

# 南海北部准被动陆缘深水区油气地质及 与世界深水油气富集区类比

何家雄<sup>1</sup>, 颜文<sup>1</sup>, 马文宏<sup>2</sup>, 祝有海<sup>3</sup>, 陈胜红<sup>4</sup>, 龚晓峰<sup>1</sup>

(1. 中国科学院边缘海地质重点实验室, 广东 广州 510640;

2. 中海石油有限公司湛江分公司, 广东 湛江 524057;

3. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

4. 中海石油有限公司深圳分公司研究院, 广东 广州 510240)

**摘要:**南海北部陆坡深水盆地新生代处于准被动大陆边缘的复杂地球动力学环境, 具有被动大陆边缘拉张裂隙的基本构造地质属性及含油气盆地的地质特征。南海北部准被动陆缘深水盆地油气运聚成藏地质条件与世界典型被动陆缘盆地深水油气富集区基本类似, 但亦存在一定的差异性和特殊性。因此, 通过与世界典型被动陆缘深水盆地地质背景及构造属性、油气地质条件及成藏控制因素等方面的类比, 系统剖析了南海北部深水盆地特殊的油气地质特征与运聚成藏控制因素以及勘探上的关键地质地球物理问题, 同时通过类比亦获得了一些有关深水油气勘探的重要启迪与借鉴。

**关键词:**南海北部准被动陆缘区; 深水油气地质特征; 典型深水油气富集区; 类比与启示

**中图分类号:** TE122

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-1926(2010)06-0897-12

## 0 引言

南海北部准被动陆缘深水区海域广阔(>500 m 水深), 约占南海北部 2/3 以上的海域面积(图 1)。通过近年来对外合作与自营并主的油气勘探方略的实施, 目前南海北部深水油气勘探与油气地质研究, 已取得了重大的进展和一些成果, 先后在珠江口盆地南部深水区白云凹陷钻探了 7 个构造目标, 并在白云凹陷东部的 LW3-1、LH34-2、LH29-1 和 LH16-2 等 4 个构造圈闭获得重大油气发现, 同时, 在邻近深水区的白云一番禹低隆起上先后钻探的多个构造目标亦获重要商业性油气发现, 获得探明+控制+预测天然气地质储量达千亿立方米。这些勘探成果均充分表明深水区具有巨大的油气资源潜力及勘探前景, 有望成为南海北部油气可持续发展及油气资源战略接替的新领域和新的油气储量增长点。南海北部准被动陆缘深水区属于古特提斯与古

太平洋 2 大构造区域的混合叠置区, 处在欧亚、印—澳和太平洋—菲律宾 3 大板块相互作用之特殊大地构造位置, 其盆地形成演化受到了中生代周边不同板块的相互作用以及南海扩张裂解等地球动力学事件的深刻影响。与大西洋两侧典型被动陆缘深水盆地相比, 南海北部准被动陆缘深水盆地与其存在一定的差异:

(1) 在构造地质属性上, 南海北部边缘海盆地明显与世界上典型被动大陆边缘盆地有所区别。南海北部大陆边缘经历了从晚中生代燕山期主动陆缘向新生代边缘海被动陆缘的转变, 其演化过程和成盆机制较复杂。

(2) 在盆地构成及演化史上, 南海北部陆坡深水区以新生代盆地为主展布规模大, 中生代仅局部残留规模较小的盆地。故沉积盆地主体为新生代沉积, 其成盆时代大大晚于大西洋两侧的典型被动陆缘盆地。

收稿日期: 2010-03-31; 修回日期: 2010-06-22.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(编号: 2007CB41170501; 2009CB219501) 联合资助.

作者简介: 何家雄(1956-), 男, 湖北天门人, 研究员, 博士, 长期从事油气勘探与地质综合研究. E-mail: hejx@gig.ac.cn.



图1 南海北部准被动大陆边缘主要沉积盆地分布特征(据朱伟林<sup>[2]</sup>, 2008)

(3)在油气成藏地质条件上,南海北部陆坡深水盆地局部区带具有高温超压特征,尤其是陆架坡折带处超压明显。其次,深水区的凹陷展布及沉积充填规模大,存在始新统湖相、渐新统海陆过渡相及中新统海相3套烃源岩,其生烃成藏机制及油气分布均具有其特殊性。在深部油气藏之上的浅层及深水海底普遍存在浅层气及天然气水合物,如珠江口盆地白云深水区东部荔湾一流花常规天然气富集区(神狐水合物调查区)海底及浅层即已钻获天然气水合物<sup>[1]</sup>,而深部则获得了重大天然气发现,表明南海北部被动陆缘深水区存在深部常规油气资源与浅层及深水海底非常规油气资源——天然气水合物空间分布上的共生组合叠置关系与成因联系。

(4)南海北部陆坡深水区沉积物源供给主要来自北部古珠江流域和西北部古红河流域及海南岛物源体系,由于深水区距离物源区较远,加之又缺乏世界级大河流物源供给体系的大规模注入,故具有明显的远源深水沉积特征,其储集层发育展布规模及物性条件是深水油气富集成藏的关键控制因素。

(5)南海北部被动陆坡深水区地形地貌崎岖,海底坡度变化大,海底火山活动频繁,具有复杂的海底地质地貌特征,因此,该区尚存在深水地震采集、处理和成像等复杂的地球物理解释及地质成图等难题。

总之,南海北部陆坡深水区不仅存在准被动大

陆边缘盆地的成盆—成烃—储盖组合—运聚成藏等一系列复杂的油气地质问题,而且尚面临崎岖海底复杂地质地貌条件下的地震采集、处理和成像等严重影响勘探目标落实与地质评价的一系列地球物理难题。因此,南海北部准被动陆缘深水盆地油气勘探具有一定的特殊性及其复杂性,且在一定程度上增加了深水油气勘探的风险和难度,进而直接影响和制约着该区深水油气勘探进程。因此,对于南海北部深水油气勘探及研究,必须借鉴世界典型被动陆缘深水盆地油气勘探的成功经验,全面分析类比其与世界典型深水油气富集区成盆成烃条件、成藏条件与地质控制因素的差异,深入研究其独特的油气地质特征及一系列制约深水油气勘探的关键地质地球物理问题,以期减少勘探风险,提高深水油气勘探成功率,加快深水油气勘探开发进程。

## 1 南海北部准被动陆缘深水区油气地质特征

### 1.1 深水盆地地质背景

南海北部准被动陆缘深水盆地虽然与大西洋两侧典型被动大陆边缘深水盆地存在一定的共性,但更多的是凸显出明显的差异。大西洋典型被动大陆边缘盆地多属伴随大西洋裂解演化过程而形成,其

深水富油气盆地大多分布在大型河流及大型三角洲体系的入海口附近,主要沉积有断陷裂谷期湖相泥岩、裂后期三角洲相泥岩及海相泥岩等多套烃源岩,且与油气储集体均属同一沉积充填体系,烃源岩与储集层空间配置甚佳(自源型油气成藏系统);储集层多属深水扇及浊积岩体系,储层展布规模大、分布广,储集物性条件好;普遍发育盐层及盐底辟,盐层发育及展布特征与盐底辟及盐构造等成为油气运聚成藏的主控因素之一<sup>[3]</sup>。很显然这些特定的区域地质背景及油气地质条件均与南海北部准被动陆缘深水区存在一定的差异。

南海北部准被动大陆边缘位于古特提斯和古太平洋两大构造区域混合叠置的特殊大地构造位置之区域地质背景下,中生代以来受印支期、燕山期及喜马拉雅期3期构造运动的影响,导致其构造演化历史相当复杂。该研究区除发生印支板块与欧亚板块的强烈碰撞及推挤作用外,亦明显受到新生代晚期红河断裂带走滑活动、南海扩张裂解以及菲律宾板块 NWW 向的俯冲作用、晚期推挤作用和深部地幔底辟作用等复杂地球动力学过程的深刻影响<sup>[4-14]</sup>。总之,南海北部大陆边缘经历了由早中生代太平洋型活动陆缘向晚期新生代边缘海准被动大陆边缘的转换过程,明显不同于大西洋两侧典型的被动大陆边缘。此外,随着地壳厚度及地幔岩石圈由北部陆架浅水区(陆壳区)向南部陆坡深水区(洋陆过渡区)及深海洋盆区(洋壳)的迅速减薄,南海北部陆坡深水区大地热流及地温梯度明显高于相邻的北部陆架浅水区<sup>[16-17]</sup>;岩石圈热一流变结构两者亦存在明显差异<sup>[18-19]</sup>,在不同演化阶段构造运动及区域构造应力的作用下,则进一步造成了岩石圈地壳变形方式及成盆机制的差异,导致南海北部陆坡深水区盆地结构及沉积充填方式主要以复合碟式双断型(地堑式)断陷为主,而北部陆架浅水区则以半地堑断陷的沉积充填样式为主<sup>[15,20]</sup>。

