

牛成民,于海波,单玄龙,等.渤海海域锦州25-A构造区中生界火山岩有利储层成因.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(6):1788-1800. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240250.  
Niu Chengmin, Yu Haibo, Shan Xuanlong, et al. Favorable Reservoir Genesis of Mesozoic Volcanic Rocks in Jinzhou 25-A Structure Area, Bohai Sea. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54 (6): 1788-1800. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240250.

## 渤海海域锦州25-A构造区中生界 火山岩有利储层成因

牛成民<sup>1</sup>,于海波<sup>1</sup>,单玄龙<sup>2</sup>,王冰洁<sup>1</sup>,郭景震<sup>1</sup>,邹玉洁<sup>2</sup>,庞赫<sup>2</sup>,衣健<sup>2</sup>

1.中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津 300459

2.吉林大学地球科学学院,长春 130061

**摘要:**渤海湾盆地辽东湾凹陷中生界火山岩勘探潜力较大,但是对于火山岩优质储层发育规律尚缺乏深入认识。针对探讨中生界火山岩有利储层成因这一难点,综合应用钻井数据、铸体薄片及物性测试资料,对渤海海域锦州25-A构造区中生界火山岩的储集空间类型、物性、孔隙微观结构等特征进行研究,分析火山岩优质储层发育的条件和储层发育模式。研究表明:锦州25-A构造区中生界火山岩主要发育中酸性溢流相下部亚相的粗安岩和安山岩,以及少量的基性溢流相玄武岩。有利储层主要发育在中酸性溢流相的粗安岩和粗面岩中,储集空间以次生成因为主,主要发育基质溶孔、晶内溶孔和裂缝,在火山岩顶部的风化砂砾岩中也可见一些粒间孔。储层孔隙度平均为20.3%,渗透率平均为0.209 mD<sup>①</sup>,属于高孔-低渗型储层。火山岩体顶面经过长时间风化剥蚀顶部常发育厚层风化壳;同时在母岩带中还发育有喷发单元间次级风化壳的内幕储层;有效裂缝方向主要为NEE—SWW和NS向,为上述风化作用形成有利储层创造了良好条件。因此,本文建立了“以风化作用主控,火山岩顶部发育厚层风化壳储层,喷发单元顶部发育次级薄层风化壳内幕储层”的火山岩规模型储层发育模式。

**关键词:**渤海湾盆地;辽东湾凹陷;锦州25-A构造区;中生界;火山岩储层;风化壳;发育模式

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240250

中图分类号:P618.130.1

文献标志码:A

## Favorable Reservoir Genesis of Mesozoic Volcanic Rocks in Jinzhou 25-A Structure Area, Bohai Sea

Niu Chengmin<sup>1</sup>, Yu Haibo<sup>1</sup>, Shan Xuanlong<sup>2</sup>, Wang Bingjie<sup>1</sup>, Guo Jingzhen<sup>1</sup>,

收稿日期:2024-10-08

作者简介:牛成民(1966—),男,教授级高级工程师,主要从事勘探地质综合研究与管理工, E-mail: Niuchm@cnooc.com.cn

通信作者:单玄龙(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事非常规和深层油气地质方面的研究, E-mail: shanxl@jlu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(41972313);中国海洋石油有限公司“十四五”重大科技项目(KJGG2022-0302)  
Supported by the National Natural Science Foundation of China (41972313) and the Major Science and Technology Project of CNOOC During 14th Five-Year Plan Period (KJGG2022-0302)

①毫达西(mD)为非法定计量单位,1 mD=0.987×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,下同。

Zou Yujie<sup>2</sup>, Pang He<sup>2</sup>, Yi Jian<sup>2</sup>

1. CNOOC China Limited, Tianjin Branch, Tianjin 300459, China

2. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

**Abstract:** The exploration potential of Mesozoic volcanic rocks in Liaodong Bay depression of Bohai Bay basin is great, but the development law of high-quality volcanic rocks reservoir is not well understood. Aiming at the difficulty of exploring the genesis of favorable reservoirs of Mesozoic volcanic rocks, the reservoir space types, physical properties, pore microstructure, and other characteristics of Mesozoic volcanic rocks in Jinzhou 25 - A structure area in Bohai Sea are studied by a comprehensive application of drilling data, thin section, and physical property data, and the conditions and reservoir development model of high-quality volcanic rocks are analyzed and discussed. The results show that the Mesozoic volcanic rocks in Jinzhou 25 - A structure area are mainly composed of trachyandesite and andesite in the lower subfacies of the intermediate-acid overflow facies, and a small amount of basalt in the basic overflow facies. Favorable reservoirs are mainly developed in trachyandesite and trachyte of the intermediate-acid overflow facies. The reservoir space is dominated by secondary origin, which mainly develops matrix pores, intracrystalline pores and fractures. Some intergranular pores can also be seen in the breccia on top of volcanic rocks. The average porosity and permeability of the reservoir are 20.3% and 0.209 mD respectively. It belongs to the high porosity and low permeability reservoir. Thick weathering crust is often developed on the top of volcanic rock mass after a long time weathering and denudation. At the same time, the inner reservoir of secondary weathering crust between eruptive units is also developed in the mother rock zone. The effective fracture direction is mainly NEE - SWW and NS direction, which creates good conditions for the formation of favorable reservoirs. Therefore, this paper established a volcanic rock regular model reservoir development model of “weathering as the main control, thick weathering crust reservoir developed on the top of volcanic rock, and secondary thin weathering crust inside reservoir developed on the top of eruption unit”.

**Key words:** Bohai Bay basin; Liaodongwan sag; Jinzhou 25 - A structure area; Mesozoic; volcanic reservoir; weathering crust; development model

## 0 引言

近年来,我国常规油气勘探发现难度日益增大,非常规油气勘探逐渐受到重视,显示了良好的勘探开发潜力<sup>[1-3]</sup>。火山岩储层被视为一种关键的非传统油气储层,在深部地层中的储集特性明显优于传统的沉积岩储层<sup>[4-5]</sup>。伴随着火山岩勘探工作的深入,中国先后在松辽盆地<sup>[6-7]</sup>、四川盆地<sup>[8]</sup>、准噶尔盆地<sup>[9]</sup>和塔里木盆地<sup>[10]</sup>等深层火山岩中获得一系列油气勘探重大突破。渤海湾盆地中生界火山岩非常发育<sup>[11-12]</sup>,具有分布广、厚度大等特点<sup>[13]</sup>。随着研究程度的深入,火山岩油气藏的探明储量不断增加,成为近年来油气藏勘探领域的重点对象<sup>[14-15]</sup>。随着油气藏勘探工作的不断深入,渤海湾盆地中生界火山岩相继发现多个火山岩油气藏,如秦皇岛 30 -

A 火山岩油气藏<sup>[16]</sup>、风化店中生界流纹岩油气藏<sup>[17]</sup>、LD25 - A 中生界火山岩油气藏<sup>[18-19]</sup>和 BZ8 - C 中生界火山岩油气藏<sup>[20]</sup>等,显示了渤海湾盆地中生界火山岩勘探的巨大潜力。辽西低凸起是渤海湾盆地辽东湾拗陷火山岩的主要分布区<sup>[21]</sup>,在该凸起上已经发现了多个油气田<sup>[22]</sup>。然而,目前本区中生界火山岩勘探程度很低,对中生界火山岩优质储层的成因及成储机制尚缺乏深入了解,限制了研究区中生界火山岩油气藏的进一步勘探。

与沉积岩相比,火山岩的形成过程复杂多样,其岩石学特征、孔隙结构、流体分布等方面均展现出高度的复杂性和特殊性<sup>[23]</sup>,这既为油气储层的形成提供了有利条件,也为勘探与开发带来了前所未有的挑战。通过比较锦州地区不同钻井中生界火山岩的物性和产能数据,发现火山岩在储层产能方面存在纵向和横向的显著差异。因此,传统成储机制无法

解释锦州地区中生界优质火山岩储层的形成,需要深入研究该地区火山岩储层的发育规律。本文采用多种研究手段,如铸体薄片、物性测试等,实现研究区火山岩储层储集空间的精细表征;同时探讨渤海湾盆地辽东湾拗陷锦州地区中生界火山岩优质储层的发育规律,建立成储模式,以期为火山岩油藏的勘探、评价和开发提供借鉴。

### 1 地质背景

渤海湾盆地位于中国东部,包括华北平原、下辽河平原和渤海海域,西侧以太行山隆起带为界,北与燕山褶皱带接壤,东以辽东隆起和胶东隆起为界,东南为鲁西隆起,是华北克拉通东部的晚中—新生代断陷盆地<sup>[24-25]</sup>。中生界及下伏地层在印支运动和燕山运动过程中形成的一些大型近 EW 向褶皱变形和 NE-NNE 向褶皱变形,控制渤海湾地区及周边,中生代时期发育了多期陆相沉积盆地<sup>[26-27]</sup>。渤海湾盆地主要由辽河拗陷、渤中拗陷、冀中拗陷、黄骅拗陷、济阳拗陷、临清拗陷六大拗陷以及埕宁隆

