

琼东南盆地松南-宝岛凹陷及其周缘新近系中新统火山岩储层发育特征及勘探前景

周杰,何小胡,卢景松,熊小峰,吴昊

[中海石油(中国)有限公司海南分公司,海南海口 570100]

摘要: S29-A构造首次在琼东南盆地揭示了火山岩气藏的存在,展现出较好的勘探前景。为了明确琼东南盆地新近系中新统火山岩储层发育特征,利用最新的钻井、地震、测井、薄片观察和核磁共振等资料,分析了S29-A构造火山岩的岩性-岩相、储层发育特征、储层主控因素和天然气成藏模式。研究结果表明:① S29-A构造中新统发育中-基性火山碎屑岩,识别出爆发相基浪亚相的火山口-近火山口微相、近源微相和远源微相。② 共识别出7类9型储集空间,储层类型为孔隙-裂缝型,储层物性较好,大直径孔隙占比高,整体属于优质火山岩储层。③ 储层发育受岩性-岩相、溶蚀作用和构造作用共同控制,近源微相火山角砾岩储层物性条件最优,溶蚀作用对储层的改善作用可达到50%以上。④ 松南-宝岛凹陷及周缘中新统发育大面积火山机构,共刻画出3大火山岩带,勘探潜力较大。其中,万户火山岩带北侧火山机构成藏条件较好、规模大,展现出较好的勘探前景,有望成为下一个千亿方级天然气聚集区。

关键词: 勘探前景;储层发育特征;火山碎屑岩储层;松南-宝岛凹陷;琼东南盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Developmental characteristics and exploration prospects of the Neogene Miocene volcanic rock reservoirs in the Songnan-Baodao Sag and its periphery, Qiongdongnan Basin

ZHOU Jie, HE Xiaohu, HU Jingsong, XIONG Xiaofeng, WU Hao

(Hainan Branch of CNOOC Ltd., Haikou, Hainan 570100, China)

Abstract: In the Qiongdongnan Basin, volcanic gas reservoirs are revealed for the first time in the S29-A structure, suggesting promising prospects for hydrocarbon exploration. This study aims to ascertain the developmental characteristics of the Neogene Miocene volcanic rock reservoirs in the Qiongdongnan Basin. Using the latest data from drilling, seismic survey, logging, thin section observation, and nuclear magnetic resonance (NMR) testing, we analyze the lithology, lithofacies, reservoir development characteristics, primary factors controlling reservoir development, and natural gas accumulation model of volcanic rocks in the S29-A block. The research results indicate that intermediate-basic pyroclastic rocks occur in the Miocene strata in the S29-A block, with three microfacies identified in the base surge subfacies of the explosive facies: crater to near-crater microfacies, proximal microfacies, and distal microfacies. A total of nine types of reservoir spaces in seven categories are determined. The reservoirs, proving porous-fractured, exhibit favorable physical properties and a high proportion of large-diameter pores, establishing them as high-quality volcanic rock reservoirs overall. The reservoir development is jointly governed by lithology, lithofacies, dissolution, and tectonism. The volcanic breccia reservoirs of the proximal microfacies exhibit the most favorable reservoir physical properties, with dissolution contributing more than 50% to their porosity enhancement. The Songnan-Baodao Sag and its periphery are characterized by extensive volcanic edifices in the Miocene strata, which have delineated three major volcanic rock zones, suggesting great potential for hydrocarbon exploration. Notably, volcanic edifices on the north side of the Wanhua volcanic rock zone exhibit favorable hydrocarbon

收稿日期:2025-07-24;修回日期:2025-12-09。

第一作者简介:周杰(1988—),男,高级工程师,南海西部油气勘探。E-mail:zhouji14@cnooc.com.cn。

基金项目:海南省“南海新星”科技创新人才平台项目(NHXXRCXM202367)。

accumulation conditions and a large scale, implying promising prospects for hydrocarbon exploration. Therefore, these volcanic edifices are expected to be a natural gas accumulation area with total resource potential exceeding 100 billion cm^3 .

Key words: exploration prospect, reservoir development characteristics, pyroclastic rock reservoir, Songnan-Baodao Sag, Qiongdongnan Basin

引用格式:周杰,何小胡,卢景松,等. 琼东南盆地松南-宝岛凹陷及其周缘新近系中新统火山岩储层发育特征及勘探前景[J]. 石油与天然气地质, 2026, 47(2): 623-637. DOI: 10. 11743/ogg20260217.

ZHOU Jie, HE Xiaohu, LU Jingsong, et al. Developmental characteristics and exploration prospects of the Neogene Miocene volcanic rock reservoirs in the Songnan-Baodao Sag and its periphery, Qiongdongnan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(2): 623-637. DOI: 10. 11743/ogg20260217.

火山岩油气藏广泛分布于全球各油气盆地中,目前,世界上 50 多个国家和地区的 300 余个盆地和区块内发现了火山岩油气藏或在火成岩层段发现了良好的油气显示^[1-2],其中在 13 个国家的 40 个盆地内的火山岩中获得了工业性油气流和大规模的储量。中国在松辽盆地^[3-5]、准噶尔盆地^[6-8]、塔里木盆地^[9]、渤海湾盆地^[10-14]、四川盆地^[15-18]和三塘湖盆地^[19-20]等也发现了多个大-中型火山岩油气田,从酸性岩到基性岩、从熔岩到火山碎屑岩、火山碎屑熔岩再到沉火山碎屑岩中均有油气发现,证实了火山岩具备发育大-中型油气田的良好条件。近年来,琼东南盆地东区多口钻井揭示了火山岩在新生界渐新统和中新统中均有发育,岩性包括中-基性熔岩和火山碎屑岩,但始终未发现规模油气藏。

近期,琼东南盆地松南-宝岛凹陷北缘松涛凸起钻探了 S29-A-1Sa 井,发现了盆地内第一个火山岩气藏,该井在 71.65 m 厚的火山碎屑岩中发现了厚 24.00 m 的气层,获得火山岩新领域勘探突破。三维地震资料显示,松南-宝岛凹陷发育多个火山岩带以及火山机构群,规模较大。但目前对该区火山岩的岩性-岩相、储层特征和储层发育控制因素等方面的认识尚不清晰,制约了火山岩领域的进一步勘探。

本文以琼东南盆地松南-宝岛凹陷 S29-A-1Sa 井为例,通过壁心(井壁岩心)和薄片鉴定、粒度分析、扫描电镜和面孔率分析等手段对火山岩岩性-岩相进行识别,分析储层的储集空间类型及结构,通过孔隙度和渗透率测试、核磁共振测试等分析储层的物性特征和微观孔隙直径特征,进一步分析研究区火山岩储层的控制因素,再通过区域地质特征和地震剖面分析研究区火山岩的成藏特征,综合以上分析结果和认识提出火山岩储层的有利区带,为后续勘探提供地质理论支持。

1 区域地质概况

琼东南盆地是中生界结晶基底上发育起来的新生

代大陆边缘断陷盆地,位于太平洋和特提斯两大构造域的交接部位,受欧亚板块、印澳板块和太平洋板块的共同影响,为全球构造活跃的边缘海盆地之一^[21-23]。受断裂系统控制,盆地自北向南依次划分为北部坳陷带、中部隆起带、中央坳陷带和南部隆起带 4 个一级构造单元。盆地演化可划分为始新世—早渐新世断陷阶段、晚渐新世断—拗转换阶段、早—中中新世热沉降阶段及晚中新世以来的加速沉降阶段^[24-25],地层从老到新依次为古近系的始新统岭头组与渐新统崖城组和陵水组,新近系的中新统三亚组、梅山组和黄流组与上新统莺歌海组,以及第四系的更新统乐东组(图 1)。

S29-A-1Sa 井位于松南-宝岛凹陷北部松涛凸起 F2 断裂火山岩带,该井在中新统黄流组发现了火山岩气藏,火山岩段埋深为 2 008.00 ~ 2 079.65 m,岩性为中-基性火山碎屑岩,揭示了 24 m 厚气层,储层岩性主要为玄武安山质凝灰岩和玄武安山质火山角砾岩,上覆地层为莺歌海组,主要发育厚层泥岩,具有较好的封盖性。松南-宝岛凹陷及周缘中新统发育大面积连片的火山机构,共刻画出炉火山岩带、F12-1 断裂火山岩带和 F2 断裂火山岩带,总面积超 400 km^2 ,勘探前景广阔。

2 火山岩岩性-岩相特征

2.1 火山岩岩性特征

火山碎屑岩按结构和粒度特征^[26]可划分为凝灰岩(粒径 < 2 mm)、火山角砾岩(粒径 = 2 ~ 64 mm)和火山集块岩(粒径 > 64 mm);根据成分特征又可分为流纹质、安山质和玄武安山质凝灰岩、角砾岩和集块岩等。

本次研究通过壁心薄片镜下鉴定,确定其成分和粒度特征,将松南-宝岛凹陷火山碎屑岩具体划分为 4 种岩性,分别为玄武安山质凝灰岩、玄武安山质含角砾凝灰岩、玄武安山质火山角砾岩和玄武安山质含集

