

# 南海北部深水油气勘探进展与未来展望

米立军<sup>1\*</sup>, 周守为<sup>2</sup>, 谢玉洪<sup>2</sup>, 张功成<sup>1</sup>, 杨海长<sup>1</sup>

(1. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028; 2. 中国海洋石油集团有限公司, 北京 100010)

**摘要:** 加大油气勘探开发力度, 减少石油和天然气对外依存度, 保障国家能源安全是关系国家经济社会发展的全局性、战略性问题。“十一五”以来, 中国海洋石油集团有限公司在南海北部深水领域持续加强基础研究, 加快技术创新和加大勘探投入, 相继获得一批重大油气勘探发现。本文阐述了五项重大勘探地质理论认识和两项勘探技术创新成果, 探讨了深水油气勘探将要面临的挑战和应对策略, 展望了南海北部深水区中深层、潜山及岩性圈闭三大领域的勘探前景。研究指出, 南海北部陆缘深水区的拆离作用控制了珠江口盆地和琼东南盆地大型凹陷的形成, 发育了湖相、海陆过渡相和海相三套规模烃源岩; 高-变地温控制凹陷烃源岩快速生烃, 建立了琼东南盆地深水区大型轴向峡谷水道油气成藏模式、白云凹陷深水区深水扇天然气晚期成藏模式和深水区“断-脊”联控油气差异聚集成藏模式。同时自主创新研发了立体震源激发和“犁形”缆接收的宽频采集处理技术。在多项地质理论认识和创新技术的指导下, 发现以“深海一号”(陵水17-2)等为代表的一批大中型气田, 对于保障粤港澳大湾区能源供应、促进海南自贸区(港)能源绿色发展、推动我国油气增储上产具有重要意义。

**关键词:** 南海北部; 深水区; 油气勘探; 深水天然气

**中图分类号:** TE5      **文献标识码:** A

## Deep-Water Oil and Gas Exploration in Northern South China Sea: Progress and Outlook

Mi Lijun<sup>1\*</sup>, Zhou Shouwei<sup>2</sup>, Xie Yuhong<sup>2</sup>, Zhang Gongcheng<sup>1</sup>, Yang Haizhang<sup>1</sup>

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

**Abstract:** Strengthening exploration and development of oil and gas is crucial for mitigating China's reliance on oil and gas supply from foreign countries and ensuring national energy security. Since the 11th Five-Year period, fundamental research on the deep-water area of the northern South China Sea has been strengthened, along with the acceleration of technological innovation and increase in exploration investment. As a result, a series of major exploration discoveries were found. This paper presents five major learnings regarding the theories of exploration geology and two achievements in the innovation of exploration technology. It also discusses the new challenges and coping strategies for oil and gas exploration in deep-water areas, and prospects the exploration potentials of three major exploration fields—medium-deep layers, buried hills, and lithologic traps—in the deep-water area of the northern South China Sea. Our research shows that the detachment of the continental margin in the deep-water area of northern South China Sea controls the formation of large sags in the Pearl River Estuary Basin and the Qiongdongnan Basin. Three sets of large-scale source rocks were developed from lacustrine, terrestrial-marine transitional, and marine sedimentary facies. High yet variable subsurface temperature

**收稿日期:** 2022-04-08; **修回日期:** 2022-04-23

**通讯作者:** \*米立军, 中海油研究总院有限责任公司教授级高级工程师, 主要从事油气勘探领域的管理和综合研究工作; E-mail: milj@cnooc.com.cn

**资助项目:** 中国工程院咨询项目“面向2035海洋能源开发及核心技术战略研究”(2020-ZD-13); 国家科技重大专项(2008ZX05025, 2011ZX05025, 2016ZX05026)

**本刊网址:** www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

controls the rapid hydrocarbon generation from the source rocks in the sags. In addition, three different hydrocarbon accumulation modes were established: accumulation mode of large axial canyon channel in the deep-water area of the Qiongdongnan Basin, late natural gas accumulation mode of deep-water fan in the deep-water area of Baiyun Sag, and differential hydrocarbon accumulation mode jointly controlled by fault and ridge. Meanwhile, the broadband seismic acquisition and processing technology for three-dimensional source triggering and plow-like cable receiving was independently developed. Guided by several geological theories and innovative technologies, a series of large- and medium-sized gas fields represented by “Deep Sea No. 1” (LS 17-2) were discovered, which are of great significance to ensuring the energy supply of the Guangdong – Hong Kong – Macao Greater Bay Area, facilitating the green development of energy in the Hainan Free Trade Zone (Port), and promoting the increase of oil and gas reserves and production in China.

