

琼东南盆地中生代潜山成储主控因素及分布规律

侯明才¹, 何小胡², 金秋月², 曹海洋¹, 贺礼文², 阙有缘¹, 陈安清¹

[1. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059; 2. 中海石油(中国)有限公司 海南分公司, 海南 海口 570311]

摘要: 中国海域盆地潜山已成为重要的勘探新领域。琼东南盆地中生代潜山勘探钻揭多个含气构造,但未获得规模性气藏发现。究其原因,储层成因机制和分布规律是制约潜山勘探大发现的瓶颈。基于琼东南盆地已有钻井、岩心、薄片和地球物理资料,研究了琼东南不同构造带潜山储层的发育特征,并探究了潜山储层的成因机制。结果表明:①储集空间主要是构造裂缝,前新生代的印支期和燕山期逆冲挤压构造是成缝关键,相关的先存主断层为潜山分带结构形成奠定了基础,新生代拉张构造活动使先存网状断裂体系活化;②以长英质矿物为主的基岩是最有利的储集岩,多期流体作用有效改造了潜山储层质量,并促成了潜山储层的垂向分带性;③琼东南盆地中生代潜山构造带可划分为南部双层强构造改造型潜山、中部三层风化-构造改造型潜山及北部准单层弱风化改造型潜山;④经历印支期构造活动的老基岩更有利于优质潜山储层发育,邻近凹陷周缘的潜山更有利于形成大型气藏。

关键词: 构造演化; 储层特征; 基岩潜山; 中生代; 琼东南盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Factors controlling the formation and distribution of Mesozoic buried hill reservoirs in the Qiongdongnan Basin

HOU Mingcai¹, HE Xiaohu², JIN Qiuyue², CAO Haiyang¹, HE Liwen², QUE Youyuan¹, CHEN Anqing¹

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Hainan Branch, CNOOC, Haikou, Hainan 570311, China)

Abstract: Buried hills are emerging as an important exploration target in the sedimentary basins offshore China. Despite the successful drilling of several gas-bearing prospects in the Mesozoic buried hills in Qiongdongnan Basin, there is a lack of research on the primary factors controlling oil and gas accumulation, and no large-scale gas reservoirs have been discovered so far. Clarifying the development characteristics and genetic mechanisms of these reservoirs is crucial for advancing buried hill exploration in this region. This paper examines the development characteristics of buried hill reservoirs across different structural belts in the Qiongdongnan Basin using existing drilling, core, thin section, and geophysical data. The results indicate that structural fractures are the primary reservoir space, with thrusting event of the pre-Cenozoic Indosinian and Yanshanian playing a key role in fracture formation. The presence of preexisting main faults provided the foundation for the formation of the buried hills and the Cenozoic extension activities reshaped the fracture systems. Bedrocks dominated by felsic minerals are the favorable reservoir rocks, with multi-stage fluid action effectively improving the quality of buried hill reservoirs and contributing to their vertical zoning. The Mesozoic buried hill structural belt of Qiongdongnan Basin can be classified into a double-layer type of buried hill intensively modified by tectonism in the south, a three-layer type of buried hill modified jointly by weathering and tectonism in the middle, and a single-layer type of buried hill weakly modified by weathering in the north. The study also shows that ancient bedrocks that experienced the Indosinian tectonic activity are more favorable for the development of high-quality buried hill reservoirs, while the buried hills near the periphery of the depression are more conducive to the formation of large gas reservoirs.

收稿日期: 2023-02-15; 修订日期: 2023-03-20。

第一作者简介: 侯明才(1968—),男,教授、博士生导师,大地构造沉积学、古地理学、石油地质学。E-mail: houmc@cudt.edu.cn。

通讯作者简介: 何小胡(1982—),男,硕士、高级工程师,石油勘探综合研究。E-mail: hexh@cnooc.com.cn。

基金项目: 中海石油(中国)有限公司海南分公司科技项目(CCL2021HNFN0248); 海南省院士创新平台科研项目。

Key words: tectonic evolution, reservoir feature, bedrock buried hill, Mesozoic, Qiongdongnan Basin

引用格式:侯明才,何小胡,金秋月,等.琼东南盆地中生代潜山成储主控因素及分布规律[J].石油与天然气地质,2023,44(3):637-650. DOI: 10.11743/ogg20230309.

HOU Mingcai, HE Xiaohu, JIN Qiuyue, et al. Factors controlling the formation and distribution of Mesozoic buried hill reservoirs in the Qiongdongnan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 637-650. DOI: 10.11743/ogg20230309.

基岩潜山油气藏已经成为目前全球油气勘探的热点之一。近年来,基岩油气藏不断获得勘探突破^[1-4],包括越南白虎油田^[5]、乍得 Bongor 盆地潜山油气藏^[6],中国辽河盆地潜山^[7-8]、渤海渤中 19-6 太古界潜山油气藏群^[9-15]、珠江口盆地惠州 26-6 潜山油气藏等^[16-17]。通过大量的研究证实了潜山储集空间类型丰富,岩浆岩潜山储集空间以裂缝为主^[18-19],构造和风化作用是潜山储层储集空间形成的重要控制因素^[20-21],并且在不同岩性潜山储层内,潜山垂向上会呈现不同的分带特征^[22-23]。近些年,针对琼东南盆地中生代潜山开展了一系列勘探工作,松南低凸起永乐 8 区优质天然气藏的发现证实了中生界潜山具有非常大的勘探潜力,开辟了潜山油气勘探新领域^[24](图 1)。已有的研究表明,琼东南中生代潜山的岩浆岩和构造体系受古特提斯和古太平洋演化影响,储层主要为花岗质火山-侵入杂岩型,储集空间类型主要为风化带和裂缝带^[25-27]。

虽然琼东南盆地中生代潜山勘探揭示出多个含气构造,但油气成藏主控因素研究薄弱,对区域上不同潜

山带的差异性和成储规律缺乏认识,致使琼东南盆地至今未获得规模性的发现。本次研究着眼于整个琼东南盆地,通过对不同类型、不同构造带的潜山开展解剖,详细分析潜山储层发育特征,揭示潜山储层形成的主要因素和成因机制,明确琼东南盆地不同潜山带的差异性和成储规律,指导该区下一步潜山勘探。

1 地质背景

琼东南盆地位于南海北部被动大陆边缘,北部为海南岛、南部为西沙群岛,西侧毗邻莺歌海盆地、东部为珠江口盆地。盆地是在前古近系基底上发育的新生代伸展断陷盆地,整体呈隆-坳相间的构造格局,从北向南依次划分为北部坳陷、中部隆起、中央坳陷和南部隆起 4 个一级构造单元^[28](图 1)。盆地总体呈 NE 向展布,盆内可进一步细分为陵南低凸起、松南低凸起、崖城凸起、崖南凸起等 8 个凸起或低凸起以及乐东凹陷、陵水凹陷、松南-宝岛凹

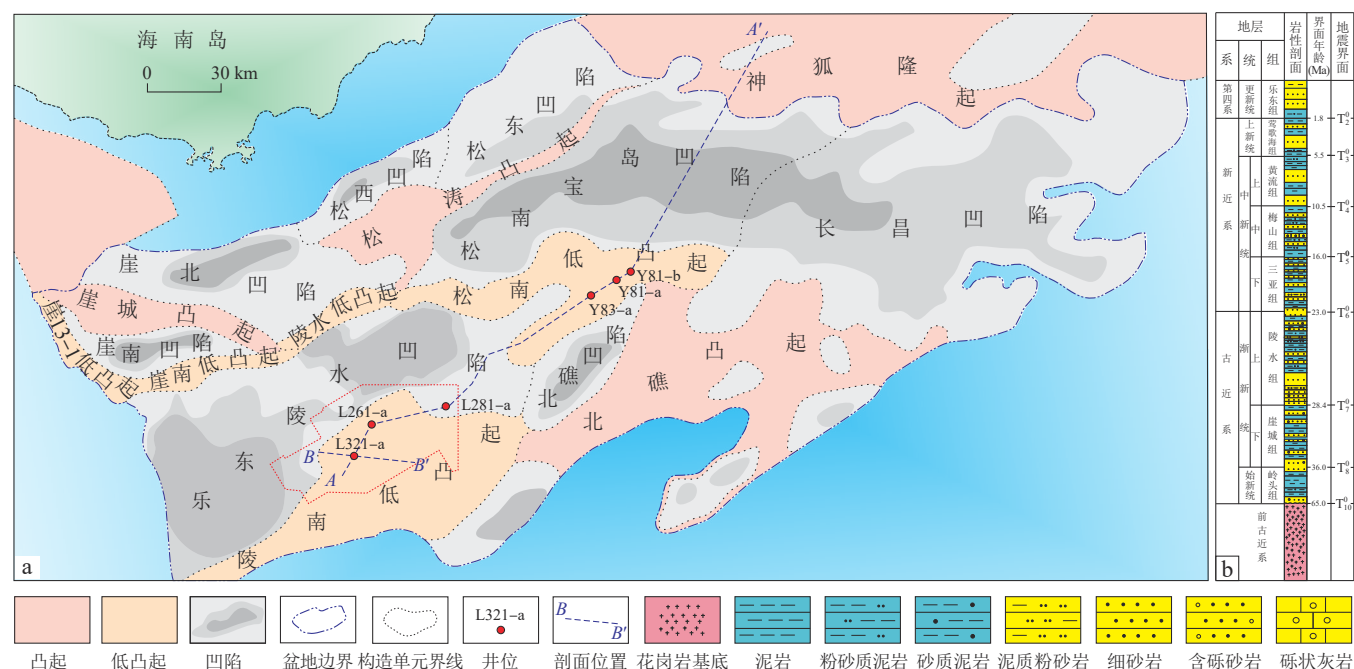


图1 琼东南盆地中生代潜山构造纲要图与地层综合柱状图

Fig. 1 Structural location and stratigraphy colum of Mesozoic buried hills in the Qiongdongnan Basin

a. 琼东南盆地中生代潜山构造位置及构造纲要;b. 琼东南盆地地层综合柱状图

陷、长昌凹陷、北礁凹陷等9个凹陷。

琼东南盆地处在太平洋构造域与特提斯构造域的构造转换地带^[29-30],其中、新生代经历了复杂的地质演化过程。三叠纪古特提斯洋消减闭合过程中,印支板块与华南板块碰撞,伴随大量断裂、褶皱和多期岩浆运动,在琼东南盆地形成了一系列NW向断裂带与侵入喷出岩体。燕山期在侏罗纪—白垩纪早期,受古太平洋板块向北西俯冲挤压亚洲大陆影响,印支期NW向断裂发生走滑,同时形成了一系列NE向构造^[31],之后受板片回卷影响,琼东南盆地在NW向拉张应力场作用下开始发生伸展,形成NE向分布的侵入喷出岩体。此外,莺歌海盆地—琼东南盆地转换部位,紧邻哀牢山—红河断裂带东延部分,受断裂活动影响显著,哀牢山洋隶属于特提斯构造域的一个分支洋,晚二叠世末—早三叠世哀牢山洋闭合,区域开启印支碰撞造山运动,中三叠世华南地块与印支地块处于碰撞拼贴阶段,晚三叠世哀牢山构造带处于碰撞后伸展演化阶段,区域发育碰撞后花岗岩类。这与琼东南盆地三叠纪构造演化一致^[32-33]。新生代的琼东南盆地受古南海俯冲消减和南海扩张影响,先后形成挤压构造和伸展盆地。

