

南海北部深水区油气成藏理论技术创新与勘探重大突破

谢玉洪¹ 张功成² 唐武² 赵钊²

1. 中国海洋石油集团有限公司 2. 中海油研究总院有限责任公司

摘要: 南海北部深水区油气资源丰富, 是我国重要的油气勘探开发领域, 历经 20 年的科技攻关与应用实践, 形成了一系列的理论和新技术。研究成果表明: ①南海北部陆缘大型拆离作用控制了深水盆地的形成和演化, 在陆缘深水区形成了始新世湖相、渐新世陆过渡相和渐新一中新世海相 3 套烃源岩; ②陆缘岩石圈强烈薄化带控制了南海北部的古地貌与沉积环境, 在珠江口盆地白云凹陷与琼东南盆地深水区形成了陆架边缘三角洲—深水扇体系和大型中央峡谷沉积体系的优质储层, 上述 3 套烃源岩与多类型储集体之间由不同的输导系统构成了 3 种油气成藏模式; ③针对深水区中深层地震成像差、储层预测与流体识别难的问题, 研发了“犁式”电缆宽频和立体震源采集技术、三维空间高精度重磁震联合反演技术、深水油气勘探海底检波器地震处理和纵横波联合反演技术、深水储层物性—含油气性定量评价技术; ④针对深水钻完井与测试关键技术缺乏等难题, 研发了一种深水探井井壁主动强化技术、深水表层集束批钻模式、深水大产能安全高效测试模块化技术。结论认为: ①建立了南海北部深水油气成藏理论、深水区油气勘探地球物理技术体系和深水安全高效钻完井测试技术, 形成了配套的深水油气勘探技术体系, 有效地指导和发现了一批大中型商业油气田, 探明天然气地质储量超过 $3\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$, 实现了我国深水油气勘探历史性重大突破; ②油气地质理论认识创新、地球物理和钻采关键瓶颈技术突破, 是南海北部深水区持续获得重大油气发现的必要条件。

关键词: 南海北部; 深水区; 天然气成藏模式; 地质理论; “犁式”采集; 模块化作业; 油气勘探技术系列

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2020.12.001

Theoretical and technological innovation of oil and gas accumulation and major exploration breakthroughs in deep-water areas, northern South China Sea

XIE Yuhong¹, ZHANG Gongcheng², TANG Wu², ZHAO Zhao²

(1. China National Offshore Oil Corporation, Beijing 100010, China; 2. CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 40, ISSUE 12, pp.1-11, 12/25/2020. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: The deep-water areas in the northern South China Sea are rich in oil and gas resources, and is an important oil and gas exploration and development region of China. Over two decades of scientific and technological researches and practices in this region, a series of theories and technologies has been formed. The research results were achieved as follows. (1) The large-scale detachment of the northern continental margin of the South China Sea controlled the formation and evolution of deep-water basins, forming three sets of source rocks (Eocene lacustrine facies, Oligocene marine-continental transitional facies and Oligocene-Miocene marine facies) in the deep-water area of the continental margin. The strong thinning zone of the continental margin lithosphere controlled the paleogeomorphology and sedimentary environment of the northern South China Sea. In the deep-water areas of the Baiyun sag in the Pearl River Mouth Basin and the Qiongdongnan Basin, high-quality reservoirs of continental shelf marginal delta-deep-water fan systems and large-scale central-canyon sedimentary systems were formed. The above three sets of source rocks and multi-types of reservoirs constitute three kinds of oil and gas accumulation models by different transport systems. (2) In view of the problems of poor seismic imaging, difficult reservoir prediction and fluid identification in middle-deep layers of the deep-water area, a set of targeted technologies has been researched and developed, including the "plough-type" cable broadband and stereo vibrator acquisition technology, three-dimensional high-precision gravity, magnetic and seismic joint inversion technology, subsea geophone seismic processing technology and P-S wave joint inversion technology for deep-water oil and gas exploration, and quantitative evaluation technology for deep-water reservoir physical properties and petroleum properties. (3) For lack of key technologies for deep-water drilling, completion and testing, a kind of deep-water exploratory well side-wall active strengthening technology, deep-water surface cluster batch drilling mode, and deep-water large-scale safe and efficient testing modular technology have been thus developed. It is concluded that: (1) the deep-water oil and gas accumulation theory in the northern South China Sea, the geophysical technology system for oil and gas exploration in deep-water area, and the safe and efficient drilling, completion and testing technology in deep-water area have been innovated and established, forming a supporting deep-water oil and gas exploration technology system, which has effectively guided and helped to discover a number of large and medium-sized commercial oil and gas fields, with proved geological reserves of natural gas more than $3\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$, achieving a historic breakthrough in deep-water oil and gas exploration in China, and (2) the innovation of oil and gas geological theory, the breakthroughs in key bottleneck technologies for geophysics, drilling and production are the necessary conditions for continuous major oil and gas discoveries in the deep-water area of the northern South China Sea.

Keywords: Northern South China Sea; Deep-water area; Accumulation model of natural gas; Geological theory; Plough-type acquisition; Modular operation; Oil and gas exploration technical series

基金项目: 国家科技重大专项“海洋深水区油气勘探关键技术”(编号:2016ZX05026)、“中国近海富烃凹陷优选与有利勘探方向预测”(编号:2016ZX05024-002), 国家重点基础研究发展计划项目“南海深水盆地油气资源形成与分布基础性研究”(编号:2009CB219400)。

作者简介: 谢玉洪, 1961 年生, 正高级工程师, 博士; 主要从事海洋油气勘探开发研究和技术管理工作。地址:(100010)北京市东城区朝阳门北大街 25 号。ORCID: 0000-0001-6382-5534。E-mail: xieyh@cnooc.com.cn

通信作者: 张功成, 1966 年生, 正高级工程师, 博士; 主要从事石油天然气地质研究与勘探工作。地址:(100028)北京市朝阳区太阳宫南街 6 号。ORCID: 0000-0003-1756-9562。E-mail: zhanggch@cnooc.com.cn

0 引言

自 2006 年我国成为天然气净进口国以来，天然气对外依存度不断上升^[1]，迫切需要寻找天然气勘探的新领域。21 世纪以来，国外深水获得了一大批油气勘探发现^[2-6]，我国深水区油气勘探潜力也引起了多方的关注^[2,7-10]。我国深水区油气勘探主要集中在南海北部陆坡深水区，地震勘探始于 20 世纪 70 年代末期，钻探始于 20 世纪 80 年代中期，截至 20 世纪末，始终没有获得商业性发现。在南海南部，我国做了大量科学考察、地球物理调查和部分综合评价。据原国土资源部的评价结果，南海油气资源丰富且大部分在深水区^[11]。南海深水油气勘探进展缓慢的主要原因之一在于该区边缘海深水成藏条件复杂，而且边缘海深水属于全球深水油气勘探的前缘领域^[12-15]，面临着深水区盆地结构与形成演化、深水区成藏主控因素与成藏机理、深水区构造成像、储层预测和烃类检测、深水安全高效钻井作业关键技术等世界级勘探难题的挑战。

2000 年以来，中国海洋石油集团有限公司（以下简称中海油）组织 600 余人的科研团队，依托国家科技重大专项、国家 973 计划和 863 计划、国家自然科学基金重点项目、国土资源部油气战略选区项目和中海油深水勘探直管项目等多项科研项目开展重点攻关。通过 20 年的攻关，从深水盆地的形成演化、烃源岩和深水储层分布规律的研究入手，创新建立了南海北部深水油气成藏理论，研发了深水

