

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.116>



南海中南部区域储层分布规律及油气成藏模式

王 龙, 赵志刚, 谢晓军, 刘世翔, 郭 佳, 宋 双, 王一博, 唐 武, 孙 瑞

中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028

摘要: 目前鲜有以南海中南部区域作为整体开展油气成藏模式研究。在前人研究基础上, 结合构造演化、烃源岩研究, 重点分析了油气分布特征, 解剖了大中型油气田, 开展了南海中南部区域碎屑岩储层和碳酸盐岩储层分布规律及油气成藏模式的系统研究。碎屑岩储层主要分布于万安盆地西侧、曾母盆地南侧和文莱—沙巴盆地, 渐新世至上新世自南海中南部西南缘—南缘—东南缘主力碎屑岩储层分布层位逐渐变新; 碳酸盐岩储层主要分布于万安盆地东部、曾母盆地中北部、礼乐盆地和巴拉望盆地。南海中南部区域迄今发现的 54 个特大型—大型油气田中, 有碎屑岩油气田 32 个, 碳酸盐岩油气田 22 个, 储量合计为 46.7×10^8 t, 占油气总储量的 81%。依据烃源岩特征、储层分布特点及典型油气田的成藏规律认识, 将南海中南部的成藏模式分为 3 类: 自生自储、砂岩储层富油为主、早期成藏; 下生上储、碳酸盐岩储层富气为主、晚期成藏; 自生自储、砂岩储层内油气并存、晚期成藏。

关键词: 南海中南部; 大中型油气田; 储层; 成藏模式; 石油地质。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2019)03-0919-10

收稿日期: 2018-09-15

Reservoir Distribution and Hydrocarbon Accumulation Patterns in Central-Southern South China Sea

Wang Long, Zhao Zhigang, Xie Xiaojun, Liu Shixiang, Guo Jia, Song Shuang, Wang Yibo, Tang Wu, Sun Rui

CNOOC Research Institute Ltd., Beijing 100028, China

Abstract: Few of researchers take the central-southern South China Sea (SCS) as a whole to study the oil and gas accumulation model. The hydrocarbon distribution features and accumulation models of both clastic reservoirs and carbonate reservoirs in central-southern SCS have been studied, based on both the previous research but also comprehensive analyses of tectonic evolution, source rock and key oil and gas field analysis. The results indicate that clastic reservoirs are mainly distributed in western Wan'an Basin, southern Zengmu Basin and Brunei-Sabah Basin. Carbonate reservoirs are mainly distributed in eastern Wan'an Basin, central-northern Zengmu Basin, Liyue Basin and Palawan Basin. There are 54 giant-supergiant oil and gas fields in central-southern SCS, among which 32 are clastic reservoirs while others are carbonate reservoirs. Reserves of these 54 fields are 4.67 billion tons, accounting for 81% of the total reserves of the whole area. Based on the characteristic analysis of source rocks, reservoirs and hydrocarbon accumulation of the key oil and gas fields, there are 3 kinds of accumulation patterns, and their features are as follows: source and reservoir in same layer, oil-rich clastic reservoirs, early-stage accumulation; lower-source and upper-reservoirs; gas-rich carbonate reservoirs, late-stage accumulation; source and reservoirs in same layer, oil and gas-rich clastic reservoirs, and late-stage accumulation.

Key words: central-southern SCS; giant oil and gas field; reservoir; accumulation model; petroleum geology.

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.91528303); 国家科技重大专项(No.2016ZX05026)。

作者简介: 王龙(1987—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事海洋油气地质综合研究。ORCID: 0000-0003-3219-4762. E-mail: 37306585@qq.com

引用格式: 王龙, 赵志刚, 谢晓军, 等. 2019. 南海中南部区域储层分布规律及油气成藏模式. 地球科学, 44(3): 919-928.

0 引言

南海是西太平洋重要的边缘海,位于欧亚板块、太平洋板块和印-澳板块的交汇地带(姚伯初和万玲,2006).南海中南部区域蕴藏着丰富的油气资源,是我国未来重要的油气勘探接替区.截至目前,该区域内油气可采储量为 57.8×10^8 t(为 2P 可采储量油当量;据 Information Handling Services,简称 IHS^①),其中石油为 17.56×10^8 t,天然气为 5.01×10^{12} m³.本文在前人对南海构造演化研究的背景下,结合烃源岩研究已经取得的认识,重点开展储层分布规律研究并分析典型油气田的成藏特征,在此基础上总结油气成藏模式,以期对南海中南部油气勘探起到一定的指导作用.

1 区域地质背景

南海中南部区域经历了多板块之间复杂的构造运动,表现为“北张南压、东挤西滑”的特征(张功成等,2015),主要盆地经历了断拗期、反转期(对应于礼乐盆地和巴拉望盆地为漂移期)和拗陷期.主要发育始新世—第四纪地层,其中礼乐盆地—巴拉望盆地以始新统一渐新统为主,万安盆地、曾母盆地及文莱—沙巴盆地以渐新统一中新统为主.区域内发育湖相、海陆过渡相和海相 3 大沉积体系.晚始新世—渐新世,万安盆地发育湖相沉积体系,其他盆地发育三角洲—滨浅海—半深海沉积体系;中新世—第四纪,全区主要发育海陆过渡相—海相沉积.主要发育 3 类烃源岩,分别为湖相烃源岩、过渡相烃源岩和陆源海相烃源岩(Hakimi *et al.*, 2013; 谢晓军等, 2018).湖相烃源岩 TOC 主体位于 1%~10%之间,氢指数(HI)为 200~300 mg/g,干酪根类型以 II₁~II₂ 型为主;过渡相烃源岩 TOC 主要在 0.5%~3%之间,局部可达 40%,氢指数(HI)主体在 50~350 mg/g 之间,以 II₂~III 型干酪根为主;陆源海相烃源岩 TOC 主体为 1%,氢指数(HI)主体在 30~240 mg/g 之间,以 III 型干酪根为主(王龙等,2017).目前在南海中南部区域已发现近 340 个油气田,其中特大型—大型油气田 54 个,油气储量合计为 46.7×10^8 t,证实其烃源岩具有非常好的生烃潜力.区域内发育碎屑岩、碳酸盐岩和风化壳 3 类储层,碎屑岩、碳酸盐岩和风化壳储层中发现的储量

分别占油气总储量的 51%、48%和 1%,碎屑岩和碳酸盐岩储层是油气聚集的主要储集类型.

