

## 渤海海域渤中凹陷中生界火山机构地质模式及建造过程

单玄龙<sup>1</sup>,王蔚<sup>1</sup>,张新涛<sup>2</sup>,衣健<sup>1</sup>,徐春强<sup>3</sup>,岳军培<sup>3</sup>,刘鹏程<sup>1</sup>,傅锚<sup>1</sup>

[1. 吉林大学 地球科学学院, 吉林 长春 130061; 2. 中国海洋石油总公司, 北京 100010; 3. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459]

**摘要:**精细刻画火山机构对火山岩储层预测十分重要。渤海海域中生界发育多类火山机构,且受后期改造强烈,目前缺乏对该区火山机构类型、结构及建造过程的系统研究。利用岩心、测井及地震资料,将渤海海域中渤中凹陷中生界火山机构分为熔岩穹丘、复合层火山、火山碎屑岩席及盾状火山4种类型。分别刻画了这4种火山机构内部喷发单元及岩性、岩相构成,建立了地质模型,并概括形态特征及内部结构建立了4种火山机构对应的建造过程示意图。其中,熔岩穹丘具有高纵/横比,由厚层酸性熔岩构成,内部一般为块状构造;复合层火山在该盆地内分布范围广、规模大,外部形态为丘状,但纵/横比小于熔岩穹丘,内部岩性复杂,多为熔岩和火山碎屑岩互层构成的层状结构;盾状火山为平缓的低丘状外形,主要由基性岩组成,其岩浆黏度低、流动范围较大,所以形成的机构规模大,内部多为席状构造;火山碎屑岩席为席状及充填状,纵/横比极小,内部为多期喷发叠加形成的层状结构。此外,通过对比不同火山机构的物性,发现研究区熔岩穹丘及复合层火山的储层物性最好,火山碎屑岩席次之,盾状火山最差;熔岩穹丘及复合层火山机构可作为后续有利油气勘探目标。

**关键词:**储层特征;建造过程;火山机构;中生界火山岩;渤中凹陷;渤海海域

**中图分类号:**TE122.2

**文献标识码:**A

## Geological model and construction process of the Mesozoic volcanic edifices in Bozhong Sag, Bohai Sea

SHAN Xuanlong<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>, ZHANG Xintao<sup>2</sup>, YI Jian<sup>1</sup>, XU Chunqiang<sup>3</sup>, YUE Junpei<sup>3</sup>, LIU Pengcheng<sup>1</sup>, FU Mao<sup>1</sup>

[1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun, Jilin 130061, China; 2. China National Offshore Oil Corporation (CNOOC), Beijing 100010, China; 3. Tianjin Branch of CNOOC, Tianjin 300459, China]

**Abstract:** Fine depiction of volcanic edifices is of great value to mapping volcanic reservoirs. A variety of volcanic edifices under fierce later modification are developed in the Mesozoic of the Bozhong Sag, Bohai Sea. There is, however, a lack of documents on the types, structure and construction process of the volcanic edifices in the area at present. The data of core observation, logging and seismic interpretation are applied to divide the Mesozoic volcanic edifices in the Bohai Sea into four types, that is, lava dome, stratovolcano, pyroclastic sheet and shield volcano. The study serves to depict the eruptive units, lithology and lithofacies within the four types of volcanic edifices, with a geological model established and based on the morphological characteristics and internal structure, the diagrams of four types are built to show the volcanic construction processes. Among others, the lava dome characterized by a high aspect ratio is composed of thick-bedded acidic lava of massive structure within; the stratovolcano widely seen in the Bohai Bay Basin and large in scale is mound-shaped in terms of external morphology, smaller than the lava domes in terms of aspect ratio, and characterized by complex lithological types, most of which are of alternating lava and pyroclastic rocks; and the shield volcano is of gentle low-mound shape, and mainly composed of basic rocks, featuring low-viscosity magma and large flow range, resulting in large-scale volcanic edifices of sheet-like structures inside to a large extent. The pyroclastic sheet is in the shape of sheet and filling, with very small aspect ratio and layered structure caused by multi-

收稿日期:2022-12-09;修订日期:2023-03-13。

第一作者简介:单玄龙(1969—),男,博士、教授,矿产普查与勘探。E-mail: shanxl@jlu.edu.cn。

通讯作者简介:衣健(1984—),男,博士、讲师,矿产普查与勘探。E-mail: yijian@jlu.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金重大项目(41790453);国家自然科学基金面上项目(41972313)。

stage eruption and superimposition. In addition, the comparison of the physical properties of different volcanic edifices shows that the reservoirs of lava dome and stratovolcano types in the study area are of the best physical properties, which can be viewed as favorable targets for future oil/gas exploration, followed by the pyroclastic sheet and then the shield volcano coming at the worst.

**Key words:** reservoir characteristics, construction process, volcanic edifice, Mesozoic volcanic rock, Bozhong Sag, Bohai Sea

引用格式:单玄龙,王蔚,张新涛,等.渤海海域渤中凹陷中生界火山机构地质模式及建造过程[J].石油与天然气地质,2023,44(3):675-688. DOI: 10.11743/ogg20230312.

SHAN Xuanlong, WANG Wei, ZHANG Xintao, et al. Geological model and construction process of the Mesozoic volcanic edifices in Bozhong Sag, Bohai Sea[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 675-688. DOI: 10.11743/ogg20230312.

火山岩储层是一种重要的非常规油气储层,在盆地深层具有超越常规沉积岩储层的良好储集性能<sup>[1]</sup>。随着火山岩勘探的不断深入,中国相继在松辽盆地、四川盆地、准噶尔盆地以及塔里木盆地等沉积盆地深层火山岩中取得了一系列重大油气勘探突破<sup>[2-5]</sup>。渤海海域深层中生界火山岩分布范围广、厚度大且烃源岩条件良好,已成为重要的油气勘探目标<sup>[6-7]</sup>。近年来中海石油(中国)有限公司天津分公司针对渤海海域渤中凹陷中生界火山岩开展了一系列勘探工作,并在旅大25-1构造区中生界火山岩中测试获得了日产油300 t以及气近50 000 m<sup>3</sup>,展现了渤海海域中生界火山岩的巨大勘探潜力<sup>[7-8]</sup>。由于火山岩储层具有非均质性强,储层物性纵向和横向变化快的特点,而火山机构具有不同的岩性、岩相空间组合,直接控制了火山岩储层的空间展布<sup>[4,9-10]</sup>。因此,对火山机构进行精细刻画是进行火山岩储层预测的有效手段。

火山机构是围绕喷发源堆积的火山物质和构造的总称,在爆发、溢流和侵出等不同火山喷发作用的控制下,其形成的火山机构类型也不尽相同<sup>[11-12]</sup>。前人依据组成火山机构的岩石类型、岩石化学成分、地层结构和地貌把火山机构分为单成因火山、复合成因火山、盾状火山、破火山、残留古火山等<sup>[13-15]</sup>。渤海海域构造复杂,盆地内部埋藏火山机构经历了长期的风化剥蚀及构造改造,其原始形态被破坏;并且渤中凹陷深层地震分辨率低,也制约了对火山机构的精细识别和刻画。

针对渤海海域渤中凹陷深部火山机构精细刻画难题,本次研究在现代火山地质模型的约束下,综合利用岩心、钻井以及三维地震资料,对渤中凹陷中生界火山机构进行了类型划分,量化表征了火山机构形态,精细刻画了机构内部喷发单元及岩性岩相构成,进而探讨了4类火山机构的建造过程。

## 1 地质概况

渤海湾盆地位于中国的东部,总面积为 $20 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,是一个发育于华北克拉通东部地块之上的由走滑-拉分作用形成的中、新生代叠合盆地<sup>[16-18]</sup>,其中渤海海域位于渤海湾盆地的中东部,勘探面积约 $4 \times 10^4 \text{ km}^2$ <sup>[19-22]</sup>(图1a)。渤中凹陷作为其次级构造单元,为渤海海域最大的生烃凹陷,东临渤东低凸起、西与沙垒田凸起相接、北依石臼坨凸起、南至渤南低凸起,面积约为 $2 \times 10^4 \text{ km}^2$ <sup>[23-25]</sup>(图1b)。

渤海湾盆地先后经历了前裂陷期(65.0 Ma以前)、裂陷期(65.0~24.6 Ma)和后裂陷期(24.6 Ma至今)3个主要的构造演化阶段<sup>[26-29]</sup>。其中,在中生代(晚侏罗世—早白垩世)前裂陷期经历了强烈的燕山构造活动,古太平洋板块俯冲造成华北克拉通破坏,随着太平洋板块的回卷,岩石圈减薄形成了伸展的构造背景,诱发了大规模的岩浆活动<sup>[16-18]</sup>,造成了强烈的火山作用,形成的火山岩广泛分布在渤海海域。

