

## 琼东南盆地深水区宝岛21-1气田天然气来源及输导体系

尤 丽<sup>1</sup>,权永彬<sup>2</sup>,虞 雷<sup>1</sup>,滕长宇<sup>2</sup>,左高昆<sup>1</sup>

[1. 中海石油(中国)有限公司海南分公司,海南海口 570312;2. 中国地质大学(武汉),湖北武汉 430074]

**摘要:**宝岛21-1气田的发现是琼东南盆地宝岛凹陷近30年以来油气勘探取得的最大突破,打开了勘探新局面,有关其天然气来源和输导体系的认识,对宝岛凹陷进一步勘探具有重要意义。以宝岛21-1气田为主要研究对象,采用油气地球化学及断裂体系刻画等手段,详细分析了天然气组成、碳同位素特征和凝析油生物标志化合物特征,精细刻画了主控断层几何形态和运动学特征,并分析了其对天然气富集的贡献。结果显示,宝岛21-1气田具有重烃气含量高、干燥系数低及碳同位素轻的特点,与Y13气田和L17气田具有明显差异,揭示除陆源有机质的贡献外,还有明显的腐泥型有机质贡献,主要为海相藻类的贡献。宝岛21-1构造经历了3期油气充注,断裂与陵水组三段三角洲砂体构成了高效输导体系,断裂形态与差异活动性控制油气汇聚-输导,使该构造所在位置成为优势聚集区。建立了紧邻生烃主洼,沿“大型构造脊+断面脊汇聚,长期活动的大型沟源断裂与三角洲砂岩配置高效输导”的天然气富集模式,为宝岛凹陷及琼东南盆地勘探提供重要依据。

**关键词:**输导体系;充注期次;富集模式;天然气来源;深水区;宝岛凹陷;琼东南盆地

**中图分类号:**TE122.1

**文献标识码:**A

## Natural gas sources and migration pathways of the Baodao 21-1 gas field in the deep-water area of the Qiongdongnan Basin

YOU Li<sup>1</sup>, QUAN Yongbin<sup>2</sup>, TUO Lei<sup>1</sup>, TENG Changyu<sup>2</sup>, ZUO Gaokun<sup>1</sup>

[1. CNOOC (China) Limited Hainan Branch, Haikou, Hainan 570312, China; 2. China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China]

**Abstract:** The discovery of Baodao 21-1 gas field highlights a landmark achievement in the hydrocarbon exploration efforts in the Baodao Sag of the Qiongdongnan Basin over the past three decades, opening up new exploration prospects. To further explore the gas potential in the sag, understanding the sources and migration pathways of natural gas is paramount. This study delves into the exploration of the Baodao 21-1 gas field, offering detailed insights into the composition and carbon isotopes of natural gas, as well as condensate biomarkers, based on petroleum geochemistry and fault system characterization. Furthermore, this study presents a fine-scale characterization of the geometrical morphologies and kinematic properties of dominant faults and evaluates their role in natural gas enrichment. Key findings include. (1) The Baodao 21-1 gas field showcases high concentrations of heavy hydrocarbon gases, low drying coefficients, and light carbon isotopes, distinguishing itself from Y13 and L17 gas fields. This suggests significant contributions from marine algae-derived sapropelic organic matter besides terrigenous organic matter. (2) The Baodao 21-1 structure experienced three stages of hydrocarbon charging. The structure's faults and the deltaic sand bodies in the third member of the Lingshui Formation serve as effective pathways for hydrocarbon migration. The fault morphology and differential activity dictate the hydrocarbon accumulation and migration. All these make the Baodao 21-1 gas field become a major area for hydrocarbon accumulation. (3) The natural gas enrichment mode for the gas field is established. This mode includes proximity to major hydrocarbon-generating sags, gas accumulation along a large-scale structural ridge and a fault-plane ridge, and efficient migration pathways via long-term active faults in large scale connecting source rocks, and deltaic sandstones. This study lays the groundwork for forthcoming exploration in both the

收稿日期:2023-01-06;修回日期:2023-06-25。

第一作者简介:尤丽(1983—),女,博士、高级工程师,石油地质。E-mail: youli1@cnooc.com.cn。

基金项目:中海石油(中国)有限公司综合科研项目(KJZH-2021-0003-00);中海石油(中国)有限公司科技项目(CNOOC-KJ135, ZDXM38ZJ03 ZJ)。

Baodao Sag and even the Qiongdongnan Basin as a whole.

**Key words:** migration pathway, hydrocarbon charging stage, enrichment mode, natural gas source, deep-water area, Baodao Sag, Qiongdongnan Basin

引用格式:尤丽,权永彬,度雷,等. 琼东南盆地深水区宝岛21-1气田天然气来源及输导体系[J]. 石油与天然气地质,2023,44(5):1270-1278. DOI: 10.11743/ogg20230515.

YOU Li, QUAN Yongbin, TUO Lei, et al. Natural gas sources and migration pathways of the Baodao 21-1 gas field in the deep-water area of the Qiongdongnan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(5): 1270-1278. DOI: 10.11743/ogg20230515.

琼东南盆地是中国南海北部重要的新生代沉积盆地,油气资源潜力丰富<sup>[1]</sup>。目前已在盆地浅水区崖南凹陷发现Y13大型气田<sup>[2]</sup>,在西区乐东-陵水凹陷深水中央峡谷发现L17, L25和L18等大中型气田<sup>[3]</sup>,而东区松南-宝岛凹陷油气勘探仅发现了一批小型气藏<sup>[4]</sup>,且非烃气含量较高<sup>[5]</sup>,一直未获得规模性突破。近年来,通过对新采集三维地震资料和已钻井资料的再分析,重新认识了松南-宝岛凹陷的结构特征,在宝岛凹陷北坡识别出系列转换断阶带,并在“转换断阶控源、控储、控聚”模式认识的指导下,发现了中国首个深水、深层大气田——宝岛21-1大气田,实现了宝岛凹陷30年以来的最大突破<sup>[6-7]</sup>。研究表明,Y13气田天然气来自崖城组海-陆过渡相烃源岩,具有圈闭形成早、储层物性好和盖层压力高的有利成藏条件<sup>[2]</sup>;中央峡谷气田天然气来自崖城组浅海相烃源

岩,具有深部超压驱动、中部底辟输导、浅部砂体汇聚的天然气成藏模式<sup>[3]</sup>。本文通过与Y13和中央峡谷L17, L25等气田对比,分析宝岛21-1气田的油气来源与充注期次,精细刻画了汇聚脊与断裂输导体系几何形态、活动性、活动强度特征,分析其对天然气富集的贡献,阐明油气运聚规律及运移路径,明确天然气富集模式,对琼东南盆地乃至南海北部及中南部天然气勘探具有重要意义。