起、沧县隆起、内黄隆起和邢衡隆起四大隆起组成,进一步可以划分为 58 个凹陷以及 52 个凸起<sup>[28]</sup>。

研究区锦州 25-A(以下简称为 JZ25-A)构造区位于渤海湾盆地东北部辽东湾拗陷辽西低凸起(图 1a),地层由老到新依次为下古生界寒武系和奥陶系,上古生界石炭系和二叠系,中生界侏罗系和白垩系(图 1b),新生界古近系、新近系和第四系,缺失下古生界志留系、泥盆系及中生界三叠系<sup>[29]</sup>。古太平洋板块中生代复杂的俯冲历史导致华北地台岩石圈减薄,渤海湾盆地发生大规模裂陷作用,形成了广泛、强烈的岩浆活动。研究区辽东湾拗陷中生界火山岩岩性主要以中酸性火山岩为主(图 1b),共发育 3 个火山旋回,从老到新依次为旋回一基性火山岩、旋回二中性火山岩和旋回三酸性火山岩<sup>[30]</sup>。

### 2 火山岩岩性岩相特征

选择 JZ25-A 构造区钻遇中生界火山岩的钻井 JZ25-A-a 井(902 m)作为研究对象,根据岩心和井壁取心资料进行火山岩的岩性、岩相特征研究。

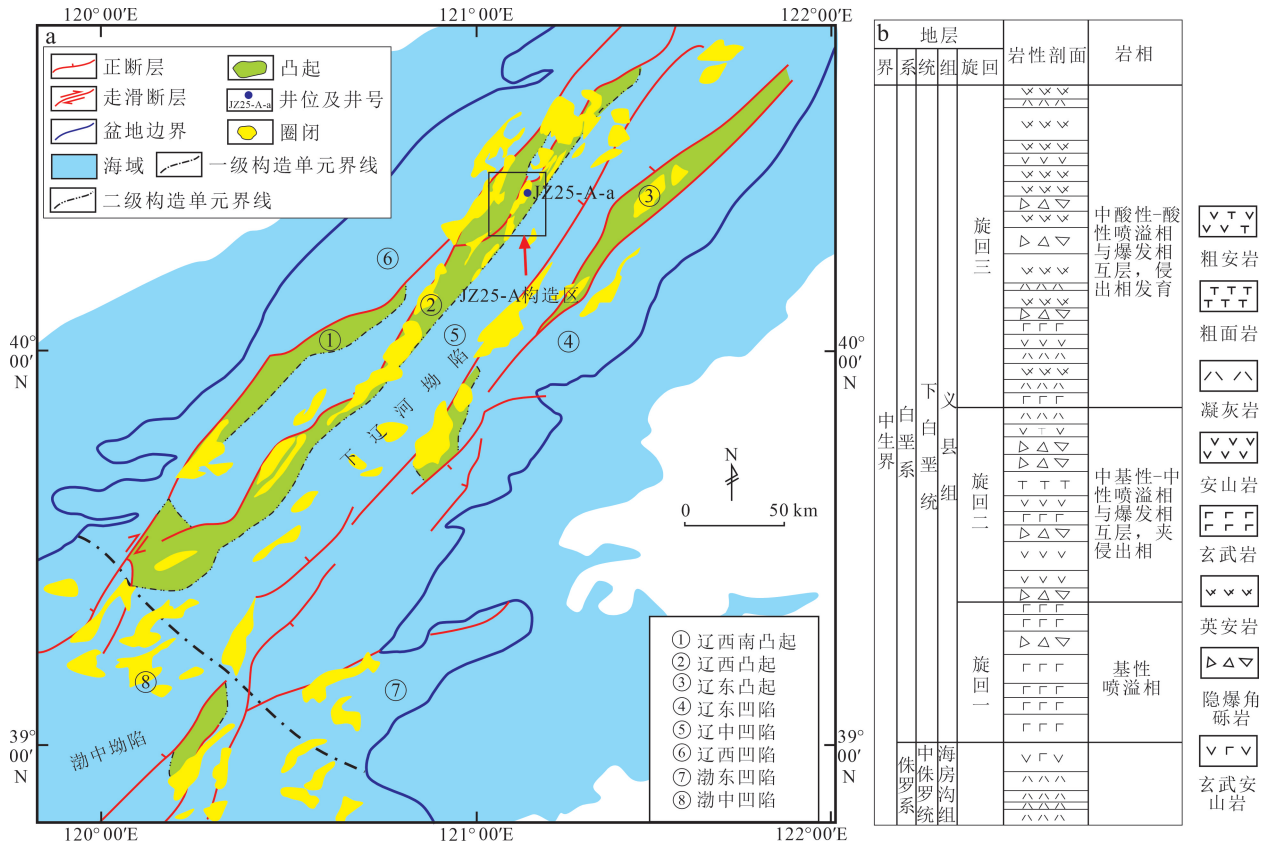
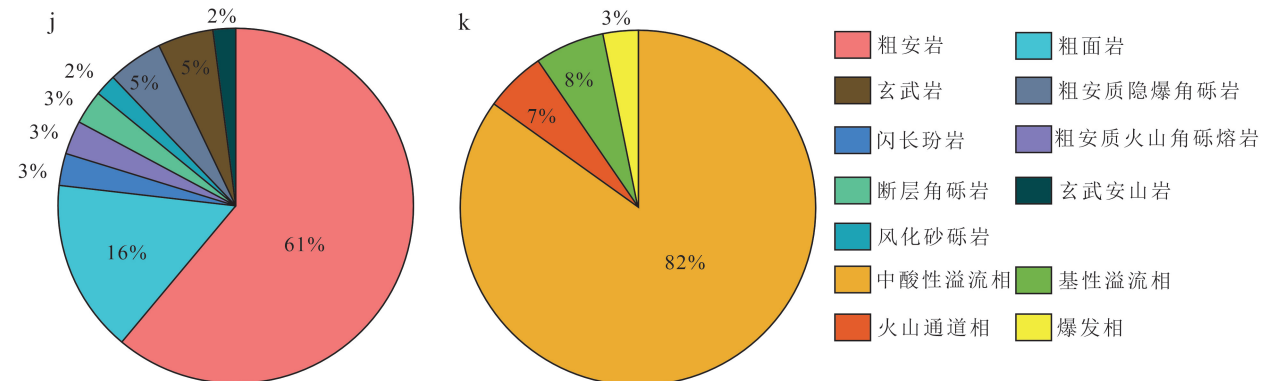
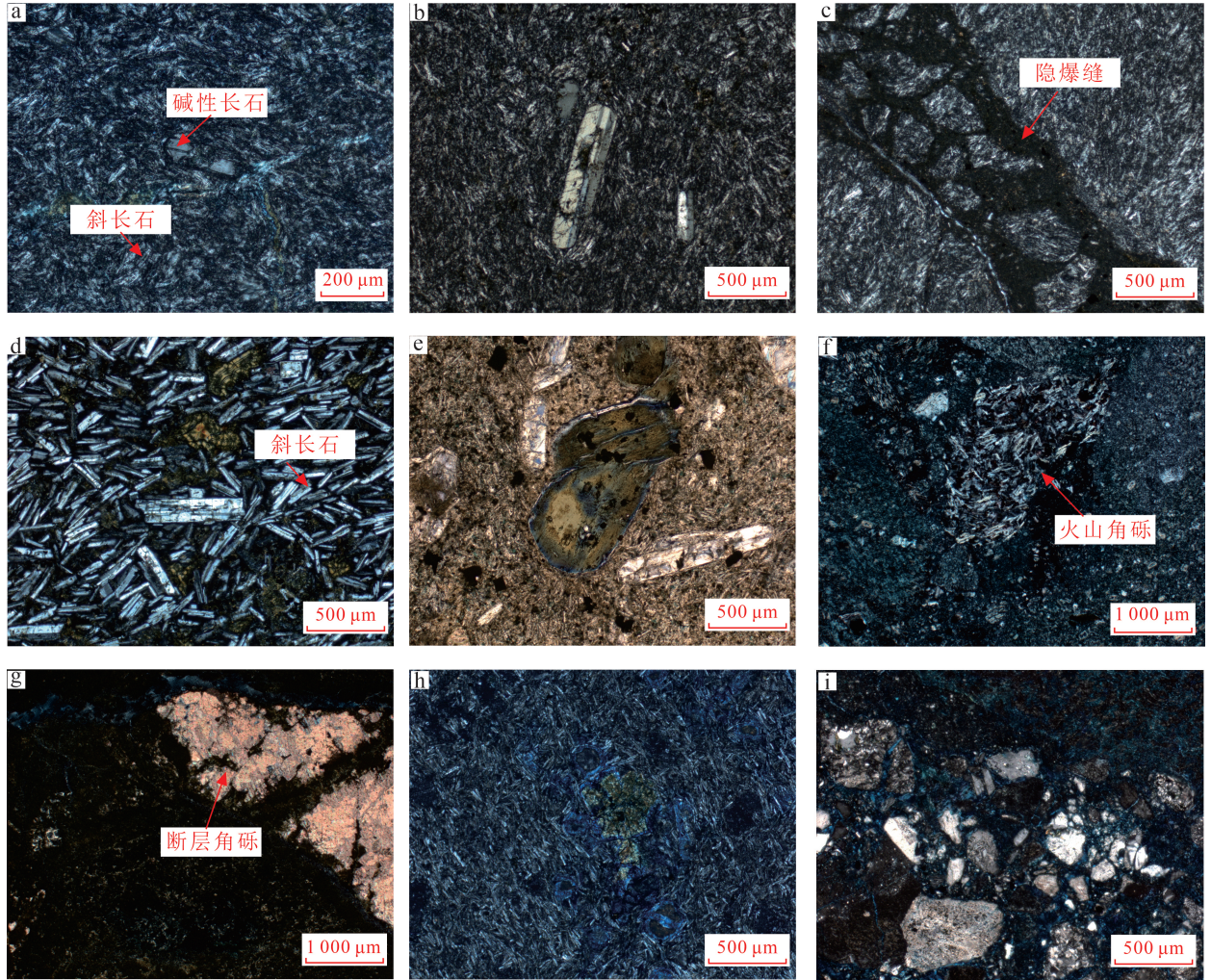