琼东南盆地基底主要为印支期与燕山期花岗岩潜山,上部沉积序列主要由新生代地层组成。新生界由下至上依次为渐新统崖城组和陵水组,中新统的三亚组、梅山组和黄流组,上新统莺歌海组及更新统乐东组(图1b)。琼东南盆地花岗岩潜山的形成与演化受到印支期、燕山期和喜马拉雅期多期构造运动影响,为其潜山风化壳和内部裂缝型储层的形成提供了良好的条件(图1)。

2 潜山储层特征

2.1 岩性特征

琼东南盆地潜山储层岩性类型多样,钻井岩心、壁心及薄片资料揭示研究区储层主要发育花岗岩、二长花岗岩以及晚期侵入岩脉,岩脉类型以闪长玢岩为主,其次发育少量辉绿岩脉,部分井区发育变质岩。花岗岩和二长花岗岩两类岩石成分上均由长石、石英以及少量暗色矿物构造,长石的含量差异较大(图2a,b)。岩石中石英颗粒较为完整,少数颗粒发生破碎,并发育裂缝,长石多遭受蚀变,呈黏土化(图2e),或受到应力改造,呈破碎状(图2f,g),后期流体作用对岩石进行交代,发生了长石的碱性交代作用,可见石英对钾长石的交代现象,造成矿物颗粒边界模糊(图2f,h),增加了长英质的含量。

研究区发育大量侵入岩体,根据岩浆性质划分为中性浅成岩脉和基性浅成侵入岩脉。潜山中性浅成侵入岩体以闪长玢岩为主(图2c),斑状结构,斑晶多为斜长石;此外,研究区基性侵入体多为辉绿岩。侵入岩脉厚度多在2~8 m,垂向上具有多层分布的特征,说明其在潜山内可能广泛分布,指示了潜山晚期拉张环境下活跃的构造活动。陵南低凸起L281构造带,发育了一系列变质岩,主要为黑云斜长片麻岩(图2d),推测为比周缘长英质花岗岩、二长花岗岩更为古老的二叠系基岩变质而成,可能与该构造区在潜山形成早期处于相对高的海拔部位有关。

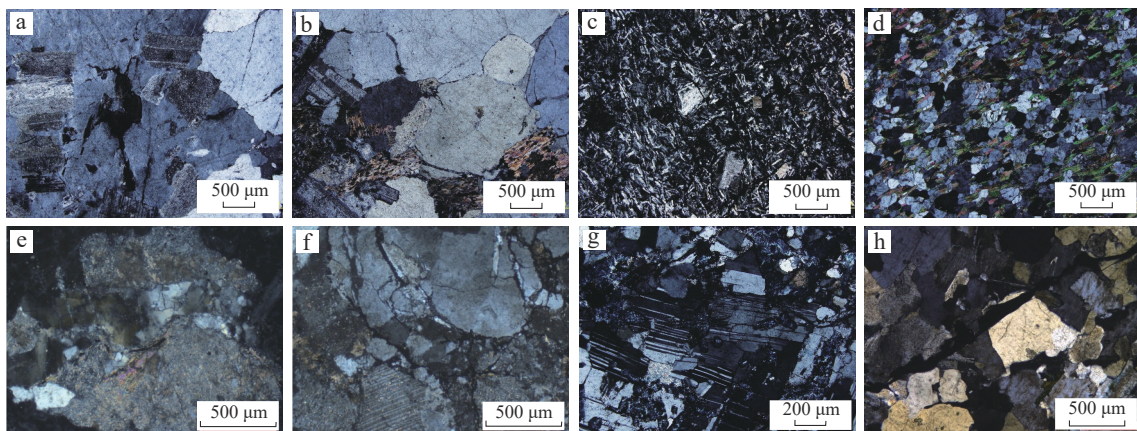


图2 琼东南盆地中生代潜山岩性特征镜下照片

Fig. 2 Lithological characteristics of Mesozoic buried hills in the Qiongdongnan Basin

a. L261-a井,埋深3 612.0 m,二长花岗岩,正交偏光;b. L261-a井,埋深3 687.0 m,花岗闪长岩,正交偏光;c. L261-a井,埋深3 732.0 m,闪长玢岩,正交偏光;d. L281-a井,埋深4 448.0 m,黑云斜长片麻岩,正交偏光;e. L321-a井,埋深4 114.0 m,二长花岗岩,正交偏光;f. L321-a井,埋深4 266.3 m,碎裂花岗闪长岩,正交偏光;g. Y81-a井,埋深2 960.5 m,花岗闪长岩,正交偏光;h. Y83-a井,埋深2 837.0 m,花岗闪长岩,正交偏光

2.2 储集空间类型

岩浆岩主体缺乏原生孔隙,有效的孔隙类储集空间主要为次生孔隙。通过岩心观察、薄片分析揭示研究区基岩潜山储集空间主要为风化作用下形成的孔隙体系,构造应力作用下刚性岩石矿物机械破碎形成的不同尺度裂缝,沿裂缝溶蚀扩大的孔隙以及破碎颗粒间的粒间孔等。不同尺度的裂缝是主要的储集空间。其中,长英质岩浆岩在应力作用下,易发育多组X型剪节理,大量节理面为潜山储层裂缝体系的主要贡献者。

风化作用导致潜山顶部岩石呈砂砾状(图3a,g),孔隙发育,岩石颗粒堆积松散,壁心上可见大量溶蚀孔隙,可作为优质储集体。此类典型风化产物发育于松南地区,说明松南地区潜山顶部残存一套风化作用形成的砂砾岩带,而在陵南地区潜山顶部不发育该砂砾岩带,仅残余长石风化的黏土矿物(图3d)。

研究区潜山储层裂缝广泛发育,从宏观尺度和薄片尺度可见,裂缝多具有平直的裂缝面,此类裂缝多为挤压构造背景下岩石颗粒机械破碎形成或由岩石节理缝演化而来,可见不同期次裂缝相互切割,说明裂缝具有多期次形成的特点(图3c)。裂缝部分被不同类型脉体充填,裂缝开度不均,说明剪性裂缝后期经历过张开活化作用(图3i)。部分裂缝沿裂缝面发育强烈的溶蚀作用,形成沿裂缝的溶蚀孔洞,有些孔洞溶蚀扩大明显,沟通能力强(图3b,f,h,k)。碎裂化严重的基岩中可见大量裂缝与粒间孔及粒内孔,构造孔隙-裂缝储集空间(图3j,l)。潜山内幕,多为不同期次裂缝切穿矿物颗粒,缝网交织,使得本身致密岩石的储集性能明显提升(图3e)。

不同尺度的裂缝体系,虽部分被充填,但仍有大量保持开启状态。开启的裂缝系统不仅作为有效的储集空间,提升储集能力,更重要的是为大气淡水、深部流

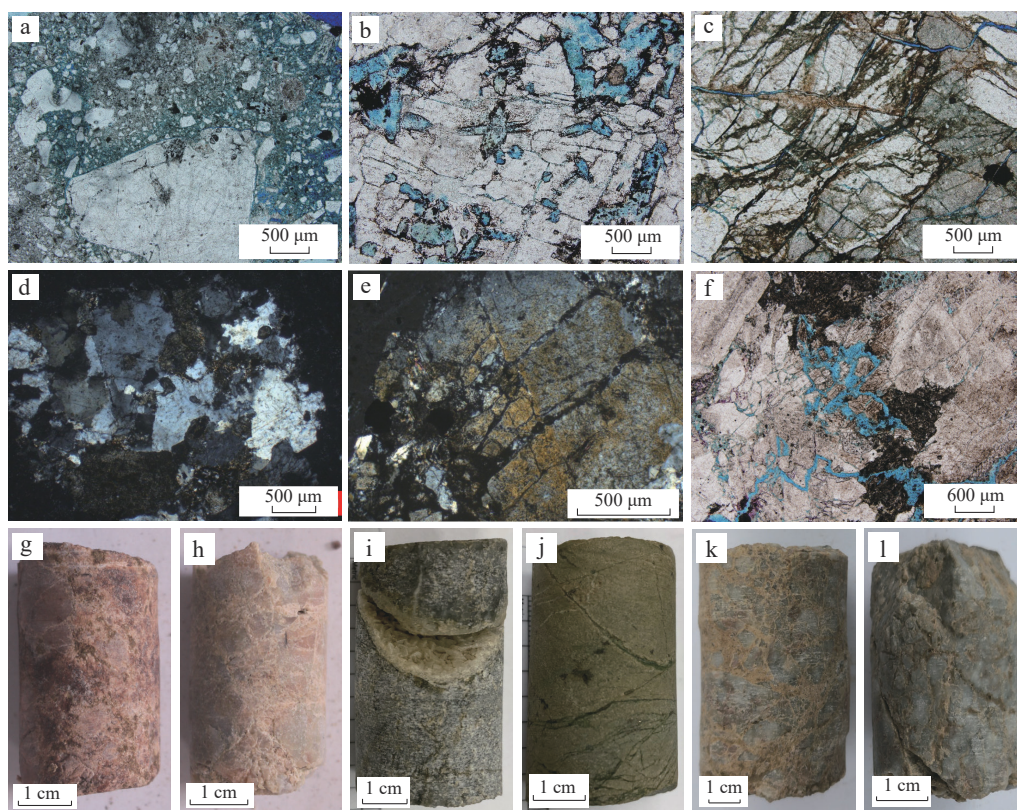


图3 琼东南盆地中生代潜山储集空间特征照片

Fig. 3 Reservoir space characteristics of Mesozoic buried hills in the Qiongdongnan Basin