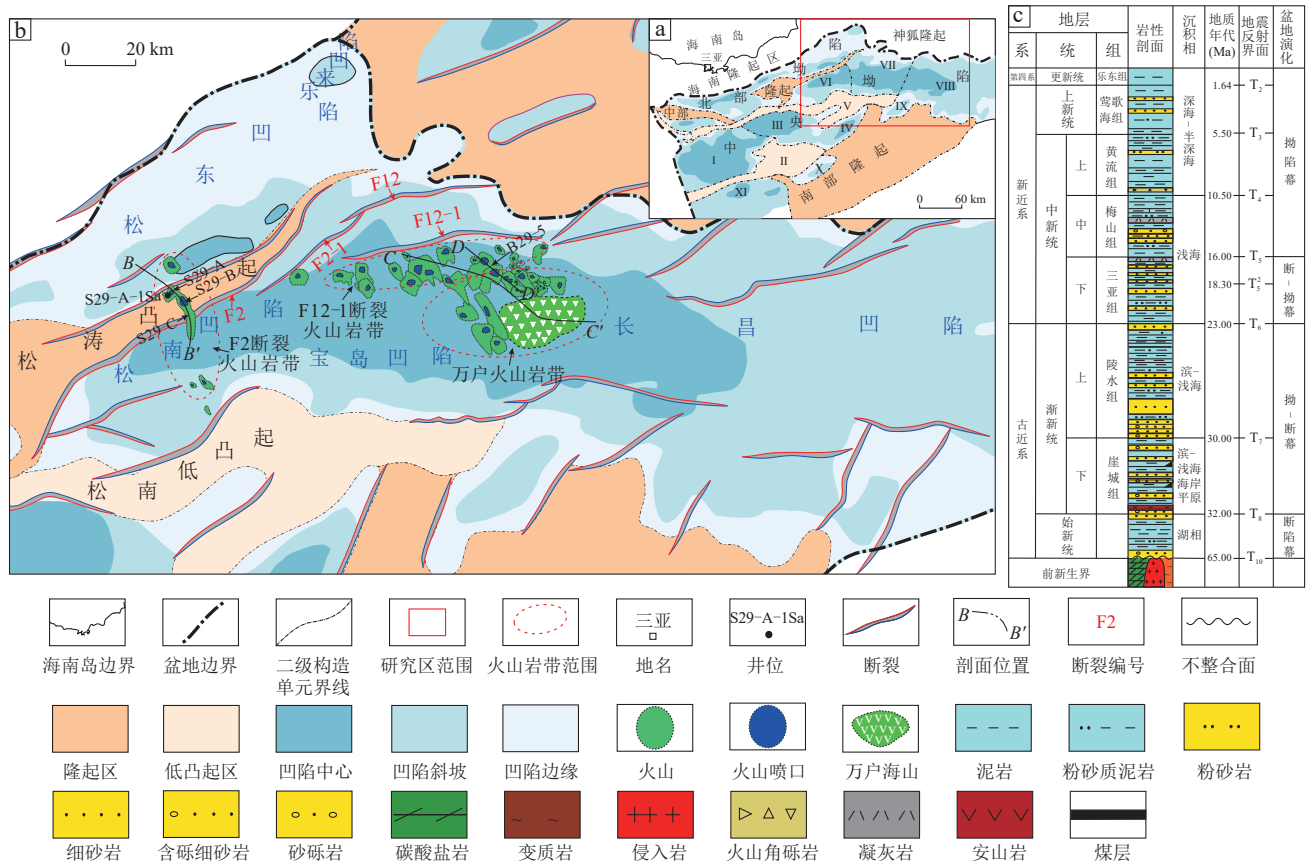


图1 琼东南盆地松南-宝岛凹陷区域位置(a)、岩浆活动分布(b)及地层综合柱状图(c)

Fig. 1 Regional tectonic location (a), magmatic activity distribution (b), and composite stratigraphic column (c) of the Songnan-Baodao Sag, Qiongdongnan Basin

I. 乐东凹陷; II. 陵南低凸起; III. 陵水凹陷; IV. 北礁凹陷; V. 松南低凸起; VI. 松南凹陷; VII. 宝岛凹陷; VIII. 长昌凹陷; IX. 长昌D注; X. 甘泉凹陷; XI. 华光凹陷

块火山角砾岩(图2)。玄武安山质凝灰岩颜色为灰-灰黄-灰绿色,凝灰成分主要为晶屑和岩屑,晶屑主要为板状斜长石和少量石英,含量约占30%;岩屑主要为凝灰岩和玄武岩岩屑,含量占10%~15%;胶结物主要为火山灰,含量占55%~60%(图2a)。玄武安山质含角砾凝灰岩颜色为黄灰色,其中含有少量火山角砾,粒径为3~40 mm,角砾主要为凝灰岩和玄武安山岩岩屑(含量约占15%);凝灰成分主要为凝灰岩和气孔玄武安山岩岩屑(含量占10%~15%),以及斜长石和少量石英晶屑(含量约占20%);胶结物主要为火山灰,含量为50%~55%(图2b)。玄武安山质火山角砾岩颜色为黄灰色,角砾主要为气孔玄武安山岩和凝灰岩岩屑(含量占30%~35%);凝灰成分主要为斜长石和少量石英晶屑(含量约占30%);胶结物主要为火山灰,含量占35%~40%(图2c)。玄武安山质含集块火山角砾岩颜色为灰黄色,块状构造,颗粒支撑,颗粒磨圆度为次棱角状-次圆状,分选较差,集块主要为气孔玄武安山岩岩屑,含量为20%~25%;角砾主要为气孔玄武安山岩

和凝灰岩岩屑,含量为45%~50%;凝灰成分主要为斜长石和少量石英晶屑,含量为15%~20%;胶结物主要为火山灰,含量为10%~15%(图2d)。

2.2 火山岩岩相特征

爆发相是指从同一个喷出口的一次连续猛烈喷发形成的火山碎屑密度流堆积体,受重力控制发生侧向移动而形成的火山碎屑流堆积单元^[27-28]。平面上表现为向某一方向呈放射状分布的形态,在地震剖面中呈丘状或席状形态,火山锥形态为圆台或圆锥状,地层结构为似层状。爆发相可进一步划分为热碎屑流亚相、(热)基浪亚相、火山碎屑裙亚相和火山碎屑简亚相等。

基浪是一种碎屑密度流,其碎屑物和动量是通过稀释的高度紊流状悬浮颗粒广泛分散而成^[29-32]。从地震相来看,基浪亚相表现出似层状且连续性较好的特征(图3a,b);从纵/横波速度比(v_p/v_s)来看,基浪亚相表现为高亮暖色调特征(图3c);从地质模式来看,基浪

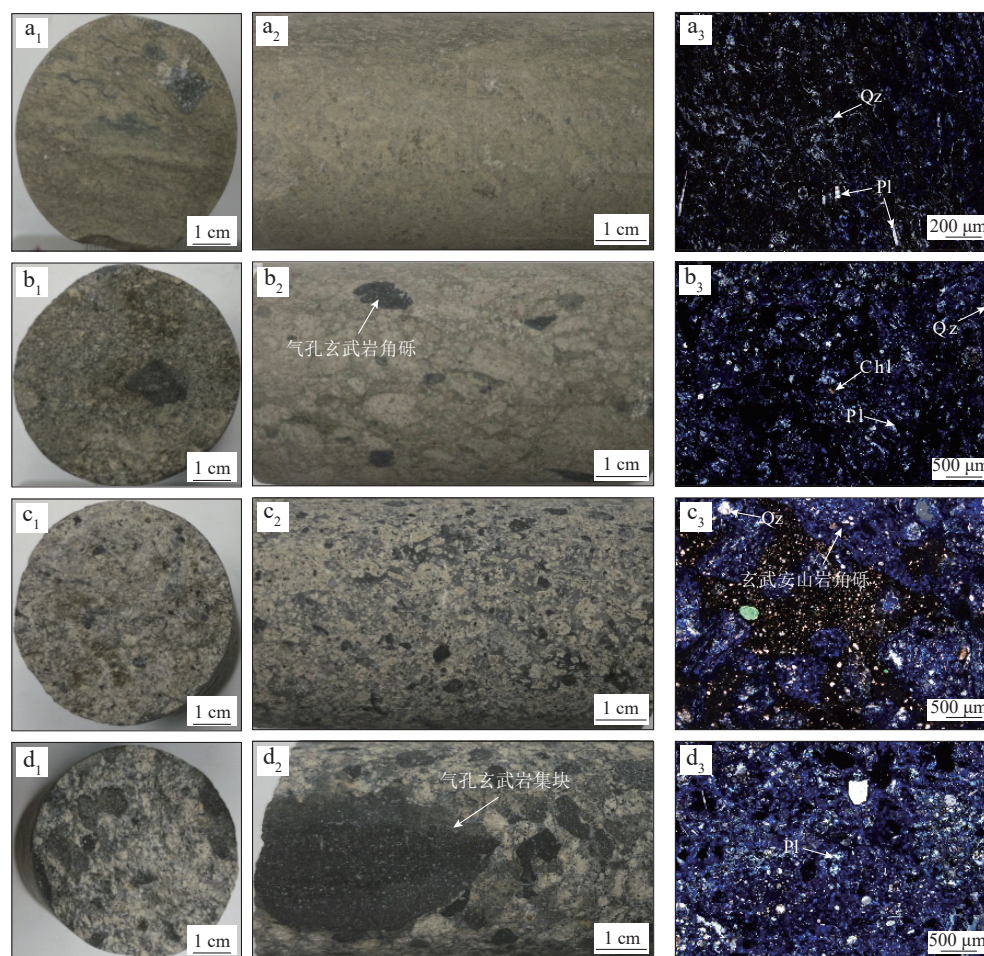


图2 松南-宝岛凹陷S29-A-1Sa井中新统火山碎屑岩岩性特征照片

Fig. 2 Sidewall core photos and micrographs showing the lithologic characteristics of the Miocene pyroclastic rocks in well S29-A-1Sa,

Songnan-Baodao Sag

a₁—a₃, 玄武安山质凝灰岩,埋深2 020.0 m;b₁—b₃, 玄武安山质含角砾凝灰岩,埋深2 059.0 m;c₁—c₃, 玄武安山质火山角砾岩,埋深2 077.5 m;d₁—d₃, 玄武安山质含集块火山角砾岩,埋深2 050.0 m;a₁—d₁,a₂—d₂, 壁心照片;a₃—d₃, 铸体薄片,显微照片,正交偏光(Qz为石英;Pl为斜长石;Chl为绿泥石。)

亚相表现为随离火山口距离变远,粒度逐渐减小,平行层理逐渐发育(图3d);从电性特征来看,基浪亚相表现为低电阻率(气层段表现为高电阻率)、低密度、低伽马值和高声波时差的特征(图4)。

基于前人提出的5相15亚相划分方案^[33],结合现代火山的分类方案,梳理出了本研究区的火山岩岩相分类方案,进一步识别出了亚相单元的微相结构。通过壁心和薄片资料分析了松南-宝岛凹陷火山岩岩性和组构特征、地震相和地震波参数特征,根据离火山口位置和岩石组构特征等在研究区识别出了爆发相基浪亚相的火山口-近火山口、近源和远源3个微相。

火山口-近火山口微相的火山集块岩和集块角砾岩厚度可达数十米,近源微相的火山角砾岩和角砾凝灰岩厚度可达数米,远源微相的凝灰岩厚度也可达数

米。对3个微相的壁心和薄片资料进行粒度分析,结果显示(图3d),火山口-近火山口微相的玄武安山质含集块火山角砾岩中,集块直径为64.0~128.0 mm,角砾直径以2.0~4.0 mm和4.0~8.0 mm为主,凝灰粒径以1.0~2.0 mm和0.5~1.0 mm为主,角砾含量较多,集块体积含量较大,该微相颗粒最粗,分选差。近源微相的玄武安山质火山角砾岩中,角砾直径以为2.0~16.0 mm为主,凝灰粒径以62.500~125.000 μm和125.000~250.000 μm为主,壁心中未观察到集块,以角砾为主,粒度变小,分选较好。远源微相的玄武安山质凝灰岩和玄武安山质含角砾凝灰岩中,部分含有少量角砾,角砾直径以2.0~4.0 mm为主,凝灰粒径以15.625~31.250 μm和31.250~62.500 μm为主,薄片可观察到部分颗粒在喷发过程中发生破碎,颗粒较细,分选中等。