**Keywords:** northern South China Sea; deep water; oil and gas exploration; deep water natural gas

### 一、前言

21 世纪以来，世界海洋油气勘探的重心已经进入深水领域。全球已探知的近半数海洋油气资源分布在深水区，近五年全球重大油气发现近 70% 集中在大西洋两岸的多个被动陆缘深水巨型盆地，深水已经成为全球油气增储上产的主要领域。南海是我国唯一发育深水盆地的海域，九段线内海域总面积超  $2 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，水深超过 300 m 的深水区面积约为

$1.5 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，以北纬  $17^\circ 05'$  为界分为南海北部和中南部，共发育 12 个主要盆地，盆地总面积约为  $7.5 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。南海北部深水区海域面积为  $2 \times 10^5 \text{ km}^2$ ，水深 300~3000 m [1]，发育白云凹陷、荔湾凹陷、开平凹陷、顺德凹陷、乐东-陵水凹陷、松南-宝岛凹陷、长昌凹陷等新生代凹陷，凹陷总面积约为  $9 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，勘探前景广阔，潜力巨大，是我国油气最重要的战略接替区之一（见图 1） [2]。

南海北部深水区勘探长期面临海底地形崎岖

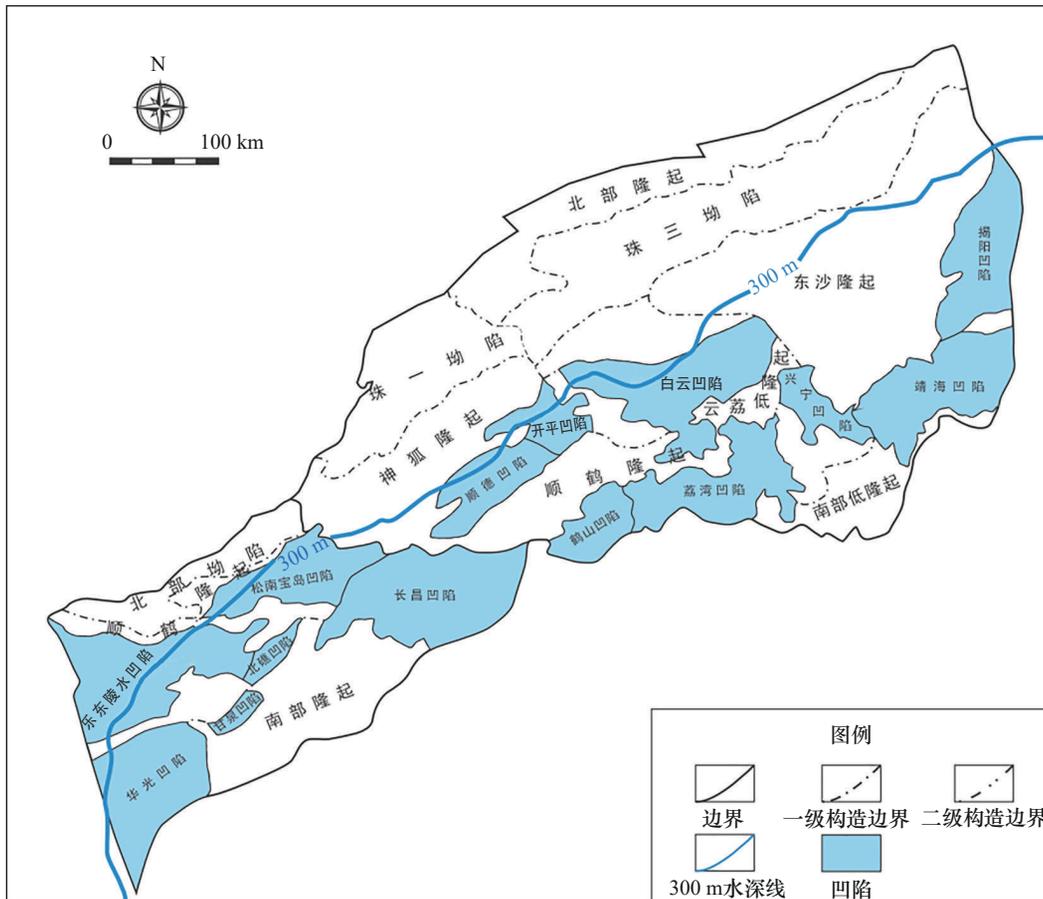


图1 南海北部深水区新生代凹陷分布图

(见图2)、火山发育、地震成像差、优质烃源岩和储层缺乏及油气成藏模式不明等难题，勘探风险极大。回顾2000年以前，以英国石油公司(BP)为代表的6家国际知名石油公司在南海历时15年的油气勘探失利教训，认为明确大中型油气田的形成条件是勘探成功的前提，理论认识的创新是勘探成功的基础，关键技术的突破是勘探成功的重要保障。中国海洋石油集团有限公司在建设中国海上大中型油气田的实践与探索中，始终坚持将技术发展放在首位，历经十余载，完成国家级、省部级和公司级三级重大科研项目十余项，通过自主创新，转变勘探思路，形成了一系列重大理论认识和勘探关键技术，引领南海北部深水区获得勘探突破。