总之,从大地构造属性及成盆机制、区域构造演变与沉积控制作用、盆地发育演化史及沉积充填序列等方面进行综合剖析,可以概括出南海北部准被动大陆边缘深水区的以下重要特点:

(1)南海海域经历了复杂的洋盆扩张裂解的发育演化史,形成了北部拉张裂陷大陆边缘、南部挤压与挠曲—伸展混合型大陆边缘、西部走滑拉分型大陆边缘和东部岛弧碰撞消减带,导致南海周边存在和发育准被动陆缘、复合大陆边缘、岛弧碰撞带及增生楔、推覆体、逆冲褶皱带等不同区域地质背景及复

杂的地球动力学系统,形成了不同类型的沉积盆地,进而控制了生烃成藏及油气分布富集规律。

(2)晚渐新世以来的裂后期全球海平面变化总趋势为海退,在南大西洋被动陆缘的两侧和墨西哥湾地区都主要发育进积层序,且均有大型河流及三角洲物源供给体系大规模注入到深海盆地,深水储层逐渐向海迁移和退积,不仅物源充分形成了储集物性好、展布规模大的深水储层,而且其大型河流及三角洲沉积体系本身具备烃源条件,故与储集层空间相互配置组合良好。南海北部准被动陆缘深水区裂后期相拗陷期,亦存在古珠江三角洲物源供给体系,但总体规模不是很大,虽然晚渐新世在珠江口盆地白云陆坡深水区发育有浅水陆架三角洲砂岩储层,中新世随着陆架坡折带向北迁移在白云凹陷亦沉积发育了6层上下叠置的深水扇体系<sup>[21]</sup>,但由于距离物源供给区甚远,中间又有珠一坳陷和中央隆起带的多重阻隔,故导致其储集层总体偏细,属于深水源沉积类型,储集物性受到了物源供给及沉积相带的制约和影响。因此,南海北部被动陆缘深水盆地油气储集层可能比大西洋被动陆缘两侧和墨西哥湾深水盆地稍差。

(3)南海北部准被动陆缘盆地具有拉张裂陷的区域构造地质环境,除了形成各种类型构造圈闭和非构造圈闭之外,部分区域亦发育生物礁储层及生物礁滩圈闭,这在相邻的北部陆架浅水区及南部和西部边缘的新生代沉积盆地中均有展布。诸如南海北部陆架浅水区东沙隆起上的流花11-1生物礁大油田,南海南部大陆边缘曾母盆地的L礁油藏等,均为其典型实例。在南海北部准被动陆缘深水区琼东南盆地东南部隆起区松南低凸起及北礁低凸起亦存在碳酸盐台地及生物礁滩<sup>[22]</sup>,表明该区具有圈闭类型多样、储层类型较多的特点。

## 1.2 深水盆地油气成藏地质条件

### 1.2.1 深水油气的烃源特征及潜力

南海北部大陆边缘自北向南处于减薄的陆壳、洋陆过渡型地壳及靠近洋壳中央海盆的位置,岩石圈地幔拉张减薄、软流圈上隆及伴生的热事件造成了处在洋陆过渡型地壳的陆坡深水区地温场具有“热盆”特征。南海北部大陆边缘大地热流平均值由陆架区的 $66\text{mW}/\text{m}^2$ 向陆坡深水区逐渐升高至 $77.5\text{mW}/\text{m}^2$ ,其地温梯度亦平均达 $3.91^\circ\text{C}/100\text{m}$ ,明显高于相邻陆架浅水区地温梯度( $3.66^\circ\text{C}/100\text{m}$ )<sup>[17]</sup>。珠江口盆地白云深水区LW3-1-1井的测温资料和中央海盆1148航次大洋钻探结果亦证实,其地温梯度及大地热流

由北至南从陆架浅水区至陆坡深水区往中央海盆的洋壳方向进一步急剧升高,表明其地温场及大地热流具有由北至南随着地壳减薄、地壳性质的变化而递增的特征。

总之,南海北部准被动陆缘深水区存在高温地质环境,其不仅促进和加快了深水区烃源岩的生烃作用,且大大降低了研究区的生烃门槛。其重要的油气地质意义乃在于:一方面使得在陆架浅水区埋藏较浅、成熟度偏低未达到成熟门槛的浅海相泥岩在深水区可能具有生烃能力,因而增强了浅层源岩的生烃能力,拓展了勘探领域;另一方面相对深部的烃源岩成熟度偏高,以产气为主。此外,南海北部准被动陆缘深水区盆地热沉降中心与沉积中心基本一致,沉积速率大,尤其是深水区西南部琼东南盆地中新世沉降幅度较大、构造活动较弱,大地热流普遍偏高,且在陆架与陆坡转折带易形成超压—强超压,而这种高温超压环境对烃源岩生烃亦存在较大的影响。再者,根据相邻北部陆架浅水区推测及跨越浅水区与深水区地震剖面的层序地层学分析,南海北部陆坡深水区存在始新统中深湖相泥岩、下渐新统滨岸平原沼泽相煤系—浅海相泥岩和上渐新统一中新统海相泥岩等 3 套烃源岩<sup>[2,23-29]</sup>,其中始新统中深湖相泥岩和渐新统滨岸平原煤系及浅海相泥岩,根据浅水区及邻近深水区钻探资料分析、推测和跨越浅水与深水区地震解释及层序地层学分析<sup>[30]</sup>,其有机质丰度较高、生源母质类型以 II—III 型为主、处于成熟—高熟演化阶段且生烃潜力大,烃类产物应以高熟天然气为主,属于已被烃源对比所证实的烃源岩。但上渐新统一中新统海相烃源岩迄今尚无直接或间接的可靠烃源对比证据,仍需进一步勘探来证实。很显然,南海北部准被动陆缘深水区高温超压条件下烃源岩成熟演化生烃机理和生烃潜力以及高效烃源灶分布与预测,仍是深水区尚需进一步深入研究的重要课题。

### 1.2.2 深水油气的储层特征及控制因素

世界上迄今已发现的深水油气藏的储集层类型主要为各类深水扇及浊积砂体,其次为碳酸盐岩。深水砂岩储集层的充足砂质来源,均为世界级规模的大型河流、大型三角洲体系物源供给系统所提供。南海北部准被动陆缘深水区不同层位的油气储层,根据其相邻的北部陆架浅水区推测及深水区少量探井钻探结果,可能存在始新统一下渐新统河流—三角洲相砂岩储层(陆相)、上渐新统一下中新统扇三角洲—滨浅海相砂岩及生物礁—碳酸盐岩储层(海

陆过渡相及海相)与中中新统深海浊流沉积和深水扇系统砂岩(深海相)3 套储层<sup>[31-35]</sup>。但其三角洲沉积体系和深水浊积砂及深水扇系统的发育规模和物源供给输入体系,均比世界典型深水油气富集区盆地及其他区域小,且砂岩储集层粒度总体偏细,非均质性较强,砂岩钙质含量高储集物性变差。

由于南海北部准被动陆缘深水区晚渐新世以来的物源供给,主要来自北部相邻的华南大陆古珠江流域三角洲体系的物源系统和西北部越南红河流域物源体系及海南岛物源体系,其物源输送距离较远,从物源供给区由北向南、由西北向东南均明显受到自陆架浅水区到陆坡深水区分布的一系列沉积盆地或拗陷带及隆起带和断裂带的多重阻隔,如自北而南分布的珠江口盆地珠一拗陷及琼东南盆地北部拗陷带和中部隆起带、东沙隆起及番禺低隆起和神狐隆起等,均是 2 大物源供给体系输送沉积物的主要沉积充填场所,故其阻隔了北部物源供给系统输送到南部深水区的大量沉积物。因此,沉积物在长距离输送搬运过程中,由于先途经北部陆架浅水区的盆地或拗陷带及隆起带,然后才能进入远离物源的南部陆坡深水区及中央洋盆,故深水区砂岩储层具有远源深水沉积特征,且深水储集层砂岩总体偏细。这已被珠江口盆地珠二拗陷白云深水区几口深水探井的钻探所证实。目前对于该区这种远源深水沉积体系的沉积充填机理、沉积展布规模、储层物性条件及控制因素,即“源—渠—汇”系统的构成模式及主控因素等尚需进行更深入研究。

