

文章编号: 0253-2697(2024)01-0226-15 DOI:10.7623/syxb202401013

琼东南盆地“气聚集带”的成藏特征与勘探潜力

张功成¹ 纪沫¹ 陈莹¹ 甘军² 王东东³ 张春宇¹

(1. 中海油研究总院有限责任公司 北京 100028; 2. 中海石油(中国)有限公司海南分公司 海南海口 570312;
3. 山东科技大学地球科学与工程学院 山东青岛 266590)

摘要:琼东南盆地是中国近海的一个在浅水区、深水区、超深水区均发现煤型大气田的盆地,探讨其天然气地质特征及勘探新领域具有重要的理论和实际意义。笔者基于区域地质、地震、钻井、地球化学测试等数据分析了琼东南盆地的成藏特征和勘探潜力。研究表明:琼东南盆地在崖城组沉积期具有“两隆两坳”的构造格局,崖城组的煤型烃源岩(包括煤系烃源岩和陆源海相烃源岩)是主要的烃源岩,以渐新统崖城组(扇)三角洲为中心的煤型烃源岩的生烃灶,主要沿北部坳陷北缘、中央坳陷南缘和北缘呈串珠状分布;北部坳陷北缘的煤型烃源岩的成熟度低,未进入大量生气阶段;中央坳陷南缘和北缘的煤型烃源岩均已成熟,且已进入大量生气阶段;每个(扇)三角洲发育的煤系烃源岩及其周边的陆源海相泥岩均为 1 个富气生烃灶。受渐新世煤型烃源岩的生烃灶控制,形成了中央坳陷南缘和北缘 2 个大型气聚集带;气聚集带中的凸起、断阶带、缓坡带、凹中油积体等圈闭是煤型天然气的主要勘探领域,勘探前景巨大,天然气资源量预计超过 $2 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。

关键词:琼东南盆地;煤系(扇)三角洲;生烃灶;气聚集带;勘探领域

中图分类号: TE122.3

文献标识码: A

Accumulation characteristics and exploration potentials of gas accumulation belt in Qiongdongnan Basin

Zhang Gongcheng¹ Ji Mo¹ Chen Ying¹ Gan Jun² Wang Dongdong³ Zhang Chunyu¹

(1. CNOOC Research Institute Company Limited, Beijing 100028, China;

2. Hainan Branch, CNOOC China Limited, Hainan Haikou 570312, China;

3. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Shandong Qingdao 266590, China)

Abstract: In China, Qiongdongnan Basin is the only place where large coal type gas fields have been discovered in shallow water, deep water, and ultra-deep water areas. Therefore, it is of important theoretical and practical significance to explore the geological characteristics of natural gas and new exploration fields in the basin. Based on regional geological, seismic, drilling, and geochemical testing, the paper analyzes the accumulation characteristics and exploration potentials of Qiongdongnan Basin. The results indicate that a tectonic framework of “two uplifts and two subbasins” was formed during the deposition period of Yacheng Formation in Qiongdongnan Basin. The coal-type source rocks (including coal-measure source rocks and terrestrial marine source rocks) of Yacheng Formation are the major source rocks, and the source kitchen of coal-type source rocks in the (fan) delta of the Oligocene Yacheng Formation mainly shows a bead-like distribution along the northern margin of the northern depression, the southern and northern margins of the central depression belt. The maturity of coal-type source rocks in the northern margin of the northern depression is low and has not come up to the main gas generation stage. The coal-type source rocks at the southern and northern margins of the central depression belt are mature and have entered the main gas generation stage. Coal-measure source rocks and the surrounding terrestrial marine mudstones developed in each (fan) delta are one source kitchen. As controlled by the source kitchen of the Oligocene coal-type source rocks, two large gas accumulation belts were formed at the southern and northern margins of the central depression belt. The main exploration areas for coal-type natural gas include uplifts, step-fault belts, gentle slope belts, and turbidite bodies inside sags in the gas accumulation belt, showing great exploration prospects, and the natural gas resources are expected to exceed $2 \times 10^{12} \text{m}^3$.

Key words: Qiongdongnan Basin; coal-measure(fan) delta; source kitchen; gas accumulation belt; exploration field

基金项目:中国海洋石油集团有限公司“十四五”科技重大项目“南海北部深水区勘探关键技术”(KJGG2021-0100)、国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2016ZX05026)、国家重点基础研究发展计划(973)项目“南海深水盆地油气资源形成与分布基础性研究”(2009CB219400)和国家自然科学基金项目“南海深海地质演变对油气资源的控制作用”(No. 91528303)资助。

第一作者:张功成,男,1966年1月生,1994年获中国地质大学(北京)博士学位,现为国务院政府特殊津贴专家、中国海洋石油有限公司资深勘探专家、教授级高级工程师,主要从事海洋油气勘探研究工作。Email:zhanggch@cnooc.com.cn

通信作者:纪沫,女,1982年7月生,2010年获中国地质大学(北京)博士学位,现为中海油研究总院有限责任公司资深地质工程师,主要从事深水油气勘探和构造地质研究工作。Email:jimo@cnooc.com.cn

引用:张功成,纪沫,陈莹,甘军,王东东,张春宇. 琼东南盆地“气聚集带”的成藏特征与勘探潜力[J]. 石油学报,2024,45(1):226-240.

Cite:ZHANG Gongcheng,JI Mo,CHEN Ying,GAN Jun,WANG Dongdong,ZHANG Chunyu. Accumulation characteristics and exploration potentials of gas accumulation belt in Qiongdongnan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica,2024,45(1):226-240.

随着中国陆上油气勘探逐渐成熟,常规油气勘探的重心已经转向海洋。南海是中国也是西太平洋海域面积最大的勘探新区。与大西洋两岸等世界典型深水区的经典被动陆缘背景不同,南海处于欧亚板块、太平洋板块等多个板块的交汇处,地质条件极为复杂,没有可以借鉴的成熟模式。源控论认为烃源岩是油气勘探最关键的基础地质问题。南海海域已发现了不少大型常规油气田,其中,琼东南盆地就是重要的煤型油气勘探区^[1-2];烃源岩以渐新统海陆过渡相煤型烃源岩为主^[3-6]。琼东南盆地主体处于深水区和超深水区,与全球其他一些主要深水盆地相比,目前的油气发现不多^[7-8]。琼东南盆地主体为海相含煤边缘海被动陆缘断-坳陷盆地,其煤型油气主要来源于煤型烃源岩^[3-5,9-10]。前人对陆相断陷盆地中含煤地层的发育与分布规律作了细致的研究工作,琼东南盆地与陆上研究程度较深的含煤盆地均不同,具有煤系地层厚度大、单煤层厚度小、区域稳定性差、热演化程度较高等特点^[5-6,11-12],尚没有可借鉴的成功先例。目前,琼东南盆地的油气勘探处于瓶颈期,盆地中富煤带及其气聚集带的发育特征与分布规律、生烃特征、油气运移与成藏规律等的研究程度较低,勘探方向不明确,勘探难度巨大。有必要从新获得的资料和区域地质特征入手,系统深入地分析对天然气成藏起主要控制作用的煤型烃源岩及其气聚集带的发育与分布特征,为煤型油气藏的预测和勘探指明方向。因此,对琼东南盆地古近纪煤型烃源岩与气聚集带的发育与分布规律开展系统研究,对指导海域煤型油气勘探具有重要理论意义和推广价值。

1 油气勘探历程

琼东南盆地处于南海北部大陆边缘西段^[13],夹持在海南隆起区、西沙隆起区、中建凸起和神狐隆起之间,水深为 100~3 000 m,横跨浅水区(水深小于 300 m)、深水区(水深为 300~1 500 m)和超深水区(水深大于 1 500 m),主体处在深水区和超深水区[图 1(a)],面积约为 $10 \times 10^4 \text{ km}^2$,新生界最大厚度超过 10 000 m,自下而上依次为始新统(E_2)、崖城组(E_3^1)、陵水组(E_3^2)、三亚组(N_1^1)、梅山组(N_1^2)、黄流组(N_1^3)、莺歌海组(N_2)和乐东组(Q)[图 1(b)、图 1(c)、图 2],是中国近海最重要的富气盆地之一。

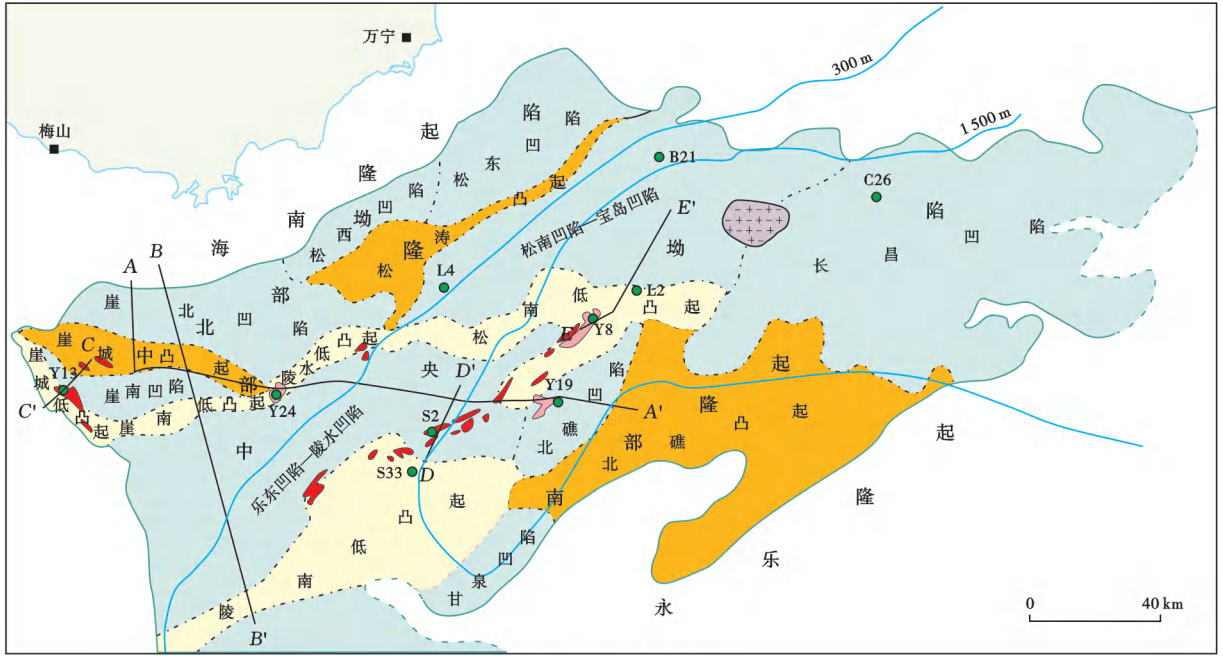
琼东南盆地天然气勘探目前已取得重大进展。在天然气储量发现规模上,除四川盆地、鄂尔多斯盆地和塔里木盆地为 3 大万亿立方米大气区之外,琼东南盆

