

陶文芳, 李洪博, 郑金云, 等. 南海北部陆缘超深水珠四坳陷地质结构及其对烃源岩发育的控制[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(1): 40-48.
TAO Wenfang, LI Hongbo, ZHENG Jinyun, et al. Geological structure of Zhusi Depression in ultra-deep water area on the continental margin of the northern South China Sea and its control on the development of source rocks[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(1): 40-48.

南海北部陆缘超深水珠四坳陷地质结构 及其对烃源岩发育的控制

陶文芳, 李洪博, 郑金云, 张青林, 李元平, 贾兆扬, 董明

(中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 深圳 518000)

摘要:珠江口盆地珠四坳陷整体水深超过 1 500 m, 属极低勘探程度区域, 钻井发现的油气显示证实了该区存在烃源岩。地震资料揭示古近系是主力烃源岩发育层系, 沉积厚度及面积均较大。珠四坳陷作为南海北部向超深水迈进的油气勘探新区, 其各凹陷的石油地质条件亟待剖析。在珠江口盆地 6 种断陷形成机制认识的基础上, 通过对新采集地震资料的系统分析, 将珠四坳陷划分大西洋贫岩型大陆边缘的壳间韧性流变型、大西洋富岩型大陆边缘的壳上岩浆底侵型、大西洋贫岩型大陆边缘的壳上先存拼合型 3 类断陷结构。运用 2Dmove 软件及去压实技术恢复各个洼陷沉降速率和伸展速率, 结合大量地震剖面深入研究了珠四坳陷地质结构及其对烃源岩发育的影响, 明确了不同断陷结构下烃源岩发育背景的差异, 以此认为荔湾、鹤山凹陷烃源岩发育条件优越, 可作为南海北部超深水地区的重要勘探突破点。

关键词:南海北部; 大陆边缘; 珠江口盆地; 珠四坳陷; 洼陷结构; 拆离断层; 烃源岩

中图分类号: P744.4; P618.13

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.287

0 引言

从全球油气资源的发现历程来看, 先陆地后海洋、先浅海后深海是勘探发展的必然趋势。随着陆上和浅海油气资源勘探开发难度的加大, 未来油气勘探将极大依赖于深海沉积盆地^[1-3]。墨西哥湾、巴西、安哥拉等大陆边缘深水地区勘探已经发现多个巨型油气田, 中国南海北部陆缘珠江口盆地和琼东南盆地先后发现了荔湾 3-1、陵水 17-2 等大中型油气田^[2-5], 由此证实, 陆缘深水-超深水盆地丰富的油气资源和良好油气勘探潜力, 是油气工业发展和储量增长的前沿领域^[1-7]。

一般认为, 现今水深 > 500 m 为深水, > 1 500 m 为超深水^[1]。南海北部陆缘珠江口盆地珠四坳陷水

深大部分 > 1 500 m, 属于超深水范畴。该坳陷处于勘探早期阶段, 研究程度较低, 多为关于局部洼陷的构造和沉积认识, 针对坳陷的整体研究尚不够深入, 对其凹陷结构的系统性分析也鲜有报道^[7-11]。凹陷结构作为控制沉积充填的框架和约束性地质条件, 不同结构下的可容空间及烃源岩发育模式差别较大, 国内外研究表明, 宽深结构凹陷具备发育规模烃源岩的条件^[4-5, 9-11]。作为未来深海油气资源勘探的重要阵地, 系统研究该坳陷的结构特征, 并在此基础上剖析其规模烃源岩形成背景尤为重要。本文以勘探研究中积累的地球物理资料解释和地质资料分析为基础, 结合南海北部陆缘地壳岩石圈组合、陆缘盆地成因机制, 阐明陆缘超深水不同凹陷结构特征差异及烃源岩发育背景, 以期对南海北部陆缘超深水盆地进一步的资源评价和油气勘探提供地质依据。

1 区域构造背景

南海北部珠江口盆地是在周缘板块伸展应力

收稿日期: 2021-11-20

资助项目: 中海石油有限公司“十三五”科技重点项目“南海东部油田上产 2000 万吨关键技术研究”(CNOOC-KJ 135 ZDXM 37 SZ 01 SHENHAI)

作者简介: 陶文芳(1988—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事油气勘探及石油地质综合研究。E-mail: taowf@cnooc.com.cn

迁移与集中的基础上, 由中生代主动陆缘发育而来的(准)被动陆缘。在中生代形成的沟-弧-盆体系中, 超深水珠四坳陷带位于弧前盆地位置, 地壳背景不同于弧后的珠一、珠三坳陷, 具有拆离薄化、莫霍

面抬升、地温梯度增高等显著特点。在盆地东、西部分别被阳江-一统断裂带和惠东-北卫滩断裂带错断, 自北向南依次发育揭阳、靖海、兴宁、荔湾、鹤山等凹陷^[9-14](图 1a)。