截至2020年，南海北部深水区累计发现以陵水17-2等为代表的大中型气田10个、流花20-2等规模油田3个，累计发现天然气三级地质储量约 $7 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ，原油三级地质储量 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。已建成深海1号、荔湾3-1两个深水大气田和流花油田群，预期年产天然气超 $6 \times 10^9 \text{ m}^3$ 、石油超 $4.5 \times 10^6 \text{ t}$ 。

## 二、理论技术创新与勘探突破

经过深入研究和不断探索，中国海洋石油集团有限公司创新发展了南海北部陆缘深水区拆离控盆、深水烃源岩形成与生烃机理、琼东南盆地深水大型轴向峡谷水道的高丰度油气成藏模式、白云凹陷深水高-变地温对油气差异富集控制作用和深水“断-脊”联控原油晚期成藏模式等五项地质理论，以及创新研发立体震源激发与“犁形”缆接收的宽频采集处理技术和表层批钻与测试模块化工程作业两项关键技术，指导了深水区油气勘探和工

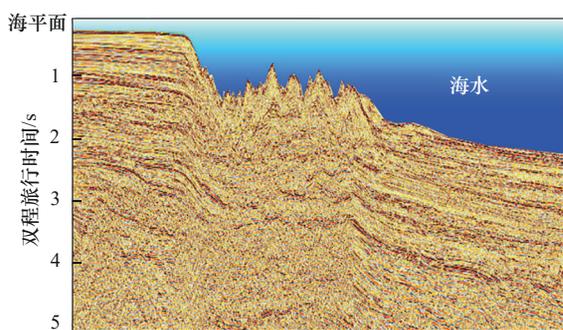


图2 南海北部深水区崎岖海底地形剖面图

程作业，推动了陵水17-2、流花20-2等一批油气田的发现，对加快深水区勘探进程具有里程碑式意义。

### (一) 创新提出南海北部陆缘深水拆离作用控制形成大规模凹陷群

应用重、磁、震资料，研究南海北部深水陆缘盆地结构，首次发现并证实了陆缘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系。受这套大型拆离断层系的控制，南海北部陆缘深水区岩石圈经历了“伸展、薄化、剥露和裂解”的非瞬时破裂过程[3]，形成了一个西起琼东南盆地中央拗陷，东至台西南盆地，总面积达 $1.1 \times 10^5 \text{ km}^2$ 、范围广阔、规模巨大的拆离凹陷群。陆缘深水拆离盆地群的发现，深刻改变了传统的陆缘深水盆地为高角度正断层控制的断陷盆地的认识，揭示出强烈的拆离断层作用可以形成“宽而深”的盆地，进而控制盆地群的差异演化[4]，为形成规模烃源岩和大型深水储集层提供了可容空间。拆离盆地控制形成的巨厚深水区勘探层系的发现，有效支撑了国家走向深水的重大勘探决策，也对国内外深水陆源盆地的研究有着重要的借鉴和指导意义。

### (二) 首次阐明了南海北部陆缘深水三套规模烃源岩的形成与高温快速生烃机理

南海北部深水盆地发育湖相、海陆过渡相和海相三套规模烃源岩。受岩石圈的幕式伸展薄化过程控制，南海北部深水区的烃源岩具有“类型多、规模大、分布广”的特征，由始新世至渐新世依次发育了高角度断陷控制的湖相烃源岩、拆离断陷控制的海陆过渡相烃源岩和地壳薄化基础上的深凹陷控制的海相烃源岩。湖相烃源岩规模较大，以偏腐泥型有机质为主，丰度较高，生油潜力大；海陆过渡相烃源岩则以偏腐殖型有机质为主，其中煤系规模成带广泛分布，有机碳含量变化大，烃源岩体积大，控制了天然气生成和聚集；海相烃源岩分布范围广，以偏腐殖型有机质为主，有机碳含量中等[5]。

南海北部陆缘新生代期间受强烈的地幔热作用影响[6]，地温梯度从浅水区到深水区，由 $3 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ 增大到 $5 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ 。深水独特的高热流场促使三

套烃源岩快速、高强度生烃，烃源岩进入主生油窗埋藏深度可由4000~5300 m减少到2500~3300 m，主生气窗埋藏深度可由5700~6800 m减少到3500~4200 m，生烃门限变浅（见图3），生烃强度显著增大，预测南海北部深水区油气资源潜力为 $7 \times 10^9$  t油当量，显示出巨大的勘探开发前景 [7]。

### （三）创立琼东南盆地深水区大型轴向峡谷水道储集、天然气立体高效成藏模式

琼东南盆地深水区中央峡谷水道大气田成藏模式具有“裂隙垂向导输、峡谷水道砂岩储集、块体泥岩封盖、高效充注”的特征（见图4）。中央峡谷水道砂岩储层形成于裂后沉降期，古红河-蓝江