2 主要储层特征

南海中南部区域的碎屑岩储层主要分布于西南缘万安盆地的西侧、南缘曾母盆地的南侧及东南缘文莱—沙巴盆地;碳酸盐岩储层主要分布于礼乐盆地、巴拉望盆地、万安盆地中东部和曾母盆地中北部.

2.1 碎屑岩储层

渐新世早期,南海中南部西南缘的万安盆地发育三角洲、滨浅湖、海岸平原沉积体系,盆地西侧发育湖相沉积;渐新世晚期,沉积环境逐渐转变为三角洲和海相沉积体系,盆地西侧开始形成多个独立分布的大规模三角洲(图 1),物源主要来自盆地西部的昆仑隆起,三角洲持续发育且分布范围不断扩大.万安盆地西侧发育的大套连续沉积三角洲砂岩是非常重要的—套储层(赵志刚等,2016).钻井揭示储层以中细粒石英岩屑砂岩和长石砂岩为主,分选中等,孔隙度为 15%~21%.同时期,曾母盆地物源主要来自婆罗洲,盆地南缘持续发育河流—三角洲沉积(Holdgate *et al.*, 2017),三角洲不断向北进积.曾母盆地南侧发育的砂岩储层,岩性为厚层块状砂岩夹泥岩,厚度为 30~170 m,砂地比为 31%~70%,砂体单层厚度为 15~30 m,孔隙度可达 25%.

早中新世,万安盆地西侧三角洲持续发育并不断向东进积,同时规模增大且横向连片性增强(高红芳,2011).曾母盆地沉积环境未发生明显变化,北巽他河物源供给方向未发生变化,拉让河物源供给方向由 SW-NE 转变为 S-N 向,物源的供给量增加,三角洲分布面积增大,储层岩性为砂岩与含煤泥岩互层,厚度为 180~201 m,砂地比为 10%~30%,砂体单层厚度为 3~15 m,孔隙度为 18%~23%.文莱—沙巴盆地主体为浅海—半深海沉积环境,盆地内缺乏粗粒陆源碎屑供给,以海相沉积为主(Franke *et al.*, 2011).

中中新世—上新世,万安盆地西侧的三角洲开始逐渐萎缩.曾母盆地南侧的拉让河物源供给方向转变为 SE-NW 向(王登等,2013),河流相欠发育,三角洲开始退积且分布面积逐渐减小,而南海中南部东南缘的文莱—沙巴盆地开始接受来自盆地东南部的物源供给,三角洲持续发育(Cullen, 2014),厚度大且分布稳定,并向盆地南部不断迁移,但整体仍然具有向 NW 方向进积的趋势.上新世,在文莱—沙

^①<https://ihsmarkit.com>; 2019-01-17.

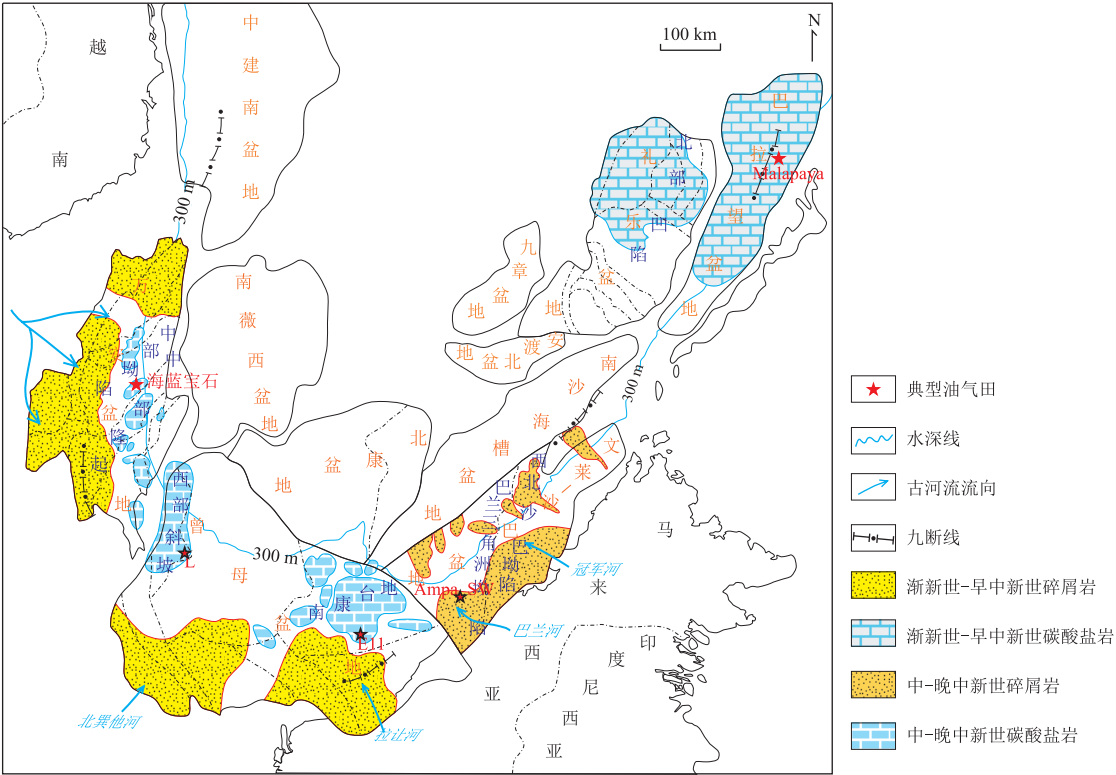


图 1 南海中南部区域盆地位置及主要盆地储层分布

Fig.1 Basin location and reservoir distribution in central-southern South China Sea

巴盆地南部三角洲仍有发育,且自下而上具有连片、广泛和稳定分布的特征(Lambiase and Cullen,2013).砂岩储层类型以细一中粗粒砂岩和滑塌浊积砂岩为主,孔隙度在 6%~26%之间,渗透率为 0.1~1.7 μm^2 .

2.2 碳酸盐岩储层

晚渐新世一中中新世,礼乐盆地和巴拉望盆地从南海北部的华南大陆边缘裂离开始不断向南漂移(Suggate *et al.*,2014;王一博等,2016;Shao *et al.*,2017),在漂移演化阶段,盆地周缘及内部缺乏大型隆起,发育浅海相沉积环境,普遍接受广泛的碳酸盐岩沉积,发育厚度稳定、分布面积广的碳酸盐岩储层,主要沉积类型为碳酸盐岩台地、生物礁和礁滩(Steuer *et al.*,2013;Ma *et al.*,2018).以下中新统尼多灰岩(Nido)为例,储层平均孔隙度为 12.6%,最大孔隙度为 16%,礼乐盆地内钻井揭示该套碳酸盐岩储层最大厚度可达 1 800 m.

