

文章编号: 0253-2697(2023)04-0569-14 DOI:10.7623/syxb202304001

南海渐进式边缘海构造旋回控制深水油气成藏理论

张功成

(中海油研究总院有限责任公司 北京 100028)

摘要:边缘海等非大西洋型大陆边缘是当前全球深水油气勘探的前沿领域。南海是全球著名的边缘海之一,其深水油气成藏机理是前缘研究的科学问题。基于地质断面及大洋钻探成果等资料分析,提出南海的形成具有渐进式边缘海构造旋回的特征,即新南海盆的SN向打开在晚渐新世—早中新世表现为自东向西扩展,古南海盆的SN向闭合在渐新世—第四纪表现为自西向东扩展。南海渐进式边缘海构造旋回控制了盆地和油气成藏要素的有序发育。在新南海北部地区,被动大陆边缘盆地的形成具有“东早西晚”的特征:东段珠江口盆地形成始于始新世,发育始新统和下渐新统两套烃源岩、始新统—下中新统储层、中新统—第四系厚层泥岩盖层,含油气层的分布从潜山至中新统;西段琼东南盆地形成始于渐新世,发育下渐新统烃源岩、渐新统—上新统储层、上新统—第四系厚层泥岩盖层,含油气层的分布从潜山至上新统。在古南海地区,活动大陆边缘盆地的形成具有“西早东晚”的特征:西段曾母盆地形成于渐新世,发育渐新统和中新统两套烃源岩、渐新统—中新统储层、上新统—第四系盖层,含油气层的分布从渐新统至上新统;东段文莱—沙巴盆地形成始于中新世,发育中新统烃源岩、下—中中新统储层、第四系泥岩盖层,含油气层的分布从潜山至下—中中新统。基于以上认识提出了南海边缘海油气勘探的新方向。南海北部大陆边缘深水区的新勘探层系为古近系—潜山,南海南部活动大陆边缘的新勘探层系为渐新统—下中新统。

关键词:南海;深水;边缘海;渐进式边缘海构造旋回;油气成藏

中图分类号: TE122.3

文献标识码: A

Theory of deepwater hydrocarbon accumulation controlled by progressive tectonic cycles of marginal sea in the South China Sea

Zhang Gongcheng

(CNOOC Research Institute Company Limited, Beijing 100028, China)

Abstract: At present, non-Atlantic continental margins such as marginal sea are a frontier of global deepwater oil-gas exploration. The South China Sea is one of the most famous marginal seas in the world, and its deepwater oil and gas accumulation mechanism is a scientific problem in frontier research. Based on the data analysis of geological transects and findings from ocean drilling, it has been proposed that the formation of the South China Sea is characterized with progressive tectonic cycles of marginal sea, i. e., the SN-trending opening of the New South China Sea Basin was extending from east to west in the Late Oligocene to Miocene, and the SN-trending closure of the Ancient South China Sea Basin was extending from west to east in the Oligocene to Quaternary. The progressive tectonic cycles of marginal sea in the South China Sea controls the orderly development of basins and hydrocarbon accumulation factors. In the northern part of the New South China Sea, the formation of passive continental margin basins is characterized by “early in the east and late in the west”. Specifically, the development of the Pearl River Mouth Basin in the east section began from the Eocene, which developed the Eocene and Lower Oligocene source rocks, the Eocene to Lower Miocene reservoir, and the Miocene to Quaternary thick mudstone cap rocks, showing a distribution of hydrocarbon-bearing strata from buried hill to Miocene. The development of Qiongdongnan Basin in the west section started from the Oligocene, which developed the Lower Oligocene source rocks, the Oligocene to Pliocene reservoir, and the Upper Miocene to Quaternary thick mudstone cap rocks, showing a distribution of hydrocarbon-bearing strata from buried hill to Pliocene. In the Ancient South China Sea, the formation of active continental margin basins is characterized by “early in the west and late in the east”. To be specific, Zengmu Basin in the west section was formed in the Oligocene, which developed the Oligocene and Miocene source rocks, the Oligocene to Middle Miocene reservoir, and the Pliocene to Quaternary cap rocks, showing a distribution of hydrocarbon-bearing strata from Oligocene to Pliocene. The development of Brunei-Sabah Basin in the eastern section was initiated from the Middle Miocene, which developed the Miocene source rocks, the Lower to Middle Miocene reservoir, and the Quaternary mudstone cap rocks, showing a distribution of hydrocarbon-bearing strata

基金项目: 国家科技重大专项(2008ZX05025, 2011ZX05025, 2016ZX05026)、国家重点基础研究发展计划(973)项目(2009CB219400)、国土资源部“全国油气资源战略选区调查评价项目”(XQ2004-05)和国土资源部“南海北部陆坡深水海域油气资源战略调查及评价项目”(XQ2007-05)资助。

作者简介: 张功成,男,1966年1月生,1994年获中国地质大学(北京)博士学位,现为中海油石油集团有限公司资深勘探专家、教授级高级工程师、西北大学兼职教授,主要从事海洋油气地质学研究及勘探工作。Email: zhanggch@cnooc.com.cn

from buried hill to Lower-Middle Miocene. Based on the above understandings, the paper proposes a new direction for oil-gas exploration in the marginal sea of the South China Sea. The new exploration strata of the deepwater area in the northern continental margin of the South China Sea are from the Paleogene to the buried hill reservoirs, and those in the southern active continental margin of the South China Sea are from Oligocene to Lower Miocene reservoirs.

Key words: South China Sea; deepwater area; marginal sea; progressive tectonic cycles of marginal sea; hydrocarbon accumulation

引用:张功成. 南海渐进式边缘海构造旋回控制深水油气成藏理论[J]. 石油学报, 2023, 44(4): 569-582.

Cite: ZHANG Gongcheng. Theory of deepwater hydrocarbon accumulation controlled by progressive tectonic cycles of marginal sea in the South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(4): 569-582.

全球油气勘探领域包括陆地、浅水区和深水区三大领域。进入 21 世纪, 深水区油气大发现占全球每年大发现的多数^[1-5], 期间, 深水区油气勘探领域从经典的大西洋型被动大陆边缘向边缘海等新领域扩展^[6]。其中, 南海是全球著名的富油气边缘海之一^[7]。

南海油气勘探始于 19 世纪末期, 在 21 世纪以前以浅水区勘探为主, 从 21 世纪开始进入浅水区和深水区勘探并举的阶段。南海浅水区已发现上百亿吨油当量储量; 深水区虽已取得突破, 但与浅水区相比规模要小。深水区经过 20 多年的勘探, 一些规模大且明显的构造圈闭和岩性圈闭已被钻探, 目前处于勘探瓶颈期, 需要创新认识, 开拓新的勘探领域。

笔者基于区域重力—磁力—地震联合地学断面的解析资料、大洋钻探资料、油气钻探成果等, 对南海的构造演化进行了再认识并分析了构造对油气的控制作用, 提出了南海渐进式边缘海构造旋回控制深水油气成藏的认识, 以期为深水油气勘探提供新的理论指导。

1 南海渐进式边缘海构造旋回新模式

关于南海的构造问题, 前人的研究主要集中在分析动力学来源方面, 存在弧后扩张^[8-9]、碰撞-挤出-逃逸模式^[10]、地幔上涌/地幔柱模式^[11]、古南海拖曳模式^[12]、东亚陆缘扩张模式^[13]和复合模式^[14]等不同观点。张功成等^[15-16]提出了南海边缘海构造旋回的形成模式, 认为南海在经历了古南海洋盆和新南海洋盆两个威尔逊旋回后才形成了现今中央为新南海洋盆、向外依次为大陆坡、大陆架格局的认识。该模式主要考虑了新南海洋盆 SN 向打开和古南海洋盆 SN 向消减的演化过程, 但对新南海洋盆和古南海洋盆的 EW 向演变特征欠考虑。基于穿过南海的区域地学断面(图 1)和大洋钻探成果等资料, 笔者提出南海的形成具有渐进式边缘海构造旋回的特征, 并从时空发展的角度对南海的形成过程进行了再认识。

1.1 晚渐新世—早中新世新南海洋盆“东早西晚”的渐进式打开特征

新南海洋盆呈 NE 走向的三角形(图 2), 其北边界呈 NE 向、东边界呈 SN 向、南边界呈 NE 向转 EW

向, 内部被 SN 走向的中南断裂分开, 该断裂以东是东部次海盆, 以西包括西北次海盆、中沙凸起和西南次海盆。关于各个次海盆的形成时代, 前人研究较多但争议也较大^[17]。有研究认为西南次海盆形成早、东部次海盆形成晚, 但也有研究认为西南次海盆形成晚、东部次海盆形成早。

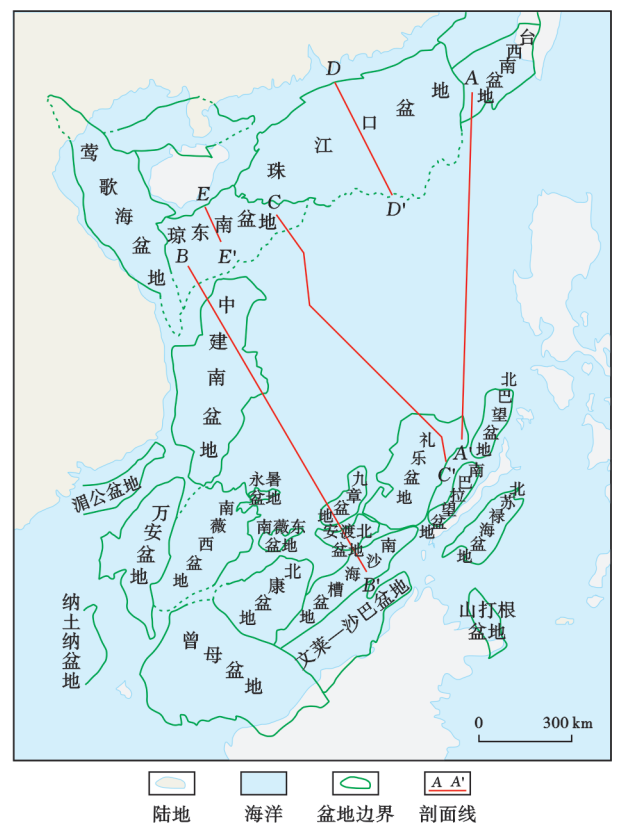


图 1 南海海域盆地及重力—磁力—地震联合地学断面位置
Fig. 1 Basins and locations of gravity-magnetic-seismic geological profiles in the South China Sea