水系在盆地中央坳陷内侵蚀沉积，形成了世界罕见的长达550 km、宽9~35 km的大型中央轴向峡谷水道 [8,9]，发育浊积水道砂体。水道砂岩与四周及上覆半深海-深海泥岩构成的岩性圈闭受差异压实和后期侵蚀充填作用的改造，形成岩性-构造复合圈闭群。新近纪特别是近1000万年以来，受红河断裂右旋走滑和青藏高原快速隆升的影响，琼东南盆地西部快速沉积沉降，其产生的超压诱发了泥底辟和断裂活化，形成了连通深部渐新统煤系烃源岩的通道，在浮力和超压动力作用下，构成了汇聚面积约几十平方千米的立体垂向导输体系，天然气晚期快速高效充注，最终形成横向连片，纵向多层叠置的深水气田群。以我国第一个自营且超千亿立方米的陵水17-2大气田为首的一系列大中型深水气田就是在这一模式的指导下发现的。

### （四）首次提出高-变地温控制白云凹陷油气差异富集、断-脊联控成藏模式

白云凹陷内发育下始新统文昌组断陷期湖相、上始新统恩平组断拗期海陆过渡相和渐新统珠海组拗陷期海相三套三类烃源岩。文昌组沉积时期主要发育浅湖相、局部半深湖相烃源岩，烃源岩以II型干酪根为主，有机质丰度较高（总有机碳含量约为

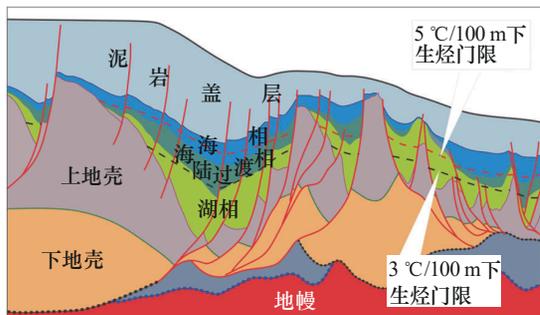


图3 南海北部深水区烃源岩成熟模式图

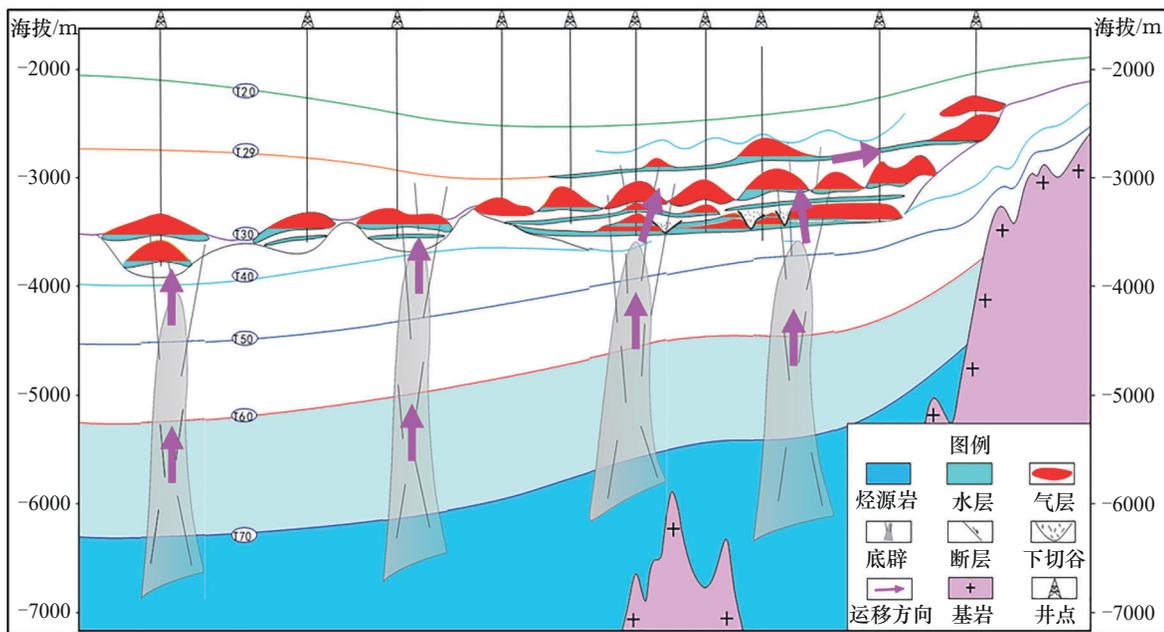


图4 琼东南盆地陵水17-2气田成藏模式图

注：T70—崖城组顶界面；T60—陵水组顶界面；T50—三亚组顶界面；T40—梅山组顶界面；T3—黄流组顶界面；T29—莺歌海组二段内部不整合面；T20—莺歌海组顶界面。