地震勘探和安全高效钻完井测试技术，形成了配套的深水油气勘探技术体系，实现了我国深水油气勘探的历史性重大突破。

1 区域地质概况

南海位于西太平洋和新特提斯两大构造域交接部位，在欧亚板块、印度—澳大利亚板块和菲律宾海板块 3 大板块的相互作用下，古南海地台新生代发生裂谷作用形成了具有洋壳结构的边缘海，发育了深海盆、大陆坡和大陆架等典型的海底地貌单元。我国深水区盆地（水深大于 300 m）主体位于南海海域，深水勘探主要集中在南海北部陆坡深水区的珠江口盆地和琼东南盆地（图 1）。新生代南海北部陆坡深水区盆地经历了多幕裂谷期、区域热沉降期和构造活动期 3 个构造演化阶段，发育陆相—海陆过渡相—海相沉积体系，具有始新世湖相、渐新世海陆过渡相和渐新世—中新世海相 3 套主力烃源岩。其中珠江口盆地以始新统文昌组中深湖相和渐新统海陆过渡相—煤系烃源岩为主，以渐新统珠海组及中新统珠江组砂岩为储集层，构成“下生上储”的油气成藏组合，而琼东南盆地深水区普遍发育渐新统崖城组煤系与陆源海相烃源岩，存在滨海相砂岩、扇三角洲相砂岩、盆底扇砂岩、中央水道砂岩、生物礁（滩）石灰岩等 5 种类型储集层，发育由一批大中型构造及岩性圈闭组成的有利构造带。

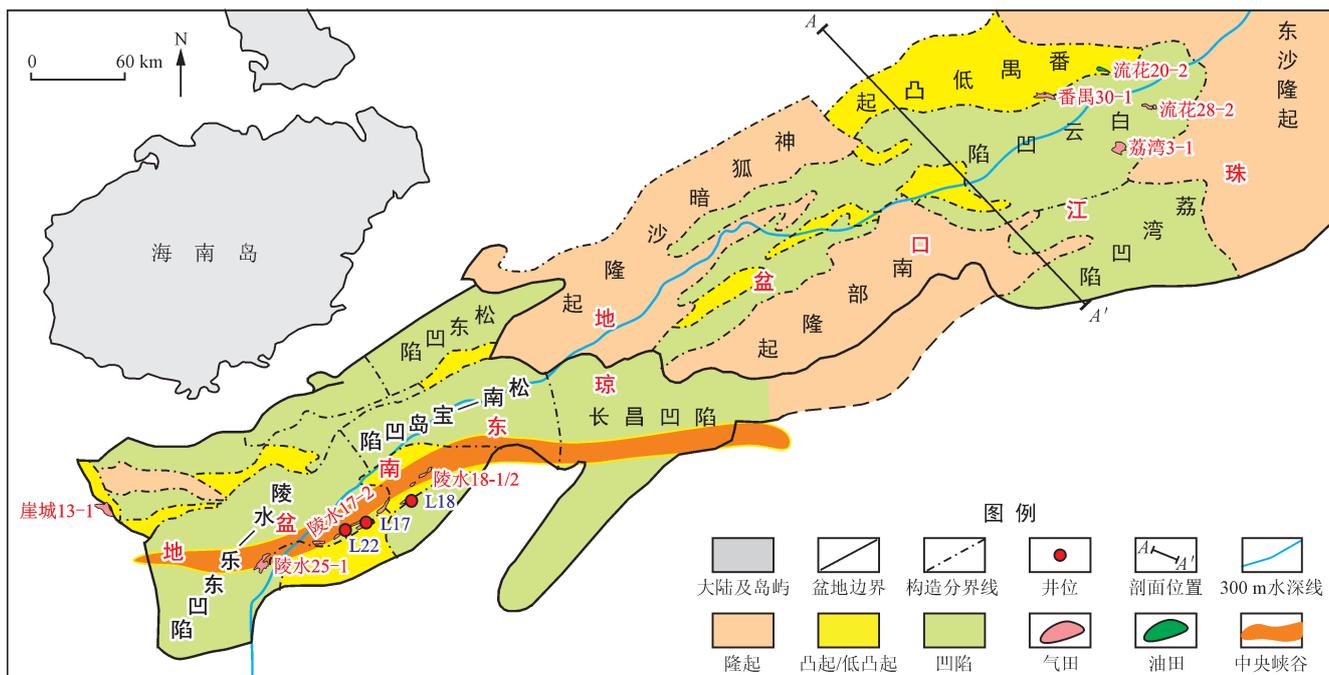


图 1 南海北部大陆边缘深水区构造单元划分图

2 南海北部深水油气成藏理论

2.1 南海北部陆缘大型拆离作用控制深水盆地的形成和演化

南海北部深水区发育大型拆离断层表明了其洋陆转换带的地质属性^[15]。通过白云凹陷长电缆地震剖面，特别是新连片的三维地震剖面解释发现深水区发育切穿地壳并向下变缓汇聚到深部莫霍滑脱面上的大型拆离断层（图 2）。之后，类似的发现在南海北部的整个陆缘深水地区，形成了一个面积为 $11.27 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的拆离断层分布区。同时发现变薄的陆壳和正常洋壳之间的洋陆过渡带由陆壳之下的蛇纹石化的地幔物质组成，地震纵波速度介于 $7.0 \sim 7.7 \text{ km/s}$ ，具有由成分莫霍面和地震莫霍面组成的“双莫霍面”结构，为利用地震剖面解释确定洋陆转换带提供了准确的标志。以地震剖面解释为基础，结合重力、磁力、热数据，开展了南海北部陆缘构造单元的识别和划分，由陆向洋划分出近端带、细颈化带、远端带、洋陆转换带和洋壳等结构构造单元（图 2）。大型拆离断层的发现和洋陆转换带地质属性的厘定，改变了“南海北部深水盆地为高角度正断层控制的断陷盆地、洋陆转换为直接接触”的传统认识。

洋陆转换带地质属性表明岩石圈的伸展破裂是非瞬时的，经历了一个逐渐薄化的过程。以南海北部陆缘深水区岩石圈伸展变形的研究为基础，通过定量模拟研究，发现南海北部的岩石圈在新生代期间经历了纯剪切变形控制的伸展、拆离断层控制的强烈薄化、剥离断层控制的地幔剥露和洋中脊扩张作用控制的裂解过程，大型拆离断层控制的简单剪切作用是南海北部陆缘岩石圈薄化的主要控制机制，地壳岩石圈的伸展破裂过程就是多层流变结构的地壳全面脆化的过程。深水盆地形成于地壳岩石圈

强烈薄化的深部背景，岩石圈伸展、薄化、剥露和裂解的非瞬时伸展破裂新模式是南海北部陆缘深水成盆机理。

在细颈化带和远端带内，南海北部陆缘深水盆地普遍发育形成于低角度正断层系统之上的拆离盆地，这类盆地的边界断层以低角度和大位移为特征，具有宽而深的可容空间。边界拆离断层的上盘多发育大型伸展断弯褶皱，盆地基底旋转幅度大，形成与传统裂谷系迥异的构造—地层格架。拆离断层开始活动的同拆离面和停止活动的后拆离面控制了北部陆缘深水区以拆离盆地为特征的裂陷幕，有别于陆架浅水区高角度正断层控制的裂陷幕。南海北部深水区具有由东向西逐渐变新的差异拆离过程，白云凹陷拆离式断陷作用发育在中始新世，琼东南盆地深水区的拆离盆地发育于渐新世，圈定了南海北部陆缘深水规模巨大的拆离盆地群^[8-10,15]。

