https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.258



珠江口盆地构造演化旋回及其新生代沉积环境变迁

郑金云^{1,2},高阳东^{1,2},张向涛^{1,2},庞 雄^{1,2},张青林^{1,2},劳妙姬^{1,2},冯 轩^{1,2}

中海石油(中国)有限公司深圳分公司,广东深圳 518054
中海石油深海开发有限公司,广东深圳 518054

摘 要:目前对珠江口盆地中生代以来的演化过程及其与沉积环境演变的响应关系尚缺乏系统性认识.基于珠江口盆地中-新生代岩浆活动、断陷结构样式及其改造、典型构造变形样式、沉积中心的转换等特征的对比分析,将盆地中-新生代的构造演化划分为4个阶段、7个期次:(1)中侏罗世-晚白垩世早期(~170~90 Ma)为古太平洋板块俯冲主控的陆缘岩浆弧-弧前盆地演化阶段;(2)晚白垩世-始新世中期(~90~43 Ma)为太平洋板块俯冲后撤背景下弧后周缘前陆/造山后塌陷-主动裂谷演化阶段;(3)始新世中期-中中新世(~43~10 Ma)为华南挤出-古南海俯冲拖曳主导的被动陆缘演化阶段;(4)晚中新世以来(~10~0 Ma)为菲律宾板块NWW向仰冲主导的挤压张扭演化阶段.~90 Ma、~43 Ma、~10 Ma分别实现了由安第斯型俯冲向西太平洋型俯冲、由主动裂谷向被动陆缘伸展、由被动陆缘伸展向挤压张扭的转换.在此过程中,伴随着古南海和南海的发育-消亡,新生代裂陷期沉积环境由东向西、由南向北逐渐海侵,裂后期由南向北阶段性差异沉降,由陆架浅水向陆坡深水转换,这使得珠一/三、珠二、珠四坳陷的石油地质条件具有显著的分带差异性. 关键词:珠江口盆地;构造演化;沉积环境演变;阶段性差异沉降;构造地质学.

中图分类号: P548 **文章编号:** 1000-2383(2022)07-2374-17 **收稿日期:** 2021-09-30

Tectonic Evolution Cycles and Cenozoic Sedimentary Environment Changes in Pearl River Mouth Basin

Zheng Jinyun^{1,2}, Gao Yangdong^{1,2}, Zhang Xiangtao^{1,2}, Pang Xiong^{1,2}, Zhang Qinglin^{1,2}, Lao Miaoji^{1,2}, Feng Xuan^{1,2}

1. Shenzhen Branch of CNOOC Ltd., Shenzhen 518054, China

2. CNOOC Deepwater Development Ltd., Shenzhen 518054, China

Abstract: There is still a lack of systematic understanding of the evolution process of the Pearl River Mouth Basin since the Mesozoic and its response to the evolution of sedimentary environment. Based on the comparative analysis of the magmatic activity, architectural style of depression and its modification, typical structural deformation style and migration of sedimentary centers, the tectonic evolution of the Pearl River Mouth Basin in Meso-Cenozoic can be divided into 4 stages and 7 periods: (1) the evolution stage of the continental-margin magmatic arc and forearc basin, dominated by paleo-Pacific plate subduction, from Middle Jurassic to early Late Cretaceous (~170-90 Ma); (2) the evolution stage of peripheral foreland basin/post-orogenic collapse to active rift basin in back-arc area, dominated by the subduction retreat of Pacific plate, from Late Cretaceous to Middle Eocene (~90-43 Ma); (3) the evolution stage of passive continental margin, dominated by South China block's extrusion and proto-South China Sea subduction, from Middle Eocene to Middle Miocene (~43-10 Ma); (4) the evolution

基金项目:国家重点研发计划项目(No. 2018YFC0310100);国家科技重大专项(No. 2016ZX05026-003)

作者简介:郑金云(1982-),男,工程师,主要从事构造地质相关的研究. ORCID:0000-0002-6734-7303. E-mail:zhengjy3@cnooc.com.cn

引用格式:郑金云,高阳东,张向涛,庞雄,张青林,劳妙姬,冯轩,2022.珠江口盆地构造演化旋回及其新生代沉积环境变迁.地球科学,47(7): 2374-2390.

Citation: Zheng Jinyun, Gao Yangdong, Zhang Xiangtao, Pang Xiong, Zhang Qinglin, Lao Miaoji, Feng Xuan, 2022. Tectonic Evolution Cycles and Cenozoic Sedimentary Environment Changes in Pearl River Mouth Basin. *Earth Science*, 47(7):2374-2390.

stage of compression and tensional-shear faults, dominated by NWW upward thrust of the Philippine Sea Plate, since the Late Miocene ($\sim 10-0$ Ma). ~ 90 Ma, ~ 43 Ma and ~ 10 Ma are three important periods of tectonic transformation. The subduction of the West Pacific transformed from Andean-type subduction to West Pacific-type subduction in ~ 90 Ma, and the rifting transformed from active rift to passive continental margin extension in ~ 43 Ma, and the tectonic environment transformed from passive continental margin extension and wrench in ~ 10 Ma. In this process, with the development and extinction of the proto-South China Sea and the South China Sea, the sedimentary environment in the Cenozoic rifting period gradually transgressed from east to west and from south to north. In the post-rifting period, under the control of phased differential subsidence from south to north, depositional environment transformed from shallow water to deep water, which resulted in significant zoning differences of the petroleum geological conditions in Zhu I / III , Zhu II and Zhu IV depressions. **Key words:** Pearl River Mouth Basin; tectonic evolution; sedimentary environment evolution; staged differential subsidence; structural geology.

珠江口盆地是在欧亚、印度洋、(古)太平洋 三大板块持续汇聚背景下形成的新生代裂陷盆 地,其形成受控于(古)太平洋板块向欧亚板块的 俯冲、印度洋板块与欧亚板块的碰撞,不同时期 盆地所处的大陆边缘具有不同的构造属性.研究 表明,中生代时期为(古)太平洋板块西向俯冲的 主动陆缘,形成陆缘岩浆弧-弧前盆地-周缘前 陆盆地(周蒂等,2005;张素芳等,2015),是华南 陆缘向海域的延伸,构成盆地新生代沉积基 底;新生代时期为南海北部(准)被动陆缘的断 陷盆地,呈"三隆三坳"NE向展布,其中珠一、 珠三坳陷位于陆架浅水区,珠二、珠四坳陷位 于陆坡深水-超深水区(图1).

近10年来,随着南海北部大陆边缘伸展-破裂过程的科学研究取得很大进展,尤其是2017-

2018年的 IODP367/368 航次大洋钻探,证实了大 西洋两岸典型被动陆缘贫岩浆型伸展破裂模式 不适用于南海北部;并提出"先贫后富"的新模 式,强调张裂早期拆离薄化作用主导地壳薄化 (即贫岩浆型伸展模式),晚期随着地壳的薄化, 岩浆作用占主导,使得岩石圈快速破裂,不发育 或在很窄的范围内发育蛇纹石化地幔橄榄岩(即 富岩浆型伸展破裂模式)(Sun et al., 2019;孙珍 等, 2020).晚期强烈的岩浆作用可能与南海所 处的周缘持续俯冲构造环境有关,古俯冲板片 的拆沉可导致大量岩浆的上涌(林间等, 2019).

正是由于南海北部陆缘汇聚背景下的伸展--破裂过程,盆地凹陷结构及其成因机制的认识也经历 了较为曲折的过程.早期盆地油气勘探主要集中在 陆架浅水区的珠一、珠三坳陷,认为盆地凹陷结构



图 1 珠江口盆地构造单元(a)及其地层柱状图(b) Fig. 1 Tectonic unit (a) and stratigraphic histogram (b) of the Pearl River Mouth Basin

及其成因与中国东部典型的断陷盆地类似,为高角 度断层控制的地堑、半地堑式箕状断陷,分隔性较 强,随着勘探步伐逐渐走向深水区,发现白云凹陷 是大型凹陷,地温梯度明显升高(庞雄等,2008),显 著不同于珠一坳陷,由此怀疑深水区是否发育始新 世文昌期断陷地层.随后,结合大西洋两岸典型被 动陆缘伸展破裂过程和深水区大面积三维地震资 料的研究成果,任建业等(2015,2018)提出大型拆 离断裂系统控制了南海北部被动陆缘岩石圈的强 烈薄化和深水大型沉积盆地的形成,并划分了近端 带(珠一、珠三坳陷)、细颈化带(白云凹陷)、远端 带(珠四坳陷)等不同构造单元,逐步认识到陆缘裂 陷盆地与陆内裂陷盆地的不同以及其盆地内部的 分带差异. 随着 2017-2018 年南海大洋钻探一系 列研究成果的出现,进一步认识到岩浆活动对盆地 形成和改造的控制作用,庞雄等(2021)提出壳上、 壳间、壳幔不同层次拆离作用及其与岩浆作用复 合,形成了盆地多样化的凹陷结构样式和演化过 程,并认为中生代主动陆缘俯冲所形成的先存构造 和岩浆活动是导致凹陷结构多样化的主要因素.

