

文章编号: 0253-2697(2023)05-0713-17 DOI:10.7623/syxb202305001

# 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

徐长贵<sup>1,2</sup> 邓勇<sup>3</sup> 吴克强<sup>4</sup> 胡林<sup>4</sup> 尤丽<sup>4</sup>

(1. 中国海洋石油有限公司 北京 100010; 2. 海洋油气勘探国家工程研究中心 北京 100010;  
3. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司 广东湛江 524057; 4. 中海石油(中国)有限公司海南分公司 海南海口 570100)

**摘要:**宝岛凹陷是琼东南盆地新生代构造活动最强烈的凹陷,2022年在宝岛21转换断阶带发现中国首个深水深层大型气田——宝岛21-1气田,证实了宝岛凹陷的天然气的资源潜力。在宝岛21-1气田基本地质特征认识的基础上,系统分析气田烃源岩富集生烃机理、储层-圈闭形成机制、断裂体系运聚机理和天然气成藏期次及成藏模式,总结针对深水深层的地球物理与测试作业攻关创新技术。宝岛21-1构造发育“双源”有机质富集,地壳强烈薄化导致构造具高热流值,烃源岩热演化加速、生气强度大;隆起区物源沿转换斜坡注入凹陷,形成大型三角洲朵叶体控制的构造+岩性圈闭;大型构造脊利于天然气汇聚,主控断层差异活动与三角洲砂岩构成高效输导系统,具备形成大型气田的地质基础。宝岛21-1气田具有多期油气充注,证实转换断阶带发育“半封闭环境富集/高热加速生烃控源—转换斜坡控圈—长期活动断裂控运—晚期多期强充注—弱活动断裂控聚”的天然气的成藏富集模式。建立深水陡陆坡崎岖海底区深层油气地球物理探测关键技术,实现了构造精细落实与含气性成功预测;创建深水深层复杂流体流动安全保障与产能释放关键技术,保障了地层真实产能释放。宝岛21-1大型气田的发现,证实强活动型被动陆缘盆地油气成藏富集模式,认为相对稳定的走向斜坡型转换带是大—中型气田富集的“黄金带”。研究认识为宝岛凹陷天然气勘探指明了方向,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的借鉴与启示意义。

**关键词:**琼东南盆地;宝岛凹陷;转换断阶带;深水深层;烃类气;大型气田

中图分类号:TE122

文献标识码:A

## 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

Xu Changgui<sup>1,2</sup> Deng Yong<sup>3</sup> Wu Keqiang<sup>4</sup> Hu Lin<sup>4</sup> You Li<sup>4</sup>

(1. CNOOC Limited, Beijing 100010, China; 2. National Engineering Research Center of Offshore Oil and Gas Exploration, Beijing 100010, China; 3. Zhanjiang Branch, CNOOC (China) Limited, Guangdong Zhanjiang, 524057, China;  
4. Hainan Branch, CNOOC (China) Limited, Hainan Haikou 570100, China)

**Abstract:** In Qiongdongnan Basin, Baodao sag is considered as the one where the strongest Cenozoic tectonic activity occurred. In 2022, China's first large deep-water and deep-layer gas field, i. e., Baodao 21-1 gas field, was discovered in Baodao 21 transition step-fault zone, thus verifying the potential of natural gas resources of Baodao sag. Based on the understanding of the basic geological characteristics of Baodao 21-1 gas field, the paper systematically analyzes the enrichment and hydrocarbon generation mechanism of source rocks, the reservoir-trap formation mechanism, the migration and accumulation mechanism of fault system, and the accumulation stages and accumulation models of natural gas of the gas field, and summarizes the groundbreaking and innovative geophysical and testing technologies for deep-water and deep-layer gas fields. Baodao 21-1 structure develops “double source” organic matter enrichment, and the intense crustal thinning leads to high heat flow in the structure, as well as accelerated thermal evolution and high gas generation intensity of source rocks; the provenance of the uplift is injected into the sag along the transition slope, forming a tectonic and lithologic trap controlled by large delta lobes; large-scale tectonic ridges are conducive to natural gas accumulation, and the differential activities of main faults and delta sandstones constitute an efficient transport system, which can provide a geological foundation for the formation of large-scale gas fields. Baodao 21-1 gas field has multi-stage oil and gas charging, proving that the transition step-fault zone develops a natural gas accumulation and enrichment mode of “enrichment in semi-enclosed environment/accelerating hydrocarbon generation at high temperature for source control, relay ramp for trap control, long-term active fault for controlling hydrocarbon migration, late multi-stage strong charging, and weak active fault for controlling accumulation”. This study develops

**基金项目:**中海石油(中国)有限公司综合科研项目“南海大—中型天然气田形成条件、勘探潜力与突破方向”(KJZH-2021-0003-00)资助。

**第一作者及通信作者:**徐长贵,男,1971年10月生,2007年获中国地质大学(北京)工学博士学位,现为中海石油(中国)有限公司勘探副总师、教授级高级工程师,主要从事石油地质与综合勘探研究。Email:xuchg@cnooc.com.cn

the key technologies for deep layer oil and gas geophysical exploration in the rugged seabed area of deepwater steep slope land, thus achieving the fine construction of structure and successful prediction of gas-bearing properties, and creates key technologies for safety control of flowing of deepwater and deep layer complex fluid and capacity release, thus guaranteeing the release of real production capacity of the formations. The discovery of the large gas field Baodao 21-1 has confirmed the oil and gas accumulation and enrichment mode of passive epicontinental basin with strong activity. It is believed that the relatively stable strike slope type transition zone is the "golden zone" for enrichment in medium- and large-scale gas fields. The relevant research and understanding point out the direction for natural gas exploration in Baodao sag, and have important reference and enlightenment significance for natural gas exploration in Qiongdongnan Basin, the northern and central-southern South China Sea.

**Key words:** Qiongdongnan Basin; Baodao sag; transition step-fault zone; deep-water and deep-layer; hydrocarbon gas; large gas field

引用:徐长贵,邓勇,吴克强,胡林,尤丽.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.

Cite :XU Changgui, DENG Yong, WU Keqiang, HU Lin, YOU Li. 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.

琼东南盆地是中国南海北部重要的新生代盆地,油气资源丰富<sup>[1-3]</sup>,是天然气勘探主战场之一<sup>[4-5]</sup>,多年勘探实践证明盆地发育中生界潜山、古近系三角洲、中新统一上新统水道—海底扇多套成藏组合<sup>[6-11]</sup>。受资料限制,琼东南盆地早期勘探主要集中在盆地西区的浅水区(现今水深<300 m),在崖南凹陷发现了崖城 13-1 气田<sup>[12]</sup>。近年来,随着勘探技术的进步,在西区乐东—陵水凹陷深水区峡谷领域相继发现陵水 17-2、陵水 18、陵水 25 等大一中型气田<sup>[11-12]</sup>,而东区松南—宝岛凹陷的深水区 and 浅水区经多轮勘探仍未取得商业突破,发现的气藏规模小、非烃含量较高<sup>[12-13]</sup>。与世界经典的稳定被动大陆边缘盆地不同,琼东南盆地松南—宝岛凹陷新生代构造活动强烈,盆地结构构造复杂、有机质富集生烃机理不明、成藏模式不清,深水区海底崎岖导致地震成像差,严重影响圈闭、储层与含气性预测,且深层产能有效释放难,这些科学与技术难题制约着油气勘探进程。

近年来,通过系统分析宝岛北坡新采集的三维地震和钻井资料,重新认识松南—宝岛凹陷结构,提出北部断阶带控源、控储、控聚天然气高效聚集模式<sup>[14-17]</sup>,指导发现了中国首个深水深层大气田——宝岛 21-1 气田<sup>[1,16-17]</sup>,2 口井揭示气层厚度超百米,测试产气量超过 100 m<sup>3</sup>/d,提交探明天然气地质储量超 500 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>、凝析油地质储量超 250 × 10<sup>4</sup> t,实现宝岛凹陷近 30 年以来的重大突破<sup>[16-17]</sup>。宝岛 21-1 大型气田的发现,证实了强活动型被动陆缘盆地油气成藏富集模式,勘探成果及勘探技术对南海北部及中—南部盆地的天然气勘探具有重要启示。在宝岛 21-1 大气田基本地质特征认识的基础上,重点分析气田烃源岩富集生烃机理、储层—圈闭形成机制、断裂体系运聚机理,明确成藏期次及成藏模式,总结针对深水深层地球物理

与测试作业攻关创新技术,以期对琼东南盆地和南海天然气勘探提供参考与借鉴。

## 1 琼东南盆地油气勘探概况

琼东南盆地是位于中国南海北部的被动大陆边缘新生代盆地,受欧亚、太平洋和印度等板块汇聚作用影响,盆地为强活动型被动陆缘盆地,平面上具有“南北分带、东西分块”的构造格局<sup>[17-20]</sup>,自北向南依次划分为北部拗陷、中部隆起、中央拗陷、南部隆起等一级构造单元,进一步划分为崖南凹陷、乐东—陵水凹陷、松南—宝岛凹陷、长昌凹陷、松南低凸起、陵南低凸起等二级构造单元[图 1(a)]。以松南低凸起为界将琼东南盆地划分为东区和西区,西区主要发育 NW 向、EW 向断裂,东区主要发育 NE 向、EW 向断裂。琼东南盆地经历了断陷、断-拗转换、拗陷三大演化阶段,纵向上具有“下断上拗”双层结构。断陷期盆地沉积了始新统岭头组、渐新统崖城组,其中,岭头组发育湖相生油岩,崖城组障壁海湾及浅海相沉积是盆地的主力气源岩。断-拗转换期沉积滨—浅海相陵水组,发育大型辫状河三角洲、(扇)三角洲砂体,是盆地的主要储集层。拗陷阶段沉积半深海—深海相中新统三亚组、梅山组、黄流组和上新统莺歌海组及第四系乐东组[图 1(b)],整体表现为区域盖层,也发育有重力流水道—海底扇储集体<sup>[19-20]</sup>。

琼东南盆地油气勘探始于 20 世纪 70 年代末,钻探第一口井见油气显示。20 世纪 80 年代初,进入对外合作勘探阶段,在崖南凹陷发现了崖城 13-1 千亿立方米级大气田。1991—2012 年为“自营+合作”勘探阶段,进军中—深层古近系,兼顾浅层新近系,先后探索环崖南凹陷、乐东凹陷、松南—宝岛凹陷等领域,发现了多个含气构造。2013—2019 年为自营中—浅层勘探阶段,在乐东—陵水凹陷深水区发现了陵水 17-2、陵水 25 等