2.2 南海北部陆缘发育 3 套规模烃源岩，具有巨大的资源潜力

南海北部深水区由于探井少且中深层地震资料品质差，尤其是在 BP、CHEVRON 等多家国际石油公司勘探失利后认为南海北部深水盆地烃源条件差而相继退出的情况下，深水区古近系优质烃源岩预测与潜力评价无疑是一项极具挑战性工作。同时，由于沉积环境不同（古气候与古地貌、构造演化与沉积充填、物源组成与富营养水系等），不同类型烃源岩的分布、形成与演化、生源组成与成烃演化机理、资源类型和潜力大小的差异性如何？深水区地壳强烈减薄和高热流背景对烃源岩热演化和油气生成作用的影响如何？这些都是深水勘探初期面临的巨大挑战。

南海北部岩石圈幕式伸展薄化过程形成的宽深盆地提供了深水规模烃源岩发育的巨大可容空间^[8,15]，

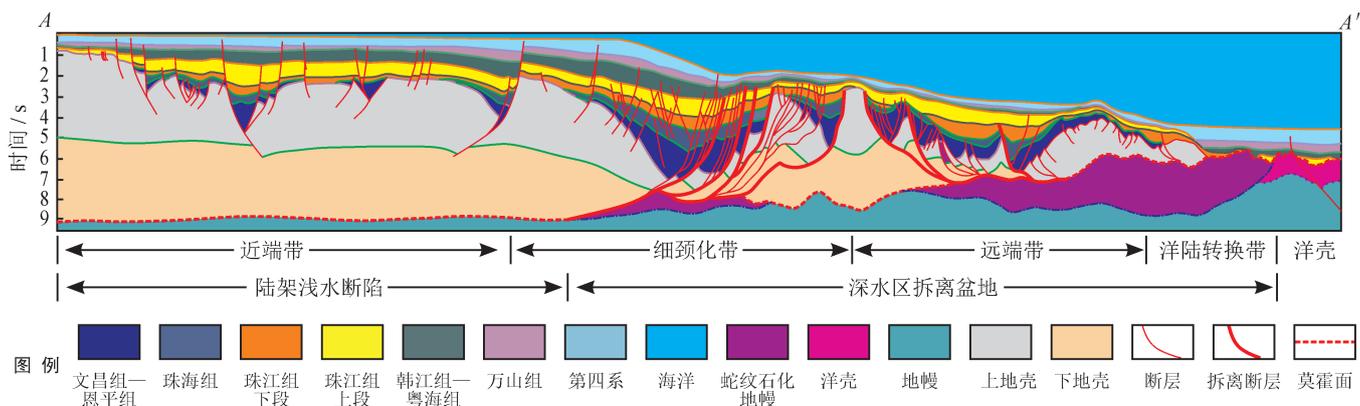


图 2 白云凹陷拆离盆地结构剖面图

有别于浅水区孤立的窄小断陷控制的类型单一、规模小的湖相烃源岩。南海北部陆缘深水区由始新世至渐新世依次发育始新世湖相、渐新世海陆过渡相和渐新世—中新世海相 3 套烃源岩（图 3）^[16-23]。湖相烃源岩以无定型有机质为主，烃源岩有机碳含量中等—高，有机质类型偏腐泥混合型，烃源岩规模大；海陆过渡相烃源岩以草质有机质为主，其次是无定型有机质，烃源岩有机碳含量变化大，有机质类型偏腐殖混合型，烃源岩体积大；海相烃源岩以陆源海相有机质为主，烃源岩有机碳含量中等，有机质类型偏腐殖混合型，烃源岩分布范围广。

南海北部大陆边缘深水区的陆坡—洋陆过渡带新生代期间岩石圈的强烈薄化作用导致莫霍面和软流圈大幅度抬升，来自地幔的热作用显著增强。钻井揭示，在北部近端带、细颈化带、远端带和洋陆转换带，地温梯度由 3 °C /100 m 增大到 8 °C /100 m，显示出软流圈界面抬升对深水区岩石圈热流背景的强烈控制作用，提供了深水区独特的高热流背景下的成烃热演化条件。高热流场加速了烃源岩快速、高强度生烃，当地温梯度由 3 °C /100 m 增大到 5 °C /100 m 时^[24-25]，烃源岩进入主生油窗埋藏深度由 4 000 ~ 5 300 m 减少到 2 500 ~ 3 300 m，主生气窗埋藏深度由 5 700 ~ 6 800 m 减少到 3 500 ~ 4 200 m，

生烃窗口变窄，埋深变浅，生烃强度显著增大，油气资源巨大。

采用盆地模拟成因法、油田规模序列法、圈闭统计与地质综合类比相结合的综合分析法评价，南海北部深水区油气资源量接近 90.00 × 10⁸ t 油当量。其中，珠江口盆地深水区天然气地质资源量为 2.56 × 10¹² m³，原油地质资源量为 22.92 × 10⁸ t；琼东南盆地深水区天然气地质资源量为 3.60 × 10¹² m³，改变了外国同行认为“南海深水区烃源潜力差”的认识。

2.3 南海北部陆缘强烈薄化带的深水区控砂机制

南海北部深水区东、西部发育差异巨大的深水沉积体系，珠江口盆地白云凹陷深水区位于古珠江出口、宽陆架之外的陆坡区，是陆源碎屑长途搬运的沉积终端。由于陆源碎屑沉积物相对较少，裂陷后期晚渐新世珠海组沉积以来的储层就成为油气勘探的重点问题。ELF、Shell 等多家国际石油公司钻探失利后认为，南海北部深水区缺乏类似墨西哥湾及大西洋沿岸典型被动大陆边缘盆地发育的大型深水储集体。

攻关研究发现，陆缘岩石圈强烈薄化带控制了南海北部的区域构造格局，进而影响了古地貌与沉积环境，在深水区发育了古珠江、古红河—蓝江两大水系供源的巨型深水沉积体系和相应的大型深水储

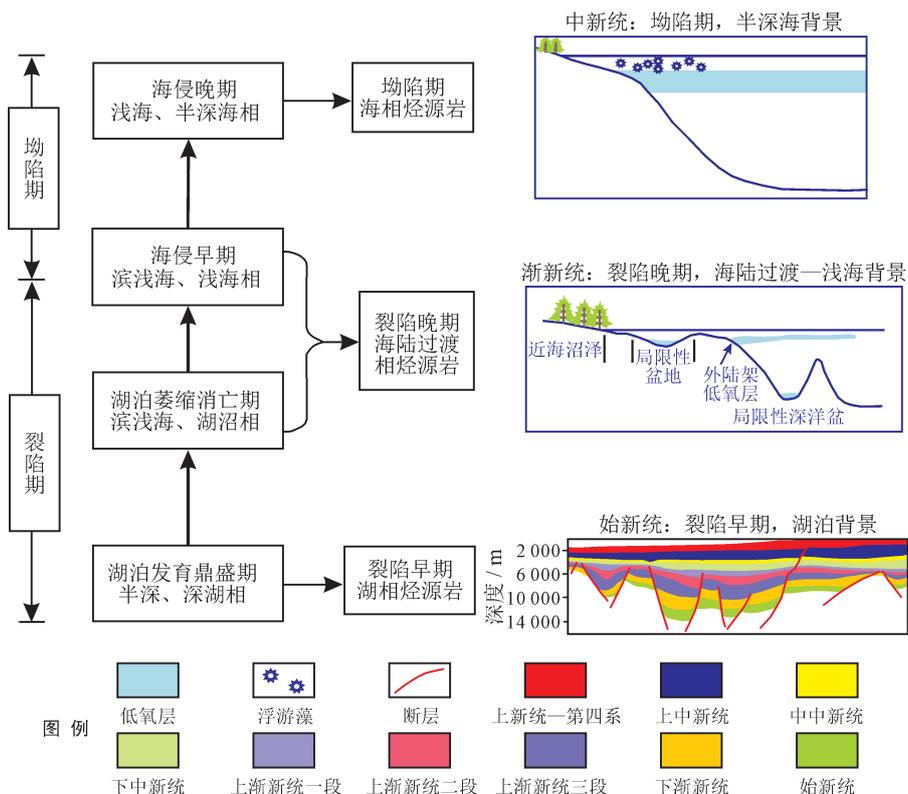


图 3 南海北部深水区盆地演化与烃源岩发育史模式图^[17-18]

