

doi:10.3799/dqkx.2014.112

渤海湾盆地黄河口凹陷 BZ34-9 区带火山岩三维刻画及火山喷发期次

朱红涛^{1,2}, 刘依梦^{1,2}, 王永利³, 周心怀³, 杨香华^{1,2}

1. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

3. 中海石油有限公司天津分公司, 天津 300452

摘要: 基于火山岩溢流相的高连续强振幅和火山通道相的低连续弱振幅 2 种截然相反的地震反射特征, 建立振幅-方差体地震属性分级-拾取-融合技术刻画火山岩时空展布的方法, 有效刻画火山岩的三维时空展布以及火山喷发期次。通过渤海湾盆地黄河口凹陷 BZ34-9 区带火山岩三维刻画和火山喷发期次研究, 取得以下认识: (1) 研究区沙一二段火山岩零星分布, 主要发育在 BZ34-9 区带中部, 多为中心式喷发; 东营组火山岩广泛发育, 连片分布, 主要发育在 BZ34-9 区带南部缓坡带, 为中心式、裂隙-中心复合式喷发; (2) 沙一二段东部火山先于西部火山喷发, 南部火山先于北部火山喷发; (3) 东营组南部火山先于北部火山喷发, 且南部火山喷发期次多于北部, 北部火山多为短暂性喷发; (4) 东营组火山较沙一二段活动强烈、喷发次数多、范围广。

关键词: 火山岩; 时空展布; 喷发期次; 黄河口凹陷。

中图分类号: TE122

文章编号: 1000-2383(2014)09-1309-08

收稿日期: 2014-03-16

Volcanic Eruption Phases and 3-D Characterization of Volcanic Rocks in BZ34-9 Block of Huanghekou Sag, Bohai Bay Basin

Zhu Hongtao^{1,2}, Liu Yimeng^{1,2}, Wang Yongli³, Zhou Xinhui³, Yang Xianghua^{1,2}

1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Tianjin Branch of China National Offshore Oil Corporation Ltd., Tianjin 300452, China

Abstract: A new method of seismic amplitude and variance cube thresholding display is proposed to enhance the description of the spatial and temporal distribution of volcanics and eruption phases in this paper, on the basis of the contrasting seismic reflections between volcanic channel facies (high continuity and strong seismic amplitude) and overflow facies (low continuity and weak seismic amplitude). Which has been applied and validated in the BZ34-9 block of Huanghekou Sag, Bohai Bay Basin. The study of 3D characterization of volcanics and eruption phases in BZ34-9 block leads to the follows conclusion. (1) Volcanics in the First and Second Members in the Shahejie Formation are located locally in the central part of study area, showing a central eruption style; whereas volcanics in the Dongying Formation are characterized by a widespread distribution in the southern gentle slope of study area, showing central, fissure-central eruption composite style. (2) For the First and Second Members in the Shahejie Formation, volcanic eruption in the eastern part is earlier than that of western part, while the southern one is earlier than that of northern one. (3) For Dongying Formation, volcanic eruption of the southern part is earlier than that of northern part, and the phases of the southern part are also more than those of northern part. (4) Compared to the First and Second Members of the Shahejie Formation, volcanic eruption in the Dongying Formation is characterized by more active, multi-period eruption, and widespread distribution.

Key words: volcanic rock; spatial and temporal distribution; eruption phases; Huanghekou sag.

基金项目: 教育部科技项目霍英东教育基金会资助项目(No. 132020).

作者简介: 朱红涛(1976-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事层序地层学、地震沉积学与地震资料综合解释的教学与科研工作。

E-mail: zhuoscar@sohu.com

0 引言

火山岩结构复杂、横向变化剧烈,不同类型的火山岩发育在不同的构造部位,具有不同的地震反射特征(王玉学等, 2006; 闫奎邦等, 2008; 邹才能等, 2008; 左国平等, 2011). 对于火山岩的刻画,主要是基于地震相、地震属性、地层切片、模型约束等技术(徐礼贵等, 2009; Miles and Cartwright, 2010; 吴颜雄等, 2010; Zhang *et al.*, 2011; Gemma *et al.*, 2012; 应明雄等, 2012), 分别在平面上和剖面上进行了火山岩发育情况、喷溢情况、地震反射特征及岩相分布预测. 徐礼贵等(2009)以地震相分析、地震属性解释、构造制图为主要技术手段,对深层火山岩进行从定性到定量的识别和预测. Miles and Cartwright (2010)分别在地震剖面上和平面上识别了莫尔盆地叶状火山岩的展布. 吴颜雄等(2010)用火山岩模型约束井旁地震解释、建立岩相—地震响对应关系,为无井区的火山岩地震识别提供了模版. Zhang *et al.* (2011)基于火山岩的强振幅特征,利用振幅相关属性及几何属性等方法预测了松辽盆地的火山岩分布. Gemma *et al.* (2012)利用南伊斯基亚岛高分辨率地震反射剖面,解释其火山岩构造和沉积特征. 应明雄等(2012)运用常规地震时间切片、剖面分析及沿层均方根振幅属性和沿层小时窗三维地震镂空显示等技术,分析了目标火山岩发育情况、火山岩喷溢情况、地震反射特征及岩相分布.