图 1 渤海海域锦州 25-A 区域构造图(a)及地层柱状图(b)

Fig.1 Structure diagram (a) and stratigraphic column diagram (b) of Jinzhou 25-A area, Bohai Sea

结果表明, JZ25 - A 构造区中生界共发育 9 种不同类型的火山岩(图 2)。其中,粗安岩最为发育,体积分数可达到 61%,主要发育在取心段的上部,斑状结构,斑晶体积分数约为 10%,主要为斜长石和碱性



a. 粗安岩(JZ25 - A - a, 1 873.0 m); b. 粗面岩(JZ25 - A - a, 1 821.0 m); c. 粗安质隐爆角砾岩(JZ25 - A - a, 1 835.0 m); d. 玄武岩(JZ25 - A - a, 2 035.0 m); e. 闪长玢岩(JZ25 - A - a, 1 715.0 m); f. 粗安质火山角砾熔岩(JZ25 - A - a, 2 330.0 m); g. 断层角砾岩(JZ25 - A - a, 1 756.5 m); h. 玄武安山岩(JZ25 - A - a, 1 856.0 m); i. 风化砂砾岩(JZ25 - A - a, 1 690.0 m); j. 火山岩岩性分布饼状图; k. 火山岩岩相分布饼状图。

图 2 JZ25 - A 构造区中生界火山岩岩性岩相图

Fig.2 Lithofacies diagram of Mesozoic volcanic rocks in JZ25 - A structure area

长石,其次可见少量辉石和角闪石等暗色矿物,基质主要由长石、辉石和少量石英、火山玻璃组成,为粗面结构(图 2a)。在大段发育的粗安岩中间还发育小段的粗面岩,体积分数达 16%,是研究区发育比例第二的火山岩岩石类型,具有斑状结构,斑晶以碱性长石为主,可见少量的斜长石、辉石和角闪石,基质由微晶碱性长石和少量玻璃质组成(图 2b)。在大段的中酸性熔岩中,还夹有少量的粗安质隐爆角砾岩(5%),岩石呈角砾化,部分角砾可拼合,角砾之间被岩汁填充(图 2c)。此外,取心段的底部还发育玄武岩,本研究区玄武岩广泛发育,但由于其位于深部的早期旋回,钻遇率低,体积分数仅约占 5%,斑状结构,基质间粒或间隐结构,斑晶为斜长石、辉石和橄榄石(图 2d)。以上 4 种岩性占研究区钻遇火山岩总体积分数的 87%,另外 13%的火山岩由闪长玢岩(3%,图 2e)、粗安质火山角砾熔岩(3%,图 2f)、断层角砾岩(3%,图 2g)、玄武安山岩(2%,图 2h)和风化砂砾岩(2%,图 2i)5 种岩性构成(图 2j)。

基于 5 相 15 亚相划分方案,结合现代火山的分类方案,在 JZ25-A 构造区中生界共识别出 4 种岩相(图 2k)6 种亚相。钻井揭示情况表明,研究区中酸性溢流相最为发育,占比 82%,由中酸性岩浆从同一个喷出口一次连续喷发后形成的堆积体凝固结成岩,主要为下部亚相,代表岩性为粗安岩和粗面岩。研究区内基性溢流相占比约为 8%,主要为基性溢流相上部亚相和下部亚相,代表岩性为玄武岩,其中基性溢流相上部亚相气孔带较为发育,基性溢流相下部亚相岩石较为致密。研究区内火山通道相(7%)共发育隐爆角砾岩亚相和次火山岩亚相两种亚相。其中:隐爆角砾岩亚相为含挥发分岩浆侵入先期喷发火山岩中产生地下原位爆炸作用形成,以发育粗安质隐爆角砾岩为主要特征;次火山岩亚相为同期或晚期侵入作用形成,代表岩性为闪长玢岩。研究区内爆发相(3%)主要为热碎屑流亚相,为含挥发分的灼热碎屑、浆屑混合物在自身重力的作用下沿着地表流动形成,代表岩性为粗安质火山角砾熔岩。

### 3 有利储层特征

#### 3.1 储集空间类型

选取研究区钻遇中生界火山岩钻井 JZ25-A-a 井 62 个铸体薄片,对 JZ25-A 构造区中生界火山岩储集空间开展分析。有利储层主要发育在中酸性溢流相的粗安岩和粗面岩以及火山通道相的火山角

砾岩中。储层的储集空间以次生成因为主,基质溶孔、晶内溶孔和裂缝为主要的储集空间(图 3a)。

基质溶孔占比约为 42%(图 3a),为火山岩基质或其细碎屑物质经溶解改造后发育而成,孔隙较小,形态各异,常发育在粗安岩和粗面岩的玻璃基质以及火山角砾岩的细火山碎屑物中。基质溶孔间相互连通可更好地提高储集空间物性(图 3b)。

晶内溶孔占比约为 29%(图 3a),多发育于粗安岩、粗面岩和闪长玢岩中,被溶蚀斑晶矿物以长石、辉石及角闪石为主,大小不等,形状不一,以筛孔状多见(图 3c),偶有斑晶完全溶蚀但仍保留矿物原有轮廓或外形(图 3d)。

裂缝也是研究区有利储集空间之一,占比约为 19%(图 3a),多发育于粗安岩、粗面岩和风化砂砾岩中。研究区裂缝储集空间主要以溶蚀缝为主,早期发育的裂缝充填了方解石等矿物,后期溶蚀形成了部分储集空间。溶蚀缝较宽,裂缝面多被溶蚀成不规则状(图 3e)。

此外,在火山岩顶部的风化砂砾岩中还可以看到粒间孔(10%,图 3a、f),且在少量的玄武安山岩中可见原生气孔发育。

#### 3.2 储层物性特征

选取 JZ25-A 构造区中生界 42 块火山岩岩心和壁心样品开展实测物性分析,结果显示火山岩储层孔隙度为 9.2%~35.2%,平均为 20.3%。从孔隙度的分布区间来看,孔隙度为 5.0%~10.0%的样品数占总样品数的 8.11%,孔隙度为 10.0%~15.0%的样品数占总样品数的 16.22%,孔隙度大于 15%的样品数约占总样品数的 75.67%(图 4a)。储层渗透率为 0.005~0.967 mD,平均为 0.209 mD。从渗透率的分布区间来看,渗透率主要为 0.005~0.200 mD,样品数占总样品数的 58.33%;其次为 0.200~0.400 mD(图 4b),样品数占总样品数的 25%。由此可见,JZ25-A 构造区中生界火山岩大部分储层孔隙度较高,渗透率较低,根据油气储层评价方法(中华人民共和国石油与天然气行业标准 ST/T 6285-2011)中关于火山岩储层孔隙度-渗透率的划分标准,属于高孔-低渗型储层。

