任梦怡,范洪军,陆国超,等.渤海莱州湾凹陷南斜坡中生界火山岩储层特征和控制因素.吉林大学学报(地球科学版),2025,55(1):15-30.doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230160.

Ren Mengyi, Fan Hongjun, Lu Guochao, et al. Characteristics and Controlling Factors of Mesozoic Volcanic Rock Reservoir in Southern Slope of Laizhou Bay Depression, Bohai Bay Basin. Journal of Jilin University(Earth Science Edition),2025,55(1):15-30. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230160.

渤海莱州湾凹陷南斜坡中生界火山岩储层特征和控制因素

任梦怡[1],范洪军[1],陆国超[2],柏佳伟[2],唐华风[2]

1.中海油研究总院有限责任公司,北京 100028

2.吉林大学地球科学学院,长春 130061

摘要:基于岩心和铸体薄片,采用镜下鉴定、扫描电镜分析、孔渗测试、恒速压汞测试、图像分析、埋藏史分析等方法,开展渤海莱州湾凹陷南斜坡垦利16构造中生界火山岩储层特征、主控因素和储层演化研究。结果表明:识别出7类16型储集空间,储层类型为裂缝-孔隙型,具有大孔径、中—粗喉的特征,属于优质火山岩储层;储层受岩性岩相、溶蚀作用和构造作用控制,与埋深关系不明显;储层物性由好到差的顺序为凝灰岩、火山角砾岩、火山集块岩、角砾熔岩、沉火山角砾岩、凝灰熔岩、安山岩和英安岩。流体对长石斑晶和基质的溶蚀溶解作用形成的孔隙贡献较大,表明埋藏前风化和埋藏流体溶蚀阶段是储层形成的重要时期;杏仁体内孔、粒间孔、炸裂缝、宏观和微观龟裂缝、隐爆缝形成于喷发同期,对孔隙贡献率有限。火山碎屑熔岩和熔岩的构造裂缝主要形成于埋藏前阶段白垩纪郯庐断裂带左行走滑应力场和沙河街期的拉张环境,火山碎屑岩的构造裂缝主要形成于埋藏后阶段的郯庐断裂带右行走滑应力场和沙河街期的拉张环境。综上可知,在埋藏浅的地区经受强构造改造和风化作用的火山碎屑岩是勘探的有利目标。

关键词:火山岩储层;主控因素;流体;孔隙演化;中生界;莱州湾凹陷;渤海湾盆地

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230160 **中图分类号**:P618.13;P588.14 **文献标志码**:A

Characteristics and Controlling Factors of Mesozoic Volcanic Rock Reservoir in Southern Slope of Laizhou Bay Depression, Bohai Bay Basin

Ren Mengyi[1], Fan Hongjun[1], Lu Guochao[2], Bai Jiawei[2], Tang Huafeng[2]

1. *CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing* 100028, *China*

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

收稿日期:2023-11-28

作者简介:任梦怡(1991—),女,工程师,博士,主要从事油气田地质与开发方面的研究,E-mail:renmy4@coori.com.cn

通信作者:唐华风(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事火山岩储层和火山地层方面的研究,E-mail:tanghfhc@jlu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(41790453);国家科技重大专项(2016ZX05026-004-001)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (41790453) and the National Science and Technology Major Project of China (2016ZX05026-004-001)

Abstract: Based on core and cast thin section data, the reservoir characteristics, reservoir controlling factors, and reservoir evolution of Mesozoic volcanic rocks in block Kenli-16 were studied by means of microscopic identification, scanning electron microscopy, porosity and permeability testing, constant velocity mercury injection, image analysis and burial history analysis. Seven types of 16 reservoir spaces are identified in block Kenli-16. The reservoir type is pore-fracture type. It is characterized by large pore size and medium-big throat, and belongs to high-quality volcanic rock reservoir. The reservoir is controlled by lithology, dissolution diagenesis, and tectonism and has no obvious relationship with burial depth. The descending order of reservoir quality is tuff, lapilli, volcanic breccia, welded breccia, reworked volcaniclastics, ignimbrite, andesite, and dacite. The fluid contributes greatly to the porosity formed by the dissolution of feldspar porphyry and matrix, the results show that pre-burial weathering and burial fluid dissolution are important stages of reservoir formation. The amygdaloid, intergranular pores, explosive cracks, macroscopic and microscopic cooling fractures, and crypto-explosive fractures were generated during syn-eruption stage, and their contribution rate to pores was limited. The tectonic fractures of pyroclastic lava and lava are mainly formed in the pre-burial stage, the left-lateral strike-slip stress field of Tanlu fault zone in Cretaceous period and the extensional environment of Shahejie stage. The tectonic fractures of pyroclastic rocks are mainly formed in the post-burial stage, the right-lateral strike-slip stress field of Tanlu fault zone in Cretaceous period and the extensional environment of Shahejie stage. In conclusion, pyroclastic rocks that are subjected to strong structural transformation and weathering in shallow buried areas are favorable targets for exploration.

Key words: volcanic reservoirs; main controlling factors; fluid; pore evolution; Mesozoic; Laizhou Bay depression; Bohai Bay basin

0 引言

火山岩油气藏广泛分布于全球各油气盆地中[1-2],在我国探明储量约6亿t油和5 800亿m^3天然气[3],展示出了我国火山岩油气藏良好的勘探潜力。近年来渤海湾盆地海域发现了大量中生界火山岩油气藏[4],成为火山岩勘探的热点区域,火山岩储层研究也受到广泛的关注。渤海湾盆地中生界火山岩储层有风化淋滤型、埋藏溶蚀型和原生气孔型3种[5]。储层分布受岩相、火山机构和断裂等因素控制。研究表明:中酸性溢流相储层较基性溢流相好[6],原因为基性溢流相原生孔隙后期多被充填,使得储集能力变差[7];如果爆发相原生孔隙保存较好,叠加溶蚀孔隙发育,可以形成好储层[7-8];近火山口区域储层物性好于远火山口地区[9]。储层的成因主要是挥发分逸出、脱玻化作用、断裂活动和风化作用等[4-5,9],部分区域的隐爆作用也较为明显[10]。喷发期的火山作用是原生孔隙的控制因素,构造运动和风化淋滤是次生孔隙的控制因素,可以显著改善储集性和渗透性[11]。断裂带和火山通道区域的裂缝发育,同时存在热液充填的情况,使得局部区域的储层变差[12]。上述研究成果为渤海湾盆地中生界火山岩潜山勘探靶区优选指出方向,重点考虑岩性岩相、火山机构相带、成岩作用和区域构造运动强度等因素[4,6]。

火山储层主控因素的确定对于勘探方向具有重要指示作用[13]。火山岩油气藏的岩性组成复杂、成岩作用多样和孔隙演化过程复杂,对主控因素的确定增加了困难,常常缺少定量分析。针对储层主控因素量化分析的难题,本文以渤海莱州湾的垦利16构造中生界火山岩为例,开展了储集空间构成的量化刻画,分析了区域构造应力与构造裂缝对应关系,量化分析了岩相、溶蚀作用、构造作用对储层发育的影响程度,讨论了火山岩各演化阶段对储层的影响,以期明确优质火山储层的控制因素和分布规律,为该区火山岩勘探开发提供技术支撑。

1 地质概况

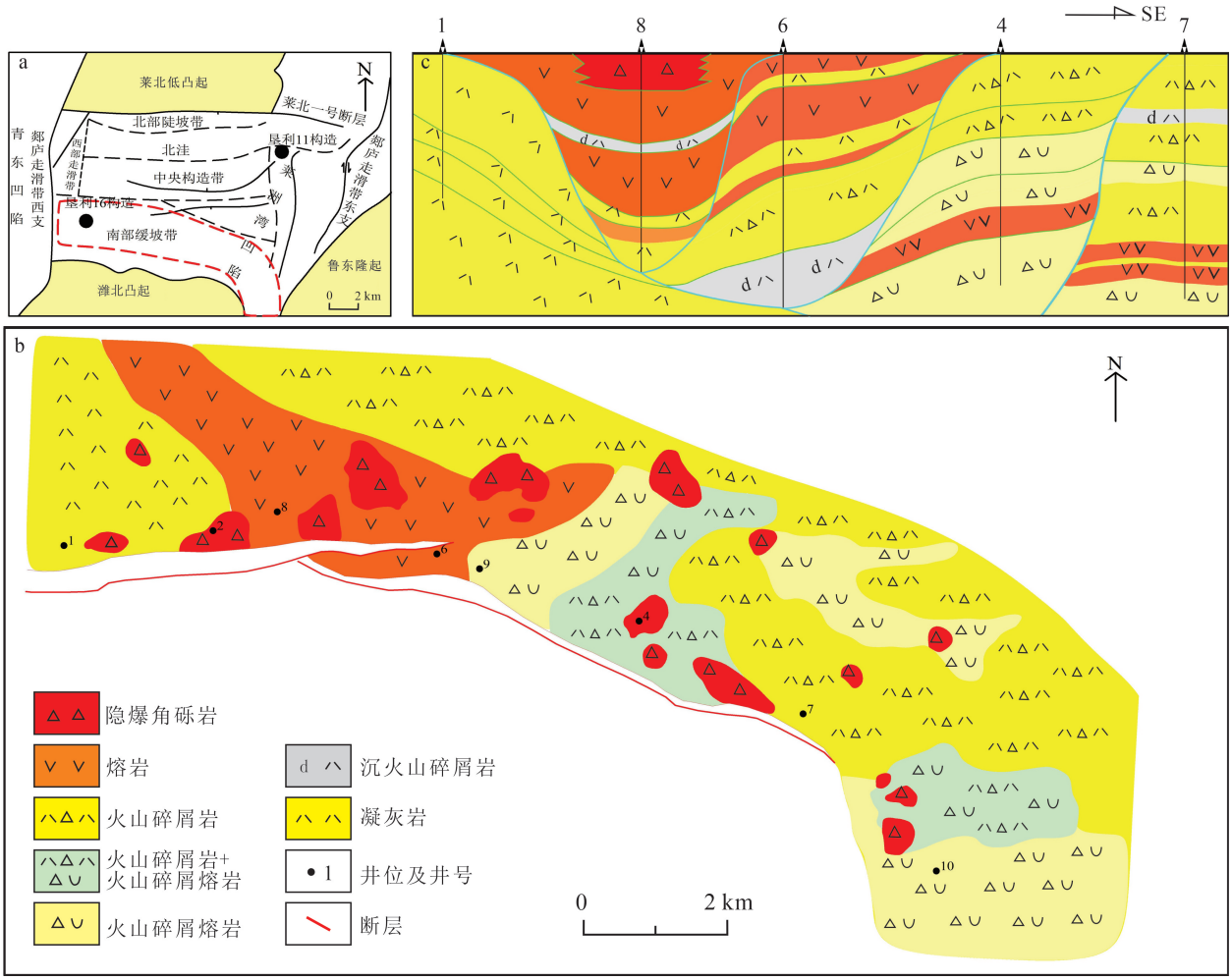
莱州湾凹陷位于渤海海域东南部,其东邻鲁东隆起区,西接青东凹陷,南依潍北凸起,北靠莱北低凸起,东西两侧分别以郯庐走滑断裂带东支和西支为界、北部以莱北一号断层为界(图1a)。其整体上