渤海海域渤中凹陷的中生界缺失三叠系和上白垩统,主要包括侏罗系和白垩系<sup>[30]</sup>。其中,侏罗系自下而上主要发育兴隆沟组、北票组、海房沟组、髫髻山组、土城子组;白垩系分为义县组、九佛堂组、沙海组、阜新组以及孙家湾组<sup>[31]</sup>。其中义县组火山岩最为发育,是本次研究主要的目的层位。岩性主要为玄武岩、安山岩、粗面岩、英安岩、流纹岩等火山熔岩以及隐爆角砾岩、凝灰岩(图1c);锆石U-Pb测年年龄范围为152~108 Ma,表明岩浆在白垩纪大规模喷发<sup>[32]</sup>。

## 2 数据与方法

本文的三维地震数据由中海石油(中国)有限公司

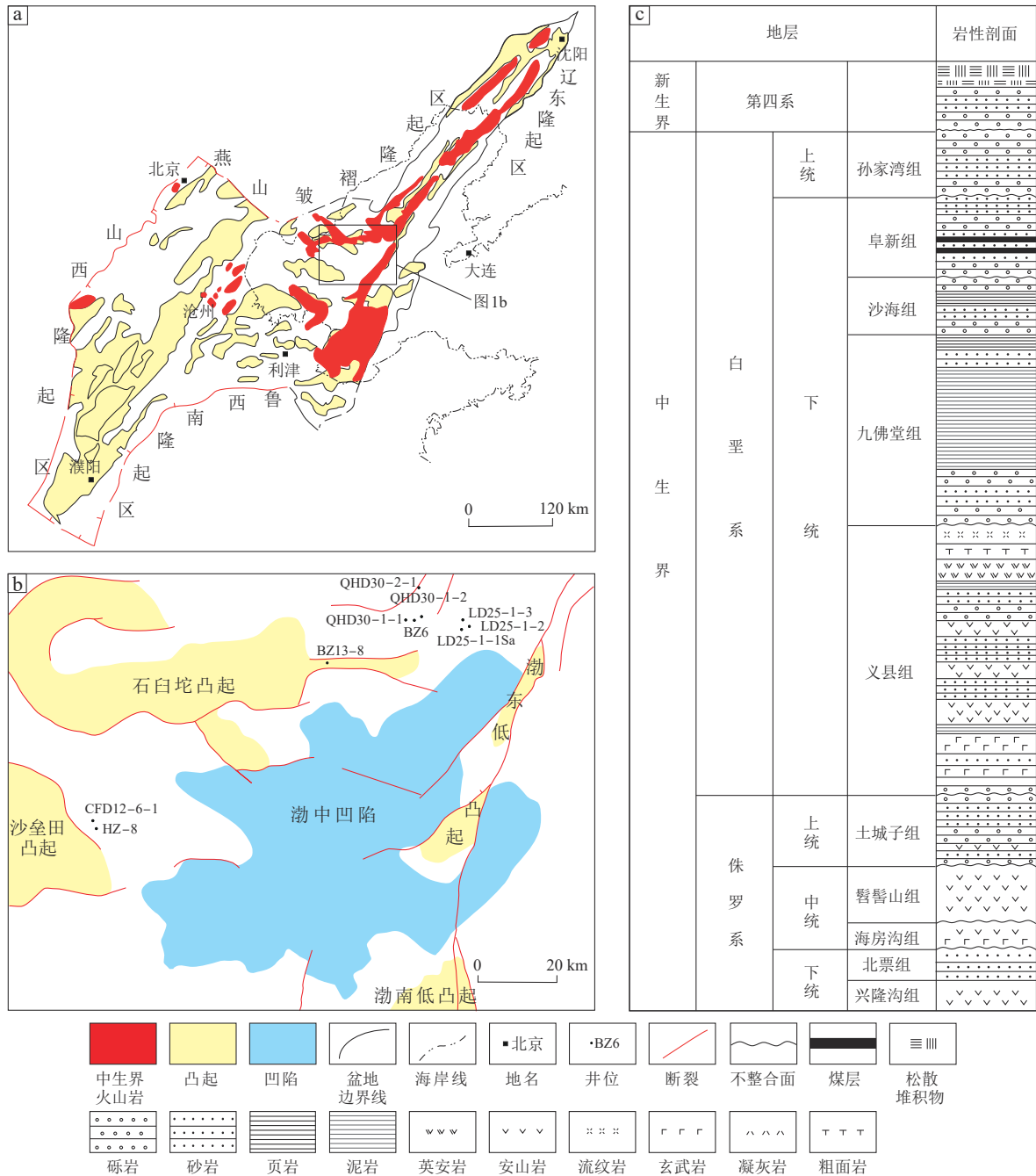


图1 渤海海域地质特征

Fig. 1 Geological characteristics of the Bohai Sea

a. 研究区区域位置及火山岩分布<sup>[13]</sup>; b. 渤中凹陷区域构造; c. 渤中凹陷地层柱状图<sup>[31]</sup>

天津分公司所提供,覆盖渤中凹陷面积5 000 km<sup>2</sup>。地震线道数据呈网格状,NW走向线间距为25 m,NE走向线间距为12.5 m。地震体的总体垂直采样率为2 ms,主频为20 Hz。利用三维地震资料以及18口钻井,并借助288块铸体及常规薄片,在全区共识别出包括255个火山机构(图2)。此外,本研究通过136个孔隙度和渗透率在内的储层物性分析报告,获得不同机构的物性特征。

### 3 火山机构特征

#### 3.1 火山机构类型

依据地震反射特征识别盆地内部埋藏火山具有很强的可操作性和实用性,地震反射的外部形态和内部结构构成可以更好地反映喷发作用特点。本文按照火

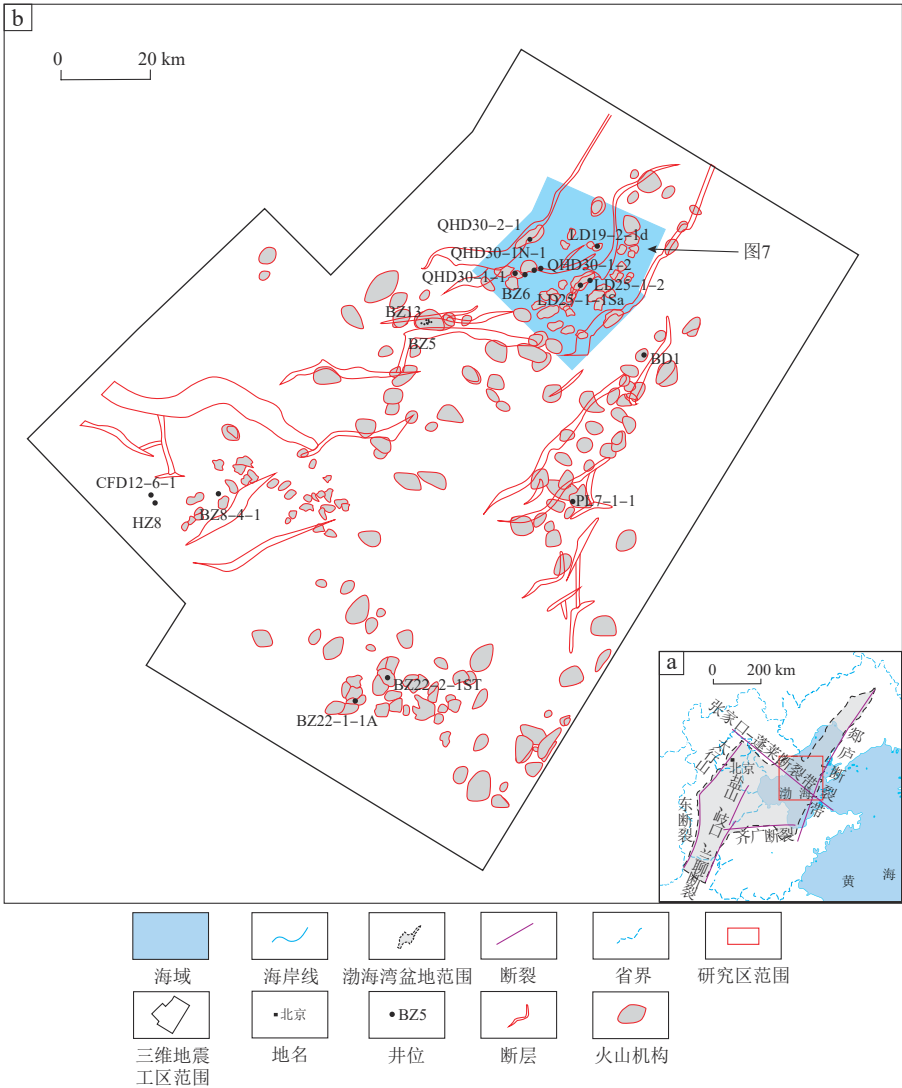


图2 渤海海域渤中凹陷埋藏火山平面分布

Fig. 2 Planar distribution of buried volcanoes in the Bozhong Sag, Bohai Sea  
a. 渤海海域位置; b. 渤海海域渤中凹陷地区地震数据覆盖范围及埋藏火山机构平面分布