## 1 区域地质概况

琼东南盆地是南海北部新生代盆地<sup>[1-8]</sup>,总体呈NE-SW向展布,具有“东西分块、南北分带”的构造格局(图1a),自北向南依次分为北部坳陷、中部隆起、中央坳陷和南部隆起等一级构造单元,以及崖南凹陷、乐

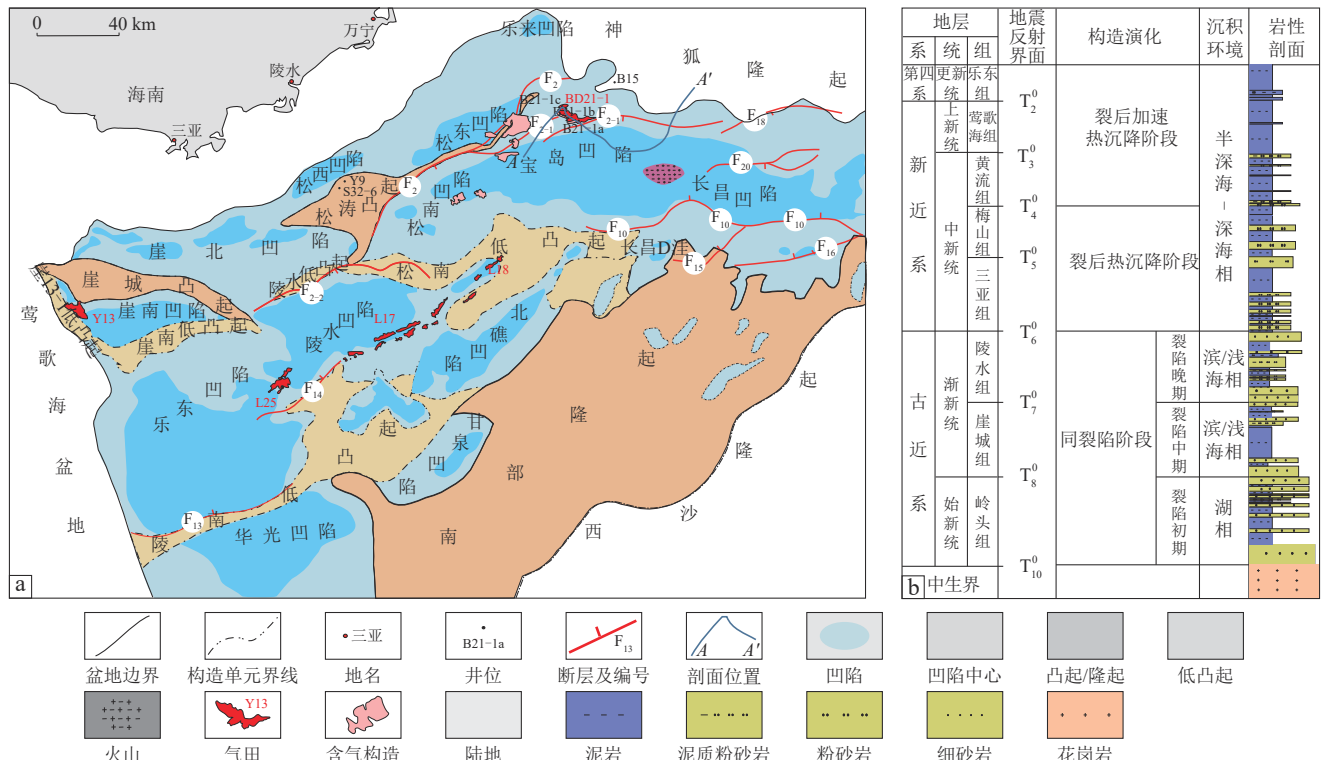


图1 琼东南盆地构造单元、主要气田分布(a)与地层综合柱状图(b)

Fig. 1 Distributions of tectonic units and major gas fields(a) in, and composite stratigraphic column (b) of, the Qiongdongnan Basin

东凹陷、陵水凹陷、松南凹陷、宝岛凹陷、长昌凹陷、松南低凸起和陵南低凸起等二级构造单元<sup>[9]</sup>。盆地经历了断陷、断-拗、拗陷3期构造演化,具有“下断上拗”的双层结构<sup>[8]</sup>。断陷期沉积了始新统岭头组、渐新统崖城组,始新统发育陆相湖盆充填的生油源岩,渐新统崖城组沉积时期,沉积环境转变为障壁海湾及浅海相,发育研究区的主力烃源岩;断-拗转换期沉积了陵水组,以滨、浅海相沉积为主,发育大型辫状河三角洲(扇)三角洲沉积;中新世以来,盆地进入拗陷阶段,主要表现为半深海-深海相沉积环境,沉积了中新统三亚组、梅山组和黄流组以及上新统莺歌海组、第四系乐东组<sup>[10]</sup>(图1b)。

## 2 天然气地球化学特征与来源

### 2.1 天然气组分

天然气由烃类气和非烃气体组成,其组分特征是母质来源和热演化阶段的宏观反映。L17气田天然气以烃类气为主(含量93.7%~99.1%),非烃气氮气含量0.3%~6.0%、CO<sub>2</sub>含量0.1%~0.9%;Y13气田天然气中非烃气氮气含量0.1%~4.7%、CO<sub>2</sub>含量0.2%~11.5%,烃类气含量88.1%~95.2%;宝岛21-1气田非烃气CO<sub>2</sub>含量7.1%~52.1%、氮气含量0.2%~0.9%,烃类气含量47.5%~92.0%。此外,Y13气田和L17气田烃类气以甲烷为主,含量分别为83.4%~90.2%和85.1%~93.1%,重烃含量分别为1.0%~8.4%和5.7%~8.8%,干燥系数普遍高于0.90,平均值分别为0.95和0.93。宝岛21-1气田烃类

气中重烃含量相对较高,介于2.6%~19.8%,干燥系数0.83~0.95,平均值仅为0.89,为典型的凝析气,指示天然气具有不同的成因类型和母质来源。

### 2.2 天然气碳同位素

正常热成因天然气中烃类气的碳同位素随碳数的增加而变重<sup>[11]</sup>。不符合上述规律的天然气则存在同位素倒转,可能为不同成因类型、不同成熟度天然气混合或天然气次生改造作用等的结果<sup>[12]</sup>。Y13气田绝大部分样品碳同位素值符合 $\delta^{13}\text{C}_1 < \delta^{13}\text{C}_2 < \delta^{13}\text{C}_3$ ,仅1个样品乙烷和丙烷之间存在同位素值倒转(图2a),这可能是因为混合了部分来自莺歌海盆地的天然气所致<sup>[13]</sup>;L17气田不存在同位素值倒转,但部分样品甲烷碳同位素值显著负漂,乙烷碳同位素值没有异常(图2b),指示可能有少量生物气的贡献;宝岛21-1气田天然气不存在同位素值倒转,烃类气为热成因气,天然气混合作用或次生改造作用不明显(图2c;表1)。

