

琼东南盆地松南低凸起YA区花岗岩潜山风化壳储层特征及发育控制因素

郭原草^{1,2}, 郭建华^{2,3}, 劳海港⁴, 李智宇³, 余 焯², 陈 广³, 吴诗情³, 黄俨然²

(1. 湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南科技大学 地球科学与空间信息工程学院, 湖南 湘潭 411201;

3. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083; 4. 华北理工大学 矿业工程学院, 河北 唐山 063210)

摘要:为揭示琼东南盆地松南低凸起YA区花岗岩潜山型油气藏发育机理与成藏规模,运用岩心、物性、元素、磷灰石裂变径迹分析测试资料及测井-地震解释,研究了区内花岗岩潜山风化壳储层特征及发育控制因素、风化壳发育史及残余厚度分布。研究表明:YA区花岗岩系形成于印支期早三叠世,盆地基底在古新世—中新世经历多次构造抬升及沉降,风化壳分两期形成并得以保存,区内热带季风型古气候促进了花岗岩系化学风化作用。区域构造演化、古气候及岩石类型是控制区内古潜山风化壳发育的主要因素。风化壳发育程度存在显著差异性,区内古构造高点处的花岗岩风化壳残余厚度大。YA区花岗岩具有显著的钙碱性-碱性、准铝质-过铝质特征,属于易风化岩石类型。区内风化壳垂向上可分为残积-坡积层、砂化层、风化裂缝层、水平潜流层和基岩层。风化裂缝层是最有利储层,平均孔隙度为11.46%,平均渗透率为 $5.98 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,物性随深度增加逐渐变差。花岗岩风化壳在测井曲线上呈现高自然伽马值、高电阻率、低密度和高声波时差等特征,测井指标变化趋势与物性变化趋势基本吻合。地震波反射属性高异常程度与风化壳裂缝发育程度基本呈正相关规律。

关键词:风化裂缝层;储层特征;储层发育;风化壳;花岗岩潜山;松南低凸起;琼东南盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Characteristics and factors controlling the development of weathered crust reservoirs in buried granite hills, YA area, Songnan swell, Qiongdongnan Basin

GUO Yuancao^{1,2}, GUO Jianhua^{2,3}, LAO Haigang⁴, LI Zhiyu³, YU Ye², Chen Guang³, WU Shiqing³, HUANG Yanran²

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China; 2. School of Earth Sciences and Spatial Information Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China; 3. School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China; 4. College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210, China)

Abstract: This study aims to reveal the developmental mechanisms and scale of hydrocarbon reservoirs in buried granite hills in the YA area, Songnan swell, Qiongdongnan Basin. Using the analytical and test data of cores, physical properties, elements, and apatite fission tracks, as well as log and seismic interpretations, we investigate the characteristics and factors controlling the development of weathered crust reservoirs in the buried granite hills, as well as the developmental history and residual thickness of the weathered crust. The results indicate that the granite series in the YA area are formed during the Early Triassic of the Indo-Chinese Epoch. The granite basinal basement underwent multiple tectonic uplifts and subsidence from the Paleocene to the Miocene, during which the weathered crust is formed and preserved in two distinct phases. The tropical monsoon paleoclimate promoted the chemical weathering of the granite series in the area. Key factors governing the development of the weathered crust of ancient buried hills in the area include regional tectonic evolution, paleoclimate, and rock types. The weathered crust exhibits significantly different developmental degrees across the area, with the weathered granite crust at paleo-

收稿日期:2023-10-11;修回日期:2024-05-10。

第一作者简介:郭原草(1984—),男,博士、讲师,沉积学与石油地质学,E-mail:xctmac@sina.cn。

通信作者简介:郭建华(1957—),男,博士、教授,沉积学与石油地质学,E-mail:gjh796@csu.edu.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05026-002);中海油湛江分公司外部协作项目(CCL2018ZJFN1603)。

structural crests exhibiting substantial residual thicknesses. Granites in the YA area possess distinct calc-alkaline to alkaline and meta-aluminous to peraluminous characteristics, which make them prone to weathering. Vertically, the weathered crust in the YA area can be categorized into five layers, namely eluvial-deluvial, sandy, weathered fractured, horizontal phreatic, and bedrock layers from top to bottom. The weathered fractured layer, among others, emerges as the most favorable reservoir, demonstrating an average porosity of 11.46% and an average permeability of $5.98 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, and its physical properties deteriorate with increasing burial depth. The weathered granite crust exhibits high natural gamma-ray (GR), high resistivity, low density, and high interval transit time values, as indicated on logging curves, which are consistent with its physical property evolution. Furthermore, there exists a positive correlation between the degree of high-amplitude anomalies in seismic wave reflections and the developmental degree of fractures within the weathered crust.

Key words: weathered fractured layer, reservoir characteristics, reservoir development, weathered crust, buried granite hill, Songnan swell, Qiongdongnan Basin

引用格式:郭原草,郭建华,劳海港,等.琼东南盆地松南低凸起YA区花岗岩潜山风化壳储层特征及发育控制因素[J].石油与天然气地质,2024,45(4):1155–1167. DOI:10.11743/ogg20240418.

GUO Yuancao, GUO Jianhua, LAO Haigang, et al. Characteristics and factors controlling the development of weathered crust reservoirs in buried granite hills, YA area, Songnan swell, Qiongdongnan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(4): 1155–1167. DOI: 10.11743/ogg20240418.

潜山型油气藏作为新的油气勘探目标和重要的接替型油气藏,已经引起越来越多的关注^[1–2]。针对花岗岩潜山型油气藏的勘探已取得重要突破^[3–8],储层特征及发育控制因素等问题已成为研究热点,但研究工作集中在渤海湾盆地蓬莱9–1油田、柴达木盆地东坪气田等有限目标^[9–16]。琼东南盆地是南海西北部油气勘探的重点区域,2019年松南低凸起YA区YA-11井钻探成功,证明区内具备大型优质花岗岩潜山型储层发育的地质条件^[17–19]。近年来,前人针对松南低凸起YA区花岗岩潜山储层开展了相关研究,认为基底潜山岩石类型主要为花岗闪长岩和二长花岗岩^[20],形成于板块碰撞–俯冲后的反向伸展环境^[21]。YA区前古近系花岗岩潜山分布较广,垂向上可分为砂砾质风化带、风化裂缝带及内幕裂缝带^[22–23],地震响应随着古潜山风化壳厚度增加而变化^[24],盆地中生代潜山平面分布具有南北分带规律,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^[25],构造改造、长英质岩性、断裂发育情况、古隆起暴露与较弱的后期成岩作用是控制YA区花岗岩潜山储层发育的主要因素^[25–28]。

但是,花岗岩潜山型油气藏储层物性纵横向变化大、非均质性强、储层有效性差、勘探难度较大。由于对风化壳发育机理等问题认识不一,出现了不尽相同的垂向分层(带)方案^[9–16, 22–23, 25–27]。目前关于琼东南盆地前古近系花岗岩潜山储层的研究总体相对不足,缺乏可借鉴的成功经验。由于深海钻探技术难度较大,成本高昂,钻井资料极其有限,加上花岗岩潜山岩石和

储集空间类型多样,储层特征及发育控制因素复杂,平面展布规律尚不清楚,造成区内潜山勘探程度总体偏低。本文以前人研究为基础,结合矿物岩石学分析、钻井取心、物性测试、磷灰石裂变径迹与地震–测井解释等方面资料,综合研究琼东南盆地松南低凸起YA区花岗岩潜山风化壳储层特征、风化壳发育过程及控制潜山发育之因素,试图为本区潜山储层评价及勘探部署提供理论依据。

1 区域地质概况

琼东南盆地位于南海西北部大陆边缘,面积约 $4 \times 10^4 \text{ km}^2$,属张拉型盆地。盆地在平面上呈NE–SW向展布(图1),具有南北分带的构造特征,由南向北依次分为4个一级构造单元:南部隆起区、中央坳陷区、中部隆起区和北部坳陷区。盆地内发育古近系至第四系,由老到新依次为岭头组、崖城组、陵水组、三亚组、梅山组、黄流组、莺歌海组和乐东组。盆地在中生代经历了剧烈的岩浆活动,构造演化史较为复杂,构造抬升导致花岗岩大面积出露地表接受风化剥蚀作用。新生代开始盆地再次经历拉张、断陷与沉积,形成一个以花岗岩为基底的断陷盆地(始新世–渐新世)。YA区位于盆地中央坳陷区松南低凸起东部,水深超过1 500 m,面积约3 000 km^2 ,已实现三维地震全覆盖,是盆地深水区内富有潜力的勘探区块^[17–19]。区内花岗岩形成于三叠纪早期($246.1 \text{ Ma} \pm 6.0 \text{ Ma}$),以二长花岗岩及闪长花岗岩为主,花岗岩潜山较为发育。