表现为东断西超和北断南超的构造样式[14]。凹陷基底为中生界义县组，盖层为断陷期沙河街组和东营组，坳陷期为馆陶组、明化镇和平原组等[15]。勘探实践证实该凹陷为富烃凹陷[16]，还处于低勘探程度阶段。2016 年渤海油田钻探了莱州湾凹陷南斜坡垦利 16 构造，在中生界火山岩地层取得了较好的油气发现，受到了广泛关注。

按结构和成分特征划分方案，垦利 16 构造钻井揭示的火山岩有火山碎屑岩、火山碎屑熔岩、熔岩和沉火山碎屑岩。火山碎屑岩占比最高，其可分为安山质、流纹质凝灰岩/角砾岩/集块岩，火山碎屑熔岩见流纹质、英安质(熔结)凝灰/角砾/集块熔岩，熔岩见流纹岩、粗安岩、安山岩和英安岩等，沉火山碎屑岩见沉凝灰岩和沉角砾岩。各井岩性特征存在差别。1 井和 7 井以火山碎屑岩为主，6 井和 8 井以熔岩为主，9 井和 10 井以火山碎屑熔岩为主，4 井以火山碎屑熔岩和火山碎屑岩为主(图 1b)。从钻井揭示段来看，火山岩形成的顺序是 1 井、7 井、4 井、6 井和 8 井(图 1c)，各井表现出了复杂的叠置关系。利用相干属性和波形分类进行了岩性平面识别，研究区西部主要为火山碎屑岩，中部以熔岩和火山碎屑岩为主，东部岩性分布复杂，几种岩性均有发育。

2　储集空间类型

依照储集空间的成因和分布特征的 11 类 28 型分类方案[2]。利用研究区 5 口井 10 m 岩心、110 个壁心和 160 片铸体薄片，识别出 7 类 16 型储集空间，分别是原生孔隙类的杏仁体内孔、粒间孔，冷凝



a. 莱州湾凹陷南斜坡构造简图；b. 莱州湾凹陷南斜坡中生界火山岩平面展布特征；c. 莱州湾凹陷南斜坡中生界火山岩纵向叠置特征。

图 1　莱州湾凹陷南斜坡构造位置(a)及中生界火山岩空间分布特征(b、c)

Fig.1　Tectonic location (a) and spatial distribution of Mesozoic volcanic rocks (b、c) in southern slope of Laizhou Bay depression

收缩缝类的宏观和微观龟裂缝,炸裂缝类的爆发炸裂缝和隐爆缝,溶蚀孔类的铸模孔、筛状孔、洞穴状孔、晶内微孔、基质海绵状溶蚀孔和脱玻化微孔,风化缝类的应力释放缝,构造缝类的剪切和张性构造缝以及溶蚀缝类。

2.1 原生孔隙类

2.1.1 杏仁体内孔

本区识别出的杏仁体内孔是岩浆中的挥发分逸出形成的气孔,被矿物质(如绿泥石、方解石、石英、玉髓等)所充填形成的一种形似杏仁状的构造。杏仁体中部未被充填部分残余的孔隙和充填物之间的晶间微孔,形态多样呈"枣核状",内壁光滑,孔间连通性较好,气孔大小不等,大多为0.5~1.0 mm(图2a),主要分布在安山质简单熔岩流顶部。

2.1.2 粒间孔

由于火山碎屑颗粒(常为岩屑和晶屑)支撑搭成格架且未被杂基和胶结物完全充填而保存的孔隙。通常沿碎屑边缘分布,形态不规则,大小不等(图2b),连通性较好,在本区也可见强的钙质充填的情况,充填程度可达90%(图2c)。粒间孔在热基浪、热碎屑流和再搬运火山碎屑堆积中常见。

2.2 冷凝收缩缝类

2.2.1 宏观龟裂缝

宏观龟裂缝是熔浆在流动的后期阶段,熔浆供应量减少,以等容冷却作用为主,受叠加重力的牵引而形成与流动方向垂直的宏观裂缝。宏观龟裂缝截面为不规则多边形,具有规则—不规则缝面,垂直方向连通性好。在简单熔岩流中可贯穿整个熔岩流。

2.2.2 微观龟裂缝

微观龟裂缝是岩浆喷发流动时,其表层存在近似等体积熔岩流且中等冷却速度时形成的缝面不规则状微裂缝,裂缝延伸可达几十厘米,缝宽约0.05 mm。裂缝发育在熔岩边部,成像测井上产状特征不明显(图2d),可见裂缝在遇到矿物颗粒时终止发育现象(图2e)。连通性中等,但分布局限,见于各种熔岩流顶、底部的几厘米至几十厘米的范围内。

2.3 炸裂缝类

2.3.1 爆发炸裂缝

爆发炸裂缝是由于熔浆中的挥发分逸出速度大于散逸速度,导致熔浆炸裂并在岩屑或矿物中保存下来的裂缝(图2e)。火山碎屑内的炸裂缝连通性好、裂缝延伸距离短,缝宽约0.02 mm。在火山碎屑岩中常见。

2.3.2 隐爆缝

隐爆缝是在浅成或超浅成环境中,由于岩浆顶部岩层经受压力大于岩浆爆破应力条件下所发生炸裂作用而形成的裂缝。该裂缝呈树杈状、网状,常由英安质岩浆充填裂缝冷凝固结形成的岩枝,充填程度约95%(图2f)。当充填程度低时具有较高的孔隙度和渗透率。在本区分布局限,在火山碎屑岩中有少量发现。

2.4 溶蚀孔类

2.4.1 铸模孔

铸模孔是岩石中的矿物(辉石、角闪石和长石等)被完全溶解产生的孔隙,孔隙形态规则,保留原晶体假象(图2g)。其连通性较好,溶蚀/溶解作用强,孔径可达5 mm。在原生孔缝发育的岩石中常见。

2.4.2 筛状孔

筛状孔是岩石中的矿物(辉石、角闪石和长石等)部分区域被溶解产生的细小筛孔状(图2h)。其具有一定的连通性,溶蚀/溶解作用中等,孔径大小不一,通常小于1 mm。在原生孔缝发育的岩石中常见。

2.4.3 洞穴状孔

洞穴状孔是岩石中的基质被溶解产生的较大的孔径孔隙(图2i)。其气孔形态较为规则,近圆状,大小约0.5 mm,有较好的连通性,溶蚀/溶解作用强。在原生孔隙发育的火山碎屑岩中常见。

2.4.4 晶内溶蚀微孔

晶内溶蚀微孔是岩石中的矿物(辉石、角闪石和长石等)被部分溶蚀产生的细小的海绵状孔(图2j)。其具有一定的连通性,溶蚀或溶解作用弱。在原生裂缝发育的熔岩和原生孔隙发育的火山碎屑岩中常见。

2.4.5 基质海绵状孔

基质海绵状溶蚀孔是岩石中的基质被部分溶蚀产生的细小的海绵状孔(图2i)。其具有一定的连通性,溶蚀/溶解作用弱。在原生孔隙发育的火山碎屑岩中常见。

2.4.6 重结晶微孔

本区的重结晶微孔有脱玻化微孔,它是岩石中的玻璃质成分脱玻化形成细小的海绵状孔(图2k),其具有一定的连通性,代表温度和压力升高。在球粒流纹岩中常见。

2.5　风化缝类

本区的风化缝主要有应力释放缝。它是指埋藏胶结程度差的火山碎屑岩在抬升出露地表时，由于载荷力的卸载在颗粒内和颗粒边缘产生的微裂缝。其方向不定、形状多样，常发育在地表和不整合面附近，裂缝延伸距离最大可达米级，缝宽 0.1～0.5 mm（图 2l）。

2.6　构造缝类

2.6.1　张性构造缝

张性构造缝是火山岩成岩后在张性构造应力下岩石发生破碎而形成的网状、不规则状裂缝（图 2m）。其连通性好，在致密的熔岩、火山碎屑熔岩和火山碎屑岩中均可以发育。

2.6.2　剪切构造缝

剪切构造缝是火山岩成岩后遭受剪切应力作用产生的裂缝（图 2n）。其特点为缝面平直光滑（图 2o），裂缝角度高，延伸可达数米至数十米，缝宽不等。成像测井上裂缝产状特征明显。在致密的熔岩、火山碎屑熔岩和火山碎屑岩中均可以发育。