a. Y81-b井,埋深2 909.0 m,花岗碎裂岩,风化成砂砾质,孔隙发育,单偏光;b. Y81-a井,埋深2 960.5 m,花岗闪长岩,溶蚀孔洞发育,裂缝发育,单偏光;c. Y81-a井,埋深2 982.0 m,花岗岩,多期裂缝发育,呈缝网结构,单偏光;d. L321-a井,埋深4 011.0 m,花岗岩,局部长石风化成黏土化,正交偏光;e. L321-a井,埋深4 167.0 m,二长花岗岩,碎裂结构,裂缝发育,正交偏光;f. L261-a井,埋深3 712.0 m,花岗岩,碎裂结构,裂缝发育,有溶蚀扩大,单偏光;g. Y81-a井,埋深2 960.5 m,花岗岩,风化成砂砾状,孔隙发育,壁心;h. Y81-a井,埋深3 054.1 m,二长花岗岩,相对致密,裂缝闭合,壁心;i. L321-a井,埋深4 290.1 m,二长花岗岩,裂缝发育,方解石脉体充填,壁心;j. L321-a井,埋深4 257.0 m,二长花岗岩,多期裂缝发育,呈缝网结构,壁心;k. L261-a井,埋深3 704.3 m,二长花岗岩,多期裂缝发育,呈缝网结构,壁心;l. L261-a井,埋深3 623.4 m,二长花岗岩,多期裂缝发育,呈缝网结构,发育溶蚀孔洞,壁心

体及有机酸等的渗流提供了通道,是潜山储层在形成时溶蚀作用发育的前提与基础。潜山基岩多为长英质岩石,长石作为脆性易溶矿物,在多期次构造作用下容易形成大量构造裂缝,在流体改造下同样会发育大量溶蚀孔洞;石英作为刚性矿物,坚硬难溶,但是能够有效地传导应力,使得共生的长石发育裂缝体系。

从松南地区的潜山可见,顶部发育一套强烈风化作用下产生的砂砾质层,下伏为风化作用强烈的裂缝型储层,裂缝具有明显溶蚀扩大现象,深部为多期次裂缝构成的内幕裂缝体系。陵南地区潜山顶部则缺乏风化形成的砂砾岩层,垂向上由上部风化作用强烈的裂缝带和内幕缝网体系构成。

2.3 物性特征

对琼东南盆地陵南地区潜山和松南地区潜山的已有钻井岩心样品实测孔隙度和渗透率进行统计分析,结果显示孔隙度与渗透率相关性较差(图4a,渗透率小于 $0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的点未投在图中)。陵南地区潜山储层孔隙度分布在 $0.10\% \sim 16.70\%$,平均值为 4.25% ,渗透率分布在 $0.050 \times 10^{-3} \sim 13.200 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值为 $2.178 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;松南地区潜山储层孔隙度分布在 $0.10\% \sim 19.70\%$,平均值为 6.41% ,渗透率分布在 $0.050 \times 10^{-3} \sim 24.400 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值为 $5.100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

由渗透率频率分布直方图可知(图4b),陵南和松南地区潜山储层渗透率均较低,属于低渗储层:陵南地区

有效渗透率集中在 $0.05 \times 10^{-3} \sim 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $0.1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;松南地区有效渗透率集中分布在 $0.1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $1 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 范围内。孔隙度的贡献上(图4c),两个区域有明显差异:陵南地区样品的孔隙度以 $1\% \sim 2\%$ 的为主,占比达 40% 以上,其次为 $2\% \sim 5\%$ 和 $5\% \sim 10\%$;松南地区样品的孔隙度较均匀地分布在 $2\% \sim 5\%$, $5\% \sim 10\%$ 和 $10\% \sim 15\%$ 区间内。

从潜山储层物性与距潜山顶面距离间的关系可知(图4d,e):陵南地区储层孔隙度从潜山顶面向下除顶部和内幕个别样品数值较高外,整体变化不大。靠近潜山顶面的高值样品可能是风化作用下裂缝溶蚀扩大的结果,内幕除局部发育相对致密层,同样显示较高的孔隙度,同时陵南地区渗透率随深度逐渐降低,内幕存在高值层段。而松南地区潜山储层从潜山顶面向下,具有明显的高值带,向内幕数值逐渐降低,但仍有孔隙度较高的层段存在,渗透率与潜山顶面距离关系也具有相同特征,潜山顶部存在渗透率高值区,而内幕渗透率降低,局部发育渗透率高值层段。

松南地区潜山顶部的高孔、高渗层段的存在与该区域潜山隆升后处在比陵南地区更高的海拔位置有关。松南地区更高的海拔造成潜山覆盖更晚,经历比陵南地区更长的暴露时间,大气淡水的淋滤作用时间更持久,风化程度更深,特别是顶部保存的砂砾岩层能够有效地提高孔隙度和渗透率。

值得明确的是,潜山储层作为典型的强非均质性

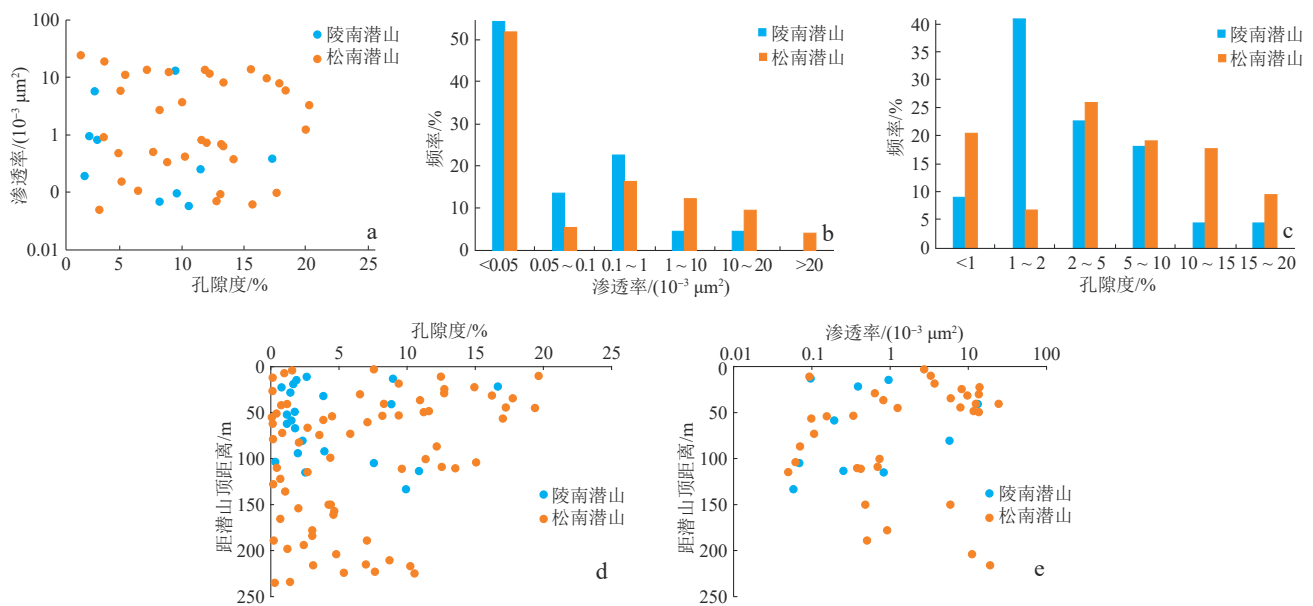


图4 琼东南盆地陵南与松南地区中生代潜山储层物性特征

Fig. 4 Physical characteristics of Mesozoic buried hill reservoirs in the Qiongdongnan Basin

a. 孔隙度与渗透率关系; b. 渗透率统计; c. 孔隙度统计; d. 孔隙度与距潜山顶距离关系; e. 渗透率与距潜山顶距离关系

裂缝型储层,呈强烈的碎裂结构,目前的钻井未获得保持原位特征的有效储集层样品。已获取的样品往往是裂缝之间的相对致密的非优质储层岩石,所以实测物性数据仅能代表潜山有效储层储集能力的下限。此外,从图上的趋势可知,目前琼东南潜山勘探没有揭示潜山储层的埋藏深度下限,其更深处潜山内幕仍存在发育有效储层的可能。

3 储层分带结构差异对比

对琼东南潜山储层的岩性、储集空间及物性分析显示,不同构造带的潜山在垂向上具有差异分带特征。垂向分带的主要差异体现在潜山上部风化作用强度和产物的保存程度。一般来说,遭受较强风化作用并保

存完整的基岩潜山储层在垂向上往往具有风化砂砾岩带+风化裂缝带+内幕裂缝带的三层结构^[34]。由于潜山岩性的特殊性,储层非均性的制约,垂向上还会出现局部的相对致密层。此类相对致密层并非空间上的阻隔层,而是相对风化裂缝带和内幕裂缝带而言的低孔、低渗层段。潜山顶面所发育的风化砂砾岩带具有较好的储集能力,但基岩在暴露过程中所发育的风化砂砾岩带厚度相对有限。因为在外动力地质营力的作用下,沉积搬运作用会使得该砂砾岩带维持在一个相对稳定的厚度(相对潜山内幕很薄)。此外,在潜山构造演化过程中,由于地貌的因素砂砾岩带往往很难完整保存。