地与准噶尔盆地、柴达木盆地、松辽盆地、渤海湾盆地、东海盆地、珠江口盆地、莺歌海盆地共同组成了 8 个千亿立方米级大气区(琼东南盆地排名第二,第一为渤海湾盆地)。琼东南盆地的勘探发现包括千亿立方米级的大气田、深水千亿立方米大气田、深水轴向峡谷水道大气田、深水深层古近系大气田、深水中生界花岗岩潜山气田和超深水超浅层大气田,是一个创造多项世界和中国天然气勘探记录的典范大气盆。

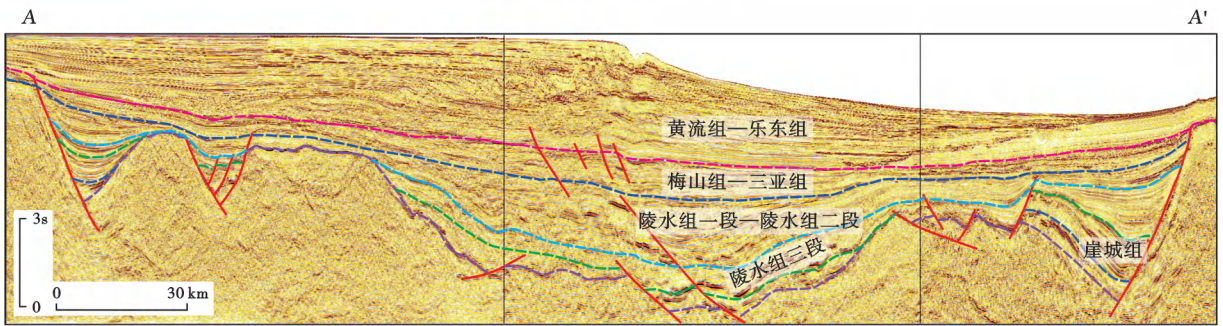
琼东南盆地的油气勘探经历了 3 个阶段:①20 世纪 60 年代—1979 年为早期自营勘探阶段,勘探活动主要在近岸浅水区,此阶段仅钻探了 1 口井,发现 1 个储量规模小的油藏^[14];②1979—2003 年为自营与合作阶段,钻探了多口井,主要位于浅水区,发现了崖城 13-1 大气田^[14-15];③2004 年以来为自营为主、合作为辅阶段,以深水区勘探为主,发现了一批深水、超深水气田^[16-18]。2014 年前后,盆地中央坳陷陵水凹陷发现了陵水 17-2 大气田^[16-17],实现了中国深水区千亿立方米级大气田的勘探突破;随后,相继发现了陵水 25-1 气田、陵水 18-1 气田和陵水 18-2 气田等大一中型气田^[19];2018 年,琼东南盆地松南低凸起发现了中生界花岗岩潜山型永乐 8-1 气田,是深水区又一个千亿立方米级气田的现实领域。近几年,在琼东南盆地乐东凹陷—陵水凹陷中新统梅山组和莺歌海组的海底扇领域勘探相继获得了新突破,证实梅山组沉积晚期和莺歌海组沉积期的海底扇发育了优质成藏组合;在松南凹陷松涛 36-2 地区的三亚组中发现厚度为 19 m 的气层,证实松南凹陷和宝岛凹陷具有较高的生烃能力^[20]。值得注意的是,琼东南盆地中央坳陷陵水凹陷在渐新统陵水组、中新统梅山组和黄流组以及上新统莺歌海组均获得天然气勘探发现,天然气地质储量超过 $2000 \times 10^8 \text{ m}^3$,呈现“煤型烃源岩供烃、构造脊/裂隙垂向输导、大型海底扇汇聚”的天然气立体复式成藏模式。

2 构造-沉积演化特征

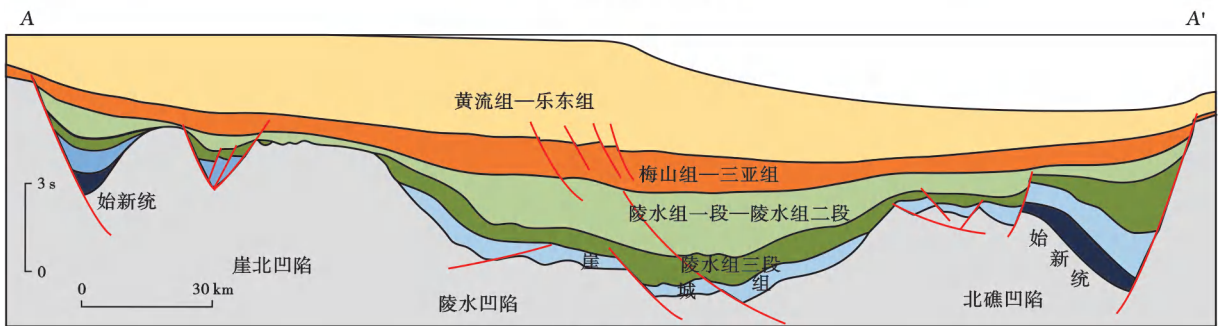
受南海边缘海构造旋回控制^[21],南海北部大陆边缘陆坡及其邻区形成了包含多个宽、深凹陷在内的沉积盆地^[22]。琼东南盆地多期原型盆地的叠合形成了被动大陆边缘盆地。盆地基底的主体是印支期—燕山期的造山带;在始新世为 4 个零星残余陆相凹陷;渐新世为主成盆期,形成了大坳、大隆的构造格局,沉积了海陆过渡相碎屑岩^[23-24];在早—中中新世呈低隆低坳格局,以浅海沉积为主;自晚中新世以来,盆地西南部



(a) 琼东南盆地构造单元



(b) 琼东南盆地典型地震剖面



(c) 琼东南盆地典型地质剖面



图1 琼东南盆地构造单元及典型地震、地质剖面

Fig. 1 Tectonic units and typical seismic-geological profiles of Qiongdongnan Basin

发生剧烈沉降,形成了单坳、深坳的构造格局,以深水沉积为主。

2.1 构造演化

2.1.1 始新世局部断陷期

该时期琼东南盆地处于南部隆起、北部断陷的背景。南部隆起零星分布着小一微断陷,北部可见串珠

状分布的湖相断陷带^[25-26]。单个断陷呈半地堑构造样式,断层活动弱、地层厚度薄,规模有限。目前,琼东南盆地已有探井钻遇始新统;结合区域演化、地震反射特征、油气生物标志化合物综合推断,崖北凹陷、松西凹陷、松东凹陷、北礁凹陷4个凹陷存在始新统。以崖北凹陷为例,受断层控制,该凹陷具有“少、窄、小、薄”的

地堑或半地堑结构,即凹陷具有数量少、宽度窄、长度短、凹陷规模小、地层厚度薄的发育特征[图 1(b)、图 1(c)、图 3(a)一图 3(d)]。

地层				界面	距今时间 / Ma	厚度 / m	岩性	沉积环境	储-盖组合
系	统	组	代号						
第四系						377~2700		浅海—深海	
新近系	上新统	莺歌海组	N ₂	T ₂₀	1.8	490~2450		浅海—深海	储+盖
		黄流组	N ₁ ³	T ₃₀	5.5	99~550		浅海—深海	
	中新统	梅山组	N ₁ ²	T ₄₀	10.5	200~1300		滨海—浅海	储+盖
		三亚组	N ₁ ¹	T ₅₀	16.0	0~1100		滨海—浅海	
		陵水组	E ₃ ²	T ₆₀	23.0	0~3800		滨海—浅海	
古近系	渐新统	崖城组	E ₃ ¹	T ₇₀	28.4	0~2800		海岸平原—浅海	储+盖
		始新统	E ₂	T ₈₀		0~2000		河流—湖泊	
	基底			T ₁₀₀					储+盖

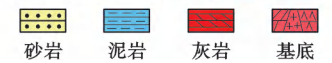


图 2 琼东南盆地综合地层特征

Fig. 2 Comprehensive stratigraphic characteristics of Qiongdongnan Basin

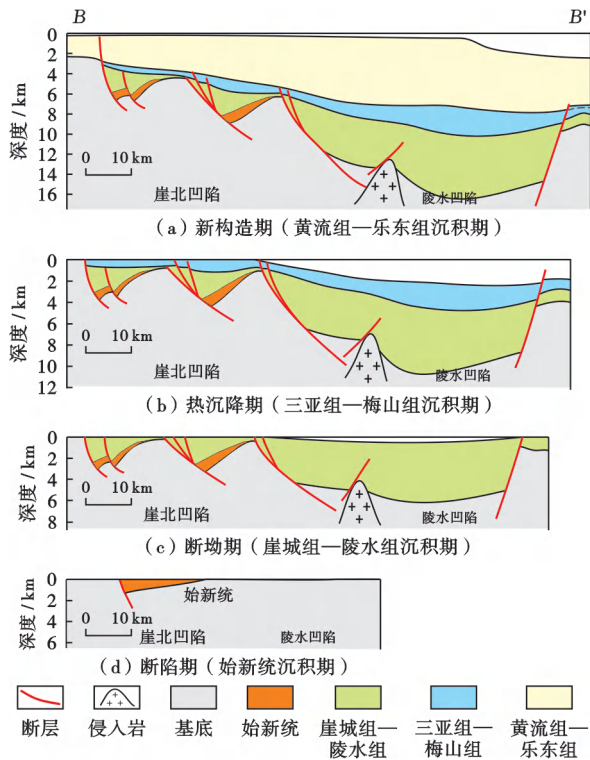


图 3 琼东南盆地构造演化阶段(据文献[21]修改)

Fig. 3 Tectonic evolution stages of Qiongdongnan Basin

2.1.2 渐新世区域断陷期

该时期琼东南盆地经历了差异伸展、翘倾断块作用,形成了北部断陷带、中央断陷带等构造单元。由于盆地基底是造山带性质的非刚性褶皱带,新生的断陷

受基底早期断裂等影响,盆地中央的断裂活动强,形成了复杂的宽、深断陷^[22],盆地南、北边缘的拗陷呈半地堑结构[图 1(b)、图 1(c)、图 3(c)]。崖城组三段(崖三段)沉积期,盆地主要发育规模较大的辫状河三角洲、扇三角洲和滨—浅海沉积,在三角洲和浅海地区发育煤层;崖城组二段(崖二段)和崖城组一段(崖一段)沉积期,盆地主要发育潮坪、潟湖沉积,在潮坪沼泽中发育煤层;陵水组沉积期主要发育滨海和浅海沉积,小范围发育滨岸平原和台地沉积体系,盆地北部发育规模不大的扇三角洲和滨海沉积体系,在潮坪、扇三角洲和滨岸平原中发育一定的煤层^[27-29]。

2.1.3 早—中中新世缓慢拗陷期

早中新世,南海西部从造山带裂陷期进入了洋盆扩张期,西南次海盆形成,由早期的陆块伸展转变为海底扩张。西南次海盆的扩张时间为早—中中新世,该时期的伸展作用集中在西南次海盆,琼东南盆地因伸展作用减弱而进入弱拗陷阶段,表现为无断裂活动,整体沉降幅度小、横向差异小。早期,琼东南盆地的拗陷区略有增加,呈浅拗低隆状;乐东凹陷、陵水凹陷、松南凹陷、宝岛凹陷、长昌凹陷所在的中央拗陷地层明显厚于盆地北部;北部拗陷几近不存在,呈单斜状向中央倾斜[图 1(b)、图 1(c)、图 3(b)]。早—中中新世,琼东南盆地全区的海水相对于渐新世进一步加深,在盆地中部出现半深海沉积,南、北两侧分别为浅海和滨海,发育三角洲及滨岸沉积^[23,30]。