由此可见,珠江口盆地的形成与演化与3个方 面密切相关:中生代基底构造层的先存构造格局、 新生代岩石圈伸展破裂过程和岩浆活动.虽然在这 3个方面已有很多认识,但对盆地中生代-新生代整 个演化过程仍然缺乏系统总结,以及在此过程中盆 地的凹陷结构、沉积环境是如何演变的仍然不清.

本文在前人研究的基础上,对比分析了珠江 口盆地中-新生代岩浆活动、断陷结构样式及其 改造、沉积充填结构与沉积中心的转换等特征, 从盆地动力学演化的角度,尝试构建中-新生代 成盆演化过程和沉积环境变迁,重点探讨了西 太平洋由安第斯型俯冲向西太平洋型俯冲、由 主动裂谷向被动陆缘伸展、由被动陆缘伸展向 挤压张扭的转换及其响应.

1 珠江口盆地四次重要的构造转换

1.1 晚白垩世早期(~90 Ma):西太平洋安第斯型 俯冲向西太平洋型俯冲的转换

对珠江口盆地及其毗邻的华南地区大面积分 布的花岗岩的研究表明,华南陆上该花岗岩主要发 育于早珠罗世-晚白垩世,以早白垩世最为强烈,峰 值在~130~120 Ma,在~160 Ma构成中等强度峰值, 在~100 Ma构成一弱峰值;且由陆向洋有逐渐变年 轻的趋势(董树文等,2019);珠江口盆地近年来针 对基底花岗岩开展了U-Pb定年研究,相对早期的 K-Ar定年可靠性更高.从年龄分布来看,岩浆活动 主要发育在~165~90 Ma,峰值集中在110~ 120 Ma;其次,分别在~150 Ma、~130 Ma、~100 Ma 有次一级峰值(图2). 与华南陆上相比,主要峰值有 变年轻的趋势,与由陆向洋逐渐变年轻的趋势一 致:其次,不论是华南陆上还是珠江口盆地,~90 Ma 岩浆作用急剧减少.基于珠江口盆地该时期岩浆岩 地球化学特征的研究表明,岩浆岩总体具有火山弧 的特征(图3),与华南陆上以 I 型花岗岩为主所反 映的构造环境一致(李献华等, 2007; Cui et al., 2021). 而在长乐-南澳变质带,变质变形岩石形成 时间集中在~107~118 Ma,小范围出露未变质变形 的花岗岩年龄为70~90 Ma,且该花岗岩为A型花 岗岩,属于非造山带或造山后期裂谷构造环境(舒 良树等,2000).同时,在三水、茂名等盆地发育与 NE向走滑拉分有关的断陷盆地沉积充填(侯明才 等,2007),虽然其成因不是典型裂谷伸展,但是表 明华南陆缘构造环境开始由挤压造山向造山后的 伸展转换.类似的特征也出现在越南东南部海域, 燕山期岩浆由陆到海年龄逐渐变新,陆上Deoca岩 套花岗岩 U-Pb 年龄为 118~115 Ma, 为大陆弧环 境;Ankroet岩体为花岗岩、花岗闪长岩,年龄为 ~87 Ma,为造山后塌陷环境(Shellnutt et al., 2013).

Mz-1井的钻探证实位于珠江口盆地东沙隆 起区的中生代潮汕坳陷发育侏罗系-白垩系,侏 罗系为滨浅海-深海相沉积,上侏罗统见半深海-深海环境的放射虫硅质岩:下白垩统为海陆过渡 相沉积,含底栖有孔虫及丰富的有机质;上白垩 统为干旱泻湖相沉积,见紫红色泥岩、砂岩中石 膏联晶式胶结.根据地震剖面的对比分析,上白 垩统具有前陆造山带-前渊-前缘隆起的前陆盆 地结构特征,前渊区最大地层厚度达千米;而下 伏侏罗系-下白垩统厚度横向变化相对较小(郝 沪军等,2009;张素芳等,2015).该井钻遇的燕 山早一中期火成岩的地球化学特征具有火山弧 构造背景(图3).由此可见,潮汕坳陷经历了弧 前盆地(初始弧前的滨浅海相-成熟弧前的深海 相-晚期弧前的海陆过渡相)和前陆盆地沉积充 填,转换的时间为早/晚白垩世(~100.5 Ma).

因此,结合岩浆活动和沉积盆地充填特征,南 海北部陆缘在早侏罗世-晚白垩世(~170~90 Ma)



Fig. 2 Characteristics of Meso-Cenozoic magmatism in the northern South China Sea 三水盆地年龄数据据袁晓博(2019); 华南陆上年龄数据据董树文等(2019)



图 3 珠江口盆地基底花岗岩(Y+Nb)-Rb构造环境判别图 解(图版据 Pearce et al., 1984)

Fig. 3 Tectonic setting discrimination diagram of (Y+Nb)-Rb of basement granite in Pearl River Mouth Basin (from Pearce *et al.*, 1984) 受(古)太平洋板块持续向欧亚板块的俯冲,形成 了华南陆缘大型陆缘岩浆弧-弧前盆地沉积,具 有安第斯型俯冲特征.晚白垩世(~90 Ma)以来, 随着太平洋板块的俯冲后撤(周蒂等,2005),岩 浆弧向洋迁移,华南陆缘由弧前向弧后构造环境 转换,即进入西太平洋型俯冲演化阶段.

1.2 早始新世时期(~55 Ma):西太平洋型俯冲主 控向华南挤出伸展主控的转换

早始新世时期,西太平洋板块向欧亚的汇聚速 度降低,并在西缘开始沿转换断层形成新的俯冲 带:伊豆-小笠原-马里亚纳俯冲带(51~48 Ma)(周 蒂和孙珍,2017),即太平洋板块的西向俯冲减速、 分化.与此同时,基于冈底斯弧岩浆作用的研究表 明,印度板块与欧亚板块在~55~53 Ma碰撞,俯冲 的洋壳板片回转,岩浆弧向南迁移(张泽明等, 2018).基于青藏高原隆升历史的研究表明,由 伸展向挤压隆升最早可能发生在始新世之前 (王成善等,2009).在此"东退西进"的过程 中,拉开了华南陆缘挤出张裂的序幕.

从华南陆上三水盆地及珠江口盆地新生代岩 浆活动特征来看,三水盆地岩浆活动高峰期为 ~64~45 Ma,~43 Ma以后岩浆活动性突然减弱. 早期喷发以基性玄武岩为主,晚期喷发中酸性岩 显著增多,为基性与中酸性岩组合(张维和方念 乔,2014;袁晓博,2019).地球化学特征的分析表 明,三水盆地岩浆岩以碱性为主,表明岩浆起源较 深,地壳混染较弱,为陆内裂谷构造环境(张维和 方念乔,2014).在岩浆演化过程分析中,发现有富 斜方辉石岩浆的混合,表明存在碱性岩浆和拉斑 岩浆的混合,即大陆裂谷演化的深源岩浆中有洋 壳再循环物质的加入,推测与古太平洋板块的拆 沉有关(袁晓博,2019).珠江口盆地岩浆活动在裂 陷期有~55 Ma、~41 Ma两个峰值,而裂后期集中 在~20 Ma,但样品点相对较少.在地震剖面上可 以识别出大量裂后期喷出岩,主要集中在~21~ 19 Ma,多沿NW向或近SN向带状或串珠状分布, 呈裂隙式或中心式喷出(高阳东等,2021).裂陷期 岩浆岩既有基性玄武岩,也有较多的中酸性岩浆, 裂后期则以基性玄武岩为主.从早到晚整体反映深 源岩浆逐渐增多的趋势,表明岩浆活动与岩石圈的 伸展减薄过程有关,不同于东非等典型陆内裂谷盆 地深源岩浆逐渐减少的特征(邹和平等,1995).