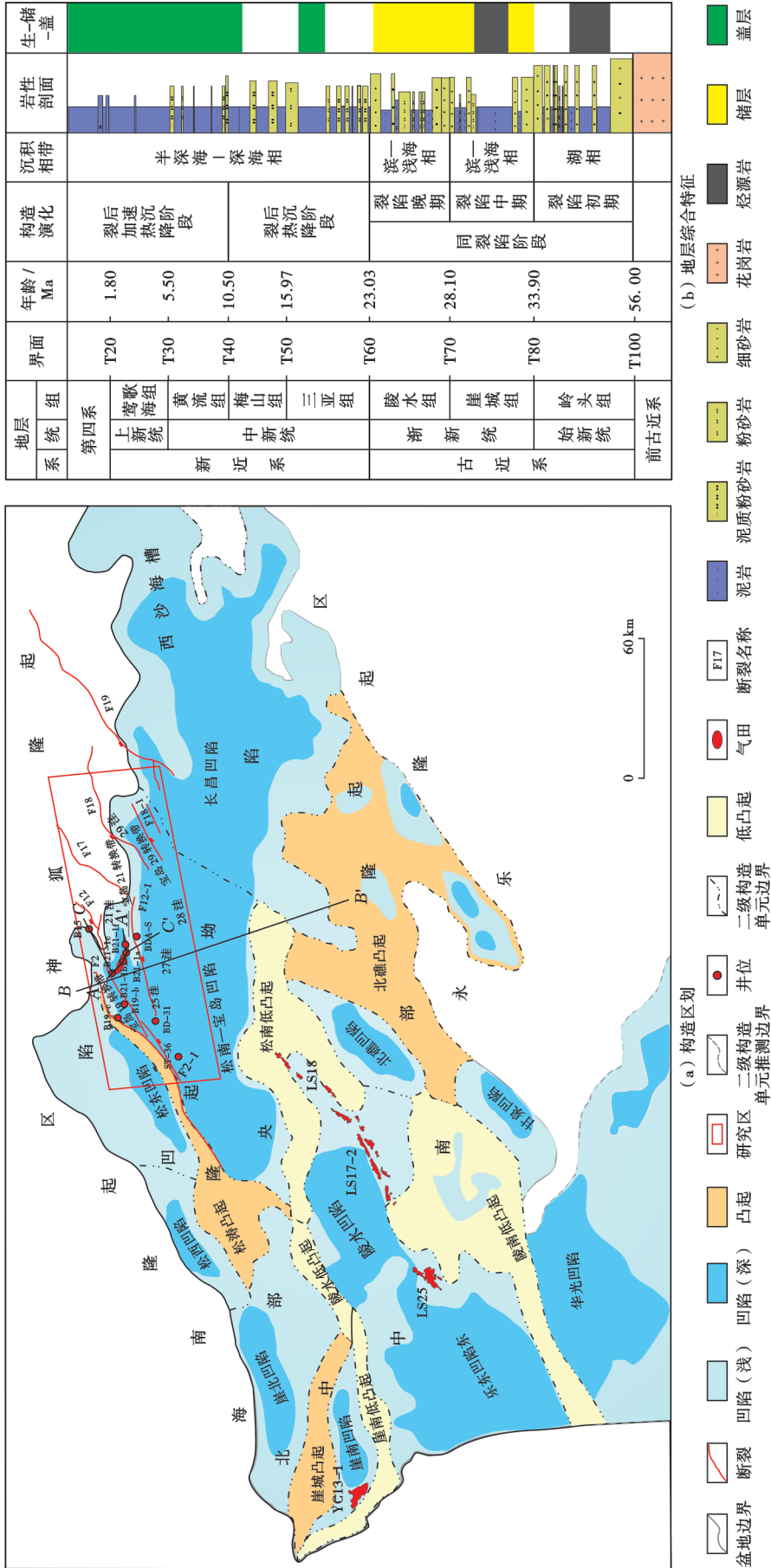


图 1 琼东南盆地构造区划与地层特征

Fig. 1 Tectonic division and stratigraphic characteristics of Qiongdongnan Basin

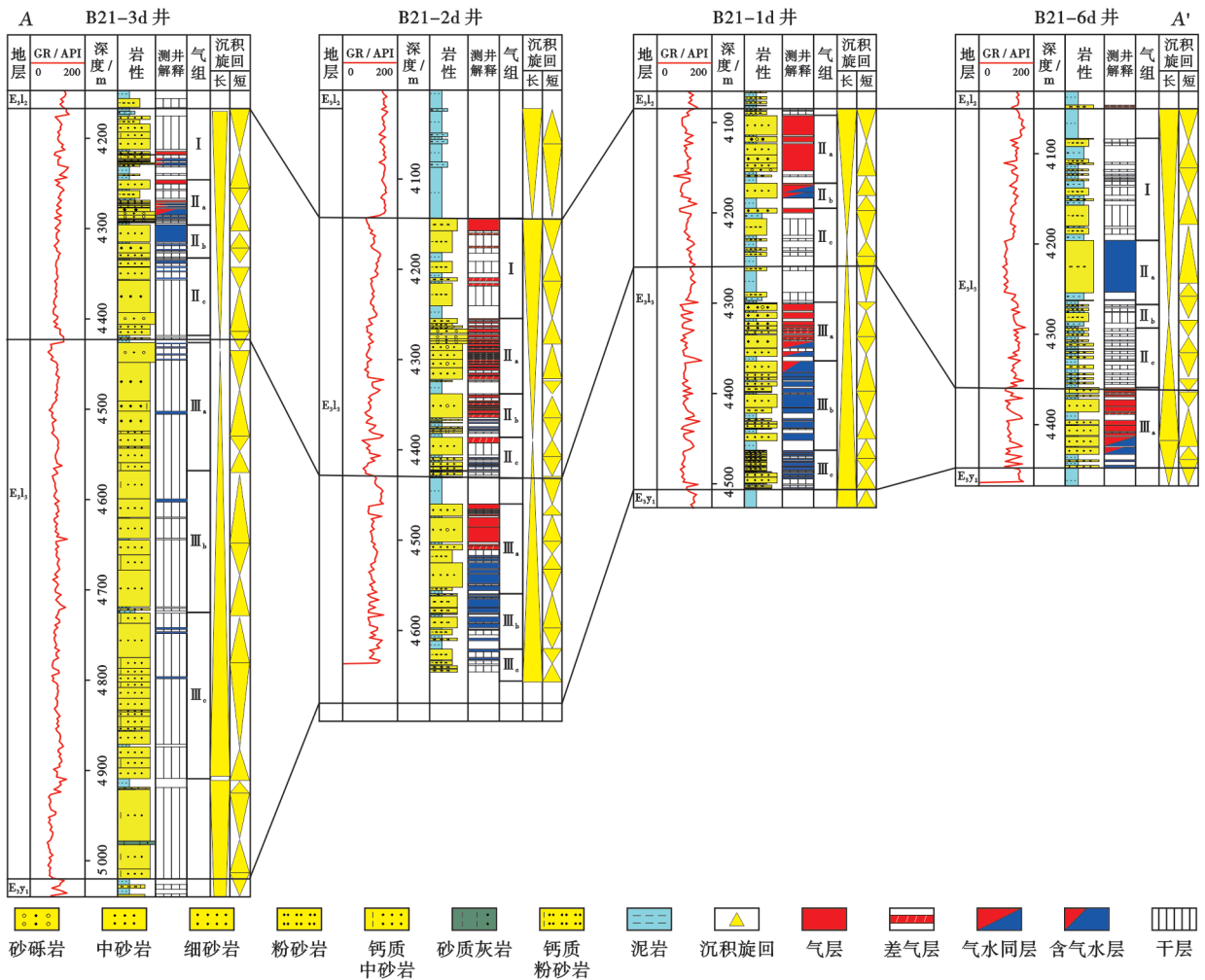
大一中型气田。20世纪90年代开始对盆地东区松南—宝岛凹陷开展多轮研究,先后钻探超过15口井,发现的气藏规模小、非烃气(CO<sub>2</sub>)含量高,一直未获规模商业性突破<sup>[17]</sup>。2020年底—2022年,基于新采集三维资料与钻井资料的系统分析,开展了新一轮石油地质研究,在宝岛凹陷北坡识别出系列转换断阶带,建立了转换断阶带控藏模式,在宝岛21断阶带落实系列潜力区,先后部署数口探井,发现中国首个深水深层大气田——宝岛21-1气田,实现了宝岛凹陷近30年以来的历史性重大突破<sup>[16-17]</sup>。

## 2 宝岛21-1大型气田基本地质特征

宝岛21-1气田发育古近系陵水组二段(陵二段)、陵水组三段(陵三段)和崖城组3套成藏组合(图2),主力成藏层系陵三段发育大型辫状河三角洲水下分流河道沉积储层,结合岩电、地震相特征自下而上划分出低位期Ⅲ气组和海侵—高位期Ⅱ、Ⅰ气组,进一步划分

出Ⅲ<sub>a</sub>、Ⅲ<sub>b</sub>、Ⅲ<sub>c</sub>、Ⅱ<sub>a</sub>、Ⅱ<sub>b</sub>、Ⅱ<sub>c</sub>亚气组。主力亚气组Ⅲ<sub>a</sub>、Ⅱ<sub>a</sub>的储集岩性以含砾中—细砂岩为主,储集空间为粒间孔与粒内溶孔组合,为中—低孔、中—低渗储层(图3)。B21-1a、B21-1b、B21-1f井区的Ⅲ<sub>a</sub>亚气组离物源区相对较远,储层物性相近[图3(a)、图3(b)],平均孔隙度为11%,渗透率在0.05~8.61mD,测压流度为0.02~2.90D/(Pa·s)。B21-1a、B21-1f井区的Ⅱ<sub>a</sub>亚气组离物源区相对较远,储集岩分选和物性较好[图3(c)],平均孔隙度为13%,渗透率在1.4~11.8mD,测压流度为1.3~38.2D/(Pa·s);离物源区相对较近的B21-1b、B21-1c井区的储集岩分选和物性较差[图3(d)、图3(e)],孔隙度为11.5%,渗透率在0.1~5.0mD,测压流度为0.01~2.63D/(Pa·s)。

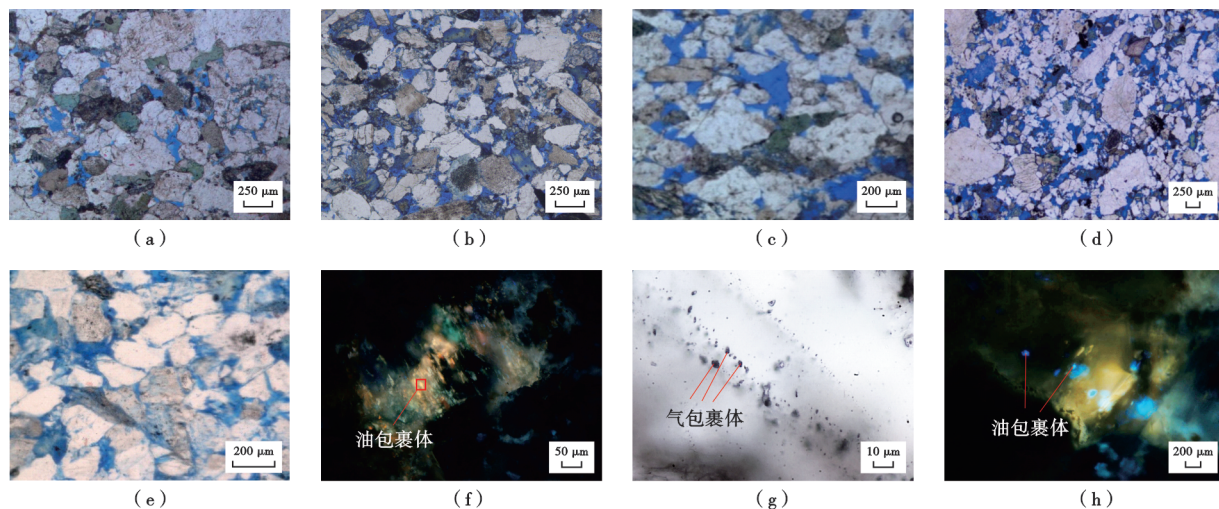
组分分析表明,宝岛21-1气田天然气以烃类气为主,CO<sub>2</sub>含量基本小于55%,明显低于邻近的宝岛19区、宝岛15区,其中,B21-1c、B21-1f井区CO<sub>2</sub>含量相对较高(约为50%),B21-1a、B21-1b、B21-1e井区CO<sub>2</sub>



注: E<sub>3</sub>l<sub>2</sub>—陵水组二段; E<sub>3</sub>l<sub>3</sub>—陵水组三段; E<sub>3</sub>y<sub>1</sub>—崖城组一段。

图2 宝岛21-1气田已钻井地层对比(剖面位置见图1)

Fig. 2 Stratigraphic correlation of the drilled wells in Baodao 21-1 gas field



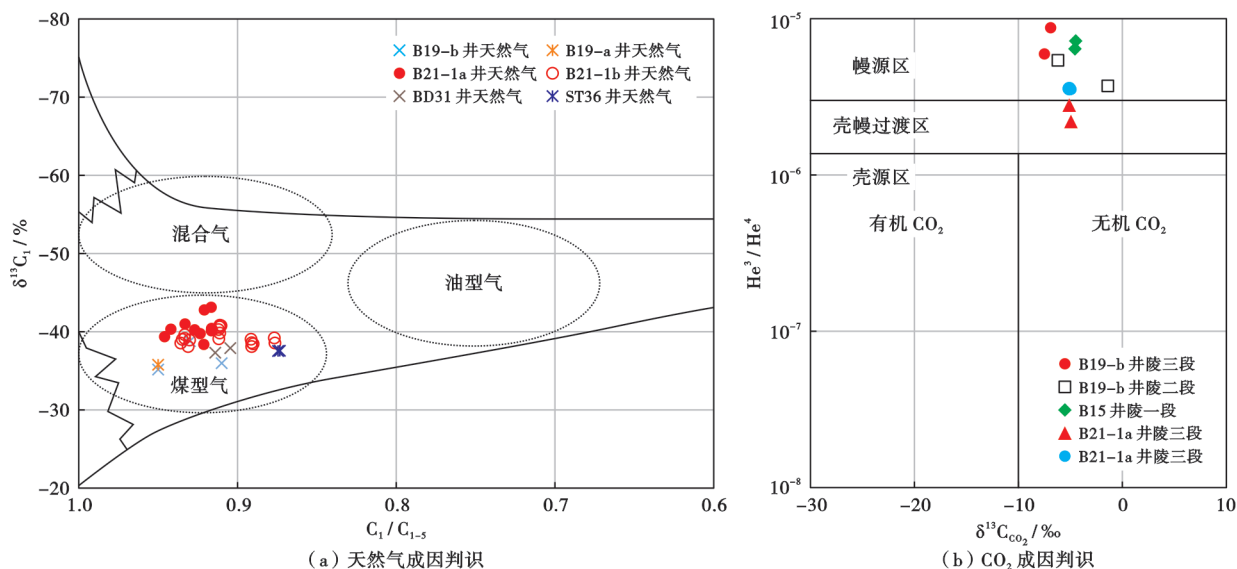
(a)溶蚀孔,中—粗砂岩,孔隙度为 11.8%,渗透率为 3.69 mD, B21-1a 井 4 322.00 m; (b)溶蚀孔,中砂岩,孔隙度为 12.4%,渗透率为 3.97 mD, B21-1b 井 4 483.00 m; (c)粒间孔和粒间溶孔,含砾粗砂岩,孔隙度为 17.7%,渗透率为 268 mD, B21-1a 井 4 121.00 m; (d)粒间孔及溶蚀孔,分选较差,砂砾岩,孔隙度为 14.8%,渗透率为 1.05 mD, B21-1b 井 4 308.35 m; (e)溶蚀孔,细砂岩,孔隙度为 12.7%,渗透率为 1.42 mD, B21-1c 井 4 250.00 m; (f)长石粒内溶孔中见油包裹体, B21-1a 井 4 322.00 m; (g)裂缝充填石英矿物含气包裹体, B21-1a 井 4 963.00 m; (h)石英颗粒裂纹中见油包裹体, B21-1a 井 4 963.00 m。