2.1.4 晚中新世—第四纪快速沉降期

晚中新世—上新世—第四纪,新南海呈 SN 方向扩展,西南次海盆的 NW—SE 向洋盆增生已停滞。受西部印支地块、东部台湾岛—菲律宾岛弧带的对挤作用控制,琼东南盆地中央特别是西南区域发生了强烈的塑性拗陷作用,加之红河水系带来了巨量的沉积物输入,在构造沉降与沉积负载叠加下,中央拗陷西段发生“电梯式”沉降,地层厚度远大于热沉降期,形成了巨厚的滨/浅海—半深海沉积;此外,盆地东段水体突然加深,中央拗陷主体及其南部也进入深水或超深水(半深海—深海)沉积环境^[23,30-31][图 1(b)、图 1(c)、图 3(a)]。该时期早期的盆岭结构消失,形成了统一的以乐东凹陷为中心、向东开口的簸箕状结构;巨厚地层引起的超压有关的流体底辟在乐东凹陷和陵水凹陷非常发育;在琼东南盆地东部靠近南海西北次海盆的区域,发育大量与岩浆活动相关的大规模海底火山。

2.2 构造格局

琼东南盆地新生界呈现下断上拗的结构[图 1(b)、图 1(c)、图 3(c)],断陷期是盆地烃源岩的主要形成期。宏观上,琼东南盆地具有“两隆两拗”的结构[图 1(a)]。

2.2.1 北部拗陷

北部拗陷呈下断、上单斜斜坡结构。古近纪,边界断裂活动控制了北部拗陷的沉积、沉降,且边界主断裂活动强,这使得凹陷呈半地堑结构;始新世,北部拗陷发育陆相沉积;渐新世,北部拗陷发育海湾相沉积;新近纪—第四纪,北部拗陷呈向南倾斜的单斜轮廓,除松东凹陷外,断层基本不发育。

2.2.2 中央拗陷

中央拗陷呈下断、上拗结构。渐新世,由于断裂活动强,断裂控制了拗陷的沉降、沉积,在断层下降盘形成了带状分布的断陷带,断陷宽且深、规模较大。该时期,乐东凹陷、陵水凹陷、宝岛凹陷和长昌凹陷的沉降和沉积中心发育于凹陷中部,边界断层的活动速率小于凹陷的沉积-沉降速率;崖南凹陷、北礁凹陷的沉降和沉积中心分别发育于凹陷边界断裂的根部。新近纪—第四纪是拗陷作用显著时期,特别是晚中新世以来,中央拗陷西段的乐东凹陷和陵水凹陷发生了快速沉积、沉降。除凹陷外,中央拗陷内部还发育松南、陵南等低凸起。

2.2.3 中部隆起和南部隆起

中部隆起和南部隆起的基底为中生界花岗岩,埋藏浅。在其上部,古近系不发育或很薄,以新近系沉积为主。

3 崖城组煤型烃源岩的分布特征

3.1 聚煤带分布

早渐新世,在古南海北部大陆边缘,由于中央造山

带伸展减薄^[21-22],形成了自东向西的“蛇形”海湾,该海湾从台西南盆地经珠江口盆地(珠二拗陷)—琼东南盆地,延伸到莺歌海盆地,在其南、北两侧形成了海陆过渡相断陷。琼东南盆地在早渐新世崖城组沉积期处于该海湾的西端,其北为海南岛隆起—珠江口盆地中央隆起带、南为西沙隆起和南沙隆起,为半封闭的海湾。该时期由于受断陷格局控制,琼东南盆地在断层弯曲部位、断裂沟槽位置、断层末梢发育(扇)三角洲,形成3个(扇)三角洲带。这些地区叠加湿热的气候环境和植物勃发条件,普遍发育煤层,形成了3个聚煤带(图4):①北部拗陷北缘聚煤带,包括崖北凹陷北部陡坡带、松西凹陷北部陡坡带、松东凹陷北部缓坡带。钻井与地震联合追踪发现了4个(扇)三角洲,面积为60~330 km²,面积合计为600 km²,其中,崖北凹陷钻井共发现煤层35层,煤层厚度合计为16.8 m。②中央拗陷北缘聚煤带,包括乐东、陵水、松南、宝岛、长昌等凹陷的北部陡坡带。这些区域共发育(扇)三角洲12个,面积分布在110~380 km²,面积合计为2240 km²。③中央拗陷南缘聚煤带,包括乐东、陵水、松南、宝岛、长昌等凹陷的南部陡坡带。这些区域共发育(扇)三角洲13个,面积分布在70~420 km²,面积合计为2690 km²。

3.2 煤型烃源岩的分布特征

琼东南盆地崖城组以发育小物源控制的小型(扇)三角洲体系为特征,煤型烃源岩的发育呈现“二元结构”,即同时发育近岸煤系烃源岩和远岸陆源海相烃

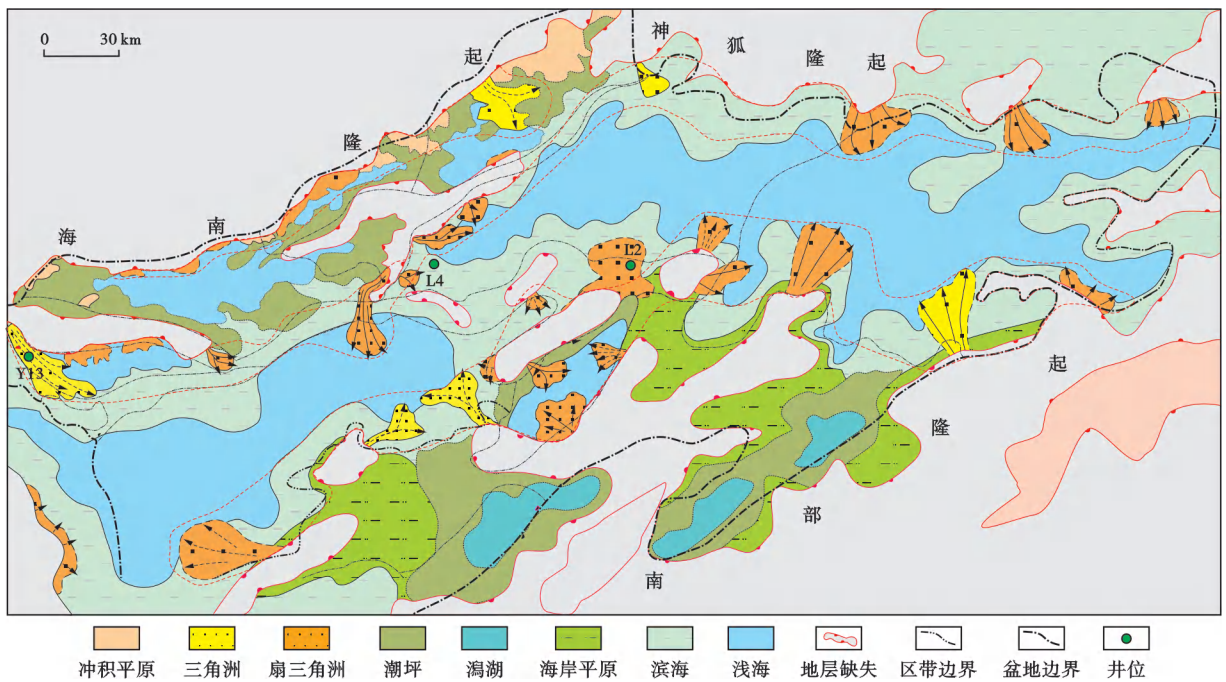


图4 琼东南盆地崖城组(扇)三角洲聚煤带(据文献[32]修改)

Fig. 4 Coal accumulation belt in (fan)delta of Yacheng Formation in Qiongdongnan Basin

源岩^[32]。在(扇)三角洲平原,发育煤系烃源岩(包括煤层和炭质泥岩);在(扇)三角洲前部的浅海、近岸静水海湾等区域,发育陆源海相烃源岩,其有机质主要源于(扇)三角洲提供的陆生高等植物。

崖城组煤系主要分布在琼东南盆地的北部坳陷、南部隆起和低凸起区,以及中央坳陷南、北边缘的(扇)三角洲平原分布区。根据钻井、地震资料的分析结果,琼东南盆地崖城组煤系烃源岩的有利相带主要为(扇)三角洲、潮坪和海岸平原。(扇)三角洲主要分布在各凹陷的边缘,如崖北凹陷北缘在崖三段钻遇扇三角洲薄煤层共 12 层,总厚度为 6.5 m,崖南凹陷也有若干钻井揭示三角洲相多层薄煤层。海岸平原和潮坪相带主要分布在盆地南、北两侧水深较浅的滨岸带,位于盆地构造位置相对较高的部位,如崖北凹陷北缘在崖一段和崖二段钻遇该相带,北礁凹陷也有钻井揭示该相带。煤层的显微有机组分以镜质组为主,壳质组相对较多,惰质组含量极低,这决定了该套煤系烃源岩具有较强的生烃能力^[5]。

崖城组陆源海相烃源岩主要分布在近(扇)三角洲前缘的浅海和近岸的静水海湾环境,受水体搬运作用影响,其沉积范围广、沉积厚度大、沉积体量大、有机质丰度中等,属于中等烃源岩。北礁凹陷钻井揭示,在靠近扇三角洲的静水海湾发育泥岩。这套浅海相泥岩发育在封闭性较强的静水海湾环境,有机质以陆源为主,保存条件好,有机质丰度高,总有机碳(TOC)含量可达 1.5%;有机质中的无定形组分保存较好,约占有机质的 10%。依据地震相特征圈定的静水海湾泥岩的分布范围显示,该套泥岩主要在中央坳陷周缘封闭的小型港湾内呈不连续分布,总面积约为 4 600 km²。

3.3 煤型烃源岩的地球化学特征

琼东南盆地崖城组煤系烃源岩为优质烃源岩。从不同岩性烃源岩的有机质类型来看,煤和炭质泥岩的

有机质类型明显优于暗色泥岩,煤系暗色泥岩也具有较高的有机质丰度,属于中等—好烃源岩(表 1)。崖城组煤系烃源岩的有机质类型主要为 II₂ 和 III 型,有机质主要来源于陆生高等植物,镜质组和惰质组的平均含量为 83.8%,无定形体的平均含量为 3.2%。崖城组煤的热解生烃潜量偏低,平均为 93.47 mg/g,这可能与盆地钻井揭示的崖城组煤的热演化程度较高有关(处于高成熟热演化阶段);炭质泥岩的热解生烃潜量为 44.56 mg/g,属于中等—好烃源岩。煤层以生成天然气为主,但由于其中含有较丰富的树脂体、孢子体和角质体等富氢显微组分,在烃源岩热演化早期具有较强的生油能力。

表 1 崖城组煤系烃源岩总有机碳含量和生烃潜量
Table 1 Total organic carbon contents and hydrocarbon generation potentials of coal-measure source rocks in Yacheng Formation

地层	源岩类型	TOC 含量/%	生烃潜量/(mg/g)
下渐新统 崖城组	煤	55.40	93.47
	炭质泥岩	18.39	55.70
	暗色泥岩	1.24	2.41