中一晚中新世万安盆地中东部区域主要为浅海相沉积环境(谢晓军等,2015).相对海平面稳定快速上升,碳酸盐岩和生物礁储层大规模发育于古隆起及局部高地之上(Lü *et al.*,2013).碳酸盐岩储层主要发育于盆地内中部坳陷的坳中隆以及中部隆起之上,储层岩性以生物灰岩、颗粒灰岩和泥灰岩为主,

局部夹泥岩薄层和白云岩,平均孔隙度为 20%,最高可达 40%,渗透率为 0.2~2 μm^2 .中中新世一上新世,曾母盆地持续发育浅海一半深海相沉积环境(Koša,2015;Jamaludin *et al.*,2018),盆地中北部(西部斜坡、南康台地)集中密集发育大规模碳酸盐岩台地和生物礁,形成盆地内重要的优质碳酸盐岩储层,岩性以生物灰岩和颗粒灰岩为主,孔隙度为 10%~37%,渗透率为 0.1~1.2 μm^2 .

3 典型油气田成藏特征

截至 2018 年,在南海中南部已发现特大型一大型油气田共 54 个,储量合计为 46.7×10^8 t,占该区域油气总储量的 81%.这些油气田主要分布于曾母盆地、文莱—沙巴盆地、万安盆地和巴拉望盆地,其中特大型油气田 4 个,储量合计为 19.9×10^8 t,大型油气田 50 个,储量合计为 26.8×10^8 t(据 IHS^①).特大型一大型碎屑岩油气田 32 个,储量合计为 25.72×10^8 t,其中石油为 11.66×10^8 t,天然气为 9.37×10^{12} m³;特大型一大型碳酸盐岩油气田 22 个,储量合计为 21.03×10^8 t,石油为 1.49×10^8 t,天然气为 3.02×10^{12} m³(图 2).

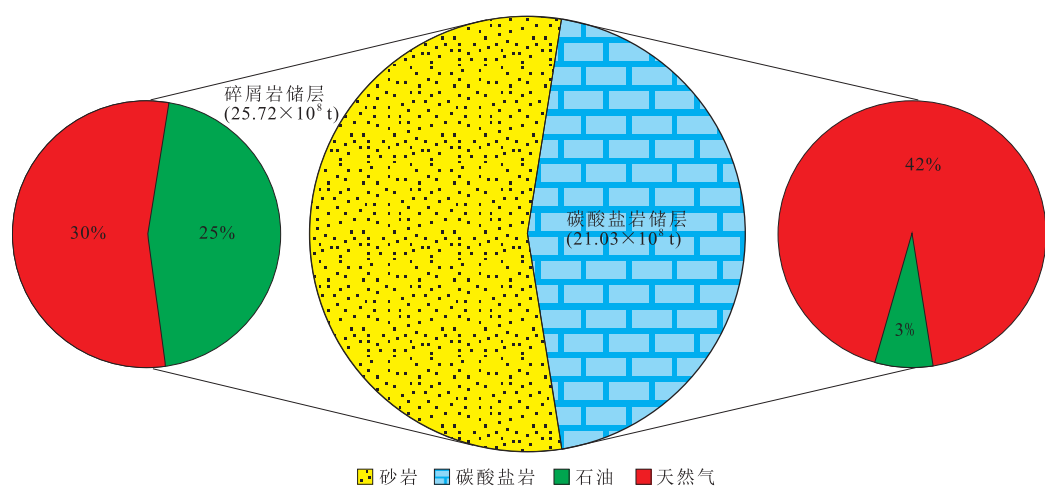


图 2 南海中南部特大型—大型油气田不同类型储层储量分布

Fig.2 Reserve distribution of different reservoir types in the super giant-giant oil and gas fields