图 3 宝岛 21-1 气田陵三段储层微观特征

Fig. 3 Microscopic characteristics of the reservoir of Member 3 of Lingshui Formation in Baodao 21-1 gas field

含量约为 30%。DST 测试数据分析显示, B21-1a 井陵三段Ⅱ<sub>a</sub>亚气组烃类气含量为 74.3%, 干燥系数为 0.93, 气油比为 20 190, 凝析油相对密度为 0.826; B21-1f 井陵三段Ⅲ<sub>a</sub>亚气组烃类气含量为 45.4%, 干燥系数为 0.92, 气油比为 66 861, 凝析油相对密度为 0.816, 属于典型的湿气气藏。MDT 取样天然气组分同位素分析显示, 陵三段天然气  $\delta^{13}C_1$  为  $-45.1\text{‰} \sim -38.6\text{‰}$ , 指示其为高熟煤型气[图 4(a)]。平面上, 离

F12 断裂较近的 B21-1c 井的天然气偏湿, 具有相对较低的  $\delta^{13}C_1$  (在  $-45.1\text{‰} \sim -40.9\text{‰}$ ) 和热演化成熟度(镜质体反射率  $R_o$  约为 1.6%); B21-1a 井和 B21-1b 井陵三段天然气甲烷碳同位素明显偏重,  $\delta^{13}C_1$  在  $-40.2\text{‰} \sim -38.6\text{‰}$ , 成熟度较高( $R_o$  为 1.5%~2.1%)。宝岛 21-1 气田陵三段天然气中的  $\delta^{13}C_{CO_2}$  约为  $-5\text{‰}$ , 与周边宝岛 19、宝岛 15 区  $CO_2$  成因一致,  $He^3/He^4$  比值为  $(2.8 \sim 3.5) \times 10^6$ , 指示其为无机幔源成因[图 4(b)]。



注: B21-1a 井陵三段 CO<sub>2</sub> 测试资料据文献[16, 18]。

图 4 宝岛 21-1 气田天然气成因判别

Fig. 4 Origin discrimination of the natural gas of Baodao 21-1 gas field

### 3 宝岛 21-1 大型气田成藏地质条件及成藏模式

#### 3.1 宝岛凹陷结构构造特征

基于琼东南盆地新采集三维地震资料与已钻井资料,对宝岛凹陷盆地结构构造开展了分析。宝岛凹陷及周缘自北向南依次为神狐隆起、宝岛凹陷和南部隆

起 3 个构造单元(图 5)。

地震剖面可清晰识别出莫霍面、脆-韧性转换面、沉积层与基底(T100)及各沉积充填界面(图 6)。莫霍面表现为—组振幅较强、连续性较好的反射界面,界面上、下分别为下地壳和地幔,其中,下地壳表现为相对复杂的反射同相轴,地震振幅强弱不同,连续性差异较大;地幔具有相对均一的地震反射特征,几乎无反射同

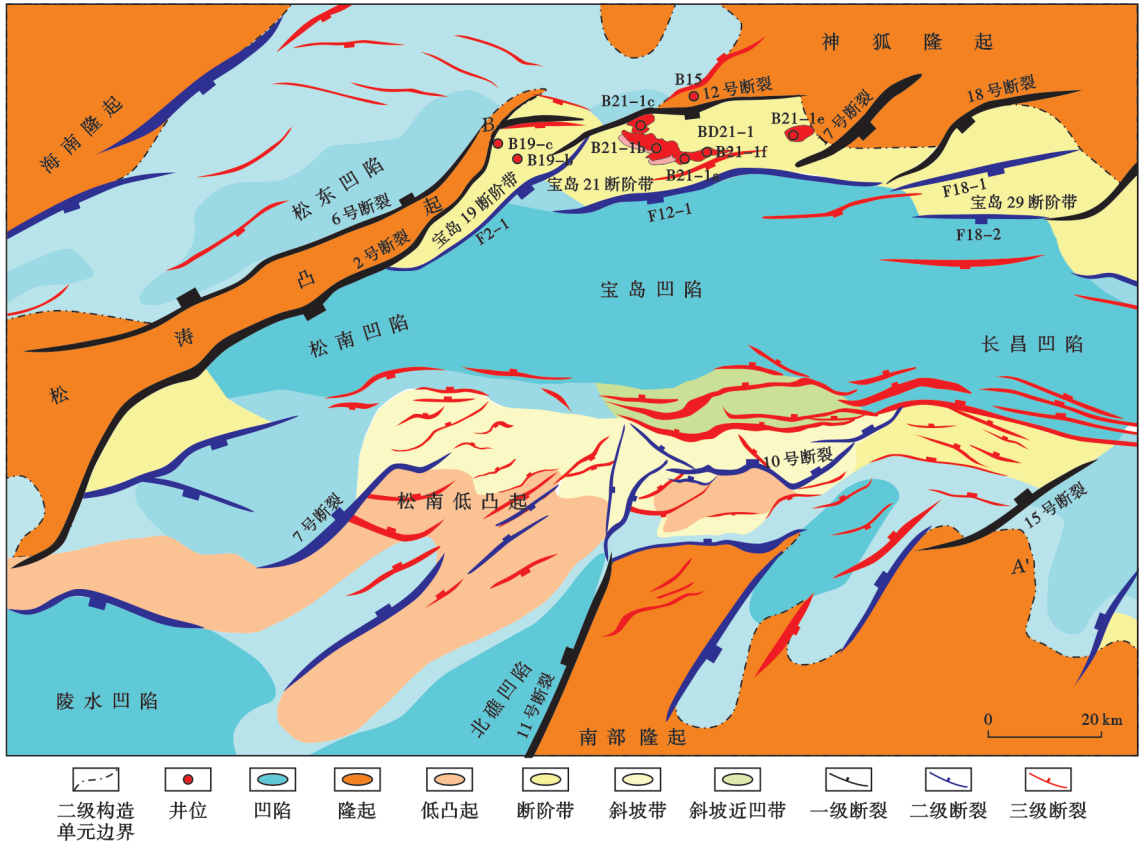


图 5 琼东南盆地宝岛凹陷结构构造  
Fig. 5 Structure of Baodao sag in Qiongdongnan Basin

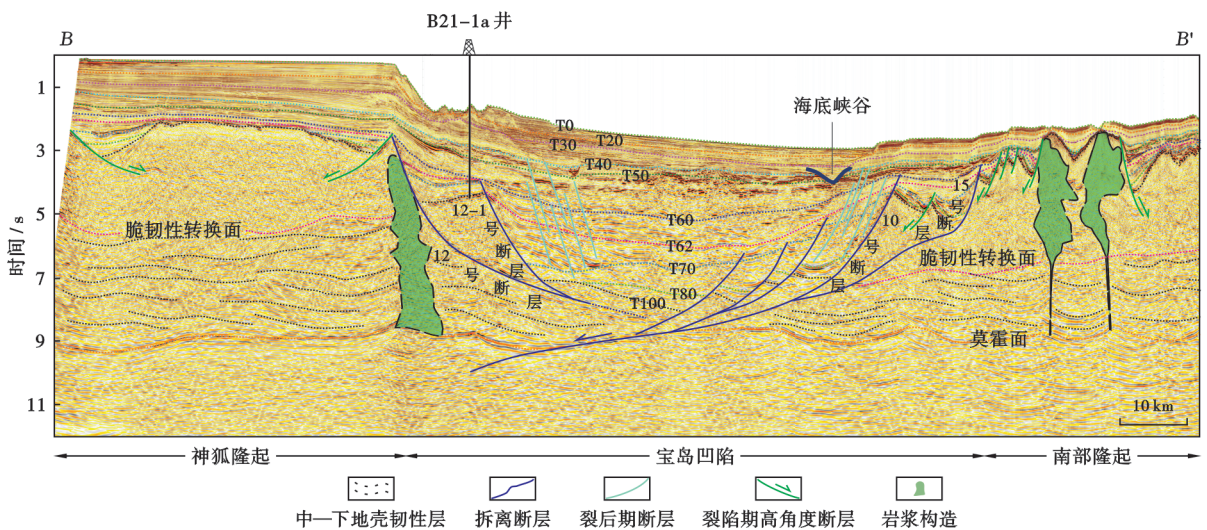


图 6 过宝岛凹陷典型结构构造剖面(剖面位置见图 1)  
Fig. 6 Structural architecture map of Baodao sag in Qiongdongnan Basin

相轴。脆-韧性转换面是下地壳的顶界面,其上部的上地壳主要发育脆性断裂。地震界面 T100 为新生代岩石圈地壳底界,具有振幅差异性较大、连续性较好的特点。莫霍面与 T100 界面之间的地壳厚度在宝岛凹陷及其周缘变化较大,在凹陷中心最薄,厚度约为 3.2 km,在周边隆起区厚度较大,约为 23 km,揭示宝岛凹陷处于岩石圈地壳极限减薄区域,其基底属性与其两侧隆起区具有显著差异。地震界面 T100 和 T0 之间为新生代沉积地层,其内部进一步识别出 T60、T80 等地震界面,其中,T62 界面表现为振幅较强、连续性好,且具有显著下削上超的不整合特征。

宝岛凹陷平面上呈 NE 向展布,内部的 F2、F12、F18、F19、F15 等高角度断裂控制了盆地边缘发育广泛分布的早期断陷盆地,控制了始新统与早渐新统崖城组的沉积(图 5、图 6)。渐新世,凹陷内部开始发育 NEE 向和近 EW 向大型拆离断裂(F10、F2-1、F12-1 断裂),这些断裂基本终止于 T62 界面,表明岩石圈地

壳厚度基本定型,发育“宽、深”的大型拆离盆地,形成了宝岛凹陷的复式地堑结构。从周缘隆起区到宝岛凹陷岩石圈地壳极限减薄区,断层逐渐趋于年轻,岩石圈地壳下部发育深部地幔热隆<sup>[21-23]</sup>,使地壳厚度向凹陷区极限减薄(图 7)。凹陷区莫霍面上隆较南、北两侧的隆升幅度高,造成宝岛凹陷热流值明显增大<sup>[24]</sup>。受 F2/F2-1、F12/F12-1、F18/F18-1 等断裂控制,宝岛凹陷北部自西向东依次发育宝岛 19、宝岛 21、宝岛 29 同向右阶斜列式转换断阶带(图 5)。宝岛 21-1 构造位于 F12 断裂和 F12-1 断裂夹持形成的宝岛 21 断阶带之上,主控断裂 F12-1 向地壳深部延伸,但未切穿地壳和莫霍面(图 6)。转换断阶带紧邻隆起物源区,其主干断裂差异活动控制块体旋转翘倾,进而控制了有机质的输入与富集。转换断阶带陆缘斜坡区控制形成了大型三角洲储集体,发育大型鼻状构造背景下的复合型圈闭。转换断阶带的多级断裂的差异活动控制油气运移及汇聚,具备优势烃源-运聚与圈闭形成条件,是深层油气突破的方向<sup>[16]</sup>。

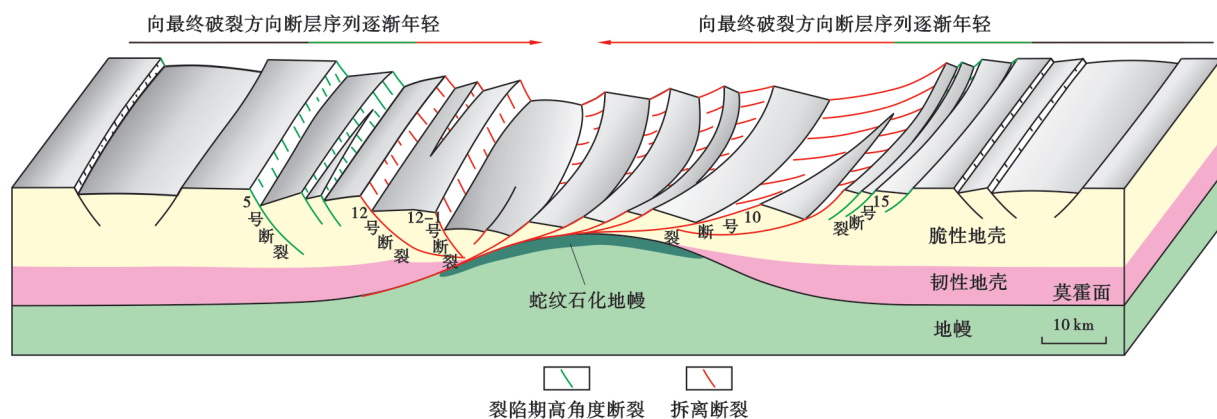


图 7 宝岛凹陷及周缘断裂特征及琼东南盆地结构构造

Fig. 7 Faults characteristics in Baodao sag and its periphery and the structural architecture of Qiongdongnan Basin