2.7　溶蚀缝类

上述各类裂缝在大气水、地层流体等的作用下发生溶蚀/溶解作用，使原来的裂缝扩大形成溶蚀缝。其在已有的形态基础上可改造为多样的形态。原生缝和构造缝发育，在与流体通道沟通的区域常见。

3　储层物性

3.1　孔隙度、渗透率特征

研究区共有 130 个火山岩孔隙度和渗透率样品，孔隙度范围为 2.0%～35.9%，几何均值为 13.9%；渗透率范围为 0.003～5 771 mD，几何均值为 0.351 mD（图 3a）。根据火山岩和火山碎屑岩储层分类评价标准可知，该区火山岩储层物性较好，整体上属于优质的火山岩储层。从孔隙度、渗透率与埋深的关系来看，孔隙度和渗透率最大值与埋深关系不明显（图 3b、c）。

3.2　孔喉半径分布特征

选取研究区内 7 井中 1 711.97、1 712.53、1 712.57 和 1 713.75 m 等 4 个中生界火山碎屑岩样品进行恒速压汞测试。本次实验使用 Coretest Systems 公司生产的 ASPE－730 型恒速压汞仪进行实验。实验温度为 25 ℃，实验过程假定岩石颗粒与汞的润湿角和表面张力为恒定值，润湿角为 140°，汞表面张力为 480 mN/m，最终进汞压力为 6.16 MPa。

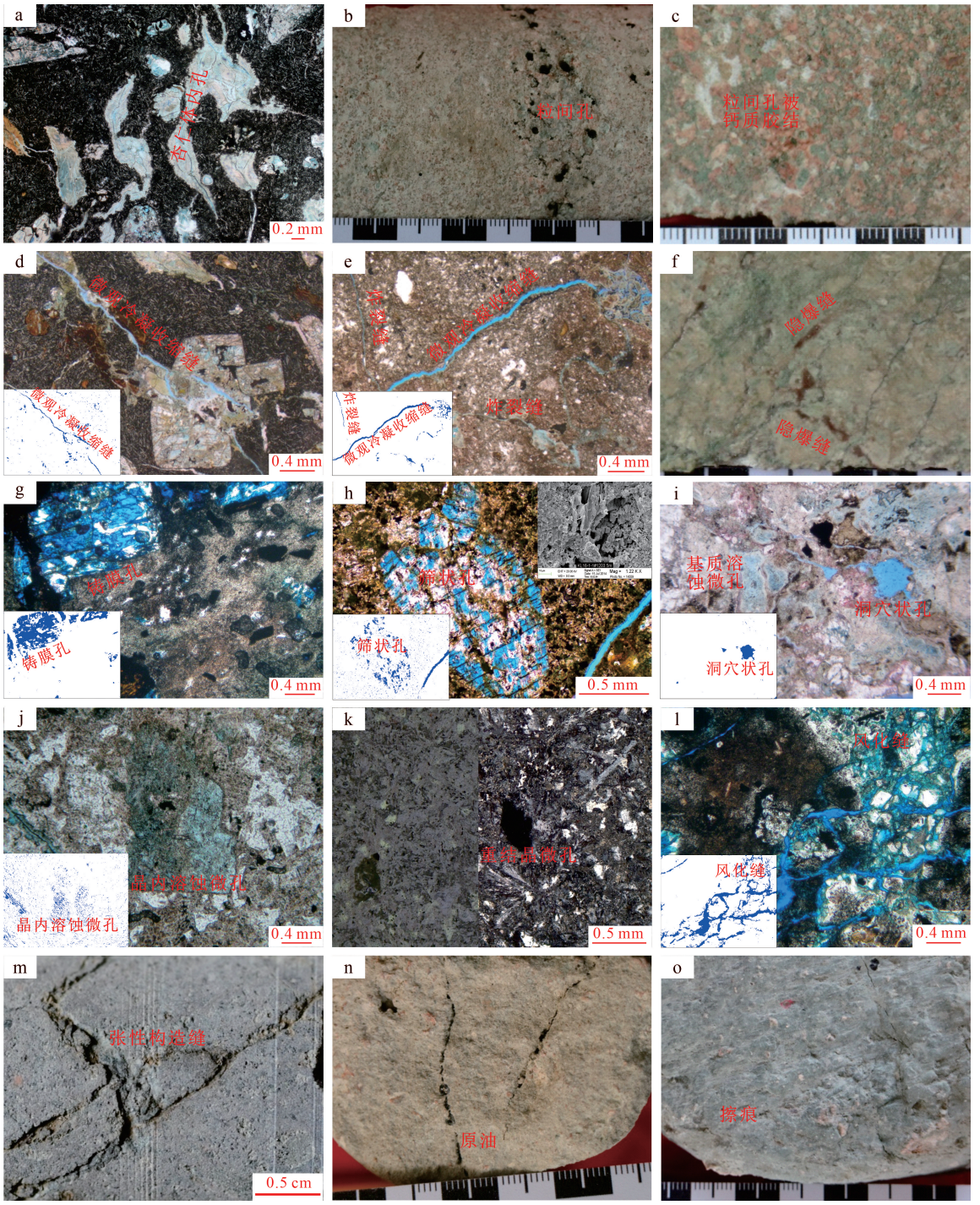
从进汞饱和度来看，样品间差异较大，从 35%～63%（图 4a）。孔隙半径测试结果（图 4b）显示：1 711.97 m样品的孔隙半径主要为 135～165 μm，平均孔隙半径为 154 μm；1 712.53 m 样品的孔隙半径主要为 135～165 μm，平均孔隙半径为 164 μm；1 712.57 m样品的孔隙半径主要为135～165 μm，平均孔隙半径为 163 μm；1 713.75 m 样品的孔隙半径主要为 135～165 μm，平均孔隙半径为160 μm。喉道半径测试结果（图 4c）显示：1 711.97 m样品的喉道半径主要为 0.8～1.4 μm，平均喉道半径为 1.3 μm；1 712.53 m 样品的喉道半径主要为 0.6～1.2 μm，平均喉道半径为 1.0 μm；1 712.57 m样品的喉道半径主要为 0.6～1.0 μm，平均喉道半径为 1.0 μm；1 713.75 m 样品的喉道半径主要为 0.4～1.0 μm，平均喉道半径为 0.8 μm。样品整体表现出大孔、中—粗喉的特征。

4　储层控制因素

本文依据储集空间对面孔率的贡献以及岩性岩相、溶蚀作用和构造作用对储层的敏感性分析结果判断储层发育的主控因素，方法是针对面孔率贡献大的储集空间类型，追踪分析其成因，相应的成因以及对储层敏感性强的因素即为储层发育控制因素。

4.1　岩性

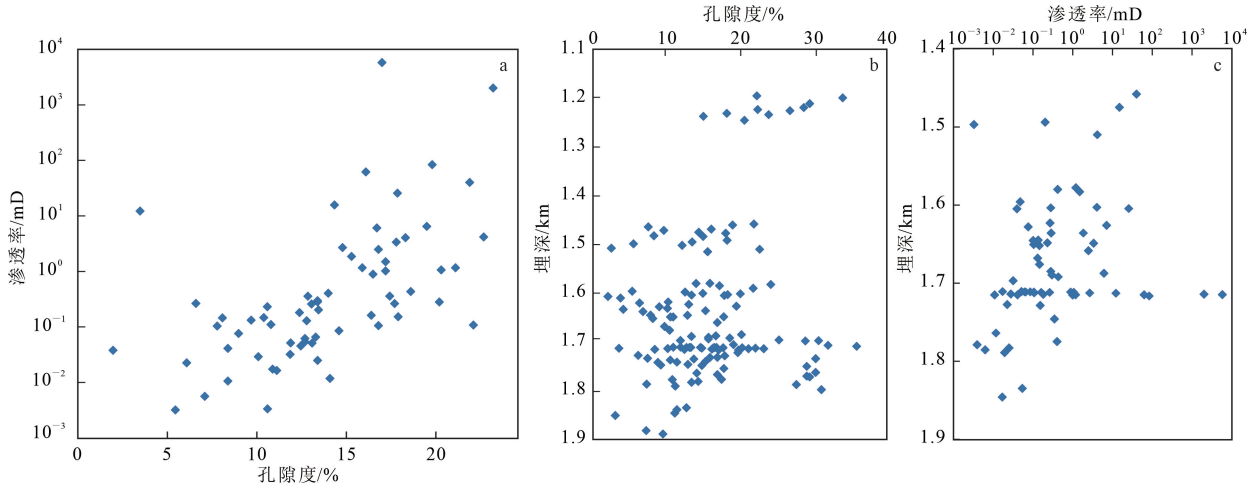
对研究区不同岩性储层物性进行统计，分析岩性对储层的影响作用。从孔隙度和渗透率几何均值来看，储层物性由好到差的顺序为凝灰岩（17.4%/0.440 mD）、火山角砾岩（13.3%/1.164 mD）、火山集块岩（12.9%/40.025 mD）、角砾熔岩（13.4%/0.254 mD）、沉火山角砾岩（12.7%/0.090 mD）、凝灰熔岩（11.1%/0.118 mD）、安山岩（10.5%/0.357 mD）和英安岩（9.9%/0.031 mD）。结果表明，研究区火山岩储层物性从好到差为：凝灰岩、火山角砾岩、火山集块岩、角砾熔岩、沉火山角砾岩、凝灰熔岩、安山岩、英安岩（表 1）。在岩性中，火山碎屑岩储层物性最好，火山碎屑熔岩、沉火山碎屑岩次之，熔岩最差。



a. 8井,1 515.00 m,安山岩,杏仁体内孔;b. 7井,1 714.80 m,凝灰岩,粒间孔;c. 7井,1 714.00 m,凝灰岩,粒间孔被钙质胶结;d. 8井,1 515.00 m,安山岩,微观冷凝缝;e. 8井,1 510.00 m,凝灰岩,爆发炸裂缝;f. 4井,1 602.90 m,凝灰岩,隐爆角砾缝;g. 1井,1 206.00 m,安山岩角砾,铸模孔;h. 8井,1 458.00 m,角砾岩,筛状孔;i. 4井,1 605.00 m,凝灰岩,洞穴状孔、基质溶蚀微孔;j.10井,1 835.00 m,安山岩,晶内溶蚀微孔;k. 7井,1 733.50 m,球粒流纹岩,重结晶微孔;l. 1井,1 195.00 m,凝灰岩,风化缝;m. 8井,1 475.00 m,安山岩,张性构造缝;n. 7井,1 711.80 m,凝灰岩,剪切构造缝;o. 4井,1 600.00~1 600.40 m,擦痕,压性构造成因。