表1 渤中凹陷中生界火山机构类型划分

Table 1 Classification of the Mesozoic volcanic edifices in the Bozhong Sag, Bohai Sea

| 火山机构<br>类型 | 形态<br>特征      | 规模            |             |               | 岩性、岩相构成                                                                | 结构特征                  |                        |                        |
|------------|---------------|---------------|-------------|---------------|------------------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
|            |               | 厚度/m          | 直径/km       | 纵/横比          |                                                                        | 近源                    | 中源                     | 远源                     |
| 熔岩<br>穹丘   | 高纵/横比,<br>丘状  | 1 300 ~ 1 600 | 2. 2 ~ 4. 4 | 0. 30 ~ 0. 72 | 侵入相(中-酸性熔岩 85 % ~ 95 %, 火山碎屑岩 5 % ~ 10 %)                              | 块状熔岩、<br>自碎角砾岩        | 溢流相熔岩<br>流、火山碎<br>屑坡积物 | 空落火山碎<br>屑堆积、火<br>山沉积岩 |
| 复合层<br>火山  | 低纵/横比,<br>丘状  | 2 100 ~ 3 000 | 6. 2 ~ 8. 9 | 0. 24 ~ 0. 48 | 爆发相、溢流相互层(中-酸性熔岩 50 % ~ 60 %, 火山碎屑岩 30 % ~ 40 %), 主要以中-酸性熔岩为主, 包括少量基性岩 | 自碎角砾<br>岩、熔岩碎<br>屑岩互层 | 火山碎屑流<br>夹少量熔<br>岩流    | 火山沉积岩                  |
| 盾状<br>火山   | 盾状            | 100 ~ 800     | 8. 4 ~ 9. 7 | 0. 01 ~ 0. 10 | 溢流相为主(玄武岩 85 % ~ 90 %, 火山碎屑岩 10 % ~ 15 %)                              | 隐爆<br>角砾岩             | 厚层玄武岩                  | 薄层玄武岩<br>夹泥岩           |
| 火山<br>碎屑岩席 | 席状、楔状、<br>充填状 | 极薄层 ~ 400     | 4. 3 ~ 5. 9 | 0. 01 ~ 0. 06 | 爆发相为主, 约占 60 %, 其余为溢流相和火山沉积相(火山碎屑岩 60 %, 熔岩 20 %, 沉积岩 10 %, 沉凝灰岩 10 %) | 中-酸性小<br>型熔岩丘         | 火山碎屑流                  | 沉火山碎屑<br>岩与沉积岩<br>互层   |

山的大小形态和反射特征将渤海湾盆地渤中凹陷中生界火山机构分为4种类型:熔岩穹丘、复合层火山、火山碎屑岩席和盾状火山,并测量了不同类型火山机构的基底直径、厚度及纵/横比,统计了其近源、中源和远源的岩性-岩相和结构组成(表1)。结果表明,不同类型的火山机构在规模上以及岩性组成上存在显著差异,熔岩穹丘纵/横比高,由厚层酸性熔岩构成;而复合层火山规模较大,熔岩与火山碎屑岩呈层状产出,熔岩层在其中起着格架的作用;板状的盾状火山通常横向流动范围远,但厚度薄,多由基性熔岩组成;纵/横比极低的火山碎屑岩席主要由火山碎屑岩构成,具有中源

加厚的特征。形态及规模的差异反映了不同类型的火山机构具有不同的建造过程,具体表现为岩浆成分以及喷发作用方式的不同。

### 3.2 火山机构地质模型

#### 3.2.1 熔岩穹丘

##### 1) 地震相特征

研究区熔岩穹丘整体外形为高纵/横比丘状,侧翼坡度较大,多大于 $40^{\circ}$ ,直径 $2.2\sim 4.0$  km,高 $1.3\sim 1.6$  km,纵/横比高达0.72(图3)。火山机构的纵/横比与岩浆

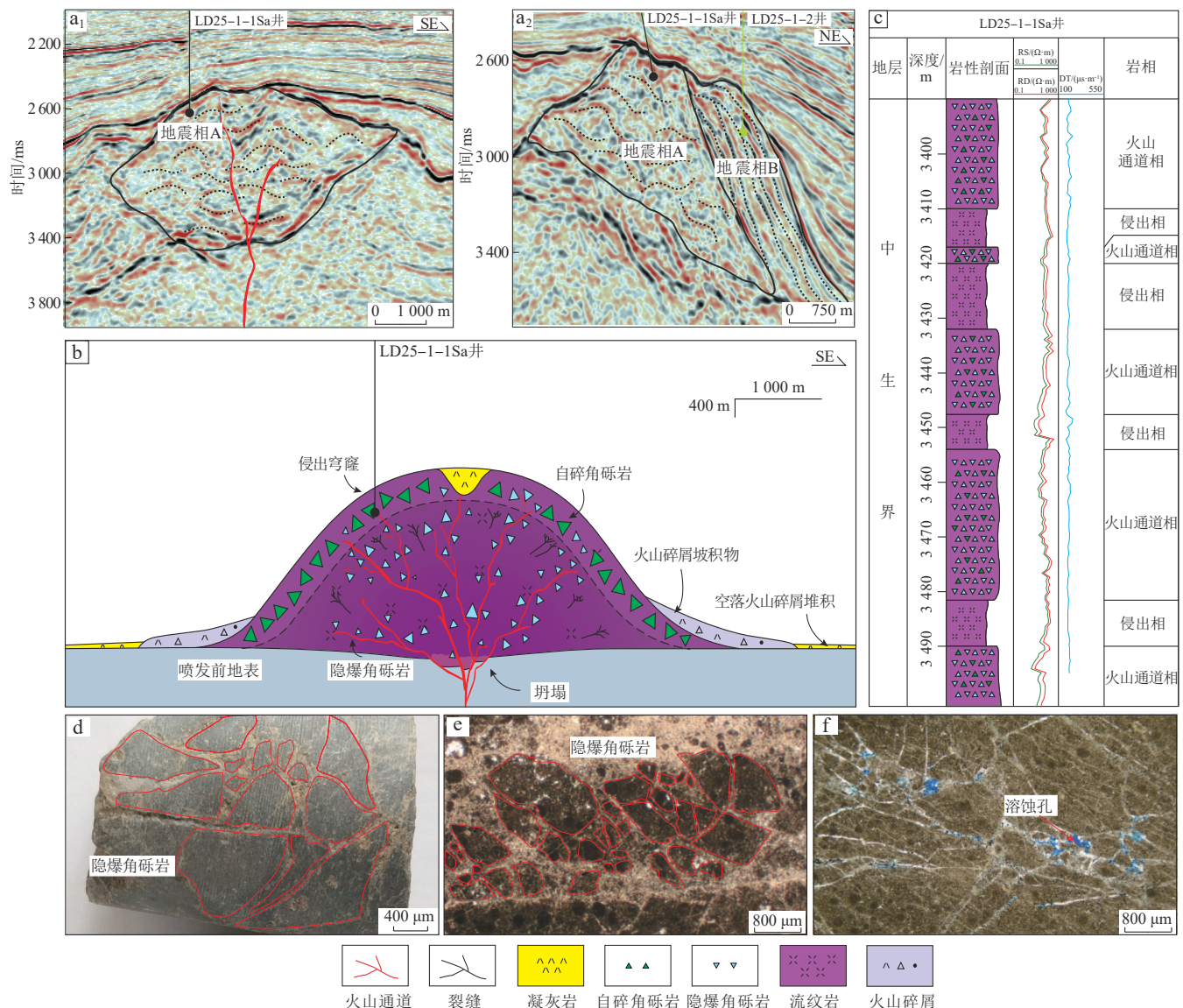


图3 渤海海域熔岩穹丘火山机构地震相特征及地质解释模式

Fig. 3 Seismic facies characteristics and geological interpretation model of the lava dome-type volcanic edifice in the Bohai Sea

a<sub>1</sub>. 熔岩穹丘火山机构地震相特征; a<sub>2</sub> 熔岩穹丘与上覆溢流相组合地震相特征; b. 熔岩穹丘火山机构地质解释模式; c. 熔岩穹丘火山机构 LD25-1-1Sa 井地层综合柱状图; d. LD25-1-1Sa 井, 埋深 3407 m, 隐爆角砾岩发育, 岩心照片; e. LD25-1-1Sa 井, 埋深 3396 m, 隐爆角砾岩发育, 普通薄片(-); f. LD25-1-1Sa 井, 埋深 3499 m, 溶蚀孔及隐爆缝发育, 铸体薄片(-)

黏度有关,黏度越大,熔岩厚度越大,流动距离越小,纵/横比越高<sup>[33-34]</sup>,一般认为侵出相的纵/横比大于0.20<sup>[34]</sup>。LD25-1-1Sa井所钻遇的火山机构是一个典型的熔岩穹丘,其内部呈现出两种反射特征(图3a):地震相A顶、底界面为强振幅连续反射,内部为杂乱反射特征,整体波状反射结构,中等振幅,低频,连续性差。在地震剖面上可以看到刺穿地震相A的具有乱岗状反射特征的火山通道。上覆的中生代沉积岩地层上超在地震相A的两翼。地震相B披覆在地震相A的侧翼,呈现出楔状外形,与地震相A截然不同,其内部主要为亚平行-平行的中等振幅、中-高频连续反射,顶、底均为强振幅连续反射特征。