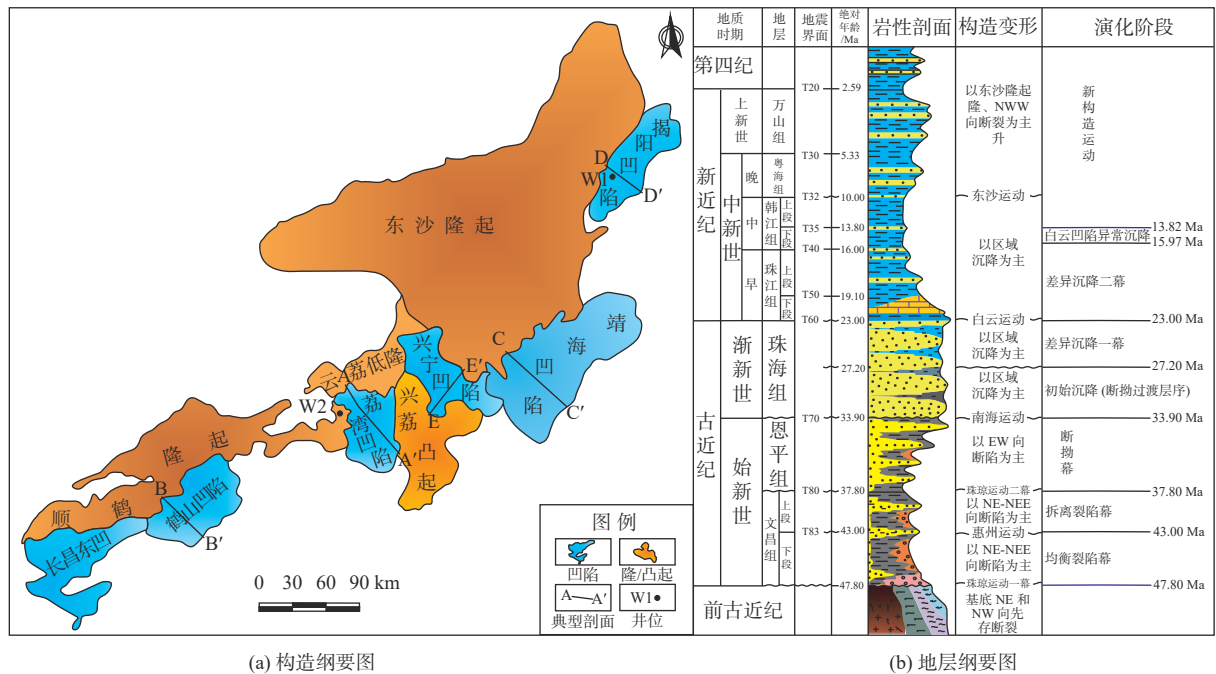


图 1 南海北部陆缘珠四坳陷构造-地层纲要图

Fig.1 Structural stratigraphic outline of Zhushi Depression on the northern continental margin of the South China Sea

南海北部陆缘珠四坳陷整体可划分为同裂陷期和裂陷后期两大演化阶段。裂陷伸展始于中生代晚期古太平洋板块的俯冲后撤, 始新世中期(约 55 Ma)印支板块与欧亚板块硬碰撞, 导致华南陆缘旋转挤出, 盆地第 1 幕裂陷开始发育(即珠琼运动一幕)。随着太平洋板块俯冲方向由 NNW 向逐步转变为 NWW 向, 盆地伸展方向逐渐由 NE 向转变为 NEE 向、近 SN 向, 盆地先后经历惠州运动(约 43 Ma)和珠琼运动二幕(约 37.8 Ma)的裂陷作用^[10-11]。同裂陷期结束后, 洋壳打开, 南海北部陆缘进入裂后期, 可进一步划分为南海扩张期(晚渐新世—中中新世, 南海期)和南海俯冲期(中中新世至今, 东沙期)2 个阶段^[10-14](图 1b)。

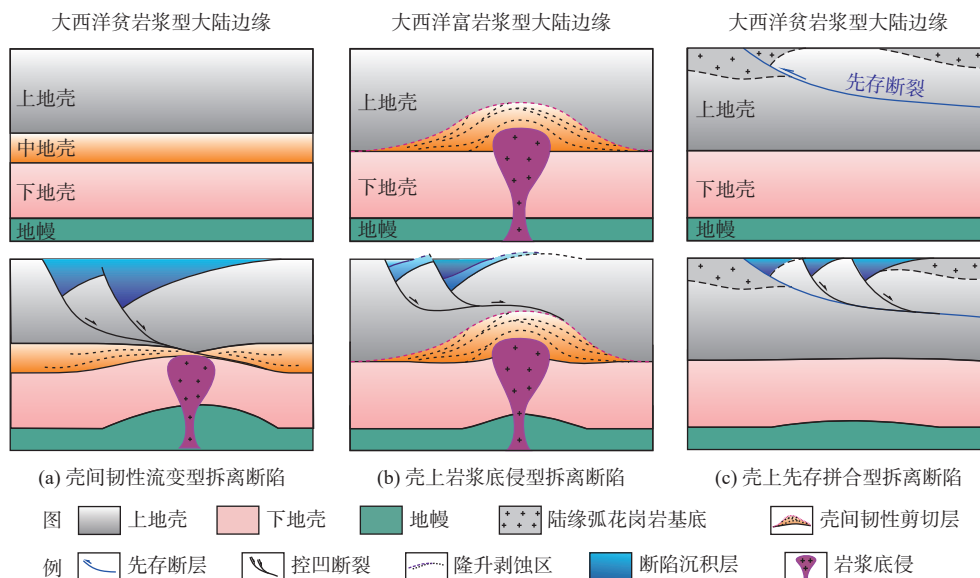
珠四坳陷前新生代基底主要为中生代沉积岩和花岗岩。中生代沉积岩分布区主要位于东沙隆起东南侧揭阳、靖海、兴宁凹陷, 花岗岩主要分布于鹤山、长昌凹陷, 花岗岩、沉积岩混合区主要位于荔湾凹陷。新生代主要发育始新世中期以来的地层, 分别为始新统文昌组、恩平组、渐新统珠海组、中新统珠江组和粤海组、上新统万山组和第四系^[14-16](图 1b)。文昌组内幕的 2 期断陷阶段控制文昌组

上段和下段的沉积充填, 始新世以陆相湖盆沉积充填为主, 始新世晚期逐渐进入海相或海陆过渡相, 渐新世以来均为海相, 并发育珠海组和珠江-韩江组两大陆架破折带, 形成陆坡深水沉积环境^[16]。

2 凹陷地质结构差异及特征

珠四坳陷位于陆缘地壳岩石圈的细颈化带和远端带, 根据陆缘岩石圈伸展、薄化、破裂过程, 裂陷演化可分为均衡裂陷幕(以早文昌期裂陷作用为主)、拆离裂陷幕(以晚文昌期拆离作用为主)、断拗幕(以恩平期地壳韧性薄化为主)3 个阶段^[17]。根据凹陷构造单元、地壳厚薄及形变方式、断陷及拆离作用强弱、岩浆改造程度及裂陷演化过程, 将珠四坳陷不同凹陷分为壳间韧性流变型拆离断陷(以荔湾、鹤山凹陷为代表)、壳上岩浆底侵型拆离断陷(以靖海凹陷为代表)、壳上先存拼合型拆离断陷(以揭阳、兴宁凹陷为代表)(图 2)。