自早中新世以来,南海北部陆坡深水区的隆起及构造高部位等局部地区尚具有碳酸盐岩台地及生物礁滩发育的有利环境,能够形成生物礁滩型碳酸盐岩储层。迄今在南海北部陆架浅水区珠江口盆地中央隆起和南海南部已发现生物礁油气田。在南海北部陆坡深水区琼东南盆地东南部北礁低凸起及附近,通过二维地震解释及层序地层学分析亦发现了碳酸盐岩台地及生物礁滩存在的证据<sup>[22]</sup>,表明深水区亦存在生物礁滩型储集层,但尚需进行更深入系统地研究和钻探方可落实与确定。

总之,南海北部被动陆缘深水区早中新世以来存在深水源源沉积的各种类型碎屑岩和生物礁滩型碳酸盐岩 2 种主要油气储层类型,在晚渐新世则发育有陆架浅水三角洲及滨浅海相砂岩储集层。这些储集层的物源供给及主控因素,均主要与华南大陆古珠江流域三角洲体系的物源系统和西北部越南红河流域物源体系及海南岛物源体系、物源输送通道

及路径、以及深水环境下各种洋流作用的改造等密切相关。

### 1.2.3 深水油气运聚成藏特点及时空配置关系

世界深水大型油气田、巨型油气田主要集中分布于大西洋两侧典型被动大陆边缘的断陷裂谷盆地。根据大西洋被动陆缘两侧的东巴西裂谷系和西非沿岸裂谷系深水盆地油气勘探实践及研究成果,这些深水油气田的主要烃源岩多为裂陷期沉积的巨厚湖相暗色泥岩,其展布规模大生烃能力强;深水环境下沉积的深水扇及浊积砂为主要储层,且规模大储集物性好;普遍发育的盐层及盐底辟,既构成了其下伏储集层的封盖层,亦是盐上构造圈闭形成的重要因素,同时盐底辟上侵活动还沟通了从盐下烃源供给系统输送到盐上圈闭聚集成藏的油气运移通道。因此,在这些典型被动陆缘裂谷盆地中,其深水油气运聚成藏的烃源、运聚通道系统与圈闭聚集场所的时空配置关系甚佳,有利于减少油气运聚散失及损耗而促进其高效富集成藏。

南海北部新生代准被动陆缘深水盆地区域地质背景较复杂,盆地结构及沉积充填特征受多种复杂地质因素的影响和制约。根据地震解释及层序地层学分析,结合相邻北部陆架浅水区推测及少量深水探井揭示,该区不同发育演化阶段均沉积充填了不同类型的烃源岩,但目前基本证实的主要烃源岩,以盆地断陷发育阶段沉积的始新统湖相泥岩及下渐新统近海湖沼相煤系泥岩为主<sup>[28,36-38]</sup>,这些烃源岩分布稳定、展布规模大、生烃潜力强。由于南海北部深水属洋陆过渡型的薄地壳,热流值比相邻北部陆架浅水区高,故这些断陷期沉积的古近系烃源岩成熟生烃可能以成气为主。盆地海相拗陷阶段沉积的上渐新统及中新统海相泥岩在深水大部分可能已成熟,亦具有一定的生烃潜力,但能否成为有效的烃源灶尚需进一步勘探与研究证实。南海北部深水纵向继承性烃源断裂的活动、横向上展布的区域不整合面及与之连通的各种类型砂体则构成了深水油气运聚的主要烃源供给输导格架,当其有效烃源灶和油气富集场所——该区低凸起上发育的大中型披覆型构造圈闭形成之时空配置良好时,即可构成良好的油气运聚系统而富集成藏。必须强调指出的是,深水纵向继承性烃源断裂在平面上的时空发育展布特征,往往具有东强西弱、北强南弱的规律及特点(图2)。其中,深水西部琼东南盆地新近纪以来发育的断裂非常有限、断裂活动强度较弱,剖面上大部分地区尚未切穿中

新统地层,进而控制了该区域油气纵向上运聚分布,均主要聚集于该地层以下的圈闭及储集层之中;而深水东部珠江口盆地白云深水区则断裂发育,剖面上大部分地区均切穿了中新统甚至第四系乃至海底,油气及其他流体通过断裂通道可以在不同层位地层的圈闭及储层中运移而富集成藏。因此,导致白云深水油气分布颇具规律性,形成了深部富集常规天然气、浅层聚集生物气与热成熟气的混合气,而超浅层及海底则富集大量天然气水合物的纵向分布格局(图3),构成了深部深水油气与浅层生物气—热解气混合气及海底天然气水合物纵向叠置的空间共生组合关系。

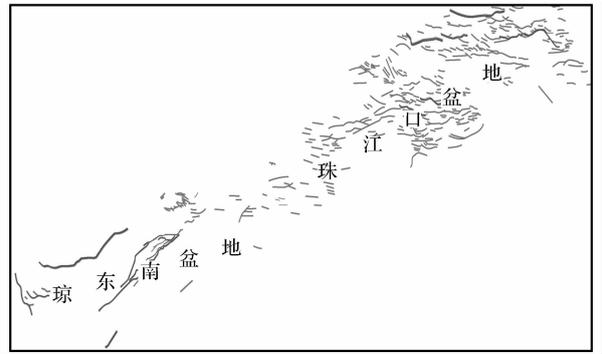


图2 南海北部准被动陆缘深水新近系断裂分布特征(据张功成<sup>[15]</sup>,2007)

总之,南海北部准被动陆缘深水盆地不同发育演化阶段与烃源岩成熟生烃、储盖组合及运聚系统,以及各种类型构造圈闭和非构造圈闭形成时间等一系列控制油气运聚成藏的地质因素时空配置关系良好。但由于无论深水还是浅水区迄今已证实的主要烃源岩仍然是深部的古近系陆相烃源岩(始新统中深湖相烃源岩及下渐新统煤系烃源岩),虽然其上覆新近系海相沉积体系在深水可能具有生烃潜力,但仍不能成为主要烃源供给系统及有效烃源灶,故新近系海相沉积体系发育的储集层及圈闭捕集的烃气源,仍然主要来自深部的古近系湖相及煤系烃源岩。因此,深水亦构成了与北部陆架浅水区类似的陆生海储、下生上储及古生新储的成藏组合系统,而古近系陆相烃源供给系统及其运聚通道格架和路径与上覆新近系海相储盖组合及圈闭的有效时空配置,则是该区油气运聚成藏的关键控制因素。

## 2 与世界典型深水油气富集区的类比

世界深水油气资源丰富,近年来深水油气勘探已成为当今世界海洋油气勘探开发的热点和油气增储上产的新亮点。迄今为止,全球6大洲18个深水

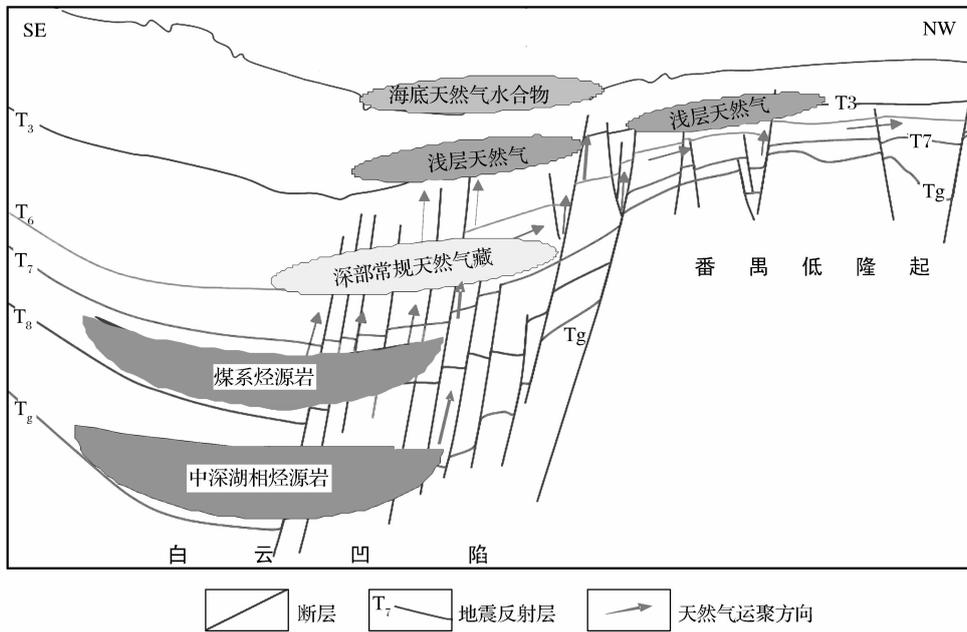


图3 珠江口盆地白云深水区深部油气与浅层气及水合物共生叠置关系(据中海油内部资料,2007,修改)