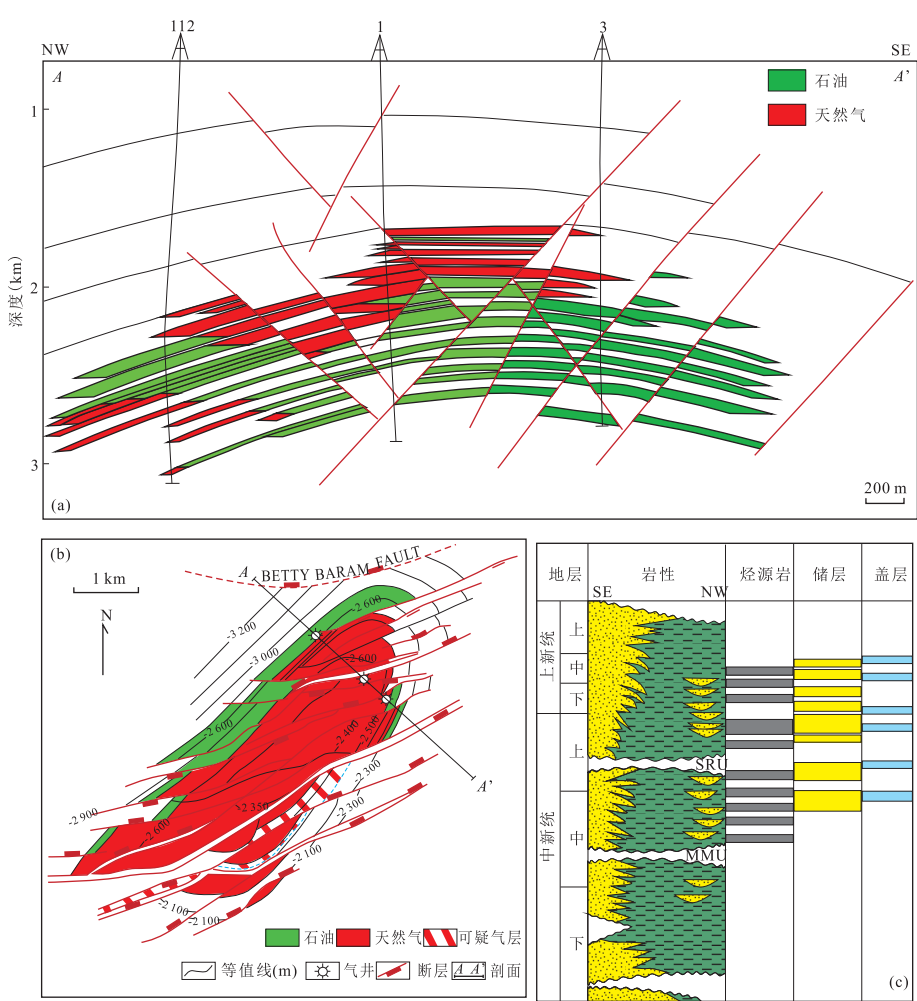


图 3 文莱—沙巴盆地 Ampa Southwest 油气田综合图

Fig.3 Integrated chart of Ampa Southwest oil and gas field in Brunei-Shaba Basin

图 a、b 为 Ampa Southwest 油气田地质剖面图、中新统储层顶面构造图,图 c 为文莱—沙巴盆地综合柱状图

3.1 碎屑岩油气田

南海中南部区域第二大油气田是 Ampa South-

west 油气田,该油气田发现于 1963 年,位于文莱—沙巴盆地巴兰三角洲坳陷西南部,是迄今为止该盆

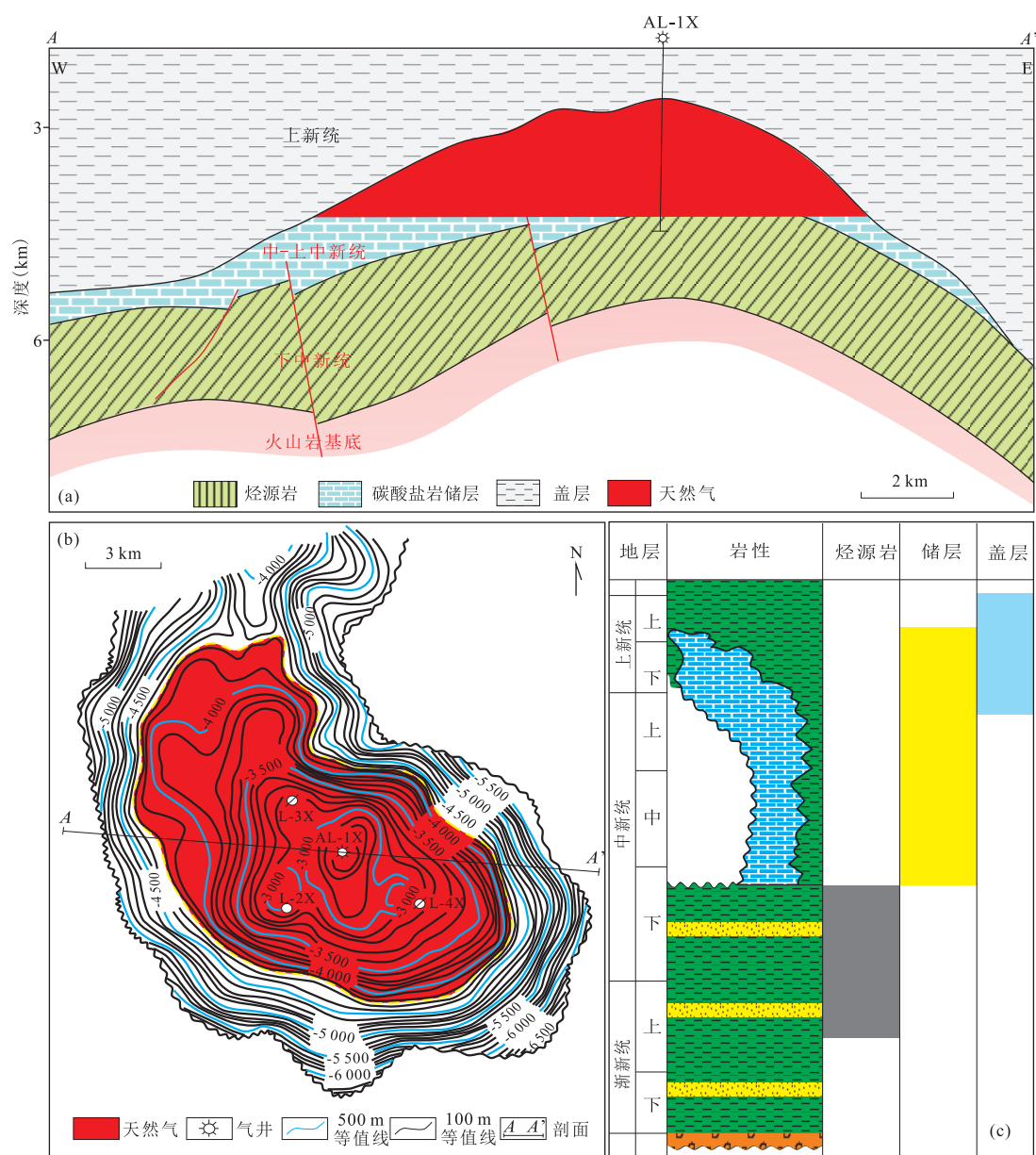


图 4 曾母盆地 L 气田综合图

Fig.4 Integrated chart of L gas field in Zengmu Basin

图 a、b 为 L 气田地质剖面图、中新统储层顶面构造图,图 c 为曾母盆地综合柱状图

地内储量规模最大的油气田.油气田最大水深为 30 m,石油可采储量为 1.53×10^8 t,天然气可采储量为 0.34×10^{12} m³,总可采储量油当量为 4.3×10^8 t,占盆地油气可采储量的 17.5%.该油气田烃源岩为上中新统三角洲煤系烃源岩,储层为上中新统巴兰三角洲砂岩(刘世翔等,2016),盖层为上中新统的层间泥岩夹层,圈闭类型为被断裂切割的断鼻和断背斜,构造形态相对完整,圈闭短轴可达 3~5 km,长轴可达 8~10 km;烃源岩在上新世进入生排烃高峰,油气生成后就近聚集在相邻的砂岩储层中成藏,各类成藏要素匹配关系良好,具有典型的自

生自储的成藏特征(图 3).