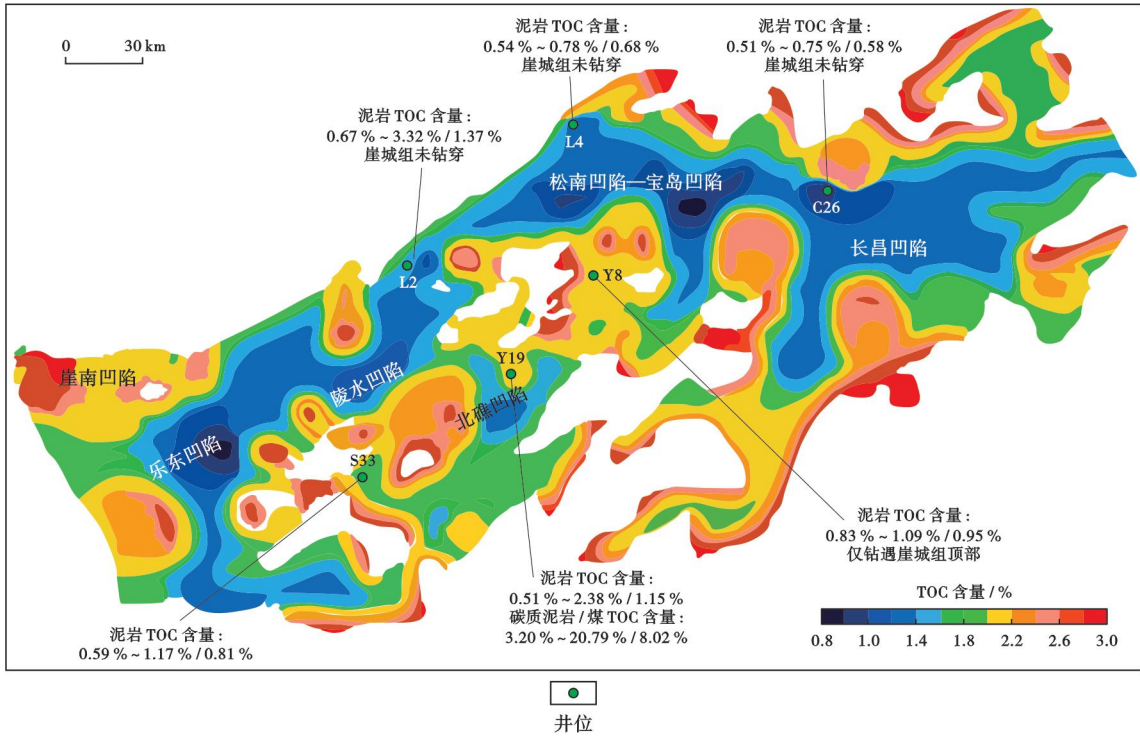
琼东南盆地崖城组陆源海相烃源岩的 TOC 含量平均为 0.94%,属于中等烃源岩,少数为好烃源岩(表 2)。热解生烃潜量普遍较低,这除了受有机质来源和有机质类型影响外,热演化程度也是重要的影响因素(琼东南盆地钻井揭示的烃源岩的热演化程度普遍较高)。

综合煤系烃源岩及陆源海相烃源岩的分布规律发现,烃源岩中的 TOC 含量在(扇)三角洲煤系发育区最高,向海方向逐渐降低(图 5),含煤(扇)三角洲平原及前缘是优质煤型烃源岩的发育部位。与深湖亚相烃源岩主要分布在凹陷沉积中心的特征不同,这一分布规律突破了含煤凹陷烃源岩丰度内部好、边缘差的传统认识。

表 2 琼东南盆地典型钻井崖城组海相泥岩的有机质显微组分及各类组分的总有机碳含量
Table 2 Organic macerals of marine mudstone and total organic carbon contents of various components from Yacheng Formation in typical wells of Qiongdongnan Basin

井名	TOC 含量/%	腐泥组/%	(镜质组 + 惰质组 + 壳质组)/%	海源 TOC 含量/%	陆源 TOC 含量/%
S33 井	0.54~1.22/0.83	9.4~56.9/32.0	43.2~90.7/68.0	0.27	0.56
Y19 井	0.13~2.46/0.50	10.2~60.7/31.4	39.3~89.8/68.6	0.34	0.16
C26 井	0.49~1.05/0.84	27.5~57.0/39.0	41.0~72.5/61.0	0.33	0.51
L2 井	1.24~1.46/1.35	28.3~53.7/41.0	46.3~71.7/59.0	0.24	1.08
L4 井	1.32	14.3~23.6/18.0	76.4~85.7/82.0	0.24	1.08
Y8 井	0.04~0.89/0.52	0~19.2/6.4	81.8~100.0/93.6	6.40	93.60

注:“/”后为平均值。



注：“/”后为平均值。

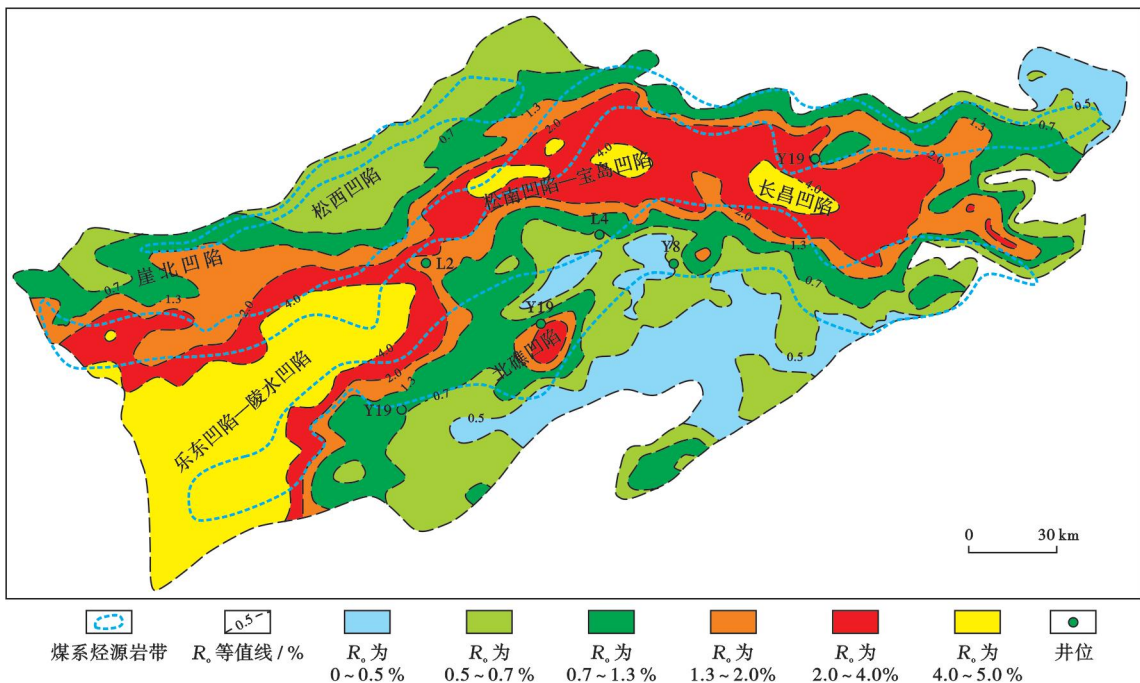
图5 琼东南盆地崖城组煤型烃源岩的总有机碳含量分布

Fig. 5 Total organic carbon content distribution of coal-type source rocks of Yacheng Formation in Qiongdongnan Basin

4 崖城组煤型烃源岩的生烃特征

琼东南盆地崖城组煤型烃源岩主要为陆源有机质^[24,33-34]。大量的地热研究结果表明,琼东南盆地经历了3

期加热,属于超热盆地,特别是在中央拗陷。在烃源岩条件和地热条件共同控制作用下,琼东南盆地整体进入了成熟—高成熟阶段,有机质进入大量生气阶段,以生成天然气为主(图6),且具有晚期爆发式生烃的特征^[35-36]。



注: R_v —镜质体反射率。

图6 琼东南盆地崖城组烃源岩镜质体反射率分布(据文献[8]修改)

Fig. 6 Distribution of vitrinite reflectance in the source rocks of Yacheng Formation in Qiongdongnan Basin

盆地模拟发现,琼东南盆地崖城组烃源岩的镜质体反射率(R_o)具有南北低、中间高的带状分布特征,且各带内部的分布也不均匀(图 6)。中央拗陷分为乐东凹陷—陵水凹陷、崖南凹陷、松南凹陷—宝岛凹陷—长昌凹陷 3 个区域,热演化程度高,烃源岩基本处于过成熟阶段,这对于提高烃源岩的有机质转化率非常重要。北部拗陷的热演化程度低,处于生油窗,油气兼生,以生油为主。通过钻探,目前已在乐东凹陷、陵水凹陷、崖南凹陷找到天然气,发现崖 13 和深海一号 2 个千亿立方米级的大气田(图 1)。油气资源主要分布在中央拗陷,以崖城组和陵水组三段(陵三段)为主力烃源层系。中央拗陷的

资源量贡献率为 87.5%,其中,崖城组的资源量占比为 59.0%,陵三段的资源量占比为 21.0%。

5 煤型油气的主要储层、盖层及储-盖组合

5.1 主要储层

琼东南盆地主要发育 3 类储层:①古潜山(基底)储层;②始新世—早渐新世沉积的各类过渡相砂岩储层,如陵三段扇三角洲或滨海相砂岩储层;③晚渐新世及其之后发育的海相储集层,如三亚组、梅山组滨/浅海相砂岩储层(图 7)。

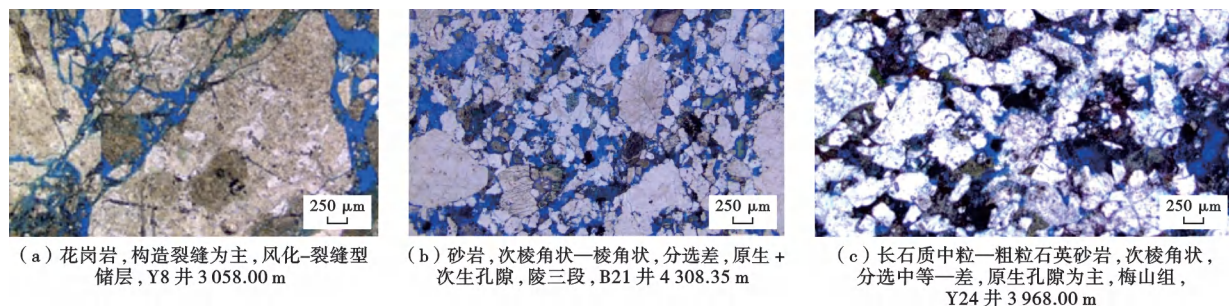


图 7 琼东南盆地主要储层的微观特征

Fig. 7 Microscopic characteristics of main reservoirs in Qiongdongnan Basin

琼东南盆地中生界潜山以构造裂缝为主要储集空间[图 7(a)],以长英质矿物为主的基岩是最有利的储集岩,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^[37]。松南低凸起基底潜山储层的岩性主要为变质二长花岗岩、碎裂二长花岗岩、长英质碎斑岩,其储集空间主要包括次生孔隙和裂缝。相对低位的花岗岩容易形成较好的风化壳型储层^[38],古隆起的长期暴露、断裂及节理发育是风化壳型储层发育的主要原因^[39]。