集体^[26-31]：①珠江口盆地面积为 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的白云凹陷深水区的中新统陆架边缘三角洲—深水扇体系，受陆架坡折带迁移作用影响，形成两套陆架边缘三角洲—深水扇复合沉积系统；②琼东南盆地深水区长达 550 km 的黄流组中央大型轴向峡谷沉积体系，受复合物源供给、窄陆架、限制性的古凹槽地貌等影响，形成了多期次深水轴向峡谷沉积系统。

珠江口盆地深水区陆架坡折带控制下的陆架边缘三角洲—深水扇沉积模式揭示了陆架坡折带控制大型深水砂岩储集体时空展布机制^[26]。研究表明，强烈薄化的细颈化带在坳陷期的差异沉降作用控制了新近系陆架坡折带分布和陆坡深水沉积环境的形成，陆架坡折带和低位体系域控制了砂质陆架背景下的主要优质砂岩储层分布，低位期的陆架边缘三角洲、深水重力流水道和朵叶体多期相伴发育。受台阶式沉降的控制导致陆架坡折带后撤，渐新世和中新世的两个陆架坡折带分别发育于白云凹陷南北两侧，每个坡折带分别发育了陆架边缘三角洲—深水扇沉积体系。

琼东南盆地深水区中央坳陷薄化带控制下的大型轴向峡谷水道沉积充填模式揭示了中央峡谷凹槽制约下的大规模浊积水道砂岩时空展布机制（图 4）^[28-30]。地壳的强烈薄化控制了裂陷后期的差异沉降，形成了东西走向、向东延伸到南海西北次海盆的巨大的带状凹槽，宏观上控制了琼东南盆地深水区中央轴向峡谷水道的形成与分布。深水轴向中央峡谷水道可分为 3 个演化阶段：中央峡谷形成—侵蚀阶段、中央峡谷沉积充填阶段和废弃阶段，优质储层主要发育在沉积充填阶段，储层类型以浊积水道复合体为主。

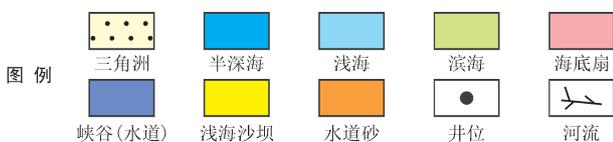
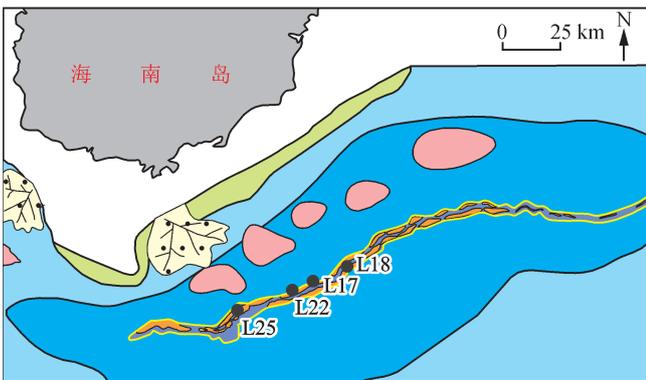


图 4 琼东南盆地黄流组沉积相平面图

珠江口盆地深水区处于陆缘岩石圈强烈薄化区，特殊的构造演化、沉积充填和热史过程导致深水的油气地质和成藏条件与浅水区、陆区的明显不同。在琼东南盆地深水区勘探早期，认为崖城 13-1 气田的成藏模式为以崖城组三角洲发育的煤系烃源岩与陵水组三角洲砂岩储层形成的三角洲“下生上储”成藏模式，该模式制约了后来的油气勘探。经过多年攻关后，提出了琼东南盆地深水区中央大峡谷水道成藏模式、珠江口盆地深水区深水扇成藏模式和陆架边缘三角洲成藏模式，揭示了南海北部深水区油气分布规律，明确了勘探方向，天然气钻探获得了历史性重大突破。

琼东南盆地深水区中央峡谷具有“裂隙垂向输导、峡谷水道砂岩储集、块体流泥岩封盖、高效充注”的成藏模式（图 5）^[30-39]。黄流组中央峡谷水道从东向西横贯陵水凹陷，峡谷水道内砂体与半深海—深海相泥岩形成了优质的储盖组合，水道砂岩与深水泥岩构成的岩性圈闭被后期侵蚀充填和差异压实作用改造，形成岩性—构造复合圈闭群，通过热流体底辟及伴生的微断裂沟通深部渐新统煤系烃源岩，以高压和浮力为油气运移的主要动力，垂向运移形成天然气藏，天然气分布横向连片、纵向多层叠置、近源、垂向晚期快速高效复合成藏。该模式指导了我国第一个自营深水千亿立方米级的陵水 17-2 等一批大中型气田的发现。

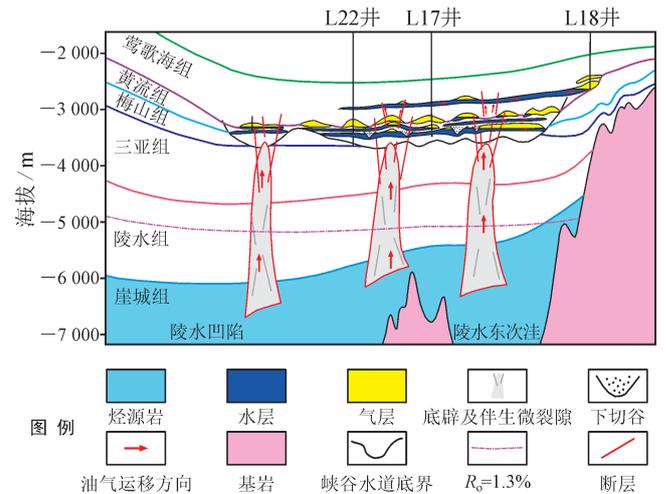


图 5 陵水 17-2 气田天然气成藏模式图

白云凹陷深水区陆坡深水扇具有“断层—底辟—砂体复合输导、陆坡深水扇砂岩储集、晚期构造活动驱动、高效充注”的成藏模式^[14,26,40]。陆架坡折带下方的陆坡深水区发育陆坡水道、深水扇朵叶储集体，通过断裂—底辟—砂体形成的台阶式复合输导体系与深部规模高热烃源灶沟通，幕式晚期断裂活动和

底辟带泄压是主要的成藏动力，长期发育的鼻状古隆起和复合输导体系控制了油气富集成藏，以近源、晚期台阶式天然气成藏为主。该模式有效指导了流花 28-2 等多个大中型气田的发现。