3.2 碳酸盐岩油气田

南海中南部区域最大的气田是位于曾母盆地的 L 气田,该气田发现于 1973 年,位于西部斜坡东侧,天然气可采储量为 1.31×10^{12} m³,占盆地已发现油气可采储量的 36.2%.天然气类型为干气,CH₄ 含量为 26.53%,CO₂ 含量为 71%.主要储层为发育于褶皱基底之上的中-上新统穹隆状碳酸盐岩生物礁(杨振等,2016),礁体厚度约为 3.9 km,礁体规模约为 320 km²,孔隙度和渗透率平均为 15% 和 0.3 μm².储层可分为上下两层,其间被 30~60 m 厚

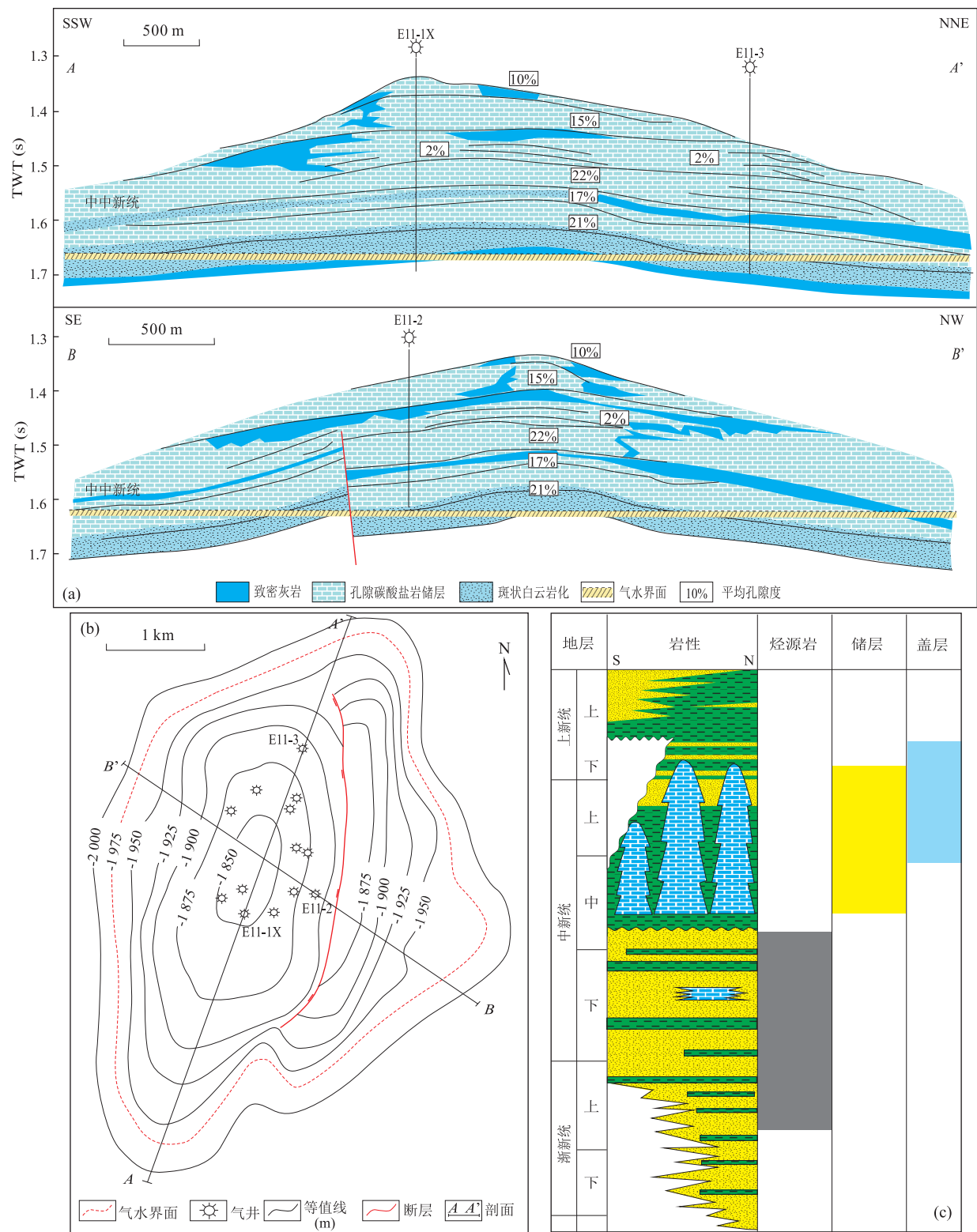


图 5 曾母盆地 E11 油气田综合图

Fig.5 Integrated chart of E11 oil and gas field in Zengmu Basin

图 a、b 为 E11 油气田地质剖面图、中中新统储层顶面构造图，图 c 为曾母盆地综合柱状图

的低孔致密泥灰岩分隔。烃源岩为下中新统泥岩和碳质泥岩，上新统烃源岩进入生烃高峰，油气沿早—中中新世形成的断裂垂向运移并在生物礁储层内聚集成藏，盖层为上新统一第四系厚层泥岩，该气田具

有典型的下生上储、晚期成藏特征(图 4)。

南海中南部区域第三大油气田同样位于曾母盆地内,该油气田发现于 1971 年,位于南康台地中部,可采储量为 2.87×10^8 t,其中凝析油储量为 0.22×10^8 t,天然气储量为 0.33×10^{12} m³。天然气类型为干气,CH₄ 含量为 86.2%,CO₂ 含量为 7.3%。构造高点深度为 1 410 m,油水界面为 1 971 m,烃柱高度为 526 m,平均气柱高度为 173 m,含烃面积为 22.3 km²,孔隙度为 15%~28%,含水饱和度为 5%~40%,渗透率为 0.1~0.6 μm²。该油气田烃源岩为下中新统煤系烃源岩,上新世,烃源岩成熟后排出的油气沿断裂垂向运移至上中新统碳酸盐岩塔形岩隆中聚集,盖层为上新统一第四系厚层泥岩,圈闭类型为具有一定构造背景的碳酸盐岩生物礁,具有下生上储、晚期成藏的特征(图 5)。

4 成藏模式

南海中南部区域构造演化阶段控制着各盆地发

育不同的沉积充填样式,因此包括烃源岩、储层、盖层以及圈闭类型等成藏要素均存在差异(姚伯初和刘振湖,2006)(图 6)。礼乐盆地和巴拉望盆地内主要为上渐新统一下中新统碳酸盐岩储层富气;万安盆地和曾母盆地近岸为上渐新统一下中新统砂岩储层富油,远岸为中—上中新统碳酸盐岩储层富气;文莱—沙巴盆地为中中新统一上新统砂岩储层富油气(图 7)。通过分析南海中南部 54 个大型及以上油气田的成藏特征,笔者将盆地划分为礼乐盆地—巴拉望盆地、万安盆地和曾母盆地—文莱—沙巴盆地 3 个大型油气区,具有 3 类油气成藏模式:(1)自生自储、早期成藏;(2)下生上储、晚期成藏;(3)自生自储、晚期成藏。