古新世-始新世时期,华南陆上三水盆地发 育典型陆相断陷湖盆沉积充填,受NW、NE向两 组断裂控制,呈似菱形展布,具有走滑伸展的性 质(侯明才等,2007).珠江口盆地古新世神弧组 为山间盆地充填,局限分布;显著的裂陷盆地发 育期开始于~49 Ma,即珠琼运动一幕(李平鲁, 1993),形成具有半地堑、地堑特征的箕状断陷.

由此可见,南海北部陆缘自早始新世 (~55 Ma)开始进入陆内裂谷盆地演化阶段,是西 太平洋俯冲减速-分化、印度板块与欧亚板块碰 撞导致华南挤出的响应,可能叠加了古老板片拆 沉导致的岩浆上涌,形成岩浆活动高峰.

1.3 中始新世末期(~43 Ma):陆缘主动裂谷主控 向被动伸展主控的转换

华南陆上三水盆地及珠江口盆地的岩浆活动

特征表明,~43 Ma 三水盆地岩浆活动突然减弱, 裂陷作用也随之停止;而珠江口盆地在~40~ 43 Ma突然增强,形成又一岩浆活动高峰,裂陷作 用显著增强,并在深水区发育大型拆离断裂系统 (任建业等,2018;米立军等,2019)(图1,图4).

依据对白云、荔湾凹陷钻井资料的标定、不整 合面对比、结构改造及其沉积中心迁移特征的分 析, 厘定了拆离断裂系统的发育时间, 过白云、荔湾 凹陷的地震剖面上,在云荔低隆起两侧分别发育倾 向南、北的大型拆离断裂系统,导致上盘基底块及 早期具有箕状断陷充填特征的地层发生旋转翘倾, 形成角度削蚀不整合面T83;同时,叠加岩浆侵位的 隆升改造,导致后期裂陷中心向上盘方向迁移,在 隆起翼部形成上超不整合界面、隆起高部位形成 缺失不整合界面 T80. 依据隆起区 L4 井古生物的 标定,T80不整合界面之下的泥岩中发现文昌组 标志性孢粉-五边粉,界面之上缺失恩平组(张丽 丽等,2019),从而确定该不整合界面为T80.在该 拆离断裂系统上盘旋转隆升区的H29井,钻遇两 套火成岩的锆石 U-Pb 年龄分别为 38.8±0.5 Ma 和 43.3±0.7 Ma, 标定了 T80、T83 不整合面(庞雄 等,2021).通过不整合面上、下地层的充填结构, T83界面是由箕状断陷向断-拗结构转换的界面, 即之前是高角度断层控制箕状断陷充填,之后 是拆离断裂系统控制的早断晚拗充填结构,且 沉积中心向上盘方向迁移.因此,T83界面所对 应的~43 Ma是拆离断裂系统开始发育的时期.

与此同时,珠一坳陷的凹陷结构与沉积充 填研究表明,上、下文昌分界面是重要的构造 界面,导致裂陷中心的迁移和转换.结合区域 板块构造运动及岩浆活动,将其发育时间厘定 为~43 Ma,并称为惠州运动(施和生等,2020).

中始新世晚期也是周缘板块运动的重要时期, ~45 Ma印度板块与欧亚板块发生陆内汇聚强烈碰 撞(张泽明等,2018),导致原青藏高原在~40 Ma达 到现今高度(王成善等,2009).印度板块与欧亚的 强烈碰撞造山,产生强烈的挤出效应,使得华南陆 缘进入强伸展期.基于古南海的研究表明,~45 Ma 南沙微陆块的西段与加里曼丹陆块碰撞,古南海开 始由西向东俯冲封闭,而封闭时代逐渐变新,直到 早中新世(~15 Ma)古南海完全消亡(周蒂等, 2005),可能也与这一强烈挤出效应有关.古南海的 向南俯冲为南海北部陆缘的伸展提供了拖曳的动



图 4 白云-荔湾凹陷拆离断裂系统与裂陷期地层迁移、改造特征(位置见图 1 中 AA') Fig. 4 Characteristics of detachment fault system and strata migration and transformation in Baiyun and Liwan sags

力和广阔的伸展空间,并在~43 Ma发育大型拆 离断裂系统,伴随强烈的岩浆作用,珠江口盆地 进入被动陆缘伸展薄化演化阶段.

1.4 中中新世末期(~10 Ma):被动陆缘伸展向挤 压张扭的转换

菲律宾板块在 11~12 Ma 与日本 Izu-Bonin 弧 碰撞而停止向北运动,而后在太平洋板块驱动下一 起向 NWW 运动,并于~6.5 Ma 与欧亚板块发生弧--陆碰撞,导致台湾岛形成(任建业等,2018).在珠江 口盆地,~10 Ma 东沙隆起的隆升显著增强,形成较 大范围角度不整合界面,并在~5 Ma 隆升强度达到 最大(何敏等,2019).深水陆坡区的沉降则显著减 缓,结束陆坡内盆地演化阶段,形成开放陆坡,来自 北部陆缘的沉积物得以大量进入海盆区,发育多期 次深水扇沉积,并被 IODP367/368 航次钻探所证实 (孙珍等,2020).盆地内断裂活动显著增强,呈X型 共轭雁列式展布,表现为张扭特征,而东沙隆起东 南部持续发育右行走滑断裂;陆缘及海盆区岩浆活 动显著增强,尤其是海盆区,现今海底火山链的形 成时间主要集中在~10 Ma 以来(孙珍等,2021).

由此可见,~10 Ma东部菲律宾板块挤压作

用已主导盆地的构造变形和深部地幔流体的活动,盆地沉降显著减缓,与挤压相关的隆升、断裂、岩浆活动增强,典型被动陆缘裂后沉降演化阶段随之结束,进入挤压张扭构造演化阶段.

2 珠江口盆地裂后期阶段性差异 沉降

珠江口盆地裂后阶段性差异沉降,也是其 有别于中国东部陆内典型断陷盆地的重要特 征之一,与南海的扩张过程密切相关.

南海可分为西北次海盆、东部次海盆、西南次海盆这3个次海盆,由东向西渐进式扩张(李家彪等,2012),期间扩张脊发生两次显著的向南迁移. 东部次海盆首先在~39 Ma破裂,在台湾地区形成破裂不整合面(黄奇瑜等,2012);随后逐渐向西北次海盆扩展,西北次海盆在~34 Ma破裂(Li et al., 2014),并在~28~26 Ma停止扩张,扩张脊向南迁移至东部次海盆.扩张脊第二次向南迁移发生在~23 Ma,由东部次海盆向西南次海盆跃迁,并向西南扩张.直到~15 Ma,南海扩张停止(Li et al., 2014). 基于深反射地震数据的研究表明,南海 洋壳内发育两组对倾的下地壳反射体(LCR), 是扩张脊周期性地幔活动两次向南跃迁的响 应,并形成南海海盆北翼宽、南翼窄的不对称 结构(Ding *et al.*, 2018;丁巍伟, 2021).

珠江口盆地裂后期的沉降过程中记录了两次 深水沉积环境的突变,分别发生在~28 Ma、 ~23 Ma,与扩张脊向南跃迁时间基本一致. ~28 Ma已被南海大洋钻探 U1501站位所证实,界 面之下见丰富的底栖有孔虫,代表陆架浅水沉积; 而界面之上底栖有孔虫突然减少,浮游有孔虫显著 增多(Jian et al., 2019).~23 Ma深水沉积环境的形 成被ODP1148和白云凹陷钻井所证实,使得白云凹 陷由陆架浅水突变为陆坡深水沉积环境,并将其称 为白云运动(庞雄等,2008).即表明盆地经历了阶 段性差异沉降演化过程:(1)~33~28 Ma缓慢沉降 阶段,形成陆架浅水沉积环境;(2)~28~23 Ma陆缘 外侧强烈沉降,形成深水沉积环境;(3)~23 Ma陆缘

通常盆地裂后沉降主要受控于深部幔源物质撤离所导致的热收缩沉降,沉降量的大小与 Moho面的抬升高度成正比.由此推测南海扩张 脊向南的迁移,导致陆缘盆地幔源物质在虹吸 效应下有序的向南撤离,盆地表现出阶段性差 异沉降,控制深水沉积环境的形成和演化.

3 珠江口盆地中-新生代构造演化 旋回

依据上述分析,结合盆地凹陷结构和沉积 充填特征,将珠江口盆地中生代以来的构造演 化分为以下4个阶段、7个期次(图5).