乙烷和丙烷碳同位素在热演化过程中相对稳定,受次生影响较小,常作为天然气成因类型的重要指标。腐殖型有机质生成的天然气,乙烷碳同位素值通常大于-28‰、丙烷碳同位素值大于-26‰,而腐泥型有机质生成的天然气则与之相反。据统计,Y13气田和L17气田天然气碳同位素较重,乙烷碳同位素值分别介于-26.80‰~-24.40‰和-26.20‰~-23.50‰,丙烷碳同位素值分别介于-27.71‰~-22.90‰和-24.10‰~-21.60‰,具有典型煤型气特征;宝岛21-1气田碳同位素明显较轻,乙烷碳同位素值介于-31.00‰~-28.40‰,丙烷碳同位素值介于-28.60‰~-25.40‰,与Y13气田和L17气田存在

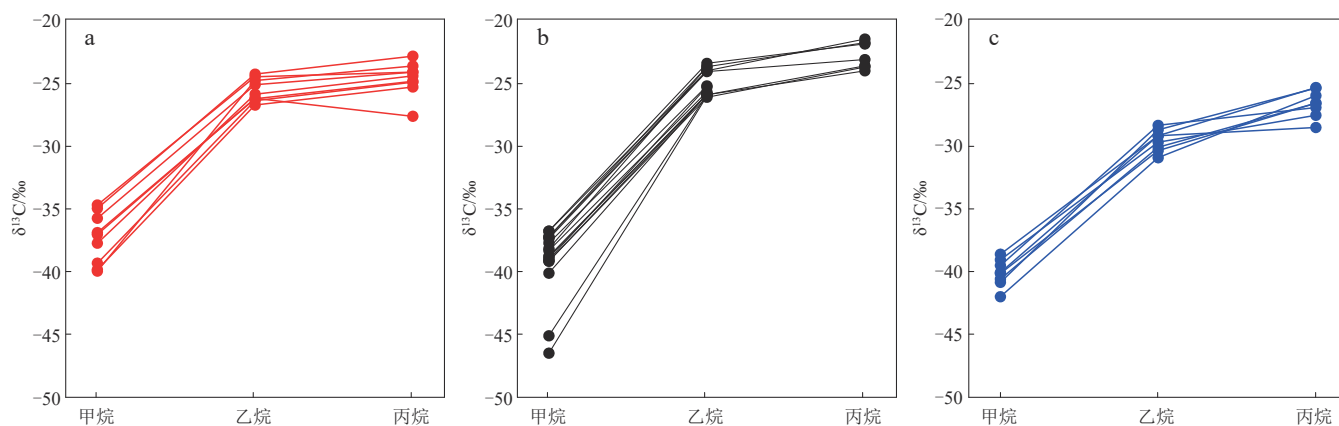


图2 琼东南盆地已发现气田甲烷、乙烷和丙烷碳同位素

Fig. 2 Variations in carbon isotopes of methane, ethane, and propane across discovered gas fields in the Qiongdongnan Basin

a. Y13气田; b. L17气田; c. 宝岛21-1气田

表1 琼东南盆地宝岛21-1气田古近系陵水组三段天然气组分和碳同位素数据

Table 1 Composition and carbon isotopes of natural gas in the Baodao 21-1 gas field, Qiongdongnan Basin

| 井名     | 深度 /m   | 天然气组分含量/%      |                 |                |                 | 碳同位素值/‰                        |                                |                                |                                             |
|--------|---------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------|
|        |         | C <sub>1</sub> | C <sub>2+</sub> | N <sub>2</sub> | CO <sub>2</sub> | δ <sup>13</sup> C <sub>1</sub> | δ <sup>13</sup> C <sub>2</sub> | δ <sup>13</sup> C <sub>3</sub> | δ <sup>13</sup> C <sub>CO<sub>2</sub></sub> |
| B21-1a | 4 121.0 | 70.18          | 4.07            | 0.16           | 25.58           | -40.62                         | -30.16                         | -26.67                         | -6.47                                       |
|        | 4 123.6 | 68.21          | 5.36            | 0.58           | 25.85           | -39.54                         | -28.43                         | -27.02                         | -5.03                                       |
|        | 4 306.0 | 57.14          | 3.32            | 0.28           | 39.26           | -40.10                         | -29.26                         | -25.43                         | -4.80                                       |
|        | 4 335.8 | 44.82          | 2.65            | 0.45           | 52.08           | -42.02                         | -31.00                         | -26.07                         | -3.81                                       |
| B21-1b | 4 147.0 | 72.15          | 19.84           | 0.92           | 7.09            | -38.65                         | -29.25                         | -28.60                         | -7.06                                       |
|        | 4 218.5 | 41.64          | 8.30            | 0.79           | 49.27           | -40.88                         | -28.78                         | -25.47                         | -6.01                                       |
|        | 4 268.5 | 60.90          | 9.12            | 0.87           | 29.11           | -39.09                         | -29.76                         | -27.63                         | -4.70                                       |
|        | 4 479.5 | 70.12          | 13.72           | 0.19           | 15.97           | -40.17                         | -30.43                         | -26.68                         | -6.82                                       |

差异(图2),指示其具有腐泥型有机质的贡献。

### 2.3 油气源分析

#### 2.3.1 烃源岩特征

琼东南盆地发育始新统岭头组湖相烃源岩与渐新统崖城组海-陆过渡相、陆源海相烃源岩<sup>[4]</sup>。始新统岭头组湖相烃源岩以丰富的4-甲基C<sub>30</sub>甾烷为主要特征,早期由Y9井原油及B15井砂岩抽提物间接揭示<sup>[14]</sup>,松西凹陷S32-6井钻遇始新统岭头组黑色泥岩70 m,总有机碳含量(TOC)为1.3%~7.5%、氢指数(HI)高达600 mg/g,证实了湖相烃源岩的存在。崖城组海陆过渡相烃源岩以丰富的双杜松烷和奥利烷为主要特征,指示大量陆源高等植物的贡献,主要发育在大型煤系三角洲<sup>[15-16]</sup>,该套烃源岩发育(炭质)泥岩和煤,TOC为0.4%~98.5%,HI小于300 mg/g,Y13气田主要来自

该套烃源岩<sup>[13]</sup>。崖城组陆源海相烃源岩沉积在海侵环境,双杜松烷和奥利烷的含量相比于海陆过渡相烃源岩降低,C<sub>27</sub>规则甾烷等藻类来源生物标志化合物增加,表明陆源高等植物和水生藻类均有贡献<sup>[17]</sup>,该类烃源岩TOC普遍小于2.0%、HI小于300 mg/g,中央峡谷L17气田被证实主要来自该套烃源岩<sup>[18]</sup>。