白云凹陷深水区陆架边缘三角洲具有“断层—构造脊复合输导、陆架边缘三角洲储集、晚期断裂活动驱动、高效充注”的成藏模式（图 6）。白云凹陷深水区陆架坡折带附近发育大规模的陆架边缘三角洲砂岩储集体，断裂—构造脊组合构成的油气优势输导系统，沟通了深部的多套规模烃源灶，生烃过程形成超压、晚期断裂活动造成泄压，是主要的成藏动力，长期发育的鼻状古隆起控制了油气富集带。该模式有效指导了白云凹陷北坡番禺 30-1、流花 20-2 等陆架边缘三角洲大型油气田的发现。

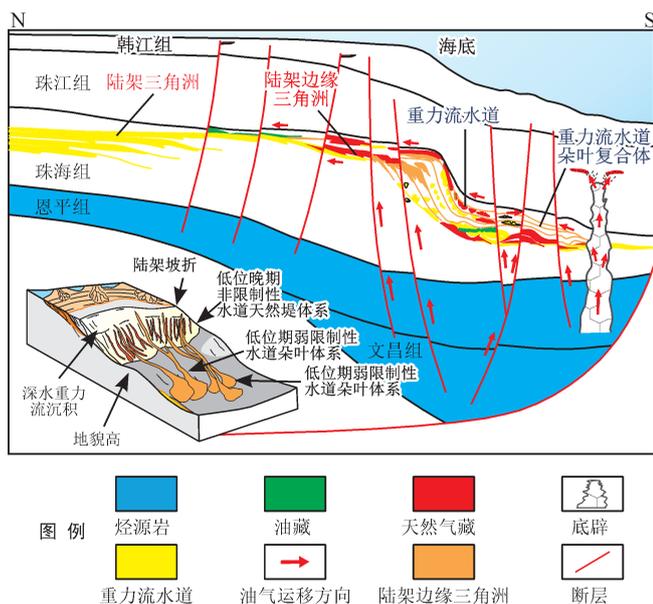


图 6 白云凹陷深水扇天然气成藏模式图

3 南海北部陆缘深水油气地球物理勘探技术

针对深水区特殊的地质条件和地震成像的瓶颈问题^[41]，从深水地震采集技术出发，通过海上“犁式”电缆、长电缆、立体震源采集技术攻关，获得宽频带、强照明、长记录的原始地震数据；针对崎岖海底造成的地震波散射和横向速度的剧烈变化，研究波动方程叠前深度域保幅偏移方法提高成像效果；针对深水区长电缆采集地震资料，优化去噪、去多次波方法，研究远偏移距叠加波形拉伸和各向异性速度优化，解决深部结构成像问题。通过攻关海底检波器多分量地震、转换横波成像及纵横波联合反演方法，突破

深水地震无法直接获取地层横波信息的屏障，改善储层流体预测精度。

为了识别陆缘岩石圈强烈薄化带的深部结构，突出以发育异常地幔高密度体为特征的岩石物性结构，构建地震资料约束条件下联合反演的地球物理模型，克服常规反演技术存在人为因素干扰、反演的多解性等问题的缺陷，精细刻画重磁异常边界，提高岩石圈结构预测的准确性和合理性，研发了针对深水区的大面积三维空间重磁震联合反演技术。

针对深水区复杂储层预测及流体识别难题，进行分频 AVO 技术、小波域储层流体识别技术及纵横波联合反演等技术攻关研究，建立深水区无井或少井条件下储层预测及流体识别技术体系，提高预测精度；通过研发、应用、创新、集成，建立了深水油气勘探地球物理技术体系。

3.1 “犁式”电缆宽频和立体震源采集处理技术

开发的“犁式”电缆宽频采集处理技术解决了鬼波干涉这一困扰海上地震成像多年的世界级难题^[42]，电缆作业深度为 100 m（常规采集电缆作业深度为 20 m）；地震道间距为 3.125 m（常规为 12.500 m），电缆深度定位精度为 0.5 m（常规为 1.0 m），使地震频带宽度从 3 个倍频程拓宽至 5 个倍频程，低频端由 6 Hz 拓宽至 3 Hz，高频端由 80 Hz 拓宽至 120 Hz，主频提高了 15 ~ 20 Hz（图 7），与国际一流的法国地球物理公司水平相当，技术整体达到国际领先水平。

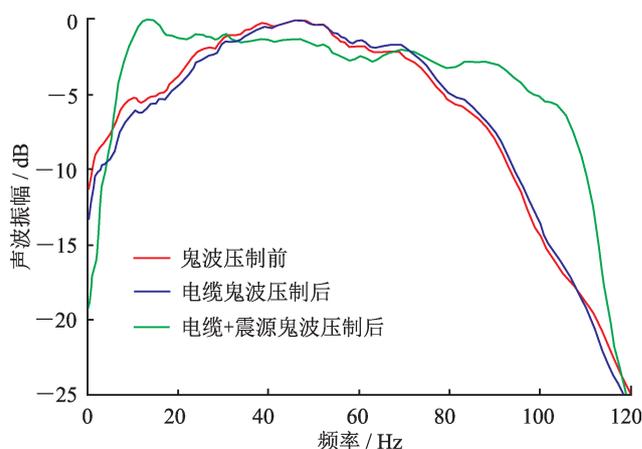


图 7 “犁式”电缆采集地震资料鬼波压制前后频谱对比图

研发了包括延迟激发—高分辨率梯形立体阵列震源组合、大容量平行四边形立体震源组合等多项立体震源采集处理技术，优化了地震子波，消除了震源鬼波干扰，拓展了频带宽度，提高地震分辨率及成像质量，主要目的层段信噪比提高 35%；波动

方程叠前深度域保幅偏移、远偏移距叠加波形拉伸和各向异性速度优化等技术改善了崎岖海底区地震成像质量，恢复了构造真实形态。

3.2 三维空间高精度重磁震联合反演技术

研发了重磁聚焦正则化反演、重磁三维共轭梯度最优化技术，建立了地震约束下的岩石圈异常体速度—密度关系模型，集成创新了三维高精度重磁震联合反演技术，在南海北部实现了面积达 $95 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、网格精度达 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的大面积高精度三维重磁震联合反演，获取了与实测数据吻合的岩石圈物性界面、异常地幔体的空间分布数据体，明确了南海北部陆缘岩石圈结构、深水区地壳薄化和洋陆转换带特征。

3.3 深水油气勘探海底检波器地震处理和纵横波联合反演技术

将海底检波器采集用于深水油气勘探，首次直接获取白云凹陷深水含油气层系的横波资料。自主研发了二次定位、双检合并、纵横波分离处理、R/T 旋转、镜像偏移等配套处理技术和联合反演技术，从地震数据中直接获取纵波阻抗、横波阻抗和纵横波速度比属性。使含油气储层弹性参数预测准确度由国际常规水平的 88.8% 提高到 97.6%，主频由 19.9 Hz 提高到 25.1 Hz，显著改善了储层预测和流体识别的精度。

3.4 深水储层物性—含油气性定量评价技术

研发了深水岩石物理综合分析、复杂储层物性—含油气性定量评价等技术，创新了基于小波理论的储层综合定量振幅烃类识别技术、叠前多参数预测技术、5 参数基本小波构建的分频 AVO 技术、双相介质小生境多参数联合反演算法和频散介质分频 AVO 反演技术。使琼东南盆地深水含油气目标预测成功率从 12% 提高到 88%。

4 深水安全高效钻完井作业技术

针对深水“极窄”的钻井作业窗口，以及溢流、卡钻、井漏等复杂情况的问题，目前通常采用多层次套管结构，以获取较高的压力窗口来保证作业的安全，但该常规手段增加了建井周期和作业成本。通过开展深水钻完井作业地层漏失机理研究，强化随钻压力监测和全过程环空当量循环密度 (ECD) 控制技术，开发承压堵漏颗粒，解决“极窄”压力窗口安全作业技术难题。