3.1 主动陆缘造山演化阶段

燕山强挤压造山期(~170~90 Ma):受控于古 太平洋板块向欧亚板块的持续俯冲,开启了中国 东部北东走向的造山运动,海水逐渐向两侧退出, 形成广泛分布的陆缘岩浆弧和弧前盆地.在珠江 口盆地东沙隆起区残留有面积超过 3×10⁴ km²的 侏罗纪-早白垩世弧前盆地,即中生代潮汕坳陷, 并被 Mz-1井所证实;与其北侧广泛分布的花岗岩 基底,构成安第斯型主动陆缘的陆缘弧-弧前盆 地组合.同时,在华南陆上发育一系列 NE 向具 有左行走滑特征的断裂带,如莲花山断裂带、 长乐-南澳断裂带等,变质年龄主要处于早白 聖世晚期(~130~90 Ma),并在局部发育与之相 关的侏罗系、白垩系断陷盆地.

3.2 俯冲后撤背景下弧后周缘前陆/造山后塌陷-主动裂谷演化阶段

燕山末期弱挤压下的弧后周缘前陆-造山后塌 陷期(~90~80 Ma):早白垩世晚期(~100 Ma),随 着古太平洋板块由NWW向运动转向NNW向,俯 冲角度增大,岩浆弧向海域迁移,进入西太平洋型 高角度俯冲演化阶段.盆地内的中生代潮汕坳陷 由弧前盆地进入周缘前陆盆地演化阶段,形成K₁/ K₂大型角度不整合界面.在NE向地震剖面上,上 白垩统前陆造山带-前渊-前缘隆起结构特征保留 相对较完整, 而NW 向则主要表现为大型角度不整 合,可能与后期NW向持续抬升剥削改造有关; 在北部的珠一坳陷局部区域发育了可能为断陷 盆地的残余地层,推测与造山后塌陷有关.在 更远离岩浆弧的华南陆上,晚白垩世与NE向 走滑伸展有关的断陷盆地分布更为广泛,如三 水、河源、南雄盆地等.表明该时期华南陆缘整 体表现为左行压扭的区域应力环境,在靠近岩 浆弧区域发育具有挤压特征的周缘前陆盆地; 远离岩浆弧区域为应力相对松弛的造山后塌陷 构造环境,发育具有走滑拉分性质的断陷盆地.

西太平洋型俯冲下古南海弧后扩张的挤压隆 升剥蚀期(~80~55 Ma):随着西太平洋俯冲角度 的持续增大,岩浆弧逐渐向靠近俯冲带的方向迁 移,弧后裂谷区进一步集中,并最终导致地壳破裂, 古南海开始发育.虽然古南海已经消亡于南海南 部,基于地震层系成像的研究表明,古南海残留洋 壳主要分布于西巴拉姆线以东的加里曼丹岛-巴 拉望岛之下(Hall and Breitfeld, 2017)(图6).西巴 拉姆线以东的达夫耳湾-拉布-巴拉望蛇绿岩和混 杂岩带中,燧石中的放射虫年代为晚白垩世,在混 杂岩中含有晚白垩世-古近纪的各种岩块,在蛇纹 石砂岩中含始新世化石(周蒂等,2005).由此推测 古南海洋壳主要为晚白垩世,最晚可至始新世.

珠江口盆地该时期以隆升剥蚀为主,局部发育 古新世断陷盆地,但分布局限、规模均较小,多表现 为山间盆地的充填特征.盆地北部的华南陆上均分 布一定规模的断陷盆地,且具有走滑拉分性质(侯 明才等,2007),但未见有大型拆离断层发育的相关 报道.由此推测,古南海为弧后主动裂谷的伸展破 裂模式,扩张过程中对两侧陆缘产生一定的推挤作



Fig. 5 Meso-Cenozoic tectonic evolution in the Pearl River Mouth Basin



图 6 南海 800 km 深度地震层析成像(a)与古南海俯冲带分布示意图(b) Fig. 6 Seismic tomography at 800 km depth in the South China Sea (a) and distribution of Paleo-South Sea subduction zone (b) a. 据 Hall and Breitfeld(2017);b. 据鲁宝亮等(2014)

用,导致陆缘盆地仍然保持隆升剥蚀为主的状态. 结合三水盆地古新世岩浆起源较深,具有陆内裂谷的特征,推测该时期古老板片拆沉,在局部沿先存 构造的薄弱区上涌,导致弧后裂谷盆地的发育.

华南挤出-古板片拆沉主导的主动裂谷期 (~55~43 Ma):~55 Ma印度板块与欧亚板块的硬 碰撞对华南陆缘形成向东南的挤出效应.而西太 平洋板块的俯冲在~51 Ma发生分化、减速,华南陆 缘进入伸展裂陷的演化阶段.在华南陆上和珠江口 盆地广泛发育高角度断层控制的箕状断陷盆地,呈 NE向展布,凹陷结构与陆内裂谷盆地较相似.同 时,该时期也是裂陷盆地具有陆内裂谷性质的岩浆 活动最强烈的时期,推测与古老俯冲板片拆沉所引 起的幔源主动上涌有关.因此,该时期是华南挤出 伸展背景下,叠加板块拆沉导致的幔源主动上涌, 从而具有弧后主动裂谷盆地的特征.

3.3 华南挤出-古南海俯冲拖曳主导的被动陆缘演 化阶段

被动陆缘伸展裂陷期(~43~33 Ma):~45 Ma 印度板块与欧亚板块全面碰撞,导致华南陆缘向东 南挤出效应显著增强,古南海开始向南俯冲,自西 向东逐渐消亡,南海北部陆缘进入强伸展的被动陆 缘伸展薄化演化阶段.珠江口盆地深水区发育大 型拆离断裂系统,导致地壳强烈薄化,裂陷中心随 之由珠一坳陷向南部珠二坳陷迁移,并伴有大量的 岩浆侵位和喷出作用,而华南陆上的裂陷作用和岩 浆活动随之停止.随着伸展的持续进行,深水区地 壳强烈减薄,减薄中心进一步向南迁移至珠四坳 陷,在~39 Ma南海东部次海盆破裂,随后呈剪刀式 向西扩展;在~34 Ma与珠江口盆地邻近的西北 次海盆破裂.该阶段大型拆离断裂系统的发育, 导致盆地裂陷作用由北向南迁移、集中,直到最 后破裂,具有典型被动陆缘的演化特征.

裂后阶段性差异沉降期(~33~10 Ma):依据裂后地层的充填特征、沉积环境的转换和沉积中心的迁移特征,将珠江口盆地裂后由南向北的差异沉降分为4个幕次(图7).

(1)西北次海盆扩张期裂后缓慢沉降幕 (~33~27 Ma):该阶段对应于珠海组下段地层 (T70-SB27.2),以发生由南向北的广泛海侵为主 要特征,形成宽广的浅海陆架和局限海湾沉积环 境,地层主要分布在珠二、珠四坳陷,具有由凹陷 中心向周缘减薄的拗陷型充填特征.珠二坳陷厚 度分布较均匀,珠四坳陷受岩浆侵位的影响,局 部呈mini盆地式充填,厚度差异较大,而珠一、珠 三坳陷缺失或局限分布.裂后初期盆地整体沉降 较缓慢,且具有非均一性,靠近扩张脊的珠四坳 陷岩浆持续活动,表明裂后初期陆缘岩石圈可能 受到挠曲回弹效应的影响,处于均衡调整期.

(2)东部次海盆扩张期裂后差异沉降幕(~27~ 23 Ma):该阶段沉积珠海组上段地层(SB27.2-T60),以陆缘外侧珠四坳陷的强烈沉降为主要特 征,进入陆坡深水沉积环境,并被荔湾凹陷南缘的 IODP367/368航次的U1501站位所证实.差异沉降 在坳陷北部形成陆架坡折带,控制了该时期大型S 型前积层的发育,陆架坡折带上方为陆架边缘三角 洲沉积,下方发育深水重力流沉积(柳保军等, 2011).该时期西北次海盆停止扩张,扩张脊向南迁



移至东部海盆,所形成的线性磁条带特征清楚,表明已建立较稳定的扩张系统,形成虹吸效应导致与其邻近的珠四坳陷幔源物质向南撤离,进入裂后热沉降演化阶段.