盆地中已发现多个大中型油气田,获得了  $300 \times 10^8$  t石油地质储量<sup>[39]</sup>。尤其是南美巴西近海、美国墨西哥湾及西非近海等被动大陆边缘深水油气富集区,目前已成为全球深水油气勘探的“金三角”,亦是近年来大油气田发现及油气储量增长的热点地区。油气勘探实践及研究表明<sup>[40-42]</sup>,这些典型被动大陆边缘富油气深水盆地基本油气地质特点及主要地质规律是:①深水油气富集区盆地主要分布在环大西洋被动大陆边缘陆坡深水区,大多是在大陆破裂、新洋裂开的演化过程中形成的,其发育演化经历了前裂谷期、断陷裂谷期、断—坳过渡转换期及坳陷期4个阶段,且不同演化阶段都为后期油气生成与运聚成藏提供了丰富的物质基础和基本地质格架系统。如断陷裂谷期沉积充填了大套有机质丰度高、分布广的湖相烃源岩,为被动大陆边缘盆地的主力烃源岩;断—坳过渡转换期和坳陷期则形成了大规模的海相烃源岩,亦为油气形成奠定了雄厚的基础;同时,断陷裂谷期、断—坳过渡转换期及坳陷期形成的各种类型的浅水砂岩和大型浊积扇体、重力滑塌体等一系列深水储层,尤其是由于海平面升降,在陆坡深水区发育的深海扇和高孔浊积岩,更为深水油气运聚成藏提供了良好的储集条件。②被动陆缘深水盆地含油气系统中各油气成藏事件有效配置与紧密结合,构成的生烃成藏之高效的烃源供给系统和运聚输导体系,大大促进了深水油气生成、运移与高效富集成藏。③广泛发育蒸发相膏盐岩和第三系及第四系海相厚层泥岩,为深水油气运聚成藏提供了极

好的封盖及圈闭保存条件。尤其是膏盐岩可塑性强,可有效化解和弥补后期断裂的破坏作用,同时形成的盐底辟及伴生构造亦为油气运聚成藏提供了纵向通道和聚集场所。④被动陆缘深水盆地发育演化的不同阶段均形成了多种封闭条件较好的不同类型圈闭,如断陷期的断块、基岩潜山、披覆背斜等圈闭类型;断—坳过渡转换期,盆地进入深水环境,区域构造变动减弱,但由于区域倾斜地貌背景及坡折带陡变化快而发生剧烈的盐、泥塑性运动或重力滑脱运动,形成了与盐丘断层、泥丘断层以及犁式断层有关的圈闭。如盐枕、盐丘、泥丘和盐岩刺穿、泥底辟/泥火山等伴生圈闭,均为油气运聚及富集成藏提供了良好的聚集场所。

总之,根据前述的南海北部准被动陆缘深水油气地质特征与世界典型被动陆缘深水富油气区相比,可以明显看出南海北部准被动陆缘深水盆地与其存在的主要差异具体表现在:

(1)南海北部陆坡深水盆地位于南海北部准被动陆缘区位置,与世界大多数著名深水油气盆地相似,但南海北部属边缘海的被动陆缘而不是开阔大洋的被动陆缘,其与墨西哥湾沿岸盆地有一定的相似性,但南海北部大陆边缘属非火山型大陆边缘,迄今尚未发现存在热点的迹象,其又与墨西哥湾沿岸盆地存在明显的差异<sup>[43]</sup>。同时,区域地质背景及大地构造环境与物源供给系统及输导格架的差异,亦造成了油气运聚成藏条件及特点明显不同:巴西东部 Canpos 盆地与 Santos 盆地处于大陆板块与大洋

板块之间的裂谷地带,存在非常发育的断裂与裂缝纵向运聚系统,为深部下构造层油气系统的油气向上运移,在上构造层各种储集物性好的近源储集层的圈闭中聚集成藏提供了快速通道等有利条件<sup>[44]</sup>。南海北部准被动陆缘深水区处在洋陆过渡型地壳的区域构造位置,受到3大板块的相互作用及南海张裂扩张等多种复杂地球动力学因素的控制和影响,加之远离古珠江三角洲物源供给区和红河及海南岛物源供给系统,其间又经过多个不同类型地质构造单元的阻隔,故深水区沉积充填物具有远源输送供给特征,深水扇体及浊积砂总体偏细,且钙质含量较高,储集物性较差。目前,白云深水区钻探失利的3个勘探目标即是其典型实例。再者,纵向运聚通道即烃源断裂输导系统在部分区域亦不甚发育、不畅通,深部烃气源的油气向上构造层储集层及圈闭和浅层聚集场所的运聚供给则受到严重的制约和影响。

(2)在所处地质地貌位置与物源供给系统构成及规模上,南海北部准被动陆缘深水区虽然也处于大河出口的下游位置(珠江口),但其物源供给系统的规模远不及世界级大型河流及大型三角洲物源供给系统,导致其深水盆地中沉积充填的各类深水沉积砂体规模相对较小,进而影响和制约了深水油气藏的储集体展布规模乃至油气地质储量的大小。南海北部陆缘即华南地区的珠江三角洲流域水系长2000多公里,水系流域面积达 $45 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,其仅是刚果河和尼日尔河长度的1/2,其面积的1/8和1/5,若与密西西比大型河流三角洲水系相比,则其长度仅是该河的1/3,面积则是它的1/7。因此,南海北部陆缘区的珠江三角洲水系的流域面积偏小,其对深水盆地物源供给规模与输送量均会受到极大的影响和制约。世界上典型被动陆缘深水盆地,一般多具有大型河流及大型三角洲物源供给系统的强势注入,故能够为油气运聚成藏提供有利的储集条件和大规模的富集场所<sup>[32]</sup>。如尼日尔盆地的尼日尔—贝努埃大型河系、加蓬盆地的奥果韦河系、下刚果盆地的刚果河系、安哥拉盆地(亦称宽扎盆地)的宽扎河系及纳米比亚盆地的奥兰治河系等。这些大型河流及三角洲物源供给系统在新生代总体海退的区域地质背景下,陆续将非洲地盾的大量剥蚀物输送到大西洋被动边缘深水盆地中沉积下来,在河口处及其附近则形成了规模巨大的建设型三角洲,进而为深水油气藏形成提供了有利的储集条件和规模巨大的富集场所。

(3)从盆地形成时间及发育演化过程看,世界上典型被动大陆边缘深水盆地形成时间较早,大西洋型被动陆缘深水盆地多形成于三叠纪以后劳亚大陆和冈瓦纳大陆破裂时期,且演化发育时间长、涉及范围大,包括西非近海和巴西近海等区域。南海北部准被动陆缘深水盆地则形成发育时间较晚,自白垩纪末—古新世开始,主裂陷期为始新世—渐新世,晚渐新世即已结束断陷阶段而进入大规模海相坳陷热沉降阶段。故盆地发育演化时间短、影响范围小,断陷期多形成凹凸相间的箕状或复合碟式地堑和洼陷,而且缺乏典型被动大陆边缘盆地的地质特征及发育演化特点。很显然,这些差别均严重控制和影响了该区烃源岩发育展布规模、烃源岩有机质丰度及类型、烃源岩成熟演化特点及生烃潜力、储盖组合类型及运聚成藏条件等,导致该区油气地质特征及运聚成藏等关键控制因素均具有一定的特殊性。

(4)世界典型被动大陆边缘深水盆地形成演化所经历的前裂谷期、断陷裂谷期、断坳转换过渡期和坳陷沉降期的4个阶段中,裂谷期与断坳过渡期发育时间长,亦与南海北部准被动陆缘深水盆地存在明显差异。大西洋型被动陆缘盆地形成发育过程中裂谷期与断坳过渡期较长且特征明显,裂谷期沉积充填了巨厚陆相烃源岩,而断坳过渡期则沉积了大范围厚层膏盐岩,将盆地含油气系统及其成藏组合剖面上划分为盐下和盐上2个含油气系统及成藏组合,油气运聚成藏及分布富集均受控于这2个含油气系统。南海北部准被动陆缘深水盆地,裂谷期与断坳过渡期发育时间短,在裂谷期沉积了大套中深湖相烃源岩,而在过渡期由于受海侵的影响,则发育了近海沼泽相煤系烃源岩及河湖沼泽相煤系烃源岩和浅海相烃源岩,没有膏盐岩沉积之区域封隔层,且整体进入海相沉积环境时间短演化较快,缺乏相应沉积层序。这些差异亦影响和制约了深水区油气成藏的储盖组合类型及运聚分布特点。