崖南低凸起及其周缘渐新统崖城组的砂岩储层物性整体为中—低孔、中—低渗,局部物性相对较好。崖城凸起及其西侧古隆起的物源供给充足,其崖城组发育大型辫状河/扇三角洲沉积,砂岩粒度粗,受早期剥蚀淋滤溶蚀作用影响,溶蚀作用强,是优质储层发育区^[40]。宝岛凹陷北坡发育渐新统陵水组三角洲和滨/浅海相砂岩,储层岩石类型以岩屑石英砂岩、长石岩屑砂岩为主[图 7(b)],储层物性为中—低孔、低渗。长昌凹陷发育渐新统陵水组海底扇砂岩,储层粒度偏细、泥质杂基重,为低—特低渗储层^[41]。

崖城地区渐新统陵水组、中新统三亚组和梅山组储层以长石石英砂岩为主[图 7(c)]。在宝岛凹陷地区,岩石的成分成熟度为中等—高成熟,主要发育长石

石英砂岩,储层为中—高孔、中—低渗、微—细喉、不均匀型。沉积相带的平面展布规律对优质储层的分布具有明显的宏观控制作用,压实作用是储层孔隙度减少的主控因素,超压在一定程度上改善了储层的物性^[42]。盆地深水区陵水组、三亚组、梅山组储层的岩性主要为粉砂—细砂粒级的长石石英砂岩、岩屑石英砂岩,分选中等,磨圆度以次棱状—次圆状为主,主要为颗粒支撑。在深水区东部,三亚组—陵水组砂岩主要为中—低孔、低渗储层,非均质性强,储层物性以浅海相最好;在深水区西部,梅山组砂岩主要为中—低孔、中—低渗储层,其沉积相主要为海底扇。乐东凹陷—陵水凹陷中新统黄流组的中央峡谷水道储层岩性以粉砂岩、细砂岩为主,属于中—高孔、中—高渗储层。

5.2 主要盖层

琼东南盆地主要的区域盖层有中新统三亚组上部和梅山组海相泥岩,以及中中新世以后沉积的广海陆架—陆坡泥岩;此外,还发育一些局部盖层,如崖城组半封闭的浅海相泥岩、陵水组二段(陵二段)泥岩;另外,还存在一定的超压盖层,如崖 13-1 构造中的三亚组和梅山组由于存在微弱超压而构成了该地区的良好盖层^[43]。

5.3 主要储-盖组合

琼东南盆地新生界的储-盖组合主要有 6 套(图 2、

图8):①基底潜山组合;②湖相砂体+湖侵泥岩、三角洲/扇三角洲砂体+湖侵/海侵泥岩储-盖组合;③三角洲/扇三角洲砂体、滨/浅海砂体与上覆泥岩构成的储-盖组合;④三亚组三角洲、滨海砂体及部分碳酸盐台地礁滩与上覆滨/浅海相泥岩呈间互层的

储-盖组合;⑤梅山组滨海、三角洲砂体与本组或上覆黄流组/莺歌海组浅海、半深海泥岩构成的储-盖组合;⑥黄流组—乐东组滨海、三角洲砂体、浊积砂体与本组或上覆莺歌海组浅海、半深海泥岩构成的储-盖组合。

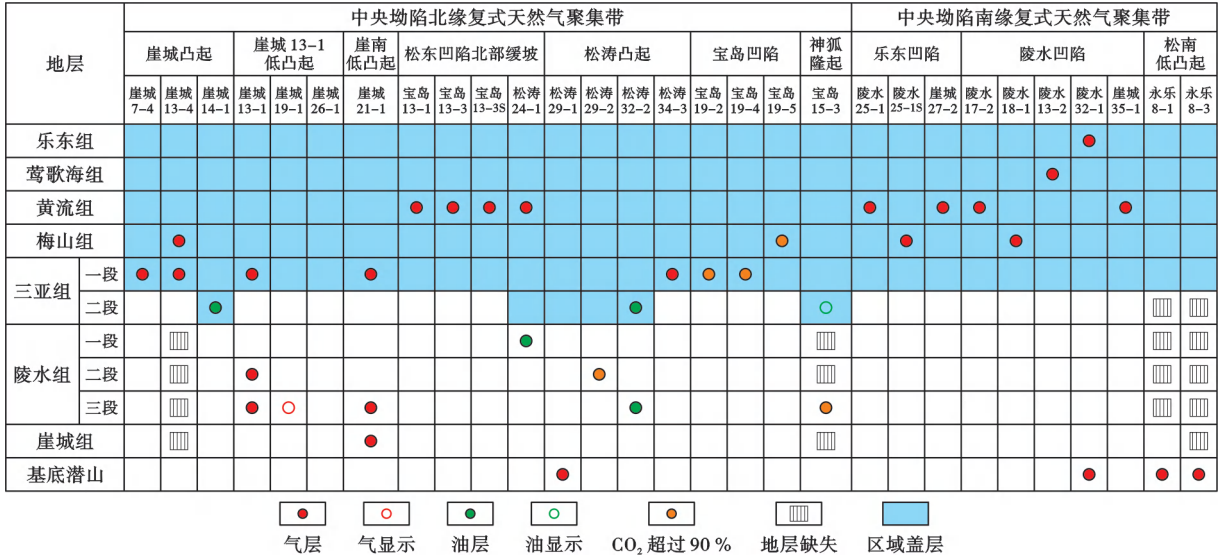


图8 琼东南盆地新生代油气成藏组合

Fig. 8 Cenozoic hydrocarbon accumulation assemblages in Qiongdongnan Basin

6 琼东南盆地天然气聚集带分布特征

琼东南盆地崖城组在北部坳陷北缘、中央坳陷北缘和中央坳陷南缘发育3个聚煤带。这些聚煤带在遭受一

定的热演化作用后,在一定的储集和封盖条件下,形成了规模较大的气聚集带。北部坳陷北缘因热演化程度低,未进入大量生气阶段;中央坳陷北缘和南缘由于热演化程度高,形成了2个大的气聚集带(图9)。

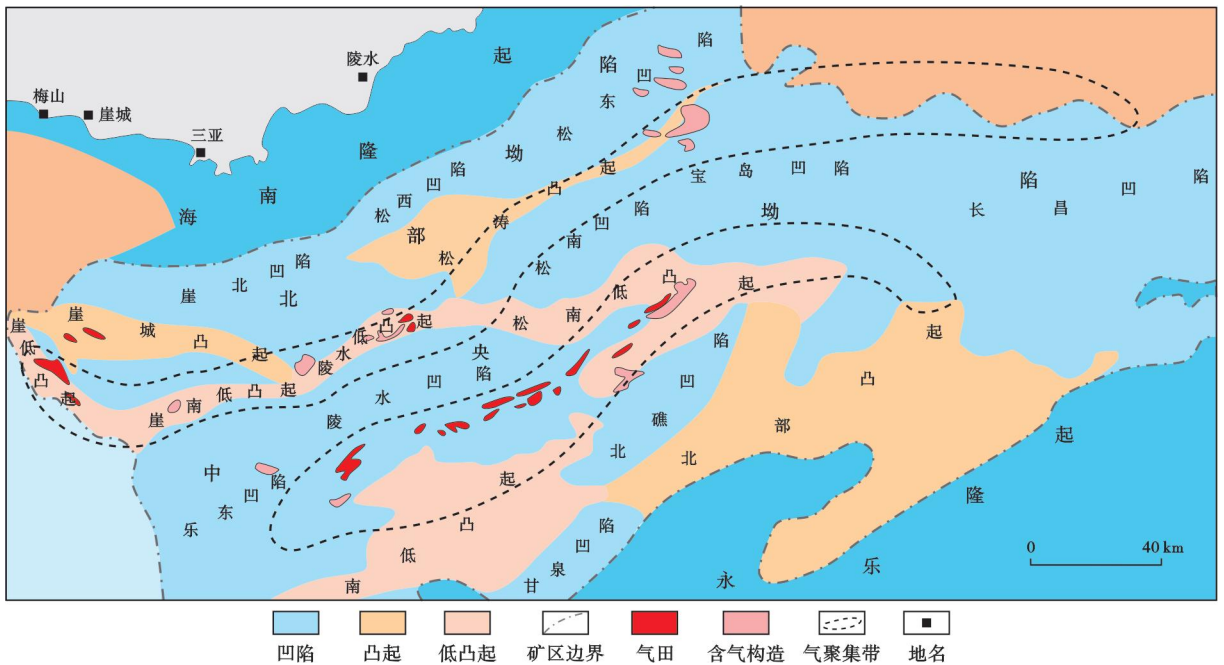


图9 琼东南盆地的主要气聚集带(据文献[8]修改)

Fig. 9 Main gas accumulation belts in Qiongdongnan Basin

6.1 中央坳陷北缘复式气聚集带

该带包括崖南凹陷及其周缘、陵水低凸起及其周缘、松涛凸起及其周缘、宝岛凸起及其周缘(图 9)。气源主要为分布在崖南凹陷、陵水凹陷、松南凹陷、宝岛凹陷和长昌凹陷崖城组含煤(扇)三角洲的煤系烃源岩及其裙边带的陆源海相烃源岩;此外,来自陵水组、三亚组和梅山组的多种烃源岩也可能存在一定贡献。盖

层包括由陵水组一段(陵一段)和陵二段海相泥岩、梅山组含钙海相泥岩、莺歌海组—乐东组海相泥岩构成的区域盖层以及一些局部盖层;储层包括中生界花岗岩潜山、陵三段海相砂岩、三亚组砂岩、梅山组砂岩等;圈闭有大型地层圈闭、披覆背斜圈闭、断块圈闭等(图 10)。天然气运聚方式有储-源披覆式上下对接、断层运移等(图 10);成藏期主要在新构造期。

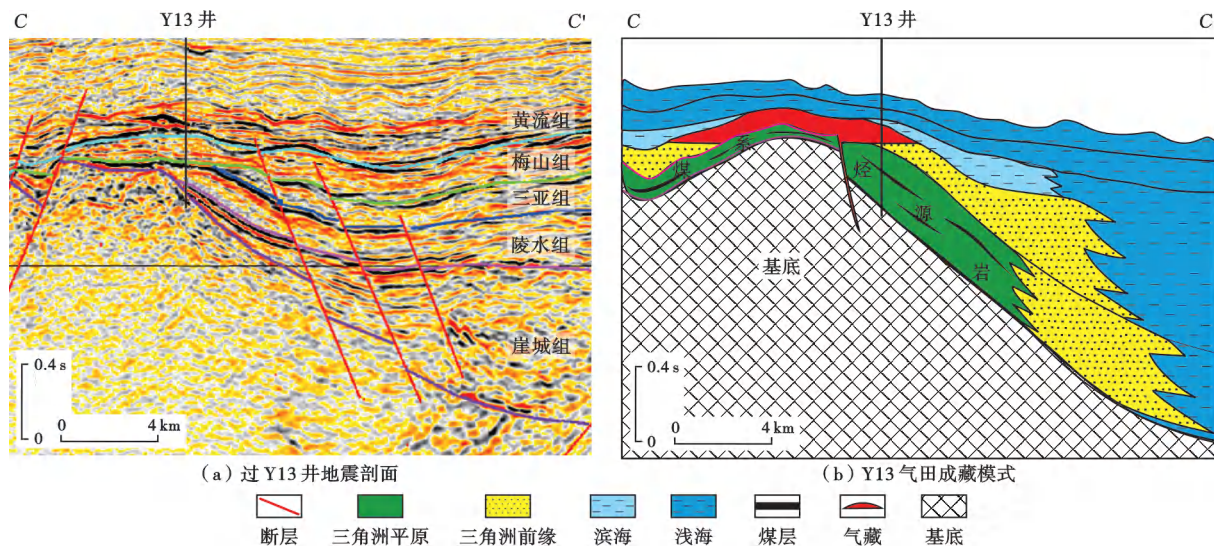


图 10 琼东南盆地崖城 13 气田地震剖面 and 成藏模式(据文献[8]修改,剖面位置见图 1)