### 3.2 宝岛 21-1 气田油气源对比及烃源岩生烃机理

宝岛 21-1 气田位于宝岛凹陷北坡受 F12 断裂和 F12-1 断裂控制形成的转换断阶带之上。F12 断裂、F12-1 断裂为高角度正断层,在崖城组沉积期断层古落差大(>1000 m),使隆起区的陆源有机质迅速搬运至凹陷区,减少了搬运过程中有机质的氧化改造。崖二段、崖城组一段(崖一段)海侵期,主控断裂形成的狭长、宽陡型转换带的水体较深,局部形成半封闭的水体环境[图 8(a)],利于陆源有机质的保存和海源有机质藻类的生长繁盛;陵三段主要发育三角洲砂岩储层。陵三段沉积后,陆源碎屑物质向凹陷中心推进并沉积,形成以陆源有机质为主的烃源岩。B21-1a 井有机质丰度和干酪根碳同位素分布指示该地区沉积有机质具有“双源”富集特征,在纵向上表现出明显的分段性[图 8(b)];崖三段烃源岩干酪根  $\delta^{13}\text{C}$  值较小,有机质母源以陆源高等植物

为主;崖二段、陵二段—三亚组二段烃源岩具有相对较高的总有机碳(TOC)含量、干酪根  $\delta^{13}\text{C}$  值,这主要是由于崖二段—崖一段底部富集陆源有机质和半封闭水体中的海相藻类,其中,陵二段—三亚组二段前三角洲亚相—浅海相泥岩富含陆源有机质,向上 TOC 含量逐渐增大,干酪根  $\delta^{13}\text{C}$  值减小,指示其沉积于氧化水体环境。

色谱—质谱图揭示 B21-1a 井烃源岩有机质具有海、陆两类来源,崖一段顶部(深度为 4551 m)泥岩壁心抽提物正构烷烃为中峰型,Pr/Ph 比为 2.22,奥利烷(OI)、蒲公英烷和双杜松烷(T 化合物)含量相对较高,Ol/C<sub>30</sub>H 比值为 1.39, T/C<sub>30</sub>H 比值为 0.98,三环萜烷和伽马蜡烷含量较低,表明其有机质母源为氧化条件下的陆源输入有机质[图 9(a)]。崖二段底部(深度为 4982 m)泥岩抽提物正构烷烃为单前峰型,Pr/Ph 比为 1.2,奥利烷和 T 化合物含量极低,伽马蜡烷和三环萜烷丰度较

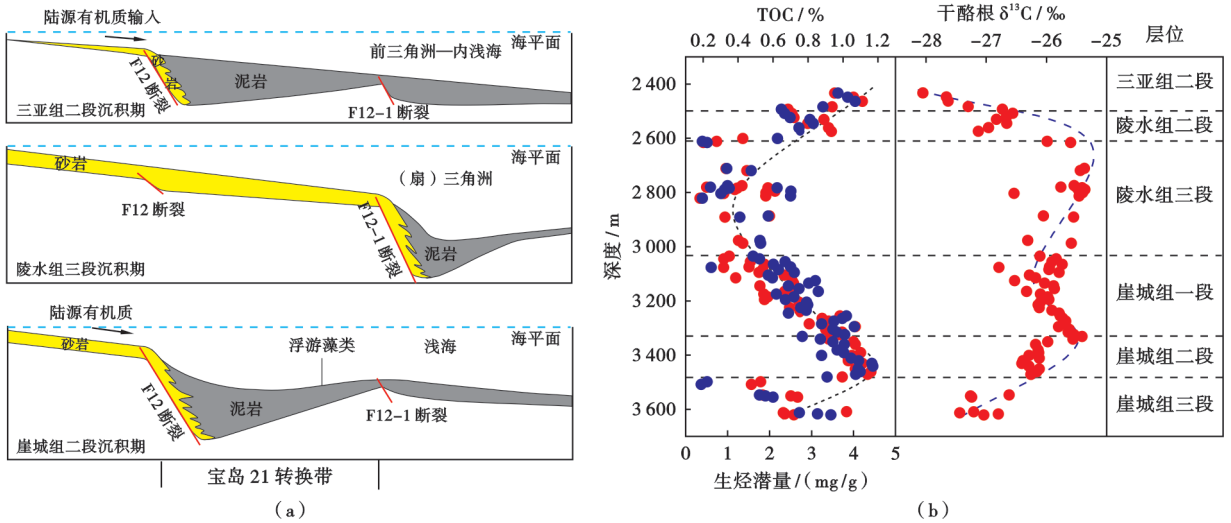


图8 宝岛21-1转换断阶带沉积充填模式与B21-1a井烃源岩TOC含量、干酪根 $\delta^{13}C$ 值分布

Fig. 8 Sedimentary filling model of Baodao 21-1 transfer fault-step zone and the distribution of TOC contents and  $\delta^{13}C$  of kerogen of the source rocks of Well B21-1a

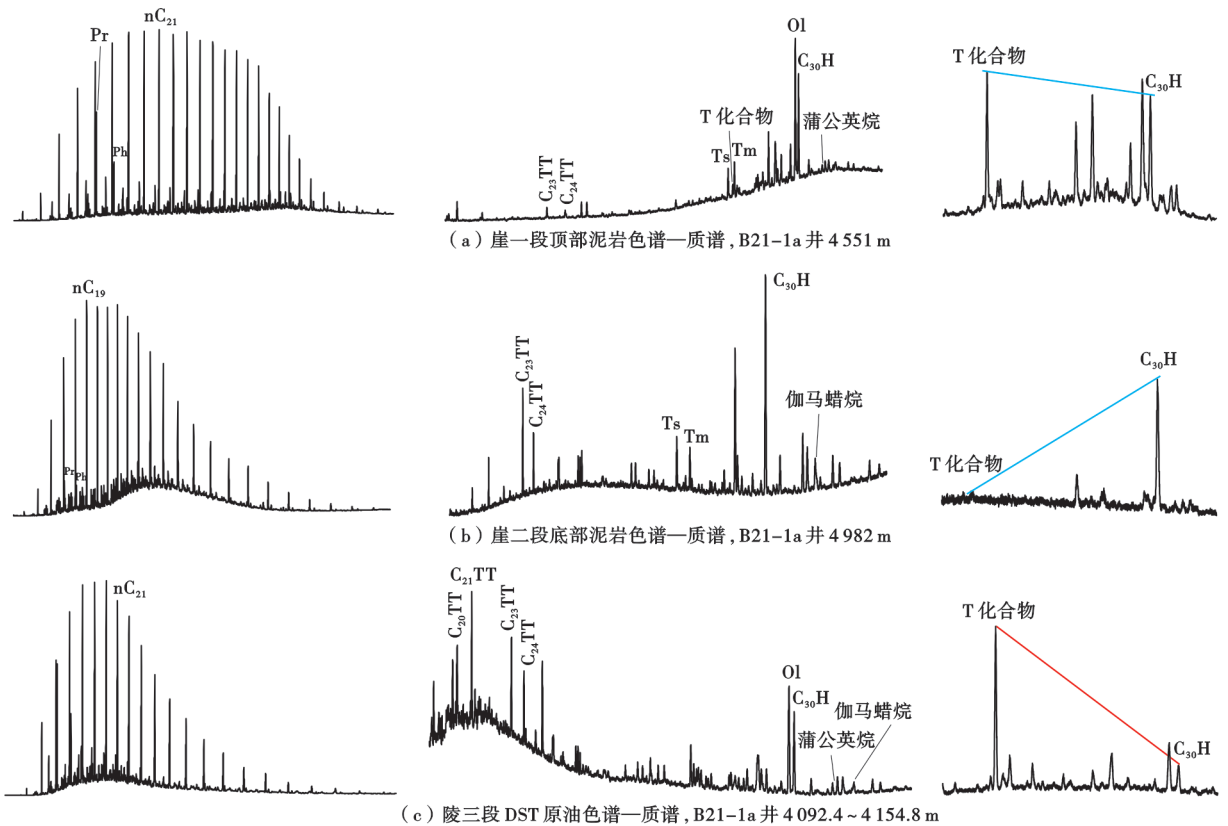


图9 B21-1a井烃源岩和原油生物标志物对比

Fig. 9 Comparison of biomarkers between source rock and crude oil of Well B21-1a

高,伽马蜡烷/ $C_{30}H$  比值为 0.24,三环萜烷/ $C_{30}H$  比值为 1.31,表明其有机质母源为相对弱还原—还原的半封闭水体环境的藻类[图 9(b)]。陵三段 DST 测试段凝析油具有高  $Ol/C_{30}H$  比值、中等 T 化合物含量和低 Pr/Ph 比值,表明其主要来自崖城组陆源海相烃源岩;色谱—质谱图显示其正构烷烃为单峰型,三环萜烷和伽马蜡烷含量相对较高,奥利烷、蒲公英烷和 T

化合物等陆源有机质含量也较高,也指示陆源有机质的贡献[图 9(c)]。相比较于陵水 25 气田,宝岛 21-1 气田天然气具有更低的  $Ol/C_{30}H$  比值、Pr/Ph 比值和 T 化合物含量,凝析油具有高甲基环己烷含量和较高的正庚烷、二甲苯环戊烷含量(图 10),指示海相藻类等腐泥型有机质在天然气生成过程中也具有贡献。



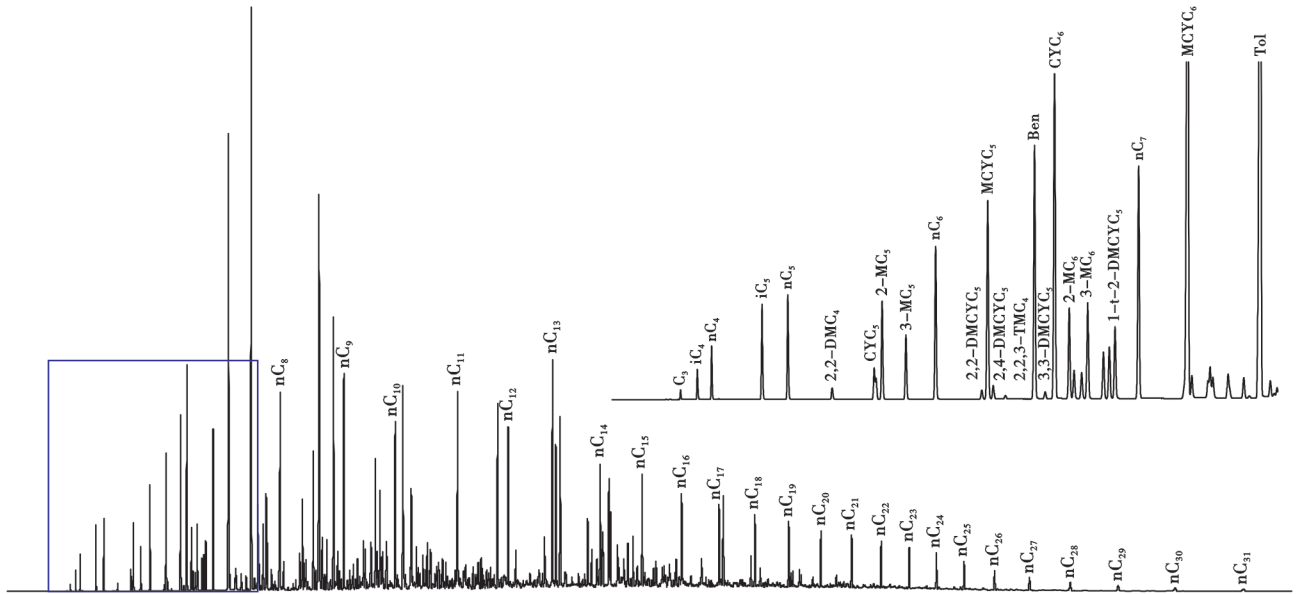


图 10 宝岛 21-1 气田 B21-1a 井陵三段凝析油轻烃气相色谱

Fig. 10 Gas chromatograph of the condensate of Member 3 of Lingshui Formation of Well 21-1a of Baodao 21-1 gas field

大型拆离与深部地幔热隆作用使琼东南盆地地壳强烈薄化,导致盆地热作用趋于活跃,盆地平均热流值为 $(71.1 \pm 13.0) \text{ mW/m}^2$ <sup>[25]</sup>。T62 界面(陵二段底界面)埋深最大位置对应地壳最薄的部位,宝岛 21 转换断阶带及其周边烃源岩位于地壳最薄的区域内(图 11),超薄地壳增热效应加速了烃源岩热演化。烃源岩微量元素与  $R_o$  等参数的演化特征证实了研究区存在异常高热现象: B20 井在崖一段出现热异常,  $R_o$  由 0.84% 突变到最大值 1.05%; 宝岛区钻井地层的 Ba、Cu、Zn、Co、Ni、V 等过渡金属微量元素明显富集,指示有机质生产率的 Ba/Cr 比值也呈现出异常高值(图 12),记录了研究区高热背景下的热演化机制<sup>[26-27]</sup>。