笔者参与设计了横穿南海的重力—磁力—地震地学断面(地震测线全长为 7 128 km、可用重力数据的测线长度为 7 128 km, 可用磁力数据的测线长度为 5 595 km), 剖面穿越南海及其大陆边缘, 能够揭示南海的深部构造。南海莫霍面以上的岩石圈结构分为浅层沉积层和深层两大层次。浅层沉积层的资料来源以钻井和地震信息为主, 可以分析沉积层的构造, 研究其地球物理特征;

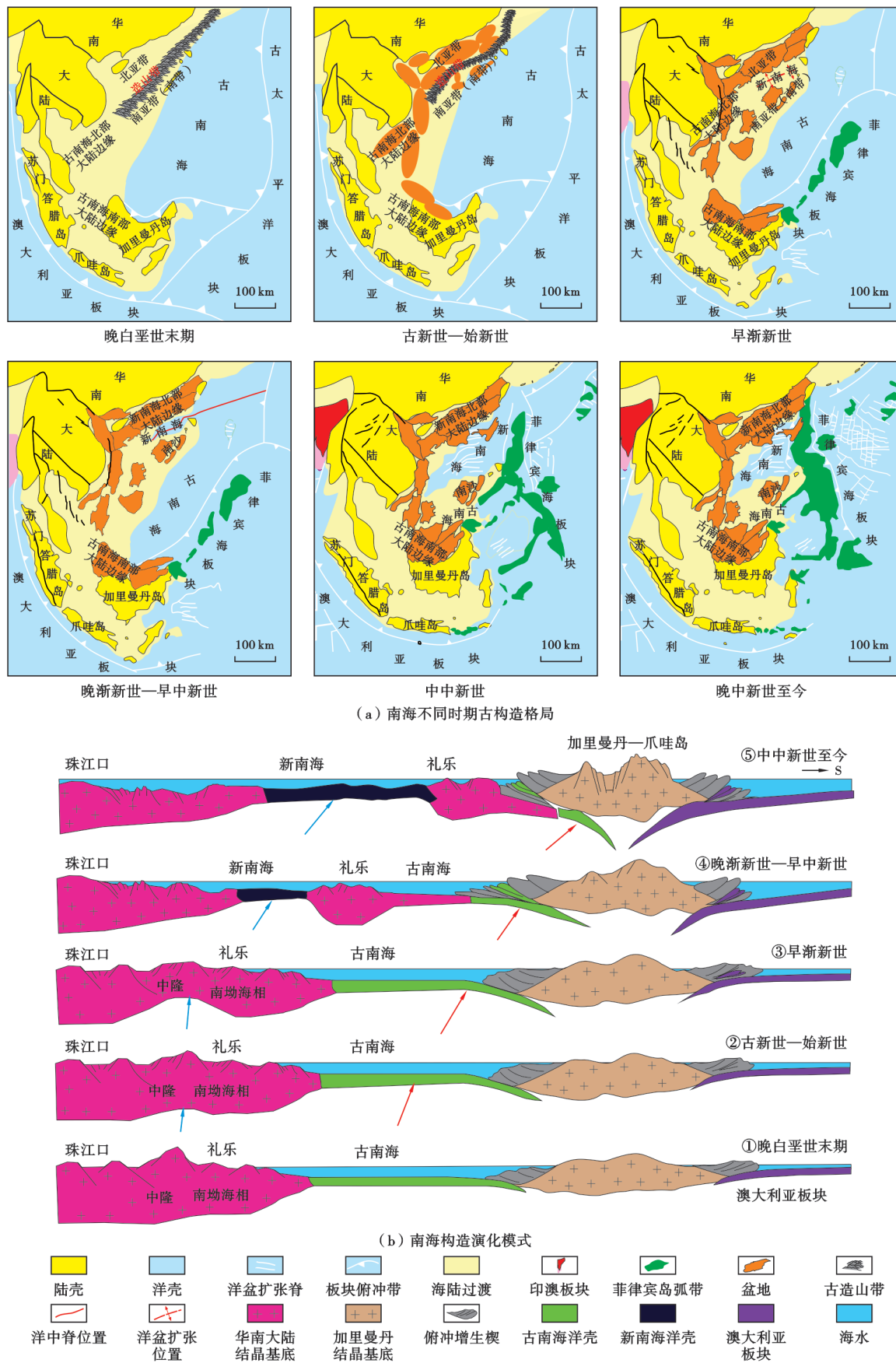
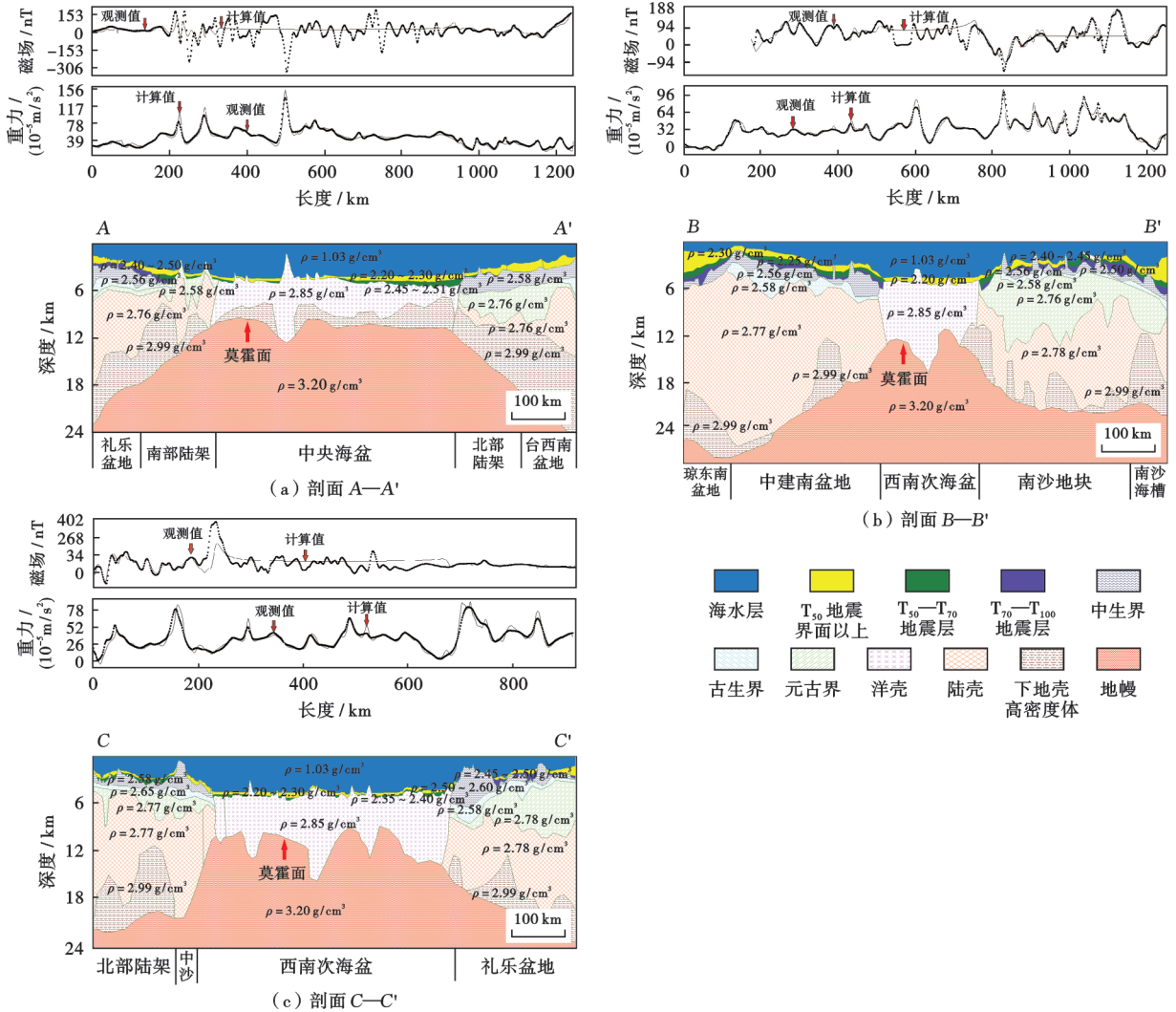


图 2 南海渐进式边缘海构造旋回

Fig. 2 Progressive tectonic cycle of marginal sea in the South China Sea

深层的构造研究采用回剥法,根据重力反演和测深标定等方法获取莫霍面深度,然后减去根据人工地震确定的基底以上地层所引起的重力异常厚度,对剩余异常进行重力—磁力联合反演,最终以能同时

满足两者的地壳结构反演结果为可能方案(图3)。将浅层沉积层与深层的构造信息相结合,综合大洋钻探和油气探井资料,推断新南海海洋盆的形成时期及其迁移特征。



注: T_{50} —三叠组顶部; T_{70} —恩平组顶部(珠江口盆地)或崖城组顶部(琼东南盆地); T_{100} —新生界底面。

图3 南海区域重力—磁力—地震联合解释剖面(剖面位置见图1)

Fig. 3 Regional gravity-magnetic-seismic interpretation profiles in the South China Sea

分析表明,新南海海洋盆经历了陆缘裂谷期、洋盆形成期、区域沉降期3大阶段,在洋壳上形成多套构造层。上渐新统一下中新统(T_{50} — T_{70})构造层是南海洋壳上沉积的第1套区域性地层(图3),其形成时代能反映洋壳形成的最老时代,其展布特征及地球物理属性揭示新南海海洋盆的结构特征。该构造层在南海东部、穿过东部次海盆的SN向剖面上的密度为2.45~2.51 g/cm³;而在南海西部、穿过西南次海盆的NW向剖面上的密度为2.35~2.40 g/cm³。同一构造层在两个区域剖面上的密度减小幅度达0.10 g/cm³,呈现出东部密度高、西部密度低,由此反映上渐新统一下中新