(3) 西南次海盆扩张期裂后差异沉降幕 (~23~13.8 Ma):该阶段沉积珠江组-韩江组下段 地层(T60-T35),以南海北部陆缘强烈沉降区向 北扩展为主要特征,陆架坡折带向北跃迁,并奠定 现今陆架浅水和陆坡深水的地貌格局(庞雄等, 2008;柳保军等,2011).表明~23 Ma南海扩张脊 向南跃迁,海盆规模持续扩大,扩张脊形成的虹吸 效应导致陆缘盆地进入热沉降演化阶段. 而深水 区裂陷期地壳的薄化更强,裂后的沉降量相应更 大,差异沉降控制陆架坡折带的发育,形成浅水 与深水的地貌格局.~15 Ma 菲律宾岛弧与南沙 地块碰撞,古南海俯冲消亡殆尽,南海海盆随之 停止扩张(任建业等,2018),进入热沉降阶段,沉 降中心随之向海迁移,形成西北次海盆区-陆缘 盆地内的大型上超不整合面 T40. 由于此阶段陆 坡区盆地的持续沉降,导致陆缘碎屑难以到达 陆缘外侧及海盆区,形成稳定欠补偿沉积.

(4)被动陆缘沉降向挤压张扭转换的过渡幕 (~13.8~10 Ma):该阶段沉积韩江组上段地层 (T35-T32),盆地仍然延续此前的沉降过程,但菲 律宾板块持续向北的挤压应力逐渐向陆缘盆地传 导,雁列式或马尾状张扭性断裂活动开始增强,东 沙隆起自~13.8 Ma开始隆升剥蚀,其东南部走滑 断裂开始发育(何敏等,2019).差异性的隆升与沉 降导致在陆坡区发育大量峡谷水道,部分陆坡区沉 积物得以通过峡谷水道进入海盆区沉积.

3.4 菲律宾板块仰冲主导的挤压张扭演化阶段

挤压张扭演化期(~10~0 Ma):菲律宾板块 由向北转为向 NWW 运动,仰冲于南海洋壳之 上,形成的挤压应力开始主导盆地的构造变形. 盆地的沉降显著减缓,陆坡成为沉积过路区,来 自北部陆缘的沉积物得以大量进入海盆区,沉 积中心向海迁移.典型被动陆缘裂后沉降演化 阶段随之结束,进入挤压张扭构造演化阶段.

4 珠江口盆地新生代沉积环境演变 及其分带差异性

珠江口盆地沉积环境的演变显著受控于构造 演化旋回,中生代-古新世的主动造山阶段以隆升 剥蚀为主,在盆地东南部潮汕坳陷残留侏罗纪-早白垩世弧前盆地海相-海陆过渡相沉积和晚白 垩世周缘前陆盆地的干旱泻湖相沉积;古新世神 狐组局限分布,以山间盆地充填为主.始新世开 始进入伸展裂陷及裂后沉降演化阶段,总体具有 裂陷期由早到晚,从东向西、由南向北逐渐海侵, 裂后期深水陆坡由南向北逐渐扩展、陆架坡折带 由南向北迁移的特征(图8),可分为4个阶段.



图 8 珠江口盆地新生代构造演化与沉积环境演变的响应关系

Fig. 8 Response relationship between Cenozoic tectonic evolution and sedimentary environment evolution in Pearl River Mouth Basin

第7期

2385

4.1 裂陷早期陆相河湖沉积

盆地裂陷早期主要发育文昌组下段地层,以 高角度正断层控制的箕状断陷充填样式为主,整 体呈NE走向条带状展布,次级洼陷间的分隔性 较强.沉积体系展布具有陆相断陷湖盆特征,凹 陷周缘的隆起及凹陷内的凸起向邻近凹陷提供 物源,形成多物源供给体系,边界正断层控制陡 坡带-洼陷带-缓坡带沉积体系展布,发育扇三角 洲、湖底扇、辫状河三角洲、长轴三角洲等砂岩分 散体系和滨浅湖、中深湖相泥岩沉积.目前,该时 期盆地内钻井未见海相或海侵湖相相关证据, 但在南海共轭边缘的南部礼乐盆地Sampaguita-1 井为海相沉积,推测为古南海北部陆缘海相断 陷盆地沉积(李前裕等,2017;任建业等,2018).

4.2 裂陷中-晚期从早到晚由东向西、由南向 北海侵

裂陷中期发育文昌组上段地层,由于古南海的 俯冲拖曳,陆缘进入被动伸展演化阶段.被动伸展 导致应变逐渐向珠二、珠四坳陷迁移、集中,发育大 型拆离断裂系统,导致地壳伸展薄化.受控于地壳 的强烈伸展薄化,裂陷沉降作用显著增强,凹陷内 次级洼陷的分隔性减弱,形成宽深湖盆.物源区主 要来自盆地周缘隆起区,受拆离旋转作用控制,缓 坡带物源供给显著增强,陡坡带主要发育转换带 物源供给体系,均可形成大型辨状河三角洲沉 积. 而靠近陆缘的珠一坳陷仍然以高角度断层控 制的断陷沉积充填为主,物源供给体系和沉积展 布与文昌组下段相似.局部区域由于控凹断层的 转换,导致沉积中心的转移.该阶段沉积环境在 珠四坳陷和珠一坳陷东北部出现显著变化,荔湾 凹陷、韩江凹陷的钻井揭示,文昌组上段地层具 有海侵特征.在盆地东部邻近的台西南盆地 DP21 井揭示该时期为海相沉积环境(李前裕等, 2017). 由此可见,该阶段邻近南海的近海裂陷盆 地由东向西海侵,为海相断陷或海侵湖相沉积.

裂陷晚期发育恩平组,该时期虽然凹陷面积达 到最大,但盆地控凹断层的活动性减弱,华南陆缘 的物源供给充足,邻近陆缘的珠一坳陷发育大型河 流-三角洲体系,以河流三角洲、湖沼相和滨浅湖相 为主,较深水湖相不发育.而邻近南海的珠二、珠 四坳陷,由于地壳持续韧性伸展薄化,导致盆地发 生 以 拗 陷 为 主 的 沉 降,形 成 较 深 的 湖 盆. IODP367/368 航次和盆地内钻井的古生物研究证 实,珠四坳陷为海相沉积,珠二坳陷的白云凹陷在 晚期也进入海相沉积环境(张丽丽等,2019).因 此,该阶段沉积环境显著由东向西、由南向北海侵, 与陆缘地壳的强烈薄化导致近海盆地的沉降有关.

4.3 裂后早期滨浅海-局限海湾沉积

裂后早期陆缘地壳处于均衡调整阶段,以整体 缓慢沉降为主,由东向西、由南向北全面海侵,继承 了恩平组晚期的沉积格局,盆地内大型隆起提供物 源,沉积珠海组下段地层.其中,珠一坳陷缺失或 局限分布,珠二、四坳陷形成局限海湾沉积环境,由 凹陷中心向周缘减薄,具有填平补齐的充填特征. 珠四坳陷的部分区域由于岩浆侵位的差异隆升作 用,形成局限分布的mini盆地式沉积充填.

4.4 裂后中--晚期深水陆坡区由南向北扩展

裂后中-晚期由于南海扩张脊向南跃迁,扩张 脊的虹吸效应导致陆缘盆地的沉降加速,尤其是邻 近海盆区.同时,受控于裂陷期地壳薄化程度的不 同,由陆向洋裂后沉降量显著增大,而沉降量的差 异控制了陆架坡折带的发育和迁移,形成陆架浅水 一陆坡深水沉积环境,沉积了珠海组上段以来的地 层.由于扩张脊分别在~28~26 Ma、~23 Ma发生了 两次向南迁移,导致盆地裂后沉降的演化过程具有 阶段性.裂后中期沉积珠海组上段地层,在白云凹 陷南部及其向西的鹤山凹陷北坡发育大型进积型 陆架破折带,控制着坡折带上方的大型陆架边缘三 角洲沉积及其坡折带下方的深水扇沉积,并均被钻 井所证实;~23 Ma珠二、珠四坳陷发生强烈构造 沉降事件,白云凹陷陆架坡折带由凹陷南部向北 跃迁至白云北坡,并稳定分布在该处,控制着陆 架边缘三角洲和深水扇沉积展布.在珠四坳陷可 见该沉降事件造成的沉积响应,如大型上超不整 合面、向南掀斜滑塌的事件界面等.该阶段陆缘 外侧的快速沉降,奠定了现今深水地貌格局,并 呈现出从早到晚由南向北扩展的演化特征.