## 2) 地质特征

以LD25-1Sa井钻遇的典型火山机构为例,钻井揭示了地震相A为岩性均一的流纹岩(图3c)。熔岩穹丘主要分为两段式喷发,分别为酸性岩浆侵出阶段和中性岩浆溢流阶段。地震相A为酸性岩浆侵出所形成。近火山通道发育后期岩汁沿裂缝发生隐爆作用而形成隐爆角砾(图3d,e),机构外部发育具有形变特征的自碎角砾,主要由于岩浆挤压作用而导致<sup>[34]</sup>。由于酸性岩浆具有挥发分少、温度低、岩浆黏度高及难以流动的特点,在受上覆地层压力的影响下,使得高黏度岩浆缓慢挤出地表,冷凝固结成岩,随着岩浆的持续侵出,火山机构的高度不断增加,最终形成熔岩穹丘(地震相A)。地震相B为气孔安山岩<sup>[13]</sup>,由第二阶段中性岩浆溢流所形成。此时由于地下岩浆系统注入富挥发分的中性岩浆,随着挥发分的不断累积,在火山通道内形成超压,最终突破上覆压力发生喷发,高黏度熔岩流沿着穹丘侧翼流淌,形成楔状熔岩流(地震相B),当火山活动静止后,由于火山机构较陡,火山丘顶部接受后期的风化淋滤作用,丘状外形被破坏,顶部较平,被剥蚀的碎屑物质沿着斜坡处堆积在火山机构两侧,形成火山碎屑坡积物。

## 3.2.2 盾状火山

### 1) 地震相特征

盾状火山具有侧面倾角( $<12^\circ$ )平缓和低纵/横比的特点(图4),通常具有盾状形态<sup>[32]</sup>。岩体多以顺层席状产出,横向延伸广,纵/横比低。前人在印度近海识别了具有类似形态参数的盾状火山<sup>[35]</sup>。地震剖面显示盾状火山主要由地震相A和B两个单元构成(图4a)。地震相A处于机构近源顶部,呈丘状外形,内部为中等振幅杂乱反射,顶底界面均不明显,内部具有多个垂直杂乱反射的刺穿火山通道。地震相B位于机

构的下部,呈盾状、席状外形,内部结构为平行-亚平行反射,中-强振幅,低频。在内部可以见到清晰的流动单元上部气孔集中分布的强振幅反射特征。整体形态有着近源厚,远离火山口的中、远源厚度明显逐渐减薄的特征。顶、底界面多呈现强振幅、中-高频、连续性好的反射特征;与下伏地层通常为平行不整合或整合接触。

### 2) 地质特征

以BZ13-8井钻遇的盾状火山为例,钻井揭示下部为玄武岩夹砂泥岩(图4c,e),由于基性岩浆具有黏性小、流动性强、流量大的特点<sup>[36]</sup>,大规模岩浆沿深大断裂、裂缝等火山通道喷发溢出后沿地表快速流动形成厚层板状、盾状熔岩流(地震相B)。并且该地震相为多期喷发叠加形成,各期次之间存在沉积间断。类似过程如中国长白山造盾期玄武岩<sup>[37]</sup>。钻井揭示机构上部为安山质隐爆角砾岩及和大量的火山碎屑熔岩(图4c),薄片观察隐爆角砾岩发育(图4d)。岩浆随着结晶分异、同化混染等作用,会逐渐从基性岩浆演化为中-酸性岩浆,晚期的中-酸性岩浆可能是由早期基性岩浆演化而来的。此阶段喷发能量弱,岩浆顺先存火山通道运至地表喷发,堆积在机构顶部近火山口处,形成缓丘状熔岩丘(地震相A)。

## 3.2.3 火山碎屑岩席

### 1) 地震相特征

火山碎屑岩席具有坡度倾斜幅度不大( $<12^\circ$ ),低纵/横比的特征(图5),由富挥发分的岩浆剧烈喷发(亚普林尼-普林尼式)形成火山碎屑堆积而成。该机构在地震剖面上的整体外形为楔状,地震上主要包括两个(A,B)地震相单元(图5a)。地震相A处于机构近缘部位,呈丘状外形,内部为中等振幅杂乱反射,顶、底界面均不明显,内部具有垂直杂乱反射的刺穿通道(同盾状火山中的地震相A)。地震相B位于机构的中、远源部位,顶界面为倾斜强振幅连续反射,底面为弱平行中等振幅连续反射;内部为同相轴组成的前积反射结构,具有频率低、振幅高、连续性较好的反射特征。与上、下地层通常为角度不整合接触,受地貌影响强烈,整体呈充填状。与盾状火山明显不同,具有厚度随着与喷发中心距离的增大到中源而变厚的典型特征,最后远源过渡为火山沉积岩和沉积岩。

### 2) 地质特征

以CFD12-6-1井钻遇的碎屑岩席为例,钻井揭示地震相A为英安质隐爆角砾岩及和大量的火山碎屑熔岩(图5a,e),说明为靠近火山通道的近源相带。岩浆

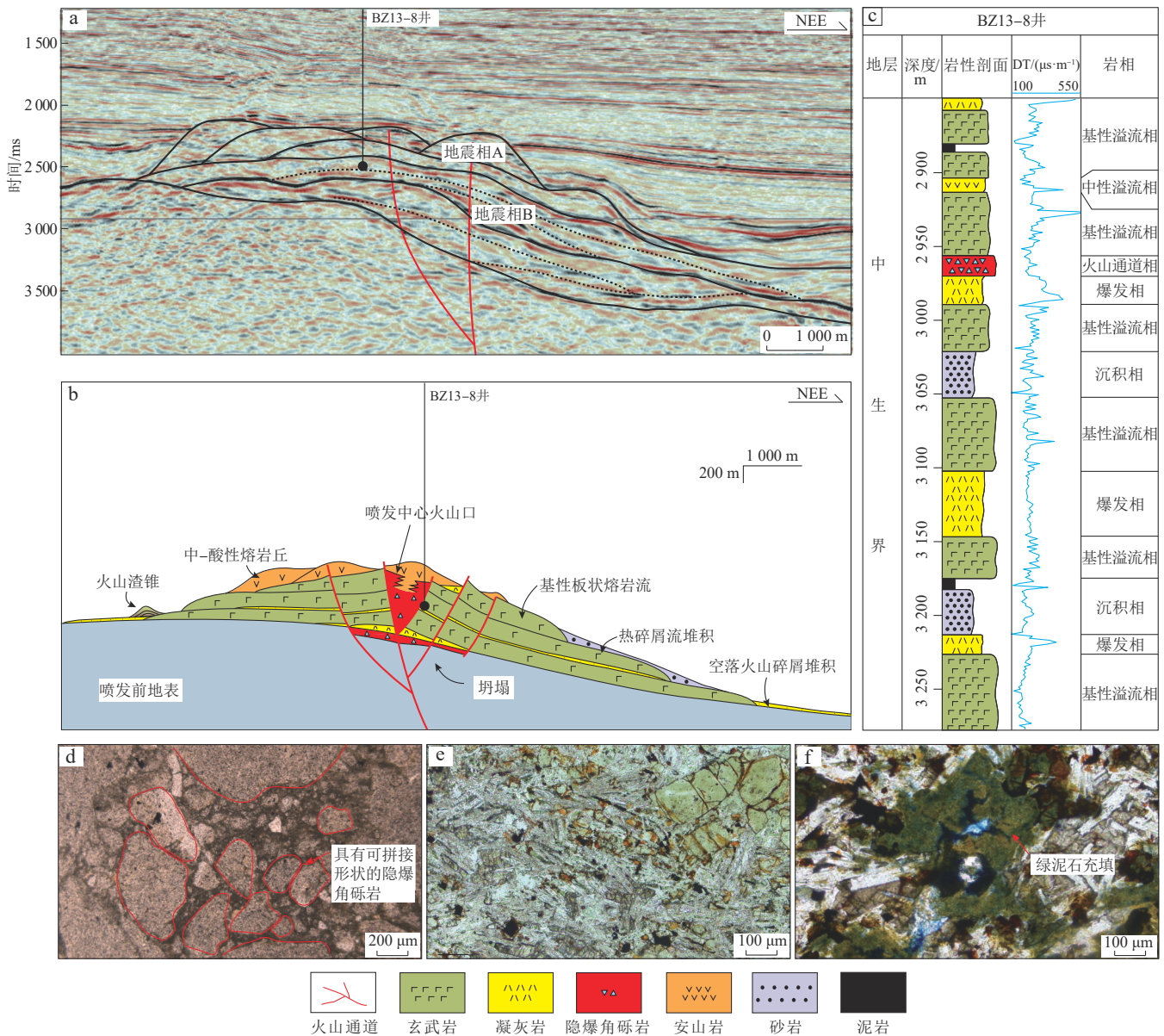


图4 渤海海域盾状火山机构地震相特征及地质解释模式

Fig. 4 Seismic facies characteristics and geological interpretation model of the shield-shaped volcanic edifice in the Bohai Sea

a. 盾状火山机构地震相特征; b. 盾状火山机构地质解释模式; c. 盾状火山机构 BZ13-8 井地层综合柱状图; d. B13-8 井, 埋深 2 995 m, 隐爆角砾岩发育, 普通薄片(-); e. B13-8 井, 埋深 3 060 m, 玄武岩, 普通薄片(-); f. B13-8 井, 埋深 3 912 m, 原生孔隙内充填绿泥石, 铸体薄片(-)