(5)世界上典型被动陆缘深水盆地均具有早期陆相裂谷断陷与晚期海相坳陷的双层盆地结构特征,但由于所处区域地质背景及地球动力学条件之差异,导致断陷期、断坳期及坳陷期不同演化阶段的沉积充填特征及其油气成藏的生、储、盖组合类型差别甚大。前已论及,大西洋两侧被动陆缘深水盆地在断陷裂谷阶段形成了巨厚湖相烃源岩及砂岩储集层,其后的断坳转换过渡期则发育大套膏盐岩沉积,其上覆则为海相坳陷阶段沉积的海相砂泥岩。由于裂后早期膏盐岩普遍发育分隔了断陷与坳陷阶段形

成的生、储、盖成藏系统,故形成了盐下陆相断陷裂谷沉积的生储盖成藏组合和盐上海相拗陷沉积的生储盖组合 2 大含油气系统,从烃源到圈闭储层中的运聚成藏过程均具有自生自储的特征,如果存在断裂及盐底辟沟通则可形成下生上储的成藏组合类型。南海北部准被动陆缘深水盆地断陷裂谷阶段亦发育湖相烃源岩,裂谷晚期及断拗转换过渡期则沉积充填了一套煤系烃源岩,但没有膏盐岩封盖层沉积,而裂后海相拗陷阶段总体沉积规模有限,海相砂泥岩厚度一般比断陷裂谷期沉积的陆相砂泥岩薄,故海相泥岩烃源岩成熟生烃潜力有限,其主力烃源岩及烃源供给系统均来自深部断陷裂谷阶段沉积的中深湖相烃源岩及煤系烃源岩供给体系。因此,构成了明显不同于大西洋两侧典型被动陆缘深水盆地的陆生海储、下生上储的油气成藏组合类型及其含油气系统特点。

(6)世界上典型被动大陆边缘盆地不仅发育早,且成盆演化时间长。如扎格罗斯深层的被动陆缘盆地自古生代开始发育,大西洋型被动大陆边缘盆地自三叠纪开始发育,其成盆演化缓慢,一直持续到中生代及新生代。由于其断陷裂谷期发育时间较长,处于长期局限的湖盆环境,沉积充填了有机质丰富的巨厚湖相烃源岩。南海北部准被动陆缘深水盆地自白垩纪末—古近纪开始发育,成盆演化在第四纪结束,成盆演化时间非常短,尤其是断陷裂谷阶段发育时间相对较短,导致其烃源岩沉积充填规模及其有机质丰度、成熟生烃潜力等均受到了较大的影响和制约。

### 3 南海北部深水油气勘探面临的问题与启示

南海北部准被动陆缘深水盆地处在 3 大板块相互作用及南海裂陷扩张等多种因素控制下的特殊大地构造位置,区域地质背景复杂,受多种地球动力学过程的影响和制约,故其成盆—成烃—成藏及其油气运聚富集规律等,与世界上典型被动陆缘深水盆地相比均具有一定的特殊性和复杂性,因此,该区深水油气勘探尚面临一系列地质及地球物理问题和难点有待攻克。

#### 3.1 深水油气勘探面临的地球物理问题

深水油气勘探虽属高成本、高投入、高风险及高技术的勘探活动,但在海洋地球物理勘探资料的采集成本上与陆地相比尚具有一定优势。因此,应充分利用海洋地球物理资料所获取的各种信息解决油

气地质问题。亦即深水油气勘探应在尽可能少打井的前提下,通过充分利用地震等地球物理资料的多种信息分析解决各种深水油气地质问题,尽可能降低深水油气勘探的钻探成本及风险,提高深水油气勘探的成功率。

然而,南海北部被动陆缘深水水区水深变化大(在 500~3 500 m 之间),陆架坡折带非常陡且变化快,海底地形崎岖水道纵横且海底火山活动频繁,具有复杂海底地形地貌的地质特征,故导致地震资料的采集、处理及成像等均面临一系列的地球物理难题<sup>[45]</sup>。如深水水区地震资料存在中深层成像品质差、多次波干扰严重、模糊杂乱反射及构造反射层畸变等问题,这些问题均极大地影响了勘探目标及构造圈闭的落实与评价。很显然, these 问题是制约和直接影响该区深水油气勘探及油气地质风险评价与提高深水油气勘探成功率的瓶颈。因此,针对南海北部深水水区这种复杂地震地质条件下的地球物理勘探问题,首先必须通过试验优选不同深水区域地震波的激发技术,不断优化地震采集观测系统,采取措施有效恢复深层地震波能量,尽量减弱和消除崎岖海底以及各向异性对地震波的散射和畸变影响。同时,要深入研究能够有效压制深水海底多次波的措施,达到提高深水地震数据的分辨率和信噪比的目的,进而为深水油气勘探提供油气地质研究与钻探目标评价所需要的高品质地震资料。

#### 3.2 深水油气勘探面临的油气地质问题

前已论及,南海北部准被动陆缘深水水区处于 3 大板块相互作用的复杂地球动力学背景之下的特殊大地构造位置,其成盆—成烃—储盖组合与成藏系统及油气地质规律,虽然与世界上典型被动陆缘深水盆地具有一定的相似性,但亦存在较大的差异。根据前述对南海北部深水水区油气地质特征的分析,目前深水油气勘探面临的主要油气地质问题如下。

##### 3.2.1 高温盆地生烃成藏机制问题

新生代时期南海北部准被动大陆边缘地幔岩石圈拉张减薄及伴生热事件造成了深水水区地温场具“热盆”特征。南海北部大陆边缘大地热流平均值由北部陆架浅水区的 66 mW/m<sup>2</sup> 向南部陆坡深水水区逐渐升高为 77.5 mW/m<sup>2</sup>,到中央海盆洋壳区则大于 100 mW/m<sup>2</sup> 以上<sup>[17]</sup>。很显然高温地质环境促进了深水水区烃源岩的成熟生烃,大大降低了生烃门限,拓展了勘探领域,但高温亦会对已形成油气藏产生破坏作用。此外,在南海北部深水水区西南部琼东南盆地,由于中新世晚期沉降幅度较大、构造活动较

弱,大地热流偏高且在陆架坡折带往往易形成高温超压环境,而这种高温超压环境对烃源岩生烃及运聚成藏过程的影响和控制作用等,目前尚不十分清楚,尤其是高温超压条件下油气运聚成藏机制及控制因素等问题,迄今为止尚未完全搞清。而且以往在邻近陆架浅水区钻探的中深层高温超压的构造圈闭目标,均未获得商业性油气发现和突破,亦表明对于这种高温超压地质环境下的油气运聚成藏机理与成藏主要控制因素等问题,至今均不甚明了,而这一问题则是制约和影响西部深水区油气勘探活动及进程的关键因素之一。

### 3.2.2 远源深水储层特征及储集物性问题

南海北部准被动陆缘深水盆地不同层位的油气储层,根据相邻北部陆架浅水区推测和地球物理资料解释以及深水少量探井钻探揭示,主要发育始新统一下渐新统河流—三角洲相砂岩储层(陆相)、上渐新统一下中新统浅水陆架三角洲—滨浅海相砂岩及生物礁滩—碳酸盐岩储层(海陆过渡相及浅海相)与中中新统深海浊积砂和深水扇系统(深海相)等3套储层<sup>[31-35]</sup>。但由于南海北部陆坡深水物源供给主要来自北部相邻的华南陆缘古珠江流域三角洲体系的物源系统和西北部越南红河流域物源体系及海南岛物源供给区,其物源输送距离甚远,从物源供给区由北向南,明显受到自陆架浅水区到陆坡深水分布的一系列沉积盆地或坳陷带及隆起带的多重阻隔,因此,来自北部物源供给区的沉积物在长距离输送搬运过程中,由于首先必须途经北部陆架浅水区的盆地或坳陷带及隆起带,然后才能进入到南部陆坡深水及中央洋盆,故沉积物及储集层具有明显的远源深水沉积特征,储集层砂体总体偏细,钙质含量高非均质性较强,导致储集物性变差,这已被珠江口盆地珠二坳陷白云深水几口深水探井钻探所基本证实。

