不大,水平面投影为圆形或椭圆形。该单元的圆柱外表面多为断层接触,横断面多为圆或椭圆,常呈杂乱结构。该类地震相可解释为火山口塌陷或火山通道扰动形成的堆积物,岩性多为角砾岩或次火山岩。

4 地震火山地层格架解剖

松辽盆地长岭断陷营城组火山岩岩性主要为流纹岩、流纹质碎屑熔岩,图 4a 为过 YP7—CS1-3 井地震解释剖面,地震资料主频为 26Hz,CDP 面元为 $25\text{m} \times 25\text{m}$ 。由图中可知:

(1)根据岩层产状以及界面上、下的接触关系,在该剖面上识别出 8 个地震相单元(VE①~VE⑧),并可划分为 4 个地震相组合单元,其中各地震相单元可与一个火山机构对应,地震相组合单元即为火山机构群。除单元 VE③与 VE④、单元 VE⑦与 VE⑧之间的叠置关系不明确外,其他单元间的接触关系均明确,并基本与火山机构相对应。

(2)构成该区营城组地震相单元主要为透镜状单元 VE④、VE⑥,丘状单元 VE②、VE⑤、VE⑧,楔状单元 VE①及席状披盖单元 VE③、VE⑦,内部结构多见亚平行、波状、乱岗状、杂乱状、前积等现象,内部反射结构可与岩层组(多为亚相组合)相对应。

(3)在同一几何单元内岩层或岩层组产状变化呈现有一定的规律性,即从喷发中心向远端倾向相同、倾角变小,如席状多发育亚平行结构,楔状多发育亚平行、前积和杂乱结构,大型丘状和透镜状中部多发育前积、乱岗状和杂乱结构,边部则发育亚平行结构,小型丘形则发育亚平行或波状结构。

图 4b 是在地震相单元划分结果基础上,经钻井标定的火山岩亚相对比结果,由图中可见,多数亚相组合单元(相当于冷却单元组合)的叠置关系较为明显,而冷却单元(相当于亚相)的叠置关系则难以确定。

图 4c 揭示了火山岩地层的发育存在横向上迁移、纵向上叠置的特征,整体上表现为先横向上迁移、后纵向上叠置。与沉积岩地层相同之处是通过岩层的叠置关系可以判断出岩层的相对新、老关系,