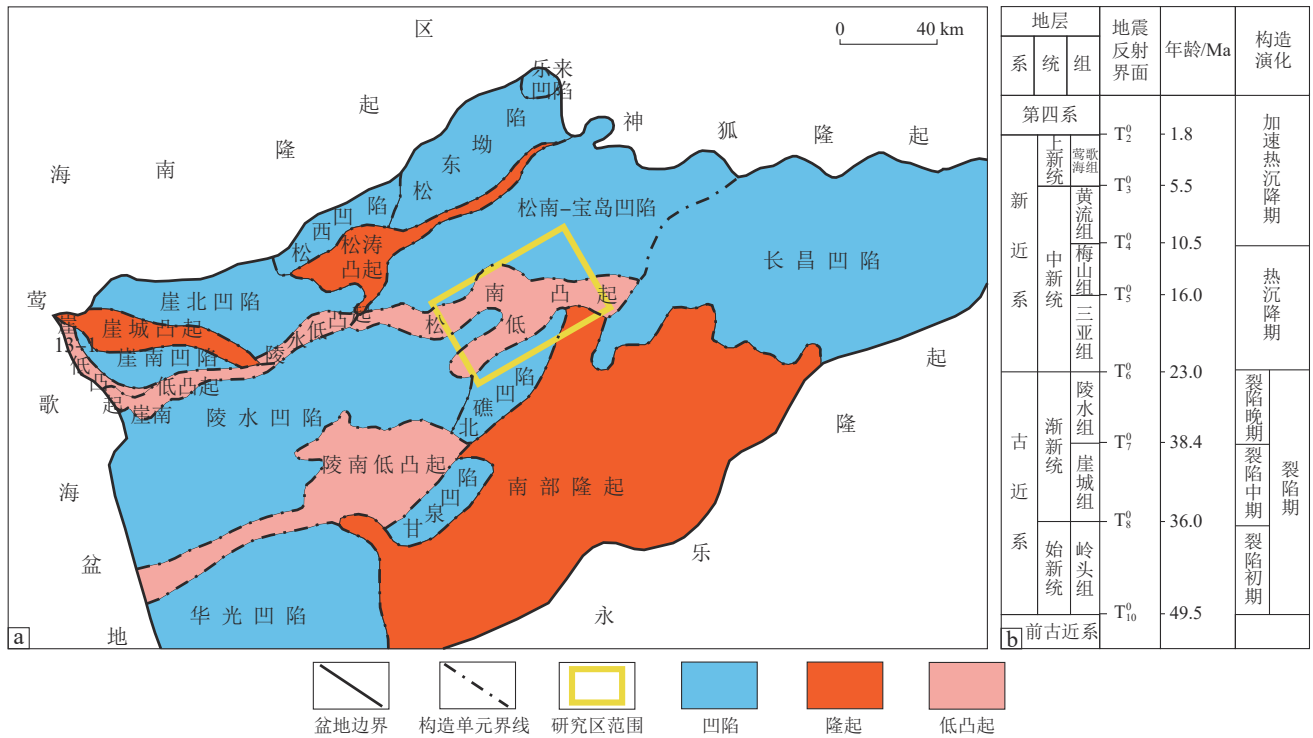


图1 琼东南盆地构造区划(a)与地层系统(b)
Fig. 1 Structural division (a) and stratigraphic column (b) of the Qiongdongnan Basin

2 花岗岩潜山储层特征

2.1 潜山岩石学特征

研究区潜山岩性以花岗闪长岩和二长花岗岩为主,主要矿物为石英、钾长石和斜长石^[22]。岩石矿物组成分析表明,区内花岗岩SiO₂含量较高,为56.26%~66.97%(均值62.71%),为中-酸性岩浆岩,长石类型以钾长石及斜长石为主。全碱(Na₂O+K₂O)含量为4.86%~11.10%(均值7.26%),K₂O含量为2.12%~

7.02%(均值4.25%),均为较高值。碱度率(AR,AR=Al₂O₃/(Al₂O₃+CaO+Na₂O+K₂O))为1.58~3.39(均值2.35),里特曼指数(σ)为1.50~6.90(均值2.87),在SiO₂-AR图上表现为钙碱性-碱性系列。K₂O/Na₂O含量比值也偏高,为0.57~9.26(均值2.60),属钾质岩系。铝饱和指数(A/KNC)为0.59~2.64(平均1.19),在A/NK-A/KNC图解上表现为准铝质-过铝质特征[A/NK=Al₂O₃/(Na₂O+K₂O),A/KNC=Al₂O₃/(K₂O+Na₂O+CaO)]。FeO/MgO含量比值为1.67~9.92(均值4.40),介于S型和铝质A型花岗岩之间(图2)。稀土元素分析表明,区内花岗岩主要形成于三叠纪早期,

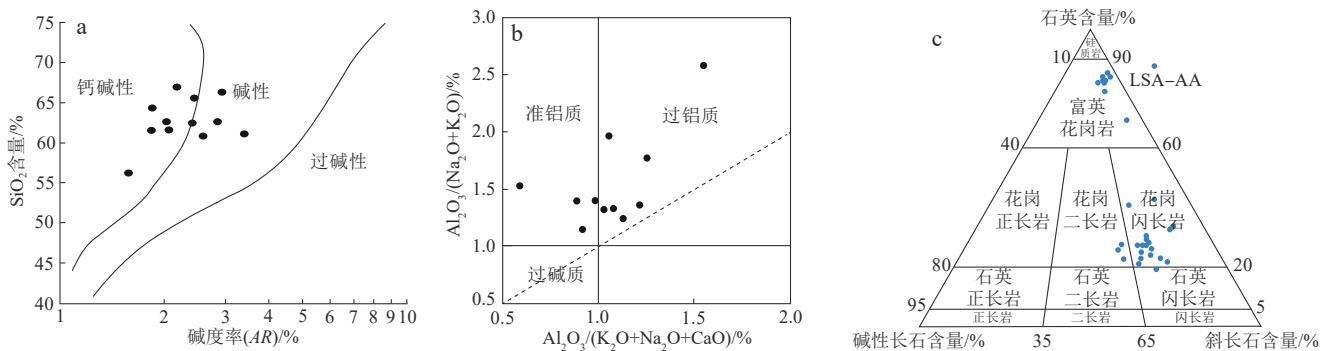


图2 琼东南盆地松南低凸起YA-11井花岗岩化学组成及岩石类型散点图

Fig. 2 Scatter diagram showing the chemical composition and rock types of granites in well YA-11 in the Songnan swell, Qiongdongnan Basin

a. 花岗岩SiO₂含量-碱度率散点图; b. 花岗岩A/NK-A/KNC散点图; c. 花岗岩岩石类型散点图
[AR=Al₂O₃/(Al₂O₃+CaO+Na₂O+K₂O), A/NK=Al₂O₃/(Na₂O+K₂O), A/KNC=Al₂O₃/(K₂O+Na₂O+CaO)]

与华南大陆三叠纪初期广泛发育的强过铝质花岗岩一致^[29]。

2.2 潜山分层特征及储集空间

前期研究表明,由于风化作用强度随深度逐渐减弱,花岗岩岩石结构破坏程度也逐渐降低,导致风化壳在垂向上呈显著分层特征。本区花岗岩风化壳垂向上可分为残积坡积层—砂化层—风化裂缝层—水平潜流缝洞层—基岩层^[30](图3),其中优质储层主要发育在砂化层、风化裂缝层和水平潜流层中。花岗岩中长石、角闪石等矿物在大气降水导致的水解、水化、酸化及渗

滤作用下大量分解、溶解并流失,最终仅剩石英颗粒,因此储集空间以石英粒间孔为主,在野外极易与砂岩储层混淆(图4a)。风化裂缝层埋藏较砂化层更深,原岩受到大气降水渗滤作用相对较弱,储集空间以溶蚀孔洞与裂缝为主,由大气降水沿既有裂缝流动渗透导致原岩溶蚀破碎、裂缝加密加宽所形成(图4b,c,e,f);岩浆冷凝收缩及后期构造运动还会形成收缩裂缝与构造裂缝(图4b,c,h)。水平潜流层已位于地表之下,基本不受大气降水渗滤作用影响。地下潜流同样可引起原岩水化、水解及酸化,造成岩石沿水平方向溶蚀、裂缝沿水平方向开展,形成沿水平方向发育的裂缝—孔