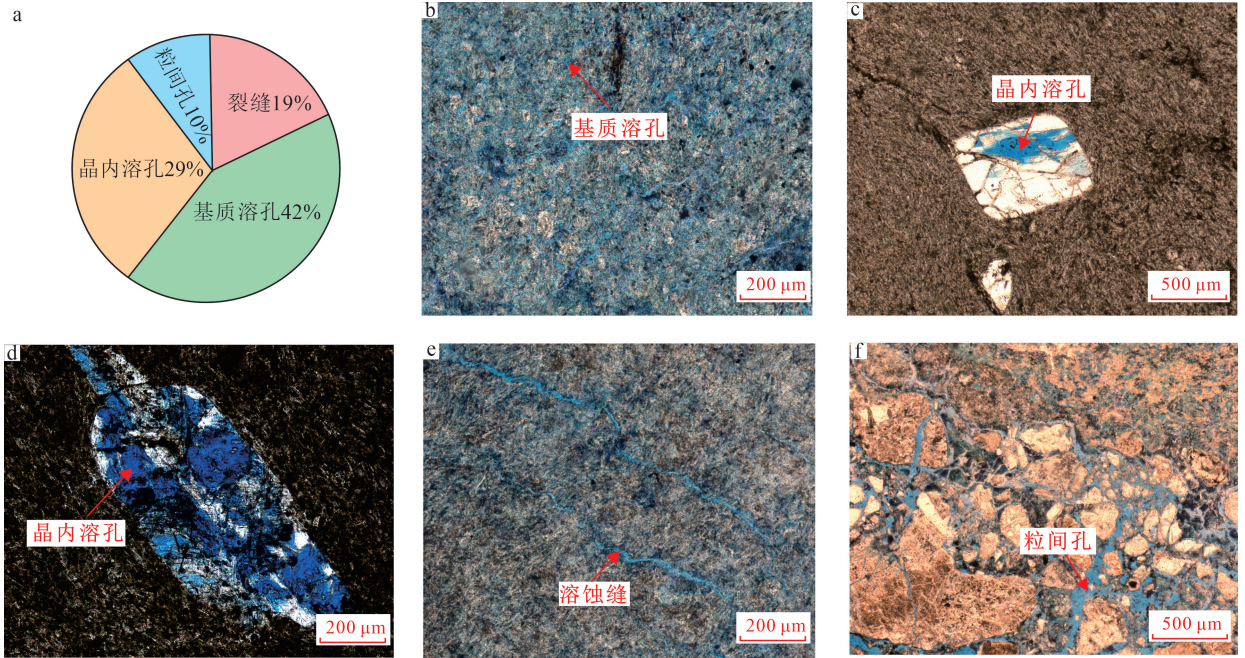
### 4 有利储层成因

#### 4.1 火山岩顶面风化壳

JZ25-A 构造区中生界火山岩形成后,经历了

长时间风化剥蚀,顶部通常发育风化壳。对井壁心、铸体薄片、常规测井和成像测井等数据的研究表明,该区火山构造顶部发育厚层风化壳,纵向上受风化作用改造程度不同,从上至下依次细分为风化砂砾岩带、淋蚀带和崩解带等多个风化单元(图 5,图 6)。风化砂砾岩带孔隙度为 19%~34%,平均为 28%,发育风化砂砾岩和闪长玢岩侵入体(图 5a),其中:

风化砂砾岩的储层物性最好,粒间孔、基质溶孔和溶蚀缝均发育(图 5b、c),测井孔隙度为 26%~34%,平均为 30%;而晚期的闪长玢岩侵入体溶蚀较弱(图 5d),测井孔隙度为 14%~16%,平均为 15%。淋蚀带主要发育粗面岩和粗安岩(图 5a),井壁心和铸体薄片可见大量溶蚀孔和网状溶蚀扩大裂缝(图 5e、f),常规测井电阻率和密度整体较低,形态为



a. 储集空间分布饼状图; b. 基质溶孔(1 691 m); c. 晶内溶孔, 斑晶部分溶蚀(1 874 m); d. 晶内溶孔, 斑晶完全溶蚀(1 706 m); e. 溶蚀缝(1 694 m); f. 粒间孔(1 690 m)。

图 3 JZ25 - A 构造区火山岩储集空间

Fig.3 Reservoir space of volcanic rocks in JZ25 - A structure area

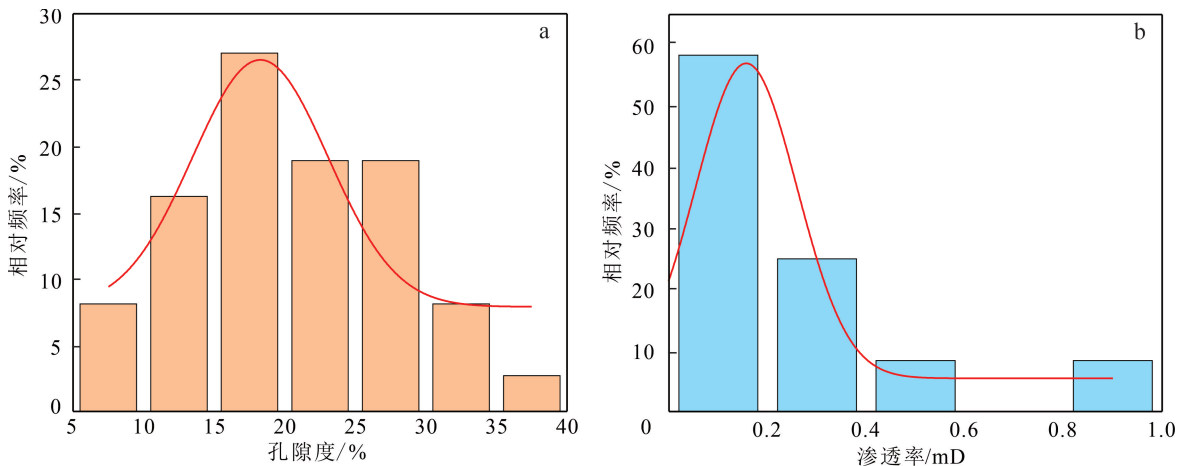
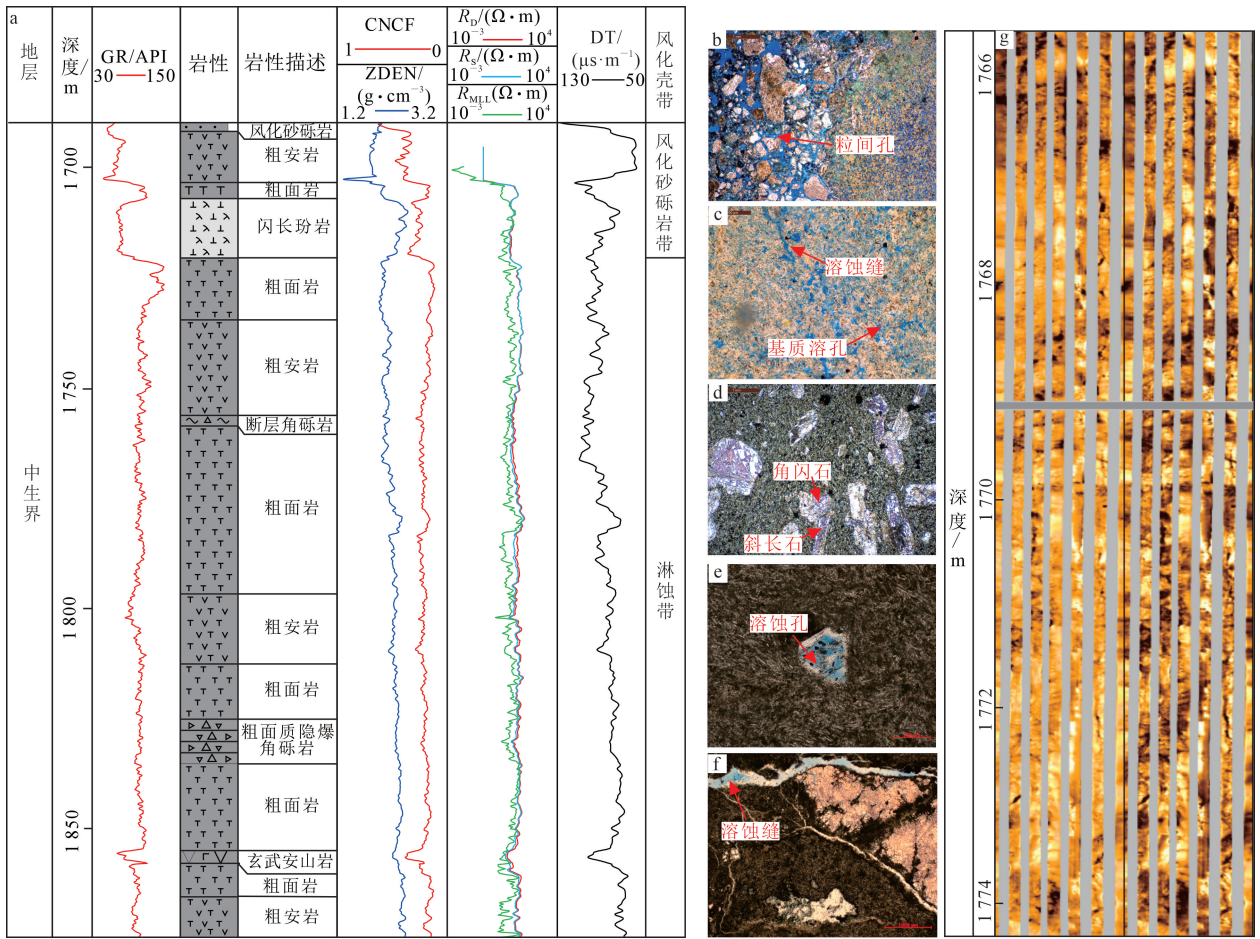