统(T_{50} — T_{70})构造层在东部次海盆中形成早、压实强,而在西南次海盆中形成晚、压实弱,揭示新南海海洋盆东部形成早、西南部形成晚,洋盆的扩张自东向西扩展,沿SN向打开的运动学过程。重力—磁力联合反演发现,东部次海盆宽,其下地壳显著发育高密度异常体(图3);西南次海盆窄,其下地壳的高密度异常体特征表现弱,这也反映东部次海盆形成早而西南次海盆形成晚。

近年来,“南海深海过程演变”研究计划^[18]与国际大洋发现计划(IODP)通过大洋钻探岩心资料和深拖地磁异常观测资料综合分析得出,南海东部次海盆的洋壳扩张时限为34~15 Ma^[19],西北次海盆的形成

时限为 30~25 Ma^[20],西南次海盆的形成时限为 23.6~16.0 Ma^[19,21-23],这也指示新南海洋盆从东部向西南部呈渐进式扩张的特征。

1.2 渐新世—第四纪古南海洋盆“西早东晚”的渐进式闭合特征

古南海洋盆是已经消失的、曾经处于华夏地块与婆罗洲地块之间的洋盆,目前已俯冲消减于婆罗洲地块之下。古南海洋盆是否存在是全球地球科学界争论的科学问题。近年来积累的各类地质、地球物理、地球化学资料可反映古南海洋盆存在。古南海洋盆是古特提斯洋的残留,曾经是沟通古特提斯洋和古太平洋的通道。在澳大利亚板块向北漂移和新南海洋盆张开的共同作用下,古南海洋盆表现为自西向东“剪刀”式闭合,最终俯冲至婆罗洲地块下方。笔者认为古南海洋盆不仅存在而且具有从西向东渐进式闭合的特征。从基于环“青藏高原东南部—南海”及其邻区的 427 个天然地震台站、14 011 个地震事件、36 万条地震相对走时数据[国际地震中心 2006—2019 年数据、美国地震学联合会(IRIS)数据中心 2003—2004 年 YA 台网和 2017—2019 年 MM 台网数据]建立的南海及其邻区深度在 0~700 km 的速度异常结构图可发现,婆罗洲地块之下存在高速的古南海洋盆俯冲板片。

蛇绿岩套是古南海洋盆存在的证据之一。蛇绿岩是古大洋岩石圈的残留碎块,标志着已消失的洋壳和陆壳之间相互作用带(缝合带)的位置。南海南部的陆上蛇绿混杂岩出露于纳土纳岛—加里曼丹岛北部—巴拉望岛南部一线,自纳土纳群岛东北侧沿 SE 走向进入加里曼丹岛,沿卢帕尔河变为 NE 向,经沙巴一直延伸至巴拉望岛^[24]。该蛇绿岩带被认为是古南海洋盆向巽他大陆之下消亡的证据,是俯冲碰撞的产物,其蛇绿岩的形成时代在西部为侏罗纪、向东逐渐变新至晚白垩世、早中新世,具有“西老东新”的特征。

南沙地块周缘的增生楔也指示曾经存在古南海洋盆,其形成时代表现为由西向东逐渐变新。在南沙地块西部,曾母地块与婆罗洲地块西北部的碰撞较早,而在南沙地块东部,礼乐地块现今正沿南沙海槽向婆罗洲地块之下俯冲。南沙地块与婆罗洲地块之间的俯冲增生体系表现为自西向东逐渐变新(中白垩世→中新世)^[25],指示古南海洋盆自西向东呈“剪刀”式闭合。增生楔内的钙碱性岩浆岩的发育时代也由西到东逐渐变新。

古南海洋盆边缘的碰撞-俯冲带发育深水沉积和浅水沉积,其中,俯冲前发育深水沉积,俯冲后发育浅水沉积。由西向东,碰撞-俯冲带内深水环境的结束时代逐渐变新。从婆罗洲地块北部钻井揭示的沉积环境

来看,在渐新世之前婆罗洲地块北部发育深水沉积,而随着古南海洋盆从西到东俯冲消亡,深水沉积环境从西到东逐渐结束。

总之,新南海洋盆的扩张表现为“东早西晚”,古南海洋盆的闭合表现为“西早东晚”。二者在时间上具有交叠。整体沿逆时针方向变新。

2 南海渐进式边缘海构造旋回控制的盆地形成与演化

受新南海洋盆扩张和古南海洋盆闭合控制,南海海域的盆地分布具有有序性。在南海北部大陆边缘形成了由台西南盆地、珠江口盆地和琼东南盆地构成的被动大陆边缘盆地;在南沙地块形成裂离型伸展盆地及其南部的挤压盆地;在南海东部形成俯冲盆地;在南海西部形成走滑-伸展盆地^[26-28](图 1、图 2)。即便在同一大陆边缘或地块上,盆地的差异性也很大^[28](图 4),主要受渐进式边缘海构造旋回控制。

2.1 南海北部伸展盆地“东早西晚”的发育特征

IODP U1501 站位位于珠江口盆地荔湾凹陷南部缓坡带上,该站位的钻井钻穿新生界、钻遇中生界基底,全井段连续取心。基于古生物浮游有孔虫生物地层学、钙质超微化石生物地层学、磁性地层学和有孔虫壳体锶同位素地层学综合研究,建立了 IODP U1501 站位新生界地层柱,该地层柱相当于南海北部地区的“金钉子剖面”^[29]。

以 IODP U1501 站位地层剖面为标准,分别对珠江口盆地 LW22 井等 6 口井和琼东南盆地深水区 6 口钻井开展了有孔虫及钙质超微化石生物地层学研究,划分了珠江口盆地渐新统一下中新统的地层序列,建立了琼东南盆地深水区渐新统一下中新统的生物地层格架。

依据以上地层划分,对珠江口盆地和琼东南盆地的地震剖面从新生界底部至海底、以组为单元进行了地层界面追踪和跨盆地、全区域地层解释,编制了区域地质结构剖面(图 5)。

统一的解释方案和编图成果揭示,南海北部的伸展盆地均经历了断陷、断—坳转换、早期坳陷和晚期坳陷阶段,各阶段南海北部东、西段的伸展盆地在形成时间上具有“东早西晚”的特征。南海北部伸展盆地的断陷期在东段珠江口盆地始于始新世,在西段琼东南盆地始于渐新世;坳陷期在珠江口盆地始于早渐新世,在琼东南盆地始于中新世;断—坳转换期的破裂不整合面在珠江口盆地发育于下渐新统与上渐新统之间,在琼东南盆地发育于古近系与新近系之间(图 4)。

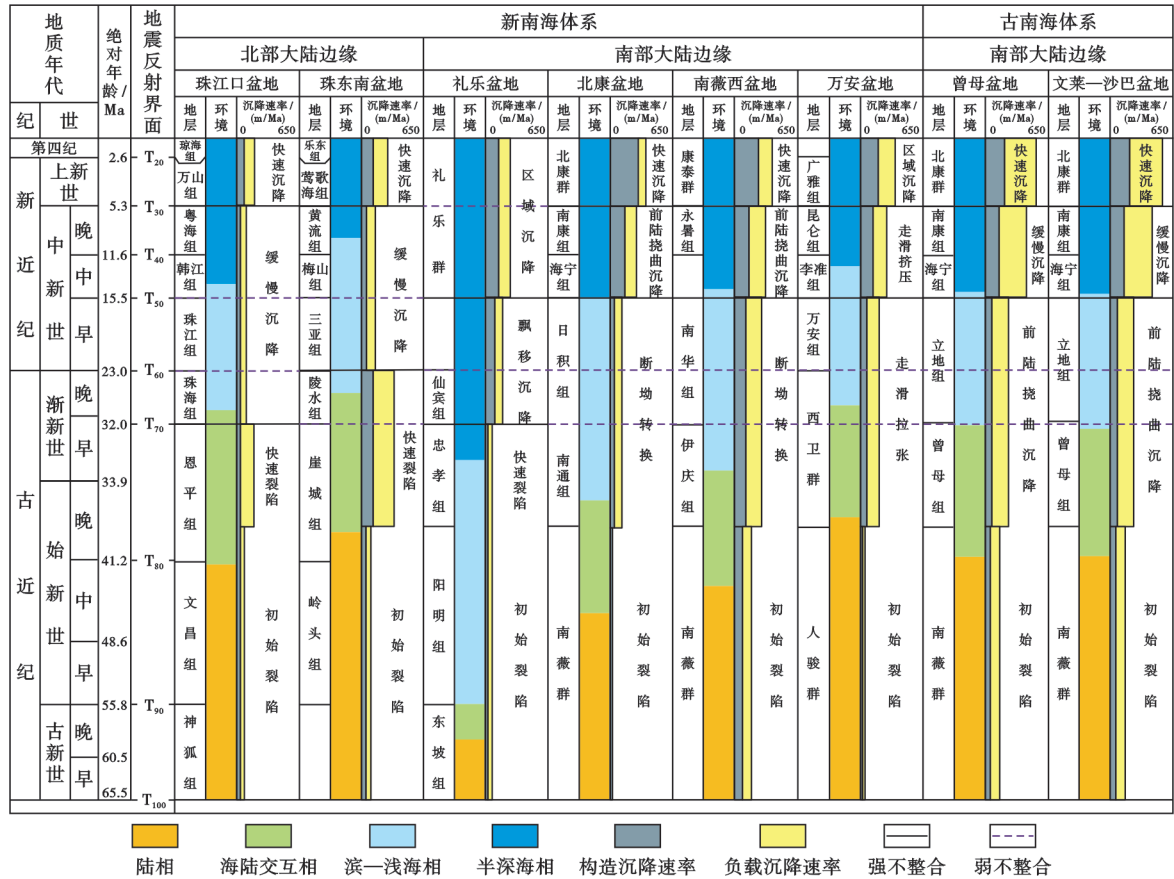


图4 南海大陆边缘盆地的渐进式演化(据文献[28]修改)