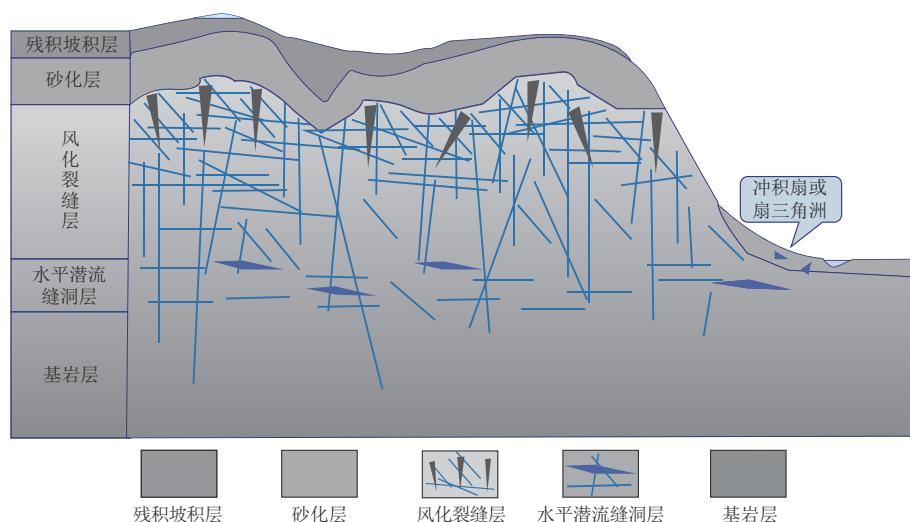


图3 琼东南盆地松南低凸起YA区花岗岩风化壳垂向分层特征

Fig. 3 Vertical stratification of the weathered granite crust in the YA area of the Songnan swell, Qiongdongnan Basin

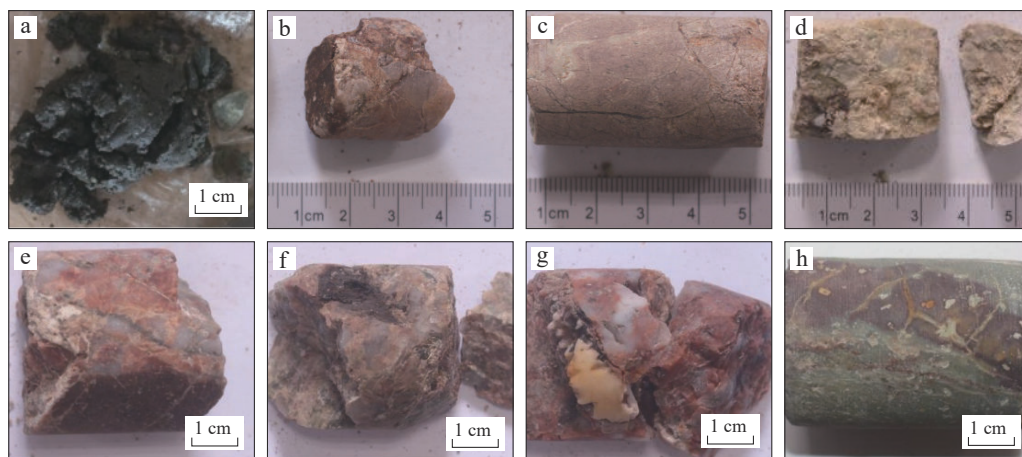


图4 琼东南盆地松南低凸起YA区潜山岩心照片

Fig. 4 Core photos of buried hills in the YA area of the Songnan swell, Qiongdongnan Basin

a. 砂化层, YA-32井, 埋深2 910 m; b. 风化裂缝层, YA-11井, 埋深2 974 m, 砾状, 破碎严重; c. 风化裂缝层, YA-11井, 埋深3 006 m, 张性裂缝中见泥质充填; d. 水平潜流层; YA-11井, 埋深3 058 m, 见溶蚀孔洞; e. 风化裂缝层, YA-12井, 埋深3 323 m, 高角度裂缝见后期矿物充填, 裂缝密度1~3条/dm; f. 风化裂缝层, YA-12井, 埋深3 356 m, 裂缝充填脉中见溶蚀孔洞; g. 水平潜流层, YA-12井, 埋深3 470 m, 裂缝充填脉中见溶蚀孔洞; h. 风化裂缝层, YA-31井, 埋深2 833 m, 网状高角度裂缝

洞系统(图4d,g),储集空间以溶蚀裂缝、构造裂缝为主,溶蚀孔隙次之。

2.3 潜山测井响应特征

花岗岩具有较强的放射性,在自然伽马能谱曲线上明显区别于上覆碎屑砂砾岩^[27]。花岗岩长期暴露于地表并遭受风化淋滤作用,致密岩石变松散,孔隙、裂缝等逐渐发育,形成储集空间。花岗岩垂向上各层带受到不同强度的风化作用,岩石储集性及密度具有显著的分层特征,通过测井曲线可以较好识别出花岗岩风化壳垂向结构。

YA-32井主要测井指标统计显示(表1),自然伽马均值随深度增加而变大,其中残积坡积层自然伽马射线强度均值为120 API,高于砂化层和风化裂缝层,推测可能是由于残留花岗岩块所致。声波时差均值由残积坡积层的342.4 $\mu\text{s/m}$ 降至基岩层的219.0 $\mu\text{s/m}$,符合岩性和非均值性的变化趋势。电阻率均值基本随深度增加而增大,其中残积坡积层电阻率值由于样本数较少且毫无变化,可信度较低;随着埋深增加,风化程度减弱,原岩结构尚未完全破坏,风化裂缝层、水平潜流缝洞层和基岩层的体积密度明显高于上覆砂化层和残积坡积层,

密度随着埋深增加逐渐增大。砂化层中子孔隙度均值最大,为46.9%,显示出良好的物性,是潜在的有利储层,而水平潜流缝洞层的中子孔隙度均值与基岩层相差已不大,均为11.0%左右,远小于砂化层(图5)。

松南低凸起钻探结果显示,YA-32井潜山风化壳自上而下可识别出残积坡积层、砂化层、风化裂缝层及水平潜流缝洞层,风化壳发育较为完整。埋深2 910.0 m以下自然伽马基线值显著升高,呈现出高自然伽马值、高电阻率、低密度、高声波时差特征。埋深2 910.0 ~ 2 930.5 m井段被划为砂化层,该层岩性疏松,成像测井图中未见裂缝显示。该层在成像测井静态图上主要显示为浅色高阻块状相,在成像测井动态图上主要显示为明显的水平层状结构,推测是由于构造抬升过程中的差异风化作用所致。埋深2 930.5 ~ 3 055.0 m井段划为风化裂缝层,成像测井图中可见高角度裂缝及破碎层(图6)。埋深3 055.0 ~ 3 170.5 m井段被划为水平潜流溶蚀缝洞层,成像测井图中可见裂缝,以水平裂缝为主(图6)。

2.4 潜山储层物性特征

目前松南低凸起上钻遇潜山的探井有5口且均已见气流。由于区内钻井极其有限,储层物性测试资料

表1 琼东南盆地松南低凸起YA-32井测井数据统计

Table 1 Statistics of log data from well YA-32 in the Songnan swell, Qiongdongnan Basin

潜山分层	伽马射线强度/API	声波时差/($\mu\text{s/m}$)	电阻率/($\Omega\cdot\text{m}$)	体积密度/(g/cm^3)	中子孔隙度/%
残积坡积层	33.4 ~ 215.5(120.1)	0 ~ 432.30(342.43)	6.19 ~ 6.19(6.19)	1.78 ~ 2.44(2.27)	15.60 ~ 52.20(26.60)
砂化层	50.3 ~ 143.6(101.4)	176.46 ~ 372.94(281.75)	0 ~ 8.82(3.24)	1.70 ~ 2.47(2.04)	14.90 ~ 65.20(46.90)
风化裂缝层	64.2 ~ 158.0(121.1)	174.82 ~ 424.10(243.38)	3.71 ~ 208.68(21.80)	1.12 ~ 2.66(2.39)	3.40 ~ 59.50(14.90)
水平潜流缝洞层	101.9 ~ 222.3(135.8)	174.82 ~ 391.63(228.94)	3.70 ~ 162.37(25.42)	0.48 ~ 7.24(2.47)	1.40 ~ 44.80(10.80)
基岩层	105.4 ~ 207.1(133.0)	157.77 ~ 285.69(219.10)	6.03 ~ 182.99(29.66)	1.76 ~ 2.64(2.47)	2.20 ~ 28.20(11.00)