顺着火山通道运移喷发至地表, 高黏度岩浆在近火山口附近堆积形成丘状堆积物(地震相 A)。地震相 B 远离火山通道, 钻井揭示岩性组合为晶屑凝灰岩夹少量英安岩(图 5c, f), 其形成过程如下: 随着火山通道被熔岩堵塞, 通道内挥发分聚集形成超压, 内部能量不断积聚直到突破堵塞熔岩, 火山强烈喷发, 经历了强烈的破碎作用, 形成大量火山碎屑、火山灰, 同期夹杂熔岩溢流式喷发。随着喷发柱的垮塌, 在近火山口形成大量的凝灰岩堆积, 喷发的碎屑混合物受火山碎屑的粒径和喷发能量的影响, 在后续喷出物驱动和自身重力共

同作用下沿地表流动, 在斜坡处形成楔状叠加式火山碎屑流(地震相 B)。

### 3.2.4 复合层火山

#### 1) 地震相特征

复合层火山主要是由中心火山口喷发的物质围绕初始的火山锥体重叠叠加喷发形成, 其形成经历了多期不同类型的喷发, 岩体多以熔岩作为火山锥骨架, 与火山碎屑岩互层。火山机构整体规模大, 外形呈低丘状。具有横向延伸广, 纵/横比低的特征, 侧翼倾角约

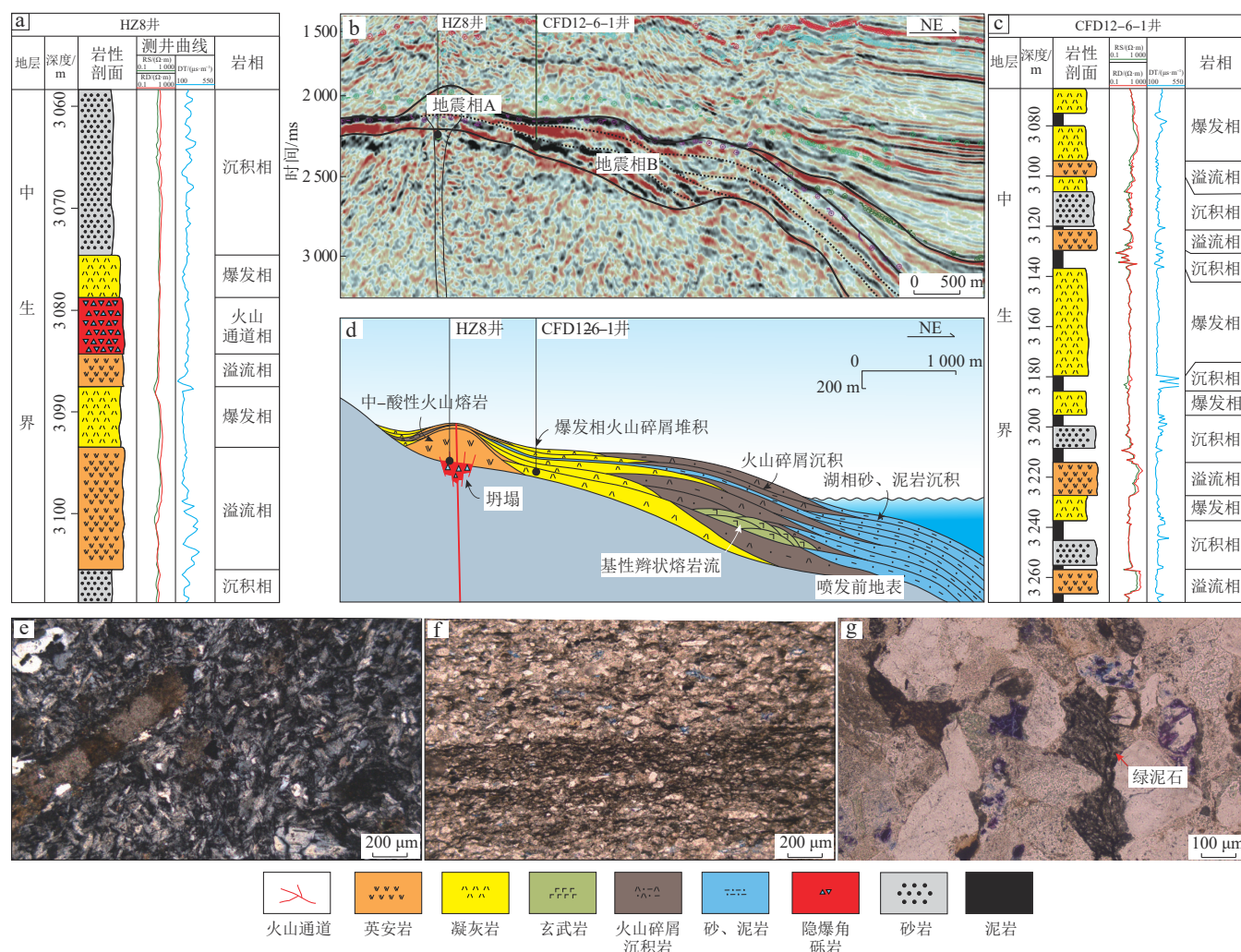


图5 渤海海域火山碎屑岩席地震相特征及地质解释模式

Fig. 5 Seismic facies characteristics and geological interpretation model of the pyroclastic sheet-type volcanic edifice in the Bohai Sea

a. HZ8井地层综合柱状图;b. 火山碎屑岩席火山机构地震相特征;c. 火山碎屑岩席火山机构BZ6井地层综合柱状图;d. 火山碎屑岩席火山机构地质解释模式;e. HZ8井,埋深3 078 m,火山碎屑熔岩,普通薄片(+);f. CFD12-6-1井,埋深3 201 m,晶屑凝灰岩,铸体薄片(-);g. CFD12-6-1井,埋深3 175 m,粒间孔被压实破坏,充填绿泥石,铸体薄片(-)

为 $30^{\circ}$ (图6)。QHD30-1-1井所钻遇的火山机构的形态参数类似于夏威夷的复合层火山模型<sup>[38]</sup>。该火山机构整体外形为低纵/横丘状,地震上包括A—F共6个地震相单元(图6a)。地震相A位于机构最下部,呈锥形,内部为乱岗状-杂乱反射,振幅低,连续性差。地震相B披覆在地震相A之上,呈现楔状外形,与地震相A反射特征截然不同,其内部为亚平行中等连续反射夹局部乱岗状反射。地震相C位于机构的上部,呈丘状外形,与下部的地震相A和B之间为削截接触关系,内部具有连续性差、中-强振幅杂乱反射特征。地震相D为机构侧翼上部楔状反射,其内部反射特征与地震相C相似,为空白-杂乱反射,振幅小,连续性差。地震相E位于火山机构侧翼最上部,反射结构表现为连续中-强振幅平行-亚平行反射,在该火山机构所有

地震相单元中,振幅最强,最为连续。另外,该剖面中可见多个近垂直的不连续、中-低振幅穿时杂乱反射刺穿下部地层的通道。

## 2) 地质特征

QHD30-1-1井底部揭示的大量玄武质角砾岩夹少量玻基玄武岩,火山玻璃已发生橙玄玻璃化(图6d),火山岩中多见泥岩夹层(图6c),指示了早期经历了水下喷发阶段。地震反射的振幅是穿过边界的物理岩石性质(例如密度和地震速度)的对比度的函数<sup>[39]</sup>,在海底环境中,连续且平行的地震反射通常被认为代表玻质碎屑岩<sup>[35,40]</sup>。一系列高振幅反射意味着具有显著不同物理性质的交替岩性序列,对应于层间熔岩流和玻质碎屑岩互层(地震相B)<sup>[35]</sup>。而地震相B井底部揭示的大量玄武质角砾岩夹少量玻基玄武岩的出现证明了