宝岛21-1气田B21-1a井揭示崖城组烃源岩TOC介于0.32%~1.16%,生烃潜量(S<sub>1</sub>+S<sub>2</sub>)在1.16~4.46 mg/g,具有中等-好烃源岩特征(图3a),HI普遍大于200 mg/g,平均值为324 mg/g,有机质类型为Ⅱ<sub>2</sub>-Ⅲ型(图3b)。干酪根碳同位素在热演化过程中较为稳定,是区分有机质母质类型的有效指标,I型干酪根的母质类型以腐泥型为主,干酪根碳同位素值一般小于-28‰;Ⅲ型干酪根的母质以纤维素和木质素为主,碳同位素值一般高于-25‰;Ⅱ型干酪根碳同位素值介于I型和Ⅲ型干酪根之间<sup>[17]</sup>。B21-1a井崖城组烃源

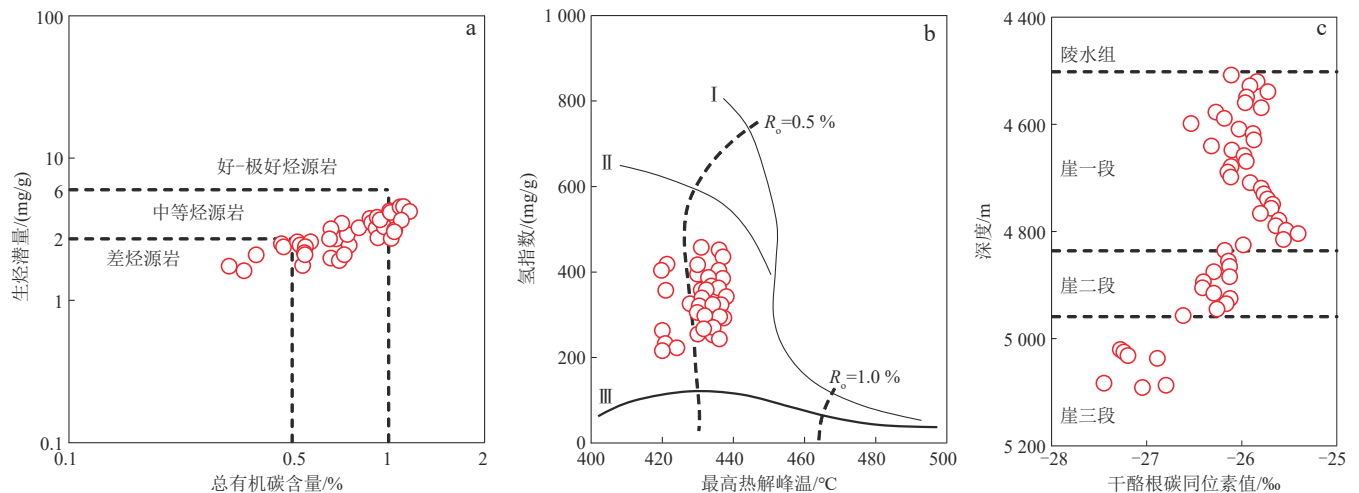


图3 琼东南盆地B21-1a井崖城组烃源岩总有机碳含量与生烃潜量(a)、最高热解峰温与氢指数(b)及干酪根碳同位素值与深度(c)关系

Fig. 3 Relationships between TOC content and hydrocarbon-generating potential (a), between peak pyrolysis temperature and hydrogen index (b), and between kerogen carbon isotopes and depth (c) for source rocks in the Yacheng Formation at well B21-1a, Qiongdongnan Basin

岩干酪根碳同位素值介于 $-28.00\%$ ~ $-25.00\%$ ,且崖城组一段(崖一段)干酪根碳同位素相对偏重,其值介于 $-26.53\%$ ~ $-25.54\%$ ,崖城组二段(崖二段)和崖城组三段(崖三段)干酪根碳同位素值逐渐减小(图3c),指示其具有更多腐泥型有机质的贡献。

### 2.3.2 气-源对比

气-源对比分析表明,宝岛21-1气田相比于来自崖城组海-陆过渡相烃源岩的Y13气田和来自崖城组陆源海相烃源岩的L17气田,干燥系数更低,乙烷和丙烷碳同位素值更低,指示该地区崖城组烃源岩可能具有更多腐泥型有机质的贡献,这与崖二段和崖三段烃源岩具有较高的氢指数(图3b)和干酪根碳同位素值负漂(图3c)所揭示的地质意义相吻合。

一般认为,轻烃中甲基环己烷主要来自高等植物、木质素等腐殖型母质,二甲基环戊烷主要来自水生生物,而正庚烷可能来自细菌和藻类,也可能来自陆源高等植物链状类脂体,是富氢腐泥型母质的主要组成<sup>[19]</sup>;较高的奥利烷通常指示丰富的被子植物贡献,双杜松烷的前体的达玛树脂,主要来自被子植物树脂。宝岛21-1气田陵水组三段(陵三段)凝析油轻烃分析,甲基环己烷含量在45%~65%,二甲基环戊烷介于15%~40%,正庚烷含量仅为10%~25%,指示其主要来自腐殖型有机质,腐泥型有机质亦有一定贡献。结合凝析油生物标志化合物参数对比(图4),Y13气田具有高奥利烷/藿烷比值( $Ol/C_{30}H$ )、高姥鲛烷/植烷比值( $Pr/Ph$ )和高双杜松烷( $T$ )含量 $[T/(T+C_{30}H)]$ ,指示具有丰富的被子植物和树脂类的贡献,是崖城组海-陆过渡相烃源岩的产物;乐东-陵水凹陷

中央峡谷L25气田和宝岛凹陷北部断阶带宝岛21-1气田具有高 $Ol/C_{30}H$ 比值、中等双杜松烷( $T$ )含量和低 $Pr/Ph$ 比值特征,表明主要来自崖城组陆源海相烃源岩,相比宝岛21-1气田具有更低的 $Ol/C_{30}H$ 和 $Pr/Ph$ 比值及双杜松烷( $T$ )含量,表明陆源高等植物贡献相对减小,具有更多海相藻类的贡献,推测可能是松南-宝岛凹陷海侵时间较早,导致具有更多海相藻类的贡献。

## 3 天然气充注期次与输导体系配置

宝岛凹陷北部自西向东发育系列NE向断裂组合<sup>[20]</sup>,分别控制形成宝岛19、宝岛21和宝岛29转换断阶带<sup>[6-7]</sup>。宝岛21-1气田位于 $F_{12}$ 断裂和 $F_{12-1}$ 断裂夹持形成的宝岛21断阶带,紧邻宝岛凹陷生烃洼陷,具有宝岛27、宝岛25和宝岛21三洼供烃、多期充注特点,发育源内大型构造-断面脊汇聚,及主控 $F_{12}$ 断裂、 $F_{12-1}$ 断裂与陵三段大型三角洲砂岩形成的高效输导体系,烃源-运聚条件优越<sup>[5-6]</sup>。