注:表中测井数据为最小值~最大值(平均值)。

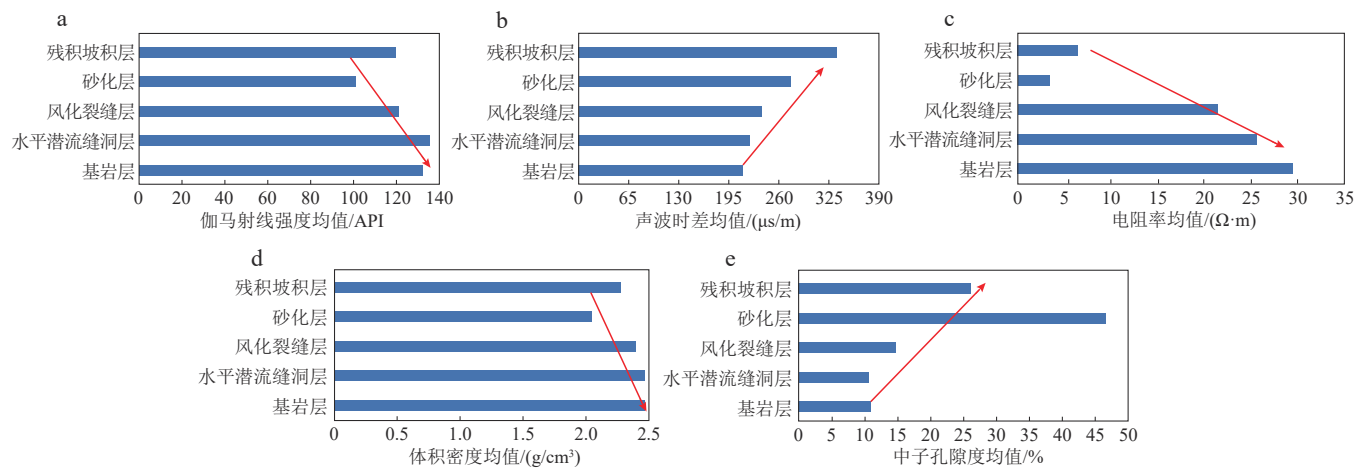


图5 琼东南盆地松南低凸起YA-32井主要测井指标平均值分布柱状图

Fig. 5 Bar charts showing the averages of primary log parameters in well YA-32 in the Songnan swell, Qiongdongnan Basin

a. 伽马射线强度;b. 声波时差;c. 电阻率;d. 体积密度;e. 中子孔隙度

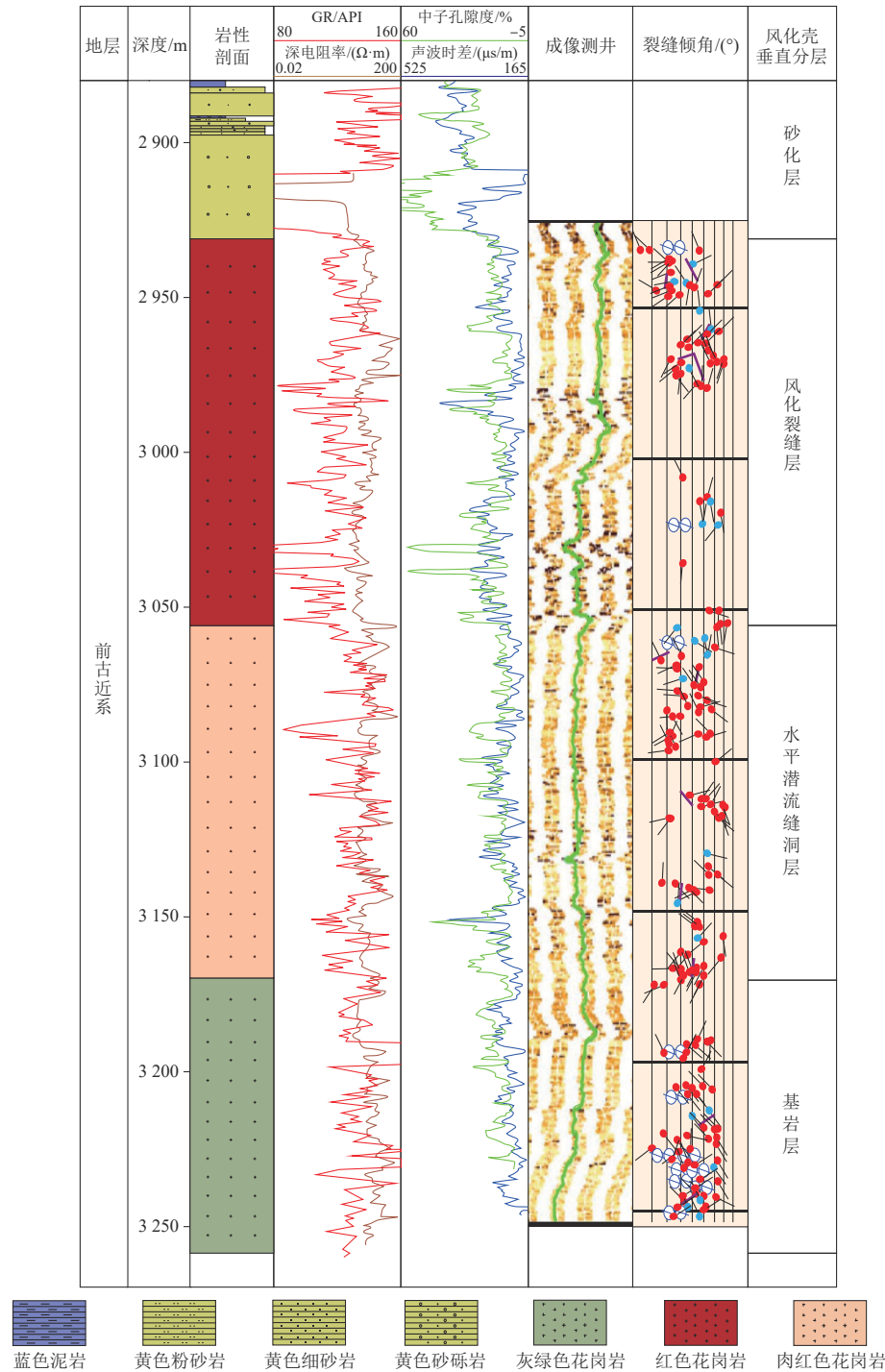


图6 琼东南盆地松南低凸起YA-32井潜山风化壳分层及裂缝成像测井解释

Fig. 6 Stratification and fracture formation micro-imaging (FMI) log interpretation of the weathered crust of buried hills in well YA-32 in the Songnan swell, Qiongdongnan Basin

较少,下面以YA-11井风化裂缝层为例分析花岗岩潜山风化壳储层物性特征。YA-11井风化裂缝层位于埋深2 935~3 043 m井段,厚约108 m。由于不同成因、不同时期的裂缝叠加与改造及后期断层作用,造成该段花岗岩破碎严重,有些层段呈砾状,部分张性裂缝中充填有小碎块或泥质,呈强烈的氧化颜色(图4)。针

对该井风化裂缝层18个样品做了常规物性分析(2个样品采自水平潜流缝洞层内),针对1个样品做了覆压下岩石孔渗测定分析,针对2个样品做了高温高压多参数测试。常规物性测试表明,最大孔隙度为17.80%,最小孔隙度是2.69%,平均孔隙度为11.46%。最大渗透率为 $13.60\times10^{-3}\mu\text{m}^2$,最小渗透率小于 $0.05\times10^{-3}\mu\text{m}^2$,

表 2 琼东南盆地松南低凸起 YA-11 井花岗岩风化壳储层常规物性测试部分数据

Table 2 Partial data from conventional physical property tests of weathered granite crust reservoirs in well YA-11 in the Songnan swell, Qiongdongnan Basin

样品编号	井深/m	岩性	孔隙度/%	渗透率/($10^{-3}\mu\text{m}^2$)	颗粒密度/(g/cm^3)	视密度/(g/cm^3)
4-2	2 968	花岗岩	9.39	3.71	2.59	2.35
4-5	2 974	花岗岩	12.70	8.22	2.63	2.29
4-6	2 984	花岗岩	17.80	5.95	2.62	2.15
2-2	2 990	花岗岩	8.30	12.50	2.61	2.39
2-5	2 999	花岗岩	11.20	13.60	2.65	2.35
4-9	3 010	花岗岩	7.09	0.05	2.65	2.46
3-1	3 016	花岗岩	2.69	0.05	2.57	2.57
3-2	3 024	花岗岩	3.57	0.05	2.56	2.56
3-3	3 050	花岗岩	11.40	0.73	2.39	2.39
3-4	3 060	花岗岩	13.50	0.38	2.31	2.31

平均 $5.98\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$, 反映出很好的储层物性。但是孔隙度、渗透率随深度变化较大, 尤其是渗透率自埋深 2 999 m 处起明显变差(表 2)。对采自埋深 2 972 m 处样品做覆压下孔隙度、渗透率测试, 结果显示孔隙度均在 12 % 以上, 渗透率大于 $13.9\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$, 孔隙度与渗透率随着覆压增加均显著下降(表 3; 图 7)。对采自埋深 2 974 ~ 3 006 m 井段的样品进行了高温高压多参数测试, 结果仍反映了较好的孔、渗性(表 4)。但是渗透率自埋深 3 000 m 以下明显下降, 反映出裂缝连通性能显

著下降, 裂缝与孔隙逐渐闭合, 原岩固结程度增加, 储层物性逐渐变差, 3 种测试方法所反映出的物性基本相近。按裂缝型储层评价标准^[31], 风化裂缝层中主要发育 I 类储层, II 类储层次之(图 8)。据测井综合解释结果, 风化裂缝层根据裂隙发育程度不同可以分成 3 段。第一段: 埋深 2 935 ~ 2 965 m 层段裂缝非常发育, 孔隙度平均可达 10 %, 最高可达 18 %。第二段: 埋深 2 965 ~ 2 992 m 层段裂缝较发育, 孔隙度平均可达 8 %, 最高可达 12 %。第三段: 埋深 2 992 ~ 3 043 m 层段裂缝不发育, 平均孔隙度约为 0 ~ 3 %, 最高可达 6 %, 非均质性极强。