礼乐盆地和巴拉望盆地在始新世—早渐新世仍然位于古南海北部华南大陆边缘(Yao *et al.*, 2012; 姚永坚等, 2013),该时期盆地内发育三角洲—滨浅海沉积体系,局部为浅海—半深海沉积环境,发育陆源海相烃源岩;进入晚渐新世—中中新世漂移期后,盆地长期处于浅海—半深海沉积环境,水质良好,发

成藏要素	巴拉望盆地	礼乐盆地	曾母盆地	万安盆地	文莱—沙巴盆地
主要烃源岩	始新世—渐新世		渐新世—早中新世		中中新世—上新世
烃源岩类型	陆源海相		海陆过渡相、陆源海相		海陆过渡相
主要储层类型	碳酸盐岩			碎屑岩	
主要储层时代	晚渐新世—早中新世	晚渐新世—现今	中—晚中新世	晚渐新世—中中新世	中中新世—上新世
构造背景	漂移期		挤压反转期	陆架边缘	陆架边缘
储层规模	厚度稳定、连片分布		大中型密集分布	与三角洲规模相关	厚度大、垂向连片叠置
分布位置	全盆地 (Nido 灰岩)	北部坳陷	西部斜坡、南康台地、 西巴林坚隆起	盆地西缘	巴兰三角洲坳陷 西北沙巴坳陷
主控因素	持续浅海相		挤压反转	海陆过渡相	
储层异性	中中新世消亡	持续发育至今	与断裂相关、集中密集分布	储层位置有序分布(与三角洲迁移相关)	
盖层	中中新统一现今		上新统一现今	渐新统一下中新统	中中新统一上新统
圈闭类型	岩性			断块、断背斜、披覆背斜、断鼻、滚动背斜	
运移方式	地层上倾方向及垂向断层		近源垂向断层	岩性输导、近源侧向运移	
典型油气田	Malapaya		L、E11	海蓝宝石、大熊	Ampa SW、Champion
成藏模式	下生上储晚期成藏			自生自储早期成藏	自生自储晚期成藏

图 6 南海中南部区域主要盆地的成藏要素

Fig.6 Oil and gas accumulation factors of the main basins in central-southern South China Sea

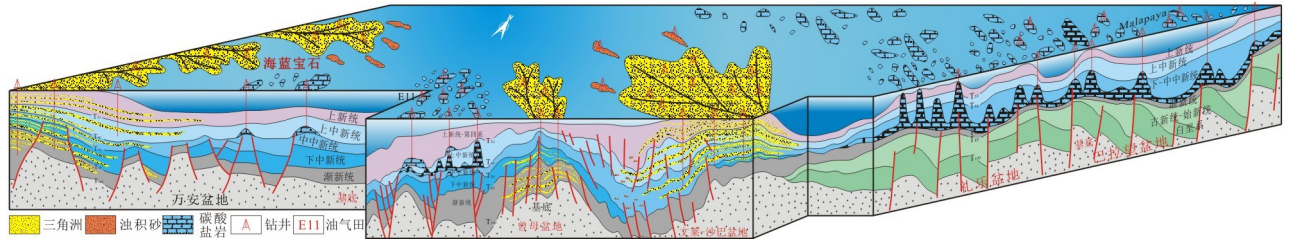


图 7 南海中南部区域油气成藏模式

Fig.7 Integrated oil and gas accumulation model in central-southern South China Sea

育了一套重要的碳酸盐岩储层(叶青等,2017);晚中新世—现今盆地进入拗陷期,沉积了广泛分布的浅海一半深海泥岩,形成了良好的盖层。晚中新世,该区域陆源海相烃源岩达到了成熟—过成熟阶段(Tang *et al.*, 2014),排出的天然气或通过垂向断裂直接运移,或先沿地层上倾方向运移至上覆地层再运移至上部碳酸盐岩储层内聚集成藏。该区域主要发育岩性圈闭,具有下生上储、储层富气为主、晚期成藏的典型特征。巴拉望盆地内最大的 Malapaya 气田为该种成藏类型的典型代表,该气田储量为 1×10^8 t,占巴拉望盆地油气储量的 83%。

万安盆地西侧在渐新世—早中新世发育大型三角洲,形成海陆过渡相碎屑岩生储盖组合;盆地东侧物源供给相对薄弱,主要发育陆源海相烃源岩及碳酸盐岩储层。中中新世盆地东部的南海西缘断裂带发生走滑挤压,导致盆地内构造活动具有东强西弱的特征(Vijayan *et al.*, 2013; Wan *et al.*, 2013)。西侧多数断裂并未沟通上部中中新统地层,中—晚中新世烃源岩成熟后生成的油气(油为主)就近聚集在同期砂岩储层内成藏,圈闭类型包括断块、断背斜、披覆背斜及构造岩性复合等,具有自生自储、早期成藏的特征。而盆地东部构造活动更强,断裂多断至中—上中新统,至上新世烃源岩成熟后生成的油气(气为主)向上垂向运移至碳酸盐岩储层内聚集成藏。

曾母盆地南部在晚渐新世—早中新世持续发育三角洲,形成了重要的煤系烃源岩(Abbassi *et al.*, 2016; Hu *et al.*, 2017)。晚中新世烃源岩成熟后排出的油气(油为主)聚集于三角洲砂岩储层内成藏,具有自生自储、早期成藏的特征;盆地中北部在早中新世主要发育陆源海相烃源岩,中—晚中新世位于盆地东北侧的西巴兰姆—廷贾断裂发生走滑挤压(Cullen, 2010),导致盆地中北部在早期隆起的背景上加剧隆升,断裂活动强烈且多数断至中—上中新统,上新世烃源岩成熟后排出的油气(气为主)向上运移至碳酸盐岩储层内聚集成藏,属于下生上储、晚期成藏。中中新世—上新世,文莱—沙巴盆地中部和南部先后发育冠军、巴兰两期三角洲,三角洲在分布位置上具有向南逐渐迁移的特征。由于物源供给充足,三角洲持续向西北方向进积,在盆地内形成厚度大、连片性好的优质碎屑岩储层。该时期构造活动强度较弱,断裂多终止于上中新统,上新世烃源岩成熟后生成的油气沿地层上倾方向或沿断层短距离运移后聚集于砂岩储层内成藏(Abdullah *et al.*, 2017),具有自生自储、油气并存、晚期成藏的特征。