综合国内外的研究现状及进展,对于火山岩的刻画,更多体现在二维剖面和平面上的刻画,尤其是将火山岩的溢流相和火山通道相等亚相分开刻画、描述,很少对火山岩的溢流相和火山通道相同时进行三维时空展布的刻画,不能体现火山岩分布规律的系统性. 本文以渤海湾盆地黄河口凹陷 BZ34-9 构造区的古近系火成岩为目标,提出一种基于振幅—方差体地震属性分级—拾取—融合技术刻画火山岩时空展布解释的新方法,体现了火山岩刻画的新思路、新方法,直观、高效地刻画火山岩的三维时空展布和火山岩喷发期次研究.

1 研究区地质概况

黄河口凹陷面积约 3 800 km², 位于渤海湾盆地东南部, 凹陷南部为垦东—青坨子凸起和莱北低凸

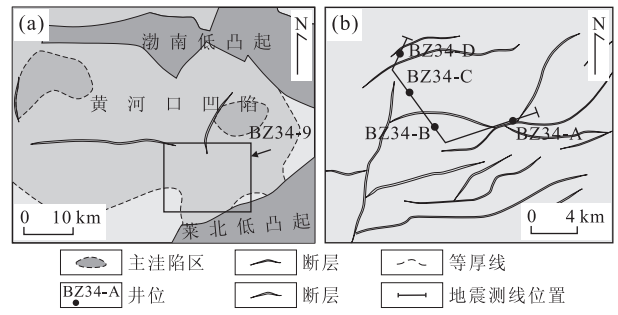


图 1 研究区构造位置

Fig. 1 Location of the study area

起,北部为渤南凸起,东部与庙西凹陷相邻(孙和风等, 2011). 黄河口凹陷古近系—现今总体构造面貌为北陡南缓、凹中有隆、断裂发育;其中 BZ34 隆起带将凹陷分为东西 2 个次洼,西深东浅. 在郑庐走滑断裂带西支右旋张扭作用下,形成一系列呈近东西和北东向的次级断裂,形成断阶带、断隆带等构造带. 黄河口凹陷古地貌特征在宏观上有一定的继承性,北部为长期发育的陡坡带,南部以挠曲为主的缓坡带,东西部长受断阶带控制.

BZ34 构造沿 BZ34 断裂带分布, BZ34-6/7 构造、BZ34-9 构造位于东南缓坡带上(图 1). 在 BZ34-9 区带沙河街期和东营期存在多期火山活动,测井标志电阻率曲线表现为高值异常;尤其是 BZ34-A 井区最为发育,其火山岩具有多层系发育、累计厚度大等特点(图 2). 研究区火山岩岩性主要为玄武岩,粗火山碎屑少见,喷发能量低,溢流相和火山通道相是主要的火山岩相. 勘探证实在 BZ34-9 区带火山岩发育区的砂岩中具有十分丰富的油气资源,且储层品质好. 落实火山岩的发育规律、火山的喷发期次是该区勘探急需解决的重要问题.

2 火山岩刻画方法

2.1 火山岩地震相特征及刻画方法

地下任何地质体及其性质的变化都将引起其地震响应信息发生相应的变化,因此,利用常规地震剖面反射特征来识别火山岩体具有可行性(宋吉杰, 2007; 曾富英等, 2009; 徐颖新等, 2012). 黄河口凹陷 BZ34-9 区带广泛分布溢流相熔岩和火山通道相火山岩,二者对应不同的内部地震反射特征. 溢流相熔岩成层性好,且速度明显高于围岩速度,对应层状强反射;火山通道内火山岩无成层性,对应杂乱弱反射.