总体而言,地壳薄化程度的差异控制了地表 裂陷和裂后沉降的强度,而南海由东向西渐进式 扩张,控制了由东向西的海侵.扩张脊有序向南 跃迁,控制了陆缘裂后强烈沉降区向北的扩展, 从而使盆地沉积环境具有分带差异性.珠一、珠 三坳陷裂陷期以陆相河湖沉积为主,仅东北部局 部区域有海侵或海相沉积,裂后期为浅海陆架沉 积.珠二坳陷裂陷早中期以陆相河湖沉积为主, 裂陷晚期逐渐过渡为海相.裂后早中期为浅水 陆架沉积,裂后中晚期为深水陆坡沉积;珠四 坳陷裂陷早期以河湖相为主,裂陷中期由东向 西海侵,裂陷晚期则为海相沉积环境.裂后早 期为浅水沉积,裂后中晚期为陆坡深水沉积.

5 油气地质意义

5.1 裂陷期烃源岩发育条件的分带差异

受陆缘伸展薄化过程的控制,随伸展应变的 迁移和集中,珠江口盆地新生代的裂陷演化具有 明显的分带差异性,沉积环境从东向西、从南到 北、由陆向海变迁,从而导致不同演化阶段烃源岩 发育的主控因素、沉积环境均存在分带差异.

珠一坳陷地壳薄化相对较弱,距离海盆较远,且有隆起相隔,主要发育箕状断陷湖盆沉积 充填,仅东部局部区域受海侵影响.以强裂陷阶 段具有欠补偿沉积的中深湖相烃源岩为最优,其 次为滨浅湖-沼泽相.随着裂陷作用的逐渐减弱, 湖盆变浅,烃源岩发育条件逐渐变差.

珠二坳陷处于地壳强烈薄化的变换带,发育 大型拆离断裂系统,形成分隔性较弱的大型宽深 湖盆,如白云凹陷.沉积环境从早到晚由陆相过 渡为海相,兼有裂陷早期断陷湖相烃源岩和逐渐 海侵环境下陆源海相烃源岩的发育条件,且湖盆 规模大.但受岩浆侵位隆升改造的影响,部分区 域裂陷早期湖盆被抬升剥蚀,不利于烃源岩的保 存和后期的热演化;海侵咸化环境下,陆源海相烃 源岩的发育需要大型沉积体系供给有机质,其 分布规律可能不同于陆相断陷湖盆.

处于陆缘外侧的珠四坳陷地壳薄化最强烈,更 早进入海相沉积环境,但也存在从早到晚、由东向 西逐渐演变的差异.因此,对于荔湾凹陷及其以东 凹陷,主要以陆源海相或海源海相烃源岩为主.其 中,裂陷早-中期受北倾主控断层控制的凹陷或受 继承性隆起所围限的凹陷,具有形成局限海湾的条 件,相对封闭的环境更有利于烃源岩的发育.对于 荔湾凹陷以西的凹陷,裂陷早中期为陆相断陷湖 盆,具有发育中深湖相优质烃源岩的条件.但湖盆 受岩浆侵位的改造作用较强,烃源岩的变形和变位 可能对后期油气运聚造成影响.裂陷晚期过渡为海 相,开放条件下,烃源岩发育条件相对较差.

5.2 裂后期储层沉积体系的分带差异

由于裂后沉降量的差异,形成陆架浅水和陆 坡深水沉积环境,由陆向洋依次发育陆架三角 洲、陆架边缘三角洲、深水扇三种类型的沉积体 系.陆架三角洲沉积体系是华南陆缘碎屑岩输 入的主要卸载区,主要受控于古珠江、古韩江等 大型河流供给体系,局部受波浪、潮汐作用改 造,整体相对富砂.陆架边缘三角洲沉积体系处 于陆架坡折带附近,距离物源输入区较远,砂体 发育程度受海平面升降的影响较大,通常只有 海平面较低、陆源碎屑向海推进较远时相对富 砂.同时,砂体易于受波浪改造,形成平行于坡 折带分布的条带状砂脊.深水扇沉积则处于陆 架坡折带下方,为重力流沉积,整体富泥.相对 富砂沉积体以复合水道、斜坡扇、盆地扇为主, 砂体局限分布,且与其物源区是否富砂有关.

受控于南海扩张脊向南跃迁,陆缘裂后强烈沉 降区由南向北扩展,进而控制陆架坡折带向北跃迁 和深水沉积环境的形成,使得各坳陷的不同储层沉 积体系随时间有序叠置.珠一坳陷主要发育陆架浅 水区三角洲沉积体,相对富砂,靠近东沙隆起周缘 的局部区域发育早中新世碳酸盐沉积储层;珠二坳 陷从早到晚分别发育陆架三角洲沉积、陆架边缘三 角洲沉积、深水扇沉积体系.其中,渐新世早期以陆 架三角洲沉积为主,晚期随着海侵扩展演变为陆架 边缘三角洲沉积体系.中新世以来随着强烈沉降 向北扩张,成为深水陆坡沉积环境,发育陆架边缘 三角洲-深水扇沉积体系.珠四坳陷以荔湾凹陷 为界,东、西差异较大,西部处于远源区域,渐新 世晚期发育陆架边缘三角洲-深水扇沉积体系, 是其主要储层发育层段.中新世以来,随着沉降 增强,古珠江三角洲沉积体系向北后撤,远源区 以深水泥岩沉积为主;东部则以东沙隆起供源 为主,不发育宽广陆架,隆起周缘发育滨岸沉积 体,局部区域发育较窄的陆架边缘三角洲沉 积,通过陆坡水道或断层进入凹陷深水区,形 成深水扇沉积.东沙隆起主要以中生界沉积岩 为主,缺乏大型水系输入,相对近源搬运,储层 发育条件相对较差.而西部的琼东南盆地则发 育大型轴向深水峡谷水道沉积体系,其发育机 制又不同于珠江口盆地(Chen et al., 2020).

5.3 构造-热演化的分带差异

珠江口盆地由陆向洋,裂陷期不同的地壳薄 化史、裂后期阶段性差异沉降史直接控制其构 造-热演化史.珠一坳陷与典型断陷盆地较为相 似,以破裂不整合时间为界,可分为裂陷期伸展 增热和裂后期沉降降温的演化过程.珠二坳陷 因裂陷中-晚期地壳开始强烈薄化,其增温过程 应快于珠一坳陷;而裂后期则较为复杂,从沉积 响应和岩浆活动来看,~23 Ma以来真正进入热 收缩沉降阶段,因此裂后初期可能处于缓慢降 温的过程,直到~23 Ma之后.珠四坳陷因裂陷 中-晚期地壳薄化更强烈,其增温速度应最大, 裂后期~27 Ma进入区域热收缩沉降阶段,即在 此之前为缓慢降温、之后则进入正常降温进程.

6 结论

在欧亚、印-澳、(古)太平洋三大板块"此消彼 长"的汇聚背景下,珠江口盆地经历了4个不同阶段 的演化:(1)中侏罗世-晚白垩世早期(~170~ 90 Ma)为古太平洋板块安第斯型俯冲主控的陆缘 岩浆弧-弧前盆地演化阶段,以大面积分布的陆缘 岩浆弧为主要特征,并发育海相弧前盆地.(2)晚白 垩世-始新世中期(~90~43 Ma)为太平洋板块俯冲 后撤背景下弧后周缘前陆/造山后塌陷-主动裂谷 演化阶段,裂陷期以陆内裂谷型岩浆的强烈活动和 发育高角度断层控制的箕状断陷为主要特征;可分 为~90~80 Ma、~80~55 Ma、~55~43 Ma三个期次, 不同时期动力学机制有所不同,沉积环境由中生代 晚期泻湖相周缘前陆盆地向新生代陆相断陷湖盆 转变.(3)始新世中期-中中新世(~43~10 Ma)为华 南挤出一古南海俯冲拖曳主导的被动陆缘演化阶 段,以发育大型拆离断裂系统和裂后阶段性沉降为 主要特征;其中裂陷期可分为~43~38 Ma、~38~ 33.9 Ma两个期次,裂后期沉降可分为~33.9~ 27 Ma、~27~23 Ma、~23~10 Ma三个期次. 沉积环 境由陆相向海相、由陆架浅水向陆坡深水转 变.(4)晚中新世-现今(~10~0 Ma)为华南挤 出-菲律宾板块 NW 向仰冲主导的挤压张扭演 化阶段,以东沙隆起的隆升剥蚀、张扭性断层 发育和陆坡沉积中心向海盆转移为主要特征.