Fig. 4 Progressive evolution of continental margin basins in the South China Sea

2.1.1 始新世

始新世,珠江口盆地表现为强烈伸展,琼东南盆地仍保持古新世的隆起状态。

珠江口盆地发育 NE 向伸展断裂,其分布范围不受现今构造格局控制,在坳陷及隆起上均有分布,并在后期坳陷阶段受 EW 向构造切割改造,导致 NE 向伸展断裂的规模在隆起上明显比坳陷内小。这些 NE 向展布的伸展断裂控制了始新统文昌组沉积的分布。EW 向断裂往往切割 NE 向断裂,控制了各个注陷的地层厚度分布。珠江口盆地在始新世处于区域断陷演化阶段,呈盆岭格局。

琼东南盆地仅个别钻井钻遇始新统。依据原油生物标志化合物、地震层序、区域不整合综合判断,琼东南盆地在始新世处于隆起状态,仅盆地北部有个别凹陷发育始新统,沉积厚度较薄,推断盆地总体处于初始断陷演化阶段。

2.1.2 早渐新世

早渐新世,珠江口盆地在继承始新世断陷的基础上,坳陷沉降作用增强,而琼东南盆地由早期隆起或局部断陷转化为区域断陷。

珠江口盆地 NE 向的伸展断裂在早渐新世仍然活

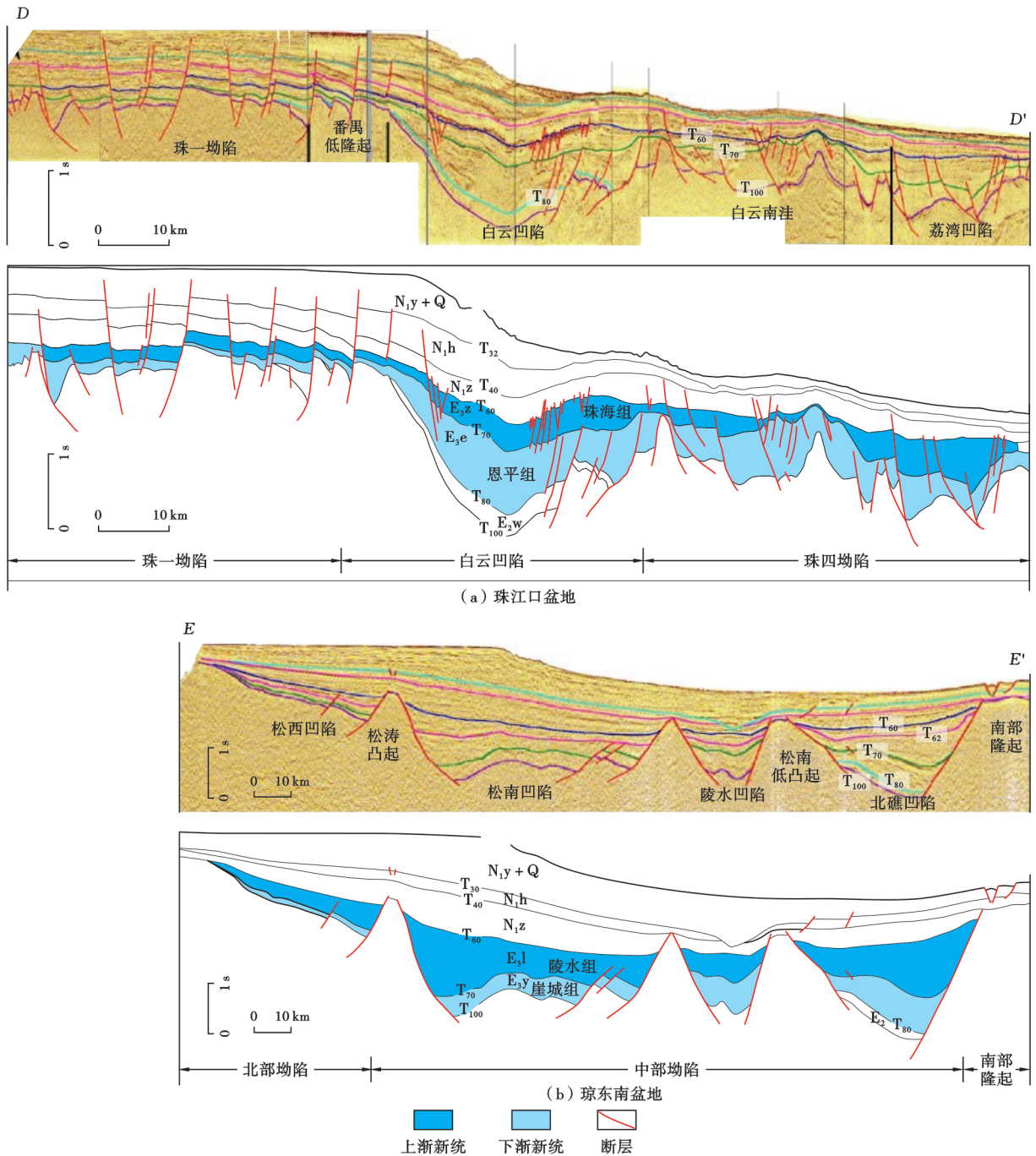
动,部分相距较近的断裂联合为一条断裂,但其构造活动强度逐渐减弱,以致于下渐新统沉积已不完全受断裂控制,因此下渐新统的分布范围大多越过各自的伸展断层,沉积范围扩大。早渐新世末期,珠江口盆地进入区域坳陷演化阶段。

琼东南盆地 NE 向及近 EW 向伸展断裂在早渐新世的发育规模增大、活动强度变强,这些伸展断裂控制了渐新统崖城组沉积,使得盆地进入区域断陷演化阶段。EW 向断裂往往切割 NE 向断裂,控制了盆地内各个凹陷的厚度分布。

2.1.3 晚渐新世

晚渐新世,珠江口盆地处于坳陷期,呈统一碟形坳陷结构;琼东南盆地处于强烈断—坳转换期。珠江口盆地的伸展作用在晚渐新世停滞,由早期的“既裂又陷”转变为完全的区域坳陷沉降;而琼东南盆地的沉降作用在继承早渐新世断陷作用的基础上增强。

在珠江口盆地,继近 EW 向伸展断裂活动停止后,随之而来的是下渐新统和始新统被抬升剥蚀,这一事件也控制了珠海组的沉积,使得盆地进入缓慢沉降演化阶段。



注: T_{30} —黄流组顶面; T_{32} —珠海组顶面; T_{40} —珠江组顶面; T_{60} —珠海组顶面(珠江口盆地)或陵水组顶面(琼东南盆地); T_{62} —陵水组三段顶面(琼东南盆地); T_{70} —恩平组顶面(珠江口盆地)或崖城组顶面(琼东南盆地); T_{80} —文昌组顶面(珠江口盆地)或始新统顶面(琼东南盆地); T_{100} —新生界底面; E_2 —始新统; E_2w —文昌组; E_3e —恩平组; E_3z —珠海组; E_3y —崖城组; E_3l —陵水组; N_1z —珠江组; N_1s —三亚组; N_1m —梅山组; N_1h —黄流组; N_2y —莺歌海组; Q —第四系。

图 5 南海北部大陆边缘伸展盆地的形成与渐进式演化

Fig. 5 Formation and progressive evolution of extensional basins of the northern continental margin of the South China Sea

琼东南盆地近 EW 向伸展断裂在晚渐新世仍然活动, 但断裂的活动强度逐渐减弱。随着伸展断裂活动趋缓, 上渐新统已不完全受断裂控制, 大多越过各自的伸展断层, 导致沉积范围扩大并使得盆地进入区域断—坳转换演化阶段。后期的 EW 向断裂往往切割

NE 向断裂, 控制了盆地内各个洼陷沉积厚度的分布。

2.1.4 新近纪—第四纪

新近纪—第四纪, 珠江口盆地处于由快速沉降 to 缓慢沉降的坳陷期; 琼东南盆地西部处于由缓慢沉降到快速沉降的坳陷期。

新近纪以来,新南海洋盆在早一中中新世持续扩张,其北部大陆边缘整体发育坳陷,其中,继承古近纪的伸展效应,珠江口盆地南部发育强伸展坳陷,琼东南盆地发育弱伸展坳陷。珠江口盆地在早一中中新世仍有断裂活动且活动强度不断增强,断裂主要分布在坳陷及隆起边界带上,控制了下一中中新统的沉积范围,使得盆地进入快速坳陷式沉降演化阶段。琼东南盆地近EW向伸展断裂的活动在早一中中新世停止,此后渐新统被抬升剥蚀,这一事件控制了三亚组—梅山组的沉积范围,盆地进入缓慢沉降演化阶段。

新近纪晚期—第四纪,新南海洋盆的扩张作用停滞,其东缘向菲律宾岛弧带之下俯冲。南海北部大陆边缘在这一时期整体处于沉降状态,邻区的构造-地貌事件对其影响显著,其中,红河水系与珠江水系搬运了大量沉积物进入海盆并在盆地内的坳陷区形成巨厚沉积,而台湾—菲律宾岛弧带的向西仰冲也使得珠江口盆地内发育成簇分布的NW向断裂带。

珠江口盆地上中新统一第四系的沉积范围在基本延续下一中中新统分布格局的基础上有较大扩张,地层总体上呈现中部厚而东部、南部、东北部薄的分布特征,盆地进入坳陷演化阶段。在珠江口盆地内,以珠三

坳陷西南部、中央隆起带西南部、珠二坳陷内顺德凹陷和开平凹陷西南部以及北部隆起带东南边缘的沉积较厚。

琼东南盆地上中新统一第四系的分布格局相对于下一中中新统有较大变革,沉积总体呈现西厚、东薄,中央厚、南北两侧薄的分布特征,盆地进入快速坳陷演化阶段。

在新南海洋盆南部陆缘,位于南沙地块北缘的礼乐盆地和南薇西盆地具有与南海北部大陆边缘相似的“东早西晚”演化特征,但其主要成盆期在陆缘裂谷期。

2.2 南海南部挤压盆地“西早东晚”的发育特征

南海南部盆地群包括南缘盆地带和北缘南沙盆地带^[30]。南缘盆地带包括曾母盆地和文莱—沙巴盆地,这两个盆地经历了古南海洋盆的洋壳俯冲阶段、南沙地块与婆罗洲地块对接碰撞阶段、沉降阶段^[31-34](图6)。