图 4 JZ25 - A 构造区中生界火山岩物性直方图

Fig.4 Physical property histogram of Mesozoic volcanic rocks in JZ25 - A structure area



a. 风化砂砾岩带和淋蚀带柱状图; b. 风化砂砾岩带粒间孔(1 690 m); c. 风化砂砾岩带基质溶孔和裂缝(1 693 m); d. 风化砂砾岩带闪长玢岩(1 710 m); e. 淋蚀带晶内溶孔(1 739 m); f. 淋蚀带溶蚀缝(1 756 m); g. 淋蚀带成像测井。GR. 自然伽马; CNCF. 中子伽马; ZDEN. 密度;  $R_D$ . 深侧向电阻率;  $R_S$ . 浅侧向电阻率;  $R_{MLL}$ . 微侧向电阻率; DT. 声波时差。

图 5 JZ25 - A 构造区中生界火山岩风化砂砾岩带和淋蚀带储层特征

Fig.5 Reservoir characteristics of Mesozoic volcanic rock wind-sand conglomerate belt and leached belt in JZ25 - A structure area

中低幅度齿状(图 5a), 成像测井图像暗色低阻孔洞发育(图 5g), 储层在垂向上连续发育, 以斑晶、基质溶孔和溶蚀裂缝为主, 从上向下孔隙度呈逐渐减小的趋势, 测井孔隙度为 16%~35%, 平均为 26%。

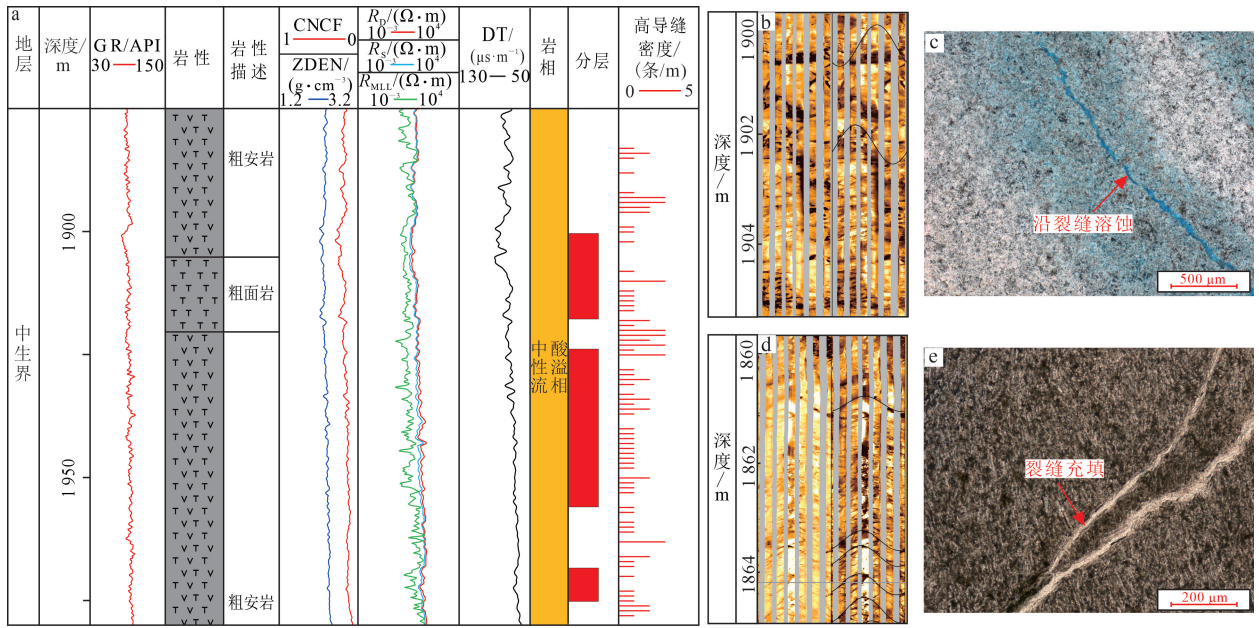
崩解带测井孔隙度为 10%~29%, 平均为 16%, 常规测井电阻率升高(图 6a), 风化裂缝较为发育, 但溶蚀孔隙减少, 仅在裂缝附近发育溶蚀孔隙。储层垂向上断续发育, 有利储层的分布与断裂带密切相关, 断裂破碎带附近溶蚀作用强, 储层发育(图 6b、c); 非破碎带附近岩石致密, 溶蚀作用弱, 储层发育程度较差, 成像测井图像较亮, 溶蚀孔隙少见(图 6d、e)。

总体来说, 火山岩体顶部厚层风化壳风化溶蚀作用强烈, 储集空间物性好, 是研究区火山岩主要的

有利储层发育段。

#### 4.2 喷发单元间小型风化壳

JZ25 - A 构造区除了在火山岩体顶部发育厚层风化壳外, 在母岩带中还发育内幕储层(图 7)。构造区火山岩由裂隙式喷发形成, 喷发单元多, 单层厚度小, 岩浆贫挥发分, 单元顶部气孔带通常不发育, 纵向上单元多但岩性变化弱, 单元间发育玄武岩夹层(图 7a、b)。由于火山岩具有多期喷发的特点, 通常一个期次为底部基性玄武岩-顶部中酸性熔岩, 不同期次火山岩之间往往存在几百万年的喷发间断, 但在喷发间歇期内, 喷发单元的顶部接受风化作用, 仍会形成风化壳内部数个垂向分布的高孔渗储层发育带, 厚度通常较薄, 即喷发单元间的小型次级风化壳。喷发单元界面在常规测井上表现为自然伽马和



a. 崩解带柱状图; b. 崩解带裂缝发育区成像测井; c. 崩解带裂缝基质和溶孔(1 886 m); d. 崩解带裂缝不发育区成像测井; e. 粗安岩, 储集空间不发育(1 860 m)。

图 6 JZ25 - A 构造区中生界火山岩崩解带储层特征

Fig.6 Reservoir characteristics of Mesozoic volcanic rock disintegration zone in JZ25 - A structure area

电阻率突变的特征,界面以上为玄武岩,自然伽马值较低,电阻率较低,界面以下为以粗安岩为主的单元顶部次级风化壳,自然伽马较高,电阻率较高(图 7a);同时,成像测井则表现为明显的不整合面特征(图 7c),界面以上较为致密,溶蚀孔和裂缝较少,界面以下可见溶蚀发育。次级风化壳内储层发育与裂缝有关,通过铸体薄片观察可见储集空间主要为沿裂缝周围溶蚀扩大形成的基质溶蚀孔(图 7d、e),成像测井上裂缝较少(图 7c),以溶蚀为主;局部可见以裂缝为主要储集空间(图 7f),成像测井上图像杂乱,破碎严重(图 7g)。