在气源对比与生烃机理分析的基础上,进一步预

测了下渐新统崖城组烃源岩的品质及生烃潜力。宝岛凹陷转换断阶带及其周围崖城组烃源岩的生气强度大于  $20 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ,资源潜力大,约占凹陷总资源量的 2/3。其中,宝岛 21 转换断阶带紧邻宝岛凹陷北部生烃主洼,宝岛 27 洼、宝岛 25 洼、宝岛 21 洼三洼供烃,烃源条件优越,具备形成大型气田的物质基础。

### 3.3 宝岛 21 转换斜坡发育大型鼻状构造背景下的复合型圈闭

宝岛凹陷北部转换断阶带主要发育张性或张扭性断裂,NE 向主控断裂控制着块体旋转翘倾和差异升降,局部形成压扭特征,发育多个鼻状构造。同时,来自海南隆起、神狐隆起两大物源区的陆源物质沿转换斜坡注入,形成多期、多支三角洲朵叶体控制下的大型复合型圈闭。

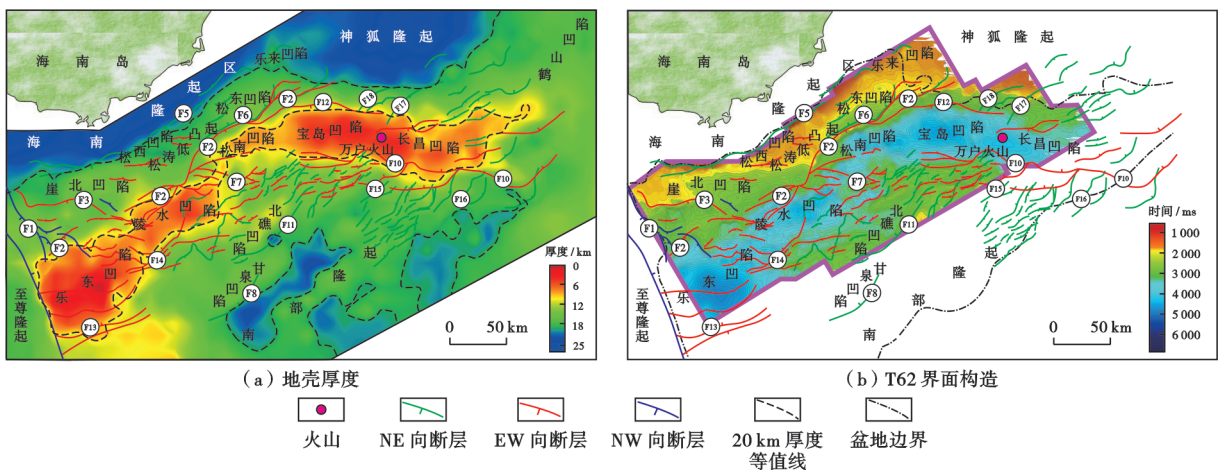


图 11 琼东南盆地地壳厚度与 T62 界面构造

Fig. 11 Crustal thickness and T62 interface structure of Qiongdongnan Basin

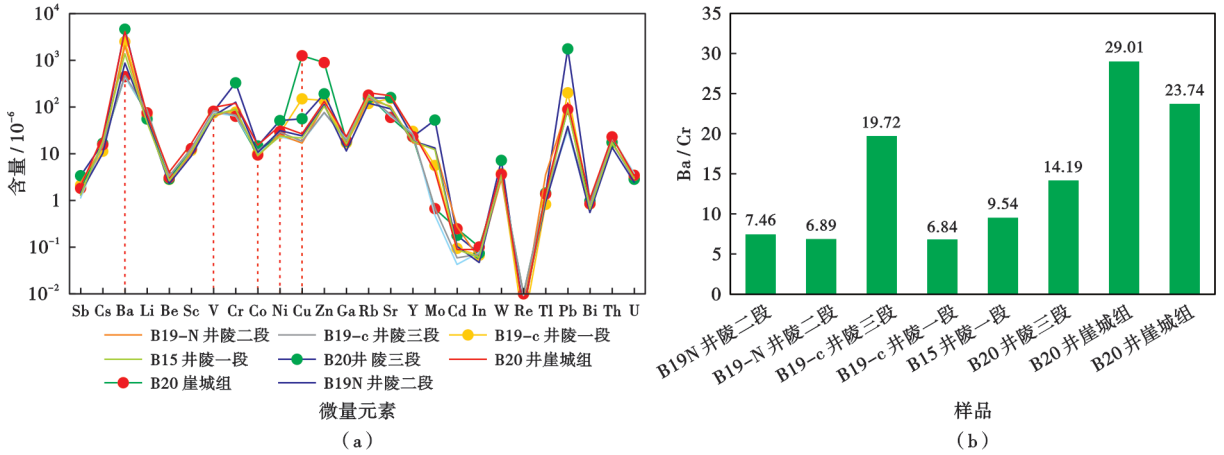


图 12 宝岛凹陷钻井微量元素特征

Fig. 12 Characteristics of the trace elements of the drilled wells in Baodao sag

主控断裂 F12 强烈活动控制着宝岛 21 转换断阶地层的旋转翘倾, 伴随 F12-1 断裂斜向伸展产生局部挤压, 形成了大型鼻状构造背景。受 F12 断裂控制, 断陷早期(崖三段沉积期), 神狐隆起物源沿 F12 断裂北侧断槽注入宝岛 21 转换断阶, 形成扇三角洲沉积; 断陷晚期, 崖一段、崖二段仅在近源区见砂岩沉积; 断-

拗转换早期(陵三段沉积期), 海平面相对较低, 北侧 F12 断裂的中-西段、东段转换斜坡为西北侧、东侧物源的主注入口, 形成多期、多支大型辫状河三角洲向盆推进较远、分布面积大。陵三段纵向上可进一步划分为低位、海侵-高位两期, 横向上识别出西支、东支多个朵叶体[图 13(a)、图 13(b)]。低位期, 西支朵叶体

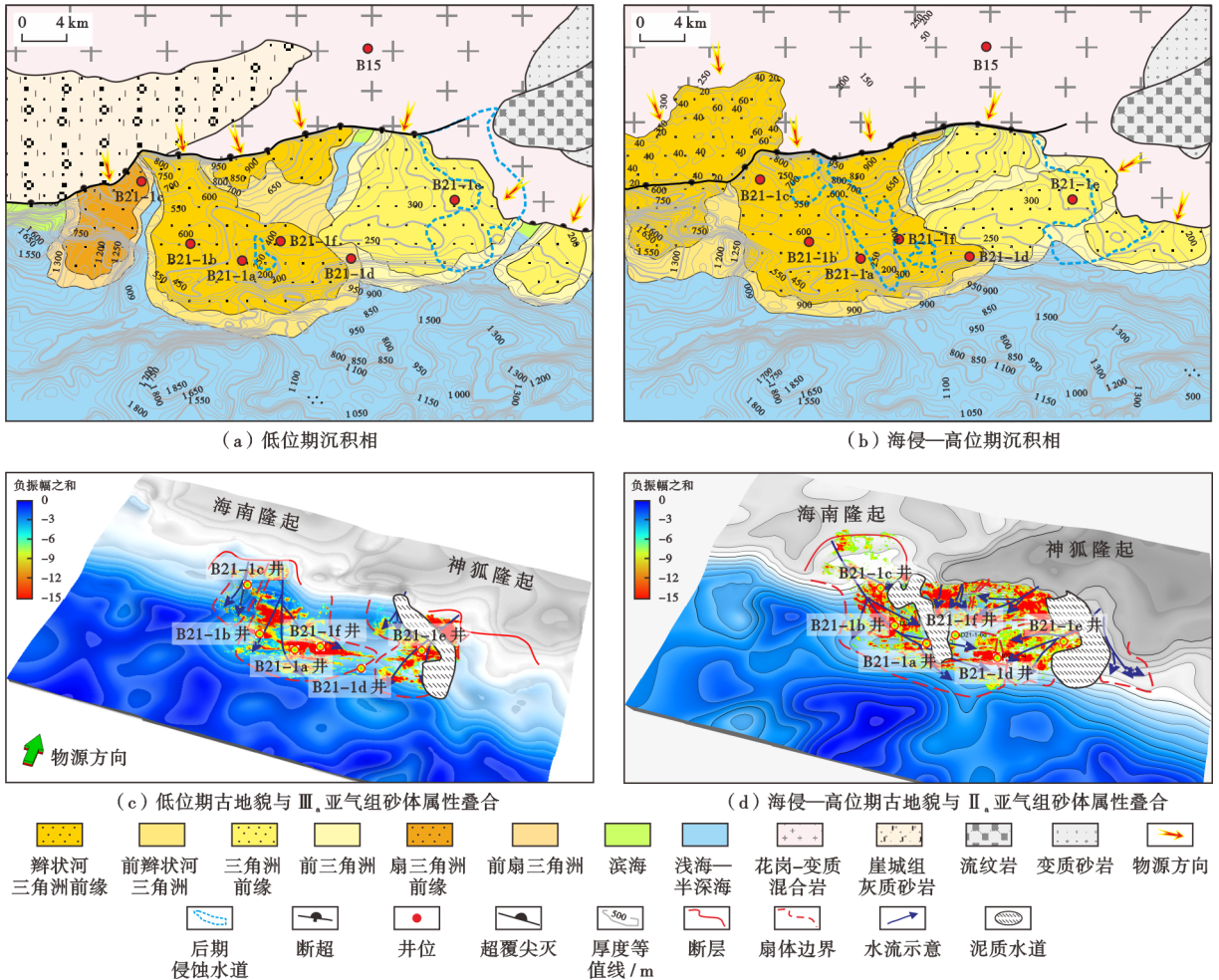


图 13 宝岛 21-1 构造陵水组三段沉积相与古地貌叠合砂体属性

Fig. 13 Sedimentary facies of Member 3 of Lingshui Formation and ancient landform superposed sandstone in Baodao 21-1 structure

西侧的 B21-3d 井区受 F12 断裂活动控制明显,发育崖城组剥蚀供源形成的扇三角洲沉积,Ⅲ气组储层分选性差、灰质含量高、储集物性差;西支朵叶体东侧的 B21-1a、B21-1b、B21-1f 井区发育大型辫状河三角洲沉积向盆推进,3 个朵叶体被局部微古高地分隔,储集岩性以块状中一细砂岩为主,局部含砾,远离物源区砂岩分选性变好、物性较好;东支朵叶体为三角洲沉积[图 13(a)、图 13(b)]。海侵一高位期,西支朵叶体发育大型辫状河三角洲沉积,东支朵叶体发育三角洲沉积[图 13(c)、图 13(d)],其中,高位期Ⅱ<sub>a</sub> 亚气组储集岩性以厚层中一细砂岩为主,局部含砾,单层砂岩厚度较大,最大达 30m,高位晚期Ⅰ气组储集岩性粒度较细,以粉砂岩为主。

三亚组沉积期,F12 断裂活动较强,研究区发育厚层泥岩,构成区域性盖层,断裂活动最强的局部区域,对下伏陵三段下切侵蚀作用强,泥岩充填侵蚀水道起侧封作用,与多个朵叶体共同形成大型鼻状构造背景下的岩性圈闭。其中,低位期Ⅲ<sub>a</sub> 亚气组发育多个朵叶体控制下的多个岩性圈闭[图 13(c)],钻探揭示 B21-1a 井、B21-1b 井、B21-1f 井具有不同气水界面(图 2),证实Ⅲ<sub>a</sub> 亚气组分布于不同的岩性圈闭;高位期Ⅱ<sub>a</sub> 亚气组发育西支被晚期泥质侵蚀水道侧封形成的岩性圈闭[图 13(d)],B21-1a 井、B21-1b、B21-1g 井区具有统一的气水界面(图 2),指示其Ⅱ<sub>a</sub> 亚气组分布于同一岩性圈闭。

### 3.4 宝岛 21-1 转换断阶带主控断裂平行组合及差异活动控制油气运聚

宝岛 21 转换断阶带主控断裂 F12 强烈活动导致宝岛 21-1 构造的地层旋转翘倾形成大型鼻状构造脊,

紧邻宝岛 27、宝岛 25、宝岛 21 三洼供烃[图 14(a)],源-脊配置良好,汇聚条件优越<sup>[16-17]</sup>。主控断裂 F12 和 F12-1 长期活动,陵水组沉积期其活动速率分别为 100 m/Ma、375 m/Ma,三亚组沉积期其活动速率分别为 160 m/Ma、120 m/Ma,构成研究区的主要断裂输导体系[图 14(b)]。陵水组三段发育分布面积广、厚度大的三角洲砂岩,可作为油气侧向输导的良好通道<sup>[16]</sup>。