0.9%~1.7%)。恩平组沉积时期发育海陆过渡相烃源岩,主要为II<sub>2</sub>型干酪根,含少量II<sub>1</sub>或III型,总有机碳含量高,约为0.8%~5.8%。珠海组主要为陆源海相烃源岩,总有机碳含量中等,以II<sub>2</sub>型干酪根为主,生烃潜力低-中等。三套烃源岩在高变地温控制下呈现“凹缘生油、凹内生气”的特征。白云深水区现今地温梯度为2.94~5.22 °C/100 m,由北向南逐渐升高。凹陷内以深湖-浅海-海陆过渡相烃源岩为主,烃源岩丰度高、埋深大、热演化程度高,以生气为主,是找气的主战场;白云东凹等边缘凹陷和地区以浅湖相-海陆过渡相烃源岩沉积为主,埋深较小,烃源岩热演化程度相对较低,油气兼生,是找油的主战场 [10]。

同时,白云东洼在“断-脊”联控作用下,油田与气田差异聚集成藏(见图5)。以II<sub>2</sub>型干酪根为主要生烃有机质的海陆过渡相烃源岩在到达生油门限后,生成的原油通过油源断裂向上运移到浅层海相砂岩中,在浅层海相砂岩构造脊汇聚效应控制下,广泛分布在海相砂岩中的原油汇聚于构造脊线附近,做侧向运移,并在运移路径上的圈闭中聚集,在约1450万年到750万年形成早期油藏;随着烃源岩热演化程度升高,生成原油减少,天然气增加,约550万年以来,东沙运动控制的晚期断裂活动,有利于天然气沿着早期原油运移通道,将已成藏的原油驱替到更远的圈闭成藏,并占据原油藏,形成新气藏,从而形成“近凹气、远凹油”的差异油气成藏模式 [11]。以该模式为指导,发现南海北部深水区第一个大中型油田群——流花油田群,其中流花21-2油田即将投产,油田群高峰年产将超4.5×10<sup>6</sup> t。白云东洼原油生产

基地的建成是白云凹陷油气差异富集认识引领勘探落地开花的生动案例。

### (五) 创建白云凹陷深水区深水扇天然气晚期成藏模式

作者团队建立了白云凹陷凹内高成熟烃源岩生气,底辟和断层复合输导,深水扇砂岩储层聚集,天然气晚期充注的成藏模式。白云凹陷深水扇砂岩储层形成于中新世早期,距今2380万年的白云运动塑造了白云凹陷深水陆坡沉积环境,来自北部的古珠江三角洲在凹内深水陆坡形成大型深水扇砂体沉积,在鼻状凸起或断层的块断作用下,形成构造-岩性复合圈闭或岩性圈闭。圈闭下方或附近的文昌组湖相和恩平组海陆过渡相烃源岩,随着埋深增大、地温升高,于1500万年前开始生成大量天然气和少量石油。

距今1050万年以来的东沙运动使白云凹陷在继承沉降的基础上发育多个贯通凹陷深浅层的底辟构造和大量北西向断裂,同时使早期北东向断裂进一步活化。深部文昌-恩平组烃源岩生成的天然气在超压和浮力作用下,形成以垂向或垂向-侧向复合输导的独特的深水扇天然气晚期成藏模式 [12]。该模式指导勘探发现了深水区荔湾3-1大气田,探明天然气地质储量近5×10<sup>10</sup> m<sup>3</sup>。

### (六) 创新研发立体震源激发和“犁形”缆接收的宽频采集处理技术

创新研发多项立体震源采集处理技术,优化地震子波,拓展频带宽度,消除震源“鬼波”干扰,提高地震分辨率及成像质量,大幅度提高目的层段的信噪比;研发了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,优化深水崎岖海底位置的地震成像质量,以恢复真实构造形态 [13]。

攻关“犁形”缆接收宽频采集处理技术,解决了困扰海上地震成像多年的“鬼波”干涉这一世界级难题。其电缆作业深度为5~50 m,斜缆段长度与水平缆段长度之比达到2:1至3:1,电缆沉放精度为0.5 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拓展至3 Hz,高频端由80 Hz拓展至120 Hz,主频提高了15~20 Hz,整体技术达到国际领先水平(见图6) [14]。