### 3.1 宝岛21构造具有三洼供烃、多期充注特点

宝岛21-1构造紧邻宝岛27、宝岛25和宝岛21洼生烃洼陷,3个洼陷现今处于成熟-高成熟阶段,其中宝岛27洼成熟度最高,现今成熟度(镜质体反射率 $R_0$ )在1.2%~3.6%,宝岛21洼成熟度相对较低,现今成熟度在1.2%~1.6%,宝岛25洼居中(图5a)。储层包裹体观察显示,宝岛21-1气田储层发育有黄色、蓝绿色和蓝白色包裹体,记录了多期油气充注的特点。其中,陵三段储层包裹体均一温度分布于60~110,120~150(主峰)和150~170℃(图5b),崖城组储层

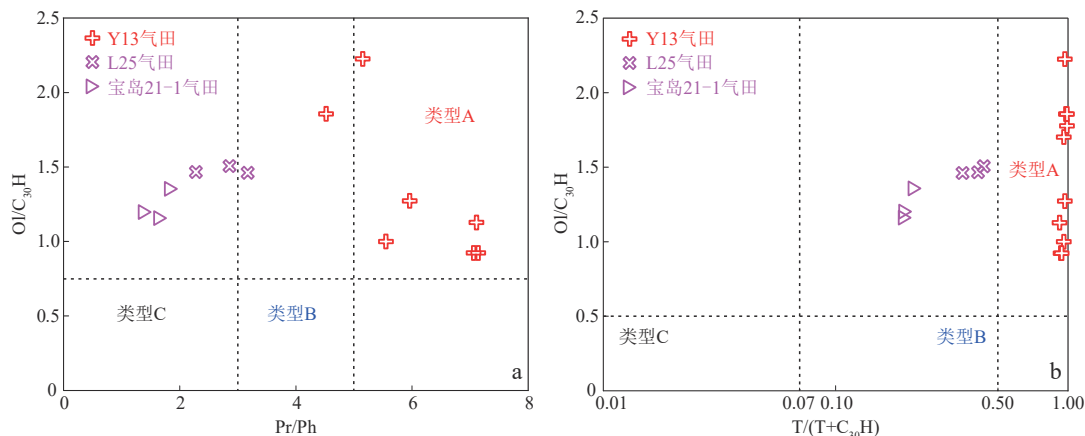


图4 琼东南盆地宝岛21-1气田与已发现气田凝析油生物标志物特征对比

Fig. 4 Comparison of the biomarkers of condensates between the Baodao 21-1 gas field and other gas fields discovered in the Qiongdongnan Basin

a.  $Pr/Ph$ 与 $Ol/C_{30}H$ 关系; b.  $T/(T+C_{30}H)$ 与 $Ol/C_{30}H$ 关系

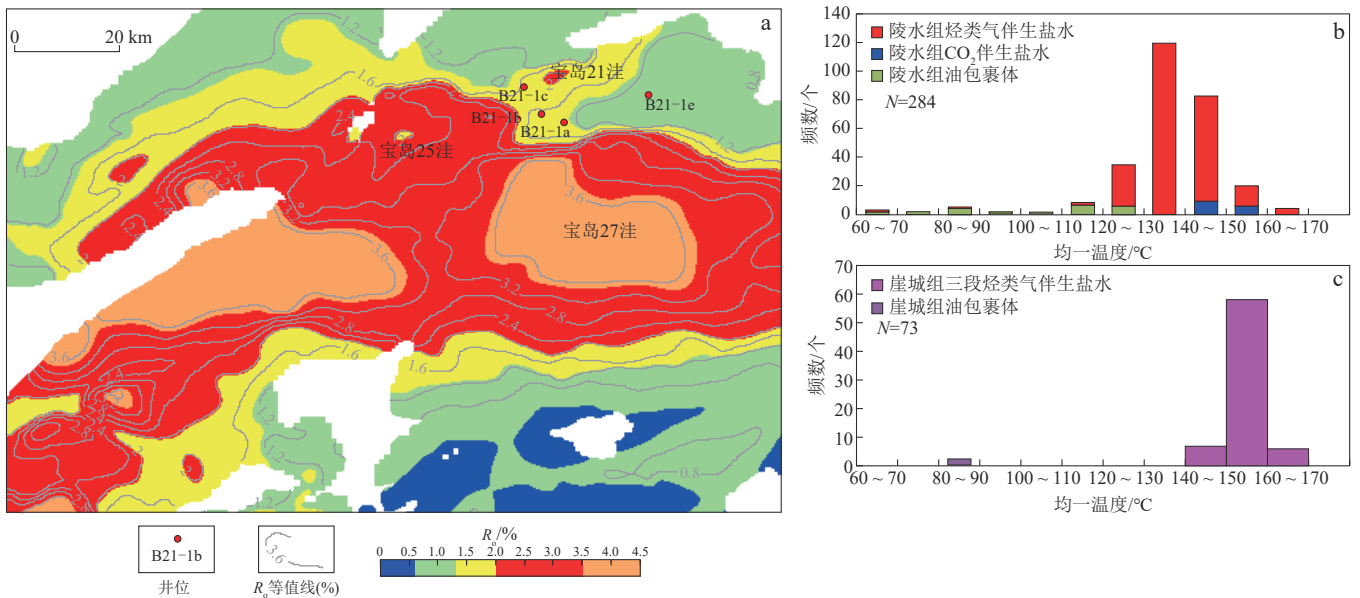


图5 琼东南盆地宝岛21-1构造古近系崖城组顶面现今成熟度与包裹体均一温度分布

Fig. 5 Present-day maturity on the top surface of the Yacheng Formation and the frequency distribution of inclusion homogenization

temperatures in the Baodao 21-1 structure, Qiongdongnan Basin

a. 崖城组顶面现今成熟度; b, c. 分别为陵水组和崖城组包裹体均一温度频数分布直方图

包裹体均一温度分布于80~90 °C和140~170 °C(主峰)(图5c),分别记录了早期低成熟烃类充注,充注时间在22.0~7.8 Ma;中期成熟烃类充注,充注时间在11.0 Ma至今,为研究区主成藏期;晚期高成熟烃类含CO<sub>2</sub>的充注,充注时间约5.0 Ma至今,发育3期油气充注<sup>[5]</sup>,证实了研究区多洼供烃、构造脊+断裂+砂体有效汇聚-输导体系,同时也显示中-晚期断裂活动性及活动强度具有关键作用。