琼东南盆地陵南地区的潜山具有双层结构,以L321-a井为例(图5),潜山上部为风化裂缝带,下部为内幕裂缝带,顶部缺少风化砂砾岩带,仅可见局部长石

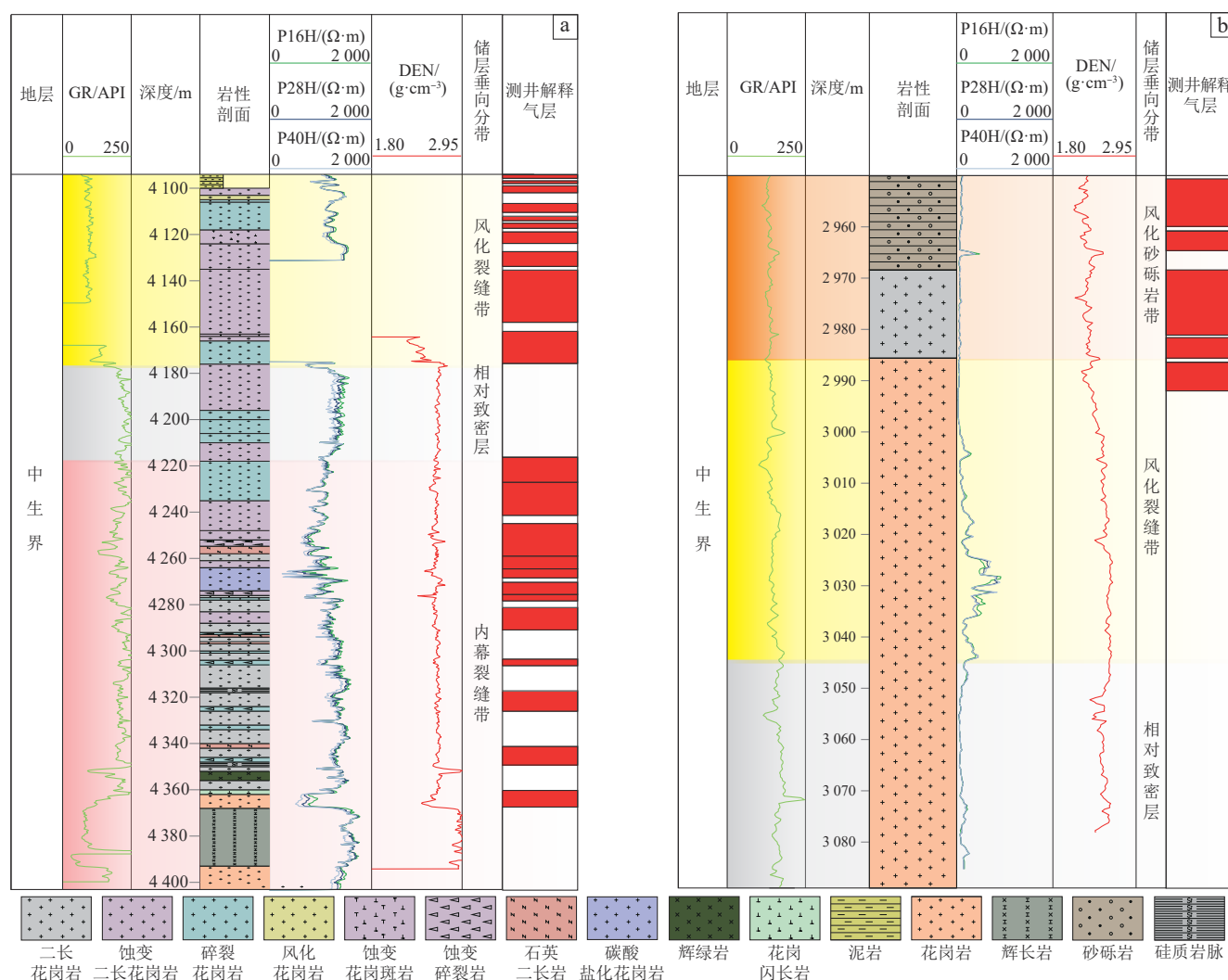


图5 琼东南盆地中生代潜山单井储层分带结构特征

Fig. 5 Zoning characteristics of Mesozoic buried hill reservoirs in exploratory wells, Qiongdongnan Basin

a. L321-a井; b. Y81-a井

风化为黏土状(图3d),内幕发育局部致密层。松南地区潜山具有三层结构,顶部发育风化砂砾岩带,向下为风化裂缝带和内幕裂缝带,内幕发育相对致密层。陵南和松南地区潜山结构的差异,可能是由于琼东南盆地中生代潜山成山构造演化差异造成的,L281-a井揭示了古老的变质岩,说明在潜山隆升剥蚀阶段,L281构造位于海拔高点,推测陵南地区在隆升剥蚀阶段处于山顶高部位,顶部风化砂砾岩层被搬运走,从而形成缺少风化砂砾岩层的双层结构潜山;松南地区在隆升剥蚀阶段可能位于山坡或山腰等底部位,其顶部风化形成的砂砾岩层得以部分保存,潜山覆盖埋藏后形成三层结构潜山。

潜山风化裂缝带,裂缝体系发育,并且伴随溶蚀扩大,是大气淡水能够渗透并建设性改造的优质储层段。从渤海油田太古界基岩潜山的研究可知,有效的风化裂缝带厚度可达300 m^[34-35],是主要的潜山优质储层发育带。结合水文地质相关理论,风化裂缝带的发育程度取决于潜山隆升高度和暴露时间以及同一时期水文地质条件。其下受风化作用影响极小的内幕裂缝带是刚性基岩经历多期构造运动的结果,所形成的缝网系统也是主要储集空间。风化裂缝带和内幕裂缝带由不同级别的裂缝沟通,伴随多元流体的改造作用,共同构成巨厚的基岩潜山缝网型块状储层。因此总结琼东南盆地陵南地区潜山储层垂向结构为双层结构,松南地区潜山储层垂向结构为三层结构,其中最主要的差别是陵南地区缺少风化砂砾岩带(图6)。

4 储层主控因素及发育模式

4.1 先存逆冲挤压及控储作用

前文分析表明,裂缝是琼东南盆地潜山储层主要的储集空间。已有研究表明,潜山裂缝型储层的形成受控于潜山基岩在成山作用过程中所经历的多期构造运动^[9]。其中,逆冲挤压作用有利于基岩形成大量裂缝^[36],主要是长英质岩石机械破碎,或是促使岩浆岩大量节理面的形成和发育,裂缝体系多为闭合状态。而在后期经历的伸展作用,易使得闭合的裂缝体系张开活化,并促进多元流体渗透,改造储层。由此可见,先存逆冲挤压作用对于潜山裂缝体系的形成具有重要的控制作用。

琼东南盆地在中、新生代经历了复杂的构造运动,主要为印支期(来自SW方向古特提斯构造域的闭合)的逆冲挤压,燕山期来自SE方向(古太平洋板块俯冲)的逆冲挤压,以及喜马拉雅期和新生代伸展作用为主的构造活动^[31]。对研究区三维地球物理数据开展先存断裂识别和解释分析发现(图7a),潜山内幕存在逆冲推覆方向分别为NE向和NW向的先存逆冲断裂,并且新生代小型断陷盆地的控盆边界断裂也是由先存逆冲推覆断裂反转而形成。通过对L321-a井成测井裂缝走向统计可见(图7b)存在SW走向和

a	潜山分带	孔隙度/%	储集空间	特征描述	b	潜山分带	孔隙度/%	储集空间	特征描述
	上覆层					上覆层			
	土壤层	<3	微孔/非储层	以泥岩或/和破碎岩为主,多数风化分解破碎为泥土或/和石英砂砾		土壤层	<3	微孔/非储层	以泥岩或/和破碎岩为主,多数风化分解破碎为泥土或/和石英砂砾
	裂缝淋蚀带	5~12	溶蚀孔、裂缝、溶蚀洞	岩石半破碎,风化淋滤蚀变作用强,构造破碎,完整性差-较完整		风化砂砾带	5~12	溶蚀孔、溶蚀洞	岩石破碎成砂砾岩,风化淋滤蚀变作用强,完整性差-较完整
	风化裂缝带	5~10	裂缝、溶蚀孔	岩石半破碎,溶蚀孔和裂缝较发育,裂缝和孔隙半充填,结构较完整		风化裂缝带	5~10	裂缝、溶蚀孔	岩石半破碎,溶蚀孔和裂缝较发育,裂缝和孔隙半充填,结构较完整
	相对致密层	1~4	少量裂缝、原生孔	岩石结构较完整,溶蚀孔和裂缝发育较差		相对致密层	1~4	少量裂缝、原生孔	岩石结构较完整,溶蚀孔和裂缝发育较差
	内幕裂缝带	3~10	裂缝、溶蚀孔、原生孔	岩石半破碎,裂缝为主,偶见溶蚀孔,裂缝和孔隙半充填,结构较完整		内幕裂缝带	3~10	裂缝、溶蚀孔、原生孔	岩石半破碎,裂缝为主,偶见溶蚀孔,裂缝和孔隙半充填,结构较完整
	致密基岩带	<1	原生孔	固结岩石,结构完整,孔、缝、洞几乎不发育		致密基岩带	<1	原生孔	固结岩石,结构完整,孔、缝、洞几乎不发育

图6 琼东南盆地中生代潜山储层垂向分带模式

Fig. 6 Vertical zoning model of Mesozoic buried hill reservoirs in the Qiongdongnan Basin