图2 莱州湾凹陷南斜坡中生界火山岩储集空间特征

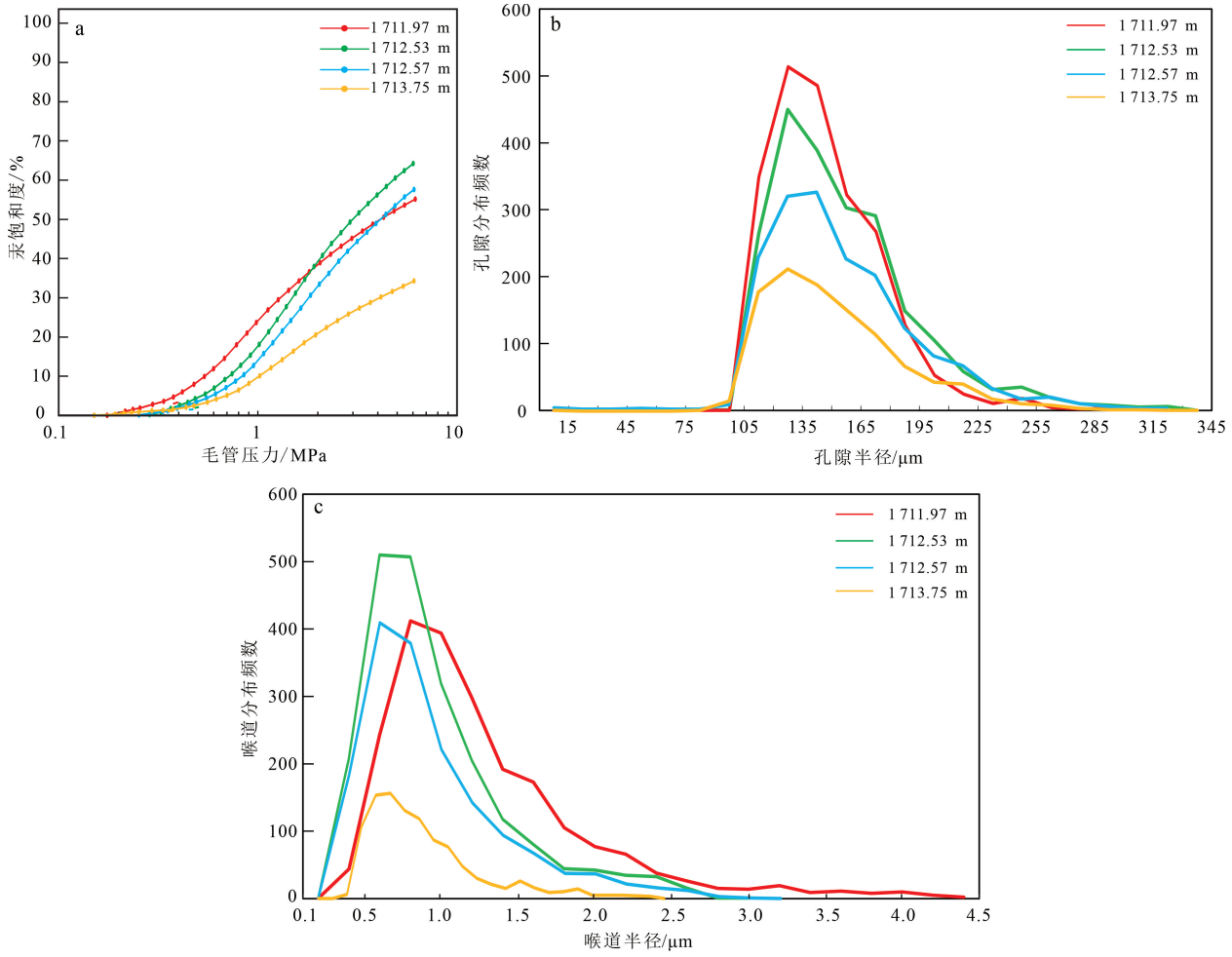
Fig.2 Reservoir space characteristics of Mesozoic volcanic rocks in southern slope of Laizhou Bay depression



a. 渗透率-孔隙度交会图；b. 埋深-孔隙度关系图；c. 埋深-渗透率关系图。毫达西(mD)为非法定计量单位，1 mD=0.987×10^{-3} μm^{-2}，下同。

图 3　莱州湾凹陷南斜坡中生界火山岩储层物性特征

Fig.3　Porosity and permeability characteristics of Mesozoic volcanic rocks in southern slope of Laizhou Bay depression



a. 毛管压力曲线特征；b.孔隙半径特征；c.喉道半径特征。

图 4　莱州湾凹陷南斜坡 7 井中生界火山岩毛管压力曲线及孔喉分布特征

Fig.4　Capillary pressure curve and pore throat distribution characteristics of Mesozoic volcanic rocks in Well 7, south slope of Laizhou Bay depression

表1 研究区岩性储层物性分析表

Table 1 Petrophysicalanalysis table of reservoir rocks in the study area

岩性	孔隙度/%	渗透率/mD
凝灰岩	(35.9～3.5)/17.4	(83.700～0.012)/0.440
火山角砾岩	(23.2～8.1)/13.3	(5 771.000～0.011)/1.164
火山集块岩	(21.9～5.3)/12.9	(40.025～40.025)/40.025
凝灰熔岩	(31.1～3.7)/11.1	(0.347～0.032)/0.118
角砾熔岩	(16.7～10.8)/13.4	(6.116～0.025)/0.254
沉火山角砾岩	(30.3～6.1)/12.7	(0.153～0.023)/0.090
英安岩	(27.4～3.8)/9.9	(0.358～0.004)/0.031
安山岩	(19.5～2.0)/10.5	(14.934～0.003)/0.357

注:(最大值～最小值)/几何均值。

4.2 溶蚀溶解作用

采用面孔率分析技术,使用JMicroVision软件对研究区128个薄片160张照片进行孔缝识别,对面孔率进行分析。在统计面孔率时受孔隙类型分辨的限制,区内共区分了7类12型孔隙,具体为原生孔隙类的杏仁体内孔和粒间孔,冷凝收缩缝类,炸裂缝类;次生孔隙类溶蚀孔类的铸模孔、筛状孔、洞穴状孔、晶内微孔和基质海绵状溶蚀孔,风化缝类,构造缝类和溶蚀缝类。

按岩性类型利用面孔率分析结果统计研究区火山岩孔隙构成可知:储集空间类型为裂缝-孔隙型,以次生孔隙为主,发育少量的裂缝;总体上大孔径储集空间(包括杏仁体内孔、粒间孔、各类裂缝、铸模孔、筛状孔和洞穴状孔)占比为50%～80%。各类岩性的储集空间类型构成还存在一定的差别:火山碎屑岩储层主要是筛状孔和基质溶蚀微孔等次生孔隙,裂缝(冷凝收缩缝、炸裂缝、风化缝、构造缝、溶蚀缝)对孔隙的贡献约占8.00%,以溶蚀缝(2.56%)为主(图5a);熔岩储层主要为筛状孔、洞穴状孔、基质溶蚀微孔等次生孔隙,裂缝的占比可达16.42%,以冷凝收缩缝及溶蚀缝为主(图5b);火山碎屑熔岩储层主要为洞穴状孔、铸模孔等次生孔隙,裂缝占比约9.00%,以冷凝收缩缝(7.48%)为主(图5c);沉火山碎屑岩储层主要为筛状孔、铸模孔等次生孔隙,裂缝发育较少,只占约1.00%,主要为炸裂缝(图5d)。

4.3 构造作用

后期的构造运动对于火山岩储集层和火山岩油气藏的形成是必不可少的,构造运动形成的裂缝、裂隙使火山岩中原本彼此独立的原生孔隙彼此连通成为储集层。受郯庐分支断裂影响,研究区火山岩裂缝的形成与构造破碎带的发育具有成因联系,在断层、断裂带发育的区域,火山岩中的裂缝发育频率明显提高,有的更是成倍增加。研究区位于郯庐断裂带内,在早白垩世主要表现为左行走滑[17-18],新生代以来主要为右行走滑[19-21],根据里德尔剪切模型[21]可知,产生北西—南东方向的剪切缝、北北东—南南西和南东东—北西西的共轭裂缝(图6)。由于左行和右行走滑时产生的共轭裂缝走向一致,难以将二者区分开;同时在渐新世发生了挤压反转,地层略有抬升,也是形成构造缝的有利条件。本阶段形成的裂缝充填程度低于喷发同期和埋藏前风化形成裂缝的充填程度,常常可见原油残存(图2n)。