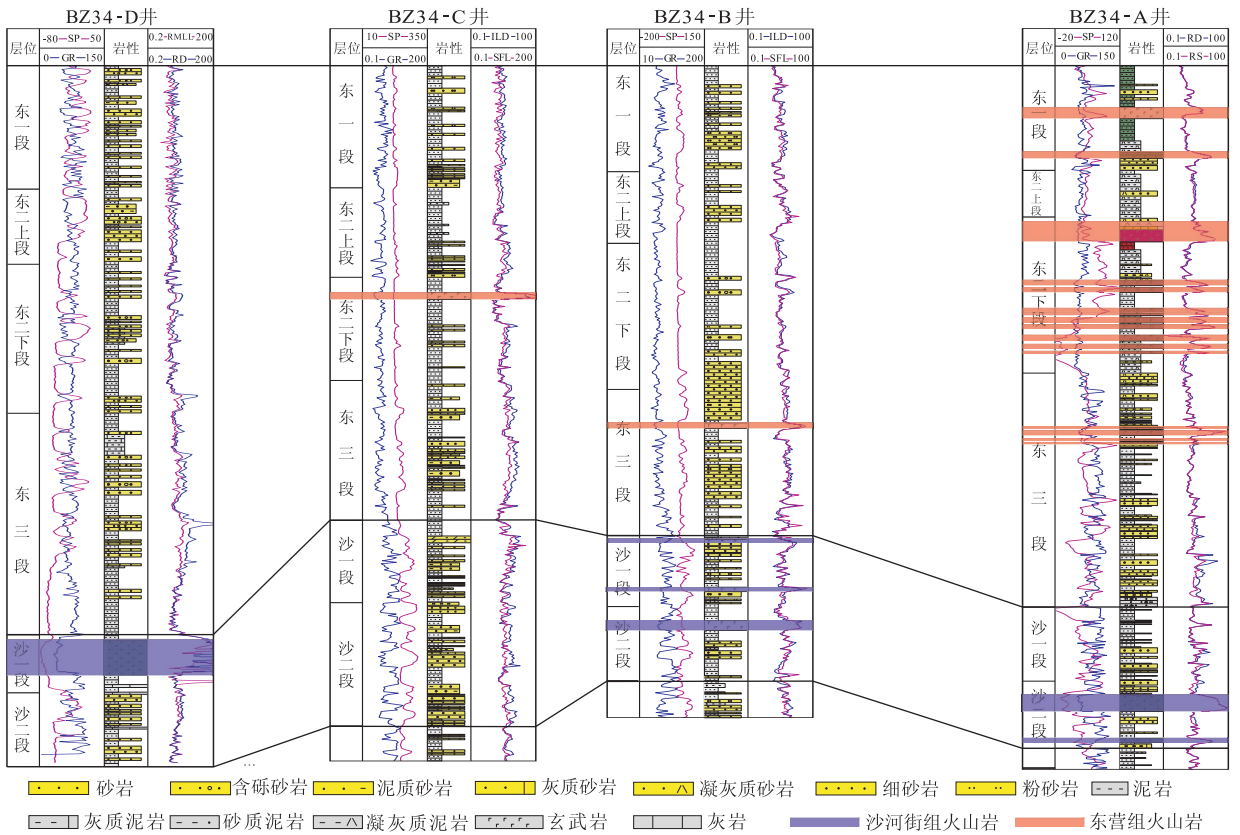


图 2 研究区连井剖面指示的火山岩发育特征

Fig. 2 Correlation section showing the characteristics of volcanic eruption phases of the study area

类型	实例	频率	振幅	反射特征	岩相	发育部位
I		中低频	弱振幅	倒锥状杂乱	火山通道相	火山口下部
II		中低频	中强振幅	丘形断续	爆发相	火山口附近
III		低频	强振幅	层状连续	溢流相	火山机构附近或低部位

图 3 研究区火山岩岩相—地震相特征

Fig. 3 Volcanic lithofacies and seismic facies in the study area

在研究区建立了 3 种识别火山岩岩相及相应的地震相特征(图 3)。类型 I:火山通道相,外形为倒锥状,中低频,弱振幅杂乱反射,分布在火山口下部;类型 II:爆发相,外形为丘形,中低频,中强振幅,断续反射,分布在火山口附近;类型 III:溢流相,外形为层状,低频,强振幅,连续反射,分布在火山机构附近或低部位。对比溢流相、火山通道相与围岩的反射特征,可知溢流相较围岩振幅强,连续性好,火山通道相较围岩杂乱,连续性差。

由建立的火山岩不同亚相的地震相识别模式可

知,溢流相和火山通道相的地震反射特征截然相反,用同一种地震属性不能揭示二者的特征,需要利用 2 种不同的属性分开进行刻画。基于火山岩溢流相强振幅特征,对原始三维地震数据进行三维振幅分级显示,只显示强振幅部分,并进行体素拾取,自动追踪得到溢流相的时空展布;利用火山通道相的杂乱反射特征,计算方差体属性,并对其进行三维分级显示,拾取高值部分,实现火山通道相的时空展布的刻画。将拾取的溢流相和火山通道相融合显示,实现火山岩的三维时空展布的刻画。图 4 展示是基于振幅一方差体地震属性分级—拾取—融合技术刻画火山岩的流程及效果,直观展现了火山岩溢流相和火山通道相形态及分布特征。

2.2 火山喷发期次分析方法

在盆地火山岩的相关研究中,期次是指一个喷发中心一次相对集中的(准连续)火山活动,在物质成分、喷发方式及喷发强度的规律性变化过程中,所形成的一套相序上具有成因联系的火山岩组合(代黎明等, 2007; 黄玉龙等, 2007; 胡治华等, 2013)。一次简单的火山喷发旋回就是一个火山喷发的期次;而一次复杂的火山喷发旋回其内部可划分出多