在深水钻完井作业过程中，由于泥线低温环境，极易形成水合物，一旦形成水合物，就会堵塞或损害防喷器 (BOP)、地面测试设备失效、改变钻完井液性能等，进而造成井下复杂情况及井控安全事故。为解决这一技术难题，通过建立天然气水合物理论预测模型，开展室内试验研究，对水合物的形成条件进行模拟和预测，得出抑制剂类型、浓度、地层水、钻井液、测试液对水合物生成条件的影响，建立南海北部深水气田水合物预测及预防模型；针对性分析钻井、测试、生产过程中的工况条件，以目标井水合物相态曲线为基础，对在钻井、测试和生产过程中各种工况下形成水合物风险的可能性进行预测评估，提出经济安全和简单易行的预防措施，指导现场作业，保证钻完井、测试和气体生产的安全实施^[43]。

针对国际深水测试常规做法测试准备时间长、测试设备占用大量平台甲板空间、作业效率低、安全问题突出、费用巨大等难题。以测试设备和流程管线所占空间最小为目标，在满足设备功能的前提下，充分考虑作业人员安全操作空间、方便作业等因素，进行测试设备选型，实现海上作业陆地化，开展深水测试地面设备模块化，形成具有自主知识产权的深水地面测试流程。

4.1 一种深水探井井壁主动强化技术

研制了预交联凝胶自适应承压堵漏颗粒，集合随钻压力监测、全过程环空当量循环密度 (ECD) 控制技术，改善深水窄压力窗口探井作业环境。预交联凝胶自适应承压颗粒通过架桥堵塞、骨架支撑、膨胀压实、化学胶结等作用来提高井壁周围的承压能力，相对原钻井液可提高地层承压能力 2.07 MPa，极窄安全窗口空间提高 30%，井身结构层次从 6 层次减至 4 层次程序，有效解决了深水窄密度窗口钻井溢流、卡钻、井漏等复杂情况频发的问题，保证了深水弱成岩地层的钻井作业的安全高效进行。

4.2 深水表层集束批钻模式

通过建立集束批钻最优化方案选择模型，对软硬悬挂模式下平台井间移位的所有工况进行分析，得到各工况下隔水管的结构响应，结合隔水管软悬挂和硬悬挂模式下作业准则，得到两种悬挂模式下许可的平台井间移位许可航速 (图 8)，创立了深水表层集束批钻模式，达到了琼东南盆地深水区中央峡谷带砂体群的快速钻探和高效评价的目的，该作业模式每批次节约工期 8 ~ 10 天。

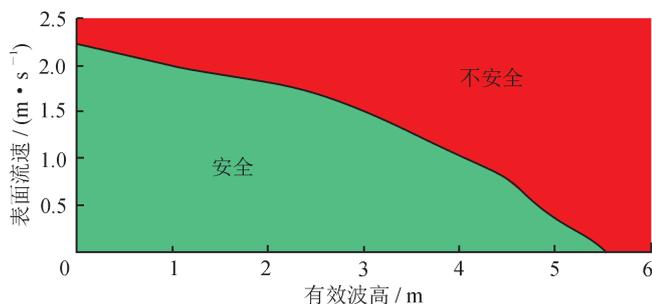


图8 携带隔水管航行波高与流速关系图

4.3 深水大产能安全高效测试模块化技术

通过深水测试地面设备选型、模块化组合设计、结构强度校核、测试地面流程优化设计,形成了以深水测试地面设备集成布控技术、深水测试地面设备模块化设计校核技术、深水测试地面流程优化设计技术和地面设备模块安全高效安装调试技术为核心的深水测试地面设备模块化技术体系,实现了大产量高流速下的水合物预防、出砂、振动监测和紧急关断功能,保证了在测试产量达到 $200 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 和平台在极端操作条件下的作业安全,节省甲板有效使用面积40%,单井节约安装工期60%,节约测试成本超过1亿元。

5 油气勘探成效

通过持续研究与成果应用,创建了南海北部深水油气成藏理论、创新了南海北部深水地球物理勘探关键技术和深水安全高效探井作业技术,该地质新理论及相关配套技术有效指导了深水区的油气勘探实践,实现了我国深水油气勘探历史性重大突破,勘探成效显著。截至2019年底,已取得陵水17-2等一批大中型商业油气发现,探明天然气储量超过 $3700 \times 10^8 \text{ m}^3$,原油储量超过 $7200 \times 10^4 \text{ t}$ 。其中,荔湾3-1气田于2014年建成投产,成为我国第一个深水油气生产基地;陵水17-2大气田正在开发建产中。

5.1 发现我国首个深水大气田及多个大中型油气田群,实现了深水区大中型油气田勘探的突破和持续发现

在南海北部深水油气成藏理论的指导下,在地球物理勘探关键技术和深水安全高效探井作业技术的支撑下,开展深水有利油气聚集区带的评价,优选了一批重点钻探目标。2006年钻探发现荔湾3-1气田,实现了我国深水勘探的里程碑式突破。继荔湾3-1气

田之后,在白云凹陷持续发现流花28-2、流花20-2等一系列大中型油气田。

5.2 深水区中央峡谷水道天然气勘探获得历史性突破,发现了陵水17-2大气田,并持续获得突破

在上述理论与技术指导下,开展琼东南盆地深水有利油气聚集区带的评价,优选了一批重点钻探目标,发现了陵水17-2大气田,实现了我国深水区首个千亿立方米级大气田勘探突破。随后相继发现了陵水25-1、陵水18-1和陵水18-2大中型气田。

5.3 我国首个深水气田荔湾3-1气田成功投产

2014年4月23日在白云凹陷实现首个深水天然气田荔湾3-1的成功投产;2020年9月流花20-2油田顺利投产;陵水17-2大气田预计2021年建成投产。

5.4 推动了南海深水区油气的勘探与开发

上述成果为我国南海北部深水海域油气勘探重大突破提供了理论和技术支撑,指导了对深水区盆地的富烃凹陷评价优选、成藏条件研究及优质储层评价,在勘探目标区带、靶点选择和气田储量、油气田总体开发方案(ODP)设计中发挥了重要的技术支持作用。目前,在南海北部深水区已部署采集三维地震超 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、二维地震超过 $10 \times 10^4 \text{ km}^2$,在白云凹陷、荔湾凹陷、长昌凹陷、松南—宝岛凹陷以及陵水—乐东凹陷发现了一批有利勘探目标。

6 结论

1) 南海北部陆缘大型拆离作用控制深水盆地的形成和演化,形成了陆缘深水区始新世湖相、渐新世海陆过渡相和渐新世—中新世海相3套烃源岩。同时,陆缘岩石圈强烈薄化带控制了南海北部的古地貌与沉积环境,在珠江口盆地白云深水区与琼东南盆地深水区分别发育陆架边缘三角洲—深水扇体系及大型中央峡谷沉积体系。

2) 南海北部陆缘深水油气地球物理勘探技术的创新改善了深水区地震成像质量,揭示了陆缘岩石圈强烈薄化带的深部结构,提高了储层预测及流体识别的精度,助力深水区大中型油气田的发现。