被动大陆边缘根据岩石圈初始的状态(厚薄、流变性)的不同, 分为贫岩浆型和富岩浆型。南海北部陆缘处于主、被动陆缘交互作用下, 珠江口盆

图 2 南海北部陆缘珠四拗陷断陷结构样式^[11]Fig.2 Structural style of fault depression in Zhushi Depression on the northern continental margin of the South China Sea^[11]

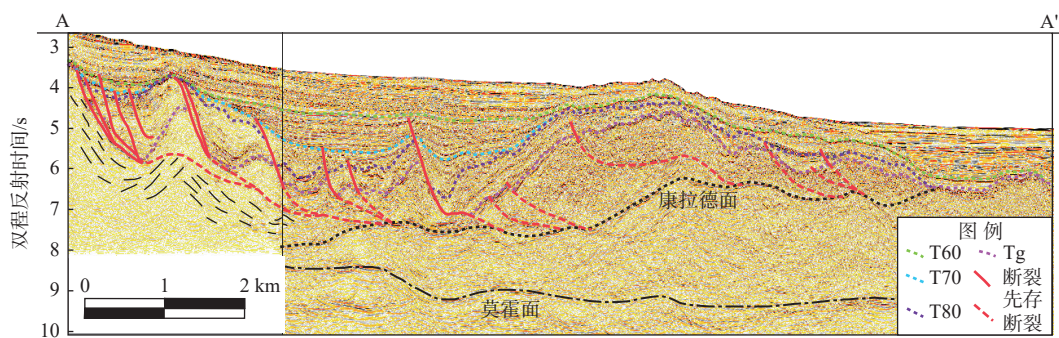
地不同位置具有贫岩浆型或富岩浆型的特征。总体来说,研究区珠四拗陷具贫/富岩浆型兼有的特征,南部更具富岩浆型被动陆缘特征,裂陷发生较早;北部更具贫岩浆被动陆缘特征,裂陷发生较晚。靖海凹陷比其他凹陷更靠近太平洋板块,岩浆底侵规模更大,同时靖海凹陷地壳厚度约为 20 km,热流值为 74~79 mW/m²。荔湾、鹤山凹陷地壳厚度约为 10 km,也就是“壳间韧性流变型拆离断陷”(荔湾、鹤山凹陷)下部莫霍面较浅,上下地壳间更具流变性,具有上、中、下地壳多层次发育的特征,热流值 > 80 mW/m²,而揭阳凹陷、兴宁凹陷则因为地壳厚度 > 20 km,热流值 < 70 mW/m²,上地壳未因高温出现韧性部分,表现为贫岩浆被动陆缘特征。

2.1 壳间韧性流变型拆离断陷——荔湾、鹤山凹陷

壳间韧性流变型拆离断陷岩石圈强度具有层状脆韧性化的特点,发育 3 层流变结构的地壳,一

般位于陆缘超伸展区的细颈化带和远端带^[10-11,17]。在经历均一伸展、应变集中迁移和拆离薄化的过程中,早期均衡裂陷阶段脆性地层破裂形成高角度半地堑,随后进入拆离断陷幕和断拗幕,地壳减薄、岩浆侵位,韧性剪切面相应抬升,应变集中、迁移,产生壳间拆离,形成断拗联控的结构形态(图 2a)。

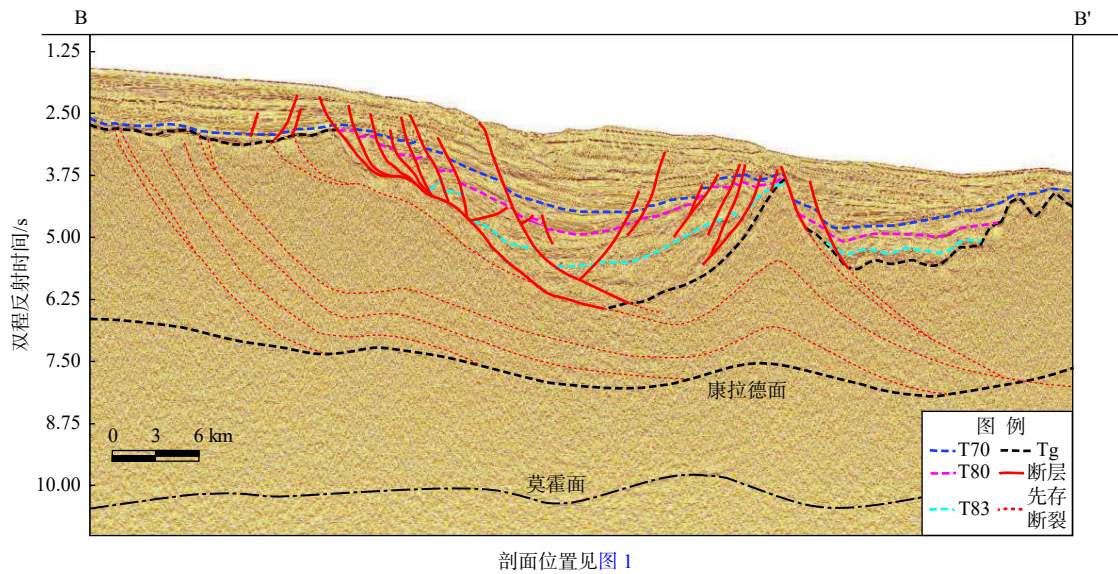
荔湾、鹤山凹陷位于陆缘伸展远端带,北靠白云凹陷和顺鹤隆起,南临西北次海盆,为超伸展构造发育区,地壳厚度约 8~12 km,为珠四拗陷地壳薄化最为强烈的凹陷,发育向洋拆离的断裂系统,是较为典型的壳间韧性流变型拆离断陷。该类断陷发育一系列南倾铲式断层,并向深部逐渐收敛。拆离断层在盆地向陆边界处倾角较大,向洋延伸迅速表现出平缓特征,拆离断层中部与地层基本平行,断层在向洋远端明显上拱(图 3、4)。拆离断层的这种形变与裂陷中晚期超伸展阶段和破裂阶段的伸展拆离和岩浆改造密切相关,伸展拆离使得韧性剪