### 3.2 宝岛21构造发育构造-断面脊汇聚与多组沟源断裂组合输导

宝岛21-1构造发育主控F<sub>12</sub>断裂和F<sub>12-1</sub>断裂夹持形成的大型构造脊,向西倾没于宝岛25洼,南侧面向宝岛27洼,北侧为宝岛21洼,主控F<sub>12</sub>断裂和F<sub>12-1</sub>断裂中部发育断面脊特征,源内成熟的天然气可通过大型构造脊和断面脊高效汇聚(图6a),后沿沟源断裂运移聚集。具有主控F<sub>12</sub>断裂和F<sub>12-1</sub>断裂与凹陷内部密集的张性断裂等多组沟源断裂运移,F<sub>12</sub>断裂和F<sub>12-1</sub>断裂为主运移断裂(图6b)。F<sub>12</sub>断裂倾向呈SSE或S向,中段表现为凸面,东西两侧为凹面,剖面上呈铲式特征,向下深切至基底,延伸于莫霍面附近,向上终止于T<sub>0</sub>界面(陵水组顶面)以上沉积层,局部向上延伸较浅;F<sub>12-1</sub>断裂与F<sub>12</sub>断裂近平行分布,倾向为SSE或S,中段整体为凸面,两侧整体为凹面,剖面上呈铲式,向下深切至基底并逐渐向F<sub>12</sub>断层接近,离莫霍面较远,向上

整体终止于T<sub>4</sub>界面(梅山组顶面)附近;凹陷内部相对较为密集的张性断层,多数与F<sub>12</sub>/F<sub>12-1</sub>断裂倾向相同,向下终止于沉积盖层内部,向上整体终止于T<sub>4</sub>界面以下(图6b)。

### 3.3 宝岛21-1构造主控断裂活动性及活动强度对天然气富集的贡献

断裂活动性分析表明,F<sub>12</sub>断裂在黄流组底界面T<sub>4</sub>和莺歌海组底界面T<sub>3</sub>断层落差呈中部高、两端低的特点,中部最高处分别接近140 m和超过180 m,向两侧逐渐减小,最低处为0 m(图7a),在T<sub>4</sub>面最西端出现小高峰,峰值接近120 m,在T<sub>3</sub>面东、西两侧各出现一个小高峰,峰值分别约为105 m和25 m;F<sub>12-1</sub>断裂在T<sub>4</sub>界面断层落差也呈中部高、两侧低的特点,中部最高处接近70 m,向两侧逐渐减小,最低处约为0 m,在T<sub>3</sub>界面基本为0 m(图7b)。综上分析,F<sub>12</sub>断裂在黄流组和莺歌海组沉积期至今中段活动最强、向两端减弱;F<sub>12-1</sub>断裂活动整体弱于F<sub>12</sub>断裂,黄流组沉积期活动强度呈中段最强、两端减弱的特点,在莺歌海组沉积期至今基本停止活动。

沿F<sub>12</sub>断裂输导上来的天然气一部分向宝岛21构造西块北侧运移,另一部分向东北侧凸起区运移,由于该断裂在莺歌海组沉积期还有活动,与晚期CO<sub>2</sub>充注时间相当,其影响区域CO<sub>2</sub>含量总体较高,在凸起区的B15井揭示CO<sub>2</sub>含量高达97.0%,宝岛21构造西

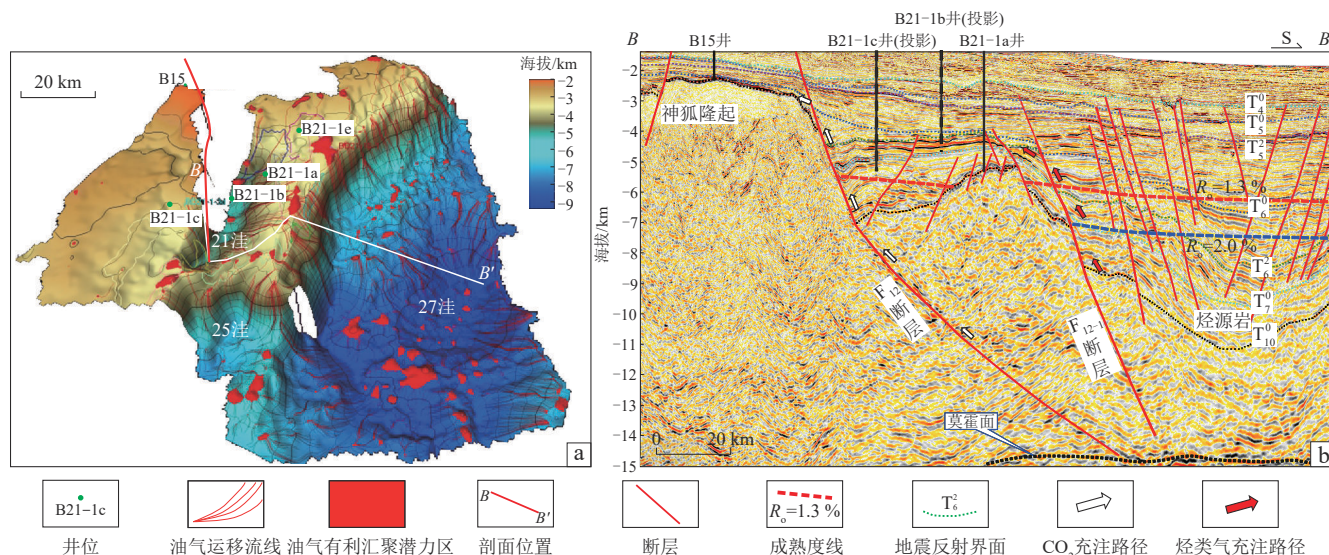


图6 琼东南盆地宝岛21-1构造关键生排烃时刻古近系崖城组顶面构造与典型地震剖面图

Fig. 6 Structural map of the top surface of the Yacheng Formation during hydrocarbon generation and expulsion and a typical seismic profile showing the Baodao 21-1 structure, Qiongdongnan Basin

a. 崖城组顶面构造; b. 典型地震剖面(剖面位置见图6a)

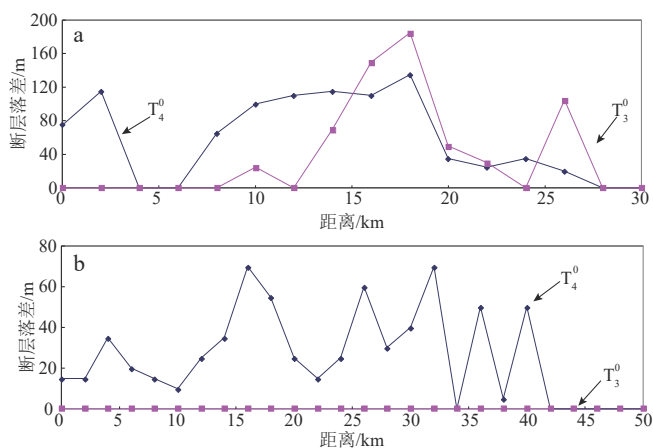


图7 琼东南盆地宝岛21构造主控断裂在 $T_4^0$ 和 $T_3^0$ 界面断层落差

Fig. 7 Throws of dominant faults at boundaries  $T_4^0$  and  $T_3^0$  of the

Baodao 21 structure, Qiongdongnan Basin

a.  $F_{12-1}$ 断裂; b.  $F_{12-2}$ 断裂

块北侧的B21-1c井揭示 $\text{CO}_2$ 含量50.5%;沿 $F_{12-1}$ 断裂输导上来的天然气一部分向宝岛21西块主体构造运移,另一部分向宝岛21构造东部运移,由于该断裂在莺歌海组沉积期基本不活动,受其影响的区域总体 $\text{CO}_2$ 含量相对较低,B21-1a井和B21-1e井揭示天然气中 $\text{CO}_2$ 含量小于30.0%。