5 结论

(1)南海中南部主要包括万安盆地、曾母盆地、文莱—沙巴盆地、礼乐盆地和巴拉望盆地。碎屑岩储层主要发育于万安盆地西侧、曾母盆地南侧及文莱—沙巴盆地内近岸大型三角洲持续发育的区域,渐新世至上新世自南海中南部西南缘—南缘—东南缘主力碎屑岩储层分布层位逐渐变新;碳酸盐岩储层主要发育于礼乐盆地、巴拉望盆地、万安盆地东部及曾母盆地中北部浅海相持续发育的区域。

(2)万安盆地西侧、曾母盆地南侧及文莱—沙巴盆地构造活动较弱,导致缺乏沟通上部储层的大型油源断裂,因此发育自生自储式砂岩油气藏,文莱—沙巴盆地内 Ampa Southwest 油气田具有典型的自生自储式成藏特征;礼乐盆地和巴拉望盆地在漂移期断层继承性发育,万安盆地东侧和曾母盆地中北部构造活动强烈,主要发育下生上储式碳酸盐岩油气藏,曾母盆地的 L 气田和 E11 油气田具有下生上储的成藏特征。

(3)南海中南部区域成藏模式分为 3 类:自生自储、砂岩储层富油为主、早期成藏;下生上储、碳酸盐岩储层富气为主、晚期成藏;自生自储、砂岩储层内油气并存、晚期成藏。

References

- Abbassi, S., Edwards, D.S., George, S.C., et al., 2016. Petroleum Potential and Kinetic Models for Hydrocarbon Generation from the Upper Cretaceous to Paleogene Latrobe Group Coals and Shales in the Gippsland Basin, Australia. *Organic Geochemistry*, 91 (1): 54 – 67. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2015.11.001>
- Abdullah, W.H., Togunwa, O.S., Makeen, Y.M., et al., 2017. Hydrocarbon Source Potential of Eocene-Miocene Sequence of Western Sabah, Malaysia. *Marine and Petroleum Geology*, 83: 345 – 361. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.02.031>
- Cullen, A., 2014. Nature and Significance of the West Baram and Tinjar Lines, NW Borneo. *Marine and Petroleum Geology*, 51: 197 – 209. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2013.11.010>
- Cullen, A. B., 2010. Transverse Segmentation of the Baram-Balabac Basin, NW Borneo: Refining the Model of Borneo's Tectonic Evolution. *Petroleum Geoscience*, 16 (1): 3 – 29. <https://doi.org/10.1144/1354-079309-828>
- Franke, D., Barckhausen, U., Baristean, N., et al., 2011. The Continent-Ocean Transition at the Southeastern Margin

- of the South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 28(6): 1187—1204. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2011.01.004>
- Gao, H. F., 2011. A Tentative Discussion on Strike-Slipping Character and Formation Mechanism of Western-Edge Fault Belt in South China Sea. *Geology in China*, 38(3): 537—543 (in Chinese with English abstract).
- Hakimi, M. H., Abdullah, W. H., Alias, F. L., et al., 2013. Organic Petrographic Characteristics of Tertiary (Oligocene–Miocene) Coals from Eastern Malaysia: Rank and Evidence for Petroleum Generation. *International Journal of Coal Geology*, 120: 71—81. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2013.10.003>
- Holdgate, G. R., Sluiter, I. R. K., Taglieri, J., 2017. Eocene–Oligocene Coals of the Gippsland and Australo–Antarctic Basins—Paleoclimatic and Paleogeographic Context and Implications for the Earliest Cenozoic Glaciations. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 472: 236—255. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2017.01.035>
- Hu, G. Y., Peng, W. L., Yu, C., 2017. Insight into the C₈ Light Hydrocarbon Compositional Differences between Coal-Derived and Oil-Associated Gases. *Journal of Natural Gas Geoscience*, 2(3): 157—163. <https://doi.org/10.1016/j.jnggs.2017.08.001>
- Jamaludin, S. N. F., Pubellier, M., Menier, D., 2018. Structural Restoration of Carbonate Platform in the Southern Part of Central Luconia, Malaysia. *Journal of Earth Science*, 29(1): 155—168. <https://doi.org/10.1007/s12583-017-0812-y>
- Koša, E., 2015. Sea-Level Changes, Shoreline Journeys, and the Seismic Stratigraphy of Central Luconia, Miocene–Present, Offshore Sarawak, NW Borneo. *Marine and Petroleum Geology*, 59: 35—55. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.07.005>
- Lambiase, J. J., Cullen, A. B., 2013. Sediment Supply Systems of the Champion “Delta” of NW Borneo: Implications for Deepwater Reservoir Sandstones. *Journal of Asian Earth Sciences*, 76: 356—371. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2012.12.004>
- Liu, S. X., Zhang, G. C., Zhao, Z. G., et al., 2016. Control of Tectonic Cycle in South China Sea over Hydrocarbon Accumulation in the Zengmu Basin. *China Petroleum Exploration*, 21(2): 37—44 (in Chinese with English abstract).
- Lü, C. L., Wu, S. G., Yao, Y. J., et al., 2013. Development and Controlling Factors of Miocene Carbonate Platform in the Nam Con Son Basin, Southwestern South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 45: 55—68. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2013.04.014>
- Ma, B. J., Wu, S. G., Mi, L. J., et al., 2018. Mixed Carbonate–Siliciclastic Deposits in a Channel Complex in the Northern South China Sea. *Journal of Earth Science*, 29(3): 707—720. <https://doi.org/10.1007/s12583-018-0830-4>
- Shao, L., Cao, L. C., Qiao, P. J., et al., 2017. Cretaceous–Eocene Provenance Connections between the Palawan Continental Terrane and the Northern South China Sea Margin. *Earth and Planetary Science Letters*, 477: 97—107. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.08.019>
- Steuer, S., Franke, D., Meresse, F., et al., 2013. Time Constraints on the Evolution of Southern Palawan Island, Philippines from Onshore and Offshore Correlation of Miocene Limestones. *Journal of Asian Earth Sciences*, 76: 412—427. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2013.01.007>
- Suggate, S. M., Cottam, M. A., Hall, R., et al., 2014. South China Continental Margin Signature for Sandstones and Granites from Palawan, Philippines. *Gondwana Research*, 26(2): 699—718. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.07.006>
- Tang, X. Y., Chen, L., Hu, S. B., et al., 2014. Tectono–Thermal Evolution of the Reed Bank Basin, Southern South China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 96: 344—352. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2014.09.030>
- Vijayan, V. R., Foss, C., Staggs, H., 2013. Crustal Character and Thickness over the Dangerous Grounds and beneath the Northwest Borneo Trough. *Journal of Asian Earth Sciences*, 76: 389—398. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2013.06.004>
- Wan, Z. F., Xia, B., Shi, Q. H., et al., 2013. The Wan-An Fault and Its Relationship with the Wan-An Basin, Western South China Sea. *Journal of the Geological Society of India*, 81(3): 415—421. <https://doi.org/10.1007/s12594-013-0052-4>
- Wang, D., Xu, Y. H., Wen, Z. G., et al., 2013. Geochemical Characteristics and Origin of Natural Gas and Condensate in the Central Zone of Zengmu Basin. *Natural Gas Geoscience*, 24(6): 1205—1213 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L., Xie, X. J., Liu, S. X., et al., 2017. Analysis of Hydrocarbon Accumulation and Diversity of the Major Basins in Mid-Southern Part of the South China Sea. *Natural Gas Geoscience*, 28(10): 1546—1554 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. B., Zhang, G. C., Zhao, Z. G., et al., 2016. The Control for Tectonic Cycle of Marginal Sea on Sedimentary Fill in South China Sea: A Case Study of Cenozoic Sediment in Lile Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 37(4): 474—482 (in Chinese with English abstract).
- Xie, X. J., Zhang, G. C., Zhao, Z. G., et al., 2015. Hydrocarbon Geology, Distribution and Favorable Exploration Direction in