Fig. 10 Seismic profile and accumulation model of Yacheng13 gas field in Qiongdongnan Basin

该气聚集带已发现崖城 13-1 大气田、宝岛 21-1 大气田。另外,在崖 13-1 低凸起带的中生界潜山、崖 21 低凸起的三亚组、崖城凸起披覆背斜内的三亚组—梅山组(崖城 14-1 构造、崖城 7-4 构造)、陵水凹陷北缘的三亚组、松南低凸起、松涛凸起(陵水 2-1 构造)等地区发现了小气田或天然气显示,显示具有活跃的天然聚集特征。

6.2 中央坳陷南缘复式气聚集带

该带包括乐东凹陷南缘、陵水低凸起及其倾没端、北礁凹陷、松南低凸起及其倾没端、长昌凹陷南构造带(图 8)。气源岩主要为扇三角洲煤系烃源岩和陆源海相烃源岩,如北礁凹陷钻遇的崖城组煤系烃源岩中含多层薄煤层,碳质泥岩的厚度约为 96 m,均为良好的烃源岩。该气聚集带内烃源岩的热演化程度差距大,从凹陷槽部向隆起高部位逐渐降低,即在凹槽区为过成熟、在过渡区为高成熟、在凸起区为未成熟。通过分析 5 口探井的地温梯度发现,深水区的地温梯度整体呈现从西向东逐渐增高的特点,地温梯度为 4.35~5.05 °C/hm。崖城组烃源岩的成熟度普遍较高,在坳陷中心崖三段、崖二段的最大 R_o 大于 4.0%。陵水凹陷的崖城组烃源岩在莺歌海组沉积期进入生、排气高峰。

S2 井气的测井、录井资料显示,甲烷含量高(97%~98%),重烃含量很低,组分很干;天然气的同位素分析显示,甲烷的碳同位素($\delta^{13}C$)含量为 39.4‰~38.8‰,属高成熟腐殖型气,与崖城 13-1 气田相似,天然气来源于深部高成熟的崖城组烃源岩。

该气聚集带的区域盖层主要为上新统一第四系巨厚海相泥岩和中中新统梅山组区域性泥岩以及局部盖层。该气聚集带共发育 6 套储层:①中生界花岗岩基底储层;②陵水组浊积水道、低位扇;③三亚组盆底扇;④黄流组中央峡谷水道浊积砂体;⑤莺歌海组海底扇砂体;⑥上新统一第四系乐东组。圈闭主要有潜山圈闭、深水浊积体岩性圈闭、背斜圈闭、断块圈闭等。油气运移通道为深层崖城组在生烃超压下形成的底辟带或断裂带^[44-45],以及输导砂体与不整合面等(图 11)。热成因气通过中央峡谷水道的中转接力,进行长距离运移;本地浅层生物气以近距离充注成藏模式为主。

该气聚集带已发现陵水 17-2 气田、陵水 25 气田和陵水 18 气田 3 个大—中型气田(图 9)。另外,在陵南低凸起、北礁凹陷、松南低凸起、长南断裂带也钻遇了气层,显示具有活跃的天然聚集特征。

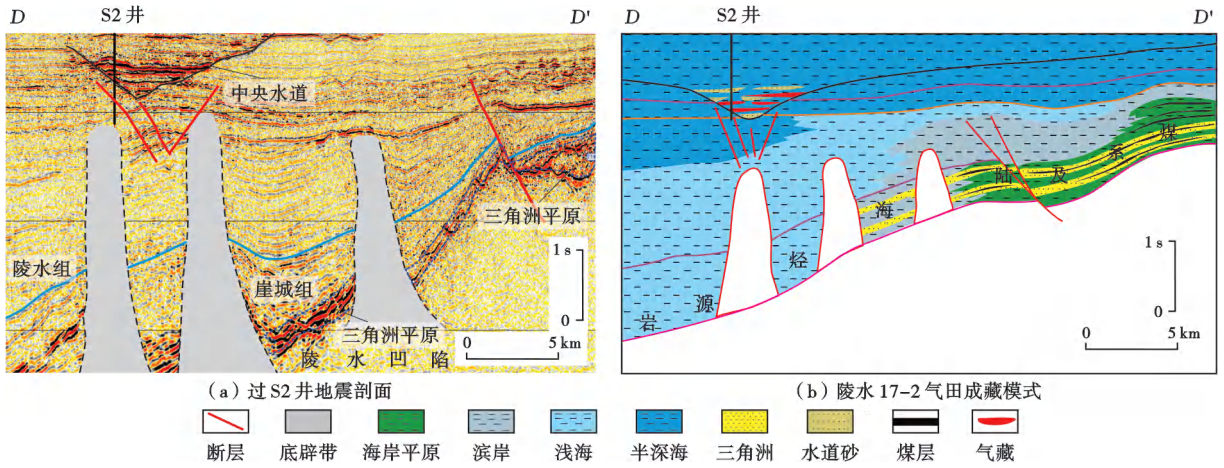


图 11 琼东南盆地陵水 17-2 气田地震剖面 and 成藏模式 (据文献[8]修改, 剖面位置见图 1)
 Fig. 11 Seismic profile and accumulation model of Lingshui 17-2 gas field in Qiongdongnan Basin

7 油气勘探方向及资源潜力

7.1 中央坳陷南缘复式气聚集带

7.1.1 松南低凸起及其倾没端

松南低凸起及其倾没端发育下部及中上部 2 套成藏组合。下部成藏组合以花岗岩潜山^[46-47]、崖城组扇三角洲为储层,以陵水组、三亚组厚层海相泥岩为盖层;已发现永乐 8-1、永乐 8-3 等气藏,油气成藏以成熟

源岩供烃、关键成藏期构造脊与三角洲砂体输导、古近系构造圈闭储集的“源—脊—储”远距离侧向运聚为主(图 12)。中上部成藏组合以三亚组海底扇为储层、三亚组—梅山组海相泥岩为盖层;已发现松涛 34-3、松涛 36-2 等气藏,油气成藏以“源—断—储”垂向运聚为主。在上述 2 个成藏组合中,松南低凸起西北倾没端的基底花岗岩潜山和北斜坡的三亚组海底扇是 2 个有利勘探领域。

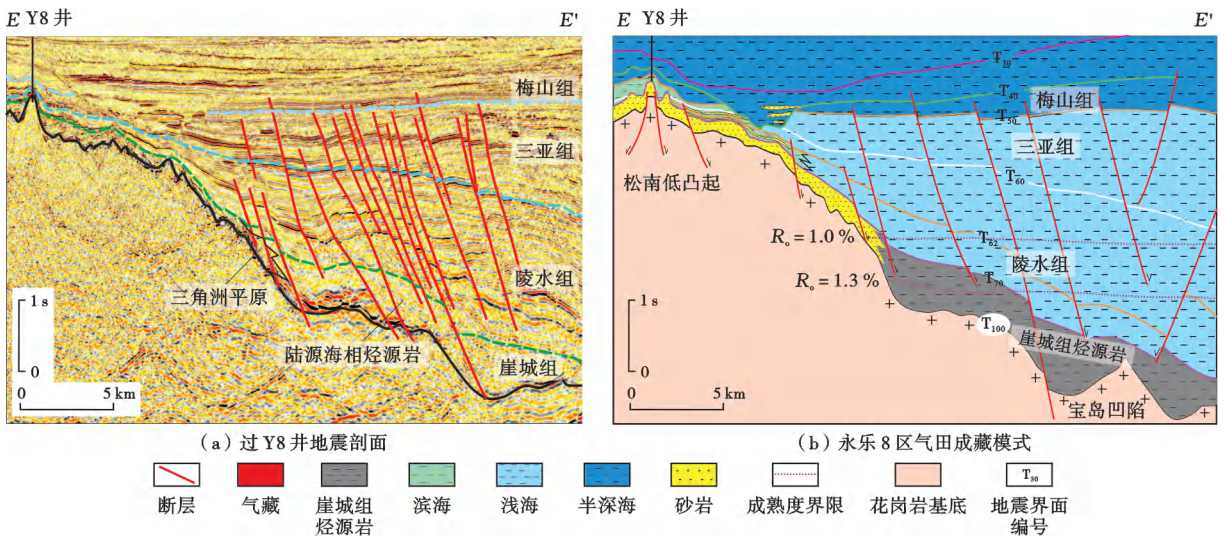


图 12 松南低凸起永乐 8 区地震剖面 and 油气成藏模式 (剖面位置见图 1)
 Fig. 12 Seismic profile and accumulation model of Yongle 8 area in Songnan low uplift

7.1.2 陵南低凸起及其倾没端

在陵南低凸起西北披覆背斜构造带,长期继承性发育背斜、断背斜构造,发育多层圈闭,呈成群成带分布,垂向叠置好。构造带与陵水凹陷以陡坡相连,油气沿断层和陡坡带发育的扇三角洲砂体垂向运聚。从油气运移模拟来看,位于超压—常压过渡带和常压带的

陵南低凸起为油气运移的有利指向。

陵南低凸起的气源来自乐东凹陷和陵水凹陷带。凹陷属于宽、深凹陷,地层厚度大,最大沉积厚度近万米。多次盆地模拟分析结果均表明,凹陷内始新统和崖城组的烃源岩已经成熟,总生烃量大,生烃强度高。乐东凹陷和陵水凹陷为已证实的富生烃凹陷,油气资

源条件优越。沉积相分析与邻区钻探结果表明,该领域主要发育三亚组、陵水组和崖城组 3 套储-盖组合。储层主要为三亚组低位滨海相砂岩、陵水组滨海相一扇三角洲相砂岩、崖城组滨海相砂岩。

7.1.3 中央峡谷水道

中央峡谷横穿琼东南盆地中央坳陷,经乐东凹陷和陵水凹陷、松南低凸起、宝岛凹陷和长昌凹陷,向东延伸到西沙海槽,止于南海西北次海盆。峡谷长度约为 460 km,宽度为 6~12 km,主要发育被半深海泥岩包裹的黄流组—莺歌海组浊积水道砂体。目前在中央峡谷水道的乐东—陵水段,已发现陵水 25-1 气田、陵水 17-2 气田和陵水 18-1 气田 3 个商业气田^[2,17]。