总之,针对南海北部准被动陆缘深水碎屑岩和碳酸盐岩2类主要储集层的物源供给系统、空间展布规律与储集物性特征及主控因素等问题,迫切需要开展被动大陆边缘深水盆地层序地层学分析与系统研究,全面恢复和重建渐新世以来的古地理环境,深入分析研究深水源碎屑岩沉积的物源供给系统与主控因素及沉积机理,探索远源深水环境下各种洋流作用影响下的沉积模式。在此基础上,即可大大提高识别与预测深水远源沉积体系中砂岩储集体分布以及局部浅水环境下发育碳酸盐岩台地—生物礁储层的能力,降低和减少深水油气勘探

中的储层预测风险。

### 3.2.3 深水油气运聚成藏的时空配置问题

根据大西洋被动陆缘两侧的东巴西裂谷系和西非沿岸裂谷系深水盆地油气勘探实践,深水油气田主要烃源岩为裂陷期湖相暗色泥岩,展布规模大生烃能力强;各种深水扇及浊积砂为主要储层,且规模大储集物性好,为大油气田形成提供了非常好的储集条件;普遍发育的盐层及盐底辟既构成了其下伏储集层的盖层,亦是盐上圈闭形成的重要因素,同时与断裂配合亦沟通了自盐下烃源输送到盐上圈闭聚集成藏的油气运移通道。因此,典型深水油气富集区的油气运聚成藏的时空配置关系甚佳,故有利于减少油气运聚散失而高效富集成藏。与世界典型被动陆缘深水富油气区相比,南海北部准被动陆缘深水盆地亦经历了断陷裂谷、断拗转换过渡、坳陷沉降及新构造运动等发育演化过程和特殊的洋盆扩张裂陷史,形成了复杂的被动大陆边缘,构成了不同于世界上典型被动陆缘深水盆地的复杂地球动力学系统,进而控制了盆地结构及沉积充填特征、烃源岩展布与油气分布等。须强调指出的是,该区晚渐新世浅水陆架三角洲储集系统和中新世深水浊积砂及深水扇储集系统的烃气源供给,主要来自通过断裂及疏导砂体构成的纵向运聚通道所提供的始新统及下渐新统深部烃气源,其运聚成藏过程及时空配置关系与控制因素目前尚不十分清楚。而且,很多认识及结论大多属分析与推测,尚没有更多的实际地质资料及钻探成果所佐证。因此,深水油气运聚成藏的地质条件、主控因素及其时空配置关系等问题,尚需进一步勘探实践与油气地质综合研究所证实。

### 3.3 深水油气勘探的启示

世界上典型被动陆缘深水盆地油气勘探开发成果捷报频传,深水油气勘探已成为当今海洋油气可持续发展及油气储量大幅度增长的最新亮点和热点。近10多年来,在南美巴西、西非大西洋沿岸、墨西哥湾沿岸、北海、巴伦支海、喀拉海以及东南亚、澳大利亚西北大陆架等深水海域均相继发现了许多大型油气田。其中,巴西近海、美国墨西哥湾、西非近海、亚太地区等大陆被动边缘深水盆地是目前全球4大富油气深水区。20世纪90年代期间世界发现新油田的40%均来自这些被动大陆边缘深水区。如巴西的Roncador油田,西非的Dalia、Kuito、Benguela、Girasol、Hungo、Rosa以及Landana等油田,墨西哥湾的Crazy Horse和Mad Dog等油田<sup>[46-47,39]</sup>。因此,全球被动陆缘深水盆地油气资源丰富、资源潜力巨大。南

海北部准被动陆缘深水盆地的区域构造背景、沉积环境及沉积充填格架、成盆—生烃—成藏规律及基本油气地质条件等方面,虽然与全球典型被动大陆边缘深水富油气区存在一定的差异,但总体上基本相似,根据全国第三次油气资源初步评价,其石油资源量达  $76 \times 10^8$  t,天然气资源量可达  $4.4 \times 10^{12}$  m<sup>3</sup>[42],且近期通过对外合作在深水区钻探的 LW3-1、LH34-2 及 LH29-1 等构造圈闭目标均获重大天然气发现,亦充分表明南海北部准被动陆缘深水盆地油气资源潜力大,勘探前景广阔。

综上所述,通过前述对世界典型被动陆缘深水盆地富油气区基本油气地质条件、油气运聚成藏规律及勘探成果的深入分析总结,以及与南海北部深水区的类比,可以得到以下几点重要启示。

(1)开展南海北部深水油气勘探活动,必须深入剖析世界上典型被动陆缘深水富油气区与南海北部准被动陆缘深水区的共性与差异,重点研究解剖深水油气运聚成藏模式及机制与控制因素,建立南海北部准被动陆缘深水油气成藏地质理论,探索适合南海北部深水油气勘探的地球物理技术及油气地质综合评价研究方法。

(2)系统总结世界典型被动陆缘深水富油气区的油气成藏地质规律及控制因素,结合南海北部准被动陆缘深水区少量探井钻探成果及油气勘探实践,借鉴相邻陆架浅水区油气地质规律及勘探成果,深入剖析南海北部准被动陆缘深水盆地特殊的油气地质条件及其控制因素,评价预测有利深水油气富集区带及勘探目标,加快深水油气勘探的步伐。

(3)南海北部准被动陆缘深水盆地烃源供给系统及烃源灶和物源供给系统及储集层类型等均与世界典型被动陆缘深水富油气区存在差异,尤其是南海北部陆坡特殊的深水源碎屑岩储层分布及储集物性预测与评价,是直接影响和制约深水油气勘探获得突破的关键和最大的风险之一,因此必须组织重点研究与系统攻关。南海北部准被动陆缘珠江口盆地白云深水区东南部几口探井的失利,均属于储集层偏细、含钙高储集物性差的原因所致,表明该区远源深水储层的评价与预测对深水油气勘探的成功与否至关重要。

总之,深水油气勘探由于受高成本、高投入、高技术及高经济门槛等因素的制约,故存在巨大的风险性和挑战性。因此,借鉴世界典型被动陆缘深水富油气区的成功勘探经验及成熟的技术方法,采取有效措施尽快攻克和解决南海北部深水油气勘探中

存在的一系列关键地质及地球物理问题,对于推进深水油气勘探进程,争取获得油气勘探的重大突破至关重要。同时,在深水油气勘探策略及具体勘探部署方针上,应按照从浅水向深水延伸的勘探战略方向逐步实施,即在毗邻深水陆坡区的陆架浅水区初步探索和证实了深水区的油气勘探潜力及初步的资源规模后,再逐步向深水区展开,优选评价与钻探深水区有利油气富集区带及最佳勘探目标,进而逐步开展和实施大规模的高风险深水油气勘探活动,以期获得重大突破。

#### 参考文献:

- [1] He Jiaxiong, Zhu Youhai, Chen Shenghong, *et al.* The genetic types and metallogenic characteristics of and prospects of resources of northern South China Sea[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2009, 20(2): 237-243. [何家雄, 祝有海, 陈胜红, 等. 天然气水合物成因类型及成矿特征与南海北部资源前景[J]. *天然气地球科学*, 2009, 20(2): 237-243.]
- [2] Zhu Weilin, Zhang Gongcheng, Gao Le. The petroleum geology and exploration orientation of northern South China Sea margin basin[J]. *Petroleum Technology*, 2008, 29(1): 1-9. [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.]
- [3] Yuan Shengqiang, Wu Shiguo, Ma Yubo, *et al.* Tectonic and sedimentary evolution and petroleum systems of deep water basin in the South Atlantic[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2008, 19(2): 216-221. [袁圣强, 吴时国, 马玉波, 等. 南大西洋深水盆地的构造沉积演化及含油气系统[J]. *天然气地球科学*, 2008, 19(2): 216-221.]
- [4] Taylor B, Hayes D E. The tectonic evolution of the South China sea basin// In: Hayes D E. The Tectonic and Geological Evolution of Southeast Asian Seas and Islands[C]. *AGU Geophysical Monograph*, 1980, 23: 89-104.
- [5] Taylor B, Hayes D E. Origin and history of the South China Sea basin// In: Hayes D E. The Tectonic and Geological Evolution of Southeast Asian Seas and Islands: Part 2[C]. *AGU Geophysical Monograph*, 1983, 27: 23-56.
- [6] Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y, *et al.* Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine[J]. *Geology*, 1982, 7: 611-616.
- [7] Ru K, Pigott J D. Episodic rifting and subsidence in the South China Sea[J]. *AAPG Bulletin*, 1986, 70: 1136-1155.
- [8] Hall R. Reconstructing Cenozoic SE Asia// In: Hall R, Blundell D J. Tectonic Evolution of Southeast Asia[C]. *Geol. Soc. London, Spec. Pub.*, 1996, 106: 203-224.
- [9] Tamaki K. Upper Mantle Extrusion Tectonics of Southeast Asia and Formation of the Western Pacific Back-arc Basins [R]. Workshop: Cenozoic Evolution of the Indochina Peninsula, Hanoi/Do Son. Abstract with Program, 1995: 89.
- [10] Flower M F J, Tamaki K, Hoang N. Mantle extrusion: A mod-