3) 深水优质高效探井作业技术体系的建立保障了南海北部陆缘深水区钻井作业的安全,提高了测试作业时效,降低了测试和作业成本。

4) 南海北部陆缘深水勘探实践证明,油气地质理论认识创新、地球物理和钻采关键瓶颈技术突破是获得重大油气发现的必要条件。

参 考 文 献

- [1] 陆家亮, 唐红君, 孙玉平. 抑制我国天然气对外依存度过快增长的对策与建议[J]. 天然气工业, 2019, 39(8): 1-9.
LU Jialiang, TANG Hongjun, SUN Yuping. Measures and suggestions on restraining China's excessive growth of natural gas external dependence[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(8): 1-9.
- [2] 杨川恒, 杜栩, 潘和顺, 等. 国外深水领域油气勘探新进展及我国南海北部陆坡深水油气勘探潜力[J]. 地学前缘, 2000, 7(3): 247-256.
YANG Chuanheng, DU Xu, PAN Heshun, et al. Advances in worldwide deep water hydrocarbon exploration and oil and gas exploration potential in the northern continental slope in South China Sea[J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(3): 247-256.
- [3] 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.
- [4] 张功成, 屈红军, 冯杨伟, 等. 深水油气地质学概论[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
ZHANG Gongcheng, QU Hongjun, FENG Yangwei, et al. An introduction to the petroleum geology of deepwater settings[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [5] 张功成, 屈红军, 赵冲, 等. 全球深水油气勘探 40 年大发现及未来勘探前景[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(10): 1447-1477.
ZHANG Gongcheng, QU Hongjun, ZHAO Chong, et al. Giant discoveries of oil and gas exploration in global deepwaters in 40 years and the prospect of exploration[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(10): 1447-1477.
- [6] 屈红军, 张功成. 全球深水富油气盆地分布格局及成藏主控因素[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(10): 1478-1487.
QU Hongjun, ZHANG Gongcheng. Distribution framework and main factors controlling hydrocarbon accumulation of global oil and gas-rich deepwater basins[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(10): 1478-1487.
- [7] 朱伟林, 钟锴, 李友川, 等. 南海北部深水油气成藏与勘探[J]. 科学通报, 2012, 57(20): 1833-1841.
ZHU Weilin, ZHONG Kai, LI Youchuan, et al. Characteristics of hydrocarbon accumulation and exploration potential of the northern South China Sea deepwater basins[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(20): 1833-1841.
- [8] 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.
- [9] 张功成. 南海北部陆坡深水构造演化及其特征[J]. 石油学报, 2010, 31(4): 528-533.
ZHANG Gongcheng. Tectonic evolution of deepwater area of northern continental margin in South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(4): 528-533.
- [10] 米立军, 张功成. 南海北部陆坡深水海域油气资源战略调查及评价[M]. 北京: 地质出版社, 2011.
MI Lijun, ZHANG Gongcheng. The investigation and evaluation of strategic petroleum resource in the deepwater area of northern continental slope in South China Sea[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011.
- [11] 国土资源部油气资源战略研究中心. 新一轮全国油气资源评价[M]. 北京: 中国大地出版社, 2009.
Oil and Gas Resource Strategy Research Center of Ministry of Land and Resources. A new round of oil and gas resource evaluation[M]. Beijing: China Land Press, 2009.
- [12] 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.
- [13] 张功成, 王璞珺, 吴景富, 等. 边缘海构造旋回: 南海演化的新模式[J]. 地学前缘, 2015, 22(3): 27-37.
ZHANG Gongcheng, WANG Pujun, WU Jingfu, et al. Tectonic cycle of marginal oceanic sea: A new evolution model of the South China Sea[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(3): 27-37.
- [14] 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.
- [15] 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区白云凹陷为例[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 deepwater area of northern South China Sea[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(1): 27-39.
- [16] 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中国南海北部深水烃源岩的启示[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 deepwater area of northern South China Sea[J]. Geology in China, 2014, 41(5): 1673-1681.
- [17] 李友川, 米立军, 张功成, 等. 南海北部深水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 South China Sea[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(5): 970-979.
- [18] 李友川, 傅宁, 张枝焕. 南海北部深水盆地烃源条件和油气源[J]. 石油学报, 2013, 34(2): 247-254.
LI Youchuan, FU Ning, ZHANG Zhihuan. Hydrocarbon source conditions and origins in the deepwater area in the northern South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(2): 247-254.
- [19] 马文宏, 何家雄, 姚永坚, 等. 南海北部边缘盆地第三系沉积及主要烃源岩发育特征[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(1): 41-48.

- MA Wenhong, HE Jiaxiong, YAO Yongjian, et al. Characteristics of Tertiary sediments and main source rocks, northern South China Sea[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2008, 19(1): 41-48.
- [20] 米立军, 刘震, 张功成, 等. 南海北部深水区白云凹陷古近系烃源岩的早期预测[J]. *沉积学报*, 2007, 25(1): 139-146.
- MI Lijun, LIU Zhen, ZHANG Gongcheng, et al. Early forecast and evaluation study on chief source rock in Baiyun Depression[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(1): 139-146.
- [21] 张功成, 杨海长, 陈莹, 等. 白云凹陷——珠江口盆地深水区一个巨大的富生气凹陷[J]. *天然气工业*, 2014, 34(11): 11-25.
- ZHANG Gongcheng, YANG Haichang, CHEN Ying, et al. The Baiyun Sag: A giant rich gas-generation sag in the deepwater area of the Pearl River Mouth Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(11): 11-25.
- [22] 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.
- [23] 朱俊章, 施和生, 庞雄, 等. 白云凹陷天然气生成与大中型气田形成关系[J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(2): 213-221.
- ZHU Junzhang, SHI Hesheng, PANG Xiong, et al. Discussion on natural gas generation and giant-medium size gas field formation in Baiyun Sag[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(2): 213-221.
- [24] 唐晓音, 胡圣标, 张功成, 等. 南海北部大陆边缘盆地地热特征与油气富集[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(2): 572-585.
- TANG Xiaoyin, HU Shengbiao, ZHANG Gongcheng, et al. Geothermal characteristics and hydrocarbon accumulation of the northern marginal basins, South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(2): 572-585.
- [25] 单竞男, 张功成, 吴景富, 等. 南海北缘琼东南盆地热结构与莫霍面温度[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(8): 2102-2109.
- SHAN Jingnan, ZHANG Gongcheng, WU Jingfu, et al. Thermal structure and Moho temperature of Qiongdongnan Basin, northern margin of the South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(8): 2102-2109.
- [26] 庞雄, 施和生, 朱明, 等. 再论白云深水区油气勘探前景[J]. *中国海上油气*, 2014, 26(3): 23-29.
- PANG Xiong, SHI Hesheng, ZHU Ming, et al. A further discussion on the hydrocarbon exploration potential in Baiyun deep water area[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2014, 26(3): 23-29.
- [27] 谢玉洪, 范彩伟, 周家雄, 等. 琼东南盆地中中新世重力流海底扇沉积特征及控制因素[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(2): 220-228.
- XIE Yuhong, FAN Caiwei, ZHOU Jiaxiong, et al. Sedimentary features and controlling factors of the gravity flows in submarine fan of Middle Miocene in the Qiongdongnan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(2): 220-228.
- [28] 王振峰. 深水重要油气储层——琼东南盆地中央峡谷体系[J]. *沉积学报*, 2012, 30(4): 646-653.
- WANG Zhenfeng. Important deepwater hydrocarbon reservoirs: The central canyon system in the Qiongdongnan Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(4): 646-653.
- [29] 苏明, 李俊良, 姜涛, 等. 琼东南盆地中央峡谷的形态及成因[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(4): 85-93.
- SU Ming, LI Junliang, JIANG Tao, et al. Morphological features and formation mechanism of central canyon in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(4): 85-93.
- [30] 许怀智, 蔡东升, 孙志鹏, 等. 琼东南盆地中央峡谷沉积充填特征及油气地质意义[J]. *地质学报*, 2012, 86(4): 641-650.
- XU Huaizhi, CAI Dongsheng, SUN Zhipeng, et al. Filling characters of central submarine canyon of Qiongdongnan Basin and its significance of petroleum geology[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(4): 641-650.
- [31] 何云龙, 解习农, 李俊良, 等. 琼东南盆地陆坡体系发育特征及其控制因素[J]. *地质科技情报*, 2010, 29(2): 118-122.
- HE Yunlong, XIE Xinong, LI Junliang, et al. Depositional characteristics and controlling factors of continental slope system in the Qiongdongnan Basin[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2010, 29(2): 118-122.
- [32] 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.
- [33] 王振峰, 孙志鹏, 朱继田, 等. 南海西部深水天然气地质与大气田重大发现[J]. *天然气工业*, 2015, 35(10): 11-20.
- WANG Zhenfeng, SUN Zhipeng, ZHU Jitian, et al. Natural gas geological characteristics and great discovery of large gas fields in deep water area of the western South China Sea[J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(10): 11-20.
- [34] 张迎朝, 徐新德, 甘军, 等. 琼东南盆地深水区L18气田上新统地层圈闭气田形成条件及成藏模式[J]. *海洋学报(中文版)*, 2019, 41(3): 120-132.
- ZHANG Yingchao, XU Xinde, GAN Jun, et al. Formation condition and accumulation of Pliocene strata-trapped gas field L18 in the deepwater area of the Qiongdongnan Basin[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 41(3): 120-132.
- [35] 何家雄, 祝有海, 翁荣南, 等. 南海北部边缘盆地泥底辟及泥火山特征及其与油气运聚关系[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2010, 35(1): 75-86.
- HE Jiaxiong, ZHU Youhai, WENG Rongnan, et al. Characters of northwest mud diapirs volcanoes in South China Sea and relationship between them and accumulation and migration of oil and gas[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2010, 35(1): 75-86.
- [36] 谢玉洪, 李绪深, 徐新德, 等. 莺琼盆地高温高压领域天然气成藏与勘探重大突破[J]. *中国石油勘探*, 2016, 21(4): 19-29.
- XIE Yuhong, LI Xushen, XU Xinde, et al. Gas accumulation and great exploration breakthroughs in HTHP formations within Yinggehai-Qiongdongnan Basins[J]. *China Petroleum Exploration*, 2016, 21(4): 19-29.
- [37] 谢玉洪. 中国海洋石油总公司油气勘探新进展及展望[J]. *中国石油勘探*, 2018, 23(1): 26-35.