~90 Ma、~43 Ma、~10 Ma 是盆地构造属性由挤 压造山向陆内裂谷、由主动裂谷主导向被动伸展主 导、由陆缘伸展向挤压张扭转变的3个重要时期,而 裂后三阶段的差异沉降具有显著的南海特色,与 扩张脊向南跃迁的虹吸效应所导致的陆缘幔源 有序向南撤离有关,并控制了陆架坡折带的发 育,进而控制了浅水、深水两大沉积储层的发育 与分布.随着盆地沉降作用的逐渐减弱,陆坡内 凹陷在~10 Ma基本被填平,形成开放陆坡,陆架 区砂质沉积物得以通过大型峡谷水道,大量进入 南海西北次海盆,并发育大规模深水扇沉积.

珠江口盆地在不同演化阶段的构造属性、沉积环境、构造-热演化史等具有珠一/三、珠二、 珠四坳陷的分带差异性,导致了成烃、成储、成 藏等石油地质条件的不同.

References

- Chen, H., Xie, X. N., Mao, K. N., et al., 2020. Depositional Characteristics and Formation Mechanisms of Deep -Water Canyon Systems along the Northern South China Sea Margin. *Journal of Earth Science*, 31(4): 808-819. https://doi.org/10.1007/s12583-020-1284-z
- Cui, Y. C., Shao, L., Li, Z. X., et al., 2021. A Mesozoic Andean - Type Active Continental Margin along Coastal South China: New Geological Records from the Basement of the Northern South China Sea. *Gondwana Research*, 99: 36-52. https://doi.org/10.1016/j.gr.2021.06.021
- Ding, W. W., Sun, Z., Dadd, K., et al., 2018. Structures within the Oceanic Crust of the Central South China Sea Basin and Their Implications for Oceanic Accretionary Processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 488: 115-125. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.02.011
- Ding, W. W., 2021. Continental Margin Dynamics of South China Sea: From Continental Break - Up to Seafloor Spreading. *Earth Science*, 46(3): 790-800 (in Chinese with English abstract).
- Dong, S. W., Zhang, Y. Q., Li, H. L., et al., 2019. The Yanshan Orogeny and Late Mesozoic Multi-Plate Convergence in East Asia—Commemorating 90th Years of the "Yanshan Orogeny". *Scientia Sinica Terrae*, 49(6): 913-938 (in Chinese).
- Gao, Y.D., Lin, H.M., Liu, P., et al., 2021. Characteristics and Periods of Cenozoic Magmatic Activity in the Eastern Yangjiang Sag, Pearl River Mouth Basin, China. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 48(2): 154-164 (in Chinese with English abstract).
- Hall, R., Breitfeld, H. T., 2017. Nature and Demise of the Proto-South China Sea. Bulletin of the Geological Society of Malaysia, 63: 61-76. https://doi.org/10.7186/ bgsm63201703
- Hao, H.J., Shi, H.S., Zhang, X.T., et al., 2009. Mesozoic Sediments and Their Petroleum Geology Conditions in Chaoshan Sag: A Discussion Based on Drilling Results from the Exploratory Well LF35-1-1. Chi-

na Offshore Oil and Gas, 21(3): 151-156 (in Chinese with English abstract).

- He, M., Zhu, W.L., Wu, Z., et al., 2019. Neotectonic Movement Characteristics and Hydrocarbon Accumulation of the Pearl River Mouth Basin. *China Offshore Oil and Gas*, 31(5): 9–20 (in Chinese with English abstract).
- Hou, M.C., Chen, H.D., Tian, J.C., et al., 2007. Sedimentary Facies and Palaeogeography of the Sanshui Basin, Guangdong during the Palaeogene. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 27(2): 37-44 (in Chinese with English abstract).
- Huang, Q.Y., Yan, Y., Zhao, Q.H., et al., 2012. Cenozoic Stratigraphy of Taiwan: Looking into Rifting, Stratigraphy and Paleoceanography of South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 57(20): 1842-1862 (in Chinese).
- Jian, Z. M., Jin, H. Y., Kaminski, M. A., et al., 2019. Discovery of the Marine Eocene in the Northern South China Sea. *National Science Review*, 6(5): 881-885. https://doi.org/10.1093/nsr/nwz084
- Li, C. F., Xu, X., Lin, J., et al., 2014. Ages and Magnetic Structures of the South China Sea Constrained by Deep Tow Magnetic Surveys and IODP Expedition 349. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 15(12): 4958– 4983. https://doi.org/10.1002/2014gc005567
- Li, J.B., Ding, W.W., Wu, Z.Y., et al., 2012. The Propagation of Seafloor Spreading in the Southwestern Subbasin, South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 57(20): 1896-1905 (in Chinese).
- Li, P. L., 1993. Cenozoic Tectonic Movement in the Pearl River Mouth Basin. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 7(6): 11-17 (in Chinese with English abstract).
- Li, Q.Y., Wu, G.X., Zhang, L.L., et al., 2017. Paleogene Marine Deposition Records of Rifting and Breakup of the South China Sea: An Overview. *Scientia Sinica Terrae*, 47(12): 1447-1459 (in Chinese).
- Li, X.H., Li, W.X., Li, Z.X., 2007. Another Discussion on the Genetic Types and Tectonic Significance of the Early Yanshan Granites in Nanling. *Chinese Science Bulletin*, 52(9): 981-991 (in Chinese).
- Lin, J., Li, J.B., Xu, Y.G., et al., 2019. Ocean Drilling and Major Advances in Marine Geological and Geophysical Research of the South China Sea. *Haiyang Xuebao*, 41 (10): 125-140 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B.J., Pang, X., Yan, C.Z., et al., 2011. Evolution of the Oligocene-Miocene Shelf Slope-Break Zone in the Baiyun Deep-Water Area of the Pearl River Mouth Basin and Its Significance in Oil-Gas

Exploration. *Acta Petrolei Sinica*, 32(2): 234-242 (in Chinese with English abstract).

- Lu, B.L., Wang, P.J., Liang, J.S., et al., 2014. Structural Properties of Paleo-South China Sea and Their Relationship with the Tethys and the Paleo-Pacific Tectonic Domain. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 44(5): 1441-1450 (in Chinese with English abstract).
- Mi, L.J., Zhang, X.T., Pang, X., et al., 2019. Formation Mechanism and Petroleum Geology of Pearl River Mouth Basin. Acta Petrolei Sinica, 40(S1): 1-10 (in Chinese with English abstract).
- Pang, X., Chen, C.M., Peng, D.J., et al., 2008. Basic Geology of Baiyun Deep-Water Area in the Northern South China Sea. *China Offshore Oil and Gas*, 20(4): 215– 222 (in Chinese with English abstract).
- Pang, X., Zheng, J.Y., Mei, L.F., et al., 2021. Characteristics and Origin of Continental Marginal Fault Depressions under the Background of Preexisting Subduction Continental Margin, Northern South China Sea, China. *Petroleum Exploration and Development*, 48(5): 1069– 1080 (in Chinese with English abstract).
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., Tindle, A. G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956-983. https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956
- Ren, J.Y., Pang, X., Lei, C., et al., 2015. Ocean and Continent Transition in Passive Continental Margins and Analysis of Lithospheric Extension and Breakup Process: Implication for Research of the Deepwater Basins in the Continental Margins of South China Sea. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 102-114 (in Chinese with English abstract).
- Ren, J. Y., Pang, X., Yu, P., et al., 2018. Characteristics and Formation Mechanism of Deepwater and Ultra -Deepwater Basins in the Northern Continental Margin of the South China Sea. *Chinese Journal of Geophysics*, 61 (12): 4901-4920 (in Chinese with English abstract).
- Shellnutt, J. G., Lan, C. Y., Van Long, T., et al., 2013. Formation of Cretaceous Cordilleran and Post-Orogenic Granites and Their Microgranular Enclaves from the Dalat Zone, Southern Vietnam: Tectonic Implications for the Evolution of Southeast Asia. *Lithos*, 182–183: 229–241. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.09.016
- Shi, H. S., Du, J. Y., Mei, L. F., et al., 2020. Huizhou Movement and Its Significance in Pearl River Mouth Basin, China. *Petroleum Exploration and Development*,

47(3):447-461 (in Chinese with English abstract).