a. 陵南地区双层结构;b. 松南地区三层结构

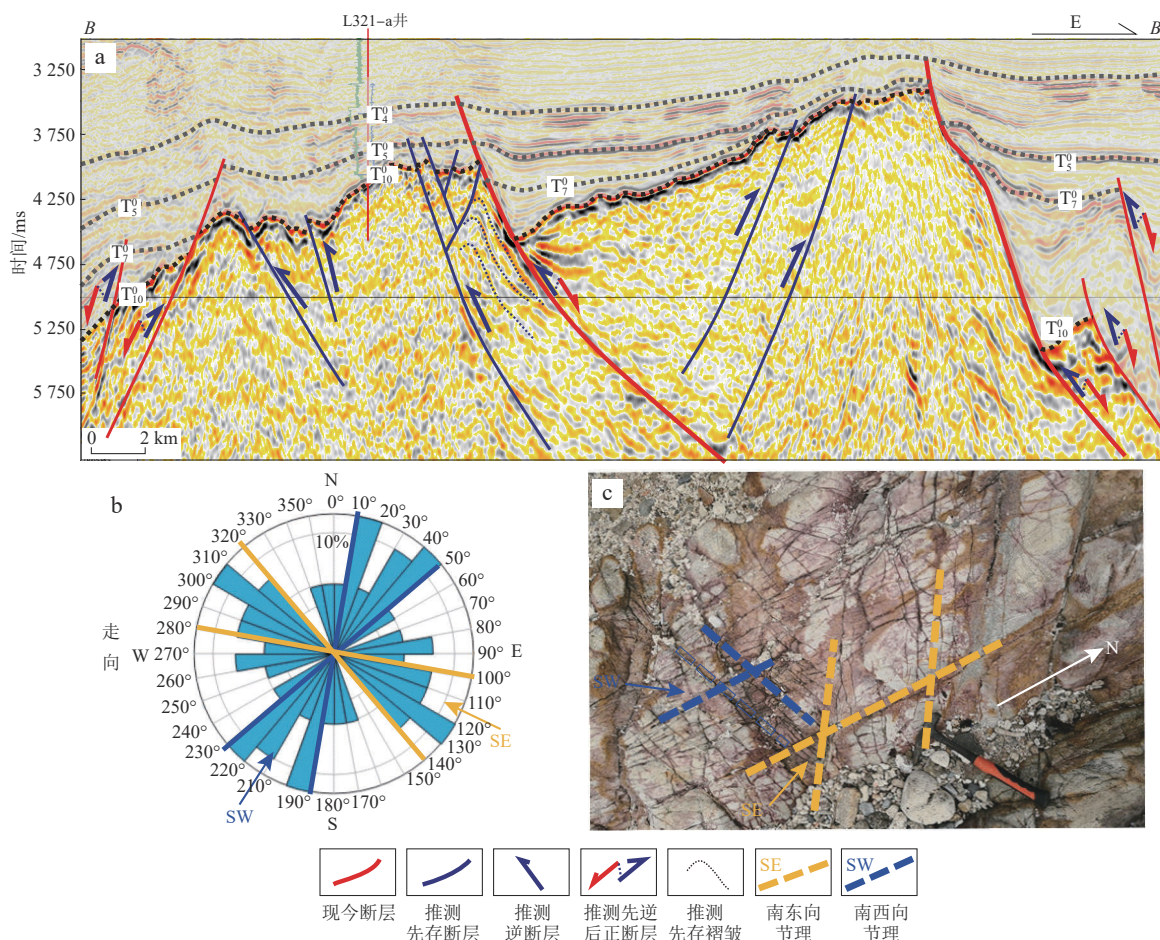


图7 琼东南盆地中生代潜山构造先存断裂解释及裂缝特征(剖面位置见图1a)

Fig. 7 Interpretation of pre-existing faults and fracture characteristics of Mesozoic buried hill structures, Qiongdongnan Basin

a. 陵南地区典型地震剖面解释; b. L321-a井成像测井裂缝走向统计; c. 海南岛三叠系岩浆岩典型露头节理裂缝应力分析

SE走向的两组裂缝。对海南岛三叠系岩浆岩露头节理裂缝应力的统计分析发现,同样存在SW和SE两个应力方向(图7c)。综合地球物理尺度断裂分析、成像测井统计以及野外露头佐证分析,可知琼东南盆地中生代印支期SW方向逆冲挤压和燕山期SE方向逆冲挤压控制了潜山先存断裂的发育,同样促使潜山发育大量裂缝,在新生代以来的张性环境下缝网系统活化并被改造。

对陵南地区开展先存断裂平面展布分析可见(图8), NW走向(蓝色)的先存断裂发育时间最早, NE走向(红色)的先存断裂发育晚于NW走向断裂, 分别对应印支期和燕山期挤压作用。在两期先存挤压作用的叠合区, 可能是潜山裂缝发育的有利区。逆冲作用过程中, 断盘可划分为主动盘和被动盘, 主动盘的裂缝发育程度要远大于被动盘^[37-38]。主动盘在逆冲过程中, 为了调节曲率的差异, 往往会发育一系列逆冲褶皱(图7a), 该区域同样也是裂缝最为发育区。通过地球

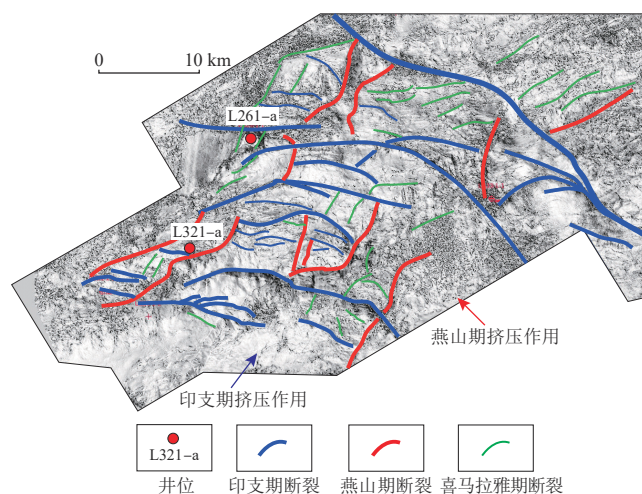


图8 琼东南盆地中生代陵南地区基于蚂蚁体属性的潜山顶面先存断裂解释

Fig. 8 Interpretation of pre-existing faults on the top of buried hills based on ant-tracking volume in Mesozoic Lingnan area, Qiongdongnan Basin

物理解释分析,认为陵南地区处在印支期逆冲推覆和燕山期逆冲推覆的双主动盘,两次构造运动的叠加,再加上新生代拉张构造运动的改造,导致潜山裂缝活化,使得该区域具有发育优质裂缝系统的构造背景。

4.2 潜山构造演化及成储模式

一般地,潜山储层的形成受岩石组成、构造演化及流体改造等3个主要因素控制^[14]。岩石是储层物质基础,长英质矿物的含量是决定能否有优质储层发育的先决条件;潜山成山演化所经历的构造演化过程,是基岩能否形成规模储层的关键性条件;而伴随潜山整个演化过程的多元流体活动,是潜山储层改造的重要因素^[39]。

琼东南盆地潜山岩石多由长英质矿物组成,具备形成规模储层的物质基础,不同构造带的岩石类型、年代有差异,是导致区域潜山横向差异的因素之一。通过对已有钻井岩石样品薄片和扫描电镜的观察分析,认为琼东南盆地潜山广泛发育各类流体活动。现存裂缝中的多类型脉体是流体活动的直接证据,对于潜山起到改造作用的流体主要分为由潜山顶面向下渗透的大气淡水和由深部运移渗透的深部热液流体。通过对各类脉体的分析可知与大气淡水成因相关的脉体主要有:黏土矿物充填脉体(图9a)、绿泥石脉体(图9b)、方解石脉体(图9c)、黄铁矿脉体(图9d)等;与深部热液流体成因相关脉体有:菱铁矿脉体(图9e)、石英脉(图9f,g)、重晶石脉体(图9h)等。流体对储层的改造

可分为建设性作用和破坏性作用,如大气淡水作用下裂缝的溶蚀扩大及溶蚀孔洞的形成,属于重要的建设性改造作用,而石英脉体的形成又对局部裂缝起到封堵作用。值得明确的是,无论大气淡水或是深部流体在储层中形成的脉体,局部都造成了对裂缝的封堵作用,但是脉体的存在本身也证明了潜山缝网系统遭受了流体作用,是一种成储的积极因素。

构造裂缝是潜山重要的储集空间,同时为后期流体作用提供运移通道,能否形成规模储层的关键是能否发育有效的缝网体系。因此,潜山构造演化过程的重建,是认识潜山缝网体系发育规律的关键^[13,40]。

前文已经明确琼东南潜山经历的印支期、燕山期两次逆冲挤压作用时期是大量裂缝形成的关键构造期,新生代以来的拉张构造运动时期是裂缝的活化期。以陵南地区L321潜山构造演化分析为例(图10):印支期随着古特提斯构造域的闭合,基岩潜山形成了北西走向的逆冲断层;燕山期古特提斯构造域的活动逐渐减弱,古太平洋板块向欧亚大陆的俯冲作用在研究区表现为NE向逆冲断裂体系的发育;两期逆冲挤压构造作用时期,潜山持续隆升,并遭受风化剥蚀作用,大气淡水作用强烈,潜山储层风化裂缝带形成;新生代时期为琼东南盆地初始断陷期,低位潜山早期埋藏,先存逆冲断层发生反转,发育一系列小型断陷盆地;T₂时期断陷活动达到顶峰,随着拆离断层的发育,拉张背景造成潜山分异和中位潜山埋藏,潜山内幕缝网系统张开并活化,潜山储层初具规模;此后再次经

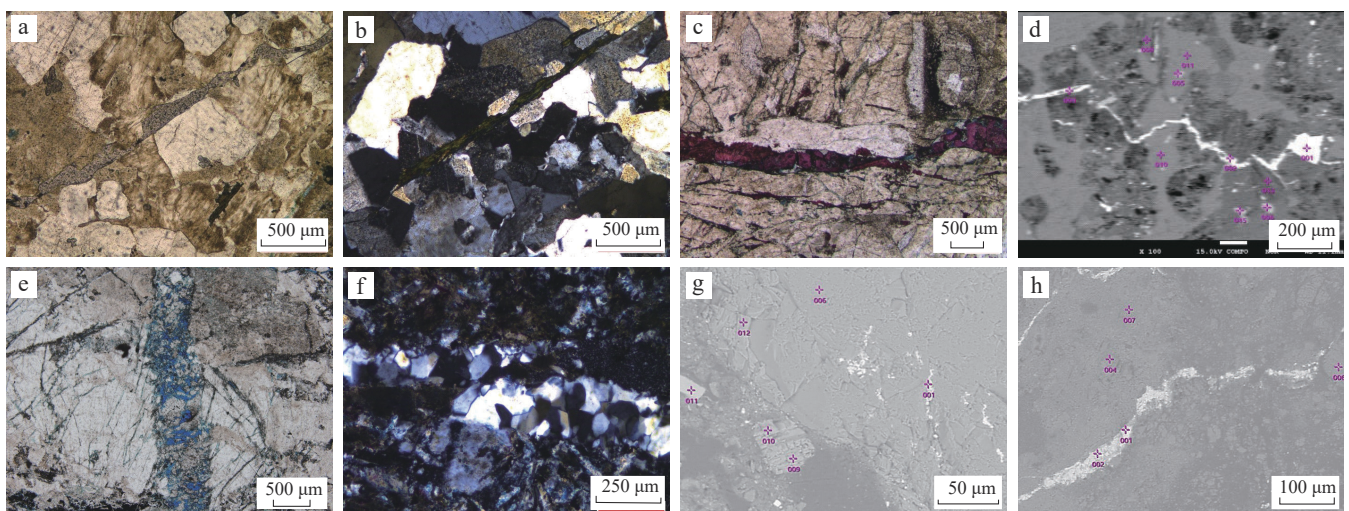


图9 琼东南盆地中生代潜山储层流体作用伴生脉体镜下照片

Fig. 9 Fluid interaction products in Mesozoic buried hill reservoirs, Qiongdongnan Basin

a. Y83-a井,埋深2 837.0 m,黏土矿物充填脉体,单偏光;b. Y83-a井,埋深2 876.0 m,绿泥石脉体,正交偏光;c. Y81-b井,埋深3 489.0 m,方解石脉体,单偏光;d. Y11-a井,埋深3 883.0 m,黄铁矿脉体,电子探针;e. Y81-a井,埋深3 058.2 m,菱铁矿脉体,单偏光;f. Y81-b井,埋深3 339.0 m,石英脉,正交偏光;g. Y71-a井,埋深3 824.0 m,石英脉,电子探针;h. L261-a井,埋深3 746.0 m,重晶石脉体,电子探针