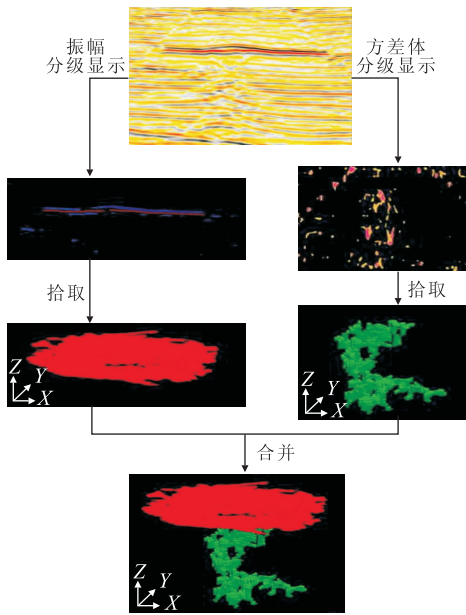


图 4 火山岩三维刻画流程

Fig. 4 Workflow for 3-D characterization of volcanic rocks

个期次基于研究区火山岩喷发次数多、喷发强度小、单次厚度薄的特点,可认为一个强振幅就代表了一次火山喷发,采用以下方法研究火山的喷发期次:

将火山岩所在地层均匀内插为 n 个参考层,由下至上分别编号为:1,2,3,⋯, n .

由下至上依次统计每个火山口附近强振幅所在的参考层编号,记为“ $a|b|c\cdots$ ”,数字越多,说明该火山喷发次数越多,数字 a 越小,说明该火山开始喷发的时间越早。

3 火山岩三维刻画

研究区内识别出了火山岩的 3 种亚相,分别为溢流相、火山通道相和爆发相。溢流相和火山通道相分布广泛,需精细刻画;爆发相分布局限,不展开讨论。溢流相的地震反射特征是层状连续强反射,火山通道相的地震反射特征是倒锥状杂乱弱反射,二者特征截然相反,分别应用振幅和方差体属性进行刻画。

3.1 火山溢流相三维刻画

火山岩溢流相在测井曲线上呈现 DT 低值、 RT 高值特征(图 5),即高速度、高电阻率特征,与围岩存在较大的波阻抗差异,在地震体上表现为强振幅异常,中基性岩浆岩差异尤其明显。通过分析研究区波阻抗—岩性的关系,可知研究区溢流相的波阻抗主要在 $1.2 \times 10^4 \text{ g} \cdot \text{m} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,围岩则在

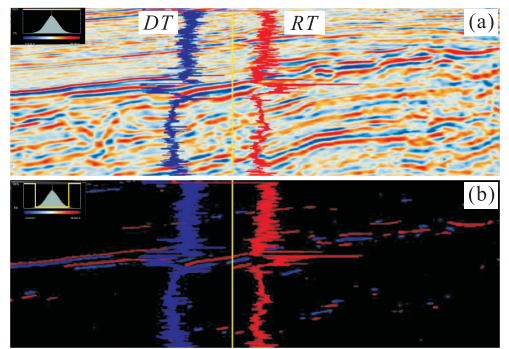


图 5 地震振幅分级显示指示的溢流相空间分布特征
Fig. 5 Seismic amplitude thresholding display showing spatial distribution of volcanic overflow facies

a. 原始地震剖面; b. 振幅分级显示地震剖面

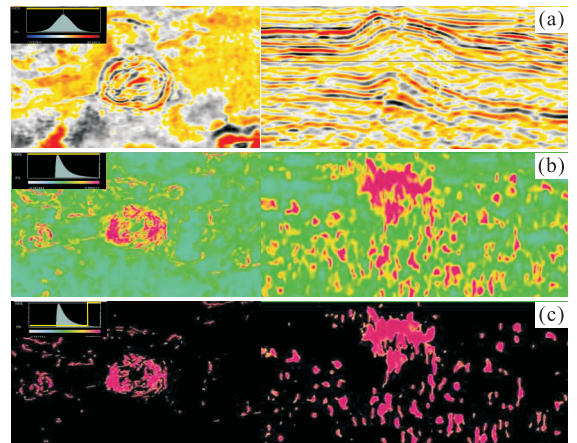


图 6 方差体分级显示指示的火山通道相空间分布特征
Fig. 6 Variance cube thresholding display showing spatial distribution of volcanic channel facies

a. 地震反射特征; b. 方差体属性特征; c. 方差体分级显示特征

$1.2 \times 10^4 \text{ g} \cdot \text{m} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下,结合钻井中火山岩分布,将振幅绝对值大于 15 800 的反射对应为溢流相。图 5a 为全振幅显示,振幅颜色棒中所有区段透明度均为 0,溢流相火山岩与围岩界限模糊,无法确切划出溢流相的范围;图 5b 为经振幅分级显示后的同一地震剖面,振幅颜色棒中振幅绝对值小于 15 800 对应的区段透明度为 100%,只显示绝对值大于 15 800 的强振幅,忽略与溢流相无关的弱振幅部分,突出溢流相强振幅特征,可明显显示火山岩溢流相发育位置及分布形态。