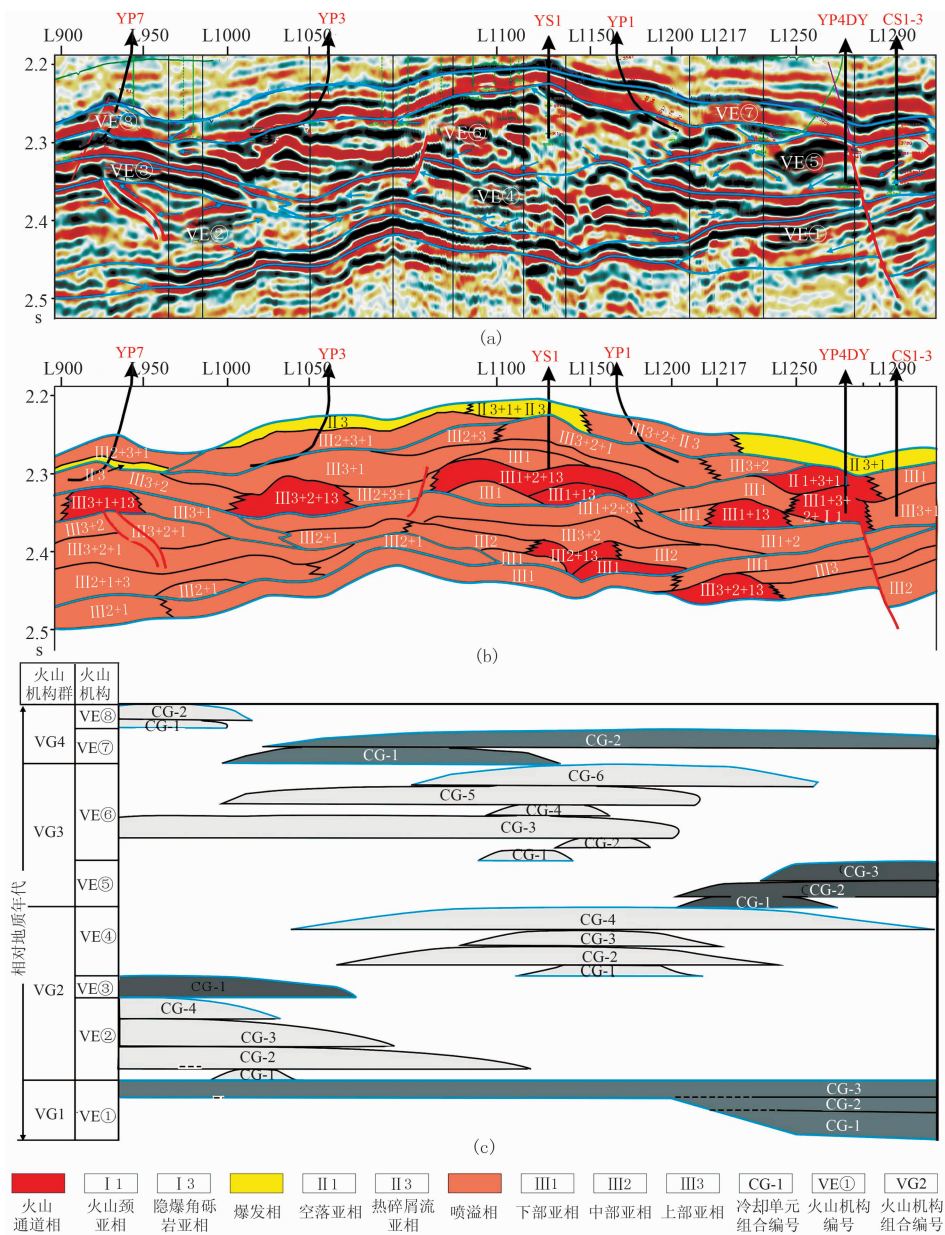


图4 松辽盆地长岭断陷营城组火山岩地层地震、地质特征

(a)过 YP7—CS1-3 井地震解释剖面；(b)营城组火山岩亚相对比结果；(c)营城组火山岩时、空叠置关系图
VE①~VE⑧为地震相单元(可解释为火山机构)

不同之处是难以定义每一个岩层的确切地质年代。由图中可知,火山岩地层中的冷却单元组合对比应该在火山机构的限定下开展,同样,冷却单元的对比也应该在冷却单元组合的限定下进行。在现有地震资料分辨率情况下可有效地区分火山机构,利用地震资料刻画火山岩地层的精度可达到冷却单元组合(相当于亚相组合),因此在没有钻井资料标定或岩相地质模型的约束下,不能精确刻画绝大多数冷却单元(亚相单元)的叠置关系。

5 讨论

5.1 火山不整合界面

火山岩地层中的角度不整合可由两种因素形成:一是喷发间歇期的剥蚀、构造改造;二是没有喷发间歇也没有构造改造时,由于喷发物堆积方式的不同造成的岩层间呈角度不整合的现象。值得注意的是,该类界面形成在时间上很短,从数分钟、数小

时或数天均可,从地质年代的角度来看完全可当作时间上没有间断,因此从时间方面来看该界面可近似看成整合界面。本文提及的地层主要偏向于岩层结构,侧重于考虑岩层产状的影响,可认为该类界面为角度不整合界面。这两种界面在火山岩地层中十分常见,常常是复合叠加出现。如果只有火山不整合时不需要将其作为独立的地震相单元进行刻画,因为该类界面不能有效地确定地震相单元界线。