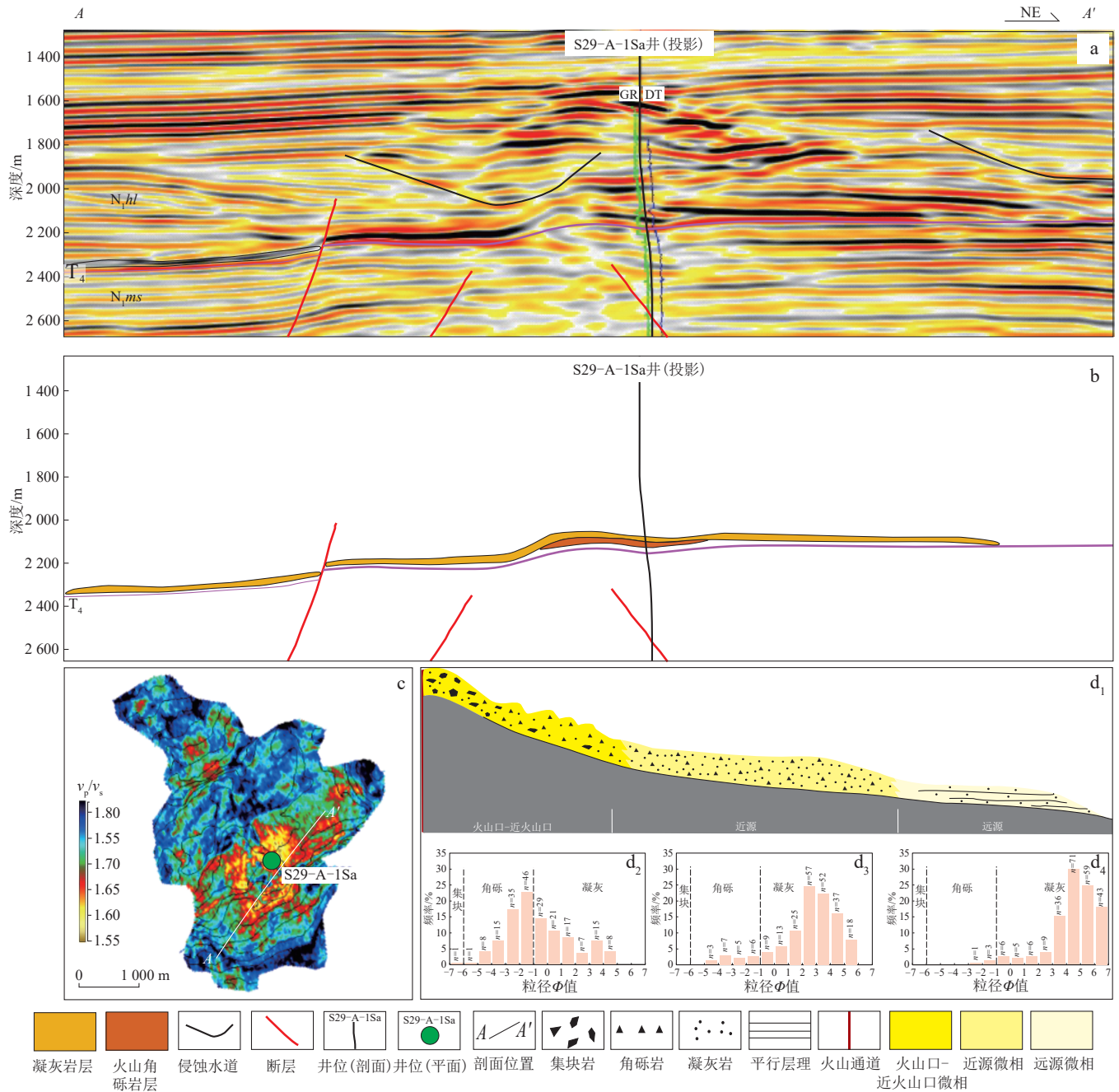


图3 松南-宝岛凹陷中新统火山岩基浪亚相特征

Fig. 3 Characteristics of base surge subfacies of the Miocene volcanic rocks in the Songnan-Baodao Sag

a. 过S29-A-1Sa井地震剖面(剖面位置见图3c); b. S29-A构造基浪亚相火山岩分布特征剖面; c. S29-A构造黄流组I气组顶部最小纵/横波速度比(v_p/v_s)平面分布; d₁. 基浪亚相岩相模式图; d₂—d₄. 分别为玄武安山质含集块火山角砾岩、玄武安山质火山角砾岩和玄武安山质含角砾凝灰岩粒度频率分布直方图(N_{1hl} 为黄流组; N_{1ms} 为梅山组; T_4 为梅山组顶部地震反射界面; n 为样本个数。)

3 火山岩储层发育特征

3.1 储集空间类型及组成结构

根据岩石中储集空间的形成阶段和几何形态,将其划分为原生孔-缝和次生孔-缝^[34-35]。利用72张壁

心照片和96张铸体薄片显微照片的面孔率分析,以及12张扫描电镜照片的观察鉴定与分析,在研究区共识别出7类9型储集空间,其中原生孔2类3型,次生孔1类2型,次生缝4类4型。原生孔主要为气孔、杏仁体内孔和颗粒间孔,次生孔主要为晶内溶蚀孔和基质溶蚀孔,次生缝主要为风化缝、构造缝、解理缝和由上述各类裂缝被溶蚀形成的溶蚀缝(表1)。

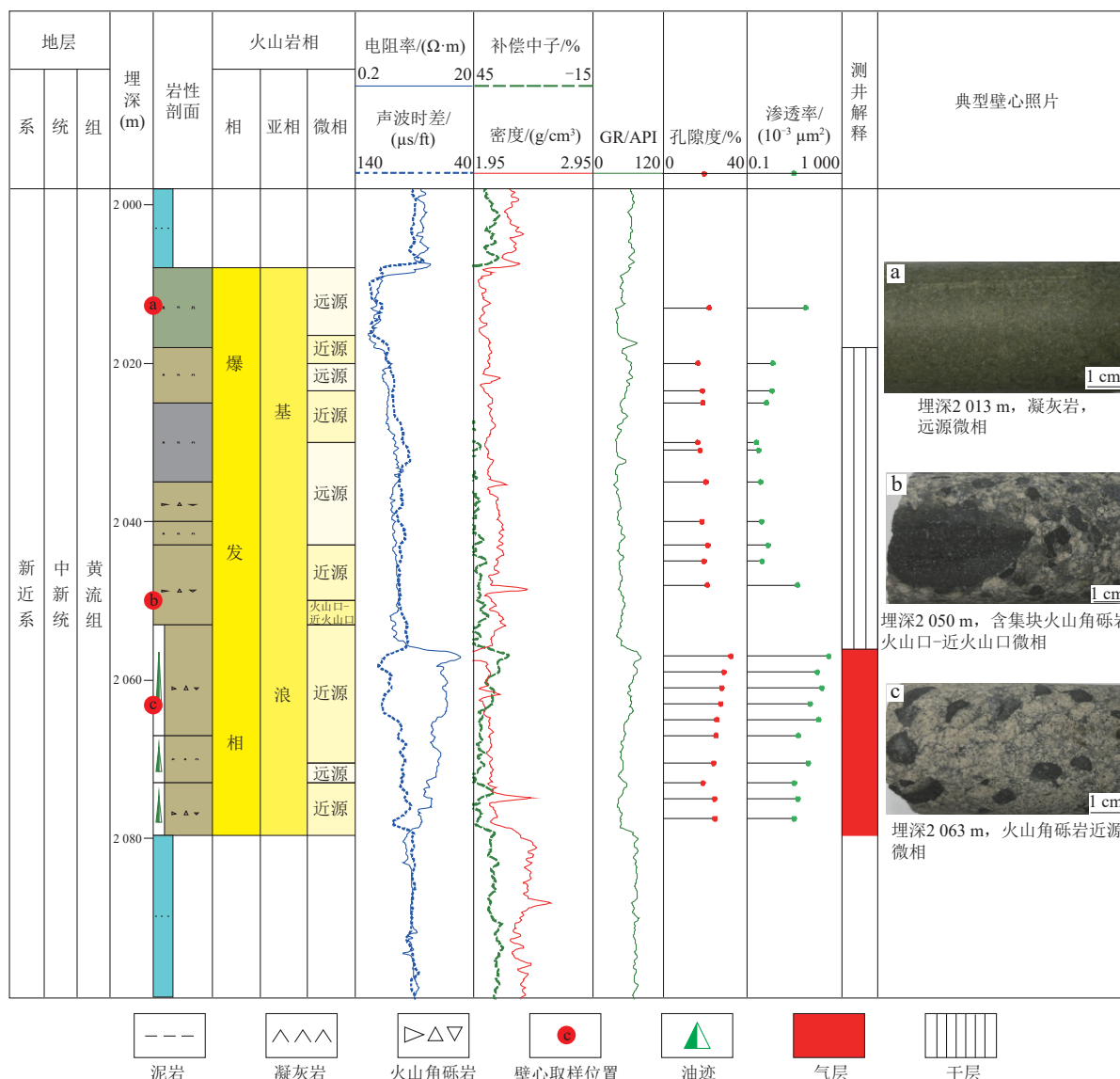


图4 松南-宝岛凹陷S29-A-1Sa井火山碎屑岩地层综合柱状图

Fig. 4 Composite stratigraphic column of pyroclastic rocks in well S29-A-1Sa, Songnan-Baodao Sag