#### 4 宝岛21-1气田天然气富集模式及勘探启示

宝岛21-1构造紧邻宝岛凹陷生烃主洼,具有宝岛

27洼、宝岛25洼和宝岛21洼三洼供烃,烃源岩成熟度高、生气强度大。由于宝岛凹陷海侵时间早于乐东-陵水凹陷,崖城组烃源岩海相藻类贡献更多,导致宝岛21-1气田天然气碳同位素偏轻、干燥系数偏低。宝岛21-1构造发育大型构造脊+断面脊汇聚,主控 $F_{12}$ 断裂和 $F_{12-1}$ 断裂晚期差异活动,与陵三段三角洲砂岩构成高效输导体系;上覆新近系和第四系海相泥岩厚度大、分布稳定,是良好的区域盖层。宝岛21-1构造具有“紧邻生烃主洼,大型构造脊+断面脊汇聚,大型沟源断裂长期活动+三角洲砂岩配置输导”的天然气富集模式,为有利汇聚区,宝岛21-1大型气田的发现,证实了汇聚条件(图8)。向东的宝岛构造具有紧邻宝岛生烃洼陷,发育沟源断裂与砂体配置高效输导体系,具有相似天然气成藏富集模式,也是天然气有利聚集区域,是下步天然气勘探重点领域。

#### 5 结论

1) 宝岛21-1气田重烃含量高,干燥系数0.83~0.95,具有凝析气的特点。乙烷碳同位素值小于-28‰、丙烷碳同位素值基本小于-26‰,指示了崖城组陆源高等植物和腐泥型有机质的双源贡献,且相对于Y13气田与中央峡谷气田,具有更多海相藻类的贡献。

2) 宝岛21-1构造具有紧邻生烃主洼、多期油气充注特点,发育断裂-砂体配置输导,主控 $F_{12}$ 断裂和

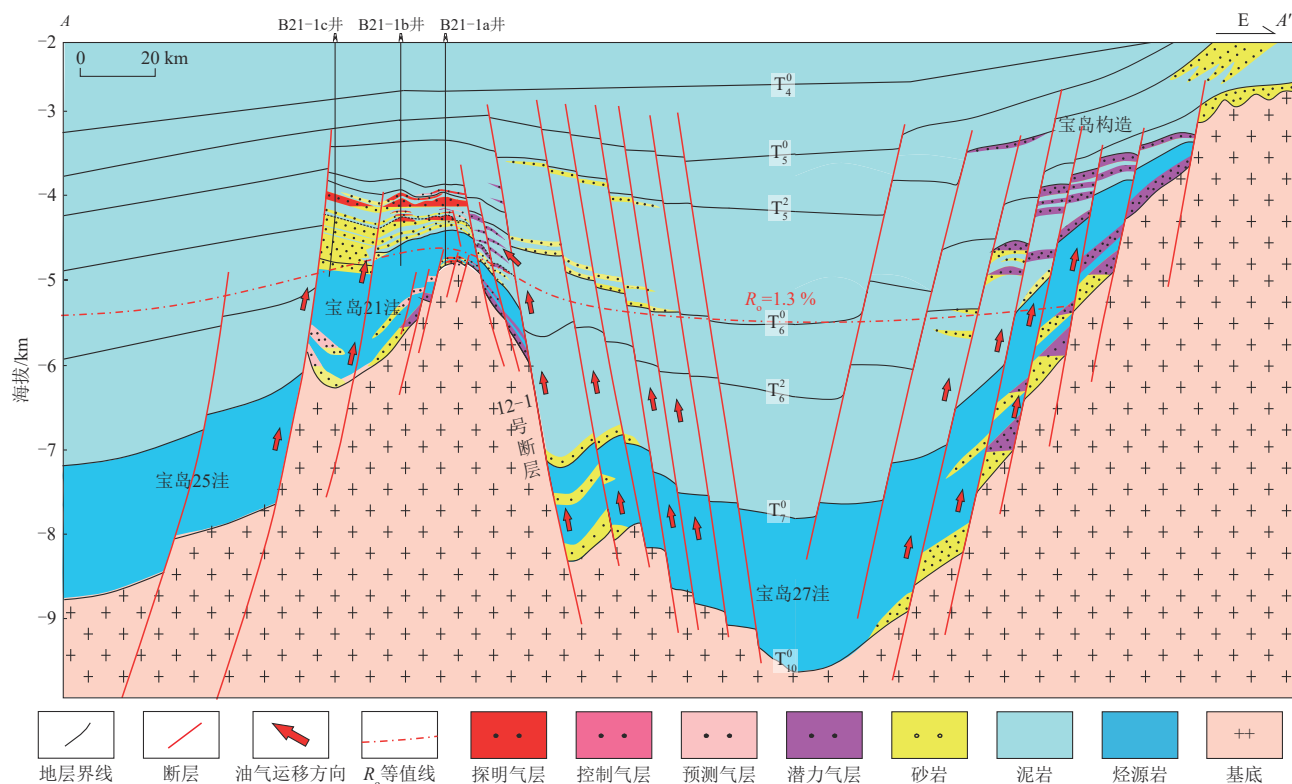


图8 琼东南盆地宝岛凹陷北部断阶带天然气富集成藏模式(剖面位置见图1a)

Fig. 8 Natural gas enrichment mode diagram in the fault terrace zone of the northern Baodao Sag, Qiongdongnan Basin  
(see Fig. 1a for the section location)

$F_{12-1}$ 断裂为近平行铲式特征,呈中间凸、两侧凹特点, $F_{12}$ 断裂晚期持续活动, $F_{12-1}$ 断裂早期活动、晚期停止,对油气具有良好的汇聚-输导作用,也是其以烃类气为主、 $\text{CO}_2$ 含量总体低于北侧凸起区的重要原因。

3) 宝岛21-1构造具有“紧邻生烃主洼,大型构造脊+断面脊汇聚,大型沟源断裂长期活动+三角洲砂岩配置的高效输导”天然气富集模式,是有利汇聚区,宝岛21-1深水深层大型气田的发现,证实了烃源-运聚条件,东向的宝岛构造也是有利聚集区,是下步天然气勘探的重点领域。

