

复合陆缘盆地成盆机制及其控藏作用

——以中国南海北部珠江口盆地为例

徐长贵¹,高阳东²,刘军^{3,4},彭光荣^{3,4},李洪博^{3,4},邱欣卫^{3,4},丁琳^{3,4},
龙祖烈^{3,4},郑金云^{3,4},姜大朋^{3,4}

[1. 中国海洋石油有限公司,北京 100010;2. 中海石油(中国)有限公司勘探开发部,北京 100010;3. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司,广东 深圳 518054;4. 中海石油深海开发有限公司,广东 深圳 518054]

摘要: 中国南海被动陆缘的裂谷盆地研究近年来取得了重要进展,但至今仍没有就盆地属性形成统一认识,缺乏对该类盆地的形成机制及其控藏作用的详细解剖。基于连片的三维地震数据、重磁资料以及超过200口钻遇基底的钻井资料,首次提出珠江口盆地中生代弧-盆体系与新生代洋-陆体系在动力上转换、空间上叠合、时间上接续的复合陆缘盆地,并根据中生代基底岩浆弧的岩性差异,及其内部先存断裂的几何学和运动学特征对新生代盆地影响程度,将中生代岩浆弧划分为后弧-内弧-前弧“三元”结构。复合陆缘盆地属性及其基底弧结构特征对盆地深部油气成藏有明显控制作用,主要表现在:①中生代岩浆弧的内弧带先存逆断层的发育密度和倾角更大,利于新生代盆地“反转深断”形成大型宽且深的断陷湖盆,其最大湖盆面积可达3 590 km²,有利于形成大面积分布的优质烃源岩;②复合陆缘盆地基底岩性的东西差异控制了珠江口盆地深层成岩环境的东西差异特征——“东部贫钾、西部富钾”,同时发现富钾流体抑制高岭石沉淀和贫钾流体抑制伊利石转化的协同保渗机制,有效指导了深部储层预测;③复合陆缘盆地深部复杂流体背景下表现为“超临界CO₂促运、钙砂薄泥交互联封”的油气高效保存富集机制。提出的复合陆缘盆地概念丰富了大陆边缘盆地类型,对在全球类似盆地内开展成盆机制及其深部研究提供重要参考价值。

关键词: 成烃机制;成储机制;油气富集机制;成盆机制;复合陆缘盆地;珠江口盆地;中国南海

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

Formation mechanisms of composite continental-margin basins and their control of hydrocarbon accumulation: A case study of the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea

XU Changgui¹, GAO Yangdong², LIU Jun^{3,4}, PENG Guangrong^{3,4}, LI Hongbo^{3,4}, QIU Xinwei^{3,4},
DING Lin^{3,4}, LONG Zulie^{3,4}, ZHENG Jinyun^{3,4}, JIANG Dapeng^{3,4}[1. CNOOC, Beijing 100010, China; 2. Exploration & Development Department of CNOOC (China) Co., Ltd., Beijing 100010, China;
3. Shenzhen Branch of CNOOC (China) Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518054, China; 4. Deepwater Development Co., Ltd., CNOOC, Shenzhen, Guangdong 518054, China]

Abstract: In recent years, significant advances have been achieved in research on rift basins along the passive continental margin of the South China Sea. However, consensus on the nature of these basins is yet to be reached, and there is a lack of in-depth studies on the formation mechanisms of these basins and their control of hydrocarbon accumulation. Using 3D seismic data, gravity and magnetic data, and drilling data from over 200 wells encountering basement, we examine the Pearl River Mouth Basin (PRMB) along the passive continental margin of the South China Sea. Specifically, we examine the lithological differences of magmatic arcs in the Mesozoic basement of the basin, as well as the geometric and kinematic characteristics of pre-existing faults within the arcs. Accordingly, we propose for the first time that the PRMB represents a composite continental-margin basin characterized by the dynamic transition,