剖面位置见图 1

图 3 荔湾凹陷地震剖面构造解释

Fig.3 Structural interpretation of seismic section in Liwan Sag



剖面位置见图 1

图 4 鹤山凹陷地震剖面构造解释图

Fig.4 Structural interpretation of seismic section in Heshan Sag

切面迅速抬升, 岩浆侵位进一步加速了韧性层的减薄上拱, 从而改变断面形态和洼陷结构。

受控于早期的快速裂陷和中晚期的强烈伸展薄化及岩浆改造, 荔湾凹陷北侧主拆离面呈现波状起伏, 总体上随莫霍面逐渐向南抬升, 一直延伸至洋盆, 收敛于拆离面的多条拆离断层也随之发生上翘, 控制上盘地层旋转变形, 形成铰链式拆离断陷过程。在裂陷演变过程中, 由于应变迁移和岩浆弥散式分布, 导致荔湾凹陷自陆向洋形成多个“迷你盆地”。在文昌组沉积早期的均衡裂陷阶段, 向陆一侧裂陷作用强, 形成深陷半地堑, 文昌组下段沉积厚度大; 向洋一侧裂陷作用弱, 文昌组下段沉积较薄。文昌组沉积晚期拆离到恩平期断拗阶段, 随着地壳韧性减薄和岩浆侵位, 向洋拆离作用逐步增强, 文昌组上段到恩平组沉积向洋逐步增厚。自文昌组沉积早期到文昌组沉积晚期、恩平组沉积期, 构造作用在“迷你盆地”间有序转换, 沉降沉积中心产生异迁移现象, 凹陷结构自陆向洋从深陷半地堑逐步转变为宽深断陷(图 3)。

受控于与荔湾凹陷相似的构造作用机制, 鹤山凹陷北侧一系列拆离断层向洋延伸, 并且上翘收敛, 使得早期地层陡倾、晚期地层宽缓。与荔湾凹陷裂陷演化的不同之处在于, 鹤山凹陷应变和岩浆侵位相对集中, 使得该区裂陷演化集中在洼陷内部。文昌组沉积早期凹陷为均衡裂陷阶段, 形成由边界断层控制发育的高角度深陷半地堑, 晚期拆离作用到恩平组沉积期断拗阶段, 边界断层持续继承活动, 但此时以横向拆离为主, 产生断拗联控作用, 沉降沉积中心在洼

陷内部向边界断层一侧有序自迁移, 凹陷结构自下向上从深陷半地堑逐步转变为宽深断陷(图 4)。

2.2 壳上岩浆底侵型拆离断陷——靖海凹陷

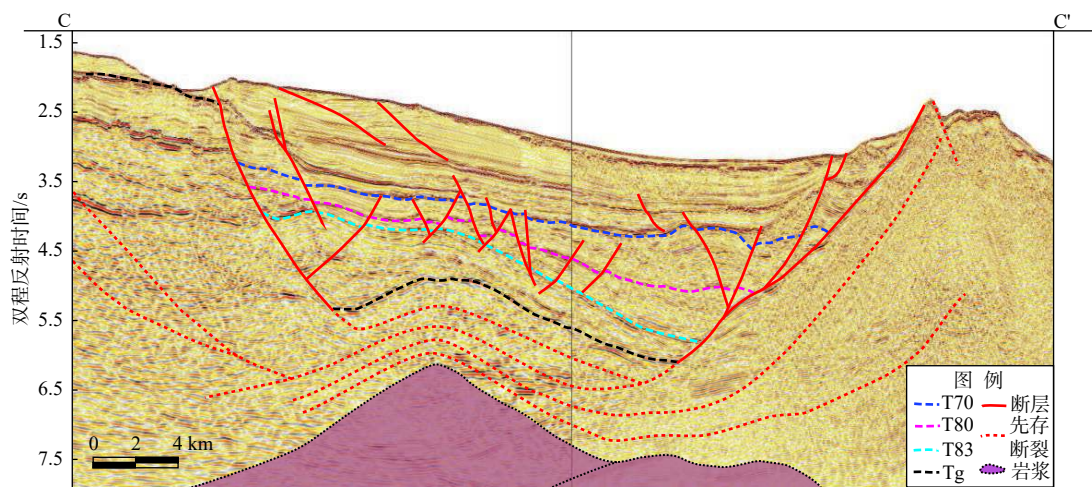
壳上岩浆底侵型拆离断陷岩石圈内部由上、下两层地壳组成, 其内部岩浆呈弥散式分布, 一般位于陆缘伸展薄化近端-细颈化带^[10-11, 17]。在裂陷演化过程中, 早期裂陷下切形成高角度半地堑, 随着断层加深至岩浆侵入带, 岩浆侵位随之加强, 并在裂陷中期持续作用, 催化岩石圈快速拆离薄化甚至熔断, 从而改变凹陷结构样式^[11, 18](图 2b)。

靖海凹陷位于陆缘伸展薄化细颈化带, 北靠东沙隆起, 南临西北次海盆, 地壳厚度约 10~14 km, 略厚于远端带的荔湾、鹤山凹陷, 靖海主洼南侧发育向陆拆离的断裂系统, 同时, 北侧向洋南倾断裂对洼陷有明显调节作用。该洼陷向陆北倾铲式断层逐步收敛于深部, 向洋南倾断裂角度较陡, 向下止于南侧的拆离断层面, 地壳内部发育的岩浆体在中期下切断层的作用活动加强, 进而改变拆离断层形态和洼陷结构。

在向洋下切断裂、向陆拆离断裂及岩浆侵位的影响下, 靖海凹陷向洋倾斜断裂在文昌组下段沉积期活动较强, 以下切裂陷作用为主, 控制北侧深陷沉降中心, 进入文昌组上段沉积期, 向陆北倾断裂向下延伸至岩浆活跃带, 岩浆上涌侵位, 凹陷中文昌组下段遭受隆升剥蚀, 南侧断裂向北拆离滑动, 在两侧伸展薄化形成新的沉积沉降中心。因此, 文昌组上、下段沉积期之间的断裂活动迁移、岩浆底