始新世—早中新世,在古南海洋盆逐渐消亡和新南海洋盆扩张联合控制下,曾母地块南缘与婆罗洲地块发生碰撞形成前陆盆地(曾母盆地);中中新世,新南海洋盆停止扩张,在婆罗洲地块逆时针旋转作用控制下,曾母盆地遭受走滑改造,形成压扭性断-坳型盆地;晚中新世,曾母盆地整体进入区域沉降阶段(图6)。

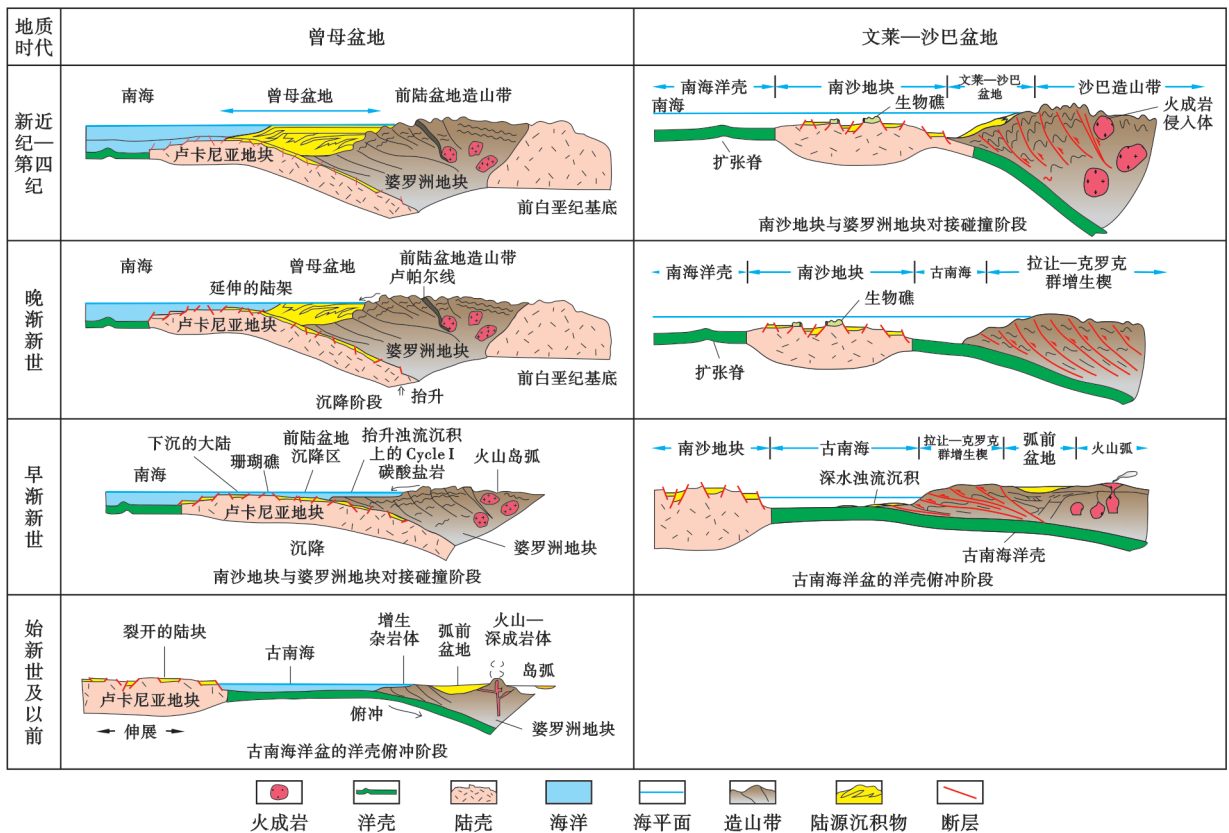


图6 南海南部盆地的形成与演化(据文献[32-33]修改)

Fig. 6 Formation and evolution of the southern basins in the South China Sea

文莱—沙巴盆地发育于婆罗洲地块的陆缘之上,是在古南海洋盆持续向婆罗洲地块之下俯冲增生的海沟—斜坡盆地,经历了始新世—早中新世俯冲增生和中中新世—第四纪快速沉降两期构造演化阶段。

从区域演化的角度来看,曾母盆地的演化比文莱—沙巴盆地早一个阶段(图6),这反映盆地演化具有“西早东晚”的特征。当曾母盆地进入前陆盆地时期,文莱—沙巴盆地尚未进入成盆期;中中新世,当曾母盆地在经历走滑改造并形成压扭性断—拗型盆地时,文莱—沙巴盆地处于快速沉降期;晚中新世,当曾母盆地整体处于区域沉降阶段并发育巨型三角洲沉积时,文莱—沙巴盆地仍处于持续快速沉降期,冲断—推覆作用和重力滑脱作用控制了盆地的形成。

因此,新南海洋盆“东早西晚”的扩张导致珠江口盆地形成早、琼东南盆地形成晚、万安盆地形成晚;古南海洋盆“西早东晚”的闭合导致曾母盆地形成早、文莱—沙巴盆地形成晚。这样的有序演化过程导致在同一时期同一大陆边缘,不同盆地处于不同的演化阶段,其构造沉积特征也不同。

3 南海渐进式边缘海构造旋回控制的成藏要素有序发育

3.1 南海渐进式边缘海构造旋回控制烃源岩的有序形成

南海沉积盆地始新世—中新世的多套烃源岩主要分布在南海北部、西部、南部大陆边缘。各大陆边缘差异大,南海北部大陆边缘主要发育古近系烃源岩,南海南部大陆边缘发育新近系烃源岩,南海西部大陆边缘发育古近系—新近系烃源岩^[35]。同一大陆边缘的盆地间烃源岩差异也很明显,新南海洋盆和古南海洋盆的大陆边缘烃源岩在时代上呈现渐进式迁移特征。在南海北部大陆边缘,东段珠江口盆地的烃源岩形成早,发育受断陷控制的文昌组湖相烃源岩和早渐新世受断—拗转换阶段控制的恩平组海陆过渡相广覆式烃源岩;西段琼东南盆地的烃源岩形成晚,在早渐新世发育受断陷控制的海陆过渡相煤型烃源岩。在南海南部大陆边缘,曾母盆地的烃源岩形成早,在渐新世—早中新世发育受断—拗转换阶段控制的海陆过渡相煤型烃源岩;文莱—沙巴盆地的烃源岩形成晚,在早中新世发育受逆冲断裂控制的煤型烃源岩(图7)。

3.1.1 南海北部大陆边缘深水区烃源岩

受渐进式边缘海构造旋回控制,珠江口盆地相比于琼东南盆地,烃源岩形成早、层位多,二者的分布格局有别。

珠江口盆地烃源岩的形成时代为始新世—早渐新世^[36]。油气与烃源岩的对比发现,主力烃源岩为始新

统深湖沉积泥岩、下渐新统湖沼—海陆过渡沉积煤系和海相烃源岩。在珠江口盆地的北部拗陷带,始新统文昌组的深湖亚相泥岩是优质的烃源岩,其中淡水藻类含量丰富,主要为葡萄藻和盘星藻,是非常好的生油母质,干酪根类型为I型;在珠江口盆地的南部拗陷,白云凹陷LW4井的微体植物化石组合及开平凹陷KP11井原油的地球化学分析结果表明,烃源岩为始新统文昌组湖相泥岩,此外,白云凹陷恩平组中的海陆过渡相煤系—浅海相泥岩也是烃源岩,这套烃源岩形成于断—拗转换期,分布于面积达5000 km²的三角洲沉积区,煤系发育在扇三角洲、三角洲内部。

琼东南盆地烃源岩的形成时代主体为早渐新世^[37-41],发育崖城组海陆过渡相煤系烃源岩和海相烃源岩,其分布受断陷控制。崖城组中发育3个煤系(扇)三角洲带,单个扇三角洲的规模小;潮坪上也发育一定的煤型烃源岩。

3.1.2 南海南部大陆边缘烃源岩

曾母盆地烃源岩发育于渐新统一中新统^[32-33],为煤系(包括煤和碳质泥岩)和陆源海相烃源岩,其干酪根类型为II₂—III型。煤系烃源岩主要分布在曾母盆地南部,其热解烃(S₂)值为10~291 mg/g,显示生烃潜力较好;干酪根类型以II₂型和III型为主,含少量II₁型;显微组分揭示壳质组含量为15%~35%,比一般腐殖型煤高,显示有一定生油潜力;生物标志化合物分析显示姥植比(Pr/Ph)和三降萘烷异构体比值(Tm/Ts)高,指示沉积环境偏氧化;较高的C₂₄四环萘烷和C₂₉甾烷优势、中—高的双杜松烷含量和适中的奥利烷含量均指示其具有高等植物来源。陆源海相烃源岩主要分布于曾母盆地中北部,其总有机碳(TOC)含量为0.3%~5.5%,平均为1.4%,属于中等—好的烃源岩;干酪根类型以III型为主,含部分II₂型;生物标志化合物分析显示其Pr/Ph比值较煤系烃源岩低、双杜松烷含量低、奥利烷含量较高。

文莱—沙巴盆地形成始于中新世^[42-44],发育煤系烃源岩(包括煤和碳质泥岩)和陆源海相烃源岩,盆地北部以陆源海相烃源岩为主,在南部以煤系烃源岩为主,烃源岩的干酪根类型为II₁—III型。煤系烃源岩的TOC含量主要分布在6%~80%,S₂分布在10~100 mg/g,生烃潜力较好;干酪根类型以II₂型和III型为主,少量样品达到II₁型;显微组份显示壳质组含量比一般腐殖型煤高,在26%~50%,有很好的生油潜力。陆源海相烃源岩的TOC含量主要分布在0.4%~6.0%,S₂主要分布在0.1~10.0 mg/g,属于中等—好的烃源岩;干酪根类型以III型为主,含部分II₂型;生物标志化合物分析显示其Pr/Ph比值较煤系烃源岩低、双杜松烷含量低、奥利烷含量较高。