3.2 火山通道相三维刻画

火山通道在时间切片上表现为圆环状异常,在地震剖面上表现为倒锥状(漏斗形)杂乱异常,在原始地震剖面上不能完全反映火山通道等地震异常体(图 6a),而应用传统的多属性联合不仅包含其他地

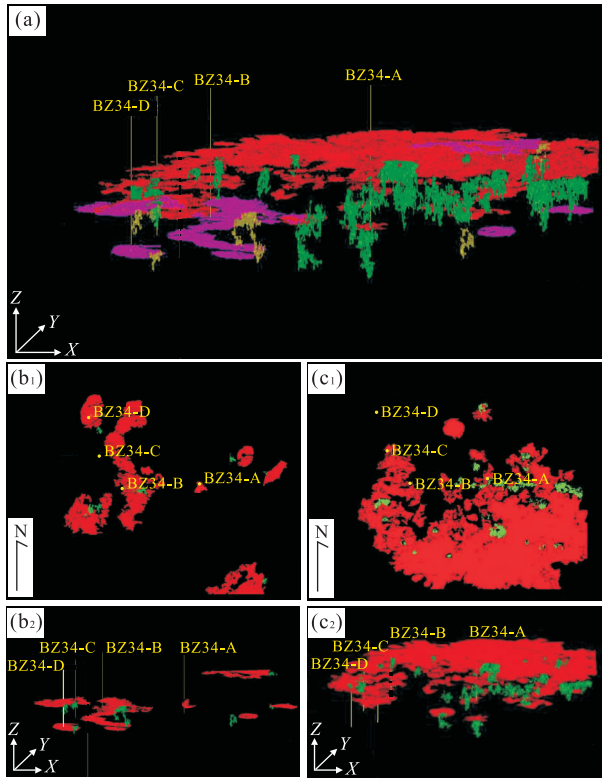


图 7 研究区火山岩三维时空展布

Fig. 7 Spatial and temporal distribution of volcanic eruption phases of the Shahejie and Dongying formations in the study area

a. 沙一二段、东营组火山岩分布叠合图; b₁. 沙一二段俯视图; b₂. 沙一二段侧视图; c₁. 东营组俯视图; c₂. 东营组侧视图

震异常信息,影响目标体的识别,而且耗时,效率不高. 利用火山通道相的杂乱反射特征,计算方差体属性,由图 6b 可以看到方差体属性可以在平面上和剖面上突出杂乱的火山通道相,火山通道处的方差值为紫色高值. 通过调节方差颜色棒中不同颜色区段的透明度,使方差高值(大于 0.34)对应区段的透明

度为 0,其他区段透明度为 100%,进行方差分级显示后,火山通道的形态更加明显,虽然火山通道周围也有紫色异常,但是火山通道处异常更加集中(图 6c).

3.3 火山岩时空展布特征

基于分别刻画的沙一二段、东营组的溢流相和火山通道相,进行二者融合显示,系统刻画溢流相和火山通道相的空间分布及配置关系(图 7). 图 7a 为沙一二段、东营组火山岩分布的叠合图,其中紫色层状指示沙一二段溢流相,红色层状指示东营组溢流相,黄色柱状指示沙一二段火山通道相,绿色柱状指示东营组火山通道相;图 7b、7c 则分布显示沙一二段、东营组火成岩展布的俯视图和侧视图. 通过图 7 可以看出,研究区共发育 28 个火山口,其中有 3 个火山口继承性喷发,在沙一二段和东营组均有喷发,同时沙一二段与东营组火山岩分布特征和喷发模式有所不同. 沙一二段火山作用较弱,仅发育 6 个火山口,主要为中心式喷发模式,各个火山口喷出的溢流相各自分离,溢流相呈点片状零星分布,且主要发育在 BZ34-9 区带中部(图 7b₁、7b₂). 东营组火山活动强烈,大约发育 24 个火山口,火山岩广泛发育;在 BZ34-9 区带南部缓坡带,溢流相连片分布,无法确定火山机构的边界,主要为中心式喷发;BZ34-9 区带中部,由于受到近东西向断裂的影响,8 个火山口沿断裂展布方向呈串珠状分布,为裂隙—中心复合式喷发模式;在研究区北部,多为孤立分布的溢流相,主要为中心式喷发(图 7c₁、7c₂).