### 4.3 构造裂缝

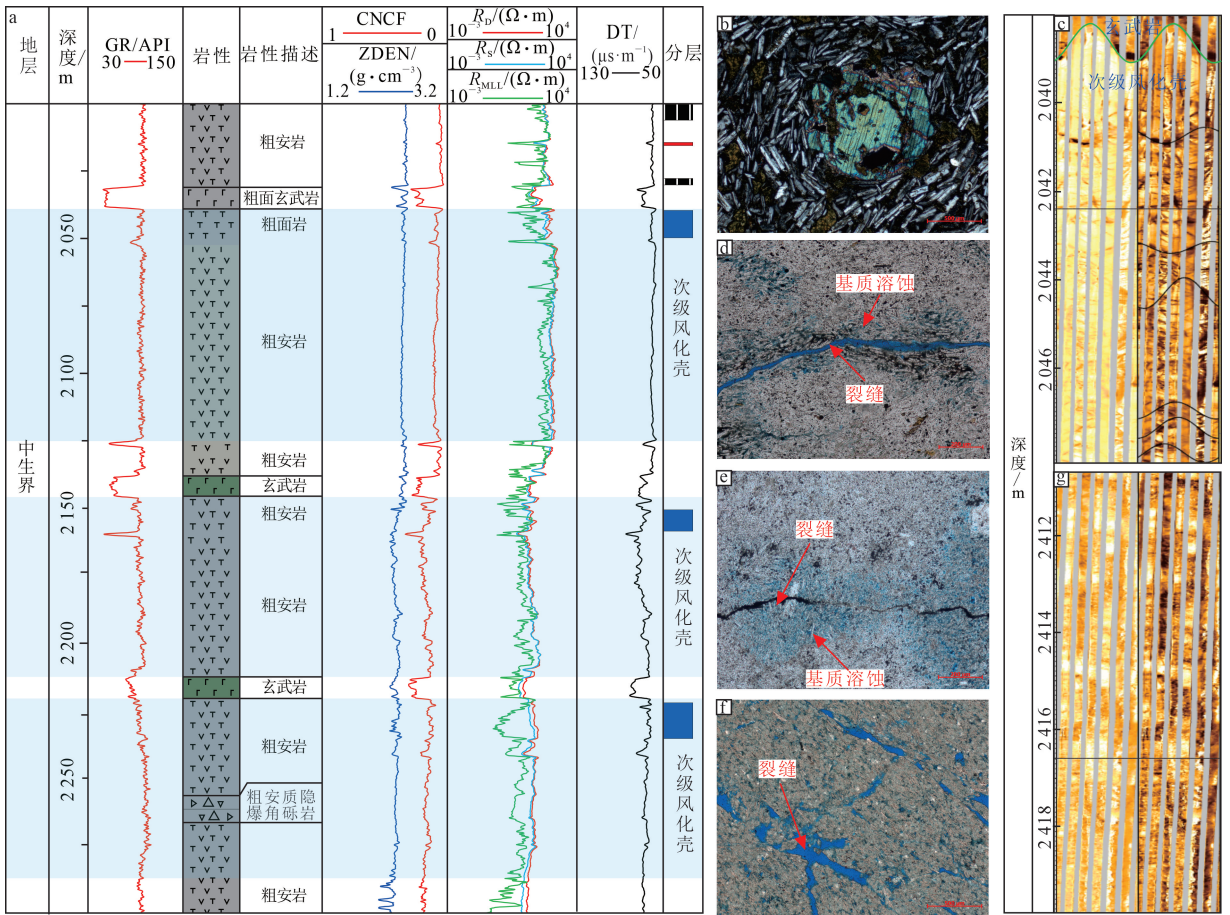
在火山岩储层形成过程中,构造起着必不可少的作用。渤海湾盆地中生界火山岩发育之后,由于燕山晚期古太平洋板块的俯冲,在区域上经历了北西西向较强的挤压,北北东向走滑断裂发育。在走滑断裂及伴生断裂周围常发育大量的构造破碎带及裂缝,为暴露阶段风化流体、埋藏阶段有机酸以及其他流体向火山岩中的运移创造有利条件,使得喷溢相下亚相带块状熔岩和其他成储效率低的火山岩同样可以形成有效储层。

根据对铸体薄片的大量观察及面孔率的分析,发现裂缝和溶蚀孔隙之间存在协同演化关系,裂缝

愈发育处溶蚀孔隙相应愈发育。构造裂缝除提供一定数量的火山岩储集空间外,也使流体和火山岩之间的接触面积增大,更为重要的是使储层渗透性增强,并且提供更多渗流通道从而促使溶蚀作用发生,造成大范围溶蚀孔隙的生成。裂缝数据表明,JZ25 - A 构造区火山岩有效裂缝方向主要为 NEE - SWW 和 NS 向,高导缝密度较高,倾角大多集中于 40°~80°之间(图 8)。铸体薄片观察发现,研究区火山岩母岩段中裂缝发育带附近往往溶蚀孔隙较为发育。JZ25 - A 构造区正是由于断裂改造作用,不仅在火山岩体顶部发育厚层风化壳型储层,且在风化壳之下的母岩也发育了小型薄层次级风化壳,形成了三段有效火山岩内幕储层,有效地扩大了 JZ25 - A 构造区火山岩储层垂向发育厚度。

### 5 成储模式

通过对 JZ25 - A 构造区中生界火山岩岩性、岩相和储层特征的分析,总结了火山岩优质储层发育条件和成储机制,建立了“以风化作用为主控,火山岩顶部发育厚层风化壳储层,喷发单元顶部发育次级薄层风化壳内幕储层”的火山岩规模型储层发育模式(图 9,图 10)。研究表明,在纵向上,JZ25 - A 构造区中生界优质火山岩储层更易于发育在中生界顶



a. 喷发单元间小型风化壳柱状图; b. 喷发单元间玄武岩(2 035 m); c. 喷发单元间小型风化壳裂缝较少区成像测井; d. 粗面岩, 沿裂缝向周围基质溶蚀(2 046 m); e. 粗安岩, 沿裂缝向周围基质溶蚀(2 154 m); f. 粗安岩, 裂缝为主要聚集空间(2 417 m); g. 喷发单元间小型风化壳裂缝区成像测井。

图 7 JZ25 - A 构造区中生界火山岩小型次级风化壳储层特征

Fig.7 Characteristics of Mesozoic volcanic small secondary weathering crust reservoir in JZ25 - A structure area

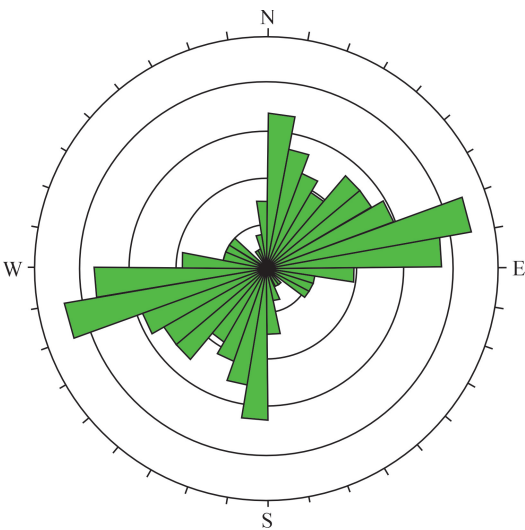


图 8 JZ25 - A 构造区玫瑰花图

Fig.8 Rose map of JZ25 - A structure area

部不整合面附近,顶部风化壳厚度普遍较大,风化作用促进了风化壳范围内溢流相下部亚相粗安岩和安山岩等具有较高成储效率的火山岩形成大量溶蚀孔-缝,改善了储层物性,是风化壳中有利储层形成的关键;由于火山岩常呈现多期次喷发的特性,不同喷发期间常存在数百万年的间隔,尽管这些间隔远小于火山岩顶面的长期风化,但火山岩仍会受到风化改造作用的影响,再加上构造作用的控制,使得风化壳下部块状熔岩物性得到改善,在喷发单元的顶部形成了裂缝和溶蚀孔隙发育带,构成了喷发单元间的次级风化壳。以上以风化作用为主控因素,在火山岩体顶部发育厚层风化壳,风化壳下部喷发单元间发育次级薄层风化壳储层的火山岩成储模式,形成了JZ25 - A构造区中生界火山岩风化壳-内幕双层储层结构。