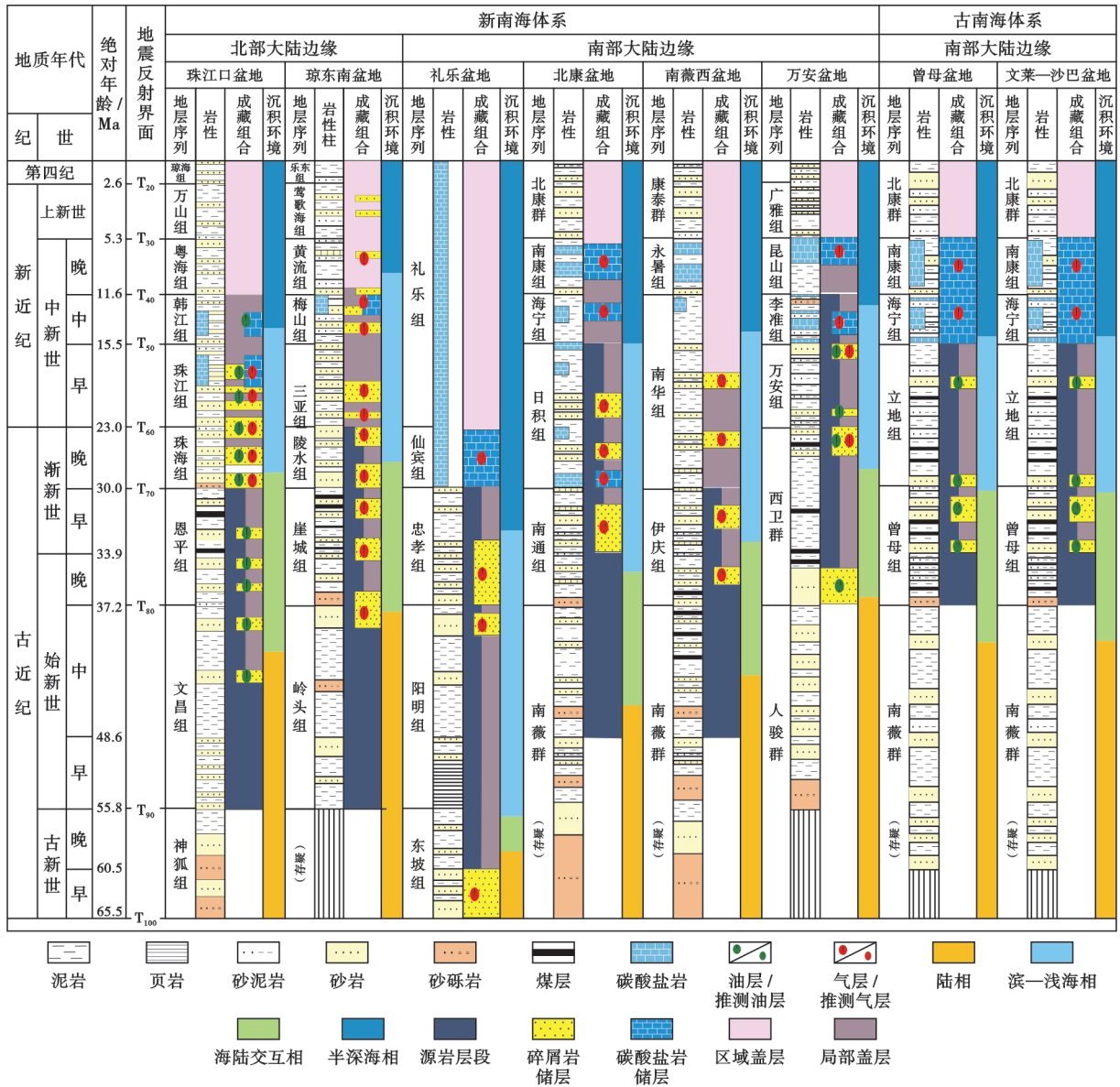


图7 南海深水区主要盆地的区域盖层与成藏组合(据文献[31]修改)

Fig. 7 Regional cap beds and accumulation assemblages of the main deep-water basins in the South China Sea

3.2 南海渐进式边缘海构造旋回控制深水区储层有序分布

受渐进式边缘海构造旋回控制,储层的发育时代及性质也出现与烃源岩类似的有序变化。

3.2.1 南海北部大陆边缘深水区储集体

受新南海洋盆的构造旋回控制,南海北部大陆边缘盆地除发育潜山储层外还发育陆相、海陆过渡相、滨—浅海相和深海相4套砂岩储层和生物礁储层^[45-49]。南海北部大陆边缘由于东、西分段,各段内盆地的储层发育时代及性质分别呈有序变化。

从大陆边缘东、西段内的盆地比较来看,始新世,南海东段珠江口盆地发育文昌组陆相储层,但西段琼东南盆地不发育该段储层;早渐新世,珠江口盆地恩平

组发育大型河流—三角洲砂岩储层,而琼东南盆地对应层位发育扇三角洲砂岩储层;晚渐新世,珠江口盆地进入拗陷期,发育古珠江河流—三角洲—深海扇体系储层,但在琼东南盆地则发育滨—浅海相储层;早中新世,南海北部大陆边缘盆地都处在拗陷阶段,其中,珠江口盆地处于拗陷阶段的成熟期,发育古珠江河流—陆架边缘三角洲—深海扇沉积储层,而琼东南盆地则处在拗陷早期,发育浅海相砂岩储层;晚中新世,珠江口盆地被大规模海侵,砂岩很不发育,而琼东南盆地因红河峡谷体系穿过其中部,在拗陷内形成大型轴向峡谷体系,发育深水重力流储层;上新世—第四纪,珠江口盆地和琼东南盆地内主要发育深海泥岩,储层不甚发育。

3.2.2 南海南部大陆边缘储集体

曾母盆地发育砂岩和碳酸盐岩两类主要储层。砂岩储层主要分布于曾母盆地北部拗陷内的东巴林坚拗陷和南部隆起区;碳酸盐岩储层分布于曾母盆地内水体相对浅的南康台地和西部斜坡;在平面上具“南砂北礁”的分布格局。曾母盆地的砂岩储层以断一拗转换期发育的渐新统一下中新统三角洲分流河道和河口坝细砂岩—粗砂岩为主,其孔隙度为10%~38%、平均为14%,渗透率主要为100~1500 mD;碳酸盐岩储层以拗陷期发育的中—上中新统生物礁滩、颗粒灰岩及泥灰岩为主,其孔隙度为10%~40%,平均为26%。总体上,曾母盆地的储层物性向上变好。

文莱—沙巴盆地的储层岩性均为砂岩,油气主要聚集在中中新统河流、三角洲和滨—浅海沉积相砂岩储层中。盆地内主要发育中中新统和上中新统两套重要的砂岩储集层以及由同期储集层滑塌形成的深水浊积扇,其中,上中新统砂岩储层为主力储层。中中新统的储层岩性以三角洲分流河道和河口坝砂岩为主,储层的孔隙度为18%~30%,渗透率为40~500 mD;上中新统储层岩性以三角洲和滨—浅海砂岩为主,孔隙度为12%~28%,渗透率为12~620 mD。

3.3 渐进式边缘海构造旋回控制深水油气区域盖层及主力成藏组合有序分布

区域盖层既控制油气层的纵向分布,是油气成藏垂向上的天花板,也控制油气的平面分布。区域盖层及其下部的局部盖层与储集体构成了不同级别的成藏组合(图7)。

3.3.1 南海北部主力成藏组合

珠江口盆地的主力成藏组合位于下中新统珠江组海侵泥岩区域盖层以下,琼东南盆地的主力成藏单元位于上新统莺歌海组海侵泥岩之下。这一特征表明,南海北部东段珠江口盆地区域盖层的形成时代早、埋藏深,而西段琼东南盆地区域盖层的形成时代晚、埋藏浅。

珠江口盆地发育始新统陆相和下渐新统海陆过渡相两套烃源岩,而受热流场和埋深综合影响,盆地内的白云拗陷表现出主洼生气、边缘洼陷生油的特点。珠江口盆地内的渐新统恩平组和珠海组为浅水沉积、下中新统珠江组为三角洲—深水扇体系,这些层系为盆地内大区域展布的油气输导层和储层,而其上覆的海侵泥岩则为区域性盖层,二者构成“黄金”储—盖组合。拗陷内的深层烃源灶与浅层输导层通过新构造运动作用下广泛发育的断裂沟通,油气在烃源灶超压和压差的驱动下从烃源灶经断层、构造脊等高速通道运移到构造脊上的圈闭内聚集成藏。深层油气的勘探程度

低,主要受断陷期和断—拗转换期的地质结构控制,拗陷内的凸起和岩性—地层复合圈闭带是主要聚集部位。

琼东南盆地仅在渐新统下部崖城组(扇)三角洲—海湾体系煤系地层中发育1套主力烃源岩,呈串珠状分布在3个烃源岩富集带。每个成熟的(扇)三角洲—海湾体系形成一个生烃灶,所生成的天然气表现为近源聚集,形成小而肥的“一洲多田”的油气分布格局。在琼东南盆地中央拗陷内,南、北两个有利生烃灶带即为两个有利勘探区带,其中,深水区的有利勘探区带包括深水区中央拗陷的北缘带、南缘带^[48]。

3.3.2 南海南部主力成藏组合

曾母盆地的区域盖层为上新统一第四系的滨—浅海至半深海相泥岩或灰质泥岩,该套地层分布广、厚度大、自南向北呈增厚趋势,最大厚度位于康西拗陷中北部,厚度超过3000 m。在曾母盆地西北侧西部斜坡的L气田,其区域盖层为上新统一第四系的滨—浅海相泥岩,局部盖层包括渐新统一中新统泥岩和致密泥灰岩。