基于振幅—方差体地震属性分级—拾取—融合技术刻画、预测的火山岩分布可与钻井揭示的火山岩、过井地震剖面指示的火山岩相互验证、对比(图 8),证明预测结果可信. BZ34-D、BZ34-C 井区连续

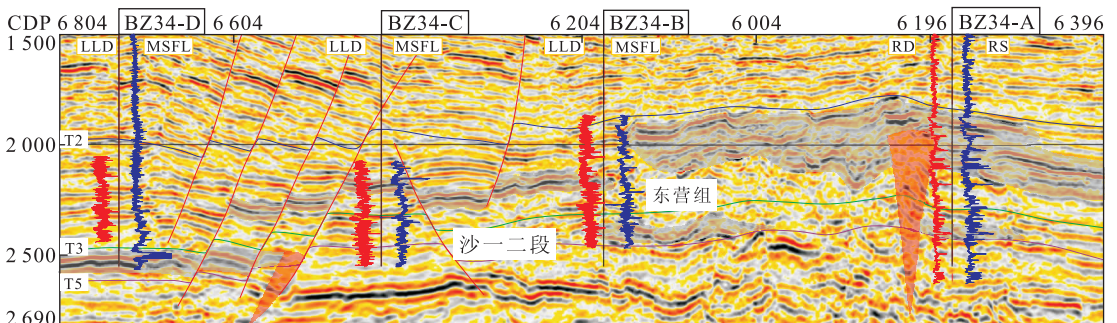


图 8 研究区过井地震剖面指示的沙河街组、东营组火山岩发育特征

Fig. 8 Characteristics of volcanic eruption phases of the Shahejie and Dongying formations on the cross-well seismic section in the study area

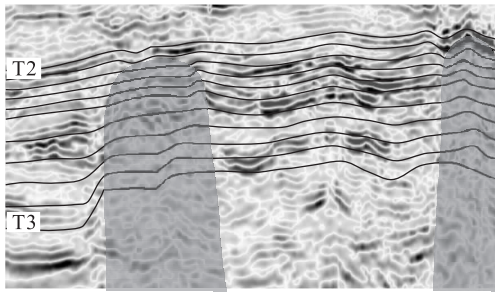


图 9 火山喷发期次分析方法

Fig. 9 Method for determining volcanic eruption phases

强振幅同相轴个数少,分布范围小,火山岩厚度薄,分布局限,仅在沙一二段、东营组发育薄层火山岩. BZ34-B、BZ34-A 井区连续强振幅较多,火山岩分布广泛,在沙一二段和东营组均有火山岩发育. 尤其是在 BZ34-A 附近东营组强振幅分布较多,表明发育了多层火山岩. 研究成果有助于火山岩分布规律的预测研究;同时,在落实火山岩的发育规律的基础上,为确定火山岩对周围储层的影响及火山活动对油气成藏的控制作用提供良好的基础.

4 火山喷发期次研究

在火山岩三维刻画的基础上,进一步开展火山喷发期次研究. 沙一二段地层较薄,将其均分为 5 个参考层,沙二段对应为参考层 1~3,沙一段对应为参考层 4~5,将东营组地层均分为 10 个参考层,东三段对应为参考层 1~3,东二段对应为参考层 4~

7,东一段对应为参考层 8~10. 统计每个火山口附近强振幅所在参考层,如图 9 中,左侧火山口附近强振幅位于第 2、5 个参考层,记为“2|5”,为东一段、东二段喷发,右侧火山口附近强振幅位于第 2、6、10 个参考层,记为“2|6|10”,东一段开始喷发,持续到东营组末期.

通过统计研究区沙一二段、东营组共 28 个火山口附近的强振幅所在的参考层(图 10),可以分析沙一二段、东营组的火山喷发期次及次数.

沙一二段火山喷发可以划分为 2 个区(图 10a): I 区西部火山对应第 2、3、4 参考层,表明为沙二段末期和沙一段喷发,II 区东部火山对应第 2 个参考层,表明为沙二段喷发. 因此,沙一二段火山均为单次喷发,且东部火山先于西部火山喷发,南部火山先于北部火山喷发.

东营组火山喷发可以划分为 6 个区(图 10b): I 区火山分别对应第 2、3、4、5、7 参考层,表明火山在东三段开始喷发,持续到东二段,且先后发生 2~3 次喷发;II 区火山分别对应第 4~10 参考层,表明火山在东二段开始喷发,持续到东一段,先后发生 2~4 次喷发;III 区火山分别对应第 2、5、6、10 参考层,表明火山在东三段、东二段、东一段均有喷发;IV 区火山主要对应第 5~6、8~10 参考层,表明火山在东二段开始喷发,持续到东营组末期,先后经历 1~3 次喷发;V 区火山主要对应第 4 参考层,表明火山在东二段短暂喷发;VI 区火山主要对应第 7~9 参考层,表明火山主体在东一段开始喷发,且多为单次喷发. 因此,东营组而言,研究区南部火山于东三段或