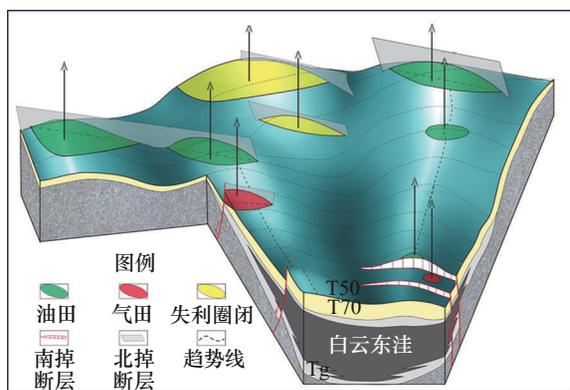


图5 白云东洼油气富集成藏模式

注: T50—珠江组下段顶界面; T70—恩平组顶界面; Tg—基底顶界面。

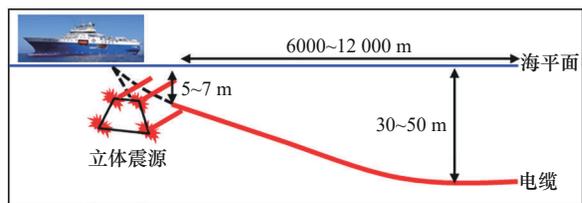


图6 立体震源和“犁形”缆采集示意图

### (七) 创新表层批钻与测试模块化工程作业技术

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模拟研究,确定各工况下隔水管的结构响应,结合隔水管软悬挂和防喷器组(BOP)硬悬挂模式下作业准则,得到两种悬挂模式下平台井间移位许可航速,解决了软硬悬挂模式下平台井间移位带来的安全及技术问题,创立了深水表层集束批钻模式,并在琼东南盆地深水中央峡谷带砂体群的高效钻探和评价实践中极大地节约了工期和成本。

通过深水测试设备选型、结构强度校核、地面流程优化、模块化组合设计,形成了以深水测试设备集成布控技术、地面流程优化设计技术、地面设备模块化设计校核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,实现了温度 $-20\sim 130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、压力 $15\ 000\ \text{psi}$ 、天然气 $2.2\times 10^6\ \text{m}^3/\text{d}$ 高流速下的水合物预防、出砂和振动监测及紧急关断或旁通功能,保证了深水开发高配产条件下测试极限产能的平台安全。深水测试模块化工艺的应用,使得海上安装时间从30天缩短为10天,拆卸时间从16天缩短为4天,单井节约工期22天,节约甲板有效使用面积40%,节约测试成本超过1亿元。

## 三、面临的新挑战与应对策略

尽管深水油气勘探现阶段取得了一定的突破,但还须认识到要实现南海北部深水区大气区还面临着“成盆、成烃、成储、成藏”四个方面以及地震采集和处理技术上的新挑战。

(1) 南海北部深水区盆地原型恢复。受制于钻井资料少且分布不均、海水深度大、崎岖海底以及地下地质构造复杂等因素造成的深层地震资料信噪比低、成像品质差等因素,南海北部深水区存在盆间、盆内始新统—渐新统划分和对比不统一,叠合

型盆地的原型恢复和古地理再造存在争议。重点展开中深部地层地质—地球物理综合划分与对比技术,通过磁异常、古生物、古气候、同位素等方法进行地层的划分与对比。在边缘海构造旋回控制深水油气成藏理论指导下[15],开展构造界面成因对比、共轭陆缘盆地原型恢复技术、构造解析恢复技术,进行盆地原型的恢复。

(2) 陆源海相烃源岩的形成机理认识与分布预测。国内外中生代和古生代海相烃源岩生烃母质以浮游藻类为主,有机质类型不同,无成熟经验借鉴。海相烃源岩沉积有机质富集的生物成因和地质成因的耦合关系及其地质—地球化学响应不清楚,烃源岩的分布规律不清,尚未形成有效的陆源海相烃源岩分布预测技术。重点开展陆源烃源岩有机质来源、富集及其沉积环境的成因关系研究,加强生排烃动力学模拟研究,明确新生代陆源海相烃源岩排烃机制与排烃效率,发展以沉积有机相为核心的陆源海相烃源岩地质—地球物理综合预测技术。

(3) “高变地温”背景下深层碎屑岩储层评价。南海北部深水区深层钻井少,优质储层识别与表征难度大;“高变地温”导致储层成岩作用加快,储层普遍低渗化,其形成机制不清楚,而且深层碎屑岩地层阻抗差异小,地球物理储层预测难度大。重点开展层序格架内的碎屑岩沉积体系正、反演攻关,明确深层高能粗碎屑岩相展布规律。从成因机理上研究高变地温背景下优质储层的成岩控储机制,利用数值模拟和物理模拟手段,深化成岩机理研究,确定地球物理储层预测的敏感参数,发展深水区高变地温背景下深层储层反演回剥和优质储层地质预测技术。

(4) “深水—深层”及“高温—高压”(双深双高)下油气运聚成藏研究。“双深双高”条件下油气相态复杂,成藏动力复杂,油气运聚动力学研究难度大,缺乏油气成藏过程恢复等方面的有效技术手段,无法做到定量模拟油气运聚。重点开展恢复盆地不同时期压力场、温度场特征及深部流体的物理化学性质与相态特征及其与盆地演化的关系,耦合盆地埋藏过程、三场(温度场、压力场、应力场)演化、油气生成动力学、储集层成岩动力学、油气运聚动力学,发展“源—聚—藏”立体成藏动态恢复和优势运移路径预测技术,全方位、多视角、全尺度定量模拟油气的生成、运聚及成藏过