曾母盆地的油气主要富集于中—上中新统,垂向上发育“下生上储型”和“自生自储型”两类油气成藏组合。“下生上储型”是曾母盆地最主要的成藏组合,主要发育于西巴林坚凸起、南康台地、康西拗陷和西部斜坡,其烃源岩为下中新统陆源海相烃源岩,储层为中—上中新统生物礁,盖层为上新统一第四系区域泥岩。“自生自储型”成藏组合主要发育于曾母盆地东南部的东巴林坚拗陷,其烃源岩为渐新统一下中新统煤系(煤和碳质泥岩),储层为渐新统一下中新统河口坝、分流河道砂体,盖层为泥岩夹层。

文莱—沙巴盆地缺乏区域盖层,局部盖层以三角洲层间的页岩、泥岩、钙质粉砂岩为主,此外深水区还发育浅海—半深海泥岩盖层。文莱—沙巴盆地的油气主要赋存于中中新统一上新统三角洲砂岩内,主力成藏组合位于上新统。文莱—沙巴盆地的冠军三角洲发育在中—晚中新世;晚中新世以来,巴兰三角洲开始发育,文莱—沙巴盆地的沉积沉降中心向南部转移,期间,冠军三角洲持续发育并形成同期最厚且沉积范围最大的三角洲砂岩储层;上新世,冠军三角洲停止发育,巴兰三角洲持续发育。

文莱—沙巴盆地主要发育“自生自储型”成藏组合,按照主力产层的不同又可以划分出两套成藏组合。产层以中中新统为主的油气田主要分布在盆地中北部沙巴拗陷,即冠军三角洲近岸砂岩沉积的范围内;受三角洲控制,这类油气田的烃源岩以同期的碳质泥岩和煤系为主,储层为同期的河流—三角洲相砂岩,盖层为层间泥岩夹层及浅海相泥岩;烃源岩在晚中新世进入生烃高峰,油气沿砂体进行大规模侧向运移或就近聚

集在砂岩储层中,形成“自生自储型”油气藏。产层以上中新统为主的油气田主要分布在盆地中南部的巴兰三角洲拗陷内,其沉积范围受冠军三角洲和巴兰三角洲联合控制;烃源岩为同期的煤系地层,储层为河流—三角洲砂岩,盖层以层间泥岩夹层为主;烃源岩在上新世后开始进入生烃高峰,油气就近聚集于砂岩储层中,形成受巴兰三角洲和冠军三角洲联合控制的“自生自储型”油气藏。文莱—沙巴盆地中中新统一上新统的成藏组合均以同期地层自生自储为主,且具有由南向北成藏层位逐渐变新的趋势。

4 南海的下一步有利勘探方向

南海的渐进式边缘海构造旋回控制了盆地内烃源岩、区域顶板盖层和区域油气层的有序分布,对确定下一步勘探方向有指导意义。

4.1 南海北部深水区

珠江口盆地深水区油气资源丰富,其中,白云凹陷在始新世断陷期发育湖相烃源岩,在早渐新世断—拗转换期发育面积达 5 000 km² 以上的三角洲煤系地层及海相烃源岩,以生成天然气为主。对于白云凹陷内中—浅层烃源岩与重力流砂体构成的成藏组合,陆架边缘三角洲与深水扇砂岩呈多层叠合连片分布,整体规模大;有利成藏位置位于缓坡大型鼻状构造带。对于白云凹陷的中—深层古近系近源超压成藏组合,在近源大型鼻状构造带、埋深较浅、地温梯度相对低的区域,成藏条件优越。对于白云凹陷的近源潜山成藏组合,受中生代古太平洋板块俯冲作用控制,发育先存断裂体系,在多期岩浆活动影响的陆缘岩浆弧位置钻遇的基底岩性多为侵入花岗岩类,其结晶年龄以 105~160 Ma 为主,钻井潜山进尺大部分小于 40 m;由于白云凹陷长期处于应力集中的三角区,油气在主注超压作用下驱动,古潜山的成藏条件具有近源、油气充注强度大、花岗岩储层被风化溶蚀且构造裂缝发育、受区域泥岩盖层保护等特点。

琼东南盆地油气勘探的新领域包括:乐东—陵水凹陷的梅山组海底扇、陵水凹陷北坡的构造-岩性带、环崖南凹陷的“双古”(古潜山和古近系)领域、松南—宝岛凹陷的北部断阶带、深水区中生界近源低位潜山带。

4.2 南海南部深水区

曾母盆地已发现的油气田主要分布在其中南部,在其西北部康西凹陷中北部地区,特别是水深大于 300 m 的区域,勘探程度较低。康西凹陷中北部是下一步油气勘探的有利区域,具有广阔的勘探前景,主要原因在于:①康西凹陷边缘发育的三角洲煤系沉积规模大,凹陷内发育陆源海相烃源岩且规模大,是一个继

承性深大凹陷,也是曾母盆地的沉积-沉降中心,其新生界沉积厚度超过 15 km,具有形成大量油气资源的物质基础;②康西凹陷是一个已证实的富生烃凹陷,其周缘已有大—中型油气田发现(如 L 气田);③康西凹陷的油气剩余资源量较大;④康西凹陷深水区具备有利圈闭发育条件,其中,三角洲前缘重力滑脱形成的挤压背斜是重要的圈闭类型。

文莱—沙巴盆地的深水区是下一步油气勘探的有利区,具有广阔的勘探前景,具备以下有利条件:①勘探程度较低,现有探井主要分布在盆地的浅水区,深水区探井较少;②深水区待发现的油气资源量大;③深水区具有构造发育背景,其内部发育大量重力滑脱形成的挤压褶皱,该类圈闭是盆地内深水区油气富集的主要圈闭类型。

5 结论

(1) 渐进式边缘海构造旋回控制了南海深水区油气的成藏特征。南海由一个向西扩张的新南海洋盆和一个向东闭合的古南海洋盆演化而来。受这一构造演化背景控制,在新南海洋盆北部和南沙地块北缘盆地内,烃源岩和区域油气盖层的层位向西变新;而在古南海洋盆南缘,从曾母盆地到文莱—沙巴盆地,烃源岩与区域盖层的层位也变新。这些地质特征控制了南海深水区的油气分布。

(2) 南海北部陆缘盆地深水区的古近系及潜山,以及南海南部盆地的深水区是下一步油气勘探的新方向。

参 考 文 献

- [1] 邹才能,张光亚,陶士振,等. 全球油气勘探领域地质特征、重大发现及非常规石油地质[J]. 石油勘探与开发,2010,37(2):129-145. ZOU Caineng,ZHANG Guangya,TAO Shizhen, et al. Geological features, major discoveries and unconventional petroleum geology in the global petroleum exploration[J]. Petroleum Exploration and Development,2010,37(2):129-145.
- [2] 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.
- [3] 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,2015:1-433. ZHANG Gongcheng,QU Hongjun,FENG Yangwei, et al. An introduction to the petroleum geology of deepwater settings[M]. Beijing: Science Press,2015:1-433.
- [4] 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.

- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] DOTT R H JR, BATTEN R L. Evolution of the earth[M]. 4th ed. New York: McGraw-Hall Book Company, 1988.
- [8] KARIG D E. Origin and development of marginal basins in the western Pacific[J]. Journal of Geophysical Research, 1971, 76(11):2542-2561.
- [9] BEN-AVRAHAM Z, UYEDA S. The evolution of the China Basin and the Mesozoic paleogeography of Borneo[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1973, 18(2):365-376.
- [10] 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, 10(12):611-616.
- [11] 朱炳泉,王慧芬,陈毓蔚,等.新生代华夏岩石圈减薄与东亚边缘海盆构造演化的年代学与地球化学制约研究[J].地球化学,2002,31(3):213-221.
ZHU Bingquan, WANG Huifen, CHEN Yuwei, et al. Geochronological geochemistry constraints on the Cenozoic extension of Cathaysian lithospheric and tectonic evolution of the border basins in East Asia [J]. Geochimica, 2002, 31(3):213-221.
- [12] FLOWER M, TAMAKI K, HOANG N. Mantle extrusion: a model for dispersed volcanism and Dupal-like asthenosphere in east Asia and the western Pacific[M]//FLOWER M F J, CHUN S L, LO C H, et al. Mantle dynamics and plate interactions in East Asia, Volume 27. Washington: American Geophysical Union, 1998:67-88.
- [13] 郭令智,施央申,马瑞士.西太平洋中-新生代活动大陆边缘和岛弧构造的形成及演化[J].地质学报,1983,57(1):11-21.
GUO Lingzhi, SHI Yangshen, MA Ruishi. On the formation and evolution of the Mesozoic-Cenozoic active continental margin and island arc tectonics of the western Pacific Ocean[J]. Acta Geologica Sinica, 1983, 57(1):11-21.
- [14] MORLEY C K. A tectonic model for the Tertiary evolution of strike-slip faults and rift basins in SE Asia[J]. Tectonophysics, 2002, 347(4):189-215.
- [15] 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.
- [16] 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 basin: a new evolution model of the South China Sea[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(3):27-37.
- [17] 林间,李家彪,徐义刚,等.南海大洋钻探及海洋地质与地球物理前沿研究新突破[J].海洋学报,2019,41(10):125-140.
LIN Jian, LI Jiabiao, XU Yigang, et al. Ocean drilling and major advances in marine geological and geophysical research of the South China Sea[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(10):125-140.
- [18] 汪品先.追踪边缘海的生命史:“南海深部计划”的科学目标[J].科学通报,2012,57(20):1807-1826.
WANG Pinxian. Tracing the life history of a marginal sea—On “The South China Sea Deep” research program[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(24):3093-3114.
- [19] LI Chunfeng, XU Xing, LIN Jian, et al. Ages and magnetic structures of the South China Sea constrained by deep tow magnetic surveys and IODP Expedition 349[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2014, 15(12):4958-4983.
- [20] 丁巍伟,黎明碧,赵俐红,等.南海西北次海盆新生代构造-沉积特征及伸展模式探讨[J].地学前缘,2009,16(4):147-156.
DING Weiwei, LI Mingbi, ZHAO Lihong, et al. Cenozoic tectono-sedimentary characteristics and extension model of the northwest sub-basin, South China Sea[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(4):147-156.
- [21] DING Weiwei, SUN Zhen, DADD K, et al. Structures within the oceanic crust of the central South China Sea Basin and their implications for oceanic accretionary processes[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2018, 488:115-125.
- [22] SUN Zhen, DING Weiwei, ZHAO Xixi, et al. The latest spreading periods of the South China Sea; new constraints from macrostructure analysis of IODP Expedition 349 cores and geophysical data[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2019, 124(10):9980-9998.
- [23] 李家彪,丁巍伟,吴自银,等.南海西南海盆的渐进式扩张[J].科学通报,2012,57(20):1896-1905.
LI Jiabiao, DING Weiwei, WU Ziyin, et al. The propagation of seafloor spreading in the southwestern subbasin, South China Sea [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(24):3182-3191.
- [24] SOERIA-ATMADJA R, NOERADI D, PRIADI B. Cenozoic magmatism in Kalimantan and its related geodynamic evolution[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 1999, 17(1/2):25-45.
- [25] CULLEN A, REEMST P, HENSTRA G, et al. Rifting of the South China Sea: new perspectives[J]. Petroleum Geoscience, 2010, 16(3):273-282.
- [26] 张功成.边缘海深水油气地质理论[M].青岛:中国石油大学出版社,2020:564-586.
ZHANG Gongcheng. Petroleum geology in deepwater settings of marginal Sea [M]. Qingdao: China University of Petroleum Press, 2020:564-586.
- [27] 谢晓军,张功成,刘世翔,等.礼乐盆地漂移前的位置探讨[J].科学技术与工程,2015,15(2):8-13.
XIE Xiaojun, ZHANG Gongcheng, LIU Shixiang, et al. Discussion the pre-drifting position of the Liyue Basin [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(2):8-13.
- [28] 解习农,张成,任建业,等.南海南北大陆边缘盆地构造演化差异性对油气成藏条件控制[J].地球物理学报,2011,54(12):3280-3291.
XIE Xinong, ZHANG Cheng, REN Jianye, et al. Effects of distinct tectonic evolutions on hydrocarbon accumulation in northern and southern continental marginal basins of South China Sea [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(12):3280-3291.
- [29] ZHANG Gongcheng, FENG Congjun, YAO Xingzong, et al. Petroleum geology in deepwater settings in a passive continental margin of a marginal sea: a case study from the South China Sea [J]. Acta Geologica Sinica: English Edition, 2021, 95(1):1-20.
- [30] 张功成,唐武,谢晓军,等.南海南部大陆边缘两个盆地带油气地质特征[J].石油勘探与开发,2017,44(6):849-859.
ZHANG Gongcheng, TANG Wu, XIE Xiaojun, et al. Petroleum geological characteristics of two basin belts in southern continen-