岩心上可见渐新世走滑形成的断陷期形成的高角度构造缝(图7a、b)和擦痕(图7c、d),在成像测井上具有良好的对应关系。4井火山岩裂缝走向主要为NW—SE向裂缝,发育程度较差;7井裂缝走向主要以NWW—SEE向和NEE—SWW向为主。通过成像测井,对4井和7井裂缝面密度及产状进行统计。4井构造缝占45%,平均裂缝面密度为19.5 m/m^2,平均裂缝开度为32.6 μm,构造缝长度主要集中在0.5～1.0 m之间,裂缝倾角大多为30°～60°;7井构造缝占43%,平均裂缝密度为18.9 m/m^2,平均裂缝开度为41.2 μm,构造缝长度在0.0～5.0 m之间,裂缝倾角大多为30°～60°。

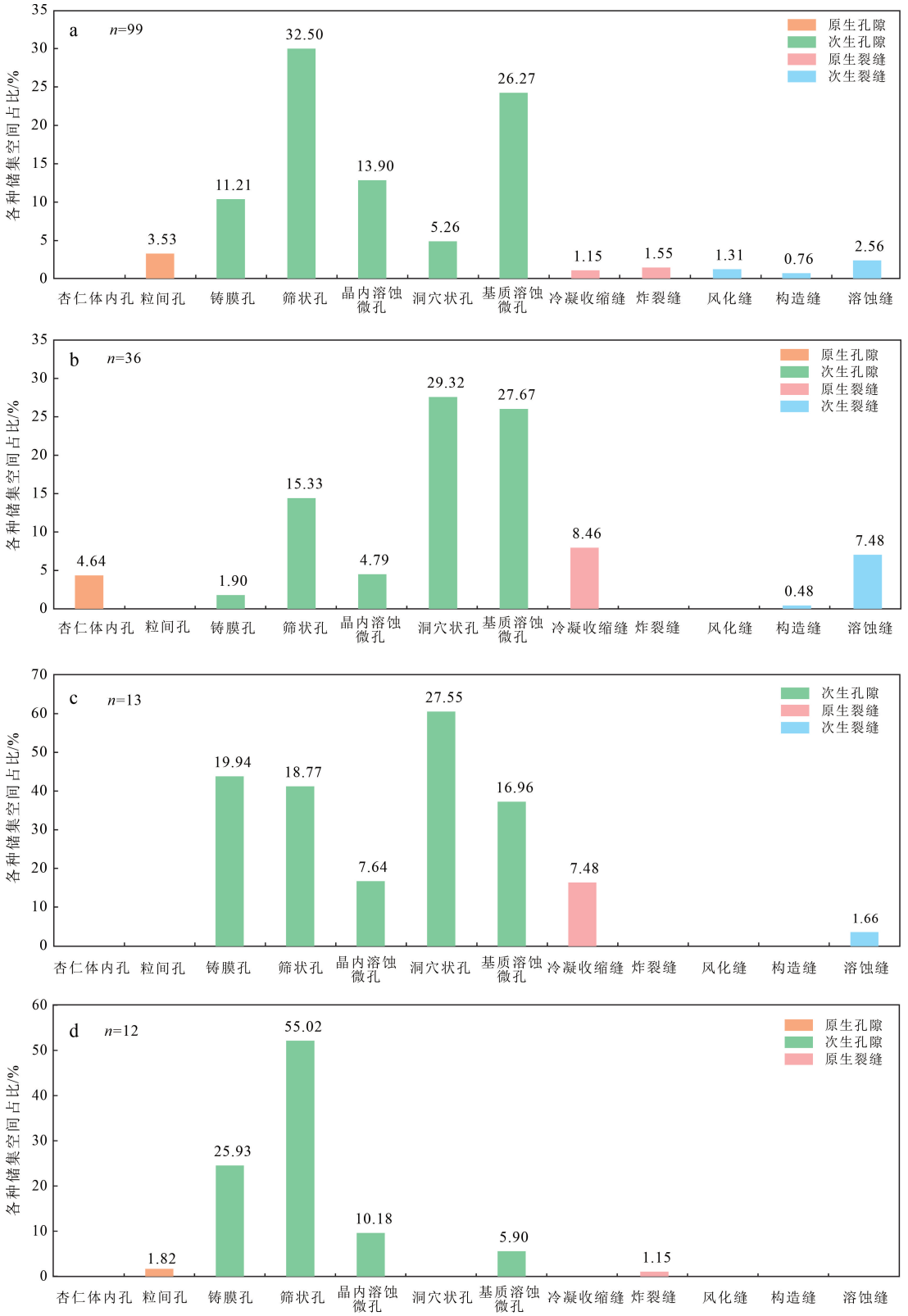
4.4 储层主控因素确定

以研究区测井解释孔隙度为统一衡量标准,比较储层各影响因素的孔隙度变化,即变化越快,对储层的影响越大。以此来分析各因素对储层的控制作用。引入敏感性分析公式:

$$f=\frac{\varphi'_n-\varphi'_{\min}}{\sum_{i=1}^{k}(\varphi'-\varphi'_{\min})}。$$

式中:f为敏感因子;φ'为孔隙度;n为累积百分比;φ_n'为各因素数量累积n时的孔隙度;$\varphi'_{\min}$为各因素数量累积孔隙度中的最小值;k为各因素孔隙度样本数目。

为消除异常孔隙度的影响,通过累积曲线选择各因素孔隙度从小到大数量累积分别为50%和



a. 火山碎屑岩储集空间构成；b. 熔岩储集空间构成；c. 火山碎屑熔岩储集空间构成；d. 沉火山碎屑岩储集空间构成。

图 5　莱州湾凹陷南斜坡中生界火山岩储集空间构成

Fig.5　Reservoir space composition of Mesozoic volcanic rocks in southern slope of Laizhou Bay depression

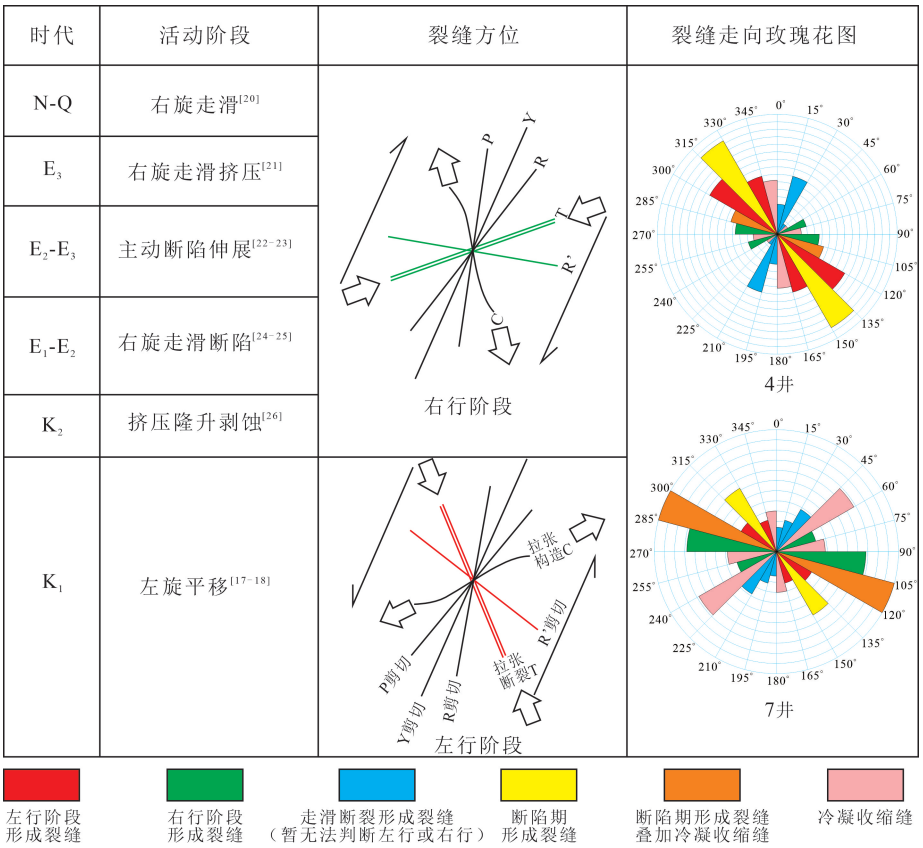


图6 莱州湾凹陷南斜坡裂缝发育特征

Fig.6 Fracture characteristics in southern slope of Laizhou Bay depression

90%时的孔隙度，结果见表2。计算各因素数量累积为 n 时孔隙度与累积 n 时孔隙中最小值的差值，得出孔隙度变化速率，分析各因素孔隙度的敏感性。

按敏感性分析方法，将研究区测井解释孔隙度按岩相、溶蚀作用和构造作用进行分类。对储层岩相敏感性进行分析，将岩相分为热基浪亚相、热碎屑流亚相、简单熔岩流亚相和崩塌再搬运亚相；对溶蚀作用形成的孔缝按面密度进行划分，每5%为一个测试区间；对构造作用产生的构造缝按成像测井面密度进行划分，每10 m/m^{2}为一个测试区间。在所有因素中：岩相对储层的影响最大，其中热基浪亚相敏感程度最高，敏感性均值可达73%；构造作用次之，构造缝面密度在0～10 m/m^{2}时对储层影响较大；溶蚀作用对储层整体的影响较低，敏感性不强(表2)。