侵作用导致洼陷结构形成“跷跷板”效应,其内部沉积沉降中心向南部拆离断层一侧迁移,断陷结构由

北侧下切断层控制的较深半地堑转变为南侧拆离断层控制的宽缓断陷(图 5)。



剖面位置见图 1

图 5 靖海凹陷地震剖面构造解释图

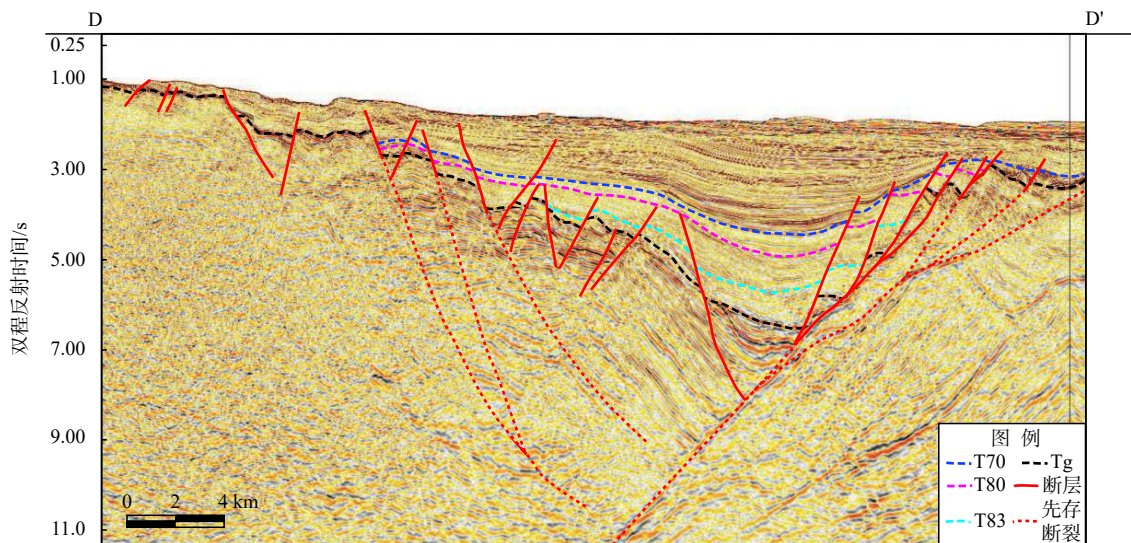
Fig.5 Structural interpretation of seismic section in Jinghai Sag

2.3 壳上先存拼合型拆离断陷——揭阳、兴宁凹陷

壳上先存拼合型拆离断陷的岩石圈结构与壳上岩浆底侵型拆离断陷相似,内部由上、下两层地壳组成,不同之处在于该类断陷上地壳内发育一系列逆冲先存断裂,构成地壳伸展裂陷的薄弱带,一般位于陆缘伸展薄化细颈化-近端带^[10-11, 17]。在区域应力场影响下,上地壳内不同期次的先存断裂差异活化,影响并控制凹陷的裂陷演化。裂陷早期,地壳沿先存断裂伸展破碎形成高角度半地堑,随着断陷加深至地壳内先存断裂面的平缓部位,控凹断

裂开始水平拆离、伸展裂陷,形成在先存断裂体系控制下的断陷结构(图 2c)。

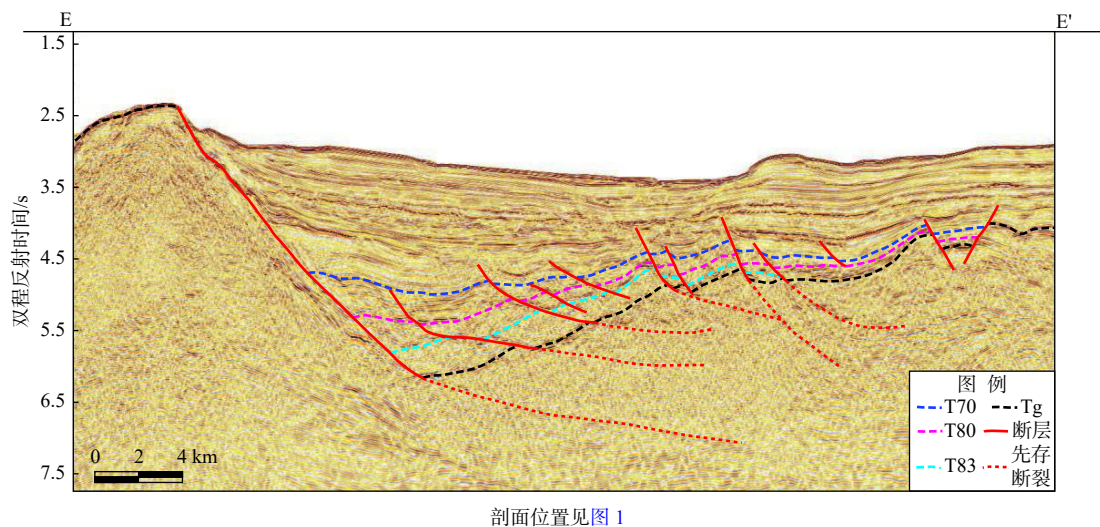
揭阳、兴宁凹陷位于陆缘伸展薄化细颈化带,紧邻近端带,北靠东沙隆起,南部为陆缘远端带,地壳厚度约 14~18 km,为珠四坳陷内地壳相对较厚的区域。控凹断裂系统均向陆倾斜发育,主断裂沿先存断裂薄弱面活动,控制洼陷的主沉降区。揭阳凹陷的控凹断裂系统呈向陆北倾、南断北超的格局,主沉降区靠近南侧,北侧缓坡延伸至东沙隆起;兴宁凹陷控凹断裂系统则为向陆东倾、西断东超的格局,主沉降区靠近西侧,东侧缓坡延伸至东沙隆起(图 6、7)。



剖面位置见图 1

图 6 揭阳凹陷地震剖面构造解释图

Fig.6 Structural interpretation of seismic section in Jieyang Sag



剖面位置见图 1

图 7 兴宁凹陷地震剖面构造解释

Fig.7 Structural interpretation of seismic section in Xingning Sag

在地壳内发育的先存逆冲断裂系统差异活化的影响下, 揭阳凹陷主控断裂在整个裂陷期沿着先存断裂陡倾段持续下切, 但由于该凹陷地壳相对较厚(16~18 km), 且该区裂陷下切强度不够, 控凹断裂尚不能完全下切至先存逆冲断裂主体的平缓部位。因此, 该凹陷在裂陷中晚期超伸展阶段和破裂阶段的伸展拆离作用相对较弱, 断陷的形成和演化以下切裂陷作用为主, 不同演化阶段沉降中心相对稳定, 垂向上沉积充填持续叠加, 形成稳定发育的半地堑结构(图 6)。兴宁凹陷的形成演化过程与揭阳凹陷较为类似, 整个裂陷演化以下切断陷为主, 不同之处在于, 该凹陷先存逆冲断裂的主体部位发育浅, 在裂陷演化后期, 先存断裂陡倾部位活化下切, 裂陷至先存断裂平缓部位, 产生一定程度的伸展拆离作用, 局部地区在裂陷晚期形成又断又拗的格局, 但因为凹陷整体以下切裂陷作用为主, 沉积沉降中心垂向叠加, 形成较为稳定发育的半地堑结构(图 7)。