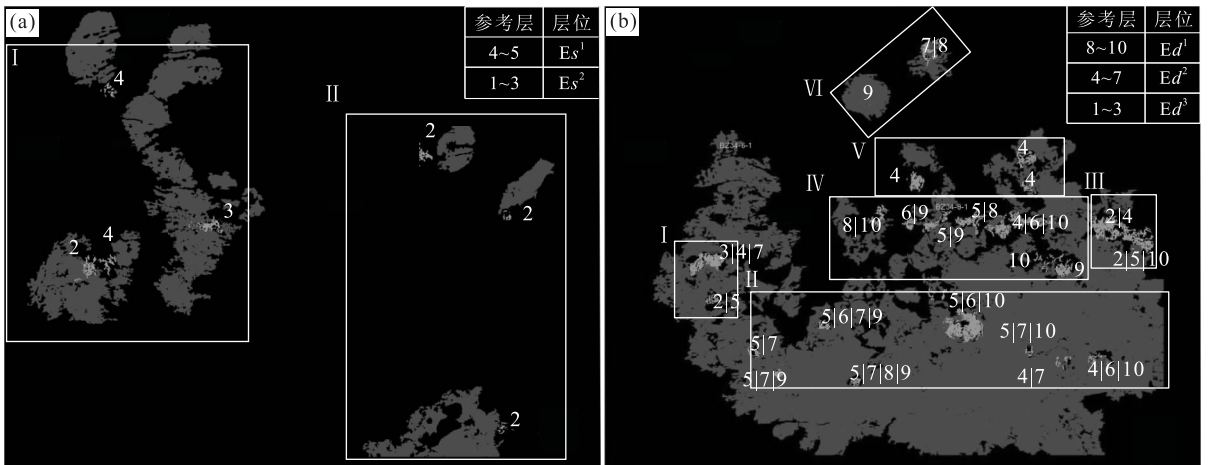


图 10 研究区沙河街组、东营组火山岩喷发期次及对比

Fig. 10 Characteristics and correlation of volcanic eruption phases between the Shahejie and Dongying formations in the study area
a. 沙一二段; b. 东营组

东二段开始喷发,北部火山于东二段或东一段开始喷发,表明南部火山先于北部火山喷发,且南部火山喷发期次多于北部,北部火山多为短暂性喷发。

通过对比沙一二段和东营组的火山喷发期次,可知东营组火山较沙一二段活动强烈、喷发次数多、范围广。

5 结论

针对火山岩溢流相强振幅和火山通道相弱振幅—杂乱反射的不同地震相特征,采用振幅—方差体地震属性分级—拾取—融合技术实现三维立体显示,高效、直观刻画了火山岩溢流相和火山通道相的时空展布和火山喷发期次。

研究区沙河街组和东营组火成岩共同特征在于:(1)具有类似的反射特征,溢流相均为低频强振幅,火山通道相均为中低频弱—杂乱反射;(2)喷发期次上,都是南部火山早于北部火山;不同之处在于:(1)分布范围:沙河街组火山岩零星分布;东营组火山岩分布连片广泛,表明火山活动逐渐活跃;(2)喷发期次:沙河街组火山喷发期次少;东营组火山喷发期次较多;(3)喷发模式:沙河街组主要为中心式喷发;东营组火山既有中心式喷发,又有裂隙—中心复合式喷发。