- tal margin in South China Sea[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(6): 849-859.
- [31] 谢晓军, 张功成, 赵志刚, 等. 曾母盆地油气地质条件、分布特征及有利勘探方向[J]. *中国海上油气*, 2015, 27(1): 19-26.
XIE Xiaojun, ZHANG Gongcheng, ZHAO Zhigang, et al. Hydrocarbon geology, distribution and favorable exploration direction in Zengmu Basin, South China Sea[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2015, 27(1): 19-26.
- [32] 郭佳, 谢晓军, 刘世翔, 等. 南海曾母盆地新生代沉积体系特征[J]. *中国石油勘探*, 2016, 21(4): 99-107
GUO Jia, XIE Xiaojun, LIU Shixiang, et al. Cenozoic sedimentary systems in Zengmu Basin, South China Sea[J]. *China Petroleum Exploration*, 2016, 21(4): 99-107.
- [33] 刘世翔, 赵志刚, 谢晓军, 等. 文莱—沙巴盆地油气地质特征及勘探前景[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(4): 29-34.
LIU Shixiang, ZHAO Zhigang, XIE Xiaojun, et al. Petroleum geology and exploration prospects of Wenlai-Shaba Basin[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(4): 29-34.
- [34] 唐武, 赵志刚, 张功成, 等. 文莱—沙巴盆地深水褶皱冲断带构造变形特征及成因机制[J]. *地球物理学报*, 2018, 61(10): 4281-4295.
TANG Wu, ZHAO Zhigang, ZHANG Gongcheng, et al. Structural deformation characteristics and genetic mechanism of deep-water fold and thrust belts in the Brunei-Sabah Basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(10): 4281-4295.
- [35] 张功成, 李友川, 谢晓军, 等. 南海边缘海构造旋回控制深水区烃源岩有序分布[J]. *中国海上油气*, 2016, 28(2): 23-36.
ZHANG Gongcheng, LI Youchuan, XIE Xiaojun, et al. Tectonic cycle of marginal sea controls the ordered distribution of source rocks of deep water areas in South China Sea[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2016, 28(2): 23-36.
- [36] 李友川, 张功成, 傅宁. 珠江口盆地油气分带性及其控制因素[J]. *中国海上油气*, 2014, 26(4): 8-14.
LI Youchuan, ZHANG Gongcheng, FU Ning. Hydrocarbon zonation and its control factors in Pearl River Mouth Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2014, 26(4): 8-14.
- [37] 张功成, 米立军, 屈红军, 等. 中国海域深水区油气地质[J]. *石油学报*, 2013, 34(增刊2): 1-14.
ZHANG Gongcheng, MI Lijun, QU Hongjun, et al. Petroleum geology of deep-water areas in offshore China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(S2): 1-14.
- [38] ZHANG Gongcheng, WANG Dongdong, ZENG Qingbo, et al. Characteristics of coal-measure source rock and gas accumulation belts in marine-continental transitional facies fault Basins: a case study of the oligocene deposits in the Qiongdongnan Basin located in the northern region of the South China Sea[J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 2019, 37(6): 1752-1778.
- [39] 李文浩, 张枝焕, 李友川, 等. 琼东南盆地古近系渐新统烃源岩地球化学特征及生烃潜力分析[J]. *天然气地球科学*, 2011, 22(4): 700-708.
LI Wenhao, ZHANG Zhihuan, LI Youchuan, et al. Geochemical characteristics and hydrocarbon generation of Paleogene Oligocene source rocks in Qiongdongnan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2011, 22(4): 700-708.
- [40] 李增学, 周静, 吕大炜, 等. 琼东南盆地崖城组煤系空间展布特征[J]. *山东科技大学学报: 自然科学版*, 2013, 32(2): 1-8.
LI Zengxue, ZHOU Jing, LÜ Dawei, et al. Coal-bearing distribution characteristics of Yacheng Formation in Qiongdongnan Basin [J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science*, 2013, 32(2): 1-8.
- [41] 梁刚, 甘军, 李兴. 琼东南盆地陵水凹陷天然气成因类型及来源[J]. *中国海上油气*, 2015, 27(4): 47-53.
LIANG Gang, GAN Jun, LI Xing. Genetic types and origin of natural gas in Lingshui sag, Qiongdongnan Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2015, 27(4): 47-53.
- [42] 张厚和, 廖宗宝, 王登, 等. 文莱—沙巴盆地北内带构造区中新统烃源岩地球化学特征及生烃史[J]. *长江大学学报: 自科版*, 2016, 13(14): 9-15.
ZHANG Houhe, LIAO Zongbao, WANG Deng, et al. The hydrocarbon generation history and geochemical characteristics of source rocks of Middle Miocene in northern inboard belt structural area of Brunei-Sabah Basin[J]. *Journal of Yangtze University: Natural Science Edition*, 2016, 13(14): 9-15.
- [43] 张强, 毛超林, 贺晓苏, 等. 深水浊积型烃源岩的发现与启示[J]. *地质科技情报*, 2013, 32(2): 71-76.
ZHANG Qiang, MAO Chaolin, HE Xiaosu, et al. The discovery of deepwater turbidite source rock and its enlightenment[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2013, 32(2): 71-76.
- [44] 郑涛, 王登, 周世卿, 等. 文莱—沙巴盆地文莱区西南缘中—上新统烃源岩地球化学特征[J]. *石油天然气学报*, 2014, 36(5): 20-24.
ZHENG Tao, WANG Deng, ZHOU Shiqing, et al. Geological characteristics of source rocks from Middle-Later Miocene in southwestern margin of Brunei areas of Brunei-Sabah Basin[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2014, 36(5): 20-24.
- [45] 陈国俊, 张功成. 南海北部大陆边缘盆地深水油气储层[M]. 北京: 科学出版社, 2020: 76-140.
CHEN Guojun, ZHANG Gongcheng. Reservoir geology of continental margin basins in deepwater area of the northern South China Sea[M]. Beijing: Science Press, 2020: 76-140.
- [46] 彭大钧, 庞雄, 黄先律, 等. 南海珠江深水扇系统的形成模式[J]. *石油学报*, 2007, 28(5): 7-11.
PENG Dajun, PANG Xiong, HUANG Xianlü, et al. Depositional model of Pearl River deep-water fan system in South China Sea [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(5): 7-11.
- [47] 曾清波, 陈国俊, 张功成, 等. 珠江口盆地深水区珠海组陆架边缘三角洲特征及其意义[J]. *沉积学报*, 2015, 33(3): 595-606.
ZENG Qingbo, CHEN Guojun, ZHANG Gongcheng, et al. The shelf-margin delta feature and its significance in Zhuhai Formation of deep-water area, Pearl River Mouth Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(3): 595-606.
- [48] 王英民, 徐强, 李冬, 等. 南海西北部晚中新世的红河海底扇[J]. *科学通报*, 2011, 56(10): 781-787.
WANG Yingmin, XU Qiang, LI Dong, et al. Late Miocene Red River submarine fan, northwestern South China Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(14): 1488-1494.
- [49] 王振峰, 孙志鹏, 张迎朝, 等. 南海北部琼东南盆地深水中央峡谷大气田分布与成藏规律[J]. *中国石油勘探*, 2016, 21(4): 54-64.
WANG Zhenfeng, SUN Zhipeng, ZHANG Yingzhao, et al. Distribution and hydrocarbon accumulation mechanism of the giant deepwater Central Canyon gas field in Qiongdongnan Basin, northern South China Sea [J]. *China Petroleum Exploration*, 2016, 21(4): 54-64.

(收稿日期 2022-07-08 改回日期 2022-10-19 编辑 雷永良)