5 储层演化

5.1 地层埋藏史

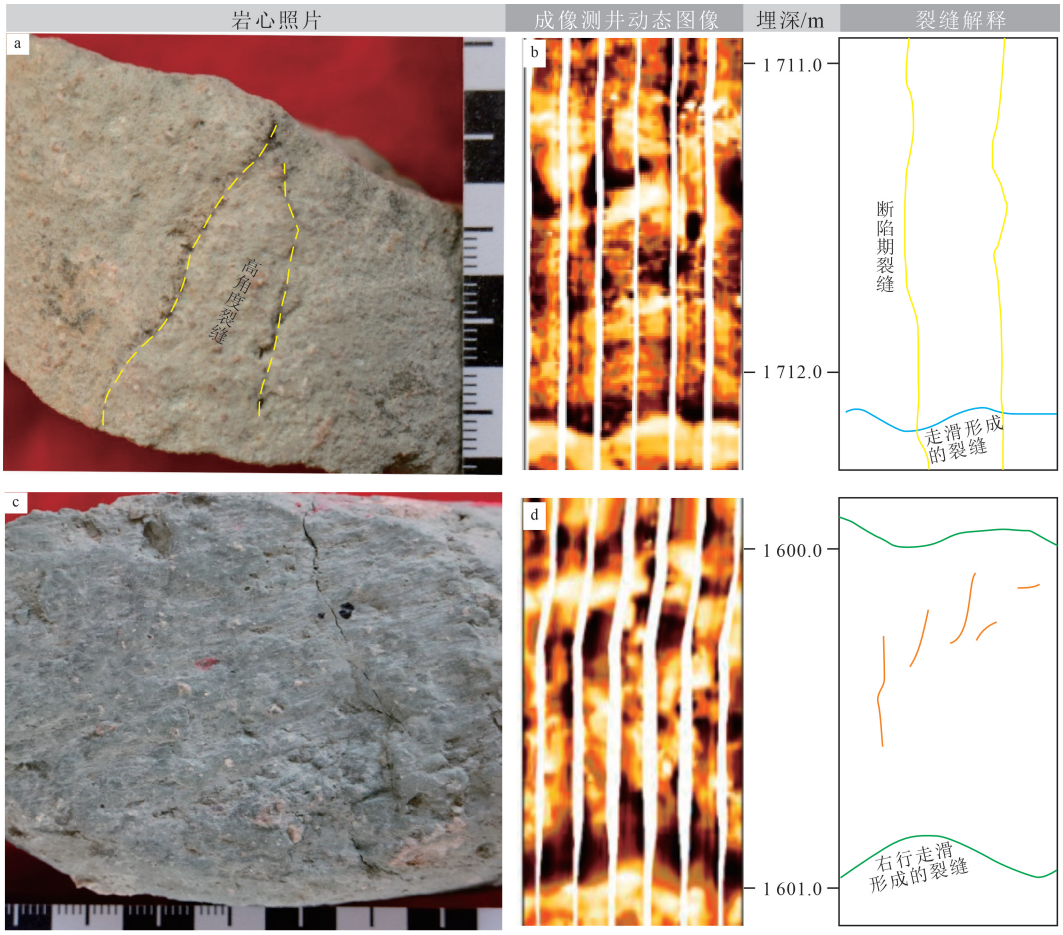
该火山岩形成于早白垩世，火山地层的形成具有快速建造的特征，推测其为快速埋藏。但由于区域上晚白垩世呈现出了隆升剥蚀的特点，直至沙河街期才接受再次埋藏，之后该区发生了再次抬升；再次抬升时间从1井区的沙三期晚期—东营末期，到6井区渐变为沙二期—东营末期，再到4井的东二期，在7井处未发现再次抬升；然后经历了馆陶期缓慢埋藏，到明化镇期以来为快速埋藏过程。

如4井经历了喷发时快速堆积，喷发后到42.0 Ma之前接受长期的埋藏前风化，剥蚀至200 m，此后进入快速埋藏和缓慢埋藏阶段，在28.7～24.6 Ma经历快速隆升，24.6 Ma至今经历了缓慢埋藏和快速埋藏阶段(图8)。

5.2 喷发同期的孔缝演化

该区火山岩在早白垩世火山喷发期形成了原生孔隙和裂缝，如熔岩中的杏仁体内孔和火山碎屑岩中的粒间孔，熔岩和火山碎屑岩的炸裂缝、熔岩中的宏观和微观龟裂缝。喷发同期或后期还形成了隐爆缝(图9)。

杏仁体内孔仅发育在8井熔岩段，占总储集空间的3.1%。熔浆在流动的后期阶段供应量减少，熔



a. 7 井，1 711.6 m，岩心高角度构造缝；b. 7 井，1 711.0～1712.0 m，成像测井构造缝特征；c. 4 井，1 600.0 m，岩心观察构造成岩擦痕；d. 4 井，1 600.0～1 601.0 m，成像测井构造缝特征。

图 7　莱州湾凹陷南斜坡岩心与成像测井构造缝特征

Fig.7　Fracture characteristics in core and imaging logging in southern slope of Laizhou Bay depression

表 2　研究区各因素储层敏感性

Table 2　Reservoir sensitivity analysis for various factors in the study area

主控因素		φ'_{50}	φ'_{90}	f_{50}/%	f_{90}/%	f_{ave}/%
岩相	热基浪亚相	15.0	20.0	58	88	73
	热碎屑流亚相	8.0	14.0	0	12	6
	简单熔岩流亚相	10.0	13.0	16	0	8
	崩塌再搬运亚相	11.0	13.0	26	0	13
溶蚀孔缝面孔/%	0～5%	14.0	18.0	20	33	27
	5%～10%	13.0	19.0	0	50	25
	10%～15%	15.0	17.0	40	17	28
	15%～25%	15.0	16.0	40	0	20
构造缝面密度/(m/m^2)	0～10%	13.0	18.5	41	56	48
	10%～20%	12.3	16.0	34	0	17
	20%～30%	11.5	16.0	26	0	13
	30%～40%	9.0	18.0	0	44	22

注：φ'_{50}为各因素数量累积 50%时孔隙度；φ'_{90}为各因素数量累积 90%时孔隙度；f_{50}为各因素孔隙度累积 50%时的敏感性系数；f_{90}为各因素孔隙度累积 90%时的敏感性系数；f_{ave}为平均敏感性系数。

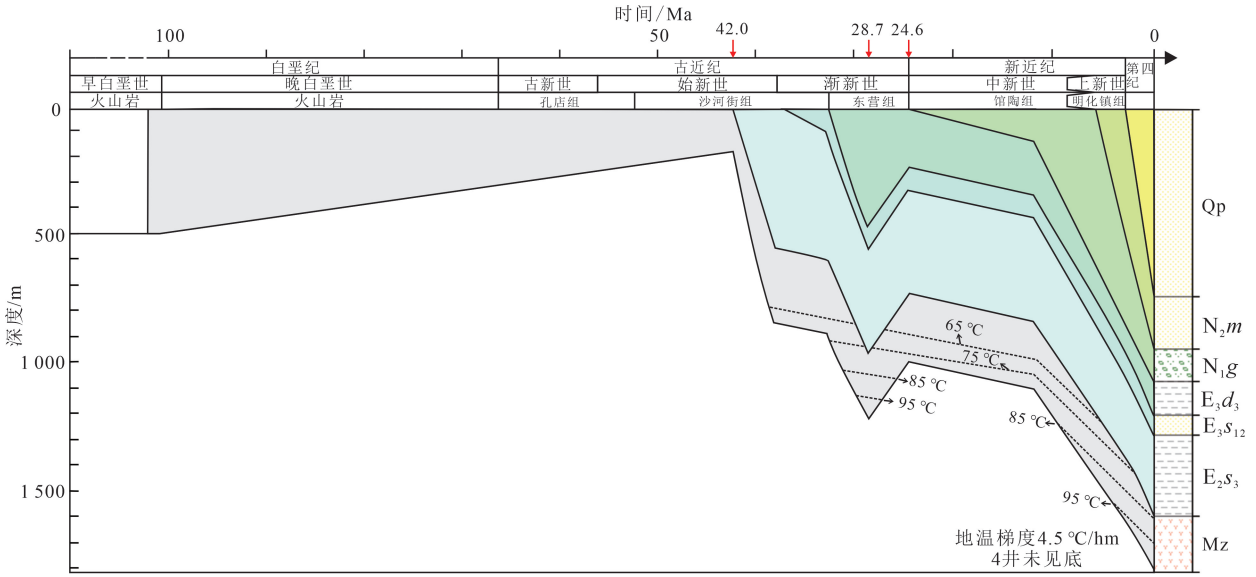


图 8 莱州湾凹陷南斜坡 4 井埋藏史

Fig.8 Burial history of Well 4 in southern slope of Laizhou Bay depression

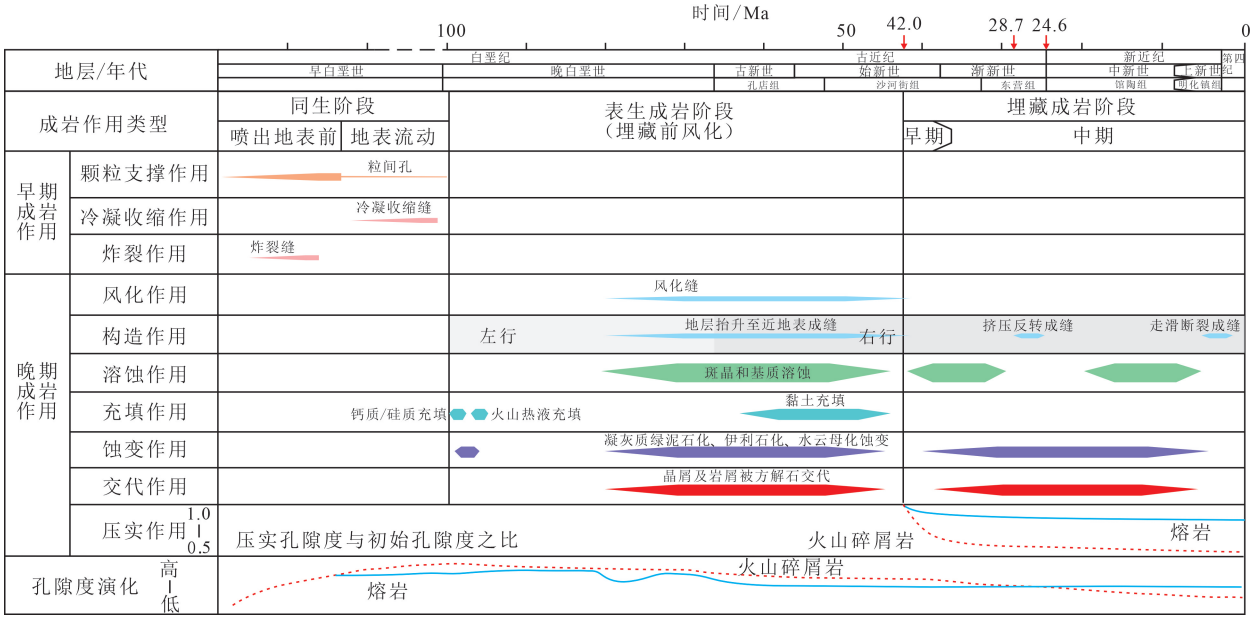


图 9 莱州湾凹陷南斜坡 4 井孔缝演化特征

Fig.9 Pore and fracture evolution characteristics of Well 4 in southern slope of Laizhou Bay depression