References

- Dai, L. M., Li, J. P., Zhou, X. H., et al., 2007. Depositional System of the Neogene Shallow Water Delta in Bohai Sea Area. *Lithologic Reservoirs*, 19(4): 75—81 (in Chinese with English abstract).
- Gemma, A., Ennio, M., Salvatore, P., 2012. Stratigraphic and Structural Setting of the Ischia Volcanic Complex (Naples Bay, Southern Italy) Revealed by Submarine Seismic Reflection Data. *Accademia Nazionale dei Lincei*, 3: 387—408. doi:10.1007/s12210—012—0204—2
- Hu, Z. H., Shen, C. S., Liu, Z. B., et al., 2013. The Research Method and Application of the Volcanic Rock Eruption Cycle and Stage in the Bohai Bay Basin. *Petroleum Geophysics*, 11(2): 30—33 (in Chinese with English abstract).
- Huang, Y. L., Wang, P. J., Men, G. T., et al., 2007. 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)*, 37(6): 1183—1191 (in Chinese with English abstract).
- Miles, A., Cartwright, J., 2010. Hybrid Flow Sills: A New Mode of Igneous Sheet Intrusion. *Geology*, 38(4): 343—346. doi:10.1130/G30414.1
- Song, J. J., 2007. Seismic Prediction of Volcanite in Xincheng Area of Northern Part of Songliao Basin. *Oil Geophysical Prospecting*, 42(3): 315—317 (in Chinese with English abstract).
- Sun, H. F., Zhou, X. H., Peng, W. X., et al., 2011. Late-Stage Hydrocarbon Accumulation and Enrichment in the Huanghekou Sag, Southern Bohai Sea. *Petroleum Exploration and Development*, 38(3): 307—313 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. X., Han, D. K., Liu, W. L., et al., 2006. The Application of Coherence Technology in the Volcanic Reservoir Prediction. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 45(2): 192—196 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. X., Wang, P. J., Yan, L., et al., 2010. Quantitative Modelling and Application of Volcanic Facies of Lower Cretaceous Yingcheng Formation of the Songliao Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 26(1): 73—81 (in Chinese with English abstract).
- Xu, L. G., Xia, Y. P., Liu, W. H., 2009. Integrative Application of Geophysical Prospecting Data to Interpret Deep Volcanic Rock in Superposed Basin. *Oil Geophysical Prospecting*, 44(1): 70—74, 97 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Y. X., Yu, L., Sun, L. Z., et al., 2012. Volcanic Rock Identification in Liaodong Sag. *Oil Geophysical Prospecting*, 47(Suppl. 1): 40—44 (in Chinese with English abstract).
- Yan, K. B., Li, H., Deng, C. W., et al., 2008. Seismic Recognition and Description of Deeply Buried Volcanics Reservoirs in WLT Area. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 47(3): 256—261 (in Chinese with English abstract).
- Ying, M. X., Chen, D. Y., Liu, J. Y., et al., 2012. Typical Volcanic Seismic Reflection Characteristics at a District of Deep Water Area in South China Sea. *Progress in Geophysics*, 27(4): 1476—1483 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, K., Marfurt, K. J., Wan, Z., et al., 2011. Seismic Attribute Illumination of an Igneous Reservoir in China. *The Leading Edge*, 30(3): 266—270. doi:10.1190/1.3567256
- Zeng, F. Y., Luo, X., Xiao, H. P., et al., 2009. Integrated Seismic Identification and Prediction of Deep Volcanic

Rock Bodies in Songliao Basin. *Progress in Exploration Geophysics*, 32(4): 270—274 (in Chinese with English abstract).

Zou, C. N., Zhao, W. Z., Jia, C. Z., et al., 2008. Formation and Distribution of Volcanic Hydrocarbon Reservoirs in Sedimentary Basins of China. *Petroleum Exploration and Development*, 35(3): 257—271 (in Chinese with English abstract).

Zuo, G. P., Tu, X. L., Xia, J. F., et al., 2011. Seismic Identification of Volcanic in Dafengxinghua Area. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 50(3): 252—259 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

代黎明, 李建平, 周心怀, 等, 2007. 渤海海域新近系浅水三角洲沉积体系分析. 岩性油气藏, 19(4): 75—81.

胡治华, 申春生, 刘宗宾, 等, 2013. 渤海湾盆地火山岩喷发旋回和期次研究的方法及应用. 油气地球物理, 2: 30—33.

黄玉龙, 王璞珺, 门广田, 等, 2007. 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), 37(6): 1183—1191.

宋吉杰, 2007. 松辽盆地北部兴城地区火山岩地震预测. 石油地球物理勘探, 42(3): 315—317.

孙和风, 周心怀, 彭文绪, 等, 2011. 渤海南部黄河口凹陷晚期成藏特征及富集模式. 石油勘探与开发, 38(3): 307—313.

王玉学, 韩大匡, 刘文岭, 等, 2006. 相干体技术在火山岩预测中的应用. 石油物探, 45(2): 192—196.

吴颜雄, 王璞珺, 闫林, 等, 2010. 松辽盆地营城组火山岩相量化表征与应用. 岩石学报, 26(1): 73—81.

徐礼贵, 夏义平, 刘万辉, 2009. 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, 44(1): 70—74, 97.

徐颖新, 喻林, 孙立志, 等, 2012. 火山岩体识别技术在辽东凹陷的应用. 石油地球物理勘探, 47(增刊): 40—44.

闫奎邦, 李鸿, 邓传伟, 等, 2008. WLT 地区深层火山岩储层地震识别与描述. 石油物探, 47(3): 256—261.

应明雄, 陈殿远, 刘建英, 等, 2012. 南中国海深水区典型火山发育地震反射特征研究. 地球物理学进展, 27(4): 1476—1483.

曾富英, 罗霞, 肖红平, 等, 2009. 松辽盆地深层火山岩体的地震综合识别及预测. 勘探地球物理进展, 32(4): 270—274.

邹才能, 赵文智, 贾承造, 等, 2008. 中国沉积盆地火山岩油气藏形成与分布. 石油勘探与开发, 35(3): 257—271.

左国平, 屠小龙, 夏九峰, 等, 2011. 大丰兴化地区火山岩地震识别方法研究. 石油物探, 50(3): 252—259.