表 3 琼东南盆地松南低凸起 YA-11 井埋深 2 972m 处覆压下风化壳储层孔隙度和渗透率测定数据

Table 3 Measured porosity and permeability of weathered crust reservoirs under overburden pressure at a burial depth of 2 972 m in well YA-11 in the Songnan swell, Qiongdongnan Basin

测压点	净上覆 岩压/MPa	孔隙 体积/mL	孔隙度/%	渗透率/ ($10^{-3}\mu\text{m}^2$)
1	2.0	1.597	14.9	13.90
2	4.0	1.451	13.8	10.10
3	6.0	1.367	13.1	8.30
4	8.0	1.313	12.6	7.24
5	10.0	1.277	12.3	6.43
6	12.0	1.247	12.1	5.91

3 风化壳发育控制因素

3.1 区域构造运动

3.1.1 印支运动与花岗岩系形成

琼东南盆地位于华南板块东南缘, 受周缘板块运动影响较为显著, 构造运动较为复杂。据推测本区在

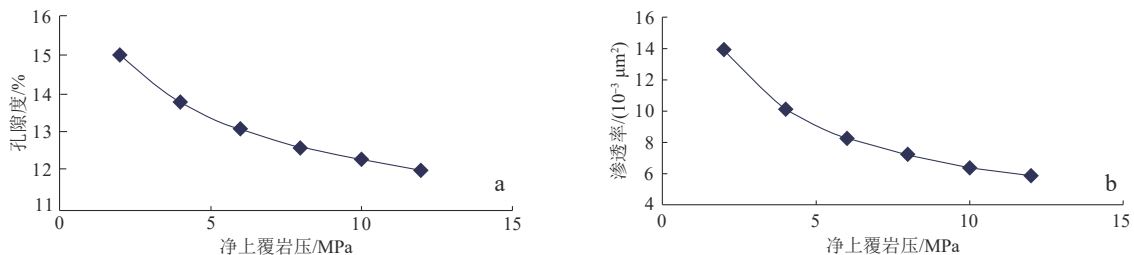


图 7 琼东南盆地松南低凸起 YA-11 井埋深 2 972 m 深处覆压下岩样孔隙度和渗透率曲线

Fig. 7 Porosity and permeability curves of rock samples under overburden pressure at a depth of 2 972 m in well YA-11 in the Songnan swell, Qiongdongnan Basin

a. 净上覆岩压-孔隙度关系曲线; b. 净上覆岩压-渗透率关系曲线

表4 琼东南盆地松南低凸起YA-11井高温高压岩心
多参数测试数据

Table 4 Multi-parameter test data of cores under high
temperature and high pressure in well YA-11 in the Songnan
swell, Qiongdongnan Basin

样品编号	样品深度/m	围压/MPa	孔隙度/%	渗透率/($10^{-3} \mu\text{m}^2$)
4-5	2 974	3	12.5	6.370
4-5	2 974	11	11.5	4.930
4-8	3 006	3	16.8	0.125
4-8	3 006	11	16.1	0.092

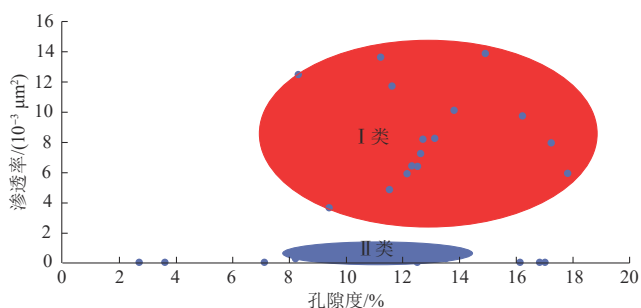


图8 琼东南盆地松南低凸起YA-11井样品实测物性分布
及评价

Fig. 8 Diagram showing the measured physical property distribution
and evaluation results of samples from well YA-11 in the Songnan
swell, Qiongdongnan Basin

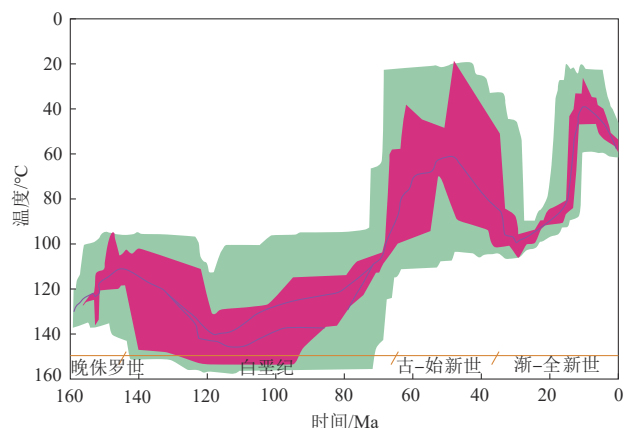


图9 琼东南盆地松南低凸起YA-31井磷灰石裂变径迹模拟
Fig. 9 Simulation of apatite fission tracks in well YA-31 in the
Songnan swell, Qiongdongnan Basin

[蓝色细实线代表磷灰石裂变径迹拟合路径最佳结果(裂变径迹年龄GOF检验值最大),紫红色区域代表拟合路径较好结果(裂变径迹长度K-S检验值和年龄GOF检验值均大于50%),浅绿色区域代表拟合路径可接受结果(K-S检验值和GOF检验值均大于5%。]

早三叠世为造山环境,太平洋板块在印支期向西北方向俯冲至华南板块之下,随后伸展。其中俯冲发生在253~239 Ma,伸展发生在232~215 Ma,在岩石圈拆下沉、炽热软流圈上涌的动力学机制下形成花岗

岩^[32]。琼东南盆地基底属S型过铝质-弱过铝质花岗岩,形成时间为243~233 Ma^[33-35]。锆石SHRIMP U-Pb年龄谐和性研究表明:锆石颗粒²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄加权平均值为246.1 Ma±6.0 Ma,可以判定区内花岗岩潜山风化壳基岩结晶时间为早三叠世(印支期),印支期构造运动形成的花岗岩是本区潜山风化壳形成的物质基础。

3.1.2 后期构造运动与花岗岩风化壳形成

本研究完成了工区5口井磷灰石U²³⁸裂变径迹测定,用以反演盆地构造隆升及热演化史,模拟松南低凸起花岗岩东潜山演化过程。其中YA-31井区潜山演化分为4阶段(图9):①晚侏罗世(160~140 Ma),盆地基底整体隆升,磷灰石温度下降23.0℃,根据地温梯度44.5℃/km换算出隆升剥蚀厚度为516.9 m。②早白垩世(140~120 Ma),盆地发生沉降,花岗岩体侵入导致潜山迅速升温;中-晚白垩世(120~70 Ma),盆地快速隆升,磷灰石温度下降37.0℃,换算出隆升剥蚀厚度为831.5 m。③古新世(70~50 Ma),地层受区域性挤压造成盆地基底快速隆升,磷灰石温度下降43.0℃,换算出隆升剥蚀厚度为966.0 m。④始新世—中新世(50~5 Ma),区域挤压逐渐转为拉伸作用,在边界断层控制下潜山进入埋藏和短暂升温期。随着控山断层活动导致潜山逐渐抬升,在中新世再次进入沉降埋藏期。在50~30 Ma期间,基底处于稳定状态,暴露在地表的花岗岩遭受大气降水导致的风化淋滤作用,形成第一期风化壳。在30~20 Ma期间,基底再次快速隆升并接受剥蚀,古地温下降55.5℃,隆升剥蚀厚度约1 745.0 m。20~5 Ma期间,暴露在地表的花岗岩遭受二次风化淋滤作用,形成了第二期风化壳。之后基底沉降,后期形成的风化壳得以完整保存,形成现今的花岗岩潜山风化壳(图10)。

3.2 古气候条件

化学蚀变指数(CIA)最初作为判定母岩化学风化程度的指标而被提出,主要用来判定硅酸盐(长石矿物)风化程度^[36]。由于沉积物化学风化程度与环境温湿度密切相关,因此CIA可作为研究古气候变化的替代指标^[37]。一般认为,CIA为50~60代表寒冷干燥型气候,CIA为60~80代表温暖湿润气候,CIA为80~100代表炎热潮湿气候^[38]。CIA值容易受到钾交代作用影响,因此还需利用A-CN-K(Al₂O₃-CaO+Na₂O-K₂O)图解判断样品钾交代程度并对CIA值进行校正。Rb元素含量在风化作用中相对稳定,而Sr元素则较易