3 不同断陷结构对烃源岩发育的控制

陆缘岩石圈在古近纪经历了伸展、薄化、破裂等过程, 珠四坳陷演化分为均衡裂陷幕、拆离裂陷幕和断拗幕 3 个阶段, 各凹陷烃源岩时空分布差异较大^[15,19-22]。文昌组沉积早期的均衡裂陷幕地壳伸展、薄化不明显, 主要以高角度断层下切裂陷为主, 形成一系列由陡倾断层控制的箕状半地堑断陷。该时期隆拗相间、洼陷分隔性强, 断层下切深度较大的断陷可容空间大, 易于形成欠补偿环境, 发育

好的烃源岩; 而下切深度较小的断陷, 在周边物源供给的影响下, 易于发育补偿-过补偿沉积, 不适于优质烃源岩发育。文昌组沉积晚期的拆离裂陷幕, 伸展作用加强、地壳薄化, 控凹断裂下切到韧性流变层, 形成伸展拆离面, 早期窄半地堑演变为由拆离断层控制的宽断陷。拆离作用越强, 断陷水平伸展越大, 沉降作用越强, 从而形成宽且深的可容空间, 此时断陷分割性减弱、物源供给减弱, 利于优质烃源岩大范围展布, 拆离作用的强弱, 控制了该时期优质烃源岩分布。恩平组沉积期断拗幕, 脆性上地壳完全被断开, 断层活动明显减弱, 沉积地层以上超充填结构为特征, 如果韧性上地壳继续发生强烈的伸展薄化, 也会具有明显的地表沉降、发育半深湖沉积环境的条件。不同凹陷在这 3 个阶段响应程度不同, 控制了不同断陷烃源岩的发育差异。

由于珠四坳陷 5 个凹陷均接受东沙隆起及顺鹤隆起供源, 文昌组沉积期物源相对充沛, 且在目前资料及研究程度下, 物源量的厘定难以开展, 此次研究重点从沉积环境、古地貌条件及构造强度的可容空间大小入手, 进行定量表征。目前与可容空间有直接关系的是沉积速率, 运用 2Dmove 软件及去压实技术恢复各个洼陷沉降速率和伸展速率统计^[19-20], 对各凹陷控凹断裂形态学特征和活动性强度进行定量表征, 以论证 3 种断陷构造机制形成的断陷对烃源岩发育的控制作用。

3.1 壳间韧性流变型拆离断陷对烃源岩发育的控制

壳间韧性流变型拆离断陷在整个伸展裂陷阶

段,断陷和拆离作用强烈,在文昌组沉积早期的均衡裂陷阶段,高角度断层下切深度大,裂陷作用强,形成深陷半地堑,利于中深湖相泥岩发育;在文昌组沉积晚期的拆离裂陷阶段,控凹断层下切至流变层,拆离作用加剧,形成宽深断陷结构,易于形成相对广泛分布的优质烃源岩(图 2)。从凹陷的伸展和沉降速率来看,该类结构的凹陷断陷和沉降作用强烈,荔湾凹陷文昌组沉积期沉降速率为 371 m/Ma,伸展速率为 425 m/Ma,鹤山凹陷文昌组沉积期沉降速率为 420 m/Ma,伸展速率为 529 m/Ma(表 1),反映出文昌组沉积早期强裂陷、晚期强拆离的构造作用,由此形成“下深上阔”的中深湖相烃源岩发育的双层结构背景,而沉降中心从早到晚沿拆离方向的迁移,为中深湖烃源岩的广泛发育提供优越条件。

表 1 珠四坳陷不同凹陷伸展沉降速率统计
Table 1 Statistics of extensional subsidence rates in different sags of Zhushi Depression

凹陷名称	凹陷结构	伸展速率/(m/Ma)	沉降速率/(m/Ma)
荔湾凹陷	壳间韧性流变型	425	371
鹤山凹陷	壳间韧性流变型	529	420
靖海凹陷	壳上岩浆底侵型	330	322
兴宁凹陷	壳上先存拼合型	193	218
揭阳凹陷	壳上先存拼合型	150	197

从凹陷文昌组厚度及分布范围也能看出,壳间韧性流变型拆离断陷强烈的断陷和拆离作用形成宽深的凹陷结构,从而使得烃源岩层系沉积厚、展布广,如荔湾凹陷文昌组厚度>3 500 m,展布范围达 6 300 km²;鹤山凹陷文昌组厚度约 4 000 m,展布范围约 3 800 km²(图 8)。壳间韧性流变型拆离断

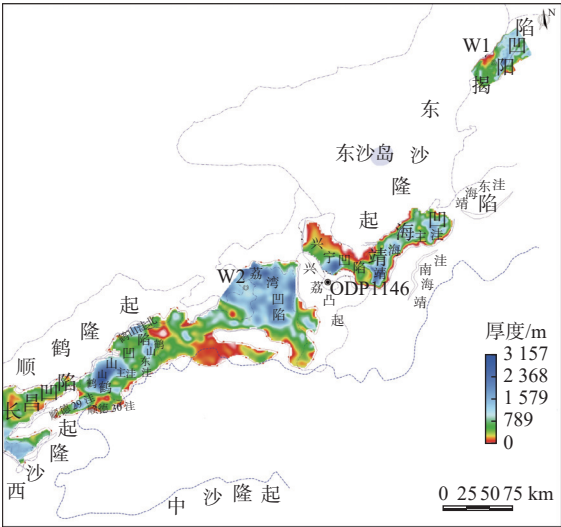


图 8 珠四坳陷不同凹陷文昌组厚度及分布范围

Fig.8 Thickness and distribution range of Wenchang Formation in different sags of Zhushi Depression