5.2 相对地质年代格架

在未被后期改造的沉积地层中,同盆地同期同源的相同岩石类型的地层厚度与形成时间往往呈正相关关系,因此在得知地层顶、底地质年龄后,根据厚度可反推地层的形成时间。在火山岩地层中根据厚度反推地层的形成时间的方法会存在较大的不确定性,至少有两点需要考虑:一是火山岩的堆积方式会造成同一次喷发的堆积物从火山口向边缘的方向上厚度变化梯度大,即它们的厚度虽不同,但其形成时间相差无几;二是不同类型的喷发在相同的时间内其堆积厚度会存在显著性的差异,因为从目前统计到的火山喷发烈度可知,在短短的数天到数百年之内,现代火山的堆积物体积从不足 0.01km^3 到大于 100km^3 均有,相对于营城组地层持续 10Ma ,岩层的形成时间显得如此短暂,因此堆积物体积不同往往造成地层厚度的显著差别。由于营城组火山岩地层的构成单元的差别且岩性复杂,仅根据地震一钻井资料建立营城组火山岩绝对地质年代格架会存在较大误差,并且有可能导致错误。根据岩层的叠置关系可建立相对地质年代格架,其顶、底界面的地质年代是准确的,其内部的地质年代限于目前资料的精度还不能进行精确刻画。

5.3 同期/准同期改造

由于火山岩地层形成的特殊过程,即物源来源于地表之下,新的物质往往需要穿过先前形成岩层才能到达地表,这样在老的岩层中就会存在新的岩层,如隐爆角砾岩和岩脉/岩墙(次火山)就属于该类情况。隐爆角砾岩往往可呈现为丘状或透镜状、杂乱、弱振幅、低频的地震相单元,次火山岩往往可表现为席状、平行—亚平行、强振幅、中高频或筒状、杂乱、弱振幅、中低频的地震相单元。在进行火山地层对比时需要将隐爆角砾岩进行原岩恢复,将次火山岩去除才有利于火山岩地层格架的建立。

上述火山岩地层特征代表的是断陷盆地酸性火

山岩的特征,至于中基性火山岩地层或其他类型盆地的火山岩地层应存在明显的差别。

6 结论

(1)松辽盆地营城组火山岩地层常见角度不整合和火山不整合界面,少见平行不整合和整合界面。火山不整合是由喷发物的堆积方式的差异形成的“角度不整合”,该类界面延伸范围小,多出现在冷却单元之间和冷却单元组合之间。

(2)根据火山岩的形成过程和岩石界面特征,可将松辽盆地营城组火山岩地层单元划分为 4 类,由小到大依次为冷却单元、冷却单元组合、火山机构、火山机构群。在现今的地震资料分辨率情况下可达对火山机构群、火山机构的有效刻画。

(3)根据界面组合和内部地震反射结构特征,在松辽盆地营城组一段、三段火山岩地层中可识别出席状、席状披盖、盾状、丘状、透镜状、楔状、扇状、碟状/盘状和筒状等 9 种基本地震相单元,每种地震相单元可与某种火山机构对应。火山岩地层由上述地震相单元组合而成,在同一地震相单元内岩层或岩层组产状变化具有规律性,即从喷发中心向远端倾向相同、倾角变小。

参 考 文 献

- [1] Planke S, Symonds P A, Alvestad E et al. Seismic volcano stratigraphy of large-volume basaltic extrusive complexes on rifted margins. *J Geophysical Research-Solid Earth*, 2000,105(8): 19335~19351
- [2] Berndt C, Planke S, Alvestad E et al. Seismic volcano stratigraphy of the Norwegian Margin: constraints on tectonomagmatic break-up processes. *Journal of the Geological Society*, 2001,158(3): 413~426
- [3] 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
- [4] 马金清,李进堂,冯宗帜. 火山构造组合研究和地质填图方法——以福建闽清测区 1:5 万区域地质调查为例. *中国区域地质*, 2000,19(2):198~204
Ma Jinqing, Li Jintang, Feng Zongzhi. On volcano-tectonic associations and their geological mapping-an example from 1:50000 regional geological surveying in Minqing area, Fujian. *Regional of China*, 2000, 19(2):198~204
- [5] 谢家莹. 试论陆相火山岩区火山地层单元与划分——关于火山岩区填图单元的讨论. *火山地质与矿产*,