程, 精细预测含油气区带、油气藏规模及分布。

(5) 中深层高精度地震资料采集和处理技术攻关。目前深水区依然存在陡陆坡、崎岖海底、火成岩干扰, 中深层地震成像不清晰, 常规频带、窄方位地震资料无法满足深水复杂目标勘探需求, 且采集作业成本较高, 地震资料处理技术难度大, 工业化推广程度低。在采集方面加大拖缆多船混合采集攻关力度, 提高深水“两宽两高”地震采集作业效率; 加大海底节点(OBN)地震采集技术及装备的自主研发力度; 在处理方面, 重点攻关富低频激发、拖缆及OBN采集的“两宽两高”地震资料配套处理技术, 提升“两宽两高”地震数据的处理、解释一体化应用能力。

### 四、南海北部深水区勘探展望

推进能源供给侧结构性改革, 大力发展绿色低碳能源, 加快天然气等清洁能源利用, 优化粤港澳大湾区能源结构和布局, 这是新时代蓝图规划的必然要求, 也是深水勘探开发的新机遇。经过几代海油勘探人、特别是“深海一号”大气田(陵水17-2气田)的成功投产, 南海北部万亿大气区呼之欲出, 而深水天然气勘探开发正在成为大气区建设的主力军。

从资源潜力看, 南海北部深水区勘探仍处于早期阶段, 已探明天然气 $3.9 \times 10^{11} \text{ m}^3$ , 待发现天然气资源量为 $3.6 \times 10^{12} \text{ m}^3$ , 其中珠江口盆地白云凹陷和琼东南盆地深水区各 $1.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$ , 待发现天然气主要分布在面积超过 $1 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的白云、乐东、陵水和松南-宝岛四大凹陷中, 因此深水区仍然具备继续发现千亿立方米级气田群的潜力。

从勘探领域看, 天然气主要富集在中深层、潜山和岩性圈闭三大领域 [16]。

(1) 中深层领域, 目前深水区已发现90%的油气储量分布在3300 m以浅的新近系, 揭示深度超过3500 m的中深层钻井仅占总钻井数的10%。白云5-2构造是白云凹陷中深层领域的代表, 该构造位于白云凹陷北部斜坡带, 煤系烃源岩带状分布的认识表明凹陷斜坡带是有利的勘探区带, 主要目的层珠海组和恩平组埋深超3500 m, 钻井钻遇气层厚度超百米。研究认为珠江口盆地白云凹陷北部斜坡带、东南斜坡带、西南断阶带的古近系和琼东南盆

地中央坳陷及周缘古近系是深水区中深层勘探的有利区带, 资源前景约 $3.5 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 。

(2) 潜山领域, 南海北部深水区发育中生代印支期花岗岩潜山, 目前琼东南盆地深水东区花岗岩潜山已获突破, 勘探前景广阔 [17]。琼东南盆地松南低凸起上已发现永乐8-3潜山气藏, 储层为前新生代浅红色花岗岩, 砂砾质风化带、风化裂缝带和内幕裂缝带孔隙度分别为18.6%、7.7%和9.7%, 储层发育且物性较好, 钻遇气层厚度约为85 m, 测试产量 $1.3 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。研究认为珠江口盆地白云凹陷西南断阶带、东南凸起和琼东南盆地陵南-松南低凸起是深水区潜山勘探的重点区带, 资源前景 $3 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 。

(3) 岩性圈闭领域, 该领域勘探尚处于起步阶段, 南海北部沉积盆地陆坡深水区中新统-上新统具备发育海底扇的背景, 勘探潜力较大。琼东南盆地深水海底扇已获得勘探突破, 钻井钻遇气层约50 m, 海底扇浊积砂岩储层条件好, 为中孔中渗储层, 与上覆深水泥岩构成良好储盖组合。研究认为珠江口盆地白云凹陷北部斜坡带三角洲前缘-浊积扇、东南斜坡地层超覆带和琼东南盆地中央坳陷海底扇是勘探的主要区带, 资源前景 $2.5 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 。

#### 利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

**Received date:** April 8, 2022; **Revised date:** April 23, 2022

**Corresponding author:** Mi Lijun is a professor-level senior engineer from CNOOC Research Institute Co., Ltd. His major research field is management and comprehensive research in oil and gas exploration. E-mail: milj@cnooc.com.cn

**Funding project:** Chinese Academy of Engineering project “Strategic Research on Marine Energy Development and Core Technologies for 2035” (2020-ZD-13); National Science and Technology Major Project (2008ZX05025, 2011ZX05025, 2016ZX05026)

#### 参考文献

- [1] 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 L J, Zhang Z T, Pang X, 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.
- [2] 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 (2): 15-21.  
Zhang G C, Mi L J, Wu S G, et al. Deepwater area: The new prospecting targets of northern continental margin of South China Sea [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007 (2): 15-21.