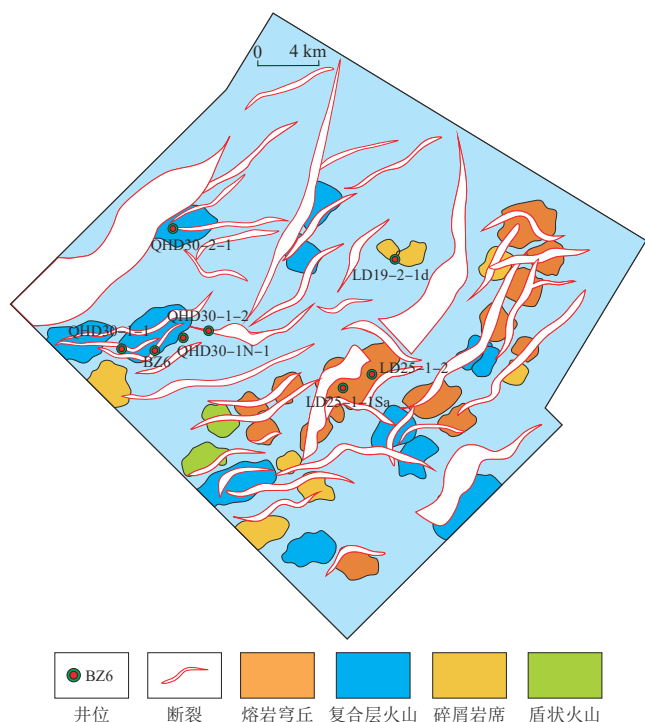


图7 渤海海域旅大-秦皇岛构造区火山机构平面分布特征  
Fig. 7 Planar distribution of the volcanic edifices in LD-QHD tectonic area in the Bohai Sea

出,这些埋藏火山机构的延伸方向和断裂的走向一致,并沿着断层带呈串珠状平行排列,分布在断裂之上或断裂两侧,表明NE向的断裂可能影响着火山活动的就位,断层为岩浆流动提供优先的、可行的途径,控制着火山岩体的分布。伸展构造背景下岩浆上升阻力的减小和众多浅部岩浆房的形成可以导致火山活动具有较高的喷发速率和更长的持续时间。但不同类型火山机构在平面上分布并无明显规律,其成因主要受岩浆性质、火山通道喷口结构控制<sup>[37-38]</sup>。

## 4 讨论

### 4.1 火山机构喷发建造过程

火山喷发方式及相关的建造过程可通过火山机构的形态特征<sup>[43]</sup>和内部结构的规律性变化来反应<sup>[28,40]</sup>。

由于喷发作用的不同导致上述提到的4类火山机构的生长模式各不相同,火山机构的生长过程包括垂向生长以及横向扩张。其中,熔岩穹丘及盾状火山机构大体都是通过机构高度和基底直径的成比例增加而生长(图8a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>, b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>),这种生长模式类似于Sun等提出的火山丘模型,其中两种生长模式的纵横比的

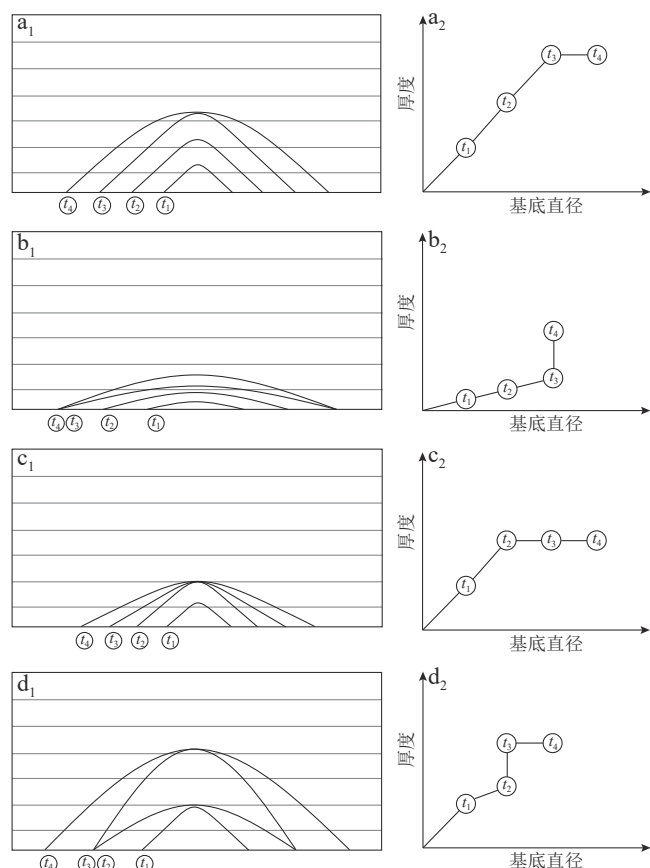


图8 渤海海域4种火山机构的基底直径与厚度的关系及据此绘制的火山生长模式简化示意图

Fig. 8 Simplified schematic sketches showing the volcanic growth based on the correlation between the diameter and height of the base of the four types of volcanic edifices mentioned above in the Bozhong Sea  
a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>. 熔岩穹丘; b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>. 盾状火山; c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>. 火山碎屑岩席; d<sub>1</sub>, d<sub>2</sub>. 复合层火山  
t<sub>1</sub>—t<sub>4</sub>. 火山机构的生长阶段

差异可能反映了岩浆黏度的不同<sup>[44]</sup>。熔岩穹丘及盾状火山在初期的生长阶段,岩浆直接挤出地表,维持着机构高度和基底直径随时间成比例的增加;而两者不同的是:熔岩穹丘后期由于火山通道被熔岩堵塞,随着通道内部能量的不断积聚,岩浆的喷发能量不断增大直至突破上覆物质发生强烈喷发,岩浆被迫沿着穹丘高倾角侧翼流淌,此时只增加了机构的基底直径,基本不增加整体的高度(图8a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>);而盾状火山机构后期的喷发能量弱,堆积物堆积在平坦的板状机构顶部近火山口处,进而只增加了盾状火山机构的高度,而直径基本保持不变(图8b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>)。火山碎屑岩席在火山口内部向下倾斜的汇聚反射表明先是通过顶部而不是侧翼添加火山物质而生长的,随着火山通道被堵塞,能量不断积聚直到喷发地表,火山物质通

过机构侧翼的侧向进积而增加,但机构高度几乎保持不变<sup>[45]</sup>(图8c<sub>1</sub>,c<sub>2</sub>)。与这3种生长模式不同的是复合层火山,它既包括了火山碎屑岩席(图8c<sub>1</sub>,c<sub>2</sub>)的侧向生长过程,又包括熔岩穹丘(图8a<sub>1</sub>,a<sub>2</sub>)及盾状火山(图8b<sub>1</sub>,b<sub>2</sub>)的垂向生长过程,是多种生长模式复合叠加的产物(图8d<sub>1</sub>,d<sub>2</sub>)。

## 4.2 火山机构储层特征

对渤中凹陷中生界火山岩15口钻井78块井壁岩心样品物性数据进行分析统计,其孔隙度和渗透率分布范围较大,孔隙度在0.6%~30.3%,平均为10.2%;渗透率为(0.001~5.566)×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,平均值为0.490×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>。不同类型的火山机构物性差异较为明显,发育的储集空间也大不相同(图9a)。根据孔隙度和渗透率可将渤中凹陷火山岩储层划分为I—III共3种类型:I类储层为高孔-中低渗型储层,II类储层为中孔-低渗型储层,III类储层为低孔-低渗型储层(图9a)<sup>[46]</sup>。

研究区复合层火山的储层发育最好,孔隙度为4.8%~30.3%,渗透率为(0.020~5.566)×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>(图9a),储层类型以I类为主(60%),其次为II类(37%),基本不发育III类(3%)(图9b)。渤中凹陷复合层火山主要由气孔粗面岩、块状粗面岩、粗面质隐爆角砾岩、气孔英安岩及块状英安岩组成,这些岩性是渤中凹陷火山岩形成储层的优势岩性<sup>[12]</sup>。气孔粗面岩、气孔英安岩和粗面质隐爆角砾岩发育有气孔、隐爆角砾间孔缝等原生孔隙(图6e),对孔隙度有极大的贡献。

复合层火山规模较大,其近源相带处于构造高部位,受风化淋滤作用改造也更为强烈,更易于形成次生溶蚀孔(图6f),这使得原生孔隙欠发育的块状粗面岩、块状英安岩和块状安山岩也可以形成I类和II类储层(图9b)。

熔岩穹丘中II类储层占比最高,为71%(图9b),孔隙度为2.3%~12.7%,渗透率为(0.010~0.143)×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>(图9a)。熔岩穹丘由块状流纹岩和流纹质隐爆角砾岩组成,在其建造过程中,随着熔岩穹丘的缓慢侵入生长,外带先冷却的熔岩受后期岩浆挤压发生破碎形成裂缝,这些自碎裂缝是最主要的储集空间,同时近火山通道附近发育有隐爆角砾缝。这些先存的裂缝为酸性流体运移提供了路径,促进溶蚀孔隙的发育(图3f)。

盾状火山仅发育II类和III类储层,分别占68%和38%(图9b),孔隙度为2.9%~16.7%,渗透率为(0.009~0.682)×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,储层质量相对熔岩穹丘更差。盾状火山由块状玄武岩和少量气孔玄武岩组成,原生气孔多被绿泥石及碳酸盐矿物强烈充填破坏(图4f)。玄武岩含有大量辉石、橄榄石等暗色矿物,一方面这些暗色矿物不稳定易发生蚀变,形成绿泥石及碳酸盐矿物;另一方面高暗色矿物含量的岩石往往韧性更强,受应力形成的裂缝较少,导致次生矿物难以运移出储层,充填孔隙<sup>[4,25]</sup>。