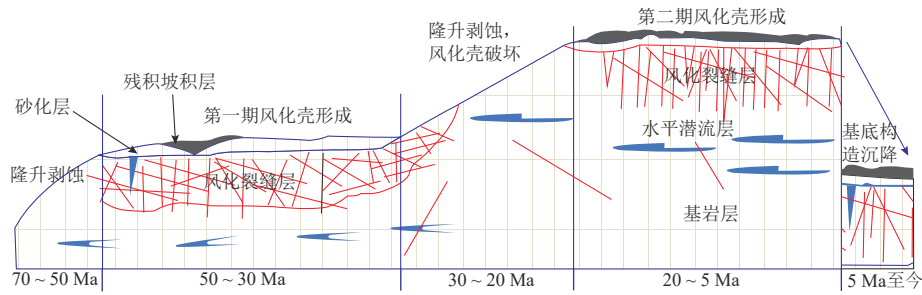


图10 琼东南盆地松南低凸起YA区花岗岩风化壳形成及保存过程

Fig. 10 Diagram showing the formation and preservation processes of the weathered granite crust in the YA area of the Songnan swell, Qiongdongnan Basin

淋失。在干燥寒冷气候下,降水较少,Sr淋失较少,Rb/Sr元素含量比值表现为较低值。当气候较为炎热潮湿时,Sr大量淋失,Rb/Sr值较高,指示化学风化程度越强。

YA-11井风化壳CIA值、Rb/Sr值沿深度变化趋势基本一致,二者之间呈显著正相关性。其中风化裂隙层CIA值为47.0~76.0,均值56.3;Rb/Sr值为0.63~14.62,均值3.75。水平潜流层CIA值为49.6~60.4,均值53.4。Rb/Sr值为0.65~2.29,均值1.31;两个指标均在深度3000~3020 m达到最大值,指示出对应地质时期较强的化学风化作用。总体来看,风化裂隙层CIA值、Rb/Sr值显著高于水平潜流层,两个层带CIA值、Rb/Sr值存在明显差异。风化裂隙层位于地表之上,相对较高的CIA值、Rb/Sr值指示出温暖湿润的古气候以及较强烈的化学风化作用。水平潜流层位于地表之下,较低的CIA值、Rb/Sr值指示出明显较弱的化学风化作用(图11)。长石裂解及黏土矿物形成是占主导地

位的化学蚀变过程,Na和K等碱金属元素易从长石中迁移而形成黏土矿物,因此 Al_2O_3 含量随着风化产物形成而增加。A-CN-K三角模型图可用来反映沉积物主矿物成分变化、元素迁移及化学风化趋势,是CIA的图解表达^[36]。样品数据点在A-CN-K图解中多分布于三角形上部区域,表明研究区花岗岩矿物成分呈现准铝质-过铝质特征及脱钠钾、富铝的变化趋势,与岩石学分析结果基本一致。

4 花岗岩古潜山风化壳平面展布规律

琼东南盆地古潜山油气勘探的主要目标区域为松南低凸起上的YA区、YB区、YC区和YE区及周缘。由于钻井资料缺乏以及基岩潜山地震反射缺乏明显特征,同相轴杂乱,使得在井区之外难以识别和追踪风化壳地震界面。而地震波某些反射特征及相关性能反映潜山内部的岩性、物性变化。借助地震波相干、频率带

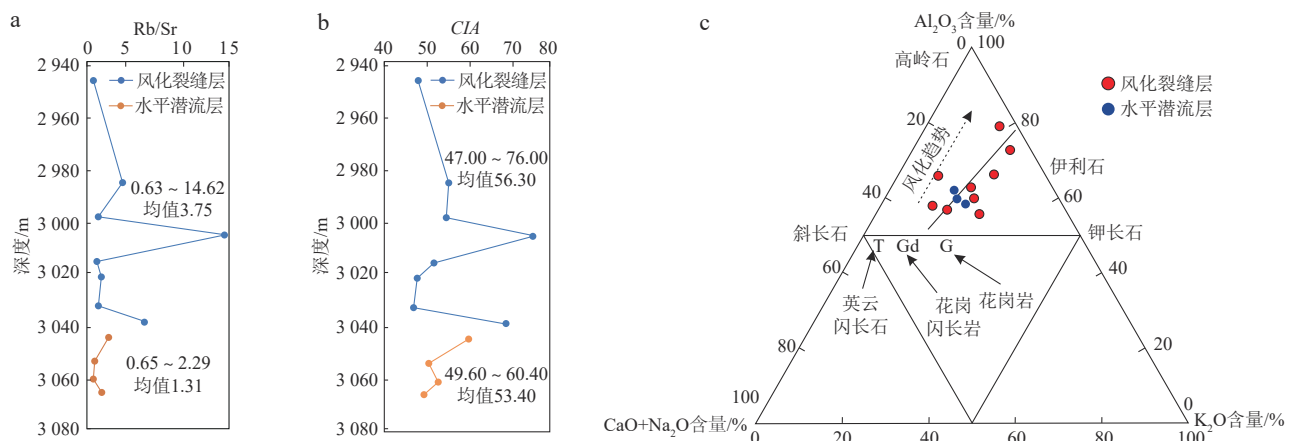


图11 琼东南盆地松南低凸起YA-11井花岗岩化学蚀变指数Rb/Sr比值、CIA值变化及A-CN-K图解

Fig. 11 Diagrams showing variations in chemical alteration indices of Rb/Sr ratio (a) and CIA value (b) and ternary plot of A-CN-K contents (c) in granites in well YA-11 in the Songnan swell, Qiongdongnan Basin

a. Rb/Sr比值-深度关系;b. CIA值-深度关系;c. A-CN-K图解

[A-CN-K代表 Al_2O_3 - $CaO+Na_2O-K_2O$]

宽、均方根振幅、弧长和反射强度等5个地震波反射属性在平面及垂向上的变化,结合钻井资料可实现风化壳底界追踪。

从研究区地震反射波均方根振幅属性图可见(图12),研究区 T_{10}^0 界面向下0~10 ms时窗内,YA-BA—YA-BB—YA-AA—YA-AB一带均方根振幅属性值(RMS)高异常明显,在7~8 ms时窗内居多,高于研究区大部分区域,说明该区域层速度变化明显,地层岩性及非均质性与周围地区相差较大,与钻井资料吻合。YC-AA区均方根振幅属性值高异常相对不明显,与坳陷区域相差不大,为3~4,风化壳欠发育,与钻井资料吻合。YC区东西两侧古高地同样呈现均方根振幅属

性值高异常,特别是东部区域均方根振幅属性值最高值可达15,表明这两处风化壳较为发育。YB区、YE区及研究区西北部高地也显示出均方根振幅属性值高异常特征,推测为风化壳发育地带。至界面下20~30 ms区间研究区整体均方根振幅属性值高异常特征大幅减弱,除YA区、YC区两处古高地外,YB区、YE区高异常区域也大幅缩小,显示研究区层速度变化幅度减少,大部分区域岩性及物性相差已不大。其中YC区古高地变化速率最大,均方根振幅属性值降低至3~4;至界面下60~70 ms内研究区均方根振幅属性值基本无明显高异常。至界面下110~120 ms内均方根振幅属性值已不再变化,说明该深度区间内研究区