中央峡谷水道气藏具有“煤型供烃、超压驱动、底辟/微裂隙垂向运移、圈闭控藏”的成藏模式,发育由底辟/微裂隙垂向输导体系与浊积砂体侧向输导体系组成的输导体系,天然气在晚期的快速生烃、高效成藏有利于天然气富集。中央峡谷内连片分布着晚中新统浊积水道砂优质储集体,厚度大、物性好,其下伏的成熟煤型烃源岩所生成的天然气可通过微裂隙与热流体活动带向储层短距离垂向运移供烃,形成构造-岩性复合圈闭,天然气藏具有晚期(距今时间晚于 5 Ma)、优质纯烃、高效运聚、高丰度成藏,“多藏独立、纵向叠置、含气丰度高”的特点。

7.2 中央坳陷北缘复式气聚集带

7.2.1 陵水凹陷北坡

陵水凹陷是已证实的富气凹陷。凹陷北部为陡坡带,新近系发现含气构造,三亚组发育含气层。该地区的深层古近系为断裂坡折带、浅层新近系为陆架坡折,储集体发育,是岩性油气藏和断层油气藏发育的有利部位。

7.2.2 松南凹陷北部断阶带

松南凹陷北部的结构与陵水凹陷类似。松南凹陷北部深层为复杂断裂带,断块旋转显著,发育断层或断块圈闭;浅层发育陆架坡折,岩性体发育,在松涛凸起上发育披覆背斜和潜山圈闭。在断裂带的断块和凸起上均已发现含气构造,显示该断阶带发生过天然气运聚,是有利的勘探方向。

7.2.3 宝岛—长昌凹陷北部断阶带

该带为侧列型断阶带,已发现宝岛 21 大气田,证实宝岛北部成藏条件好。该气田紧邻宝岛凹陷生烃中心,发育 II₂—III 型优质烃源岩,烃源岩具有较强的生烃能力。转换断阶带控制了大型构造脊汇聚和大型三角洲储集体,是天然气的有利汇聚区。古近系陵水组、崖城组和中生界潜山的勘探前景甚优。断阶带向东部的长昌凹陷拓展,也发育多个古近系陵三段、崖城组大

型(扇)三角洲储集体与中生界花岗岩潜山储集体,储集体在横、纵向上呈多套叠置。该带发育北高南低的构造-岩性圈闭,局部发育断背斜、断鼻构造,是寻求大一中型气田发现的勘探方向。

8 结 论

(1) 琼东南盆地历经 40 余年的勘探,发现了崖 13-1 气田、陵水 17-2 气田和宝岛 21-1 气田等大一中型天然气田。中央坳陷陵水凹陷发现的天然气地质储量超过 $2\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$,气藏呈现“煤型烃源岩供烃、构造脊/裂隙垂向输导、大型海底扇侧向汇聚”的天然气立体复式成藏模式。

(2) 琼东南盆地主要发育渐新统煤系烃源岩和陆源海相烃源岩。崖城组沉积期,琼东南盆地在北部坳陷北缘、中央坳陷南缘和中央坳陷北缘发育 3 个(扇)三角洲带,是 3 个聚煤带。

(3) 琼东南盆地内渐新统崖城组(扇)三角洲煤型烃源岩的生烃灶主要沿北部坳陷北缘、中央坳陷南缘和北缘呈串珠状分布;中央坳陷南缘和北缘的煤型烃源岩均已成熟,且进入大量生气阶段;每个(扇)三角洲发育的煤系烃源岩及其周边的陆源海相泥岩为 1 个富气生烃灶。

(4) 受渐新世煤型烃源岩的生烃灶控制,形成了中央坳陷南缘和中央坳陷北缘 2 个大型气聚集带;气聚集带中的凸起、断阶带、缓坡带、凹中浊积体等圈闭是煤型天然气的主要勘探领域,天然气资源量超 $2 \times 10^{12} \text{ m}^3$,勘探前景巨大。

参 考 文 献

- [1] 张功成,米立军,吴时国,等.深水区——南海北部大陆边缘盆地油气勘探新领域[J].石油学报,2007,28(2):15-21.
ZHANG Gongcheng, MI Lijun, WU Shiguo, et al. Deepwater area—the new prospecting targets of northern continental margin of South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(2): 15-21.
- [2] ZHANG Gongcheng, WANG Dongdong, LAN Lei, et al. The geological characteristics of the large- and medium-sized gas fields in the South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2021, 40(2): 1-12.
- [3] 傅宁,邓运华,张功成,等.南海北部叠合断陷盆地海陆过渡相烃源岩及成藏贡献——以珠二坳陷白云凹陷为例[J].石油学报,2010,31(4):559-565.
FU Ning, DENG Yunhua, ZHANG Gongcheng, et al. Transitional source rock and its contribution to hydrocarbon accumulation in superimpose rift-subsidence basin of northern South China Sea; taking Baiyun sag of Zhu II depression as an example[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(4): 559-565.
- [4] 李友川,米立军,张功成,等.南海北部深水区烃源岩形成和分布研究[J].沉积学报,2011,29(5):970-979.

- LI Youchuan, MI Lijun, ZHANG Gongcheng, et al. The formation and distribution of source rocks for deep water area in the northern of South China Sea[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(5): 970-979.
- [5] 张功成, 何玉平, 沈怀磊. 琼东南盆地崖北凹陷崖城组煤系烃源岩分布及其意义[J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(4): 654-661.
- ZHANG Gongcheng, HE Yuping, SHEN Huailei. Distribution of Yacheng Formation coal measure in Yabei sag in Qiongdongnan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(4): 654-661.
- [6] WANG Dongdong, ZHANG Gongcheng, LI Zengxue, et al. The development characteristics and distribution predictions of the Paleogene coal-measure source rock in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2021, 95(1): 105-120.
- [7] 张功成, 米立军, 屈红军, 等. 全球深水盆地群分布格局与油气特征[J]. *石油学报*, 2011, 32(3): 369-378.
- ZHANG Gongcheng, MI Lijun, QU Hongjun, et al. A basic distributional framework of global deepwater basins and hydrocarbon characteristics[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(3): 369-378.
- [8] 张功成, 屈红军, 张凤廉, 等. 全球深水油气重大新发现及启示[J]. *石油学报*, 2019, 40(1): 1-34.
- ZHANG Gongcheng, QU Hongjun, ZHANG Fenglian, et al. Major new discoveries of oil and gas in global deepwaters and enlightenment[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(1): 1-34.
- [9] 李文浩, 张枝焕, 李友川, 等. 琼东南盆地古近系渐新统烃源岩地球化学特征及生烃潜力分析[J]. *天然气地球科学*, 2011, 22(4): 700-708.
- LI Wenhao, ZHANG Zhihuan, LI Youchuan, et al. Geochemical characteristics and hydrocarbon generation of Paleogene Oligocene source rocks in Qiongdongnan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2011, 22(4): 700-708.
- [10] 李文浩, 张枝焕, 李友川, 等. 世界深水含油气盆地烃源岩的发育特征及对南海北部深水区烃源岩的启示[J]. *中国地质*, 2014, 41(5): 1673-1681.
- LI Wenhao, ZHANG Zhihuan, LI Youchuan, et al. The development characteristics of source rocks in the main deepwater petroliferous basins of the world and their enlightenment to the study of source rocks in deep-water area of northern South China Sea[J]. *Geology in China*, 2014, 41(5): 1673-1681.
- [11] 李增学, 张功成, 李莹, 等. 中国海域区古近纪含煤盆地与煤系分布研究[J]. *地学前缘*, 2012, 19(4): 314-326.
- LI Zengxue, ZHANG Gongcheng, LI Ying, et al. The Paleogene coal-bearing basin and coal-measures distribution of China sea area[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(4): 314-326.
- [12] ZHANG Gongcheng, CHEN Ying, WANG Dongdong, et al. Cenozoic giant coal-bearing basin belt discovered in China's Sea area[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2023, 42(3): 101-112.
- [13] 张功成, 谢晓军, 王万银, 等. 中国南海含油气盆地构造类型及勘探潜力[J]. *石油学报*, 2013, 34(4): 611-627.
- ZHANG Gongcheng, XIE Xiaojun, WANG Wanyin, et al. Tectonic types of petroliferous basins and its exploration potential in the South China Sea[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(4): 611-627.
- [14] 翟光明, 王善书. 中国石油地质志(第16卷 下册)[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992.
- ZHAI Guangming, WANG Shanshu. *Petroleum geology of China (16 volumes, the second volume)*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992.
- [15] 邓鸣放, 陈伟煌. 崖13-1气田天然气特征及其源岩研究[J]. *中国海上油气(地质)*, 1989, 3(6): 11-18.
- DENG Mingfang, CHEN Weihuang. Characteristics of natural gas in Ya 13-1 gas pool & a study on its source rock[J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 1989, 3(6): 11-18.
- [16] 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.
- [17] 张功成, 曾清波, 苏龙, 等. 琼东南盆地深水陵水17-2大气田成藏机理[J]. *石油学报*, 2016, 37(增刊1): 34-46.
- ZHANG Gongcheng, ZENG Qingbo, SU Long, et al. Accumulation mechanism of LS 17-2 deep water giant gas field in Qiongdongnan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(S1): 34-46.
- [18] 屈红军, 张功成, 孙晓晗, 等. 中国深水盆地油气勘探及成藏研究进展——以中国南海北部为例[J]. *西北大学学报: 自然科学版*, 2022, 52(6): 1028-1043.
- QU Hongjun, ZHANG Gongcheng, SUN Xiaohan, et al. Research progress on hydrocarbon exploration and accumulation of deep water basins in China: taking the northern South China Sea as an example[J]. *Journal of Northwest University: Natural Science Edition*, 2022, 52(6): 1028-1043.
- [19] 谢玉洪, 张功成, 唐武, 等. 南海北部深水区油气成藏理论技术创新与勘探重大突破[J]. *天然气工业*, 2020, 40(12): 1-11.
- XIE Yuhong, ZHANG Gongcheng, TANG Wu, et al. Theoretical and technological innovation of oil and gas accumulation and major exploration breakthroughs in deep-water areas, northern South China Sea[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(12): 1-11.
- [20] 谢玉洪. 中国海油“十三五”油气勘探重大成果与“十四五”前景展望[J]. *中国石油勘探*, 2021, 26(1): 43-54.
- XIE Yuhong. Major achievements in oil and gas exploration of CNOOC in the 13th Five-Year Plan period and prospects in the 14th Five-Year Plan period[J]. *China Petroleum Exploration*, 2021, 26(1): 43-54.
- [21] 纪莫, 曾清波, 杨海章, 等. 中央坳陷带深水区的构造特征及琼东南盆地和松南低洼带[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2021, 40(2): 42-53.
- [22] 张功成, 屈红军, 刘世翔, 等. 边缘海构造旋回控制南海深水油气成藏[J]. *石油学报*, 2015, 36(5): 533-545.
- ZHANG Gongcheng, QU Hongjun, LIU Shixiang, et al. Tectonic cycle of marginal sea controlled the hydrocarbon accumulation in deep-water areas of South China Sea[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(5): 533-545.