火山碎屑岩席整体储层质量较差,孔隙度为0.6%~6.7%,渗透率为(0.001~0.084)×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,不发育I类储层,III类储层占67%,二类储层占33%

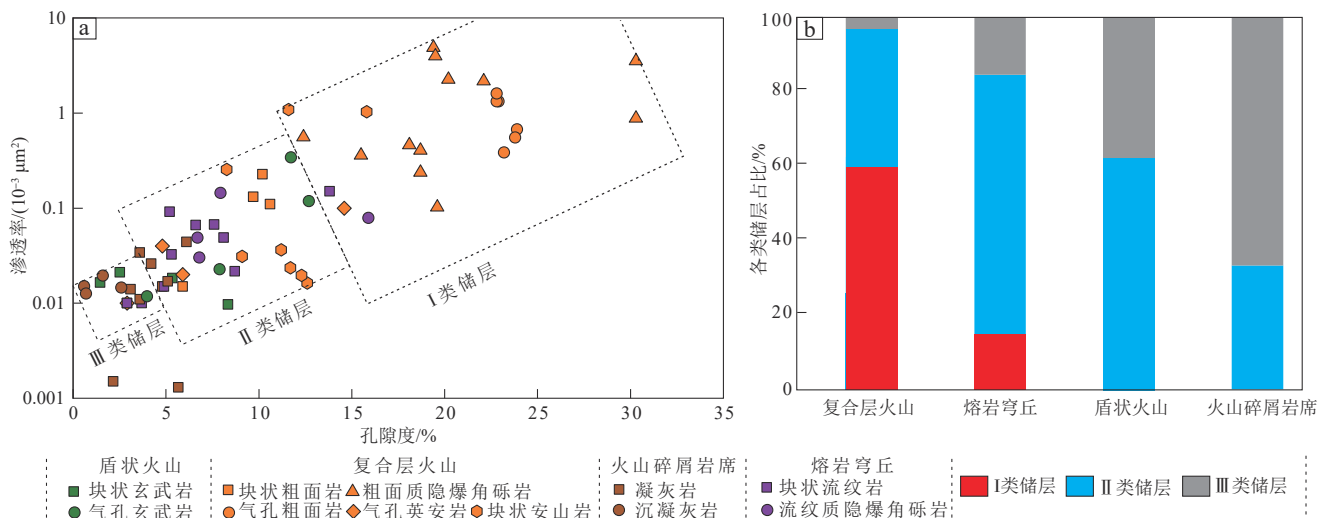


图9 渤中凹陷中生界火山机构储层物性和类型

Fig. 9 Reservoir physical properties and types developed in the Mesozoic volcanic edifices in the Bozhong Sag

a. 火山岩储层物性特征; b. 火山机构储层类型(图9a虚线框为储层类型分界<sup>[46]</sup>)

(图9b)。火山碎屑岩席由凝灰岩和沉凝灰岩组成,原生孔隙以粒间孔为主。由于火山碎屑岩储层的物性受埋深影响强烈,压实作用会导致先存粒间孔被破坏,前人研究表明松辽盆地火山碎屑岩在埋深超过3 000 m的条件下难以形成有效储层<sup>[1]</sup>。渤中凹陷火山碎屑岩席埋深大(>3 000 m),结构致密,颗粒间呈线接触,可见岩屑发生形变的现象(图5f,g)。

## 5 结论

1) 由于渤海湾盆地渤中凹陷中生界火山机构受后期风化和构造作用改造强烈,结合外部形态和内部结构特征,将渤中凹陷中生界火山机构划分为熔岩穹丘、复合层火山、火山碎屑岩席及盾状火山共4种类型,建立了4类火山机构的地质模型并进行了详细的地质特征分析。

2) 建立了4种火山机构对应的简化生长模式,通过火山机构的形态特征和内部结构的规律性变化来反应火山喷发方式及相关的建造过程。

3) 通过对比分析不同火山机构物性,认为研究区以原生孔隙类型为主的复合层火山和熔岩穹丘叠加后期的溶蚀作用是渤中凹陷形成高孔渗优质火山岩储层的必要条件,可作为寻找火山岩有利储层的勘探方向。

## 参 考 文 献

- [1] WANG Pujun, CHEN Shumin. Cretaceous volcanic reservoirs and their exploration in the Songliao Basin, northeast China [J]. AAPG Bulletin, 2015, 99(3): 499-523.
- [2] 南云, 柳益群, 周鼎武, 等. 三塘湖盆地晚石炭世火山岩气孔和裂缝填充物特征及其成因研究[J]. 岩石学报, 2016, 32(6): 1901-1913.  
NAN Yun, LIU Yiqun, ZHOU Dingwu, et al. Characteristics and origin of amygdale and crack fillers in volcanic rock of Late Carboniferous in Santanghu Basin, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 2016, 32(6): 1901-1913.
- [3] 高有峰, 刘万洙, 纪学雁, 等. 松辽盆地营城组火山岩成岩作用类型、特征及其对储层物性的影响[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(6): 1251-1258.  
GAO Youfeng, LIU Wanzhu, JI Xueyan, et al. Diagenesis types and features of volcanic rocks and its impact on porosity and permeability in Yingcheng Formation, Songliao Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2007, 37(6): 1251-1258.
- [4] 杨凯凯. 准噶尔盆地东部石炭系巴塔玛依内山组火山岩储层成岩作用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- YANG Kaikai. Diagenesis of carboniferous Batamayinshan Formation volcanic reservoir in eastern Junggar Basin [D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [5] 时应敏. 松辽盆地长岭断陷火山机构及天然气成藏特征研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.  
SHI Yingmin. Volcano edifices and gas pool formation in Changling faulted depression, Songliao Basin, China [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2012.
- [6] 王晨杰, 张新涛, 徐春强, 等. 渤中凹陷北部中生界火山岩储层发育特征及主控因素[J]. 中国海上油气, 2021, 33(3): 48-57.  
WANG Chenjie, ZHANG Xintao, XU Chunqiang, et al. Development characteristics and main controlling factors of Mesozoic volcanic reservoirs in northern Bozhong Sag [J]. China Offshore Oil and Gas, 2021, 33(3): 48-57.
- [7] 徐长贵, 于海波, 王军, 等. 渤海海域渤中19-6大型凝析气田形成条件与成藏特征[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(1): 25-38.  
XU Changgui, YU Haibo, WANG Jun, et al. Formation conditions and accumulation characteristics of Bozhong 19-6 large condensate gas field in offshore Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(1): 25-38.
- [8] YE Tao, CHEN Anqing, HOU Mingcai, et al. Lithofacies characteristics and controlling on volcanic reservoirs in the basement: A case study of the offshore Bohai Bay Basin, Eastern China [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 209: 109860.
- [9] 赵玉婷, 单玄龙, 王璞珺, 等. 松辽盆地白垩系营城组火山岩脱玻化作用及其储层意义——以盆缘剖面为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(6): 1152-1158.  
ZHAO Yuting, SHAN Xuanlong, WANG Pujun, et al. Devitrification of the volcanic rocks of the Cretaceous Yingcheng Formation in the Songliao Basin and its reservoir significance: An example from a basin boundary section [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2007, 37(6): 1152-1158.
- [10] 赵海玲, 黄微, 王成, 等. 火山岩中脱玻化孔及其对储层的贡献[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(1): 47-52, 58.  
ZHAO Hailing, HUANG Wei, WANG Cheng, et al. Micropores from devitrification in volcanic rocks and their contribution to reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 30(1): 47-52, 58.
- [11] 徐宏节. 松辽盆地南部断陷层火山岩储层识别及评价研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2010.  
XU Hongjie. The identification and evaluation about volcanic reservoir of fault depression layer in southern Songliao Basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010.
- [12] YUE Qingyou, SHAN Xuanlong, ZHANG Xintao, et al. Quantitative characterization, classification, and influencing factors of the full range of pores in weathering crust volcanic reservoirs: Case study in Bohai Bay Basin, China [J]. Natural Resources Research, 2021, 30(2): 1347-1365.