3.1.1 气孔

岩浆在通道内上升过程中挥发分逸出形成气孔。研究区火山角砾岩中发育较多气孔,多为球形-椭圆形,直径为0.1~0.5 mm,受后期裂缝改造,连通性较好(图5a)。

3.1.2 杏仁体内孔

研究区火山角砾岩中碎屑颗粒多为玄武安山岩,杏仁体内孔较发育,呈杏核状,内壁较光滑,直径为0.1~0.4 mm,连通性较好(图5b)。

3.1.3 颗粒间孔

颗粒间孔在岩浆同期喷发阶段形成。研究区火山

碎屑岩中发育较多颗粒间孔,多分布在碎屑颗粒边缘,形态不规则,大小不一,连通性较好,对研究区火山碎屑岩孔隙度有一定贡献(图5c)。

3.1.4 晶内容蚀孔

岩石中的长石斑晶或角砾中的矿物颗粒被溶蚀产生晶内容蚀孔。根据溶蚀程度不同,可形成铸模孔、筛状孔和晶内容蚀微孔3种大小的形态,在研究区火山碎屑岩中均有发育。铸模孔为矿物斑晶完全被溶蚀产生的孔隙,仍保留矿物晶体的假象,连通性好,表明溶蚀作用强;筛状孔为矿物斑晶部分区域被溶蚀产生的孔隙,该类孔隙规模比铸模孔小,具有一定的连通性,表明有一定的溶蚀作用;晶内容蚀微孔为矿物斑晶被部分溶蚀产生的细小孔隙,孔隙不连片,具有一定的连

表 1 松南-宝岛凹陷中新统火山岩储集空间类型

Table 1 Reservoir space types and categories of the Miocene volcanic rocks in the Songnan-Baodao Sag

形成阶段	几何形态	类型		成因	特征	分布情况
原生	孔隙	气孔	气孔	熔浆中含有的挥发分随着岩浆上升,减压发生脱气作用产生气泡,喷发到地表冷却过程中被岩石固定成气孔	形态以圆形和椭球形为主,直径差异大,呈线状定向分布或离散分布;连通率与气孔的孔隙度、裂缝发育程度呈正相关	火山角砾岩中较发育
			杏仁体内孔	具有气孔构造的岩石,其气孔被矿物质(如方解石和石英等)所充填形成的一种形似杏仁状的构造	杏仁体中未充填部分的残余孔隙和充填物之间的晶间微孔,形态多样	火山角砾岩中较发育
		颗粒间孔		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留下来的孔隙	形态不规则,通常沿碎屑边缘分布,连通性较好	火山角砾岩中较发育
次生	孔隙	溶蚀孔	晶内溶蚀孔	岩石中的矿物(辉石、角闪石和长石等)被部分溶蚀产生的孔隙	根据溶蚀程度可产生铸模状、筛状和海绵状孔,连通性由好到一般,溶蚀作用由强到弱	火山碎屑岩内均发育
			基质溶蚀孔	岩石中的基质被部分溶蚀产生的孔隙	细小的海绵状孔,具有一定的连通性,溶蚀/溶解作用弱	火山碎屑岩内均发育
	裂缝	风化缝		深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	方向不定,形状多样,延伸性较差	火山碎屑岩内均发育
		构造缝		火山岩成岩后遭受张性/剪切应力作用产生的裂缝	剪切缝高角度、缝面平直;张性缝呈不规则网状、连通性好	火山碎屑岩内均发育
		解理缝		岩石中的矿物(如长石和角闪石等)沿解理发生溶蚀产生的裂缝	沿矿物解理方向发育,溶蚀/溶解作用较强	火山碎屑岩内均发育
		溶蚀缝		上述各类裂缝在大气水和地层流体等的作用下发生溶蚀作用,使原来的裂缝扩大	在已有的形态基础上可改造为多样的形态	火山碎屑岩内均发育

通性,表明溶蚀作用较弱。基质溶蚀孔在研究区火山碎屑岩中均发育不同溶蚀程度的溶蚀孔(图 5d)。

3.1.5 基质溶蚀孔

岩石中的基质被溶蚀形成基质溶蚀孔,根据溶蚀程度的不同可形成孔洞-海绵状微孔的形态。孔洞形态较规则,多呈圆状,直径较大,连通性较好,表明溶蚀作用强;细小的海绵状微孔形态不规则,直径较小,具有一定的连通性,表明溶蚀作用较弱。基质溶蚀孔在研究区火山碎屑岩中均有发育(图 5e)。

3.1.6 风化缝

研究区火山角砾岩中可见风化微裂缝,呈锯齿状,未被充填,延伸较短,壁心尺度下的长度为 1~3 cm,薄片尺度下的长度约为 3 mm(图 5f)。

3.1.7 构造缝

研究区火山碎屑岩通常发育较少的构造缝,在火山角砾岩中识别出了少量的构造缝,成组出现,几乎未被充填,缝面较平直,沿构造缝发育较多溶蚀孔(图 5g)。

3.1.8 解理缝

岩石中的长石和角闪石等矿物颗粒在溶蚀作用

下,沿着矿物解理产生微裂缝。该类裂缝成组出现,在其周围可见溶蚀孔发育,连通性较好,研究区凝灰岩和火山角砾岩中均有发育(图 5h)。

3.1.9 溶蚀缝

火山碎屑岩中发育的部分风化缝和构造缝在酸性流体作用下被溶蚀,可观察到缝面被明显加宽,沿溶蚀缝发育较多溶蚀孔。溶蚀缝在研究区凝灰岩和火山角砾岩中均有发育(图 5i)。

为了定量分析研究区火山岩的储集空间构成特征,对铸体薄片进行了面孔率分析。结果显示,研究区火山岩整体孔-缝较发育,以孔隙为主,面孔率为 9.85%~48.65%,几何平均值为 23.65%,整体为孔隙-裂缝型储层。储集空间以基质溶蚀孔、晶内溶蚀孔和玄武岩角砾中发育的杏仁体内孔为主,占据了总储集空间的 84%左右。另外发育较少的颗粒间孔和少量的未被充填的气孔、风化缝、构造缝、长石解理缝和溶蚀缝(图 6)。

3.2 储层物性特征

研究区 21 个火山碎屑岩样品的孔隙度和渗透率分析结果显示两者呈正相关关系。从整体看,孔隙度范围为 16.2%~32.2%,几何平均值为 21.8%;渗透率

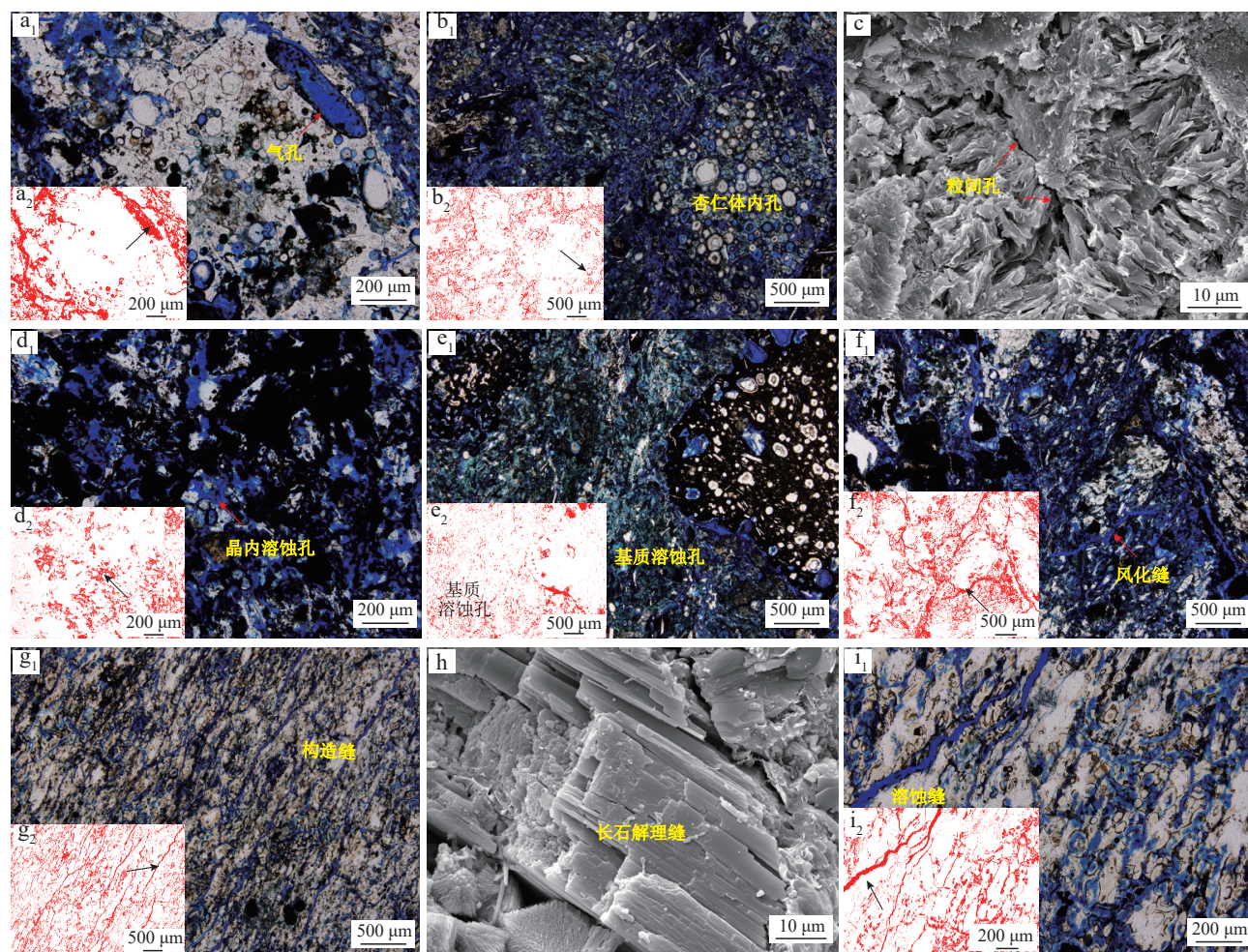


图5 松南-宝岛凹陷S29-A-1Sa井中新统火山岩储集空间特征显微照片

Fig. 5 Micrographs showing the reservoir space characteristics of the Miocene volcanic rocks in well S29-A-1Sa, Songnan-Baodao Sag
a₁. 玄武山质火山角砾岩,玄武山岩角砾中发育气孔,埋深2 053.0 m; b₁. 玄武山质含角砾凝灰岩,玄武山岩角砾中发育杏仁体内孔,埋深2 023.5 m; c. 玄武山质凝灰岩,颗粒间孔,埋深2 031.0 m; d₁. 玄武山质含角砾凝灰岩,长石表面发育晶内溶蚀孔,埋深2 059.0 m; e₁. 玄武山质含角砾凝灰岩,基质溶蚀孔,埋深2 025.0 m; f₁. 玄武山质火山角砾岩,岩石表面发育风化缝,埋深2 053.0 m; g₁. 玄武山质凝灰岩,构造缝成组发育,埋深2 013.0 m; h. 玄武山质含角砾凝灰岩,长石沿解理产生解理缝,埋深2 070.5 m; i₁. 玄武山质凝灰岩,风化缝被溶蚀形成溶蚀缝,埋深2 013.0 m; a₂—i₂. 分别为a₁—i₁图中提取的孔隙分布图像;a₁, b₁, d₁—g₁, i₁. 铸体薄片,单偏光;c, h. 扫描电镜