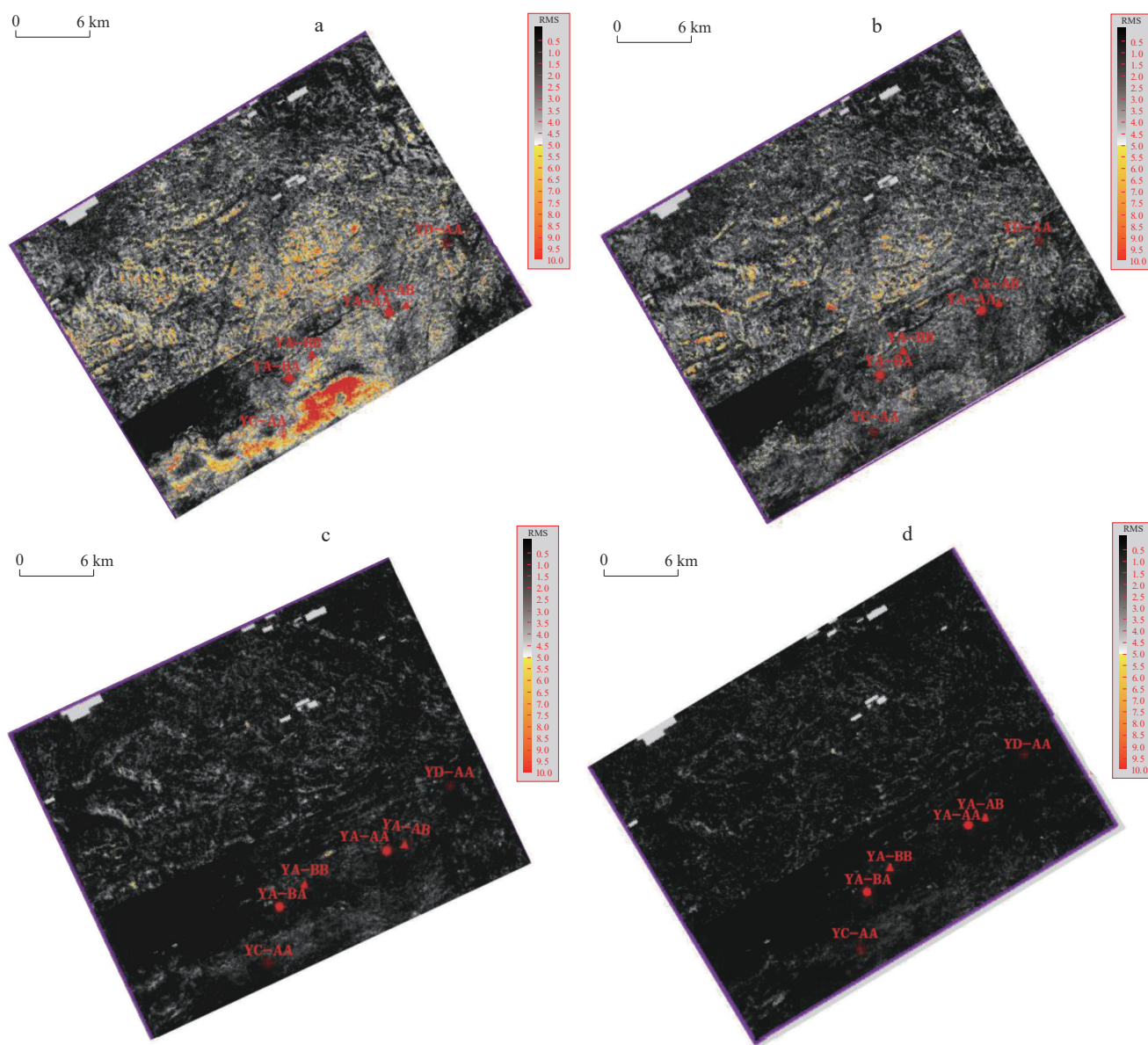


图12 琼东南盆地松南低凸起YA区地震均方根振幅属性值(RMS)

Fig. 12 Seismic attribute of RMS amplitude of the YA area in the Songnan swell, Qiongdongnan Basin
a. T_{10}^0 界面下0~10 ms时窗; b. T_{10}^0 界面下20~30 ms时窗; c. T_{10}^0 界面下60~70 ms时窗; d. T_{10}^0 界面下110~120 ms时窗

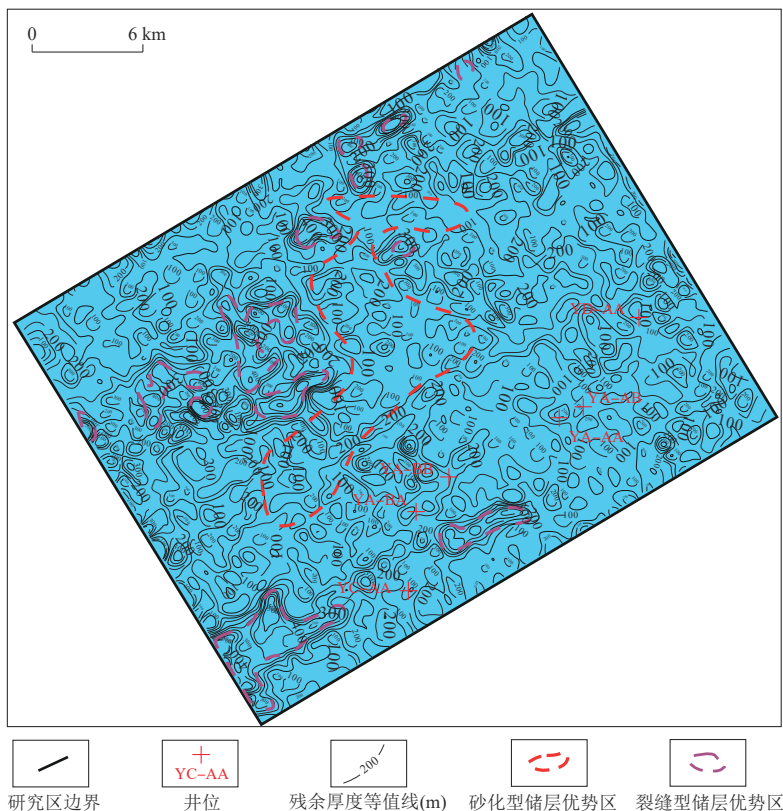


图13 琼东南盆地松南低凸起YA区风化壳残余厚度

Fig. 13 Residual thickness map of the weathered crust in the YA area of the Songnan swell, Qiongdongnan Basin

岩性和物性基本没有变化。总体来看,地震反射波均方根振幅属性值高异常可较好地反映风化壳裂缝发育程度,高异常特征越显著表明裂缝越发育,地层岩性及非均质性与周围地区相差越大,风化壳越发育。

通过观察前述5种地震反射波属性在工区平面和垂向上的变化规律,结合钻井资料可在测井-地震对比剖面上大致识别追踪出风化壳与基岩带之间界面 $T_j^{[30]}$,再根据5口井拟合出的时深关系作出风化壳残余厚度图(图13)。可以看出,YA-BA—YA-BB—YA-AA—YA-AB井区风化壳较厚,平均厚约180 m。YB区风化壳平均厚约200 m;YC区东西两侧古高地厚度最大,平均厚约300 m。YE区位于研究区西北古高地,风化壳最厚可达300 m。区内花岗岩潜山风化壳发育程度及残余厚度受暴露时间影响较大,花岗岩接受风化剥蚀和大气淡水淋滤时间越久,风化壳越发育,残余厚度越大。在一些沉积较晚的古构造高点及褶皱构造转折处,复杂应力作用会导致花岗岩风化壳裂缝大量发育。

5 结论

1) 风化壳在垂向上呈显著分层特征,风化裂缝层是花岗岩风化壳最稳定、最易识别的储层,孔隙度、渗

透率总体较高,储集空间以裂缝为主,呈现出较强的非均质性。测井指标垂向变化趋势与风化壳物性变化趋势基本一致。

2) 印支运动形成的花岗岩系是本区风化壳形成的基础。晚白垩世神狐运动造成本区地壳强烈抬升,花岗岩潜山暴露于地表,接受风化、剥蚀作用并形成风化壳。燕山、喜马拉雅运动造成区内地层反复抬升与沉降,前期形成的风化壳得以保存。

3) 古构造对风化壳发育及平面展布具有显著的控制作用。位于古构造高点处的花岗岩体受到风化剥蚀和大气淡水淋滤作用时间更长,风化壳垂向各层带发育较完整,残余厚度较大。地震反射波均方根振幅属性值高异常可较好地反映风化壳发育程度,松南低凸起YA区风化壳发育总体较好,陵水东次洼和松南宝岛凹陷风化壳欠发育。

致谢:感谢项目组全体成员辛勤劳动,使得本文得以完成!感谢评审专家和编辑部提出的宝贵意见,使本文得以不断完善!