宝岛 21 转换断阶带主控断裂 F12、F12-1 倾向呈 SSE 向或南向,断阶带中段表现为凸面,东、西两侧为凹面,剖面呈近平行铲式特征,向下深切至基底,未延伸至莫霍面(图 14),这是宝岛 21-1 气田天然气组分以烃类气为主、CO<sub>2</sub> 含量总体较低的主要原因。断裂 F12 和 F12-1 均表现为中段活动强度大,向两端减弱,相较而言,近主洼的断裂 F12-1 活动强度整体弱于断裂 F12,整体终止于 T40 界面(梅山组顶面)附近,在莺歌海组沉积期至今基本停止活动;断裂 F12 的东、西两侧局部稍有活动,向上终止层位变化较大,整体终止于陵水组顶面上部,局部延伸较浅,在莺歌海组沉积期有活动。崖城组成熟烃源岩生成的天然气部分沿断裂 F12-1 向宝岛 21-1 西块主体区运移,另一部分向宝岛 21-1 构造东部运移。由于断裂 F12-1 在莺歌海组沉积期基本不活动,受其影响的区域内天然气中 CO<sub>2</sub> 含量相对较低,B21-1a 井、B21-1e 井揭示天然气中 CO<sub>2</sub> 含量小于 30%。崖城组烃源岩排出的天然气部分沿断裂 F12 向宝岛 21 西块北侧运移,另一部分向北侧凸起区运移。由于断裂 F12 在莺歌海组沉积期活动,其影响范围内天然气运聚时间与晚期 CO<sub>2</sub> 充注时间(5.5 Ma 以来<sup>[16]</sup>)相近。因此,天然气中 CO<sub>2</sub> 含量总体较高,凸起区 B15 井揭示 CO<sub>2</sub> 含量高达 97%,宝岛 21-1 西块北侧的 B21-1c

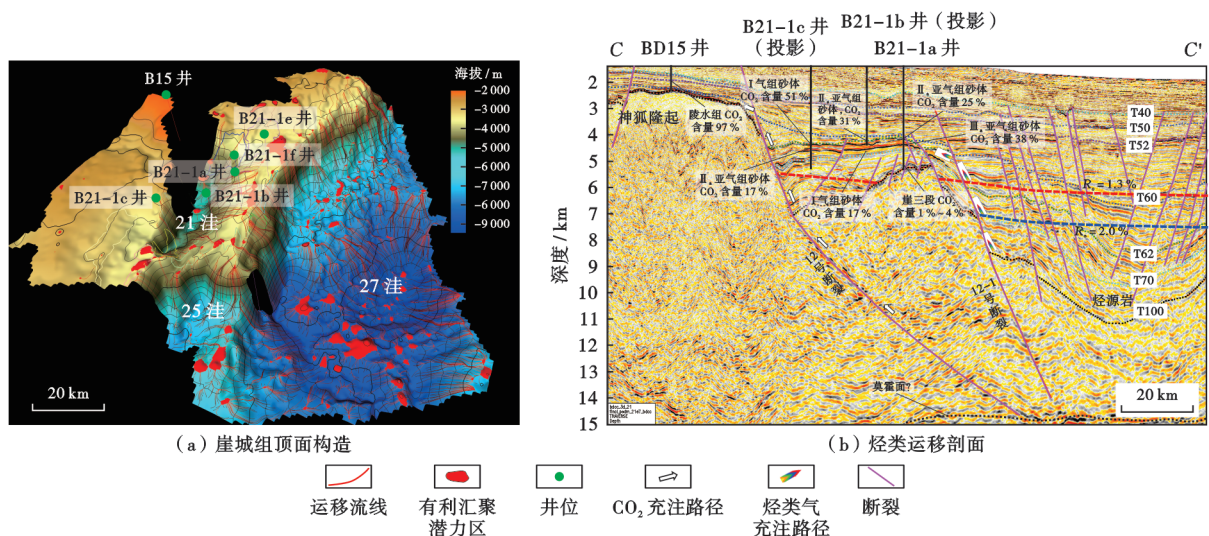


图 14 宝岛 21-1 关键时刻崖城组顶面构造与过宝岛 21 构造典型运移地震剖面(剖面位置见图 1)

Fig. 14 Interface structure of Yacheng Formation at key moment of petroleum accumulation in Baodao 21-1 structure and typical seismic profile of Baodao 21 structure

井揭示 CO<sub>2</sub> 含量为 50.5% [图 13(b)]。研究区相邻的宝岛 19 转换断阶带的主控断裂 F2 下切至莫霍面, 与深部地幔沟通, 断裂 F21-1 与 F2 呈“Y”型组合, 且低位控运移断裂 F2-1 的活动时间晚, 幔源 CO<sub>2</sub> 充注阻碍了晚期天然气的注入, 形成了高 CO<sub>2</sub> 含量的气藏<sup>[16]</sup>。

### 3.5 宝岛 21-1 气田盖层及保存条件

宝岛 21-1 气田发育三亚组区域性盖层和陵二段局部性盖层, 盖层厚度大、天然气保存条件好。其中, 陵二段沉积期研究区整体为海侵背景, 沉积大套泥岩夹薄层砂岩, 晚期被三亚组侵蚀, 钻井揭示陵二段厚度变化在 40~200 m。宝岛 21-1 构造区三亚组厚度较大, 为 800~2000 m [图 15(a)], 平面上, 构造区西侧和中部的厚度大于 1000 m, 明显大于东侧。三亚组沉积期, 宝岛 21-1 构造处于沉积陆坡区, 受局部沉积和断裂坡折的影响, 主要发育深水侵蚀块体流沉积, 以大套

泥岩为主, 偶见薄层砂岩, 盖层厚度大、泥地比高。由于沉积速度快, 宝岛 21-1 构造区三亚组盖层泥岩来不及脱水, 具有一定欠压实特征, 发育超压环境, 压力系数在 1.0~1.3 [图 15(b)], 中部和西侧的压力系数均大于 1.1, 表现出超压封盖特点。整体上, 宝岛 21-1 构造区天然气保存条件优越, 且构造区中部和西侧的盖层条件优于东侧。

### 3.6 宝岛 21-1 气田成藏期及成藏模式

宝岛 21-1 气田陵水组、崖城组储层识别出黄色、蓝绿色、蓝白色包裹体 [图 3(f)—图 3(h)], 指示多期油气充注。陵水组储层识别出 3 类包裹体: 均一温度为 60~110 °C 的原油包裹体、均一温度为 120~150 °C 的烃类气伴生包裹体 (主峰) 和均一温度为 150~170 °C 的 CO<sub>2</sub> 伴生包裹体 [图 16(a)]。崖城组储层包裹体均一温度集中分布在 140~170 °C (主峰) 和 80~90 °C [图 16(b)]。结合埋藏

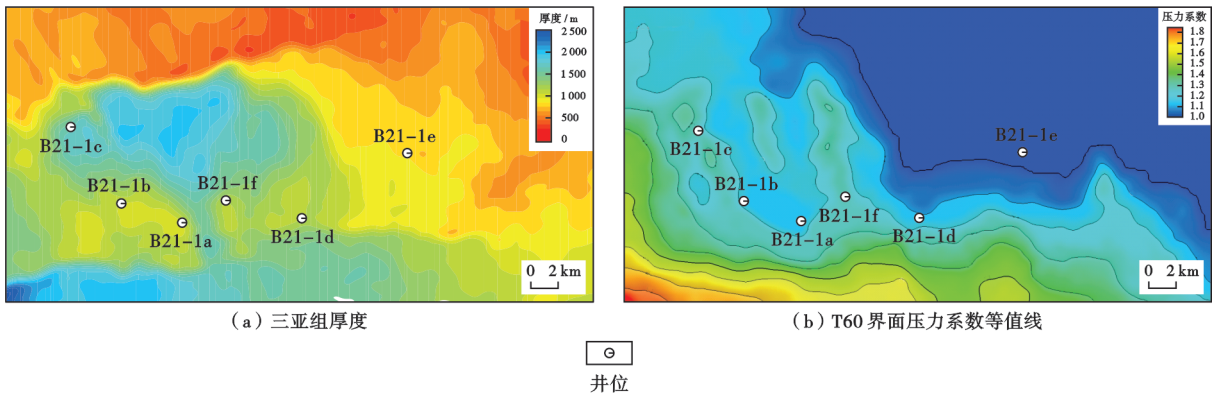


图 15 宝岛 21-1 构造及周缘三亚组厚度及 T60 面压力系数平面分布

Fig. 15 Plan distribution of the thickness of Sanya Formation and the surface pressure of T60 surface of Baodao 21-1 structure and surrounding areas

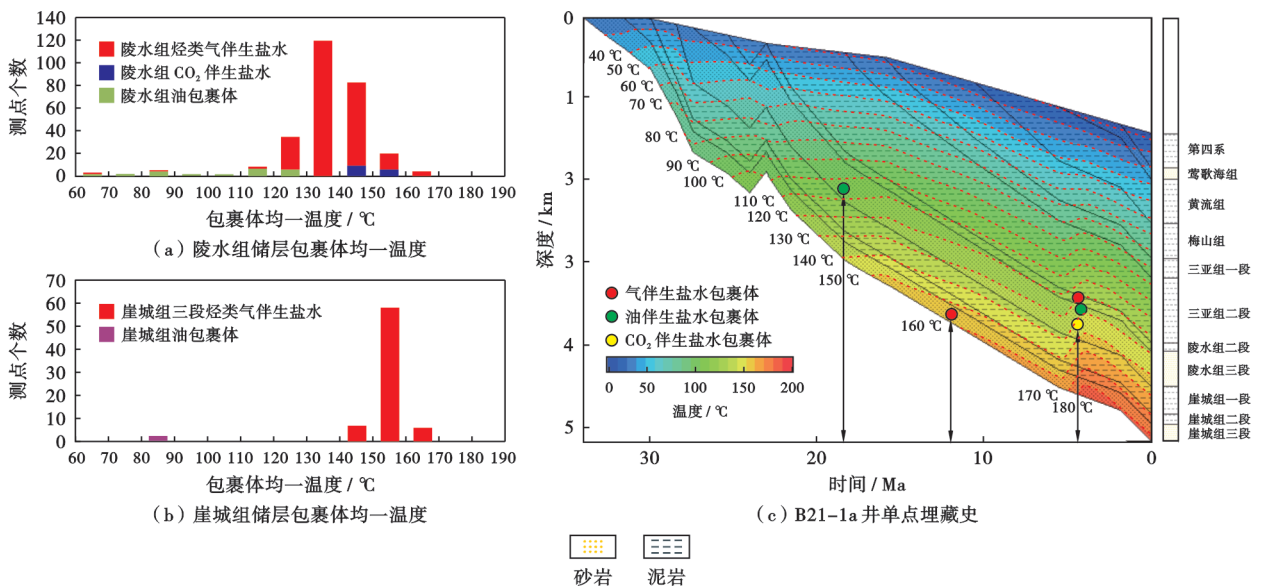


图 16 宝岛 21-1 气田单点埋藏史与流体包裹体均一温度分布

Fig. 16 Burial history and homogenization temperature distribution of fluid inclusion of Baodao 21-1 gas field

史和热演化史分析[图 16(c)],认为陵三段储层存在 3 期烃类充注:早期(20.0~7.8 Ma)混合油气充注、中期(7.8 Ma 以来)高成熟烃类充注和晚期(5.5 Ma 以来)高成熟天然气伴生幔源 CO<sub>2</sub> 充注。崖城组储层存在 2 期烃类充注:22~21 Ma 油充注和 11~3 Ma 油气充注,证实宝岛 21 转换断阶带烃源-运聚条件优越。

宝岛 21-1 构造三洼供烃,有机质来源包括陆源有机质和局部封闭水体环境下的海相藻类,而地壳强烈薄化导致的高热流值背景加速了烃源岩热演化成熟,烃源岩生气强度大,具备形成大型气田的物质基础。海南隆起、神狐隆起物源沿转换斜坡注入宝岛 21-1 构造,在大型构造脊背景下发育受大型三角洲朵叶体控制的构造+岩性圈闭,三亚组厚层泥岩封盖,具备形成大型气田的圈闭条件。大型构造脊背景、主控

断裂(F12、F12-1)平行组合及差异活动,与陵三段大型三角洲砂岩构成“垂向+侧向”高效输导系统,使宝岛 21-1 构造具备形成大型气田的输导条件(图 17)。宝岛 21-1 大型气田的发现,证实了宝岛北部转换断阶带发育“半封闭环境富集/高热加速生烃控源—转换斜坡控圈—长期活动断裂控运—晚期多期强充注—弱活动断裂控聚”的天然气成藏富集模式,是天然气的优势运聚区。与宝岛 21 断阶带相比,东部的宝岛 29 转换断阶带发育相似的成藏组合,其受宝岛 27 洼、宝岛 28 洼双洼供烃,源内构造脊利于油气汇聚,发育神狐隆起供源的大型三角洲砂体,顺向和反向断裂控制形成了顺向/反向断块-断鼻圈闭群,且主控断裂组合及活动性与宝岛 21 断阶带相似,是烃类气的有利汇聚区,是琼东南盆地下一步的重点勘探领域。