浆以等容冷却作用为主,叠加重力的牵引而形成与流动方向垂直的宏观龟裂缝。岩浆喷发流动时,其表层存在近似等体积、中等冷却速度时形成微观龟裂缝。冷凝收缩缝是研究区内最常见裂缝,在各井均有发育,占总储集空间的8.64%。

粒间孔在各井中均存在,占总储集空间的5.22%。由于熔浆中的挥发分逸出速度大于散逸速度,而导致熔浆炸裂,在岩屑或矿物中保存下来的炸裂缝仅在1井和4井的火山碎屑岩和沉火山碎屑岩段有发现,占总储集空间的1.31%。在浅成或超浅成环境中,在岩浆顶部岩层经受压力大于岩浆爆破应力条件下所发生炸裂作用而形成隐爆缝。

5.3 埋藏前风化阶段的孔缝演化

至火山岩就位之后就接受了埋藏前风化作用,时间可持续超过数十 Ma,如4井的埋藏前风化可持续到约42.0 Ma(图8)。在地表条件下火山灰等

易风化蚀变为膨润土，熔岩中的长石、角闪石发生溶蚀溶解作用，多产生蒙脱石、伊利石、高岭石等。常见的孔隙主要有如下 4 类：一是碱性长石溶解成铸模孔和筛状孔，二是碱性长石溶蚀成晶内微孔，三是火山灰溶解为洞穴状孔，四是火山灰溶蚀为基质海绵状微孔。在现代火山中所采的近地表次火山岩样品中可见丰富的铸模孔和筛状孔[27-28]，也可以说明在风化阶段就产生了丰富的溶蚀孔类的铸模孔、筛状孔、洞穴状孔、晶内微孔、基质海绵状溶蚀孔。

在该阶段固结的熔岩和碎屑熔岩与未固结的火山碎屑在风化作用下产生的孔隙效应可能存在差别。未固结的火山碎屑，风化时的溶蚀溶解作用产生的次生粒间溶孔未能在后期埋藏压实时得以保存；对于固结的熔岩和碎屑熔岩来讲，风化时的溶蚀溶解作用产生的次生孔隙可以得到较好的保存。

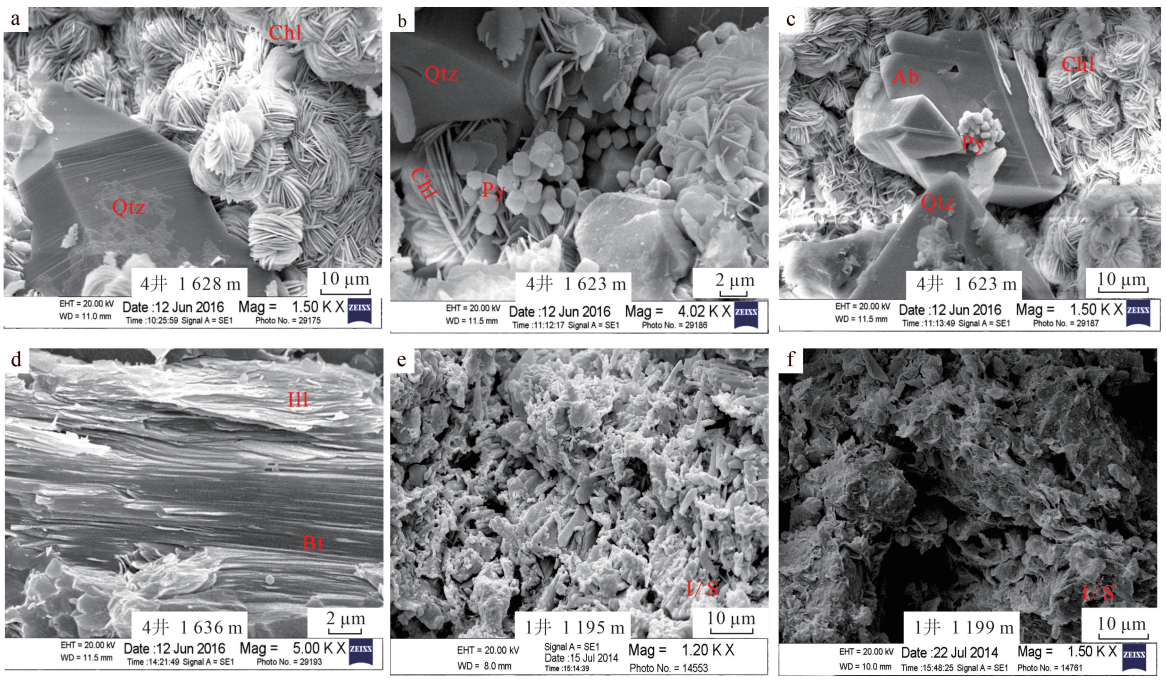
风化阶段构造应力作用于松散的火山碎屑堆积物产生构造缝的效应不明显，在熔岩中可产生较好的效果。

结合野外山东潍坊地区的中生代火山岩可知，在火山碎屑岩区往往风化形成了平原，而熔岩区则形成了丘陵。前者可见土壤层，其具有吸水膨胀性特征，导致垂向上的渗水效果差，不利于大气水对下伏火山碎屑的风化。后者因土壤层不发育导致大气水可沿宏观冷凝收缩缝和构造缝向下渗流，可能更有利于风化作用向下拓展。

火山碎屑岩粒间孔中见钙质和硅质充填，从颗粒间为点接触关系来看，充填作用发生在较浅埋藏阶段，所以推测为埋藏前阶段或者是火山期后。钙质和硅质充填早期形成的炸裂缝和风化缝。同时也可见自形黄铁矿充填、钾长石蚀变成钠长石和绿泥石等（图 10a、b、c），这都代表了温度高于地温状态的产物，推测该类蚀变也是发生在火山期后至埋藏前的热流活动，也会产生晶间微孔和筛状孔。

5.4　埋藏阶段的孔隙演化

研究区火山岩上覆地层沙河街组发育煤和暗色泥岩，二者在热演化过程中均会排出酸性物质。其中有两个阶段会产生大量的酸：一是在埋深 200～400 m 范围内的植物遗体转化为泥炭、再到褐煤的过程，二是在当地温达到 80～120 ℃时煤和泥岩会大量排出有机酸。这些酸性物质对于长石岩屑、角



a. 4 井，1 628 m，绒球状绿泥石和自生石英充填粒间孔；b. 4 井，1 623 m，针叶状绿泥石、黄铁矿和自生石英充填粒间孔；c. 4 井，1 623 m，碱性长石溶蚀后生成的自生石英、钠长石、绒球状绿泥石和黄铁矿，形成孔隙；d. 4 井，1 636 m，片状黑云母部分蚀变为伊利石；e. 1 井，1 195 m，长石溶蚀形成丝片状伊/蒙混层，形成晶内微孔；f. 1 井，1 199 m，粒间孔隙内充填物形成丝片状伊/蒙混层。Qtz.石英；Chl.绿泥石；Py.黄铁矿；Ab.钠长石；Bt.黑云母；Ill.伊利石；I/S.伊/蒙混层。

图 10　莱州湾凹陷南斜坡中生界火山岩孔隙中充填物特征

Fig.10　Filling characteristics of Mesozoic volcanic pores in southern slope of Laizhou Bay depression

闪石岩屑和火山灰等物质的溶蚀溶解作用明显。地层流体可以沿着埋藏前风化阶段的孔缝体系对岩石进行改造,扩大之前的孔缝,筛状孔可演化成铸模孔、晶内微孔可演化成筛状孔和铸模孔,基质海绵状微孔可演化成洞穴状孔,各类裂缝可演化成溶蚀缝。同时,片状黑云母向伊利石转换(图 10d)、由于温度和压力的升高使蒙脱石向伊利石转化以及伊/蒙混层的形成也可以进一步产生晶间微孔(图 10e、f)。岩石中的玻璃质成分在脱玻化作用下产生晶间微孔,如图 2k 的球粒流纹岩可发育丰富的脱玻化孔。