范围为 $(0.245 \sim 273.000) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,几何平均值为 $5.870 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图7a)。从岩性看,凝灰岩表现为中-高孔、低渗特征,火山角砾岩表现为高孔、中渗特征。研究区火山碎屑岩储层物性较好,整体上属于优质火山岩储层。

研究区共有4个火山碎屑岩样品的核磁共振测试结果,测试样品均为直径2.5 cm、长约3.0 cm的柱状样品,样品测试在中海油海南实验中心完成。测试结果显示,样品核磁共振弛豫时间(T_2)为0.1~500.0 ms,多呈高幅和中-高幅双峰态,表明该区火山碎屑岩样品中具有小直径和大直径两类孔隙,且大直径峰值较高、孔隙占比较大,与孔隙度测试结果有较好的对应性(图7b)。通过与储集空间类型对比可知,弛豫时

间 ≤ 10 ms的部分对应着溶蚀微孔;弛豫时间 > 10 ms的部分对应着岩石中的气孔、杏仁体内孔、颗粒间孔或由矿物完全溶蚀形成的铸模孔。

3.3 储层控制因素

3.3.1 岩性

火山岩储层物性具有随着埋深增加而减小的趋势,通常埋深在3 km以浅时,火山碎屑岩可具有较好的储层物性^[36]。研究区火山碎屑岩埋深为2 000~3 000 m,通过孔隙度、渗透率和埋深的交汇图来看,二者与埋深未见有相关关系,而是与岩性有较明显关系(图8)。根据实测孔、渗结果,凝灰岩段孔隙度为

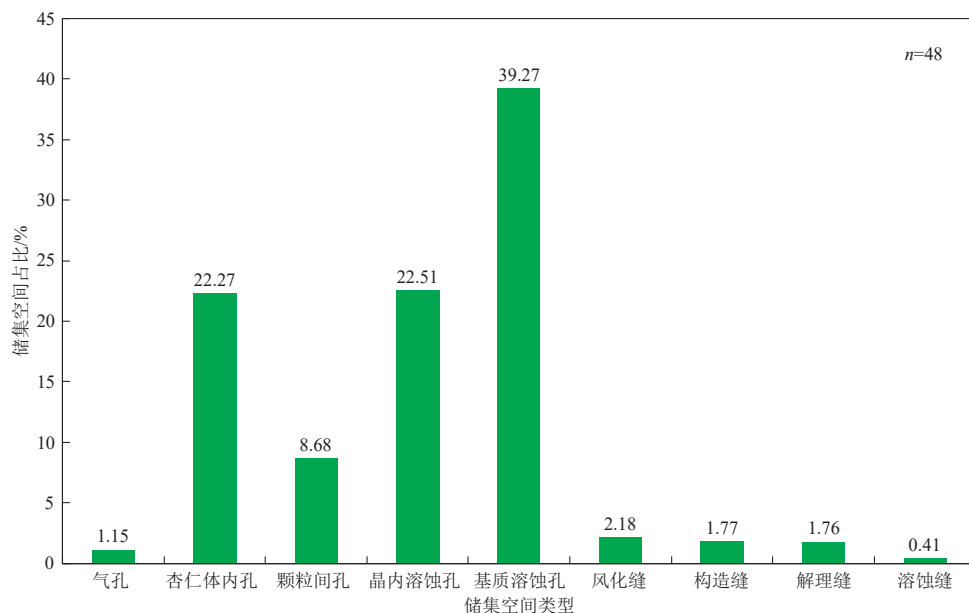


图6 松南-宝岛凹陷中新统火山岩不同类型储集空间分布柱状图

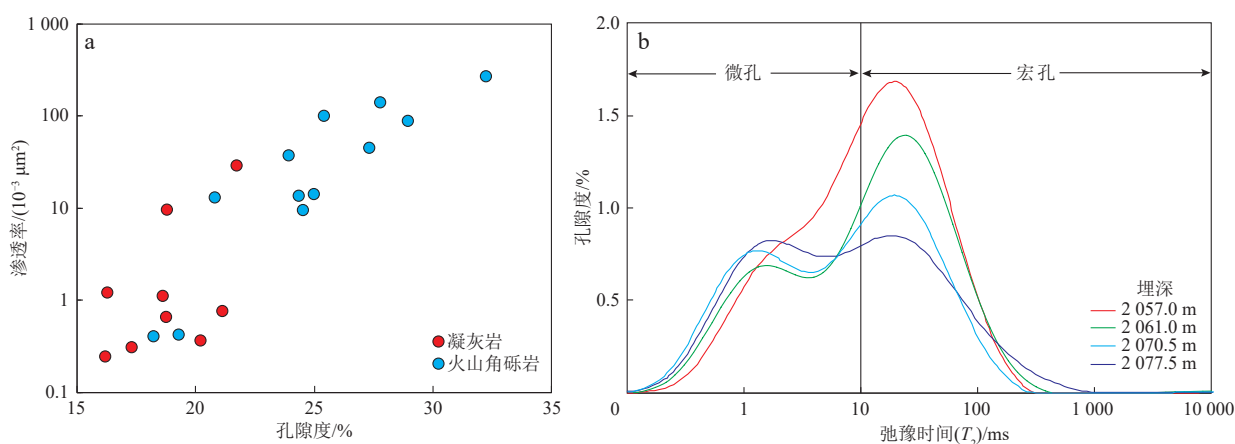
Fig. 6 Bar chart showing the reservoir space composition of the Miocene volcanic rocks in the Songnan-Baodao Sag
n. 样品个数

图7 松南-宝岛凹陷中新统火山岩储层物性(a)和微观孔隙(b)特征

Fig. 7 Characteristics of the physical properties (a) and microscopic pores (b) of the Miocene volcanic reservoirs in the Songnan-Baodao Sag

16.3% ~ 21.7%, 几何平均值为 18.7%; 渗透率为 $(0.245 \sim 29.100) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 几何平均值为 $1.205 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。火山角砾岩段孔隙度为 18.2% ~ 32.2%, 几何平均值为 24.5%; 渗透率为 $(0.408 \sim 273.000) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 几何平均值为 $19.232 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。相比凝灰岩而言, 火山角砾岩储层物性更优。

3.3.2 岩相

不同微相发育的储集空间类型及其构成特征不同, 表现出的储层物性特征也不相同。对研究区 3 个微相的储集空间类型占比、孔隙度和渗透率进行了统计分析, 建立了微相尺度的火山岩精细储层分布模式。

由于火山口-近火山口微相数据量较小, 不具有代表性, 因此本次研究对火山口-近火山口微相不予讨论。

统计分析结果显示, 近源微相面孔率为 13.38% ~ 48.65%, 几何平均值为 27.99%, 其中以基质溶蚀孔、晶内溶蚀孔和杏仁体内孔最为发育(图 9a); 孔隙度为 18.2% ~ 32.2%, 几何平均值为 23.2%, 孔隙度主体分布在 20.0% ~ 25.0% (图 9b); 渗透率为 $(0.408 \sim 273.000) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 几何平均值为 $10.600 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 渗透率主体分布在 $(10.000 \sim 100.000) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图 9c)。

远源微相面孔率为 9.85% ~ 23.07%, 几何平均值为 17.34%, 其中以基质溶蚀孔和杏仁体内孔最为发育

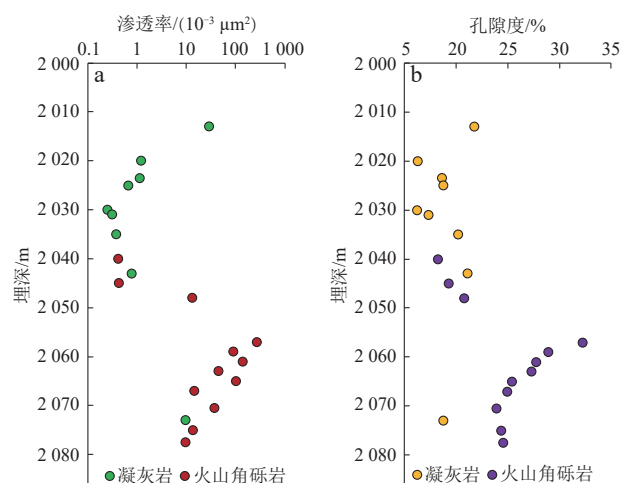


图8 松南-宝岛凹陷中新统火山岩岩性与物性的关系

Fig. 8 Relationships of reservoir porosity and permeability with lithologies for the Miocene volcanic rocks in the Songnan-Baodao Sag

a. 埋深 vs. 渗透率; b. 埋深 vs. 孔隙度

(图9d); 孔隙度为16.2%~28.9%, 几何平均值为19.7%, 孔隙度主体分布在15.0%~20.0%(图9e); 渗透率为 $(0.245 \sim 89.400) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 几何平均值为 $2.250 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 渗透率主体分布在 $(0.100 \sim 1.000) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图9f)。

通过对比可发现, S29-A-1Sa井黄流组火山碎屑

岩位于火山机构近源相带, 胶结作用较弱, 原生孔隙更发育, 与远源相带相比储层物性更好。

3.3.3 溶蚀作用

火山岩地层在抬升至地表的同时接受风化溶蚀作用的改造, 这一过程可持续数千年至数十万年。另外, 火山岩地层在埋藏过程中也可接受地下流体的溶蚀作用, 对储层进行改造。

通过统计研究区内火山岩储集空间构成可知, 储集空间类型以次生孔隙为主, 岩石内的基质和矿物斑晶在排烃期酸性流体的溶蚀作用下形成溶蚀孔, 在增加储集空间的同时将孤立孔隙连通起来。通过铸体薄片观察, 原生孔-缝发育的火山岩对次生溶蚀作用的发生具有一定的促进作用, 其为地表流体渗流和地下有机酸性流体运移提供了良好的通道。从面孔率分析结果看, 溶蚀作用增孔占总孔的62.2%; 从各微相的统计结果来看, 溶蚀作用增孔占比为56.4%~64.3%(图10)。溶蚀作用在各微相储层中均存在, 其对研究区火山岩储层的改善效果显著。