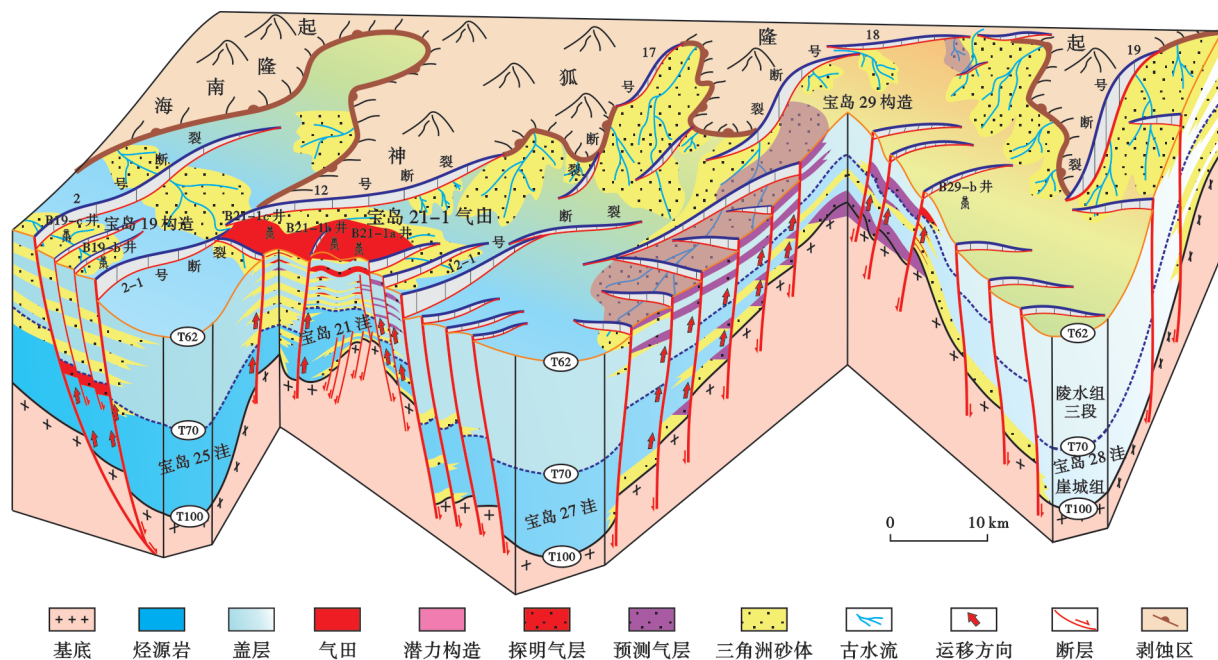


图 17 宝岛 21-1 构造及围区成藏模式

Fig. 17 Hydrocarbon accumulation model of Baodao 21-1 structure and the surrounding area

## 4 主要勘探技术

### 4.1 深水陡陆坡崎岖海底区深层油气地球物理探测关键技术

宝岛 21-1 构造位于宝岛北坡深水崎岖海底区,深层地震波场复杂、普遍绕射多次,地震信息失真严重制约了构造落实与含气性评价;同时,井位密度低、地层横向变化快、地震耦合严重等难题,导致中—浅层成熟的储层预测与烃类检测技术在深水深层领域应用时的多解性增强,需开展针对性的储层预测及含气性检测技术攻关。

针对崎岖海底区多次波运动学特征极其复杂,不符合周期、双曲、抛物线等常规假设的特点,基于字典学习

的自编码绕射多次波压制方法,建立崎岖海底绕射多次波压制技术,达到了崎岖海底区保幅压制复杂多次波目的。通过属性地质距离理论建立速度与属性关系,基于深度学习实现多属性约束精细刻画速度空间变化,建立了崎岖海底区速度反演技术,改善了成像质量,实现宝岛 21-1 构造深度误差由早期 90 m 缩小到 10 m 以内。建立了基于空间动态评价与多维度地震解耦的含气性检测技术,实现了地层主控因素下振幅定性、实际地震与理论调谐的半定量匹配及盖层因素自适应解耦[图 18(a)],提取了地层真实信息,在宝岛 21-1 构造复杂气水关系下,含气性预测成功率达 92%,主力气组Ⅲ、Ⅳ气组的含气性预测成功率高达 100%[图 18(b)]。

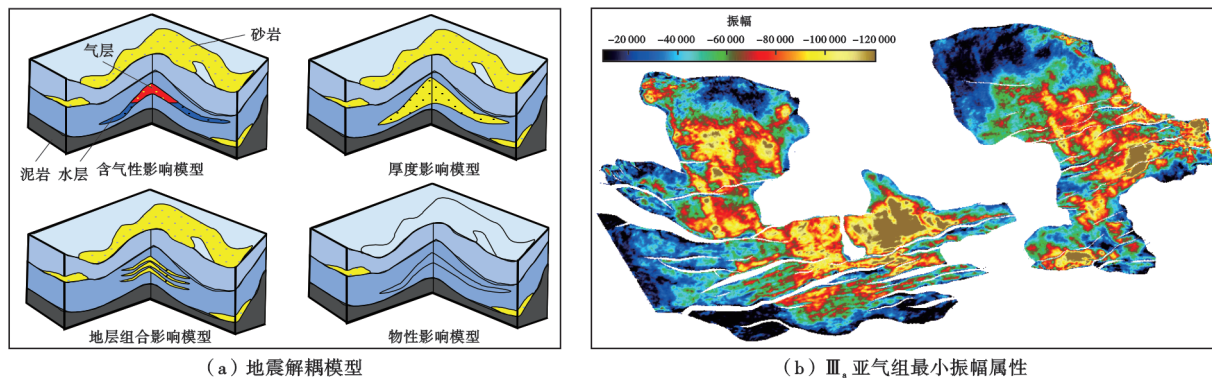


图 18 宝岛 21-1 构造地震解耦模型与Ⅲ<sub>3</sub>亚气组原始属性

Fig. 18 Seismic decoupling model and original seismic attribute of the III<sub>3</sub> gas subgroup of Baodao 21-1 structure

## 4.2 深水深层复杂流体流动安全保障与产能释放关键技术

宝岛 21-1 构造区水深超过 1500 m, 勘探目的层埋深大于 3500 m, 深水深层储层渗透性差、易被污染, 常规粗放型射孔无法明确是否穿透污染带或造成二次损伤。同时, 管柱内流体流动表现为多组分、多相变的复杂流动, 受井筒内多变的温压场、CO<sub>2</sub> 含量、固相产出等因素影响, 极易生成水合物堵塞, 无法准确求取产能, 需创新射孔评价手段, 释放地层真实产能。

建立了基于井筒多相流动理论的深水深层安全控流测试技术, 通过 36 组物理模拟实验, 形成了一套完整的复杂流体组分下的水合物相平衡预测模型, 耦合井筒多相流动、水合物生成动力学、沉积动力学等理论, 实现了复杂流体水合物沉积堵塞动态定量评价, 保障产能测试全周期管柱流动安全风险控制。建立了基于多尺度射孔效能评价的深水深层射孔关键技术, 首创大尺寸、高温压(200 °C、100 MPa)射孔物模装置, 基于 60 组射孔大型模拟实验, 建立多维度系统评价射孔损伤方法, 模拟了真实气藏射孔孔道的流动效率, 以指导制定深水深层井最佳射孔方案, 最大限度解除储层污染、保障地层产能释放, 实现深水深层产能的有效释放与获取。

## 5 勘探启示意义与勘探潜力

宝岛 21-1 大型气田的发现, 证实了强活动型被动陆缘盆地油气成藏富集模式, 提出相对稳定的走向斜坡型转换带形成的相对封闭环境有利于烃源岩的形成与富集, 具备发育大—中型气田的条件, 是大—中型气田富集的“黄金带”, 研究认识对于琼东南盆地乃至南海北部及中—南部盆地的天然气勘探具有重要启示意义。

**5.1 强活动型被动陆缘盆地可以找到大气田, 突破了强活动被动陆缘盆地难以找到大气田的传统认识**  
传统地质认识认为强活动型被动陆缘盆地断裂活

动强、岩浆活动强烈、地温梯度超高、成岩作用强, 这些地质特征均不利于天然气成藏, 难以找到大气田。宝岛 21-1 大气田的成功勘探表明, 多幕伸展、多盆地叠合和长期活动的强活动型被动陆缘盆地中, 相对稳定的转换断阶带集中分布于盆地边缘, 仍具备形成大型气田的构造条件, 其控制了有利烃源岩、储集体和大型圈闭的分布及天然气优势运聚方向, 是强活动型被动陆缘盆地天然气勘探的突破方向。

## 5.2 相对稳定的走向斜坡型转换带是强活动型被动陆缘盆地大—中型油气田富集的“黄金带”

相对稳定的走向斜坡型转换带利于陆源碎屑物质沿其长距离搬运, 易形成烃源岩富集与大型储集体广泛分布, 发育大构造背景下的复合型圈闭, 具有“转换斜坡控圈—长期活动断裂控运—弱活动断裂控聚”的天然气成藏富集模式, 是天然气优势运聚区。琼东南盆地 NE 向主干断裂带活动形成了雁列式、多级断阶的走向斜坡型转换带, 这类斜坡型转换带形成了陵水组辫状三角洲沉积区, 构成了宝岛 21 构造带的主要储集层。此外, 裂后期中央坳陷与陆架区差异构造沉降, 控制主干断裂活动期与油气充注期相匹配, 晚期断裂缓慢活动, 构造环境相对稳定, 易于天然气的保存。钻探揭示宝岛 21-1 构造具有多期油气强充注的特点, 大型气田的发现证实了相对稳定的走向斜坡型转换带是强活动型被动陆缘盆地大—中型油气田富集的“黄金带”。

## 5.3 幕式活动的凹陷转换带可以形成半封闭的海湾有利于烃源岩的形成与发育

世界富油气深水盆地的优质烃源岩多形成于封闭的海湾环境, 如大西洋两岸盆地群。传统观点认为, 强活动型盆地缺乏有利于有机质保存的封闭海湾环境, 烃源岩品质较差, 难以形成规模性优质烃源岩。宝岛 21-1 大气田的发现, 证实幕式活动的凹陷转换带可以造成水体变深、形成局部封闭环境, 利于有机质的输入

和保存。因此,凹陷转换带既有利于陆源有机质搬运汇聚,也可发育相对还原的沉积条件,对烃源岩的形成与发育具有重要意义。琼东南盆地的沉积有机质主要来源于陆源高等植物,其在搬运过程中氧化降解不利于大规模、高丰度烃源岩的形成,但不同断层幕式活动的时空差异控制了断阶带的古地貌与可容纳空间,可形成断崖式的半封闭海湾,既提高了陆源有机质的富集保存,也提供了相对还原的水体条件,利于海相藻类有机质富集和有利烃源岩发育。

#### 5.4 琼东南盆地宝岛凹陷勘探潜力大

宝岛 21-1 大气田的发现,证实松南—宝岛凹陷北

部转换断阶带天然气成藏条件好,资源潜力大。下一步以宝岛 21-1 大气田为立足点,开展环宝岛凹陷立体勘探,主攻古近系陵水组—崖城组、兼探中新统,向东、向南、向西拓展(图 19),进一步落实天然气资源潜力。向东拓展宝岛 29 转换断阶带古近系和古潜山,并积极探索长昌凹陷的油气勘探新领域;向南拓展宝岛凹陷南坡东区永乐 10 区及其周缘古近系、古潜山和西区永乐 1/2 区中新统;向西评价宝岛 19 断阶带和松涛凸起中新统气藏,并探索古近系、古潜山新层系,力争下一个大—中型气田的勘探突破,实现环宝岛凹陷千亿立方米气田群的发现。