陷从演化过程和结构模式上控制形成较为宽深的断陷,为优质烃源岩的形成提供了良好的空间条件。

3.2 壳上岩浆底侵型拆离断陷对烃源岩发育的控制

壳上岩浆底侵型拆离断陷在文昌组沉积早期的均衡裂陷阶段,高角度断层下切强度较大,裂陷作用较为强烈,形成的半地堑有较大深度,对于物源供给较弱的洼陷,能够发育一定程度的中深湖相泥;在文昌组沉积晚期的拆离裂陷阶段,控凹断层持续下切至岩浆侵入带,一方面岩浆底侵限制了断层下切,另一方面岩浆流体的润滑作用加剧了断层的水平拆离,形成相对宽深的断陷结构,提供了中深湖相泥岩沉积的可容空间(图 2)。

从凹陷的伸展和沉降速率来看,该类结构凹陷具有较强的断陷和沉降作用,靖海凹陷文昌组沉积期沉降速率为 322 m/Ma,伸展速率为 330 m/Ma(表 1),小于荔湾、鹤山凹陷的构造作用强度,反映出文昌组沉积早期具有较强的断陷作用,晚期具有较强的拆离作用,早晚两期均提供了一定程度的欠补偿沉积空间。

从凹陷文昌组厚度及分布范围也能看出,壳上岩浆底侵型拆离断陷具有相对宽深的凹陷结构,从而使得烃源岩层系具有一定的沉积厚度和分布广度,受到上、下文昌组沉积期之间的断裂活动迁移、岩浆底侵作用影响,凹陷的沉降中心具有明显的迁移效应,从而使得烃源岩分布范围变广,如靖海凹陷文昌组厚度约 3 000 m,展布范围约 3 900 km²,其展布范围甚至超过鹤山凹陷(图 8)。

3.3 壳上先存拼合型拆离断陷对烃源岩发育的控制

壳上先存拼合型拆离断陷的先存断裂体系规模和发育深浅控制了凹陷的伸展裂陷演化过程,在整个伸展裂陷阶段,控凹断层在相对高角度先存断裂的限制下活动,形成小型高角度半地堑,随着断陷加深至地壳内先存断裂面的平缓部位,形成在先存断裂水平伸活化的断陷结构,由于残留的先存断裂体系通常发育在上地壳表层,断陷在其限制下难以深陷和伸展,因而可容空间和欠补偿环境较为有限(图 2)。

从凹陷的伸展和沉降速率来看,该类结构凹陷以断陷作用为主。兴宁凹陷文昌组沉积期的沉降

速率为 218 m/Ma, 伸展速率为 193 m/Ma; 揭阳凹陷文昌组沉积期的沉降速率为 197 m/Ma, 伸展速率为 150 m/Ma(表 1)。2 个凹陷沉降速率较为接近, 但伸展速率差别较大, 主要在于兴宁凹陷边界断层能够下切至先存断裂的水平部位, 从而产生一定的拆离作用, 使得凹陷的水平伸展加强。整体而言, 该类凹陷伸展、沉降较前 2 类凹陷明显更弱, 在一定程度上限制了烃源岩发育所需的欠补偿环境和可容空间。

从凹陷文昌组厚度及分布范围也能看出, 壳上先存拼合型拆离断陷形成相对稳定的叠合性结构, 使得烃源岩沉积厚度较大, 但分布范围有限, 明显不及沉降中心迁移的凹陷, 如兴宁凹陷文昌组厚度约 2 500 m, 展布范围约 1 900 km²; 揭阳凹陷文昌组厚度约 2 400 m, 展布范围约 2 200 km²(图 8)。其文昌组展布范围远不及荔湾、鹤山、靖海等凹陷, 这使烃源岩在空间上的发育受到极大制约。

从珠四坳陷现有的钻井资料来看, W1 井(图 1)位于揭阳凹陷, 录井未见油气显示, 但砂岩抽提烃见到油气显示, 地化分析珠海组砂岩见到成熟烃的运移痕迹, 含一定丰度的 C₃₀4-甲基甾烷, 镜质体反射率 R_o 约为 0.8%, 推测油气可能来自揭阳凹陷文昌组烃源岩。从前述凹陷结构分析来看, 揭阳凹陷并非是具备最好烃源岩发育背景的凹陷, 但钻井已揭示该凹陷生烃, 由此可以推测, 烃源岩形成条件更为优越的荔湾、鹤山、靖海等凹陷, 可能蕴含较大的生烃潜力, 有望成为未来油气勘探的重要领域。

4 结论

(1) 南海北部陆缘超深水珠四坳陷不同凹陷所受差异断陷机制控制了不同凹陷地质结构特征存在明显差异。荔湾、鹤山凹陷为壳间韧性流变型结构, 受强烈的断陷、拆离双重作用联合控制; 靖海凹陷为壳上岩浆底侵型结构, 在较强的断陷、拆离作用下, 受到岩浆底侵的制约; 兴宁、揭阳凹陷为壳上先存拼合型结构, 在先存断裂体系限制下, 以较强断陷和弱拆离构造作用为主。

(2) 南海北部陆缘超深水珠四坳陷不同凹陷地质结构特征控制着各个凹陷沉积充填及可容空间增长存在明显差异。荔湾、鹤山凹陷在强烈的断陷和拆离作用下, 形成下深上宽的凹陷结构, 沉降中心沿拆离断裂迁移, 易于沉积厚度大、分布广的中深湖泥岩; 靖海凹陷在岩浆作用下, 限制断层垂

向下切、加剧断层水平拆离, 沉降中心也呈现迁移的特点, 形成相对宽深的凹陷结构, 提供了中深湖相泥岩沉积的可容空间; 兴宁、揭阳凹陷断陷较强、拆离较弱, 发育相对稳定的沉降中心, 中深湖相泥岩发育但分布范围有限。