- Zengmu Basin, South China Sea. *China Offshore Oil and Gas*, 27(1):19–26 (in Chinese with English abstract).
- Xie, X.J., Zhao, Z.G., Zhang, G.C., et al., 2018. Hydrocarbon Geological Differences of Three Basins in Southern South China Sea. *Earth Science*, 43(3): 802–811 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.508>
- Yang, Z., Zhang, G.X., Zhang, L., 2016. The Evolution and Main Controlling Factors of Reef and Carbonate Platform in Wan'an Basin. *Earth Science*, 41(8): 1349–1360 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.107>
- Yao, B.C., Liu, Z.H., 2006. Sedimentary Basins and Petroleum Resources in Nansha Offshore Area, South China Sea. *China Offshore Oil and Gas*, 18(3): 150–160 (in Chinese with English abstract).
- Yao, B.C., Wan, L., 2006. Three-Dimensional Structure of Lithosphere and Its Evolution in South China Sea. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Yao, Y.J., Liu, H.L., Yang, C.P., et al., 2012. Characteristics and Evolution of Cenozoic Sediments in the Liyue Basin, SE South China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 60: 114–129. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.08.003>
- Yao, Y.J., Yang, C.P., Li, X.J., et al., 2013. The Seismic Reflection Characteristics and Tectonic Significance of the Tectonic Revolutionary Surface of Mid-Miocene (T_3 Seismic Interface) in the Southern South China Sea. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(4): 1274–1286 (in Chinese with English abstract).
- Ye, Q., Shi, H.S., Mei, L.F., et al., 2017. Post-Rift Faulting Migration, Transition and Dynamics in Zhu I Depression, Pearl River Mouth Basin. *Earth Science*, 42(1): 105–118 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.008>
- Zhang, G.C., Wang, P.J., Wu, J.F., et al., 2015. Tectonic Cycle of Marginal Oceanic Basin: A New Evolution Model of the South China Sea. *Earth Science Frontiers*, 22(3): 27–37 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z.G., Liu, S.X., Xie, X.J., et al., 2016. Hydrocarbon Geological Characteristics and Reservoir Forming Conditions in Wan'an Basin, South China. *China Offshore Oil and Gas*, 28(4): 9–15 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 高红芳, 2011. 南海西缘断裂带走滑特征及其形成机理初步研究. *中国地质*, 38(3): 537–543.
- 刘世翔, 张功成, 赵志刚, 等, 2016. 南海构造旋回对曾母盆地油气成藏的控制作用. *中国石油勘探*, 21(2): 37–44.
- 王登, 徐耀辉, 文志刚, 等, 2013. 曾母盆地中部地区天然气与凝析油地球化学特征及成因. *天然气地球科学*, 24(6): 1205–1213.
- 王龙, 谢晓军, 刘世翔, 等, 2017. 南海南部主要盆地油气分布规律及主控因素. *天然气地球科学*, 28(10): 1546–1554.
- 王一博, 张功成, 赵志刚, 等, 2016. 南海边缘海构造旋回对沉积充填的控制——以礼乐盆地新生代沉积为例. *石油学报*, 37(4): 474–482.
- 谢晓军, 张功成, 赵志刚, 等, 2015. 曾母盆地油气地质条件、分布特征及有利勘探方向. *中国海上油气*, 27(1): 19–26.
- 谢晓军, 赵志刚, 张功成, 等, 2018. 南海南部三大盆地油气地质条件差异性. *地球科学*, 43(3): 802–811. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.508>
- 杨振, 张光学, 张莉, 2016. 万安盆地生物礁及碳酸盐台地的发育演化及控制因素. *地球科学*, 41(8): 1349–1360. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.107>
- 姚伯初, 刘振湖, 2006. 南沙海域沉积盆地及油气资源分布. *中国海上油气*, 18(3): 150–160.
- 姚伯初, 万玲, 2006. 中国南海海域岩石圈三维结构及演化. 北京: 地质出版社.
- 姚永坚, 杨楚鹏, 李学杰, 等, 2013. 南海南部海域中中新世 (T_3 界面) 构造变革界面地震反射特征及构造含义. *地球物理学报*, 56(4): 1274–1286.
- 叶青, 施和生, 梅廉夫, 等, 2017. 珠江口盆地珠一坳陷裂后期断裂作用: 迁移、转换及其动力学. *地球科学*, 42(1): 105–118. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.008>
- 张功成, 王璞珺, 吴景富, 等, 2015. 边缘海构造旋回: 南海演化的新模式. *地质前缘*, 22(3): 27–37.
- 赵志刚, 刘世翔, 谢晓军, 等, 2016. 万安盆地油气地质特征及成藏条件. *中国海上油气*, 28(4): 9–15.