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 赵淑娟, 李三忠, 牛成民, 等. 渤海湾盆地旅大隆起区多期叠加构造及其对潜山的控制作用[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(5): 1188–1202.
- ZHAO Shujuan, LI Sanzhong, NIU Chengmin, et al. Multistage structural superimposition and its control on buried hills in the Lyuda uplift zone, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(5): 1188–1202.
- [3] 龚再升. 继续勘探中国近海盆地花岗岩储层油气藏[J]. *中国海上油气*, 2010, 22(4): 213–220.
- GONG Zaisheng. Continued exploration of granitic-reservoir hydrocarbon accumulations in China offshore basins[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2010, 22(4): 213–220.
- [4] DOU Lirong, WANG Jingchun, WEI Renchong, et al. Precambrian basement reservoirs: Case study from the northern Bongor Basin, the Republic of Chad[J]. *AAPG Bulletin*, 2018, 102(9): 1803–1824.
- [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] RUXTON B P, BERRY L. Weathering of granite and associated erosional features in Hong Kong[J]. *GSA Bulletin*, 1957, 68(10): 1263–1292.
- [7] DEWANDEL B, LACHASSAGNE P, WYNS R, et al. A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 330(1/2): 260–284.
- [8] IRFAN T Y. Mineralogy, fabric properties and classification of weathered granites in Hong Kong[J]. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 1996, 29(1): 5–35.
- [9] 陈国成, 陈华靖, 田晓平. 渤海PL油田花岗岩潜山储层发育特征及控制因素[J]. *海洋地质前沿*, 2016, 32(2): 14–19, 65.
- CHEN Guocheng, CHEN Huajing, TIAN Xiaoping. Characteristics and controlling factors of granitic buried-hill reservoir in PL Oilfield of Bohai Sea[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2016, 32(2): 14–19, 65.
- [10] 王昕, 周心怀, 徐国胜, 等. 渤海海域蓬莱9-1花岗岩潜山大型油气田储层发育特征与主控因素[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(2): 262–270.
- WANG Xin, ZHOU Xinhui, XU Guosheng, et al. Characteristics and controlling factors of reservoirs in Penglai 9-1 large-scale oilfield in buried granite hills, Bohai Sea[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(2): 262–270.
- [11] 胡志伟, 徐长贵, 杨波, 等. 渤海海域蓬莱9-1油田花岗岩潜山储层成因机制及石油地质意义[J]. *石油学报*, 2017, 38(3): 274–285.
- HU Zhiwei, XU Changgui, YANG Bo, et al. Reservoir forming mechanism of Penglai 9-1 granite buried-hills and its oil geology significance in Bohai Sea[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(3): 274–285.
- [12] 王明臣, 官大勇, 刘朋波, 等. 渤海蓬莱9-1油藏花岗岩储层特征与成储化条件分析[J]. *地质科技情报*, 2016, 35(6): 83–89.
- WANG Mingchen, GUAN Dayong, LIU Pengbo, et al. Characteristics and formation conditions of the Penglai 9-1 granite oil reservoir in Bohai gulf basin[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2016, 35(6): 83–89.
- [13] 李建平, 周心怀, 王清斌. 表生喀斯特作用对蓬莱花岗岩潜山油田风化壳储层发育的控制作用[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2014, 41(5): 556–566.
- LI Jianping, ZHOU Xinhui, WANG Qingbin. Control of epigenic karstification over weathering crust reservoir development of Penglai granite buried hill oilfield, Bohai Bay Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2014, 41(5): 556–566.
- [14] 李欣, 谢庆宾, 牛花朋, 等. 阿尔金山前带东段基岩储层主要特征及评价[J]. *地球科学*, 2020, 45(2): 617–633.
- LI Xin, XIE Qingbin, NIU Huapeng, et al. Main characteristics and evaluation of bedrock reservoirs in the eastern segment of Altun piedmont[J]. *Earth Science*, 2020, 45(2): 617–633.
- [15] 黄成刚, 张小军, 胡贵, 等. 高原咸化湖盆基底储层特征与成藏主控因素——以柴达木盆地东坪地区为例[J]. *石油学报*, 2020, 41(2): 179–196.
- HUANG Chenggang, ZHANG Xiaojun, HU Gui, et al. Reservoir characteristics and main controlling factors of hydrocarbon accumulation of basement in plateau saline lacustrine basin: A case study of Dongping area in Qaidam Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(2): 179–196.
- [16] 窦立荣, 魏小东, 王景春, 等. 乍得Bongor盆地花岗岩质基岩潜山储层特征[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.
- [17] 谢玉洪. 南海北部自营深水天然气勘探重大突破及其启示[J]. *天然气工业*, 2014, 34(10): 1–8.
- XIE Yuhong. A major breakthrough in deepwater natural gas exploration in a self-run oil/gas field in the northern South China Sea and its enlightenment[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(10): 1–8.
- [18] 游君君, 孙志鹏, 李俊良, 等. 琼东南盆地深水区松南低凸起勘探潜力评价[J]. *中国矿业*, 2012, 21(8): 56–59.
- YOU Junjun, SUN Zhipeng, LI Junliang, et al. Exploration potential of Songnan low-uplift in the deep water region, Qiongdongnan basin[J]. *China Mining Magazine*, 2012, 21(8): 56–59.
- [19] 杨计海, 黄保家, 杨金海. 琼东南盆地深水区松南低凸起天然气成藏条件与勘探潜力[J]. *中国海上油气*, 2019, 31(2): 1–10.
- YANG Jihai, HUANG Baojia, YANG Jinhai. Gas accumulation conditions and exploration potentials of natural gases in Songnan low uplift, deep water area of Qiongdongnan Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2019, 31(2): 1–10.
- [20] 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]. *Global Geology*, 2021, 40(3): 613–623.
- [21] 钟佳, 王岩泉. 琼东南盆地松南低凸起花岗岩年代学、地球化学特征及构造环境[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2022, 52

- (1): 134-148.
- ZHONG Jia, WANG Yanquan. Geochronology, geochemical characteristics and tectonic environment of granite in Songnan low uplift, Qiongdongnan Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(1): 134-148.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- 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.
- [26] 徐守立, 尤丽, 毛雪莲, 等. 琼东南盆地松南低凸起周缘花岗岩潜山储层特征及控制因素[J]. 地球科学, 2019, 44(8): 2717-2728.
- XU Shouli, YOU Li, MAO Xuelian, et al. Reservoir characteristics and controlling factors of granite buried hill in Songnan low uplift, Qiongdongnan Basin[J]. Earth Science, 2019, 44(8): 2717-2728.
- [27] 李鸿明, 王璞珺, 徐守立, 等. 琼东南盆地松南低凸起前古近系花岗岩潜山储层特征与控制因素[J]. 世界地质, 2022, 41(3): 568-582.
- LI Hongming, WANG Pujun, XU Shouli, et al. Reservoir characteristics and controlling factors of Prepaleogene granitic buried-hill in Songnan low uplift, Qiongdongnan Basin[J]. World Geology, 2022, 41(3): 568-582.
- [28] 周杰, 杨希冰, 杨金海, 等. 琼东南盆地深水区中生界潜山裂缝发育特征及形成机理——以松南低凸起Y8区为例[J]. 中国海上油气, 2020, 32(3): 1-9.
- ZHOU Jie, YANG Xibing, YANG Jinhai, et al. Development characteristics and formation mechanism of Mesozoic buried hill fractures in the deep water area of Qiongdongnan Basin: Taking Y8 area in Songnan low uplift as an example[J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(3): 1-9.
- [29] 徐先兵, 张岳桥, 贾东, 等. 华南早中生代大地构造过程[J]. 中国地质, 2009, 36(3): 573-593.
- XU Xianbing, ZHANG Yueqiao, JIA Dong, et al. Early Mesozoic geotectonic processes in South China[J]. Geology in China, 2009, 36(3): 573-593.
- [30] 郭原草, 郭建华, 李智宇, 等. 琼东南盆地YLA区花岗岩潜山风化壳地质模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(9): 3462-3473.
- GUO Yuancao, GUO Jianhua, LI Zhiyu, et al. Geological model of weathering crust of granite buried hill in YLA area of southeastern Hainan Basin[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(9): 3462-3473.
- [31] 牛涛, 胡光义, 王晖, 等. 渤海湾盆地石臼坨凸起Q油田沙一二段储集层特征及控制因素[J]. 非常规油气, 2019, 6(5): 11-17.
- NIU Tao, HU Guangyi, WANG Hui, et al. Reservoir characteristics and controlling factors of the 1-2 member of Shahejie Formation in Q Oilfield, Shijiutuo Uplift, Bohai Bay Basin[J]. Unconventional Oil & Gas, 2019, 6(5): 11-17.
- [32] 谢才富, 朱金初, 丁式江, 等. 海南尖峰岭花岗岩体的形成时代、成因及其与抱伦金矿的关系[J]. 岩石学报, 2006, 22(10): 2493-2508.
- XIE Caifu, ZHU Jinchu, DING Shijiang, et al. Age and petrogenesis of the Jianfengling granite and its relationship to metallogenesis of the Baolun gold deposit, Hainan Island[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(10): 2493-2508.
- [33] 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 等. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释[J]. 地质学报, 2007, 81(11): 1449-1461.
- DONG Shuwen, ZHANG Yueqiao, LONG Changxing, et al. Jurassic tectonic revolution in China and new interpretation of the Yanshan movement[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(11): 1449-1461.
- [34] 毛建仁, 房子龙, 叶海敏. 华南中生代构造-岩浆活动研究: 现状与前景[J]. 中国科学(地球科学), 2014, 44(12): 2593-2617.
- MAO Jianren, LI Zilong, YE Haimin. Mesozoic tectono-magmatic activities in South China: Retrospect and prospect[J]. Science China Earth Sciences, 2014, 44(12): 2593-2617.
- [35] 汤加富, 高天山, 李怀坤. 中国东部中生代构造格局和岩浆岩带的形成与演化[J]. 地质调查与研究, 2004, 27(2): 65-74.
- TANG Jiafu, GAO Tianshan, LI Huaikun. Formation and evolution of the tectonic framework and magmatic rock belt in eastern China during Mesozoic and Cenozoic[J]. Geological Survey and Research, 2004, 27(2): 65-74.
- [36] NESBITT H W, YOUNG G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. Nature, 1982, 299(5885): 715-717.
- [37] GOLDBERG K, HUMAYUN M. The applicability of the Chemical Index of Alteration as a paleoclimatic indicator: An example from the Permian of the Paraná Basin, Brazil[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2010, 293(1/2): 175-183.
- [38] FEDO C M, NESBITT H W, YOUNG G M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance[J]. Geology, 1995, 23(10): 921-924.

(编辑 张亚雄)