- el for dispersed volcanism and DUPAL-like asthenosphere in east Asia and the western Pacific//In: Flower M F J, Chun S L, Lo C H, *et al.* Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia[C]. Washington: AGU Monograph Geodynamic Series, 1998, 27: 67-88.
- [11] Gong Zaisheng, Li Sitian, Xie Taijun, *et al.* The continental margin basin analysis and hydrocarbon accumulation of northern South China Sea[J]. Beijing: Science Press, 1997. [龚再升, 李思田, 谢泰俊, 等. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集[J]. 北京: 科学出版社, 1997.]
- [12] Gong Zaisheng, Li Sitian, Yang Jiaming, *et al.* The dynamics research of oil and gas accumulation of continental margin basin of northern South China Sea[J]. Beijing: Science Press, 2004. [龚再升, 李思田, 杨甲明, 等. 南海北部大陆边缘盆地油气成藏动力学研究[J]. 北京: 科学出版社, 2004.]
- [13] Li Sitian, Lin Changsong, Zhang Qiming, *et al.* The dynamics process of episodic rifting and the tectonic events since 10Ma of continental margin basin of northern South China Sea[J]. Science Bulletin, 1998, 43(8): 797-810. [李思田, 林畅松, 张启明, 等. 南海北部大陆边缘盆地幕式裂隙的动力学过程及10Ma以来的构造事件[J]. 科学通报, 1998, 43(8): 797-810.]
- [14] Yao Bochu, Wan Ling, Liu Zhenhu, *et al.* The dynamics characteristic of tectonic evolution of sedimentary basin in Cenozoic and oil and gas resources of South China Sea[J]. Earth Science, 2004, 9(5): 543-549. [姚伯初, 万玲, 刘振湖, 等. 南海海域新生代沉积盆地构造演化的动力学特征及其油气资源[J]. 地球科学, 2004, 9(5): 543-549.]
- [15] Zhang Gongcheng, Mi Lijun, Wu Shiguo, *et al.* The deep water area: The new field of oil and gas exploration of continental margin basin of northern South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(2): 15-21. [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.]
- [16] He Jiaxiong, Chen Shenghong, Liu Hailing, *et al.* The regional geology and rules and characteristics of hydrocarbon migration and accumulation of continental margin basin of northern South China Sea[J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2008, 30(5): 91-98. [何家雄, 陈胜红, 刘海龄, 等. 南海北部边缘盆地区域地质与油气运聚成藏规律及特点[J]. 西南石油大学学报, 2008, 30(5): 91-98.]
- [17] Mi Lijun, Yuan Yusong, Zhang Gongcheng, *et al.* The characteristic of subterranean heat and its causes of deep water area of northern South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(1): 27-32. [米立军, 袁玉松, 张功成, 等. 南海北部深水区地热特征及其成因[J]. 石油学报, 2009, 30(1): 27-32.]
- [18] Shi Xiaobin, Zhou Di, Zhang Yixiang, *et al.* The heat flow structure of the lithosphere of northern South China Sea continental margin[J]. Science Bulletin, 2000, 45(15): 1160-1165. [施小斌, 周蒂, 张毅祥, 等. 南海北部陆缘岩石圈的热流变结构[J]. 科学通报, 2000, 45(15): 1160-1165.]
- [19] Liu Shaowen, Shi Xiaobin, Wang Liangshu, *et al.* Recent advances in studies on the formation mechanism of South China Sea and thermal-rheological structure of lithosphere in its northern; an overview[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2006, 26(4): 117-124. [刘绍文, 施小斌, 王良书, 等. 南海成因机制及北部岩石圈热一流变结构研究进展[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(4): 117-124.]
- [20] He Jiaxiong, Chen Shenghong, Ma Wenhong, *et al.* The deep-water oil and gas accumulation conditions of the early prediction and evaluation of continental margin basin of northern South China Sea[J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(6): 740-750. [何家雄, 陈胜红, 马文宏, 等. 南海北部边缘盆地深水油气成藏条件早期预测与评价[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(6): 740-750.]
- [21] Pang Xiong, Shen Jun, Yuan Lizhong, *et al.* The deep water fan system of Zhujiang in the South China Sea and its oil and gas exploration prospects[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(3): 11-21. [庞雄, 申俊, 袁立忠, 等. 南海珠江深水扇系统及其油气勘探前景[J]. 石油学报, 2006, 27(3): 11-21.]
- [22] Wu Shiguo, Yuan Shengqiang, Dong Dongdong, *et al.* The reef development characteristics of deep water area of northern South China Sea in Miocene[J]. Journal of Oceanology and Limnology, 2009, 40(2): 117-121. [吴时国, 袁圣强, 董冬冬, 等. 南海北部深水区中新世生物礁发育特征[J]. 海洋与湖沼学报, 2009, 40(2): 117-121.]
- [23] Yang Chuanheng, Du Xu, Pan Heshun, *et al.* The new development of oil and gas exploration of deep water area overseas and oil and gas exploration potential of deep water area of the northern slope of South China Sea[J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(3): 247-256. [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区油气勘探潜力[J]. 地学前缘, 2000, 7(3): 247-256.]
- [24] Liu Tieshu, He Shibin. The deepwater oil and gas exploration prospects of northern South China Sea continental margin basin[J]. China Offshore Oil and Gas: Geology, 2001, 15(3): 164-170. [刘铁树, 何仕斌. 南海北部陆缘盆地深水区油气勘探前景[J]. 中国海上油气: 地质, 2001, 15(3): 164-170.]
- [25] He Jiaxiong, Xia Bin, Shi Xiaobin, *et al.* The development of deepwater oil and gas exploration advances in the world and the prospects of deepwater oil and gas exploration of South China Sea[J]. Natural Gas Geoscience, 2006, 17(6): 748-752. [何家雄, 夏斌, 施小斌, 等. 世界深水油气勘探进展与南海深水油气勘探前景[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(6): 748-752.]
- [26] He Jiaxiong, Shi Xiaobin, Xia Bin, *et al.* The situation of oil and gas exploration and prospects of deepwater oil and gas exploration of northern South China Sea margin basin[J]. Earth Sciences, 2007, 22(3): 261-270. [何家雄, 施小斌, 夏斌, 等. 南海北部边缘盆地油气勘探现状与深水油气资源前景[J]. 地球科学进展, 2007, 22(3): 261-270.]
- [27] He Jiaxiong, Yao Yongjian, Liu Hailing, *et al.* The gas genetic types and characteristics of gas source composition of northern South China Sea margin basin[J]. China Geology, 2008, 35(5): 997-1006. [何家雄, 姚永坚, 刘海龄, 等. 南海北部边缘