- XIE Yuhong. New progress and prospect of oil and gas exploration of China National Offshore Oil Corporation[J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(1): 26-35.
- [38] 谢玉洪, 高阳东. 中国海油近期国内勘探进展与勘探方向 [J]. 中国石油勘探, 2020, 25(1): 20-30.
- XIE Yuhong, GAO Yangdong. Recent domestic exploration progress and direction of CNOOC[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1): 20-30.
- [39] 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.
- [40] 米立军, 张忠涛, 庞雄, 等. 南海北部陆缘白云凹陷油气富集规律及主控因素 [J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(5): 902-913.
- MI Lijun, ZHANG Zhongtao, PANG Xiong, et al. Main controlling factors of hydrocarbon accumulation in Baiyun Sag at northern continental margin of South China Sea[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(5): 902-913.
- [41] 谢玉洪, 李列, 袁全社. 海上宽频地震勘探技术在琼东南盆地深水区的应 [J]. 石油地球物理勘探, 2012, 47(3): 430-435.
- XIE Yuhong, LI Lie, YUAN Quanshe. Broadband marine seismic exploration in Qiongdongnan Basin deepwater areas[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2012, 47(3): 430-435.
- [42] 刘春成, 陶杰, 焦振华, 等. 海洋“犁式”电缆采集技术研究与实践 [J]. 石油地球物理勘探, 2016, 51(6): 1069-1074.
- LIU Chuncheng, TAO Jie, JIAO Zhenhua, et al. Marine plow streamer acquisition[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2016, 51(6): 1069-1074.
- [43] 李中, 方满宗, 李磊. 南海西部深水钻井实践 [J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(1): 92-95.
- LI Zhong, FANG Manzong, LI Lei. Drilling practices of deepwater well in west of South China Sea[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(1): 92-95.

(修改回稿日期 2020-10-19 编辑 陈古明)

中国西南油气田公司建成年产 300 亿立方米大气区

2020 年 12 月 14 日 8 时, 中国西南油气田公司年产气量突破 $300 \times 10^8 \text{ m}^3$, 标志着我国西南地区首个年产 300 亿立方米大气区正式建成, 也意味着川油人 45 载奋斗终圆梦。预计该公司今年的天然气产量将达到 $316 \times 10^8 \text{ m}^3$, 约占全国天然气总产量的 1/6。

四川盆地天然气资源量位居全国第一, 但地质条件复杂、探明率尚不到 10%, 天然气勘探开发潜力巨大。今年以来, 面对疫情与低油价的“双重大考”, 该公司克服重重困难, 在川中古隆起北斜坡取得天然气勘探重大新突破; 天然气日产量突破 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$, 年产气量有望增加近 $50 \times 10^8 \text{ m}^3$; 62 年累计产气量超过 $5000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

截至目前, 该公司已在四川盆地开发气田 114 个、生产井 2 300 余口, 建成 3 个年产气 $100 \times 10^8 \text{ m}^3$ 区块。其中, 安岳气区年产能超过 $150 \times 10^8 \text{ m}^3$, 成为四川盆地最大的常规气区; 页岩气产量年底将突破 $100 \times 10^8 \text{ m}^3$, 成为我国最大的页岩气产区; 老气田和川东北高含硫、川西深层、致密气、火山岩等新领域, 则保持了每年稳产天然气 $100 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的能力。

四川盆地是我国天然气工业的摇篮, 1958 年组织的川中石油会战, 结束了大西南无油的历史; 1966 年, 红村会战发现了我国第一个整装大气田——威远气田。1975 年, 为扭转北煤南运的被动局面, 改变我国能源结构比例, 国家提出了在四川加快上产 300 亿立方米天然气和铺设川汉输气管道的构想。从此, “建设 300 亿立方米战略大气区”实现“川气出川”, 融入了川油人的文化血脉, 成为川油人的夙愿与梦想。

改革开放以来, 川油人矢志不渝寻找大场面建设大气区, 通过理论创新和技术进步, 相继发现了川东北高含硫、安岳寒武系—震旦系、川南页岩气等一批高产高效气田。

2004 年, 在建成国内首个百亿立方米气区之际, 忠武线通气, 实现了“川气出川”。如今, 该公司生产的天然气惠及 1 000 余家大中型工业用户、2 500 多万户居民、10 000 余家公用事业用户。四川省和重庆市成为我国气化率最高、用气范围最广的地区, 川渝地区天然气在一次能源消费结构中的占比为 16.4%, 远高于 8.3% 的全国平均水平, 形成了“覆盖川渝、联通全国、内外互通、战略储备”的天然气产运销格局, 助力区域经济发展和全国冬季保供。

在“十三五”收官之年, 经过有关院士专家的专题咨询论证, 该公司制定了新“三步走”战略: 到 2025 年, 天然气年产量力争达到 $500 \times 10^8 \text{ m}^3$; 到 2030 年, 天然气年产量力争达到 $800 \times 10^8 \text{ m}^3$, 成为国内最大的现代化天然气战略基地。

(天工 摘自中国石油新闻中心)

下载网址: <http://news.cnpc.com.cn/system/2020/12/15/030019118.shtml>

下载日期: 2020-12-15