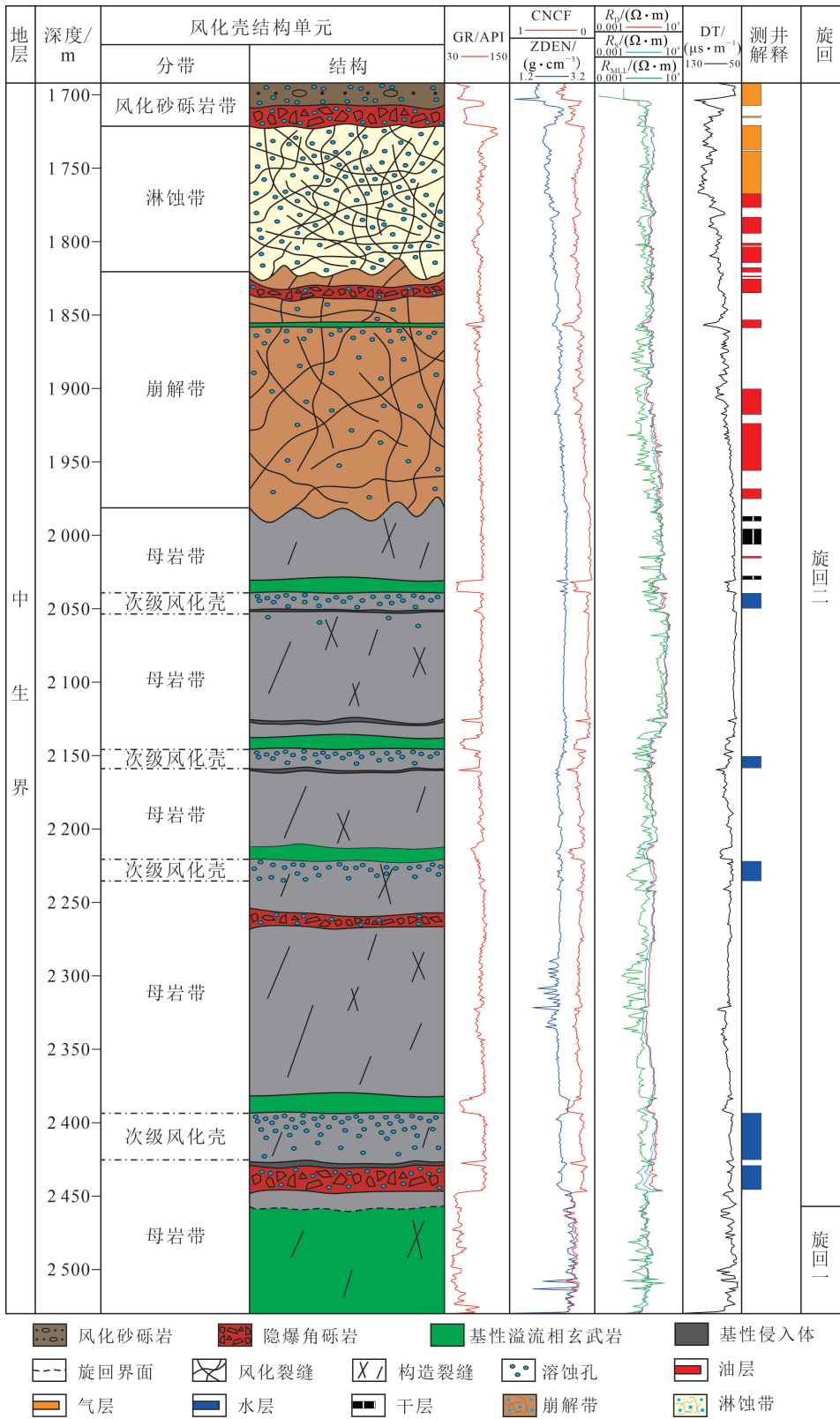
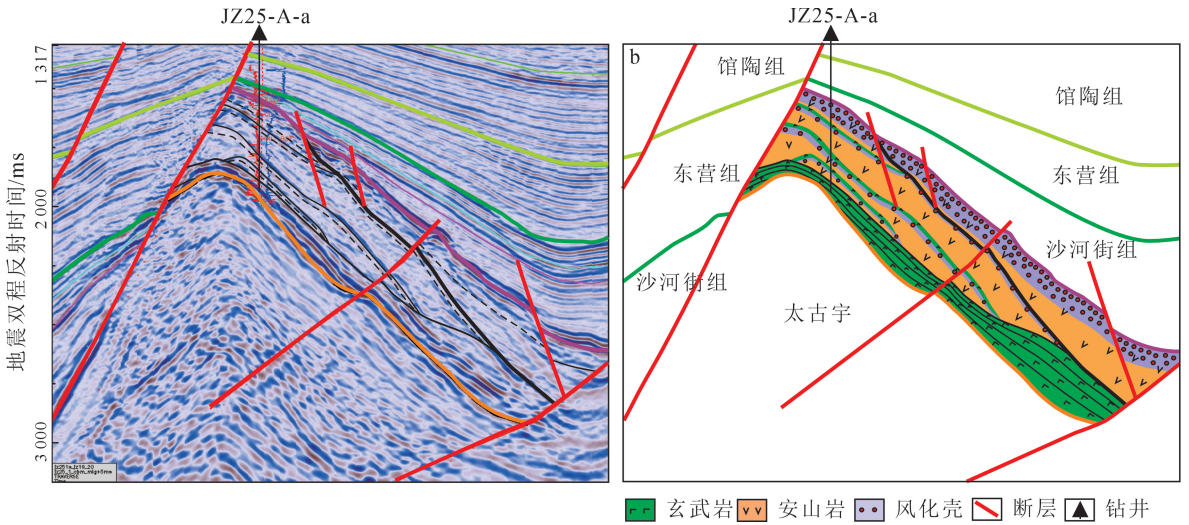


图 9 JZ25 - A 构造区风化壳结构单元图

Fig.9 Structural unit diagram of weathering crust in JZ25 - A structure area



a. 典型地震剖面图; b. 储层发育模式图。

图 10 JZ25 - A 构造区储层发育模式

Fig.10 Reservoir development model of JZ25 - A structure area

## 6 结论

1) JZ25 - A 构造区共发育粗安岩、安山岩、玄武岩、闪长玢岩、粗安质火山角砾熔岩、断层角砾岩、安山岩和风化砂砾岩共 8 种火山岩以及中酸性溢流相、基性溢流相、火山通道相和爆发相 4 种岩相 6 种亚相。

2) 有利储层主要发育在中酸性溢流相的粗安岩和粗面岩以及火山通道相的火山角砾岩中, 储层的储集空间以次生成因为主, 基质溶孔和晶内溶孔为主要的储集空间, 也可见一些裂缝, 属于高孔-低渗型储层。

3) 火山岩体顶面经过长时间风化剥蚀顶部常发育厚层风化壳, 同时在母岩带中还发育有喷发单元间次级风化壳的内幕储层, 有效裂缝方向主要为 NEE - SWW 和 NS 向, 为上述风化作用形成有利储层创造良好条件。

4) 建立了“以风化作用为主控, 火山岩顶部发育厚层风化壳储层, 喷发单元顶部发育次级薄层风化壳内幕储层”的火山岩规模型储层发育模式。

### 参考文献 (References):

[1] 吴西顺, 孙张涛, 杨添天, 等. 全球非常规油气勘探开发进展及资源潜力[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(4): 1 - 17.  
Wu Xishun, Sun Zhangtao, Yang Tiantian, et al. Global Unconventional Oil and Gas Exploration and Development Progress and Resource Potential [J].

Marine Geology Frontiers, 2020, 36(4): 1 - 17.  
[2] 孟凡超, 周立宏, 魏嘉怡, 等. 渤海湾盆地黄骅坳陷潜山中生界火山岩储层特征及成储机制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(3): 859 - 875.  
Meng Fanchao, Zhou Lihong, Wei Jiayi, et al. Reservoir Characteristics and Reservoir Formation Mechanism of Mesozoic Volcanic Rocks in Buried Hills of Huanghua Depression, Bohai Bay Basin [J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2021, 52(3): 859 - 875.  
[3] 邹才能. 非常规油气地质[M]. 北京: 地质出版社, 2011.  
Zou Caineng. Unconventional Oil and Gas Geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011.  
[4] 唐华凤, 王璞珺, 边伟华, 等. 火山岩储层地质研究回顾[J]. 石油学报, 2020, 41(12): 1744 - 1773.  
Tang Huafeng, Wang Pujun, Bian Weihua, et al. Review of Volcanic Rock Reservoir Geology [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(12): 1744 - 1773.  
[5] 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 Depression [J]. China Offshore Oil and Gas, 2021, 33(3): 48 - 57.  
[6] 李瑞磊, 杨立英, 朱建峰, 等. 松辽盆地南部断陷层火山岩储层特征及油气成藏主控因素[J]. 地学前沿, 2023, 30(4): 100 - 111.