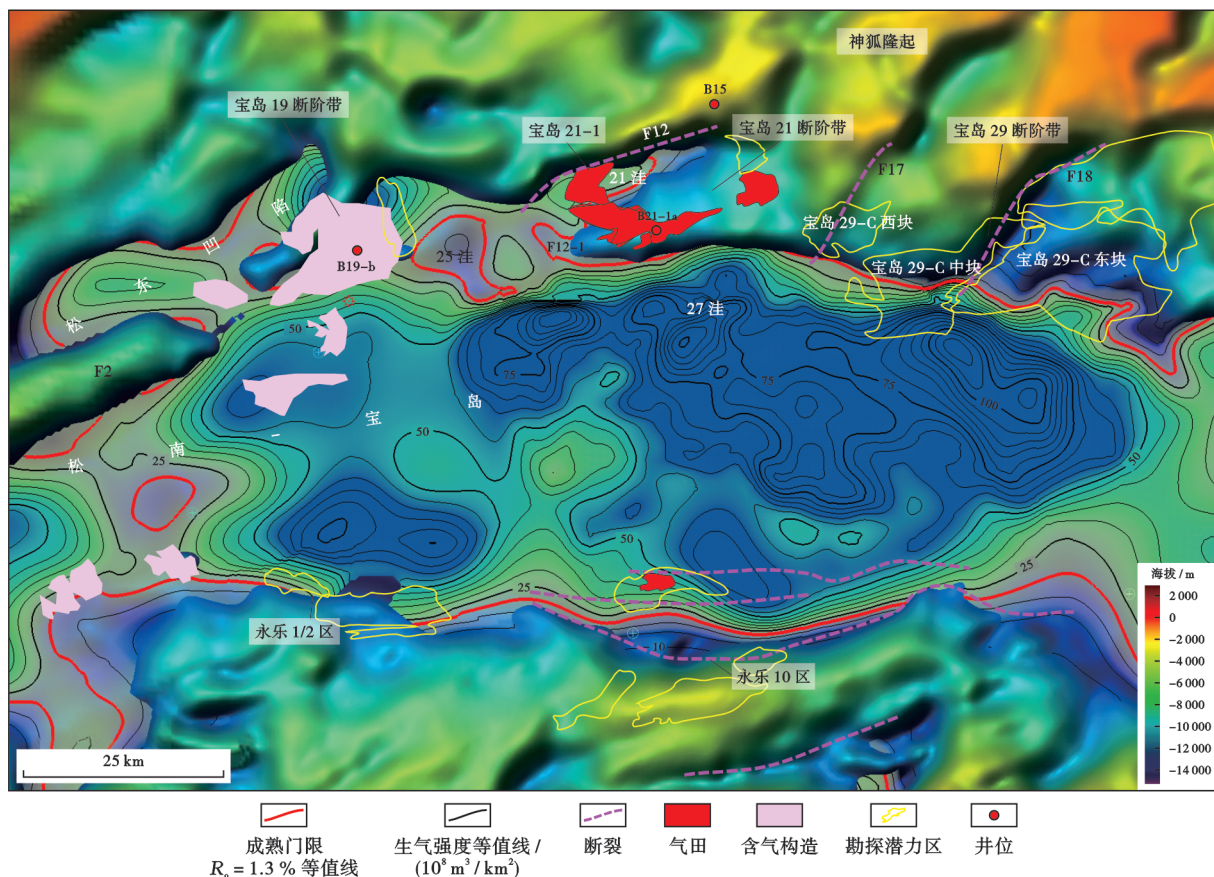


图 19 宝岛凹陷基底构造叠合生气强度与勘探潜力

Fig. 19 Superimposed gas generating intensity of the basement structure and the exploration potential of Baodao sag

## 6 结 论

(1) 宝岛 21-1 气田发育古近系陵二段、陵三段和崖三段 3 套成藏组合。其中,主力成藏层系陵三段发育大型辫状河三角洲沉积,储集岩性以含砾中—细砂岩为主,为中—低孔、中—低渗储层,天然气以烃类气为主, $\delta^{13}C_1$  为  $-45.1\% \sim -38.6\%$ ,  $R_o$  在  $1.5\% \sim 2.1\%$ , 为高成熟度的煤型气,具有凝析气藏特点。

(2) 宝岛 21-1 构造具有陆源和海相藻类“双源”有机质富集的特点,地壳强烈薄化导致的高热流值加

速烃源岩热演化成熟、生气强度大。隆起区物源沿转换斜坡注入宝岛 21-1 构造,受微地貌控制,在大型构造脊背景下形成大型三角洲朵叶体控制的构造+岩性圈闭,大型构造脊利于天然气汇聚,主控断层平行组合及差异活动与三角洲砂岩构成高效输导系统,具备形成大型气田的基础。

(3) 宝岛 21-1 气田存在早、中、晚 3 期油气充注,发育“转换断阶带半封闭环境富集/高热加速生烃控源—转换斜坡控圈—长期活动断裂控运—晚期多期强充注—弱活动断裂控聚”的天然气成藏富集模式。东

部的宝岛 29 转换断阶带与宝岛 21 断阶带具有相似的成藏特征,是烃类气的有利汇聚区。

(4) 建立深水陡陆坡崎岖海底区深层油气地球物理探测关键技术,实现深度误差由早期的 90 m 缩小到 10 m 以内,含气性预测成功率达 92%。创建深水深层复杂流体流动安全保障与产能释放关键技术,保障产能测试全周期管柱流动安全风险控制,制定最佳射孔方案,最大限度解除储层污染、保障地层产能释放。

(5) 宝岛 21-1 大型气田的发现,证实了强活动型被动陆缘盆地油气成藏富集模式,认为相对稳定的走向斜坡型转换带形成的相对封闭环境,有利于烃源岩的形成和发育,是大一中型气田富集的“黄金带”。

### 参 考 文 献

- [1] 徐长贵. 中国近海油气勘探新进展与勘探突破方向[J]. 中国海上油气,2022,34(1):9-16.  
XU Changgui. New progress and breakthrough directions of oil and gas exploration in China offshore area[J]. China offshore oil and Gas,2022,34(1):9-16.
- [2] 施和生,杨计海,张迎朝,等. 琼东南盆地地质认识创新与深水领域天然气勘探重大突破[J]. 中国石油勘探,2019,24(6):691-698.  
SHI Hesheng, YANG Jihai, ZHANG Yingzhao, et al. Geological understanding innovation and major breakthrough to natural gas exploration in deep water in Qiongdongnan Basin[J]. China Petroleum Exploration,2019,24(6):691-698.
- [3] 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.
- [4] 徐长贵,范彩伟. 南海西部近海大中型油气田勘探新进展与思考[J]. 中国海上油气,2021,33(2):13-25.  
XU Changgui, FAN Caiwei. New exploration progress and thinking of offshore large-medium-sized oil and gas fields in the western South China Sea[J]. China offshore oil and Gas,2021,33(2):13-25.
- [5] 朱伟林,张功成,高乐. 南海北部大陆边缘盆地油气地质特征与勘探方向[J]. 石油学报,2008,29(1):1-9.  
ZHU Weilin, ZHANG Gongcheng, GAO Le. Geological characteristics and exploration objectives of hydrocarbons in the northern continental margin basin of South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica,2008,29(1):1-9.
- [6] 施和生,杨计海,张迎朝,等. 琼东南盆地地质认识创新与深水领域天然气勘探重大突破[J]. 中国石油勘探,2019,24(6):691-698.  
SHI Hesheng, YANG Jihai, ZHANG Yingzhao, et al. Geological understanding innovation and major breakthrough to natural gas exploration in deep water in Qiongdongnan Basin[J]. China Petroleum Exploration,2019,24(6):691-698.
- [7] 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.  
WANG Zhenfeng, SUN Zhipeng, ZHANG Yingzhao, et al. Distribution and hydrocarbon accumulation mechanism of the giant deepwater central canyon gas field in Qiongdongnan Basin, northern South China Sea[J]. China Petroleum Exploration,2016,21(4):54-64.
- [8] 王振峰,李绪深,孙志鹏,等. 琼东南盆地深水区油气成藏条件和勘探潜力[J]. 中国海上油气,2011,23(1):7-13.  
WANG Zhenfeng, LI Xushen, SUN Zhipeng, et al. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration potential in the deep-water region, Qiongdongnan Basin[J]. China Offshore Oil and Gas,2011,23(1):7-13.
- [9] 张迎朝,徐新德,甘军,等. 琼东南盆地深水大气田地质特征、成藏模式及勘探方向研究[J]. 地质学报,2017,91(7):1620-1633.  
ZHANG Yingzhao, XU Xinde, GAN Jun, et al. Study on the geological characteristics, accumulation model and exploration direction of the giant deepwater gas field in the Qiongdongnan Basin[J]. Acta Geologica Sinica,2017,91(7):1620-1633.
- [10] 尤丽,江汝锋,徐守立,等. 琼东南盆地深水区乐东—陵水凹陷梅山组天然气成藏特征与勘探潜力[J]. 中国海上油气,2021,33(5):24-31.  
YOU Li, JIANG Rufeng, XU Shouli, et al. Accumulation characteristics and exploration potential of Meishan Formation gas in Ledong-Lingshui sag, deep water area of Qiongdongnan Basin[J]. China Offshore Oil and Gas,2021,33(5):24-31.
- [11] 何家雄,夏斌,王志欣,等. 南海北部边缘盆地西区油气运聚成藏规律与勘探领域剖析[J]. 石油学报,2006,27(4):8-14.  
HE Jiaxiong, XIA Bin, WANG Zhixin, et al. Hydrocarbon accumulation and exploratory orientation in the western marginal basin of the northern South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica,2006,27(4):8-14.
- [12] 姚哲,王振峰,左倩媚,等. 琼东南盆地中央峡谷深水大气田形成关键要素与勘探前景[J]. 石油学报,2015,36(11):1358-1366.  
YAO Zhe, WANG Zhenfeng, ZUO Qianmei, et al. critical factors for the formation of large-scale deepwater gas field in central canyon system of Southeast Hainan Basin and its exploration potential[J]. Acta Petrolei Sinica,2015,36(11):1358-1366.
- [13] 童亨茂,范彩伟,童传新,等. 琼东南盆地宝岛变换带的特征、类型及其成因机制[J]. 石油与天然气地质,2015,36(6):897-905.  
TONG Hengmao, FAN Caiwei, TONG Chuanxin, et al. Characteristics, types and genetic mechanism of Baodao transfer zone, Qiongdongnan Basin[J]. Oil & Gas Geology,2015,36(6):897-905.
- [14] 徐长贵. 渤海走滑转换带及其对大中型油气田形成的控制作用[J]. 地球科学,2016,41(9):1548-1560.  
XU Changgui. Strike-slip transfer zone and its control on formation of medium and large-sized oilfields in Bohai Sea area[J]. Earth Science,2016,41(9):1548-1560.
- [15] XU Changgui, PENG Jingsong, WU Qingxun, et al. Vertical dominant migration channel and hydrocarbon migration in complex fault zone, Bohai Bay sag, China[J]. Petroleum Exploration and Development,2019,46(4):720-728.
- [16] 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.
- [17] 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): 1229-1242.
- [18] 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.
- [19] 张远泽, 漆家福, 吴景富. 南海北部新生代盆地断裂系统及构造动力学影响因素[J]. 地球科学, 2019, 44(2): 603-625.  
ZHANG Yuanze, QI Jiafu, WU Jingfu. Cenozoic faults systems and its geodynamics of the continental margin basins in the northern of South China Sea[J]. Earth Science, 2019, 44(2): 603-625.
- [20] 范彩伟, 李绪深, 刘昆, 等. 琼东南盆地乐东、陵水凹陷中新统岩性地层圈闭成藏条件[J]. 中国海上油气, 2016, 28(2): 53-59.  
FAN Caiwei, LI Xushen, LIU Kun, et al. Hydrocarbon accumulation condition of Miocene litho-stratigraphic trap in Ledong & Lingshui sags, Qiongdongnan Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2016, 28(2): 53-59.
- [21] 张迎朝, 徐新德, 甘军, 等. 琼东南盆地深水大气田地质特征、成藏模式及勘探方向研究[J]. 地质学报, 2017, 91(7): 1620-1633.  
ZHANG Yingzhao, XU Xinde, GAN Jun, et al. Study on the geological characteristics, accumulation model and exploration direction of the giant deepwater gas field in the Qiongdongnan Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91(7): 1620-1633.
- [22] 庞雄, 任建业, 郑金云, 等. 陆缘地壳强烈拆离薄化作用下的油气地质特征——以南海北部陆缘深水白云凹陷为例[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(1): 27-39.  
PANG Xiong, REN Jianye, ZHENG Jinyun, et al. Petroleum geology controlled by extensive detachment thinning of continental margin crust: a case study of Baiyun sag in the deep-water area of northern South China Sea[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(1): 27-39.
- [23] 任建业, 庞雄, 于鹏, 等. 南海北部陆缘深水—超深水盆地成因机制分析[J]. 地球物理学报, 2018, 61(12): 4901-4920.  
REN Jianye, PANG Xiong, YU Peng, et al. Characteristics and formation mechanism of deepwater and ultra-deepwater basins in the northern continental margin of the South China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(12): 4901-4920.
- [24] 任建业, 罗盼, 高圆圆, 等. 南海西南次海盆地壳岩石圈伸展破裂过程的构造、沉积和岩浆作用记录[J]. 地球科学, 2022, 47(7): 2287-2302.  
REN Jianye, LUO Pan, GAO Yuanyuan, et al. Structural, sedimentary and magmatic records during continental breakup at southwest sub-basin of South China Sea[J]. Earth Science, 2022, 47(7): 2287-2302.
- [25] 施小斌, 于传海, 陈梅, 等. 南海北部陆缘热流变化特征及其影响因素分析[J]. 地学前缘, 2017, 24(3): 56-64.  
SHI Xiaobin, YU Chuanhai, CHEN Mei, et al. Analyses of variation features and influential factors of heat flow in the northern margin of the South China Sea [J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(3): 56-64.
- [26] 张功成, 张厚和, 赵钊, 等. “源热共控”中国近海盆地石油富集规律[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(4): 38-53.  
ZHANG Gongcheng, ZHANG Houhe, ZHAO Zhao, et al. “Joint control of source rocks and geothermal heat”-oil enrichment pattern of China’s offshore basins [J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(4): 38-53.
- [27] 张黎, 张新涛, 刘艺萌, 等. 渤海海域深部热流体存在的证据及其对油气成藏意义——以秦皇岛 29-2/2E 油气田为例[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(5): 633-644.  
ZHANG Li, ZHANG Xintao, LIU Yimeng et al. Evidence of deep fluid and its influence on gas reservoiring in Bohai Sea: case study of QHD29-2/2E oilfield [J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(5): 633-644.

(收稿日期 2023-02-01 改回日期 2023-04-23 编辑 肖 飞)