- 盆地天然气成因类型及气源构成特点[J]. 中国地质, 2008, 35(5): 997-1006. ]
- [28] He Jiexiong, Chen Shenghong, Cui Shasha, *et al.* The early evaluation and prediction of hydrocarbon source rocks of northern South China Sea margin basin[J]. China Geology, 2009, 26(2): 404-416. [何家雄, 陈胜红, 崔莎莎, 等. 南海北部大陆边缘深水盆地烃源岩早期预测与评价[J]. 中国地质, 2009, 26(2): 404-416. ]
- [29] Wu Shiguo, Yuan Shengqiang. Advance of exploration and petroleum geological features of deepwater hydrocarbon in the world[J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(6): 693-699. [吴时国, 袁圣强. 世界深水油气勘探进展与我国南海深水油气勘探前景[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(6): 693-699. ]
- [30] He Jiexiong, Chen Shenghong, Liu Shilin, *et al.* The genetic types of natural gas and source rocks of northern slope of Baiyun depression-Panyu low uplift of Zhujiangkou basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(1): 16-21. [何家雄, 陈胜红, 刘士林, 等. 珠江口盆地白云凹陷北坡一番禺低隆起天然气成因类型及其烃源探讨[J]. 石油学报, 2009, 30(1): 16-21. ]
- [31] Peng Dajun, Pang Xiong, Chen Changmin. *et al.* From the shallow shelf to deep water slope-deep water fan system of the South China Sea[J]. Sedimentary Sinica, 2005, 7(3): 1-11. [彭大钧, 庞雄, 陈长民, 等. 从浅水陆架走向深水陆坡——南海深水扇系统的研究[J]. 沉积学报, 2005, 7(3): 1-11. ]
- [32] Pang Xiong, Chen Changmin, Peng Dajun, *et al.* The Deep Water Fan Systems and Oil and Gas of the South China Sea[M]. Beijing: Science Press, 2007: 142-341. [庞雄, 陈长民, 彭大钧, 等. 南海珠江深水扇系统及油气[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 142-341. ]
- [33] Pang Xiong, Shen Jun, Yuan Lizhong, *et al.* The deep water fan systems and prospects of oil and gas exploration of northern South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(3): 11-16. [庞雄, 申俊, 袁立忠, 等. 南海北部珠江深水扇系统及其油气勘探前景[J]. 石油学报, 2006, 27(3): 11-16. ]
- [34] He Shibin, Zhang Gongcheng, Mi Lijun, *et al.* The reservoir types and sedimentary evolution of deep water area of continental margin basin of northern South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 5(28): 51-56. [何士斌, 张功成, 米立军, 等. 南海北部大陆边缘盆地深水区储层类型及沉积演化[J]. 石油学报, 2007, 5(28): 51-56. ]
- [35] Liu Baojun, Shen Jun, Pang Xiong, *et al.* The shallow marine delta sedimentary environment of Zhuhai layer of Baiyun depression in Zhujiangkou basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 2(28): 49-56. [柳保军, 申俊, 庞雄, 等. 珠江口盆地白云凹陷珠海组浅海三角洲沉积环境[J]. 石油学报, 2007, 2(28): 49-56. ]
- [36] Ma Wenhong, He Jiexiong, Yao Yongjian, *et al.* The Tertiary sediment and the main characteristics of hydrocarbon source rocks of northern South China Sea margin basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(1): 41-48. [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. ]
- [37] Mi Lijun, Zhang Gongcheng, Fu Ning, *et al.* The analysis of oil and gas sources and accumulation of northern slope of Baiyun depression-Panyu low uplift of Zhujiangkou basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2006, 18(3): 161-168. [米立军, 张功成, 傅宁, 等. 珠江口盆地白云凹陷北坡一番禺低隆起油气来源及成藏分析[J]. 中国海上油气, 2006, 18(3): 161-168. ]
- [38] Fu Ning, Mi Lijun, Zhang Gongcheng, *et al.* The hydrocarbon source rocks of Baiyun depression in Zhujiangkou basin and northern oil and gas origin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(3): 32-38. [傅宁, 米立军, 张功成, 等. 珠江口盆地白云凹陷烃源岩及北部油气成因[J]. 石油学报, 2007, 28(3): 32-38. ]
- [39] Paul Mann, Mike Horn, Ian Cross. Tectonic Setting of 79 Giant Oil and Gas Fields Discovered from 2000—2007: Implications for Future Discovery Trends[C]. Tulsa: AAPG 2007 Annual Convention.
- [40] Edwards J D, Santogrossi P A. Divergent/Passive Margin Basins[M]. AAPG Memoir 48. Tulsa: AAPG, 1989.
- [41] Marcio Rocha Mello, Barry J. Katz. Petroleum Systems of South Atlantic Margins [M]. AAPG Memoir 73. Tulsa: AAPG, 1997.
- [42] Lv Fuliang, He Xunyun, Wu Jinyun, *et al.* The situation of the world's deep water oil and gas exploration, development trends and inspiration on deepwater exploration in China[J]. China Petroleum Exploration, 2007, (6): 28-31. [吕福亮, 贺训云, 武金云, 等. 世界深水油气勘探现状、发展趋势及对我国深水勘探的启示[J]. 中国石油勘探, 2007, (6): 28-31. ]
- [43] Zhou Di, Sun Zhen, Chen Hanzong. The structural characteristics of famous deep water basins in the world and inspiration on deep water oil and gas exploration of northern South China Sea[J]. Advance in Earth Sciences, 2007, 22(6): 561-572. [周蒂, 孙珍, 陈汉宗. 世界著名深水油气盆地的构造特征及对我国南海北部深水油气勘探的启示[J]. 地球科学进展, 2007, 22(6): 561-572. ]
- [44] Ma Yubo, Wu Shiguo, Yuan Shengqiang, *et al.* The comparison of deepwater oil and gas geological conditions between continental margin basin of northern South China Sea and Sri Lanka Campo basin[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2008, 28(4): 101-110. [马玉波, 吴时国, 袁圣强, 等. 南海北部陆缘盆地与坎波斯盆地深水油气地质条件的对比[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(4): 101-110. ]
- [45] Zhu Weilin. The key geological problems of deep water oil and gas exploration of northern South China Sea[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(8): 1059-1064. [朱伟林. 南海北部深水油气勘探关键地质问题[J]. 地质学报, 2009, 83(8): 1059-1064. ]
- [46] Michel T, Halbouty. Giant oil and gas fields of the 1990s: An introduction//Halbouty M T. Giant Oil and Gas Fields of the Decade 1990—1999[M]. AAPG Memoir 78. Tulsa: AAPG, 2003: 1-14.
- [47] Halbouty M T. Giant Oil and Gas Fields of the Decade 1990—1999[M]. AAPG Memoir 78. Tulsa: AAPG, 2003.

2005,16(3):398-402. ]

天然气地球科学,2007,18(2):168-175. ]

- [4] Shi Dou,Zheng Junwei. Coexistence and enrichment of oil,gas, coal and uranium in a basin and their organic material base[J]. Natural Gas Geoscience,2007,18( 2):168-175. [史斗,郑军卫. 天然气与油、煤、铀同盆共存富集关系及其有机物质基础[J].

- [5] USGS. U. S. Geological Survey Fact Sheet 2008-3049: Circum-Arctic Resource Appraisal: Estimates of Undiscovered Oil and Gas North of the Arctic Circle [http://pubs. usgs. gov/fs/2008/3049/].

## Potential of Global Offshore Petroleum Resource Exploration and Utilization Prospect

JIANG Wen-rong,ZHOU Wen-wen,JIA Huai-cun

(CNOOC Research Center,Beijing 100027,China)

**Abstract:** World offshore petroleum resource is abundant. With rapid economic development and onshore exploration becoming mature, the exploration and development for offshore petroleum resource has gradually become a hot spot. Two databases of IHS and USGS (United States Geology Survey) suggested that the recoverable oil and gas reserve would be 1 321. 5 billion barrels oil equivalent, about 35. 8% of world total petroleum reserve. They are distributed in 12 regions around offshore. The undiscovered oil and gas resources in offshore are not uniformly distributed in the world. By statistics of undiscovered petroleum resources and exploration layers in the main global offshore basins, the first and second class potential exploration areas are 16 basins, 10 of which was in the moderate exploration degree for undiscovered oil and gas resources, accounting for 42% of total resource. So it is good target for petroleum exploration.

**Key words:** Global offshore oil-gas; Overseas exploration; Undiscovered oil-gas resource; Exploration layer; Exploration potential.

(上接第 908 页)

## Analogy of Oil and Gas Geology between Quasi-passive Margin of Northern South China Sea and Global Oil and Gas Enriched Areas in Deep Water

HE Jia-xiong<sup>1</sup>, YAN Wen<sup>1</sup>, MA Wen-hong<sup>2</sup>, ZHU You-hai<sup>3</sup>, CHEN Sheng-hong<sup>4</sup>, GONG Xiao-feng<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, CAS, Guangzhou 510640, China;

2. Zhanjiang Branch, CNOOC, Zhanjiang 524057, China; 3. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 4. Shenzhen Branch, CNOOC, Shenzhen, 510240, China)

**Abstract:** Deep-water basin of northern South China Sea is under complex geodynamic setting of quasi-passive continental margin in Cenozoic, with a passive continental margin extensional tectonic rifting of basic properties and oil and gas geological features. Geological conditions for oil and gas migration and accumulation in the deep-water basin of quasi-passive continental margin in northern South China Sea is similar with some typical deep-water oil and gas-enriched area in global passive continental margin, but there is also some difference and particularity. In this paper, we discuss the special geological background for oil and gas in deep-water basin of the northern South China Sea, accumulation and migration of oil and gas, and geological and geophysical exploration, in comparison with regional geological setting and structural properties, geological condition, and oil and accumulation in deep-water basin of typical passive continental margin in the world. We also received some important suggestion and reference about oil and gas exploration in deep-water basin.

**Key words:** Quasi-passive continental margin of northern South China Sea; Deep-water oil and gas geological feature; Deep-water oil and gas-enriched area; Analogy; Suggestion.