收稿日期:2025-02-07;修回日期:2025-05-07。

第一作者简介:徐长贵(1971—),男,博士、教授级高级工程师,海洋油气勘探开发管理和综合研究。E-mail: xuchg@cnooc.com.cn。

基金项目:中国海洋石油集团有限公司“十四五”重大科技项目(KJGG2022-0403);中国海洋石油有限公司科技项目(SCKY-2024-SZ-01)。

spatial superposition, and temporal succession between the Mesozoic arc-basin system and the Cenozoic ocean-continent system. The Mesozoic magmatic arcs in the PRMB are identified as a ternary structure consisting of back-, inner-, and fore-arc zones. The nature of the PRMB as a composite continental-margin basin and the architectural characteristics of the basement magmatic arcs exert significant controlling effects on the deep hydrocarbon accumulation in the basin. Specifically, pre-existing reverse faults in the inner-arc zone of the Mesozoic magmatic arcs feature higher density and larger dip angles, facilitating the formation of inverted and deep-seated faults in the Cenozoic basins. This contributes to the formation of large-scale, wide, deep faulted lacustrine basins, with the largest measuring up to 3 590 km² in area, creating favorable conditions for the generation of extensive, high-quality source rocks. The east-west lithological differences in the basement of the PRMB govern the east-west differences in deep diagenetic environment of the basin, that is, potassium-poor and potassium-rich fluids occur in the eastern and western parts of the basin, respectively. The potassium-rich fluids inhibit the kaolinite precipitation, while the potassium-poor fluids restrain the illite transformation, jointly forming the synergetic permeability preservation mechanism. This finding can effectively guide the mapping of deep reservoirs. In the context of complex deep fluid systems, the PRMB shows an efficient hydrocarbon preservation and enrichment mechanism characterized by supercritical CO₂-facilitated transport and joint sealing by alternating calcareous sandstones and thin-bedded mudstones. The concept of composite continental-margin basins introduced in this study enriches the types of continental-margin basins, providing a significant reference for in-depth research on the formation mechanisms and deep hydrocarbon accumulation of similar basins worldwide.

Key words: hydrocarbon generation mechanism, reservoir formation mechanism, hydrocarbon enrichment mechanism, basin-forming mechanism, composite continental-margin basin, Pearl River Mouth Basin (PRMB), South China Sea

引用格式:徐长贵,高阳东,刘军,等.复合陆缘盆地成盆机制及其控藏作用——以中国南海北部珠江口盆地为例[J].石油与天然气地质,2025,46(3):719-739. DOI:10.11743/ogg20250303.

XU Changgui, GAO Yangdong, LIU Jun, et al. Formation mechanisms of composite continental-margin basins and their control of hydrocarbon accumulation: A case study of the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea [J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(3): 719-739. DOI: 10.11743/ogg20250303.

大陆边缘的形成与演化一直是地球科学研究的重要领域,特别是被动大陆边缘因其与大型含油气盆地的紧密关联,吸引了广泛关注。经典的被动大陆边缘的形成模型源于对大西洋陆缘的研究,划分为“富岩浆型”和“贫岩浆型”两端元模式^[1]。然而,随着技术的进步和数据的积累,发现中国南海北部大陆边缘与这两端元模式有显著差异^[2],既不同于广泛发育的与地幔柱(热点)假说相关的富镁岩浆岩的“富岩浆型”陆缘,也未发现与“贫岩浆型”陆缘相关的地幔剥露证据,而是表现为发育较多的壳源岩浆岩^[3],孙珍等把它称为“多岩浆型”陆缘^[4],考虑到这类陆缘上发育的裂谷盆地多与周缘板块俯冲-回撤等动力学过程密不可分,有学者称之为“板缘型”裂谷边缘^[5]。位于南海北部陆缘的珠江口盆地中生代基底已有众多探井钻遇,其岩石组成与元素地球化学特征揭示其与古太平洋板块向欧亚板块俯冲作用密切相关^[6-11]。然而,目前关于中生代板块俯冲与新生代被动陆缘之间的关联机制仍不清楚,特别是中生代俯冲遗留的断裂系统、岩性及其非

均质性如何影响新生代陆缘伸展、减薄及最终破裂的过程,尚缺乏系统研究。

珠江口“板缘型”裂谷边缘岩浆活动广泛发育,一方面促使盆地呈高热流特征,另一方面与岩浆伴生有大量CO₂,造就了深部成岩环境与烃类流体活动的多变性,加剧了盆地深部成烃、成储与成藏作用的复杂性。自2020年以来,珠江口盆地深层屡获重大勘探突破^[12-17],目前盆地深部的古近系文昌组与恩平组已成为该区域最重要的勘探目标。成功的勘探实践表明,深度超过4 500 m的深层依然发育有达西级优质储层,并且连续发现亿吨级油田,因此亟需总结并系统梳理这类盆地成烃、成储与成藏机制,指导下步勘探。

本文利用大量三维地震、钻井和分析化验等数据,系统探讨南海北部陆缘珠江口盆地的前裂陷期构造、裂陷期变形过程及其与区域地壳结构的关系,研究中生代板块俯冲作用如何塑造新生代被动陆缘的形成,并揭示富烃凹陷发育机制;通过数值模拟和物理模拟等手段,阐明高热流和富CO₂背景下,深部甜点储层发

育和油气大规模高效富集的机制,为被动大陆边缘的油气成藏机制提供新的科学依据。

1 南海北部复合陆缘:从中生代主动陆缘到新生代被动陆缘

1.1 中生代主动陆缘结构

Taylor 和 Hayes 早在 1983 年就利用磁异常数据、自由空气重力异常数据和有限的地震反射资料对华南地区中生代构造演化进行了推测性研究,提出南海北部发育中侏罗世—早白垩世的安第斯型陆缘弧,并在有限的资料基础上圈定了其大致范围(其北部边界如图 1 所示)。后续学者基于华南陆缘与海域广泛分布的花岗岩的地球化学与同位素分析,进一步明确了南海北部中生代主动陆缘背景^[9,18-23],其陆缘弧特征可与南美的安第斯岩浆弧类比^[24]。