### 参 考 文 献

- [1] 吴克强,曾清波,李宏义,等. 南海北部天然气成藏规律与勘探领域[J]. 中国海上油气, 2022, 34(5): 23-35.  
WU Keqiang, ZENG Qingbo, LI Hongyi, et al. Accumulation laws and exploration fields of natural gas in northern South China Sea[J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(5): 23-35.
- [2] XIE Yuhong, WANG Zhenfeng, TONG Chuanxin. Petroleum geology of Yacheng 13-1, the largest gas field in China's offshore region[J]. Marine and Petroleum Geology, 2008, 25 (4/5): 433-444.
- [3] 王振峰,孙志鹏,张迎朝,等. 南海北部琼东南盆地深水中央峡谷大气田分布与成藏规律[J]. 中国石油勘探, 2016, 21 (4): 54-64.
- [4] 张迎朝,范彩伟,徐新德,等. 南海琼东南盆地东区天然气成因类型与烃源探讨[J]. 石油实验地质, 2015, 37(4): 466-472, 478.  
ZHANG Yingzhao, FAN Caiwei, XU Xinde, et al. Genesis and sources of natural gas in eastern Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2015, 37(4): 466-472, 478.
- [5] 徐长贵,邓勇,吴克强,等. 南海北部强活动型被动陆缘盆地宝岛21-1大气田的发现及地质意义[J]. 石油学报, 2023, 44 (5): 713-729.  
XU Changgui, DENG Yong, WU Keqiang, et al. Discovery and geological significance of the large gas field Baodao 21-1 in a passive epicontinental basin with strong activity in the northern South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(5): 713-729.
- [6] 徐长贵,尤丽. 琼东南盆地松南—宝岛凹陷北坡转换带特征及其对大中型气田的控制[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(6): 1061-1072.  
XU Changgui, YOU Li. North slope transition zone of Songnan-

- Baodao Sag in Qiongdongnan Basin and its control on medium and large gas fields, South China Sea[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(6): 1061–1072.
- [7] 邓勇, 裴健翔, 胡林, 等. 南海西部海域宝岛21-1气田的发现与成藏模式[J]. *中国海上油气*, 2022, 34(5): 13–22.
- DENG Yong, PEI Jianxiang, HU Lin, et al. Discovery and hydrocarbon accumulation models of Baodao 21-1 Gas Field in the western South China Sea[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2022, 34(5): 13–22.
- [8] 贺婉慧, 汪伟, 尹宏伟, 等. 琼东南盆地深水区构造演化及东西段构造差异对比[J]. *高校地质学报*, 2022, 28(5): 644–654.
- HE Wanhui, WANG Wei, YIN Hongwei, et al. Structural evolution in deep water area of Qiongdongnan Basin and comparison of structural differences between eastern and western segments[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2022, 28(5): 644–654.
- [9] 吴克强, 解习农, 裴健翔, 等. 超伸展陆缘盆地深部结构及油气勘探意义——以琼东南盆地为例[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(3): 651–661.
- WU Keqiang, XIE Xinong, PEI Jianxiang, et al. Deep architecture of hyperextended marginal basin and implications for hydrocarbon exploration: A case study of Qiongdongnan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(3): 651–661.
- [10] YOU Li, XU Shouli, MAO Xuelian, et al. Reservoir characteristics and genetic mechanisms of the mesozoic granite buried hills in the deep-water of the Qiongdongnan Basin, Northern South China Sea[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2021, 95(1): 259–267.
- [11] XIA Xinyu, GAO Yongli. Mechanism of linear covariations between isotopic compositions of natural gaseous hydrocarbons[J]. *Organic Geochemistry*, 2017, 113: 115–123.
- [12] DAI Jinxing, XIA Xinyu, QIN Shengfei, et al. Origins of partially reversed alkane  $\delta^{13}\text{C}$  values for biogenic gases in China[J]. *Organic Geochemistry*, 2004, 35(4): 405–411.
- [13] HAO Fang, LI Sitian, SUN Yongchuan, et al. Geology, compositional heterogeneities, and geochemical origin of the Yacheng Gas Field, Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. *AAPG Bulletin*, 1998, 82(7): 1372–1384.
- [14] ZHU Weilin, HUANG Baojia, MI Lijun, et al. Geochemistry, origin, and deep-water exploration potential of natural gases in the Pearl River Mouth and Qiongdongnan basins, South China Sea[J]. *AAPG Bulletin*, 2009, 93(6): 741–761.
- [15] 张功成, 陈莹, 李增学, 等. 中国海域煤型油气成因理论[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(3): 553–565.
- ZHANG Gongcheng, CHEN Ying, LI Zengxue, et al. Theory on genesis of coaliferous petroleum in the China Sea[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(3): 553–565.
- [16] 李增学, 刘莹, 李晓静, 等. 琼东南盆地古近纪泥炭沼泽破坏与重建作用对煤型源岩物质形成的控制[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(6): 1309–1320.
- LI Zengxue, LIU Ying, LI Xiaojing, et al. The control of Paleogene peat swamp destruction and reconstruction on the formation of coal-type source material in the Qiongdongnan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(6): 1309–1320.
- [17] 梁刚, 甘军, 李兴. 琼东南盆地陵水凹陷天然气成因类型及来源[J]. *中国海上油气*, 2015, 27(4): 47–53.
- LIANG Gang, GAN Jun, LI Xing. Genetic types and origin of natural gas in Lingshui Sag, Qiongdongnan Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2015, 27(4): 47–53.
- [18] 黄合庭, 黄保家, 黄义文, 等. 南海西部深水区大气田凝析油成因与油气成藏机制——以琼东南盆地陵水17-2气田为例[J]. *石油勘探与开发*, 2017, 44(3): 380–388.
- HUANG Heting, HUANG Baojia, HUANG Yiwen, et al. Condensate origin and hydrocarbon accumulation mechanism of the deepwater giant gas field in western South China Sea: A case study of Lingshui 17-2 Gas Field in Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(3): 380–388.
- [19] 黄第藩, 李晋超, 张大江. 干酪根的类型及其分类参数的有效性、局限性和相关性[J]. *沉积学报*, 1984, 2(3): 18–33.
- HUANG Difan, LI Jinchao, ZHANG Dajiang. Kerogen types and study on effectiveness, limitation and interrelation of their identification parameters[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1984, 2(3): 18–33.
- [20] 谢玉洪, 童传新, 范彩伟, 等. 琼东南盆地断裂系统特征与演化[J]. *大地构造与成矿学*, 2015, 39(5): 795–807.
- XIE Yuhong, TONG Chuanxin, FAN Caiwei, et al. Characteristics and evolution of fault system in Qiongdongnan Basin[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2015, 39(5): 795–807.

(编辑 梁 慧)