- 1996, 17(3-4): 85~94
Xie Jiaying. Approach to volcanic stratigraphic unite and its division in continental volcanic terrain. *Volcanology & Mineral Resources*, 1996, 17(3-4): 85~94
- [6] 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
- [7] 孟宪锋, 高建斌. 冀北中生代陆相火山—沉积地层填图单位划分探讨. 地质调查与研究, 2004, 27(1): 58~63
Meng Xianfeng, Gao Jianbin. Division of cartographic unit in the Mesozoic continental volcano-deposit basin in Northern Hebei, China. *Geological Survey and Research*, 2004, 27(1): 58~63
- [8] 刘庆宏, 廖思平, 黄传冠. 火山构造组合研究和填图方法应用——以西藏措麦—邦多地区火山岩为例. 沉积与特提斯地质, 2004, 24(2): 35~40
Liu Qinghong, Liao Siping, Huang Chuanguan. The research and mapping of volcanic associations: An example from the volcanic rocks in the Comai-Boindoi zone, Xizang. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2004, 24(2): 35~40
- [9] Wang Pujun, Ren Yanguang, Shan Xuanlong et al. The cretaceous volcanic succession around the Songliao Basin, NE China: Relationship between volcanism and sedimentation. *Geological Journal*, 2002, 37(2): 97~115
- [10] 唐华风, 边伟华, 王璞珺等. 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
- [11] 唐华风, 王璞珺, 姜传金等. 松辽盆地火山岩相地震特征及其与控制陷断裂的关系. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(1): 73~78
Tang Huafeng, Wang Pujun, Jiang Chuanjin et al. Seismic characters of volcanic facies and their distribution relation to deep faults in Songliao Basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2007, 37(1): 73~78
- [12] 黄玉龙, 王璞珺, 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 the 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
- [13] 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 Pujun, Zhang Gongcheng, Meng Qi'an et al. Applications of seismic volcano stratigraphy to the volcanic rifted basins of China. *Chinese J Geophys*, 2011, 54(2): 597~610
- [14] 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. 石油学报, 2008, 29(6): 841~845
Tang Huafeng, Pang Yanming, Bian Weihua et al. Reservoirs quantitative analysis of volcanic edifice of Yingcheng Formation in Songliao Basin, Early Cretaceous, NE China. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(6): 841~845
- [15] 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 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. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(2): 530~536
- [16] 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 J Geophys*, 2011, 54(2): 620~627
- [17] 王玲, 张研, 戴晓峰等. 徐深气田徐深9井区火山岩气藏有效储层识别方法. 石油地球物理勘探, 2010, 45(5): 741~747, 767
Wang Ling, Zhang Yan, Dai Xiao-feng et al. Identification of effective volcanic gas reservoir in the block of Xushen 9 well, Xushen gas field. *OGP*, 2010, 45(5): 741~747, 767
- [18] 徐礼贵, 夏义平, 刘万辉. 综合利用地球物理资料解释叠合盆地深层火山岩. 石油地球物理勘探, 2009, 44(1): 70~74, 97
Xu Ligui, Xia Yiping, Liu Wanhui. Integrative application of geophysical prospecting data to interpret deep volcanic rock in superposed basin. *OGP*, 2009, 44(1): 70~74, 97
- [19] 蔡先华. 松辽盆地南部长岭断陷的火山岩分布及成藏规律. 石油地球物理勘探, 2002, 37(3): 291~294
Cai Xianhua. Distribution of volcanic rock and its role of reservoir on Changling faulted depression, south of Songliao Basin. *OGP*, 2002, 37(3): 291~294
- [20] 王玉华, 雷茂盛, 雷裕红等. 高精度重磁资料在松辽盆地古龙断陷火山岩气藏勘探中的应用. 石油地球物理勘探, 2008, 43(1): 107~112
Wang Yuhua, Lei Maosheng, Lei Yuhong et al. Application of high precision gravity and magnetic data in exploration of volcanic gas reservoir in Gulong fault depression of Songliao basin. *OGP*, 2008, 43(1): 107~112
- [21] 白志达, 孙善平, 李家振等. 五大连池新期火山锥体结构及喷发过程. 地质论评, 1999, 45(S): 369~377
Bai Zhida, Sun Shanping, Li Jiazhen et al. Cone structure and eruption process of modern volcanoes in Wudalianchi area, Heilongjiang province. *Geological Review*, 45(S): 369~377