3.3.4 构造作用

构造作用产生的裂缝可以起到沟通孔隙的作用,

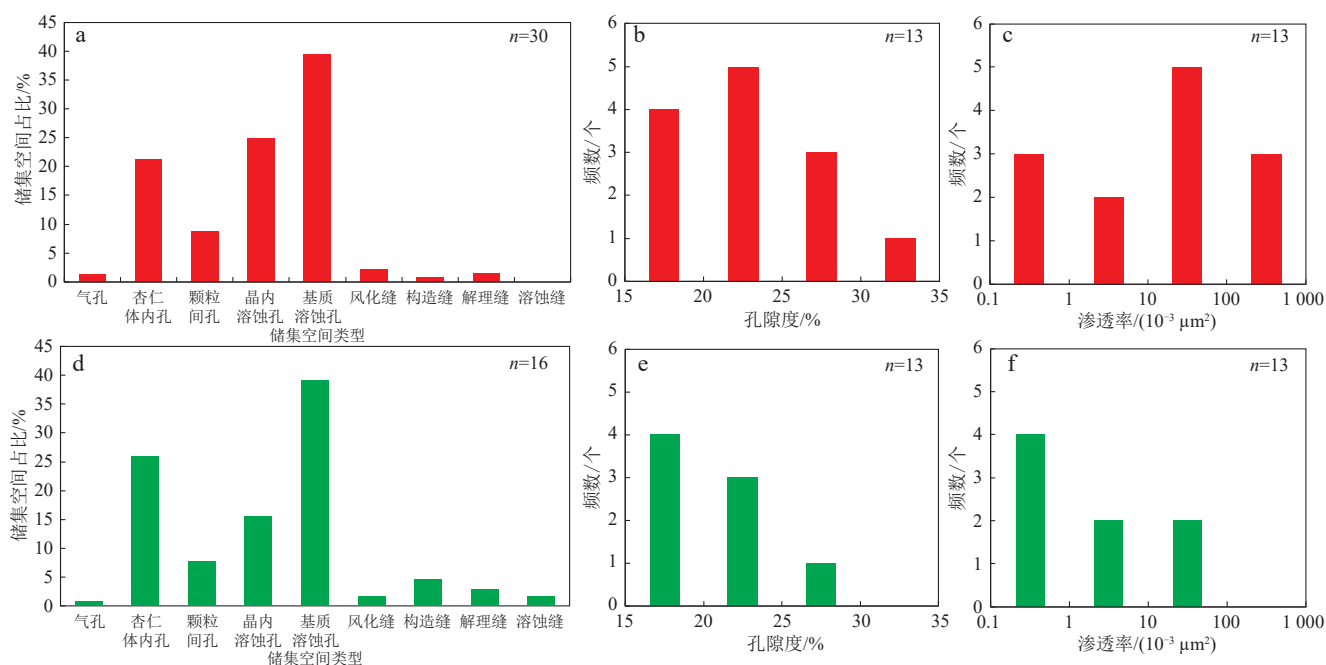


图9 松南-宝岛凹陷中新统爆发相基浪亚相火山岩储层特征

Fig. 9 Bar charts and histograms showing the characteristics of the Miocene volcanic reservoirs of the base surge subfacies of explosive facies in the Songnan-Baodao Sag

a. 近源微相不同类型储集空间分布柱状图; b. 近源微相孔隙度频率分布直方图; c. 近源微相渗透率频率分布直方图; d. 远源微相不同类型储集空间分布柱状图; e. 远源微相孔隙度频率分布直方图; f. 远源微相渗透率频率分布直方图

n. 样本个数

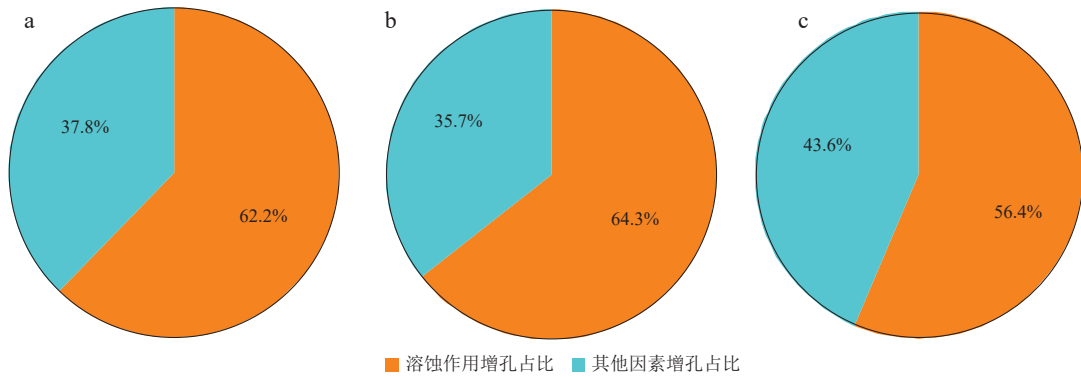


图10 松南-宝岛凹陷中新统火山岩不同岩相溶蚀作用增孔占比饼状图

Fig. 10 Pie charts showing dissolution-induced porosity enhancement in the Miocene volcanic rocks in the Songnan-Baodao Sag

a. 整体; b. 近源微相; c. 远源微相

其自身也可作为有效的储集空间。研究区内F2断裂从崖城组沉积时期之前开始活动,至黄流组沉积时期之后停止,活动速率为7~400 m/Ma。其中,黄流组沉积时期之后活动速率达到12 m/Ma,断裂活动形成多组构造裂缝,能够显著提升储层物性,裂缝发育段实测渗透率为 $(9.57 \sim 273.00) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,并且通过镜下观察发现这些裂缝能够沟通孤立的溶蚀孔和杏仁体内孔(图5g)。

4 中新统火山岩天然气成藏特征与勘探前景

4.1 S29-A构造天然气成藏特征

火山岩储层已被证实是一种良好的储集体,储层与烃源岩、盖层等成藏要素具有良好的时-空匹配关系时,将形成多类型的油气藏。S29-A构造中新统火山岩主要为近源型岩性油气藏,生烃模拟及包裹体分析表明,研究区天然气成藏期为5.5 Ma至今^[37],主要由松南凹陷崖城组和陵水组烃源岩供烃^[38],凹陷内主洼处于高-过成熟阶段,具备大规模生气条件,且松南凹陷烃源岩压力系数高、剩余压力大^[39-40],超压烃源岩为油气运移提供了充足的动力,在超压作用下油气通过F2断裂运移至黄流组火山碎屑岩储层中,同时上覆凝灰岩干层和浅海相厚层泥岩具有良好的封盖性,形成良好的储-盖组合,具备规模成藏的有利条件,呈松南凹陷崖城组-陵水组烃源岩供烃、超压驱动、断裂输导、持续充注、有效封盖的天然气成藏模式。S29-B和S29-C构造均发育中新统火山机构,与S29-A构造具有类似的成藏特征(图11)。

4.2 松南-宝岛凹陷中新统火山岩勘探前景

琼东南盆地东区新生代火成岩分布表现为“北喷、南侵,西喷、东侵”的特点。根据构造高低及断裂分布与组合特征,平面上将琼东南盆地松南-宝岛凹陷火山岩划分为3大区带,即万户火山岩带、F12-1断裂火山岩带和F2断裂火山岩带,总资源潜力超过千亿方。

4.2.1 多数火山机构位于生烃中心上方,烃源及运聚条件较好

从生烃强度与火山岩带关系来看,万户火山岩带位于供烃中心,生气强度大,供烃条件最好,其次为F12-1断裂火山岩带。中新世岩浆活动造成基底局部隆升,上覆崖城组与陵水组烃源岩发生局部皱弯,形成火山岩带良好汇聚背景。从基底及 $T_{6.2}$ (陵水组三段顶部地震反射界面)构造面来看,万户火山岩带与F12-1断裂火山岩带下方具有明显汇聚背景,大量发育的通源断裂为油气垂向运移至火山机构提供有利输导通道,其长期处于优势运聚方向,有利于油气持续充注。

4.2.2 火山机构连片分布,具备发育大规模优质储层的基本条件

本次研究在松南-宝岛凹陷周缘中新统火山岩优质储层的岩性-岩相、储层特征和成藏特征分析的基础上,综合利用钻井和三维地震资料,落实了松南-宝岛凹陷内围绕生烃中心、汇聚背景好、位于通源断裂发育区带和近源相带且规模大的火山机构目标(图12a)。这些目标主要分布在万户火山岩带北侧和F12-1断裂火山岩带南侧,数量分别为16个和3个,面积分别为228.0 km²和134.0 km²,火山机构纵向高度/横向长度比值(纵/横比)为1.0:3.3~1.0:7.7,推测为