- Shu, L.S., Yu, J.H., Wang, D.Z., 2000. Late Mesozoic Granitic Magmatism and Its Relation to Metamorphism Ductile Deformation in the Changle-Nan'ao Fault Zone, Fujian Province. *Geological Journal of China Universities*, 6(3): 368-378 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Z., Li, F.C., Lin, J., et al., 2021. The Rifting-Breakup Process of the Passive Continental Margin and Its Relationship with Magmatism: The Attribution of the South China Sea. *Earth Science*, 46(3): 770-789 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Z., Lin, J., Qiu, N., et al., 2019. The Role of Magmatism in the Thinning and Breakup of the South China Sea Continental Margin Special Topic: The South China Sea Ocean Drilling. *National Science Review*, 6(5): 871-876. https://doi.org/10.1093/nsr/nwz116
- Sun, Z., Lin, J., Wang, P.X., et al., 2020. International Collaboration of Ocean Exploration in the South China Sea Enhanced by International Ocean Discovery Program Expeditions 367/368/368x. Journal of Tropical Oceanography, 39(6): 18-29 (in Chinese with English abstract).
- Wang, C.S., Dai, J.G., Liu, Z.F., et al., 2009. The Uplift History of the Tibetan Plateau and Himalaya and Its Study Approaches and Techniques: A Review. *Earth Science Frontiers*, 16(3): 1-30 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, X.B., 2019. The Record of Cenozoic Magmatism in Sanshui Basin and Its Relationship with the Early Tectonic Evolution Stage of the South China Sea (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. L., Shu, Y., Cai, G. F., et al., 2019. Eocene -Oligocene Sedimentary Environment Evolution and Its Impact on Hydrocarbon Source Conditions in Eastern Pearl River Mouth Basin. Acta Petrolei Sinica, 40(S1): 153-165 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S.F., Zhang, X.T., Zhang, Q.L., et al., 2015. Characteristics of the Cretaceous in the Northern South China Sea and Tectonic Implications. *Marine Geology* & Quaternary Geology, 35(6): 81-86 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W., Fang, N.Q., 2014. Geochemistry Characteristics of Eocene Volcanic Rocks in Sanshui Basin, Guangdong. *Earth Science*, 39(1): 37-44 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. M., Ding, H. X., Dong, X., et al., 2018. The Gangdese Arc Magmatism: From Neo-Tethyan Subduc-

tion to Indo-Asian Collision. *Earth Science Frontiers*, 25(6): 78-91 (in Chinese with English abstract).

- Zhou, D., Sun, Z., 2017. Plate Evolution in the Pacific Domain since Late Mesozoic and Its Inspiration to Tectonic Research of East Asia Margin. Journal of Tropical Oceanography, 36(3): 1-19 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, D., Sun, Z., Chen, H.Z., et al., 2005. Mesozoic Lithofacies, Paleo-Geography, and Tectonic Evolution of the South China Sea and Surrounding Areas. *Earth Science Frontiers*, 12(3): 204-218 (in Chinese with English abstract).
- Zou, H.P., Li, P.L., Rao, C.T., 1995. Geochemistry of Cenozoic Volcanic Rocks in Zhu Jiangkou Basin and Its Geodynamic Significance. *Geochimica*, 24(S1): 33-45 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 丁巍伟,2021.南海大陆边缘动力学:从陆缘破裂到海底扩 张.地球科学,46(3):790-800.
- 董树文,张岳桥,李海龙,等,2019."燕山运动"与东亚大陆 晚中生代多板块汇聚构造——纪念"燕山运动"90周 年.中国科学:地球科学,49(6):913-938.
- 高阳东,林鹤鸣,刘培,等,2021.珠江口盆地阳江东凹新生 代岩浆活动特征与期次.成都理工大学学报(自然科学 版),48(2):154-164.
- 郝沪军,施和生,张向涛,等,2009.潮汕坳陷中生界及其石 油地质条件:基于LF35-1-1探索井钻探结果的讨论. 中国海上油气,21(3):151-156.
- 何敏,朱伟林,吴哲,等,2019.珠江口盆地新构造运动特征 与油气成藏.中国海上油气,31(5):9-20.
- 侯明才,陈洪德,田景春,等,2007.广东三水盆地古近纪岩 相古地理特征及演化.沉积与特提斯地质,27(2): 37-44.
- 黄奇瑜, 闫义, 赵泉鸿, 等, 2012. 台湾新生代层序: 反映南 海张裂, 层序和古海洋变化机制. 科学通报, 57(20): 1842-1862.
- 李家彪,丁巍伟,吴自银,等,2012.南海西南海盆的渐进式 扩张.科学通报,57(20):1896-1905.
- 李平鲁,1993.珠江口盆地新生代构造运动.中国海上油气 (地质),7(6):11-17.
- 李前裕,吴国瑄,张丽丽,等,2017.古近纪南海断陷作用和 破裂不整合的海相沉积记录.中国科学:地球科学,47 (12):1447-1459.
- 李献华,李武显,李正祥,2007.再论南岭燕山早期花岗岩 的成因类型与构造意义.科学通报,52(9):981-991.
- 林间,李家彪,徐义刚,等,2019.南海大洋钻探及海洋地质 与地球物理前沿研究新突破.海洋学报,41(10):

125 - 140.

- 柳保军, 庞雄, 颜承志, 等, 2011. 珠江口盆地白云深水区渐 新世-中新世陆架坡折带演化及油气勘探意义. 石油学 报, 32(2): 234-242.
- 鲁宝亮,王璞珺,梁建设,等,2014.古南海构造属性及其与 特提斯和古太平洋构造域的关系.吉林大学学报(地球 科学版),44(5):1441-1450.
- 米立军,张向涛,庞雄,等,2019.珠江口盆地形成机制与油 气地质.石油学报,40(S1):1-10.
- 庞雄,陈长民,彭大钧,等,2008.南海北部白云深水区之基 础地质.中国海上油气,20(4):215-222.
- 庞雄,郑金云,梅廉夫,等,2021. 先存俯冲陆缘背景下南海 北部陆缘断陷特征及成因.石油勘探与开发,48(5): 1069-1080.
- 任建业, 庞雄, 雷超, 等, 2015. 被动陆缘洋陆转换带和岩石 圈伸展破裂过程分析及其对南海陆缘深水盆地研究的 启示. 地学前缘, 22(1): 102-114.
- 任建业, 庞雄, 于鹏, 等, 2018. 南海北部陆缘深水-超深水盆 地成因机制分析. 地球物理学报, 61(12): 4901-4920.
- 施和生,杜家元,梅廉夫,等,2020.珠江口盆地惠州运动及 其意义.石油勘探与开发,47(3):447-461.
- 舒良树,于津海,王德滋,2000.长乐-南澳断裂带晚中生代 岩浆活动与变质-变形关系.高校地质学报,6(3): 368-378.
- 孙珍,李付成,林间,等,2021.被动大陆边缘张-破裂过程 与岩浆活动:南海的归属.地球科学,46(3):770-789.

- 孙珍,林间,汪品先,等,2020.国际大洋发现计划IO-DP367/368/368X航次推动南海国际化海洋科考成果. 热带海洋学报,39(6):18-29.
- 王成善,戴紧根,刘志飞,等,2009.西藏高原与喜马拉雅的 隆升历史和研究方法:回顾与进展.地学前缘,16(3): 1-30.
- 袁晓博,2019. 三水盆地新生代岩浆记录与南海早期演化 (博士学位论文). 北京:中国地质大学.
- 张素芳,张向涛,张青林,等,2015.南海北部白垩系发育特 征及构造意义.海洋地质与第四纪地质,35(6):81-86.
- 张维,方念乔,2014.广东三水盆地始新世火山岩地球化学 特征.地球科学,39(1):37-44.
- 张泽明,丁慧霞,董昕,等,2018. 冈底斯弧的岩浆作用:从 新特提斯俯冲到印度-亚洲碰撞. 地学前缘,25(6): 78-91.
- 周蒂, 孙珍, 2017.晚中生代以来太平洋域板块过程及其对 东亚陆缘构造研究的启示.热带海洋学报, 36(3): 1-19.
- 周蒂,孙珍,陈汉宗,等,2005.南海及其围区中生代岩相古 地理和构造演化.地学前缘,12(3):204-218.
- 邹和平,李平鲁,饶春涛,1995.珠江口盆地新生代火山岩 地球化学特征及其动力学意义.地球化学,24(S1): 33-45.