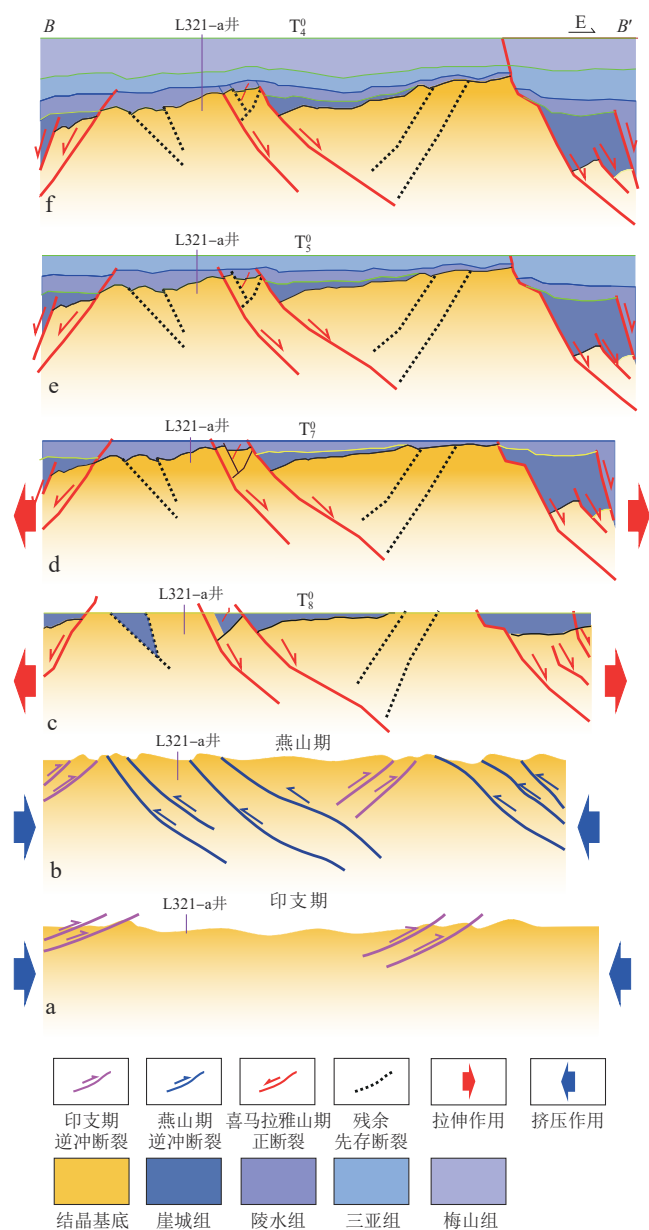


图10 琼东南盆地陵南地区中生代潜山储层构造演化

Fig. 10 Reservoir structural evolution in Lingnan area of

Mesozoic buried hills, Qiongdongnan Basin

a. 古特提斯应力场主导第一期挤压缝形成和暴露风化作用; b. 古太平洋应力场主导第一期挤压缝形成和暴露风化作用; c. 新生代早期初始拉张造成低位潜山早期埋藏; d. 新生代拆离式拉张背景造成潜山分异和中位潜山埋藏; e. 新生代挤压造成埋藏成型的潜山裂缝加密; f. 新生代持续沉降早期潜山埋藏定型;

历拗陷-热沉降期至今,同时伴随生、排烃作用和多元流体的持续改造,潜山储层最终形成。

4.3 琼东南盆地潜山带储层发育规律

通过对琼东南盆地中生代潜山综合分析,揭示印支期构造作用对于琼东南盆地中生代潜山带的分布具有明显的控制意义。通过对全盆地前新生代先存断裂

系统的解释,绘制了盆地印支期及燕山期构造纲要图(图11a),印支期盆地构造线呈明显的WE走向,并且存在南、北两条主要的构造带,燕山期构造线走向为NE向,对印支期构造有所改造,但是南、北分带的特征依然明显。新生代拉张背景下发育的正断层,多数为先存断裂活化的结果,新生代断层与内幕前新生代断层具有相同的产状,是判断先存断层的一个依据(图11b,c)。

基于不同潜山的特征,结合印支期构造线的分布,将琼东南潜山划分为南部潜山带、中部潜山带和北部潜山带3个潜山带(图12,图13)。印支期关键构造线的确定综合了区域构造格局、构造演化过程、基底的变质岩和辉绿岩出露等。L281潜山出露更老的变质岩基底,此处作为南部和中部潜山带的分界,北部松南-宝岛凹陷北缘,作为中部和北部潜山带的分界,中-北部潜山带界线以北的地震相具有明显先存褶皱特征,南侧以脆性变形的断裂为主。总体上,从南部潜山带到北部潜山带,埋藏深度、埋藏时间及现今海水深度都在减小,潜山发育部位在升高。

岩性上,从南部向NE方向,潜山的中-晚中生代岩浆岩在持续增多。南部潜山带以晚海西期-印支期岩性为主,中部潜山带以印支期-白垩系岩性为特征,北部潜山带则以侏罗系-白垩系岩性为主(图13)。

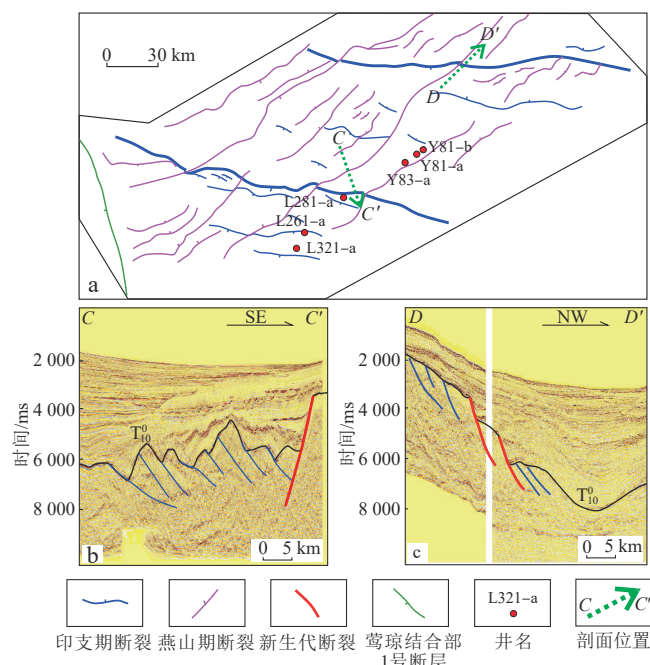


图11 琼东南盆地中生代潜山前新生代构造纲要

Fig. 11 Pre-Cenozoic structural outline of Mesozoic buried hills,

Qiongdongnan Basin

a. 琼东南盆地基底前新生代构造纲要平面图; b. 南部与中部潜山带界线典型地震剖面解释; c. 中部与北部潜山带界线典型地震剖面解释

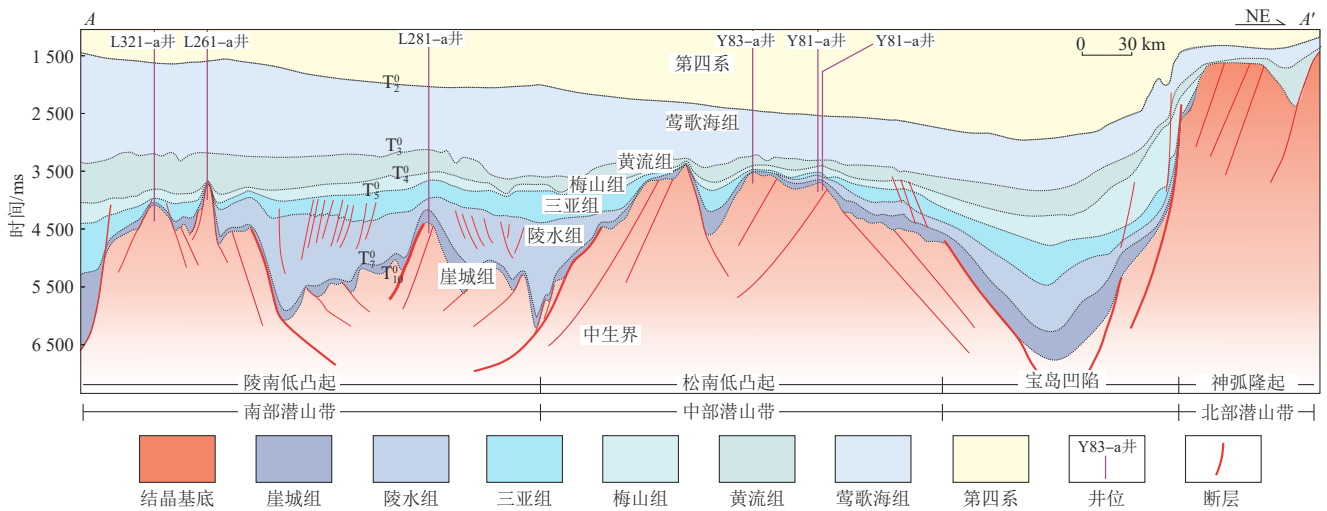


图12 琼东南盆地中生代潜山地层样式(剖面位置见图1a)

Fig. 12 Stratigraphic pattern of Mesozoic buried hills, Qiongdongnan Basin (see Fig. 1a for the location of the section)