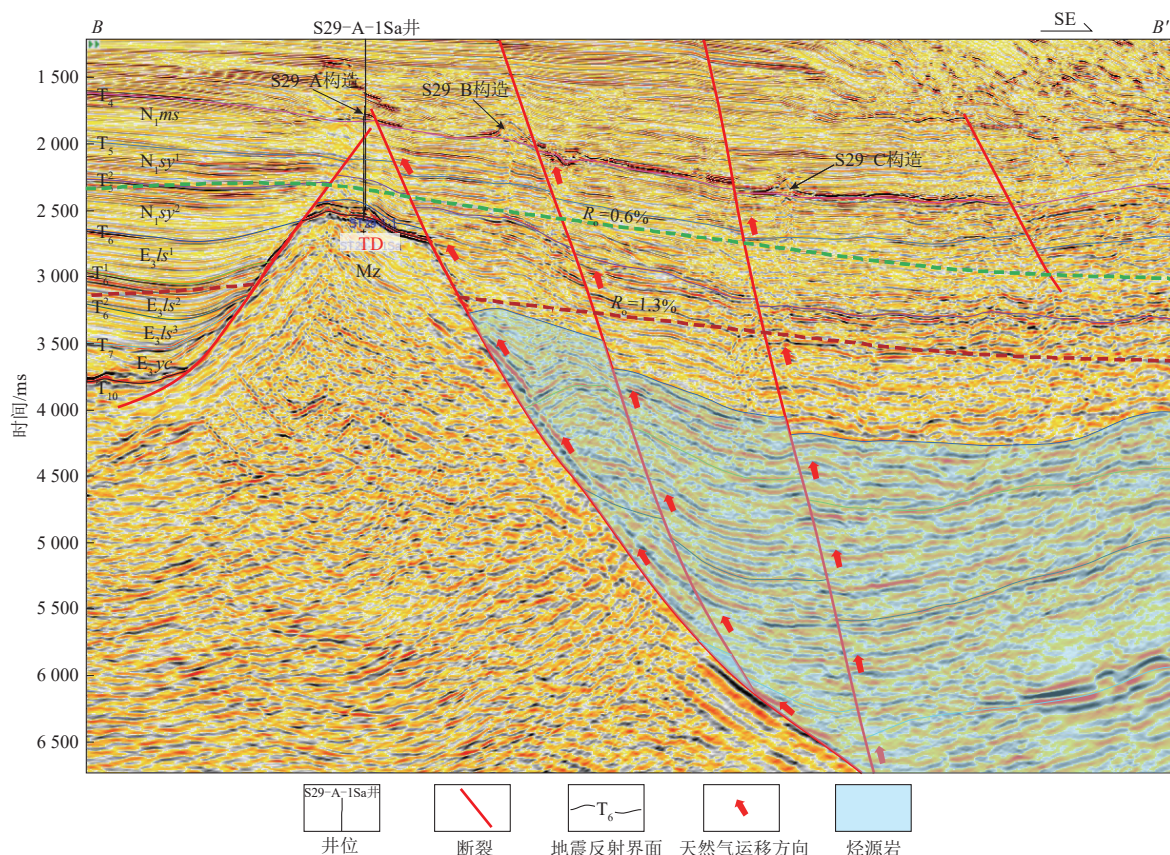


图 11 松南-宝岛凹陷中新统火山岩天然气运移特征剖面(剖面位置见图 1b)

Fig. 11 Section showing the natural gas migration in the Miocene volcanic rocks in the Songnan-Baodao Sag (see Fig. 1b for the section location)
 N_{1ms} . 梅山组; N_{1sy}^1 — N_{1sy}^2 . 三亚组一段—二段; E_3ls^1 — E_3ls^3 . 陵水组一段—三段; E_3yc . 崖城组; Mz. 中生界; T_4 . 梅山组顶部地震反射界面; T_5 . 三亚组顶部地震反射界面; T_5^2 . 三亚组二段顶部地震反射界面; T_6 . 陵水组顶部地震反射界面; T_6^1 . 陵水组二段顶部地震反射界面; T_6^2 . 陵水组三段顶部地震反射界面; T_7 . 崖城组顶部地震反射界面; T_{10} . 潜山顶部地震反射界面
 TD. 完钻深度; R_0 . 镜质体反射率

中-酸性火山机构,具有较好的储层条件。

4.2.3 重点勘探区带

F2断裂火山岩带规模较小,多丘叠置型火山机构不发育,裂缝较少,岩性为基性火山岩,因此未被纳入本次评价范围。因此本次优选的评价对象是规模大、中-酸性、多丘叠置的火山机构群,其具有更高的勘探成功率。

宝岛凹陷万户火山岩带火山机构位于生烃中心,火山机构整体处于正向构造背景,汇聚条件好,通源断裂发育,利于油气垂向输导;北侧火山机构连片发育,面积大,最大可达 44.5 km²;火山机构形态清晰、纵/横比范围为 1:3 ~ 1:8,均大于 1:10,推测属于偏中-酸性火山机构;火山机构内部为似层状反射,推测为爆发相基浪亚相火山岩,储层物性较好。因此勘探部署优选万户火山岩带北侧浅层含气特征明显的火山机构近源相带,单个火山机构面积为 1.6 ~ 44.5 km²,幅度为 50 ~ 500 m(图 12b)。

5 结论

1) 研究区识别出中-基性火山碎屑岩,根据粒度划分为玄武安山质凝灰岩、玄武安山质含角砾凝灰岩、玄武安山质火山角砾岩和玄武安山质含集块火山角砾岩。识别出爆发相基浪亚相,进一步可划分为火山口-近火山口、近源和远源微相。

2) 研究区火山岩识别出 7 类 9 型储集空间,以次生溶蚀孔和原生杏仁体内孔最为发育,储层类型为孔隙-裂缝型。整体属于优质火山岩储层,大直径孔隙较发育。分析认为储层控制因素为岩性-岩相、溶蚀作用和构造作用。呈现松南凹陷供烃、超压驱动、断裂输导、持续充注、有效封盖的天然气成藏模式。

3) 松南-宝岛凹陷中新统发育大面积火山机构,主要构成 3 大火山岩带。其中,万户火山岩带位于宝

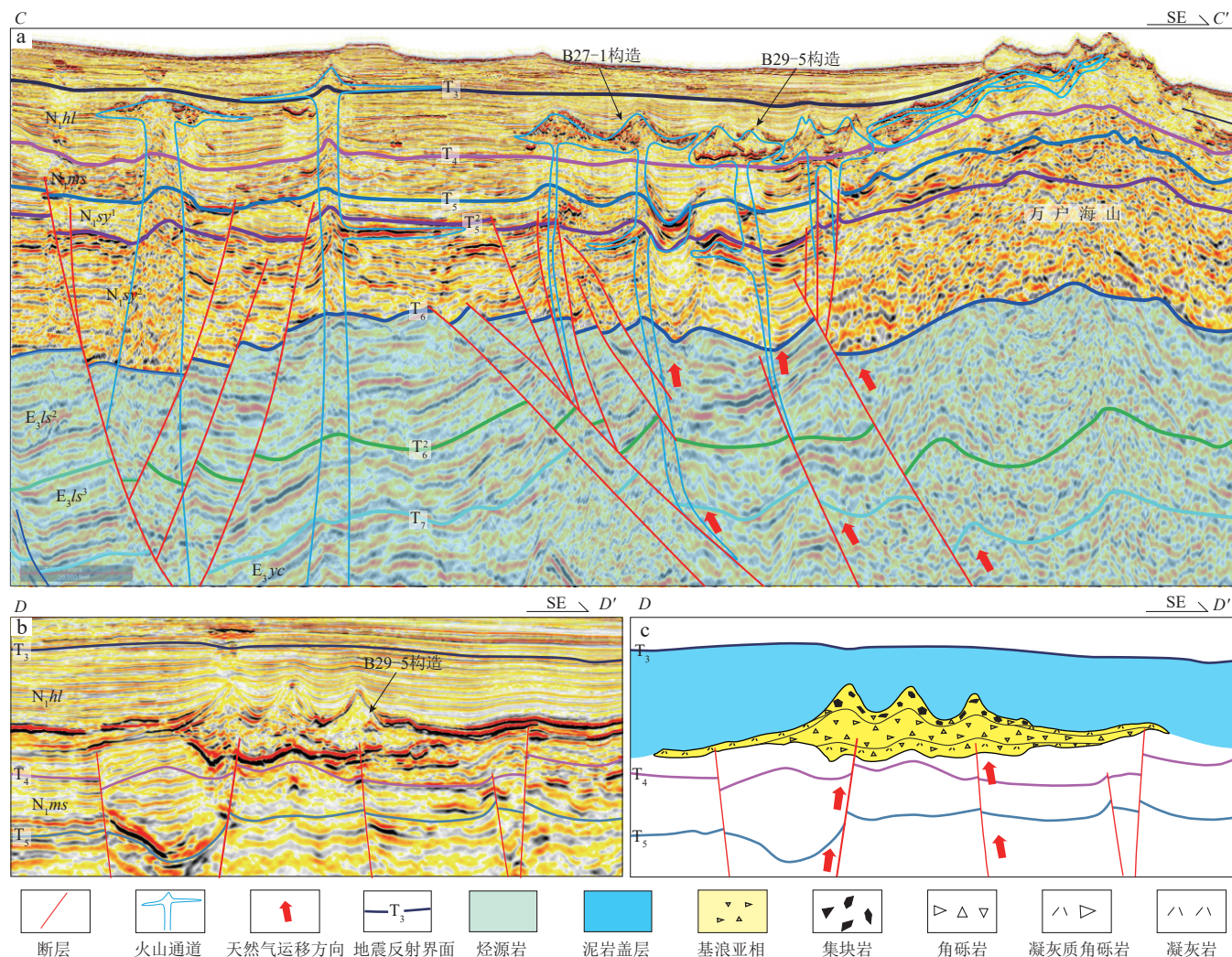


图12 松南-宝岛凹陷中新统火山机构发育特征(剖面位置见图1b)

Fig. 12 Sections showing the developmental characteristics of the Miocene volcanic edifices in the Songnan-Baodao Sag (see Fig. 1b for the section locations)

a. 整体火山机构特征; b. B29-5构造火山机构特征; c. B29-5构造火山岩特征

N_{1hl} 黄流组; N_{1ms} 梅山组; N_{1sy}^1 — N_{1sy}^2 三亚组一段—二段; E_3ls^2 — E_3ls^3 陵水组一段—三段; E_3yc 崖城组; T_3 黄流组顶部地震反射界面; T_4 梅山组顶部地震反射界面; T_5 三亚组顶部地震反射界面

岛凹陷生烃中心之上, 储层连片分布、规模较大, 为下一步勘探的重点区带。

参考文献

- [1] SCHUTTER S R. Occurrences of hydrocarbons in and around igneous rocks [M]//PETFORD N, MCCAFFREY K J W. Hydrocarbons in Crystalline Rocks. London: Geological Society of London, 2003: 35–68.
- [2] 刘嘉麒, 孟凡超, 崔岩, 等. 试论火山岩油气藏成藏机理[J]. 岩石学报, 2010, 26(1): 1–13.
LIU Jiaqi, MENG Fanchao, CUI Yan, et al. Discussion on the formation mechanism of volcanic oil and gas reservoirs [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(1): 1–13.
- [3] 高有峰, 吴艳辉, 刘万洙, 等. 松辽盆地南部英台断陷营城组火山岩晶间微孔特征及储层效应[J]. 石油学报, 2013, 34(4): 667–674.
GAO Youfeng, WU Yanhui, LIU Wanzhu, et al. Intercrystalline micropore characteristics and reservoir effect of Yingcheng Formation volcanic rock in Yingtai fault depression, southern Songliao Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 34(4): 667–674.
- [4] 唐华凤, 孔坦, 刘祥, 等. 松辽盆地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 volcanoclastic sedimentary rocks of Early Cretaceous in Songliao Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2016, 37(5): 631–643.
- [5] 白国帅, 蒋有录, 侯帅, 等. 龙凤山地区火石岭组火山岩优质储层主控因素及成因机制[J]. 地球科学, 2022, 47(5): 1748–1761.
BAI Guoshuai, JIANG Youlu, HOU Shuai, et al. Main controlling factors and genetic mechanism of high-quality volcanic