- Li Ruilei, Yang Liying, Zhu Jianfeng, et al. Characteristics of Volcanic Reservoirs and Main Controlling Factors of Hydrocarbon Accumulation in Fault Depression of Southern Songliao Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30(4): 100 - 111.
- [7] 单玄龙, 牟汉生, 刘玉虎, 等. 湖盆水下喷发火山岩相类型、特征与储集意义: 以松辽盆地南部查干花地区白垩系为例[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(4): 719 - 730.
- Shan Xuanlong, Mou Hansheng, Liu Yuhu, et al. Facies Types, Characteristics and Reservoir Significance of Underwater Eruptive Volcanic Rocks in Lake Basin: A Case Study of Cretaceous in Chaganhua Area, Southern Songliao Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(4): 719 - 730.
- [8] 文龙, 李亚, 易海永, 等. 四川盆地二叠系火山岩岩相与储层特征[J]. *天然气工业*, 2019, 39(2): 17 - 27.
- Wen Long, Li Ya, Yi Haiyong, et al. Lithofacies and Reservoir Characteristics of Permian Volcanic Rocks in the Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(2): 17 - 27.
- [9] 何辉, 孔垂显, 蒋庆平, 等. 准噶尔盆地西北缘二叠系火山岩储层裂缝发育特征及分布预测: 以金龙2井区佳木河组为例[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2015, 45(5): 1278 - 1288.
- He Hui, Kong Chuixian, Jiang Qingping, et al. Fracture Development Characteristics and Distribution Prediction of Permian Volcanic Reservoir in Northwest Margin of Junggar Basin: A Case Study of Jiamuhe Formation in Jinlong 2 Well Area [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2015, 45(5): 1278 - 1288.
- [10] 汤良杰, 黄太柱, 邱海峻, 等. 塔里木盆地塔河地区海西晚期火山岩构造特征与油气成藏[J]. *地质学报*, 2012, 86(8): 1188 - 1197.
- Tang Liangjie, Huang Taizhu, Qiu Haijun, et al. Tectonic Characteristics and Hydrocarbon Accumulation of Late Hercynian Volcanic Rocks in Tahe Area, Tarim Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(8): 1188 - 1197.
- [11] 金春爽, 乔德武, 谈伟宁. 渤海湾盆地中、新生代火山岩分布及油气藏特征[J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(1): 19 - 29, 36.
- Jin Chunshuang, Qiao Dewu, Tan Weining. Distribution and Hydrocarbon Reservoir Characteristics of Meso-Cenozoic Volcanic Rocks in Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(1): 19 - 29, 36.
- [12] 陈欣, 郭玲莉, 陶圩, 等. 渤中凹陷中生界火山岩储层裂隙发育程度实验研究: 以安山岩为例[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2024, 44(1): 130 - 142.
- Chen Xin, Guo Lingli, Tao Wei, et al. Experimental Study on Fracture Development Degree of Mesozoic Volcanic Rock Reservoir in Bozhong Depression: A Case Study of Andesite [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2024, 44(1): 130 - 142.
- [13] 王晨杰, 张新涛, 徐春强, 等. 渤中凹陷428构造中生界火山岩优质储层主控因素[J]. *海洋地质前沿*, 2022, 38(2): 69 - 75.
- Wang Chenjie, Zhang Xintao, Xu Chunqiang, et al. Main Controlling Factors of High Quality Mesozoic Volcanic Rock Reservoir of 428 Structure in Bozhong Sag [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2022, 38(2): 69 - 75.
- [14] 徐春强, 张新涛, 王晨杰, 等. 渤中凹陷中生界火山岩特征及优质储层控制因素[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2022, 52(4): 1027 - 1036.
- Xu Chunqiang, Zhang Xintao, Wang Chenjie, et al. Characteristics of Mesozoic Volcanic Rocks and Controlling Factors of High-Quality Reservoirs in Bozhong Depression [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2022, 52(4): 1027 - 1036.
- [15] 黄胜兵, 刘丽芳, 陈少平, 等. 渤东低凸起南段中生界火山岩潜山优质储层形成控制因素及综合预测[J]. *中国海上油气*, 2021, 33(2): 26 - 35.
- Huang Shengbing, Liu Lifang, Chen Shaoping, et al. Controlling Factors and Comprehensive Prediction of High Quality Reservoir Formation of Mesozoic Volcanic Buried Hill in Southern Bodong Low Uplift [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2021, 33(2): 26 - 35.
- [16] 郭颖, 王粤川, 韦阿娟, 等. 潜山内幕火山岩储层特征及控制因素: 以渤海海域秦皇岛30A地区白垩系为例[J]. *沉积学报*, 2017, 35(2): 343 - 357.
- Guo Ying, Wang Yuechuan, Wei Ajuan, et al. Reservoir Characteristics and Controlling Factors of Volcanic Rocks in Buried Hills: A Case Study of Cretaceous in Qinhuangdao 30A Area, Bohai Sea [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(2): 343 - 357.
- [17] 林伶, 李洪香, 杨朋. 风化店中生界火山岩储层特征与油气成藏模式[J]. *地质学刊*, 2017, 41(2): 224 - 229.
- Lin Ling, Li Hongxiang, Yang Peng. Reservoir Characteristics and Hydrocarbon Accumulation Model of Mesozoic Volcanic Rocks in Fenghuadian [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 41(2): 224 - 229.
- [18] 曲长胜, 邱隆伟, 李文涛, 等. 渤海湾盆地滩北凹陷孔三段中基性火山岩储层特征及控制因素[J]. *吉林大*

- 学学报(地球科学版),2016,46(5):1284-1296.
- Qu Changsheng, Qiu Longwei, Li Wentao, et al. Characteristics and Controlling Factors of the Intermediate and Mafic Volcanic Reservoirs of the Paleogene Kongdian Formation in the Weibei Sag of the Bohaiwan Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2016, 46(5): 1284-1296.
- [19] 田世峰,高长海,查明.渤海湾盆地冀中拗陷潜山内幕油气成藏特征[J].石油实验地质,2012,34(3):272-276.
- Tian Shifeng, Gao Changhai, Zha Ming. Reservoir-Forming Characteristics of Inner Buried Hills in Jizhong Depression, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(3): 272-276.
- [20] 周家雄,徐春强,黄志,等.渤海湾盆地渤中凹陷 BZ8-3S 大型构造规模型火山岩储层形成条件[J/OL]. 地球科学. [2024-09-12]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1874.P.20240412.1549.002>.
- Zhou Jiexiong, Xu Chunqiang, Huang Zhi, et al. Formation Conditions of BZ8-3S Large Structural Model Volcanic Rock Reservoir in Bozhong Sag, Bohai Bay Basin [J/OL]. Earth Science. [2024-09-12]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1874.P.20240412.1549.002>.
- [21] 吕丁友,杨明慧,周心怀,等.辽东湾拗陷辽西低凸起潜山构造特征与油气聚集[J].石油与天然气地质,2009,30(4):490-496.
- Lü Dingyou, Yang Minghui, Zhou Xinhui, et al. Structural Characteristics and Oil and Gas Accumulation of Buried Hill with Low Uplift in Liaoxi, Liaodong Bay Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(4): 490-496.
- [22] 胥伟,王洁,张志鹏,等.辽西低凸起 JZ20-2 中生界火山岩储层特征及主控因素分析[J].中文科技期刊数据库(全文版)自然科学,2018(7):19-21.
- Xu Wei, Wang Jie, Zhang Zhipeng, et al. Reservoir Characteristics and Main Controlling Factors of Mesozoic Volcanic Rock JZ20-2 in the Liaoxi Low Uplift [J]. Chinese Journal of Natural Sciences, 2018 (7): 19-21.
- [23] 刘宝鸿,张斌,郭强,等.辽河拗陷东部凹陷深层火山岩气藏的发现与勘探启示[J].中国石油勘探,2020,25(3):33-43.
- Liu Baohong, Zhang Bin, Guo Qiang, et al. Discovery and Exploration Implications of Deep Volcanic Gas Reservoirs in the Eastern Depression of Liaohe Depression [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(3): 33-43.
- [24] 滕长宇,邹华耀,郝芳.渤海湾盆地构造差异演化与油气差异富集[J].中国科学:地球科学,2014,44(4):579-590.
- Teng Changyu, Zou Huayao, Hao Fang. Tectonic Differential Evolution and Petroleum Differential Enrichment in Bohai Bay Basin [J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44(4): 579-590.
- [25] 徐守余,严科.渤海湾盆地构造体系与油气分布[J].地质力学学报,2005,11(3):259-265.
- Xu Shouyu, Yan Ke. Tectonic System and Oil and Gas Distribution in Bohai Bay Basin [J]. Chinese Journal of Geomechanics, 2005, 11(3): 259-265.
- [26] 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(增刊1):199-207.
- Qi Jiafu, Yu Fusheng, Lu Kezheng, et al. Conspectus on Mesozoic Basins in Bohai Bay Province [J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10 (Sup. 1): 199-207.
- [27] 叶涛,韦阿娟,曾金昌,等.渤海湾盆地中生代构造差异演化与潜山油气差异富集[J].地质科学,2019,54(4):1135-1154.
- Ye Tao, Wei Ajuan, Zeng Jinchang, et al. Mesozoic Tectonic Differential Evolution and Differential Accumulation of Buried-Hill Oil and Gas in Bohai Bay Basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2019, 54(4): 1135-1154.
- [28] 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):845-850.
- Hou Guiting, Qian Xianglin, Cai Dongsheng. The Tectonic Evolution of Bohai Basin in Mesozoic and Cenozoic Time [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis, 2001, 37(6): 845-850.
- [29] 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.
- [30] 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.
- Shan Xuanlong, Wang Wei, Zhang Xintao, et al. Geological Model and Construction Process of Mesozoic Volcanic Mechanism in Bozhong Depression, Bohai Sea [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 675-688.