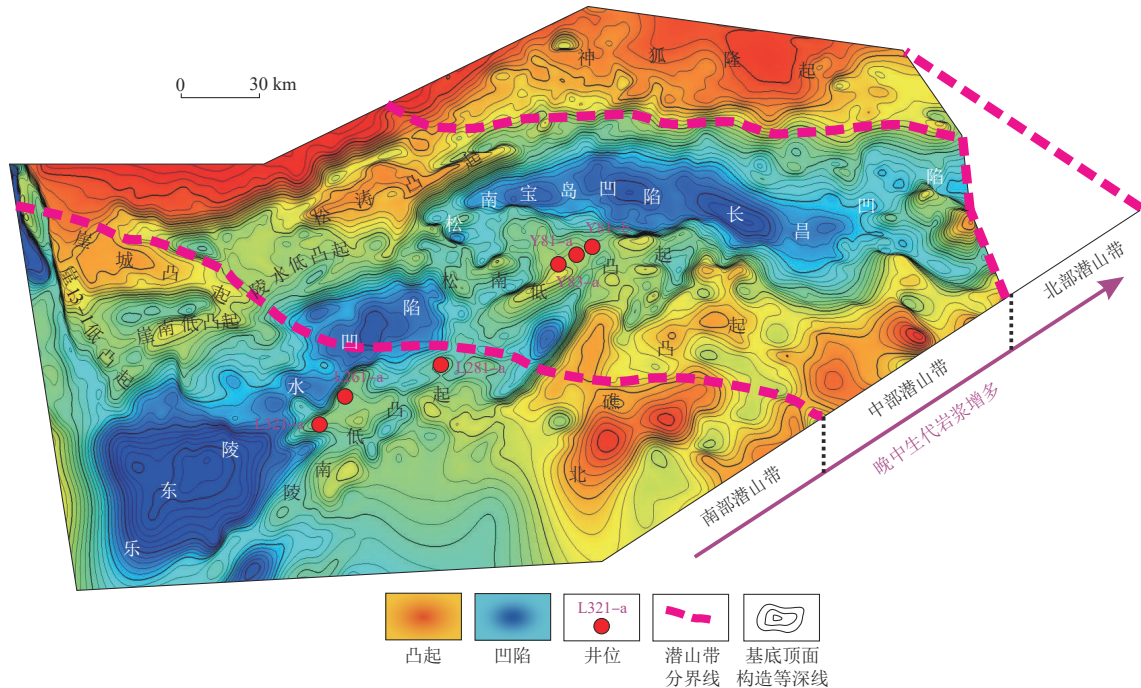


图13 琼东南盆地中生代潜山分带特征

Fig. 13 Zoning characteristics of Mesozoic buried hills, Qiongdongnan Basin

南部潜山带为典型双层结构型潜山,构造改造强,既有陵南低凸起的双主动逆冲型潜山,也有崖城凸起的强走滑改造潜山。陵南地区为深水低位早埋潜山,具有风化裂缝带+内幕裂缝带的双层结构,局部有致密夹层。储层为巨厚弱溶蚀-高密裂缝型,大气淡水改造弱,“印支期+燕山期”双主动逆冲盘的交叠部位为最有利成储区。而莺琼结合部位的崖13-1低凸起构造内发育的潜山具有明显的走滑改造作用,崖13-1低凸起呈NW向展布,且紧邻莺歌海走滑拉分盆地,受

哀牢山-红河走滑断裂带东延部分影响,燕山末-喜马拉雅构造运动早期走滑活动有利于先存裂缝活化和开启,且派生新生裂缝。

中部潜山带为三层结构型潜山,以深水中位较晚埋潜山为主,具有风化砂砾岩带+风化裂缝带+内幕裂缝带的三层结构,发育致密夹层,大气淡水改造强,储层为溶蚀-裂缝型,构造裂缝密度较小。中生代时可能位于比陵南更低的斜坡部位,保存了风化砂砾岩带。由于海拔高于陵南潜山,其埋藏较晚。

北部潜山带为单层弱风化改造型潜山,为相对浅水高位晚埋潜山,发育在宝岛-长昌凹陷北部,神狐隆起之上,其顶部存在一定风化溶蚀现象,但风化程度比较弱,现有钻井揭示其主要岩石类型为侏罗系-白垩系火成岩。基岩经历构造活动改造期较少,后期流体改造及新生代强烈逆冲反转更为关键,其有利区的识别及勘探研究可借鉴越南白虎油田^[5]。

总之,琼东南盆地潜山勘探的有利方向应该围绕先存逆冲挤压构造发育区,尤其是发育印支期构造的地区,其潜山内幕经历更多期次的构造改造,并且经历足够长的风化暴露期,叠加新生代拉张构造活动对裂缝的活化改造,更有利于潜山规模储层的形成。

5 结论

1) 潜山储层的岩性主要是以长英质矿物为主的花岗岩类,构造裂缝是主要的储集空间,岩浆岩主体缺乏原生孔隙,有效的孔隙类储集空间主要为次生孔隙。印支期和燕山期的逆冲挤压是潜山储层成缝的关键,新生代拉张构造活动引发裂缝体系的活化改造。

2) 大量的裂缝系统为大气淡水、深部流体和有机酸等的渗流提供了通道,是潜山储层产生溶蚀作用的前提与基础,潜山储层经历了多期流体作用,有效改善了潜山储层质量,并促成了潜山储层的垂向分带。

3) 琼东南盆地潜山分布具有分带规律,南部为双层强构造改造型潜山,中部为三层风化-构造改造型潜山,北部为单层弱风化改造型潜山;总体上,从南部潜山带到北部潜山带,埋藏深度、埋藏时间及现今海水深度都在减小,潜山发育部位在升高。

4) 经历印支期构造活动的老基岩经历更多期次的构造改造,且经历足够长的风化暴露期,叠加新生代拉张构造活动对裂缝的活化改造,更有利于优质潜山储层发育,邻近生烃中心周缘的潜山更具有形成大规模油气藏的潜力。

参 考 文 献

- [1] 胡文革. 塔里木盆地塔河油田潜山区古岩溶缝洞类型及其改造作用[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 43-53.
HU Wenge. Paleokarst fractured-cavity types and their reconstruction in buried hill area, Tahe oilfield, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 43-53.
- [2] SALAH M G, ALSHARHAN A S. The Precambrian basement: A major reservoir in the rifted basin, Gulf of Suez [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1998, 19(3/4): 201-222.
- [3] DE SOUZA CARVALHO I, MENDES J C, COSTA T. The role of

- fracturing and mineralogical alteration of basement gneiss in the oil exsudation in the Sousa Basin (Lower Cretaceous), Northeastern Brazil [J]. Journal of South American Earth Sciences, 2013, 47: 47-54.
- [4] YE Tao, CHEN Anqing, NIU Chengmin, et al. Characteristics and vertical zonation of large-scale granitic reservoirs, a case study from Penglai oil field in the Bohai Bay Basin, North China [J]. Geological Journal, 2020, 55(12): 8109-8121.
- [5] CUONG T X, WARREN J K. Bach Ho field, a fractured granitic basement reservoir, Cuu Long Basin, offshore SE Vietnam: A "buried-hill" play [J]. Journal of Petroleum Geology, 2009, 32(2): 129-156.
- [6] 谢文彦, 孟卫工, 张占文, 等. 辽河坳陷潜山内幕多期裂缝油藏成藏模式[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(6): 649-652.
XIE Wenyan, MENG Weigong, ZHANG Zhanwen, et al. Formation model of multi-stage fracture reservoirs inside the buried hills in Liaohe Depression [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(6): 649-652.
- [7] 窦立荣, 魏小东, 王景春, 等. 乍得 Bongor 盆地花岗岩基岩潜山储层特征[J]. 石油学报, 2015, 36(8): 897-904, 925.
DOU Lirong, WEI Xiaodong, WANG Jingchun, et al. Characteristics of granitic basement rock buried-hill reservoir in Bongor Basin, Chad [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(8): 897-904, 925.
- [8] 刘国平, 董少群, 李洪楠, 等. 辽河盆地西部凹陷古潜山天然裂缝特征及其影响因素[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(3): 525-533.
LIU Guoping, DONG Shaoqun, LI Hongnan, et al. Characteristics of natural fractures and their influencing factors in the paleo-buried-hill reservoirs of the western sag in the Liaohe Basin, China [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(3): 525-533.
- [9] 侯明才, 曹海洋, 李慧勇, 等. 渤海海域渤中 19-6 构造带深层潜山储层特征及其控制因素[J]. 天然气工业, 2019, 39(1): 33-44.
HOU Mingcai, CAO Haiyang, LI Huiyong, et al. Characteristics and controlling factors of deep buried-hill reservoirs in the BZ19-6 structural belt, Bohai Sea area [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(1): 33-44.
- [10] 廖新武, 谢润成, 周文, 等. 古地貌对渤海湾盆地 B 区块太古宇暴露型潜山变质岩风化带储层裂缝发育的影响[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 406-417.
LIAO Xinwu, XIE Runcheng, ZHOU Wen, et al. The effects of paleogeomorphology on the development of fractures in reservoirs of weathering metamorphic zone in an exposed Archean burial hill, Block B, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 406-417.
- [11] 胡安文, 王德英, 于海波, 等. 渤海湾盆地渤中 19-6 凝析气田天然气成因及油气成因关系判别[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(5): 903-912, 984.
HU Anwen, WANG Deying, YU Haibo, et al. Genesis of natural gas and genetic relationship between the gas and associated