- reservoirs in Huoshiling Formation of Longfengshan area [J]. *Earth Science*, 2022, 47(5): 1748-1761.
- [6] 鲍李银, 庞雄奇, 崔新璇, 等. 准噶尔盆地金龙油田二叠系佳木河组火山岩岩相组合及产能差异[J]. *石油与天然气地质*, 2025, 46(1): 136-150.
- BAO Liyin, PANG Xiongqi, CUI Xinxuan, et al. Lithofacies assemblages and differential productivity of volcanic rocks in the Jiamuhe Formation, Jinlong Oilfield, Junggar Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2025, 46(1): 136-150.
- [7] 赵耀, 潘虹, 骆飞飞, 等. 准噶尔盆地红车断裂带石炭系火山岩储层特征及质量控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(5): 1129-1140.
- ZHAO Yao, PAN Hong, LUO Feifei, et al. Characteristics and quality determinants of Carboniferous volcanic reservoirs in the Hongche Fault Zone, Junggar Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(5): 1129-1140.
- [8] 周健, 林承焰, 刘惠民, 等. 准噶尔盆地哈山地区石炭系-二叠系火山岩储层发育机制研究[J]. *地学前缘*, 2024, 31(2): 327-342.
- ZHOU Jian, LIN Chengyan, LIU Huimin, et al. Mechanism of reservoir development in the Carboniferous-Permian volcanic rock reservoirs in Hala' alate Mountain area, Junggar Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2024, 31(2): 327-342.
- [9] 潘文庆, 张巍, 于红枫, 等. 塔里木盆地跃南地区二叠系火山岩储层成因机理研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2013, 49(4): 603-613.
- PAN Wenqing, ZHANG Wei, YU Hongfeng, et al. Study of the genesis of Permian volcanic reservoir in Yuenan region Tarim Basin [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2013, 49(4): 603-613.
- [10] 孟凡超, 周立宏, 魏嘉怡, 等. 渤海湾盆地黄骅拗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.
- [11] 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.
- [12] 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. Regularity of the Mesozoic volcanic reservoir in Bozhong Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2023, 53(1): 1-16.
- [13] 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 the Mesozoic volcanic edifices in Bozhong Sag, Bohai Sea [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(3): 675-688.
- [14] 徐长贵, 张功成, 黄胜兵, 等. 渤海湾盆地海域白垩系大中型火山岩油气藏形成条件[J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51(3): 467-477.
- XU Changgui, ZHANG Gongcheng, HUANG Shengbing, et al. Formation of large-and medium-sized Cretaceous volcanic reservoirs in the offshore Bohai Bay Basin, East China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(3): 467-477.
- [15] 马新华, 杨雨, 张健, 等. 四川盆地二叠系火山碎屑岩气藏勘探重大发现及其启示[J]. *天然气工业*, 2019, 39(2): 1-8.
- MA Xinhua, YANG Yu, ZHANG Jian, et al. A major discovery in Permian volcanic rock gas reservoir exploration in the Sichuan Basin and its implications [J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(2): 1-8.
- [16] 夏茂龙, 文龙, 李亚, 等. 四川盆地简阳地区二叠系火山喷发旋回、环境与模式[J]. *天然气工业*, 2020, 40(9): 11-22.
- XIA Maolong, WEN Long, LI Ya, et al. Permian volcanic eruption cycle, environment and model in the Jianyang area of the Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(9): 11-22.
- [17] 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.
- [18] 董清源, 徐旭辉, 李国发, 等. 四川盆地涪陵北部二叠系茅三段火山碎屑岩储层预测及油气勘探潜力[J]. *天然气地球科学*, 2025, 36(3): 508-518.
- DONG Qingyuan, XU Xuhui, LI Guofa, et al. Reservoir prediction and gas exploration potential in Mao3 Member pyroclastic rock of Permian in northern Fuling area of Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2025, 36(3): 508-518.
- [19] 刘书强, 姚孟多, 冯亚琴, 等. 马朗凹陷条湖组凝灰岩脱玻化孔影响因素与油气关系[J]. *特种油气藏*, 2018, 25(1): 16-19.
- LIU Shuqiang, YAO Mengduo, FENG Yaqin, et al. Influencing factor analysis of devitrification pore and its relationship with hydrocarbon in Tiaohu Formation of Malang Depression [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2018, 25(1): 16-19.
- [20] 陈亚军, 于家义, 宋小勇, 等. 三塘湖盆地马朗凹陷牛圈湖—牛东构造带上石炭统火山岩黏土矿物特征及其对储层物性的影响[J]. *石油学报*, 2021, 42(8): 1053-1071.
- CHEN Yajun, YU Jiayi, SONG Xiaoyong, et al. Characteristics of clay mineral in the Upper Carboniferous volcanic rocks of Niujuanhu-Niudong structural belt in the Malang Sag, Santanghu Basin and their effects on reservoir physical properties [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(8): 1053-1071.
- [21] HU Bo, WANG Liangshu, YAN Wenbo, et al. The tectonic evolution of the Qiongdongnan Basin in the northern margin of the

- South China Sea[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 77: 163-182.
- [22] ZHAO Zhongxian, SUN Zhen, SUN Longtao, et al. Cenozoic tectonic subsidence in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea[J]. *Basin Research*, 2018, 30(S1): 269-288.
- [23] 谢玉洪, 张功成, 唐武, 等. 南海北部深水区油气成藏理论技术创新与勘探重大突破[J]. *天然气工业*, 2020, 40(12): 1-11.
- XIE Yuhong, ZHANG Gongcheng, TANG Wu, et al. Theoretical and technological innovation of oil and gas accumulation and major exploration breakthroughs in deep-water areas, northern South China Sea[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(12): 1-11.
- [24] 甘军, 张亚震, 林璐, 等. 琼东南盆地宝岛凹陷天然气差异聚集主控因素与成藏模式[J]. *地球科学*, 2023, 48(2): 439-450.
- GAN Jun, ZHANG Yazhen, LIN Lu, et al. Main controlling factors of natural gas differential accumulation model, in Baodao Sag, Qiongdongnan Basin [J]. *Earth Science*, 2023, 48(2): 439-450.
- [25] 裴建翔, 罗威, 吕诗阳, 等. 琼东南盆地宝岛凹陷南部渐新统陵水组三段三角洲的发现及石油地质意义[J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51(2): 299-310.
- PEI Jianxiang, LUO Wei, GUO Shiyang, et al. Discovery and petroleum geological significance of delta in the third member of Oligocene Lingshui Formation in southern Baodao Sag, Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(2): 299-310.
- [26] 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.
- [27] 王璞珺, 吴河勇, 庞颜明, 等. 松辽盆地火山岩相: 相序、相模式与储层物性的定量关系[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2006, 36(5): 805-812.
- WANG Pujun, WU Heyong, PANG Yanming, et al. Volcanic facies of the Songliao Basin: Sequence, model and the quantitative relationship with porosity & permeability of the volcanic reservoir [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2006, 36(5): 805-812.
- [28] 唐华凤, 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 model of volcanic facies in the basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2023, 53(6): 1651-1671.
- [29] 《地球科学大辞典》编委会. 地球科学大辞典-基础学科卷[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 1-1173.
- Editorial Board of the Dictionary of Earth Sciences. Dictionary of earth sciences-basic disciplines volume [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 1-1173.
- [30] NEUENDORF K K E, MEHL J P, Jr, JACKSON J A. Glossary of geology [M]. 5th ed. Alexandria, VA: American Geological Institute, 2011: 1-3587.
- [31] FISHER R V, SCHMINCKE H U. Pyroclastic rocks [M]. Berlin: Springer, 1984: 59-265.
- [32] LOCKWOOD J P, HAZLETT R W. Volcanoes: Global perspectives [M]. Hoboken, N. J.: Wiley-Blackwell, 2010: 1-539.
- [33] 王璞珺, 迟元林, 刘万洙, 等. 松辽盆地火山岩相: 类型、特征和储层意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2003, 33(4): 449-456.
- WANG Pujun, CHI Yuanlin, LIU Wanzhu, et al. Volcanic facies of the Songliao Basin: Classification, characteristics and reservoir significance [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2003, 33(4): 449-456.
- [34] 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 reservoir geology [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(12): 1744-1773.
- [35] TANG Huafeng, TIAN Zhiwen, GAO Youfeng, et al. Review of volcanic reservoir geology in China [J]. *Earth-Science Reviews*, 2022, 232: 104158.
- [36] WANG Pujun, CHEN Shumin. Cretaceous volcanic reservoirs and their exploration in the Songliao Basin, northeast China [J]. *AAPG Bulletin*, 2015, 99(3): 499-523.
- [37] 张迎朝, 甘军, 徐新德, 等. 琼东南盆地深水东区Y8-1含气构造天然气来源及侧向运聚模式[J]. *地球科学*, 2019, 44(8): 2609-2618.
- ZHANG Yingchao, GAN Jun, XU Xinde, et al. The source and natural gas lateral migration accumulation model of Y8-1 gas bearing structure, east deep water in the Qiongdongnan Basin [J]. *Earth Science*, 2019, 44(8): 2609-2618.
- [38] 甘军, 张迎朝, 杨希冰, 等. 琼东南盆地深水区源-储共控的天然气成藏模式[J]. *高校地质学报*, 2022, 28(5): 635-643.
- GAN Jun, ZHANG Yingchao, YANG Xibing, et al. Natural gas accumulation model controlled jointly by source and reservoir in deep water area of Qiongdongnan Basin [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2022, 28(5): 635-643.
- [39] 翟普强, 陈红汉, 谢玉洪, 等. 琼东南盆地深水区超压演化与油气运移模拟[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2013, 44(10): 4187-4201.
- ZHAI Puqiang, CHEN Honghan, XIE Yuhong, et al. Modelling of evolution of overpressure system and hydrocarbon migration in deepwater area of Qiongdongnan Basin, South China Sea [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 44(10): 4187-4201.
- [40] 甘军, 张迎朝, 梁刚, 等. 琼东南盆地深水区天然气成藏过程及动力机制研究[J]. *地质学报*, 2018, 92(11): 2359-2367.
- GAN Jun, ZHANG Yingchao, LIANG Gang, et al. On accumulation process and dynamic mechanism of natural gas in the deep water area of central canyon, Qiongdongnan Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2018, 92(11): 2359-2367.