在埋藏阶段孔隙演化时存在被压实的过程,这是孔隙减少的主要动力因素。熔岩和火山碎屑岩孔隙演化过程存在一定的差别,其中熔岩受压实变形较小、火山碎屑岩的变形大。所以熔岩中的孔隙在埋藏成岩阶段随埋深增大时直径可能有少量的减少,溶蚀产生的铸模孔、筛状孔等也容易得以保存。而火山碎屑岩随埋深加大,颗粒支撑型岩石的颗粒接触方式为点—线—凹凸接触,部分颗粒可能会破碎,颗粒之间由于应力的变化可能还会产生位移来达到新的支撑平衡,所以火山碎屑岩的孔隙会显著变小[2]。从孔隙度演化来看,火山碎屑岩受压实作用减孔现象显著,作为孔隙小于 20%的熔岩和碎屑熔岩随着压实增大而孔隙度减少的绝对值是相对有限的(图 9)。所以 6 井、8 井、9 井、10 井和 4 井(下部)的压实减孔效益较弱,有利于孔隙的保存。而 1 井、4 井(上部)和 7 井的压实减孔效益较强,不利于孔隙的保存。就目前的孔隙度来看,1 井、4 井(上部)和 7 井较高,所以可以反推这 3 口井的初始孔隙度具有更高的值。

6 结论

1)识别出 7 类 16 型储集空间。储层类型为裂缝-孔隙型。整体上属于优质的火山岩储层,表现为大孔径、中—粗喉的特征,储层物性由好到差的顺序为凝灰岩、火山角砾岩、火山集块岩、角砾熔岩、沉火山角砾岩、凝灰熔岩、安山岩和英安岩。

2)储层的主控因素是岩性岩相,孔隙度和渗透率最大值与埋深关系不明显,可能与早期的钙质硅质胶结使得岩石的强度增加、更抗压实。

3)杏仁体内孔、粒间孔、炸裂缝、宏观和微观龟裂缝、隐爆缝形成于喷发同期,对孔隙贡献率有限。构造裂缝主要形成于埋藏前风化阶段,受控于郯庐断裂带白垩纪左行和新生代右行的应力场以及断陷早期的拉张环境应力场。溶蚀孔隙形成分为埋藏前风化和埋藏流体溶蚀两个阶段,这两个阶段是储层形成的主要时期。

参考文献(References):

[1] Schutter S R. Occurrences of Hydrocarbons in and Around Igneous Rocks [J]. Geological Society, London, Special Publications, 2003, 214(1): 35-68.

[2] 唐华风,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 Reservoir Geology [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(12):1744-1773.

[3] 谢继容,李亚,杨跃明,等. 川西地区二叠系火山碎屑岩规模储层发育主控因素与天然气勘探潜力[J].天然气工业, 2021, 41(3): 48-57.
Xie Jirong, Li Ya, Yang Yueming, et al. Main Controlling Factors and Natural Gas Exploration Potential of Permian Scale Volcanoclastic Reservoirs in the Western Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(3):48-57.

[4] 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.

[5] 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. Characteristics and Formation Mechanism of Mesozoic Volcanic Reservoirs from Buried Hills in Huanghua Depression, Bohai Bay Basin[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(3):859-875.

[6] 张宏国,王昕,鲁凤婷,等. 渤海中部中生界火山岩储层研究及靶区预测[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2015, 37(5):47-54.
Zhang Hongguo, Wang Xin, Lu Fengting, et al. Research and Targets Prediction of Mesozoic Volcanic Reservoir in Central Bohai Sea Area[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2015, 37(5):47-54.

[7] 唐华风, 边伟华, 王璞珺, 等. 盆地火山岩相分类和模

式[J]. 吉林大学学报(地球科学版)，2023，53(6)：1651－1671.
Tang Huafeng，Bian Weihua，Wang Pujun，et al. Classification and Mode of Volcanic Facies in the Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition)，2023，53(6)：1651－1671.

[8] 刘晓健，王清斌，代黎明，等. 莱州湾凹陷中生代火山岩岩性岩相特征与储层关系[J]. 石油地质与工程，2018，32(3)：1－6.
Liu Xiaojian，Wang Qingbin，Dai Liming，et al. Relationship Between Lithofacies Characteristics and Reservoirs of Mesozoic Volcanic Rocks in Laizhouwan Sag[J]. Petroleum Geology and Engineering，2018，32(3)：1－6.

[9] 王保全，王志萍，汤国民，等. 渤海海域中部地区中生界火山岩储层特征及主控因素[J]. 海洋地质前沿，2020，36(8)：36－42.
Wang Baoquan，Wang Zhiping，Tang Guomin，et al. Characteristics of Mesozoic Volcanic Reservoir Rocks and Their Main Controlling Factors in the Central Bohai Sea[J]. Marine Geology Frontiers，2020，36(8)：36－42.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 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. Characteristics and Controlling Factors of Buried-Hill Inner Volcanic Reservoir：An Example from the Cretaceous in Qinhuangdao 30A Area，Offshore Bohai Sea，China[J]. Acta Sedimentologica Sinica，2017，35(2)：343－357.

[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 Reservoirs in the Structure 428 of Bozhong Sag[J]. Marine Geology Frontiers，2022，38(2)：69－75.

[14] 史浩，周东红，吕丁友. 莱州湾凹陷东部新生代走滑构造特征及油气勘探意义[J]. 海洋石油，2014，34(3)：34－39.
Shi Hao，Zhou Donghong，Lü Dingyou. Cenozoic Strike-Slip Tectonic Character and the Significance of Oil and Gas Exploration in Eastern Laizhou Bay[J]. Offshore Oil，2014，34(3)：34－39.

[15] 牛成民. 渤海南部海域莱州湾凹陷构造演化与油气成藏[J]. 石油与天然气地质，2012，33(3)：424－431.
Niu Chengmin. Tectonic Evolution and Hydrocarbon Accumulation of Laizhouwan Depression in Southern Bohai Sea[J]. Oil & Gas Geology，2012，33(3)：424－431.

[16] 黄雷，王应斌，武强，等. 渤海湾盆地莱州湾凹陷新生代盆地演化[J]. 地质学报，2012，86(6)：867－876.
Huang Lei，Wang Yingbin，Wu Qiang，et al. Cenozoic Tectonic Evolution of the Laizhouwan Sag in Bohai Bay Basin[J]. Acta Geologica Sinica，2012，86(6)：867－876.

[17] 徐嘉炜. 郯—庐断裂带巨大的左行平移运动[J]. 合肥工业大学学报，1980，3(1)：4－29，130－131.
Xu Jiawei. The Great Left-Lateral Horizontal Displacement of Tancheng-Lukiang Fault Zone，Eastern China[J]. Jurnal of Hefei Polytechnic University，1980，3(1)：4－29，130－131.

[18] 朱光，王道轩，刘国生，等. 郯庐断裂带的伸展活动及其动力学背景[J]. 地质科学，2001，36(3)：269－278.
Zhu Guang，Wang Daoxuan，Liu Guosheng，et al. Extensional Activities Along the Tan-Lu Fault Zone and Its Geodynamic Setting[J]. Chinese Journal of Geology，2001，36(3)：269－278.

[19] Sylvester A G. Strike-Slip Faults[J]. Geol Soc Am Bull，1988，100：1666－1703.

[20] Hsiao L Y，Graham S A，Tilander N. Seismic Reflection Imaging of a Major Strike-Slip Fault Zone in a Rift System：Paleogene Structure and Evolution of the Tan-Lu Fault System，Liaodong Bay，Bohai，Offshore China[J]. AAPG Bulletin，2004，88(1)：

71-97.

[21] Montgomery C W. Physical Geology[M]. Dubuque: W C Brown Publishers, 1990:555.

[22] 马杏垣,刘和甫,王维襄,等. 中国东部中、新生代裂陷作用和伸展构造[J]. 地质学报, 1983, 57(1):22-32.
Ma Xingyuan, Liu Hefu, Wang Weixiang, et al. Meso-Cenozoic Rifting and Extensional Structures in Eastern China[J]. Acta Geologica Sinica, 1983, 57(1): 22-32.

[23] 漆家福,张一伟,陆克政,等. 渤海湾盆地新生代构造演化[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),1995, 19(增刊1):1-6.
Qi Jiafu, Zhang Yiwei, Lu Kezheng, et al. Cenozoic Tectonic Evolution in Bohai Bay Basin Province[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 1995, 19(Sup.1):1-6.

[24] 蔡东升,罗毓晖,姚长华,等. 渤海莱州湾走滑拉分凹陷的构造研究及其石油勘探意义[J]. 石油学报, 2001, 22(2):19-25.
Cai Dongsheng, Luo Yuhui, Yao Changhua, et al. Strike-Slip and Pull-Apart Structure Study and Its Significance to Petroleum Exploration on Laizhouwan Sag, Bohai Area[J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(2): 19-25.

[25] 李晓清. 潍北走滑盆地形成演化与含油气系统[D]. 兰州:中国科学院西北生态环境资源研究院油气资源研究中心, 2002.
Li Xiaoqing. The Evolution History and Petroleum Systems of Weibei Strike-Slip Basin[D]. Lanzhou: Oil and Gas Research Center, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, 2002.

[26] 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. Research on Mesozoic and Cenozoic Tectonic Evolution of Bohai Bay Basin [J]. Journal of Peking University (Natural Science Edition), 2001, 37 (6): 845-851.

[27] 唐华风, 孔坦, 刘祥,等. 松辽盆地下白垩统沉火山碎屑岩优质储层特征和形成机理[J]. 石油学报, 2016, 37(5): 631-643.
Tang Huafeng, Kong Tan, Liu Xiang, et al. Characteristics and Formation Mechanisms of High Quality Reservoir of Volcaniclastic Sedimentary Rocks of Early Cretaceous in Songliao Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(5):631-643.

[28] 郭天婵,唐华风,王寒飞. 浅成侵入岩储层分布模式:以新西兰 Lyttelton 火山中新世浅成岩脉为例[J]. 地质学报, 2021, 95(12):3885-3898.
Guo Tianchan, Tang Huafeng, Wang Hanfei. Reservoir Distribution Pattern of the Hypabyssal Intrusive Rocks: A Case Study from the Miocene Hypabyssal Dykes of Lyttelton Volcano, New Zealand[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(12): 3885-3898.