(3) 不同断陷形成机制控制形成的断陷结构可发育优质烃源岩类型差异较大。具有壳间韧性流变型结构的荔湾、鹤山凹陷及壳上岩浆底侵型结构的靖海凹陷, 与壳上先存拼合型结构的兴宁、揭阳凹陷相比, 具备更利于中深湖相烃源岩发育的构造背景, 而揭阳凹陷已钻井揭示其生烃能力, 推测荔湾、鹤山、靖海等凹陷可能蕴含更大的生烃潜力, 是未来油气勘探值得探索的重要领域。限于目前的勘探和资料程度, 仅对不同类型断陷发育较大规模烃源岩的可能性进行了探讨, 相信随着勘探程度的提高, 未来在古湖盆演化、可容空间、地震-沉积相等方面的研究基础上, 将得出关于珠四坳陷不同凹陷优质烃源岩发育、分布等更深入的结论。

参考文献:

- [1] 龚再升. 中国近海大油气田[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
- [2] 朱伟林, 郑金云. 南海北部深水油气新认识[J]. 科技导报, 2020, 38(18): 89-98.
- [3] 吴婷婷, 张丽丽, 吴哲, 等. 珠江口盆地前新生代先存断裂特征及动力背景: 以惠州凹陷和番禺4洼为例[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(6): 54-62.
- [4] PERON-PINVIDIC G, MANATSCHAL G. The final rifting evolution at deep magma-poor passive margins from Iberia-Newfoundland: a new point of view[J]. International Journal of Earth Sciences, 2009, 98(7): 1581-1597.
- [5] MOHN G, MANATSCHAL G, BELTRANDO M, et al. Necking of continental crust in magma-poor rifted margins: evidence from the fossil Alpine Tethys margins[J]. Tectonics, 2012, 31(1): 1-28.
- [6] SUTRA E, MANATSCHAL G, MOHO G, et al. Quantification and restoration of extensional deformation along the Western Iberia and Newfoundland rifted margins[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2013, 14(8): 2575-2597.
- [7] 贾培蒙, 张向涛, 陈维涛, 等. 珠江口盆地惠州凹陷惠州21古潜山的形成演化及其对深层油气成藏的控制[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(12): 27-37.
- [8] 庞雄, 施和生, 朱明, 等. 再论白云深水区油气勘探前景[J]. 中国海上油气, 2014, 26(3): 23-29.
- [9] 朱筱敏, 葛家旺, 赵宏超, 等. 陆架边缘三角洲研究进展及实例分析[J]. 沉积学报, 2017, 35(5): 945-955.
- [10] 庞雄, 任建业, 郑金云, 等. 陆缘地壳强烈拆离薄化作用下的油气地质特征: 以南海北部陆缘深水区白云凹陷为例[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(1): 27-39.
- [11] 庞雄, 郑金云, 梅廉夫, 等. 先存俯冲陆缘背景下珠江口盆地

- 断陷结构的多样性[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(4): 1-11.
- [12] 任建业, 庞雄, 雷超, 等. 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[J]. 地质前缘, 2015, 22(1): 102-114.
- [13] 孙珍, 刘思青, 庞雄, 等. 被动大陆边缘伸展-破裂过程研究进展[J]. 热带海洋学报, 2016, 35(1): 1-16.
- [14] 任建业, 庞雄, 于鹏, 等. 南海北部陆缘深水-超深水盆地成因机制分析[J]. 地球物理学报, 2018, 61(12): 4901-4920.
- [15] 庞雄, 陈长民, 彭大钧, 等. 南海北部白云深水区之基础地质[J]. 中国海上油气, 2008, 20(4): 215-222.
- [16] 米立军, 张向涛, 庞雄, 等. 珠江口盆地形成机制与油气地质[J]. 石油学报, 2019, 40(s1): 1-10.
- [17] 李洪博, 郑金云, 庞雄, 等. 南海北部陆缘差异拆离作用结构样式与控制因素: 以珠江口盆地白云-荔湾深水区为例[J]. 中国海上油气, 2020, 32(4): 24-35.
- [18] 施和生, 杜家元, 梅廉夫, 等. 珠江口盆地惠州运动及其意义[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(3): 1-15.
- [19] 梁杰, 刘培, 陈维涛, 等. 适用于改造型洼陷的烃源规模识别技术: 以西江主洼为例[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(6): 78-87.
- [20] 刘培, 蒋有录, 刘华, 等. 渤海湾盆地沾化凹陷断层活动与新近系油气成藏关系[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(3): 541-547.
- [21] 张功成. 南海北部陆坡深水区构造演化及其特征[J]. 石油学报, 2010, 31(4): 528-533.
- [22] 赵中贤, 周蒂, 廖杰, 等. 珠江口盆地陆架区岩石圈伸展模拟及裂后沉降分析[J]. 地质学报, 2010, 84(8): 1135-1145.

Geological structure of Zhusi Depression in ultra-deep water area on the continental margin of the northern South China Sea and its control on the development of source rocks

TAO Wenfang, LI Hongbo, ZHENG Jinyun, ZHANG Qinglin, LI Yuanping, JIA Zhaoyang, DONG Ming

(Shenzhen Branch of CNOOC (China) Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: The overall water depth of Zhusi Depression in the Pearl River Mouth Basin is more than 1 500 m with very low degree of the exploration. The oil and gas revealed by drilling has shown the existence of source rocks in this area, and seismic data present a vast and thick source rocks in the Paleogene strata. As a new oil and gas exploration area marching towards ultra-deep water in the north of the South China Sea, we analyzed the advantages and disadvantages of petroleum geological conditions in each depression. Based on the knowledge of the formation mechanism of six types of fault depressions in the Pearl River Mouth Basin, Zhusi Depression were divided into three representative fault depression structural styles: inter crustal ductile rheological type of Atlantic magma-poor continental margin, supracrustal magmatic underplating type of Atlantic magma-rich continental margin, and pre-existing splicing type of supracrustal magmatic on Atlantic magma-poor continental margin. Using the 2Dmove software and decompaction technology, the subsidence rate and extension rate of each depression were restored. Combining a large number of seismic profiles, the geological structure of Zhusi Depression and its impact on the development of source rocks were studied in depth, and the differences of source rock development background under different fault depression structures were clarified. Results show that the development conditions of source rocks in Liwan and Heshan depressions are superior, which can be regarded as an important exploration breakthrough point in the ultra-deep water area in the north of the South China Sea.

Key words: northern South China Sea; continental margin; Pearl River Mouth Basin; Zhusi Depression; depression structure; detachment fault; source rock