- [3] 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 J Y, Pang X, Yu P, 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.
- [4] 杨海长, 陈莹, 纪沫, 等. 珠江口盆地深水区构造演化差异性油气勘探意义 [J]. 中国石油勘探, 2017, 22 (6): 59-68.  
Yang H Z, Chen Y, Ji M, et al. Structural evolution difference and the significance for oil and gas exploration in the deep water area of the Pearl River Mouth Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22 (6): 59-68.
- [5] 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 G C, Yang H Z, Chen Y, 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.
- [6] 胡圣标, 龙祖烈, 朱俊章, 等. 珠江口盆地地温场特征及构造-热演化 [J]. 石油学报, 2019, 40(S1): 178-187.  
Hu S B, Long Z L, Zhu J Z, et al. Characteristics of geothermal field and the tectonic-thermal evolution in Pearl River Mouth Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(S1): 178-187.
- [7] 米立军, 何敏, 翟普强, 等. 珠江口盆地深水区白云凹陷高热流背景油气类型与成藏时期综合分析 [J]. 中国海上油气, 2019, 31(1): 1-12.  
Mi L J, He M, Zhai P Q, et al. Integrated study on hydrocarbon types and accumulation periods of Baiyun sag, deep water area of Pearl River Mouth basin under the high heat flow background [J]. China Offshore Oil and Gas, 2019, 31(1): 1-12.
- [8] 谢玉洪. 莺琼盆地区中央峡谷源头沉积特征及油气勘探前景 [J]. 地质科技通报, 2020, 39(5): 69-78.  
Xie Y H. Sedimentary characteristics and hydrocarbon exploration potential of the upstream of the Central Canyon in the Yinggehai and Qiongdongnan Basins [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(5): 69-78.
- [9] 杨金海, 李才, 李涛, 等. 琼东南盆地深水区中央峡谷天然气成藏条件与成藏模式 [J]. 地质学报, 2014, 88(11): 9.  
Yang J H, Li C, Li T, et al. Accumulation condition and model of gas reservoir in central canyon in deepwater area of Northern South China Sea [J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(11): 9.
- [10] 龙祖烈, 陈聪, 马宁, 等. 珠江口盆地深水区白云凹陷油气成因来源与成藏特征 [J]. 中国海上油气, 2020, 32(4): 36-45.  
Long Z L, Chen C, Ma N, et al. Geneses and accumulation characteristics of hydrocarbons in Baiyun sag, deep water area of Pearl River Mouth basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(4): 36-45.
- [11] 陈亮, 庞雄, 韩晋阳, 等. 珠江口盆地白云深水区构造-岩性油气藏特征及成藏模式 [J]. 特种油气藏, 2019, 26(1): 30-36.  
Chen L, Pang X, Han J Y, et al. Structural-lithologic hydrocarbon reservoir characterization and accumulation patterns in the Baiyun deep-water area of the Pearl River Mouth Basin [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2019, 26(1): 30-36.
- [12] 张忠涛, 张向涛, 孙辉, 等. 珠江口盆地渐新世陆架边缘三角洲沉积特征及其对成藏的控制作用 [J]. 石油学报, 2019, 40(S1): 81-89.  
Zhang Z T, Zhang X T, Sun H, et al. Sedimentary characteristics of Oligocene shelf edge delta and their control on hydrocarbon accumulation in Pearl River Mouth Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(S1): 81-89.
- [13] 刘春成, 焦振华, 管西竹, 等. 海洋“犁式”电缆地震资料采集与处理方法 [J]. 中国海上油气, 2016, 28(5): 1-7.  
Liu C C, Jiao Z H, Guan X Z, et al. The acquisition and process method of marine plow cable streamer seismic data [J]. China Offshore Oil and Gas, 2016, 28(5): 1-7.
- [14] 叶云飞, 刘春成, 刘志斌, 等. 海上宽频地震反演方法及其在南海深水区的应用 [J]. 中国海上油气, 2018, 30(2): 65-70.  
Ye Y F, Liu C C, Liu Z B, et al. Analysis of marine broadband seismic data inversion and application in deep water of South China Sea [J]. China Offshore Oil and Gas, 2018, 30(2): 65-70.
- [15] 张功成, 屈红军, 刘世翔, 等. 边缘海构造旋回控制南海深水区油气成藏 [J]. 石油学报, 2015, 36(5): 533-545.  
Zhang G C, Qu H J, Liu S X, 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.
- [16] 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 Y H. New progress and prospect of oil and gas exploration of China National Offshore Oil Corporation [J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(1): 26-35.
- [17] 谢玉洪. 低油价背景下中国海油油气勘探进展与发展思考 [J]. 中国海上油气, 2021, 33(1): 1-12.  
Xie Y H. Progress and thinking of CNOOC oil and gas exploration under the background of low oil prices [J]. China Offshore Oil and Gas, 2021, 33(1): 1-12.