- condensate in Bozhong 19-6 gas condensate field, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(5): 903-912, 984.
- [12] 牛涛, 范洪军, 范廷恩, 等. 渤中19-6气田太古界变质岩潜山“隔夹层”成因及发育模式[J]. *大庆石油地质与开发*, 2021, 40(4): 1-8.
- NIU Tao, FAN Hongjun, FAN Tingen, et al. Genesis and development pattern of the interlayer in Archeozoic metamorphic-rock buried hill of Bozhong 19-6 Gas Field [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2021, 40(4): 1-8.
- [13] 郑华, 康凯, 刘卫林, 等. 渤海深层变质岩潜山油藏裂缝主控因素及预测[J]. *岩性油气藏*, 2022, 34(3): 29-38.
- ZHENG Hua, KANG Kai, LIU Weilin, et al. Main controlling factors and prediction of fractures in deep metamorphic buried hill reservoirs in Bohai Sea[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2022, 34(3): 29-38.
- [14] 徐长贵, 杜晓峰, 刘晓健, 等. 渤海海域太古界深埋变质岩潜山优质储集层形成机制与油气勘探意义[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(2): 235-247, 294.
- XU Changgui, DU Xiaofeng, LIU Xiaojian, et al. Formation mechanism of high-quality deep buried-hill reservoir of Archean metamorphic rocks and its significance in petroleum exploration in Bohai Sea area [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(2): 235-247, 294.
- [15] 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.
- [16] 冷杰, 刘杰, 陈安清, 等. 珠江口盆地惠州26-6潜山中生代中基性火山岩储层成因[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 48(6): 661-674.
- LENG Jie, LIU Jie, CHEN Anqing, et al. Genesis of Mesozoic intermediate-basic volcanic reservoirs in Huizhou 26-6 buried hill, Pearl River Mouth Basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2021, 48(6): 661-674.
- [17] 刘杰, 徐国盛, 温华华, 等. 珠江口盆地惠州26-6构造古潜山—古近系油气成藏主控因素[J]. *天然气工业*, 2021, 41(11): 54-63.
- LIU Jie, XU Guosheng, WEN Huahua, et al. Main factors controlling the formation of buried hill-Paleogene reservoirs in 26-6 structure of Huizhou, Pearl River Mouth Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(11): 54-63.
- [18] 沈澈, 蒋有录, 苏圣民, 等. 二连盆地乌兰花凹陷花岗岩潜山储层特征及发育模式[J]. *大庆石油地质与开发*, 2021, 40(6): 12-19.
- SHEN Che, JIANG Youlu, SU Shengmin, et al. Characteristics and development modes of the granite buried-hill reservoir in Wulanhua Sag of Erlian Basin [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2021, 40(6): 12-19.
- [19] 蒋有录, 刘佳, 苏圣民, 等. 渤海湾盆地潜山油气藏保存条件探讨[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(4): 1-11.
- JIANG Youlu, LIU Jia, SU Shengmin, et al. Study on hydrocarbon preservation conditions of buried hill reservoirs in Bohai Bay Basin [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2022, 46(4): 1-11.
- [20] 倪国辉, 鲍志东, 杜旭东, 等. 辽河坳陷大民屯凹陷静北潜山基岩储集层研究[J]. *石油勘探与开发*, 2006, 33(4): 461-465.
- NI Guohui, BAO Zhidong, DU Xudong, et al. Bedrock reservoir of Jingbei buried hill in Damintun Sag, Liaohde Depression [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2006, 33(4): 461-465.
- [21] 刘宗宾, 程奇, 吕坐彬, 等. 渤海海域锦州南太古宇变质岩潜山储层特征及其发育模式[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2022, 52(3): 829-839.
- LIU Zongbin, CHENG Qi, LYU Zuobin, et al. Reservoir characteristics and development model of archean metamorphic buried hill in Jinzhou South Oilfield, Bohai Sea [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2022, 52(3): 829-839.
- [22] 黄建红, 谭先锋, 程承吉, 等. 花岗岩基岩风化壳结构特征及油气地质意义: 以柴达木盆地东坪地区基岩风化壳为例[J]. *地球科学*, 2016, 41(12): 2041-2060.
- HUANG Jianhong, TAN Xianfeng, CHENG Chengji, et al. Structural features of weathering crust of granitic basement rock and its petroleum geological significance: A case study of basement weathering crust of Dongping area in Qaidam Basin [J]. *Earth Science*, 2016, 41(12): 2041-2060.
- [23] 高长海, 孟士达, 查明, 等. 渤海湾盆地黄骅坳陷港北多层系潜山结构特征与成藏模式[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(3): 36-45.
- GAO Changhai, MENG Shida, ZHA Ming, et al. Structural characteristics and hydrocarbon accumulation models of Gangbei multi-layer buried hill in Huanghua Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2022, 46(3): 36-45.
- [24] 陈沛, 于小健, 陈现军, 等. 琼东南盆地YL8区基底潜山岩石类型及其录井识别特征[J]. *世界地质*, 2021, 40(3): 613-623.
- CHEN Pei, YU Xiaojian, CHEN Xianjun, et al. Rock types and logging identification characteristics of basement buried hill in YL8 area of southeastern Hainan Basin [J]. *World Geology*, 2021, 40(3): 613-623.
- [25] 宋爱学, 杨金海, 胡斌, 等. 琼东南盆地深水区古潜山裂缝性储层展布特征及有利区含油气性预测[J]. *海洋地质前沿*, 2021, 37(7): 60-67.
- SONG Aixue, YANG Jinhai, HU Bin, et al. Distribution patterns of fracture reservoirs in the buried-hills in deep water areas of Qiongdongnan Basin and prediction of favorable areas for

- hydrocarbon exploration[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2021, 37(7): 60-67.
- [26] 宋爱学, 杨计海, 杨金海, 等. 南海西部深水区潜山储层分带特征与有利储层预测[J]. *中国海上油气*, 2020, 32(6): 54-63.
- SONG Aixue, YANG Jihai, YANG Jinhai, et al. Zoning characteristics of buried hill reservoir and prediction of favorable reservoir in the western deep water area of South China Sea[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2020, 32(6): 54-63.
- [27] 邱宇, 李安琪, 周杰, 等. 琼东南盆地深水区松南低凸起花岗岩风化壳储层底界面识别技术[J]. *海洋地质前沿*, 2021, 37(7): 87-96.
- QIU Yu, LI Anqi, ZHOU Jie, et al. Calibrating the bottom interface of granite weathering crust reservoir on the Songnan lift in the deep water areas of Qiongdongnan Basin[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2021, 37(7): 87-96.
- [28] 唐历山, 范彩伟, 张焱, 等. 琼东南盆地花岗岩潜山发育演化及控藏作用[J]. *海洋地质前沿*, 2023, 39(3): 81-90.
- TANG Lishan, FAN Caiwei, ZHANG Yan, et al. Tectonic evolution of granite buried hill and its control on reservoir accumulation in Qiongdongnan Basin[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2023, 39(3): 81-90.
- [29] 鲁宝亮, 王璞珺, 张功成, 等. 南海北部陆缘盆地基底结构及其油气勘探意义[J]. *石油学报*, 2011, 32(4): 580-587.
- LU Baoliang, WANG Pujun, ZHANG Gongcheng, et al. Basement structures of an epicontinental basin in the northern South China Sea and their significance in petroleum prospect[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(4): 580-587.
- [30] 张功成. 南海北部陆坡深水区构造演化及其特征[J]. *石油学报*, 2010, 31(4): 528-533, 541.
- ZHANG Gongcheng. Tectonic evolution of deepwater area of northern continental margin in South China Sea[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(4): 528-533, 541.
- [31] 甘军, 季洪泉, 梁刚, 等. 琼东南盆地中生界潜山天然气成藏模式[J]. *现代地质*, 2022, 36(5): 1242-1253.
- GAN Jun, JI Hongquan, LIANG Gang, et al. Gas accumulation model of Mesozoic buried hill in Qiongdongnan Basin[J]. *Geoscience*, 2022, 36(5): 1242-1253.
- [32] 刘兵兵, 彭头平, 范蔚茗, 等. 哀牢山古特提斯洋盆闭合和印支造山开启的时限: 来自中-上三叠统碎屑锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素约束[J]. *大地构造与成矿学*, 2022, 46(1): 132-153.
- LIU Bingbing, PENG Touping, FAN Weiming, et al. Timing of the Ailaoshan Paleo-Tethys ocean closure and the Indosinian orogeny initiation: Constraints from the detrital zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes of the Middle-Upper Triassic strata[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2022, 46(1): 132-153.
- [33] 刘俊来, 唐渊, 宋志杰, 等. 滇西哀牢山构造带: 结构与演化[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2011, 41(5): 1285-1303.
- LIU Junlai, TANG Yuan, SONG Zhijie, et al. The Ailaoshan belt in western Yunnan: Tectonic framework and tectonic evolution[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2011, 41(5): 1285-1303.
- [34] 周心怀, 王清斌, 冯冲, 等. 渤海海域大型太古界潜山储层形成条件及地质意义[J]. *地球科学*, 2022, 47(5): 1534-1548.
- ZHOU Xinhui, WANG Qingbin, FENG Chong, et al. Formation conditions and geological significance of large Archean buried hill reservoirs in Bohai Sea[J]. *Earth Science*, 2022, 47(5): 1534-1548.
- [35] 叶涛, 牛成民, 王清斌, 等. 渤海湾盆地大型基岩潜山储层特征及其控制因素——以渤中 19-6 凝析气田为例[J]. *地质学报*, 2021, 95(6): 1889-1902.
- YE Tao, NIU Chengmin, WANG Qingbin, et al. Characteristics and controlling factors of large bedrock buried-hill reservoirs in the Bohai Bay Basin—a case study of the BZ19-6 condensate field[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(6): 1889-1902.
- [36] 曾联波, 王正国, 肖淑容, 等. 中国西部盆地挤压逆冲构造带低角度裂缝的成因及意义[J]. *石油学报*, 2009, 30(1): 56-60.
- ZENG Lianbo, WANG Zhengguo, XIAO Shurong, et al. The origin and geological significance of low dip-angle fractures in the thrust zones of the western basins of China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(1): 56-60.
- [37] 祖克威, 曾联波, 巩磊. 断层相关褶皱概念模型中的裂缝域[J]. *地质科学*, 2013, 48(4): 1140-1147.
- ZU Kewei, ZENG Lianbo, GONG Lei. Fractures domains in conceptual models of fault-related folds[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2013, 48(4): 1140-1147.
- [38] 鞠玮, 侯贵廷, 黄少英, 等. 断层相关褶皱对砂岩构造裂缝发育的控制约束[J]. *高校地质学报*, 2014, 20(1): 105-113.
- JU Wei, HOU Guiting, HUANG Shaoying, et al. Constraints and controls of fault related folds on the development of tectonic fractures in sandstones[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2014, 20(1): 105-113.
- [39] 丁歌. 浅部流体对蓬莱 9-1 潜山花岗岩储层的改造作用[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- DING Ge. The reformation of shallow fluid for granite reservoir of buried hill in Penglai 9-1[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [40] 何登发, 崔永谦, 张煜颖, 等. 渤海湾盆地冀中坳陷古潜山的构造成因类型[J]. *岩石学报*, 2017, 33(4): 1338-1356.
- HE Dengfa, CUI Yongqian, ZHANG Yuying, et al. Structural genetic types of paleo-buried hill in Jizhong Depression, Bohai Bay Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(4): 1338-1356.

(编辑 张亚雄)