- [13] 叶涛, 韦阿娟, 祝春荣, 等. 渤海海域基底“改造型火山机构”特征及油气成藏意义[J]. 石油学报, 2016, 37(11): 1370–1380, 1434.  
YE Tao, WEI Ajuan, ZHU Chunrong, et al. Characteristics and hydrocarbon accumulation significance of reformed volcanic edifice in the basement of Bohai Sea [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(11): 1370–1380, 1434.
- [14] 唐华凤, 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[J]. 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 [J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(2): 530–536.
- [15] 王璞珺, 郑常青, 舒萍, 等. 松辽盆地深层火山岩岩性分类方案[J]. 大庆石油地质与开发, 2007, 26(4): 17–22.  
WANG Pujun, ZHENG Changqing, SHU Ping, et al. Classification of deep volcanic rocks in Songliao Basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2007, 26(4): 17–22.
- [16] 侯贵廷, 钱祥麟, 蔡东升. 渤海湾盆地中、新生代构造演化研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2001, 37(6): 845–851.  
HOU Guiting, QIAN Xianglin, CAI Dongsheng. The tectonic evolution of Bohai Basin in Mesozoic and Cenozoic time [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2001, 37(6): 845–851.
- [17] 李三忠, 索艳慧, 戴黎明, 等. 渤海湾盆地形成与华北克拉通破坏[J]. 地学前缘, 2010, 17(4): 64–89.  
LI Sanzhong, SUO Yanhui, DAI Liming, et al. Development of the Bohai Bay Basin and destruction of the North China craton [J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(4): 64–89.
- [18] 薛永安, 王奇, 牛成民, 等. 渤海海域渤中凹陷渤中19-6深层潜山凝析气藏的充注成藏过程[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(5): 891–902.  
XUE Yongan, WANG Qi, NIU Chengmin, et al. Hydrocarbon charging and accumulation of BZ 19-6 gas condensate field in deep buried hills of Bozhong Depression, Bohai Sea [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(5): 891–902.
- [19] 王冰洁, 王德英, 王鑫, 等. 渤海湾盆地辽中凹陷南洼走滑转换带特征及其对大、中型油田的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(6): 1347–1358.  
WANG Bingjie, WANG Deying, WANG Xin, et al. Characteristics of strike-slip transition zone in southern Liaozhong Sag, Bohai Bay Basin and its control on large/medium-sized oilfields [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(6): 1347–1358.
- [20] 衣健, 李慧勇, 单玄龙, 等. 渤海湾盆地渤中凹陷太古宇变质岩潜山储集层垂向结构单元划分与识别[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(6): 1107–1118.  
YI Jian, LI Huiyong, SHAN Xuanlong, et al. Division and identification of vertical reservoir units in Archeozoic metamorphic buried hill of Bozhong Sag, Bohai Bay Basin, East China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(6): 1107–1118.
- [21] 王德英, 刘晓健, 邓辉, 等. 渤海湾盆地渤中19-6区中-新生代构造转换特征及其对太古宇潜山大规模储层形成的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(6): 1334–1346.  
WANG Deying, LIU Xiaojian, DENG Hui, et al. Characteristics of the Meso-Cenozoic tectonic transformation and its control on the formation of large-scale reservoirs in the Archean buried hills in Bozhong 19-6 area, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(6): 1334–1346.
- [22] 牛成民, 杨海风, 郭涛, 等. 郯庐断裂带辽东湾段变形特征及展布规律[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 265–276.  
NIU Chengmin, YANG Haifeng, GUO Tao, et al. Deformation characteristics and distribution of Tan-Lu fault zone in Liaodong Bay Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 265–276.
- [23] XU Shang, HAO Fang, XU Changgui, et al. Hydrocarbon migration and accumulation in the northwestern Bozhong subbasin, Bohai Bay Basin, China [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 172: 477–488.
- [24] WANG Guangzeng, LI Sanzhong, WU Zhiping, et al. Early Paleogene strike-slip transition of the Tan-Lu fault zone across the southeast Bohai Bay Basin: Constraints from fault characteristics in its adjacent basins [J]. Geological Journal, 2019, 54(2): 835–849.
- [25] WANG Wei, YI Jian, SHAN Xuanlong, et al. Characteristics of fractures development and its controlling factors within the buried hill reservoirs from the Archean metamorphic basement in the Bozhong Sag, Bohai Bay Basin, Eastern China [J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 935508.
- [26] YE Tao, CHEN Anqing, NIU Chengming, et al. Effective fractures linked with tectonic reactivation and multiple genetic fluids in the ultradeep Paleozoic carbonate buried hills of the Bozhong Sag, North China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2022, 140: 105642.
- [27] YE Tao, CHEN Anqing, NIU Chengming, et al. Characteristics, controlling factors and petroleum geologic significance of fractures in the Archean crystalline basement rocks: A case study of the South Jinzhou Oilfield in Liaodong Bay Depression, North China [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 208 (Part C): 109504.
- [28] 杨海风, 徐长贵, 牛成民, 等. 渤海湾盆地黄河口凹陷BZ34-9油田新生界“断裂-岩浆”联合控藏作用[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(5): 1056–1064.  
YANG Haifeng, XU Changgui, NIU Chengmin, et al. Joint control of the Cenozoic faults and magma on hydrocarbon accumulation in BZ34-9 Oilfield in Huanghekou Sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(5): 1056–1064.
- [29] 许廷生. 渤海湾盆地岩浆侵入活动与油气成藏特征[J]. 特种油气藏, 2021, 28(1): 81–85.

- XU Tingsheng. Research on the magmatic intrusion and oil and gas reservoir forming characteristics in Bohai Bay Basin [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2021, 28(1): 81–85.
- [30] 漆家福, 于福生, 陆克政, 等. 渤海湾地区的中生代盆地构造概论[J]. *地学前缘*, 2003, 10(S1): 199–206.
- QI Jiafu, YU Fusheng, LU Kezheng, et al. Conspectus on Mesozoic basins in Bohai Bay Province [J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(S1): 199–206.
- [31] 岳庆友. 渤中凹陷中生界火山岩成储机理及分布规律研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- YUE Qingyou. Formation mechanism and distribution of the Mesozoic volcanic reservoir in Bozhong Sag[D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [32] FU Mao, SHAN Xuanlong, ZHANG Xintao, et al. Geodynamic evolution of lithospheric removal of the North China Craton: Constraints from late Mesozoic volcanic rocks in the Bohai Bay Basin, East China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2022, 236: 105330.
- [33] 衣健, 王璞珺, 李瑞磊, 等. 松辽盆地断陷层系地震火山地层学研究: 典型火山岩地震相与地质解释模式[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2014, 44(3): 715–729.
- YI Jian, WANG Pujun, LI Ruilei, et al. Seismic volcanostratigraphy of the Songliao Basin, Early Cretaceous: Typical volcanic seismic facies and geological interpretation pattern [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2014, 44(3): 715–729.
- [34] 唐华风, 戴岩林, 郭天婵, 等. 侵出式火山机构储层的分布模式——以伊通火山群为例[J]. *石油学报*, 2020, 41(7): 809–820.
- TANG Huafeng, DAI Yanlin, GUO Tianchan, et al. Distribution pattern of reservoirs in the extrusive volcanic edifice: A case study of the Yitong volcanoes [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(7): 809–820.
- [35] CALVÈS G, SCHWAB A M, HUUSE M, et al. Seismic volcanostratigraphy of the western Indian rifted margin: The pre-Deccan igneous province [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2011, 116(B1): B01101.
- [36] YI Jian, WANG Pujun, GAO Youfeng, et al. Seismic volcanostratigraphy of large, extrusive complexes in continental rift basins of Northeast China: Analysis of general bedding patterns in volcanostratigraphy and their seismic reflection configurations [J]. *Journal of Central South University*, 2016, 23(6): 1459–1467.
- [37] ZHANG Maoliang, GUO Zhengfu, LIU Jiaqi, et al. The intraplate Changbaishan volcanic field (China/North Korea): A review on eruptive history, magma genesis, geodynamic significance, recent dynamics and potential hazards [J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 187: 19–52.
- [38] GARCIA M O, DAVIS M G. Submarine growth and internal structure of ocean island volcanoes based on submarine observations of Mauna Loa volcano, Hawaii [J]. *Geology*, 2001, 29(2): 163–166.
- [39] JACKSON C A L. Seismic reflection imaging and controls on the preservation of ancient sill-fed magmatic vents [J]. *Journal of the Geological Society*, 2012, 169(5): 503–506.
- [40] BISCHOFF A, NICOL A, COLE J, et al. Stratigraphy of architectural elements of a buried monogenetic volcanic system [J]. *Open Geosciences*, 2019, 11(1): 581–616.
- [41] SORIANO C, GIORDANO G, CAS R, et al. Facies architecture, emplacement mechanisms and eruption style of the submarine andesite El Barronal complex, Cabo de Gata, SE Spain [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2013, 264: 210–222.
- [42] 傅锚. 渤海湾盆地环渤中凹陷地区晚中生代埋藏火山的成因与分布及其构造过程[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- FU Mao. Origin, distribution and tectonic processes of Late Mesozoic buried volcanoes in the Bozhong sag and surrounding areas, Bohai Bay Basin [D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [43] GROSSE P, VAN WYK DE VRIES B, PETRINOVIC I A, et al. Morphometry and evolution of arc volcanoes [J]. *Geology*, 2009, 37(7): 651–654.
- [44] SUN Q, MAGEE C, JACKSON C A L, et al. How do deep-water volcanoes grow? [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, 542: 116–320.
- [45] BISCHOFF A, NICOL A, BARRIER A, et al. Paleogeography and volcanic morphology reconstruction of a buried monogenetic volcanic field (part 2) [J]. *Bulletin of Volcanology*, 2019, 81(9): 57.
- [46] 张新涛, 张藜, 刘晓健. 渤海湾盆地渤中凹陷中生界火山岩优质储层发育规律[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2023, 53(1): 1–16.
- ZHANG Xintao, ZHANG Li, LIU Xiaojian. Development regularity of the Mesozoic volcanic reservoir in Bozhong Sag, Bohai Bay Basin, China [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2023, 53(1): 1–16.

(编辑 梁 慧)