- [23] 邵磊,李昂,吴国璋,等. 琼东南盆地沉积环境及物源演变特征[J]. 石油学报,2010,31(4):548-552.
SHAO Lei, LI Ang, WU Guoxuan, et al. Evolution of sedimentary environment and provenance in Qiongdongnan Basin in the northern South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(4): 548-552.
- [24] 李友川,邓运华,张功成. 中国近海海域烃源岩和油气的分带性[J]. 中国海上油气,2012,24(1):6-12.
LI Youchuan, DENG Yunhua, ZHANG Gongcheng. Zoned distribution of source rocks and hydrocarbon offshore China[J]. China Offshore Oil and Gas, 2012, 24(1): 6-12.
- [25] 刘妍轲,陈红汉,苏奥,等. 从含油气检测来洞悉琼东南盆地东部发育始新统烃源岩的可能性[J]. 地球科学,2016,41(9):1539-1547.
LIU Yanhua, CHEN Honghan, SU Ao, et al. Eocene source rock determination in Qiongdongnan Basin, the South China Sea: a hydrocarbon detection perspective[J]. Earth Science, 2016, 41(9): 1539-1547.
- [26] 付大巍,胡德胜,孙文钊,等. 琼东南盆地松西凹陷湖相烃源岩发育条件新认识与优质烃源岩刻画[J]. 石油实验地质,2023,45(2):288-295.
FU Dawei, HU Desheng, SUN Wenzhao, et al. New understanding on development conditions of lacustrine source rocks and characterization of high-quality source rocks in Songxi sag, Qiongdongnan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(2): 288-295.
- [27] 李增学,何玉平,刘海燕,等. 琼东南盆地崖城组煤的沉积学特征与聚煤模式[J]. 石油学报,2010,31(4):542-547.
LI Zengxue, HE Yuping, LIU Haiyan, et al. Sedimentology characteristics and coal-forming models in Yacheng Formation of Qiongdongnan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(4): 542-547.
- [28] 刘海燕,吕大炜,李增学,等. 琼东南盆地构造演化与含煤沉积作用研究[J]. 山东科技大学学报:自然科学版,2012,31(5):86-92.
LIU Haiyan, LÜ Dawei, LI Zengxue, et al. Research prospect on tectonic evolution and coal-bearing sedimentary action in Qiongdongnan Basin[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2012, 31(5): 86-92.
- [29] 张亚雄,朱筱敏,张功成,等. 中国南海琼东南盆地渐新统陵水组沉积特征[J]. 天然气地球科学,2013,24(5):956-964.
ZHANG Yaxiong, ZHU Xiaomin, ZHANG Gongcheng, et al. Sedimentary characteristics of oligocene Lingshui Formation in Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(5): 956-964.
- [30] 雷超,任建业,裴建翔,等. 琼东南盆地深水构造格局和幕式演化过程[J]. 地球科学:中国地质大学学报,2011,36(1):151-162.
LEI Chao, REN Jianye, PEI Jianxiang, et al. Tectonic framework and multiple episode tectonic evolution in deepwater area of Qiongdongnan Basin, northern continental margin of South China Sea[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2011, 36(1): 151-162.
- [31] 李俞锋,蒲仁海,樊笑微,等. 琼东南盆地北礁凹陷上新统等深流影响的水道沉积体系[J]. 海洋学报,2022,44(10):80-89.
LI Yufeng, PU Renhai, FAN Xiaowei, et al. Pliocene channel sedimentary system influenced by contour currents in the Beijiao sag, Qiongdongnan Basin[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(10): 80-89.
- [32] 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.
- [33] 黄保家,王振峰,梁刚. 琼东南盆地深水中央峡谷天然气来源及运聚模式[J]. 中国海上油气,2014,26(5):8-14.
HUANG Baojia, WANG Zhenfeng, LIANG Gang. Natural gas source and migration-accumulation pattern in the central canyon, the deep water area, Qiongdongnan Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2014, 26(5): 8-14.
- [34] 张功成,李友川,谢晓军,等. 南海边缘海构造旋回控制深水烃源岩有序分布[J]. 中国海上油气,2016,28(2):23-36.
ZHANG Gongcheng, LI Youchuan, XIE Xiaojun, et al. Tectonic cycle of marginal sea controls the ordered distribution of source rocks of deep water areas in South China Sea[J]. China Offshore Oil and Gas, 2016, 28(2): 23-36.
- [35] 张功成. 源热共控论[J]. 石油学报,2012,33(5):723-738.
ZHANG Gongcheng. Co-control of source and heat: the generation and distribution of hydrocarbons controlled by source rocks and heat[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(5): 723-738.
- [36] 张功成,李友川,刘世翔,等. “源热共控”中国海油气田“近岸油、远岸气”有序分布[J]. 中国石油勘探,2014,19(5):1-22.
ZHANG Gongcheng, LI Youchuan, LIU Shixiang, et al. “Co-control of source rock and heat” in orderly distribution of “near-shore oil and far-shore gas” in China’s offshore and adjacent area[J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(5): 1-22.
- [37] 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.
- [38] 李鸿明. 琼东南盆地松南低凸起中生代花岗岩潜山储层特征及控制因素分析[D]. 长春:吉林大学,2022.
LI Hongming. Reservoir characteristics and controlling factors of Mesozoic granite buried-hill in Songnan low uplift, Qiongdongnan Basin[D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [39] 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.
- [40] 付大巍. 琼东南盆地崖南低凸起古近系深层优质储层发育机制[J]. 石化技术,2023,30(2):146-148.
FU Dawei. Development mechanism of Paleogene deep high-quality reservoir in Yanan low uplift of Qiongdongnan Basin[J]. Petrochemical Industry Technology, 2023, 30(2): 146-148.
- [41] 朱沛苑,元庆涛,尤丽,等. 琼东南盆地宝岛区陵水组储层特征与

- 有利储层分布[J]. 天然气技术与经济, 2020, 14(1): 15-20.
ZHU Peiyuan, YUAN Qingtao, YOU Li, et al. Reservoir characteristics and favorable distribution of Lingshui Formation, Baodao area, Qiongdongnan Basin[J]. Natural Gas Technology and Economy, 2020, 14(1): 15-20.
- [42] 马明, 张功成, 陈国俊, 等. 琼东南盆地崖城地区储层古孔隙面貌恢复[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(11): 1734-1753.
MA Ming, ZHANG Gongcheng, CHEN Guojun, et al. Restoration of paleo-pore features of the sandstone in Yacheng area, Qiongdongnan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(11): 1734-1753.
- [43] 钟佳, 杨希冰, 朱沛苑, 等. 琼东南盆地宝岛—长昌凹陷陵水组储层差异演化特征[J]. 地球科学, 2019, 44(8): 2665-2676.
ZHONG Jia, YANG Xibing, ZHU Peiyuan, et al. Porosity evolution differences of the Lingshui Formation reservoir between Baodao and Changchang sag, Qiongdongnan Basin[J]. Earth Science, 2019, 44(8): 2665-2676.
- [44] 翟普强, 陈红汉, 谢玉洪, 等. 琼东南盆地深水区超压演化与油气运移模拟[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013, 44(10): 4187-4201.
ZHAI Puqiang, CHEN Honghan, XIE Yuhong, et al. Modelling of evolution of overpressure system and hydrocarbon migration in deepwater area of Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2013, 44(10): 4187-4201.
- [45] 王子嵩, 刘震, 王振峰, 等. 琼东南盆地深水区中央坳陷带异常压力分布特征[J]. 地球学报, 2014, 35(3): 355-364.
WANG Zisong, LIU Zhen, WANG Zhenfeng, et al. Distribution characteristics of abnormal pressure in central depression belt, deepwater area, Qiongdongnan (southeast Hainan) Basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2014, 35(3): 355-364.
- [46] 张功成, 贾庆军, 王万银, 等. 南海构造格局及其演化[J]. 地球物理学报, 2018, 61(10): 4194-4215.
ZHANG Gongcheng, JIA Qingjun, WANG Wanyin, et al. On tectonic framework and evolution of the South China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(10): 4194-4215.
- [47] YOU Li, XU Shouli, MAO Xuelian, et al. Reservoir characteristics and genetic mechanisms of the Mesozoic granite buried hills in the deepwater of the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2021, 95(1): 259-267.
(收稿日期 2023-10-02 改回日期 2023-12-01 编辑 雷永良)

(上接第 146 页)

- [28] 吴世强, 陈凤玲, 姜在兴, 等. 江汉盆地潜江凹陷古近系潜江组白云岩成因[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(1): 201-208.
WU Shiqiang, CHEN Fengling, JIANG Zaixing, et al. Origin of Qianjiang Formation dolostone in Qianjiang sag, Jianghan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(1): 201-208.
- [29] 李乐, 刘爱武, 漆智先, 等. 潜江凹陷王场背斜潜四下段盐韵律层页岩储层孔隙结构特征[J]. 地球科学, 2020, 45(2): 602-616.
LI Le, LIU Aiwu, QI Zhixian, et al. Pore structure characteristics of shale reservoir of the lower Qian 4 Member in the Wangchang anticline of the Qianjiang sag[J]. Earth Science, 2020, 45(2): 602-616.
- [30] 李乐, 王自翔, 郑有恒, 等. 江汉盆地潜江凹陷潜三段盐韵律层页岩油富集机理[J]. 地球科学, 2019, 44(3): 1012-1023.
LI Le, WANG Zixiang, ZHENG Youheng, et al. Mechanism of shale oil enrichment from the salt cyclotherm in Qian 3 Member of Qianjiang sag, Jianghan Basin[J]. Earth Science, 2019, 44(3): 1012-1023.
- [31] 徐文明, 蒋启贵, 刘伟新, 等. 江汉盆地潜江凹陷盐间潜 3⁴ 油组储层微观结构特征及与物性的关系[J]. 石油实验地质, 2020, 42(4): 565-574.
XU Wenming, JIANG Qigui, LIU Weixin, et al. Micro-pore structure in an inter-salt shale oil reservoir and the relationship with physical properties in the fourth section of the third Member of Qianjiang Formation, Qianjiang sag, Jianghan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(4): 565-574.
- [32] 蔡媛, 孔祥鑫, 姜在兴, 等. 潜江凹陷古近系盐间地层沉积环境与有机质富集——以潜江组三段下亚段 10 号韵律为例[J]. 石油学报, 2022, 43(5): 605-616.
CAI Yuan, KONG Xiangxin, JIANG Zaixing, et al. Sedimentary environment and organic matter enrichment of Paleogene inter-salt strata in Qianjiang sag, a case study from 10th rhythmite of the lower Member 3 of Qianjiang Formation[J]. Acta Petroli Sinica, 2022, 43(5): 605-616.
- [33] 沈云琦, 金之钧, 苏建政, 等. 中国陆相页岩油储层水平渗透率与垂直渗透率特征——以渤海湾盆地济阳坳陷和江汉盆地潜江凹陷为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 378-389.
SHEN Yunqi, JIN Zhijun, SU Jianzheng, et al. Characteristics of horizontal and vertical permeability of continental shale oil reservoirs in China: a case from Jiyang depression in Bohai Bay Basin and Qianjiang sag in Jianghan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 378-389.
(收稿日期 2023-08-30 改回日期 2023-10-31 编辑 雷永良)