1.1.1 珠江口盆地基底属性和先存构造特征

关于珠江口盆地裂陷结构与形成演化的研究,早期更多聚焦新生代以来的构造动力学过程,而随着盆地基底钻井资料与高精度三维地震资料的丰富,越来越多的证据表明,与中生代主动陆缘伴生的盆地基底的非均质性与先存构造的发育,对新生代盆地的形成具有重要的控制作用^[25-26]。盆地 200 余口基底钻井的岩石学分析结果表明,珠江口盆地基底岩性主要包括普通花岗岩、二长花岗岩和闪长岩在内的侵入岩、沉积岩以及零星分布的火山岩与变质岩(图 1,图 2a)。基底连片分布的沉积岩主要分布在潮汕坳陷,研究普遍认为其为中生代弧前盆地沉积,其中 LF35-A-a 井钻遇了中侏罗世—晚白垩世地层(图 3)。基底花岗岩的 U-Pb 同位素定年测试结果统计显示,侵入时间主要为晚侏罗世(J_3)—早白垩世(K_1),其中发育 155 ~ 150, 135 ~ 130 和 120 ~ 110 Ma 这 3 个年龄峰值(图 2b)。花岗岩的 Rb-(Nb+Y) 同位素年龄判别图版指示其形成于岩浆弧背景(图 2c)。盆地基底岩石学、沉积学、年代学和地球化学信息夯实了南海北部新生代裂陷前的中生代主动陆缘背景,并构建出完整的弧前盆地—岩浆弧—弧后盆地体系(图 3)。

珠江口盆地基底内部发育大量不同规模的先存逆冲断层,走向主要包括 NE—NEE 向和 WE—NNW 向 2 组(图 1)。断层规模可以分为 3 个级别,其中不同级别断层对新生代裂陷起着不同的控制作用。一级断裂为一系列 NE 走向的大型先存逆断层(图 4 中红色断裂),断层规模大、切割深,呈现出背冲构造样式,新生代时

期普遍发生构造反转并控制了珠一坳陷、珠二坳陷西部和珠三坳陷的南、北边界。二级断裂主要是 WE—NNW 向先存逆断层(图 1 中蓝色断裂),断层根部通常收敛于一级断层断面之上,主要发育在盆地内部低凸起边缘或内部。其中,发育在坳陷内部的二级断裂的反转,加强了坳陷内部隆凹格局的形成,而发育在低凸起内(如番禺低隆起)的二级断裂的反转则控制了隆起上残洼的发育。三级断层在盆地内部广泛发育(图 1 中黑色断裂),这些先存断裂的走向既有 NE—NEE 向,也有 WE—NNW 向,断层规模较小、切割浅、反转程度低,对新生代盆地发育影响较小。

1.1.2 岩浆弧的结构特征和分带

中生代陆缘岩浆弧的结构表现出显著的分段与分带特征,具体表现为阳江—统和惠西—北卫滩两条大型 NW 向隐伏走滑断层将岩浆弧沿走向分为东、西和中 3 段,以一级断裂为界,背冲断裂夹持部分为内弧带,内弧带靠近弧前盆地一侧为前弧带,靠弧后区一侧为后弧带,这一分带模式可称为“岩浆弧背冲分带模式”(图 1)。岩浆弧不同区带基底先存逆冲断层的规模、强度、密度和倾角等特征具有显著差异,其中内弧带先存断层发育最密集,规模与强度最大,前弧带次之,后弧带由于远离俯冲边界先存断层稀疏且规模小,同时内弧带的先存断裂倾角最大,前弧带次之,后弧带最小(图 4)。通过统计岩浆弧不同带上新世代洼陷的厚度以及控洼断裂活动速率发现内弧带洼陷发育规模最大,前弧带洼陷次之,而后弧带以残余洼陷发育为主,规模明显小于其他两带(图 4)。

1.2 新生代被动陆缘结构

1.2.1 珠江口盆地地壳结构与空间减薄特征

利用深二维地震反射资料(时间 > 10 s)对地壳底部的莫霍面进行成像的方法已被广泛应用于全球被动陆缘的地壳结构研究中。迄今为止,珠江口盆地布设有近 400 条长电缆深二维地震反射测线,可以有效约束盆地的壳—幔边界和地壳结构。通过对莫霍面与结晶基底顶界面(T_g)进行闭合追踪解释,计算出 T_g 与莫霍面之间的时间差(地壳的时间域厚度)。在平均地震速度约为 6.5 km/s 的假设前提下^[27],编制了珠江口盆地地壳厚度图(图 5a)。

从地壳厚度图可以看出,隆起区(顺鹤隆起、番禺低隆起和东沙隆起)有较大的地壳厚度,最大地壳厚度位于北部隆起带和东沙隆起,厚度近 30.0 km。盆地

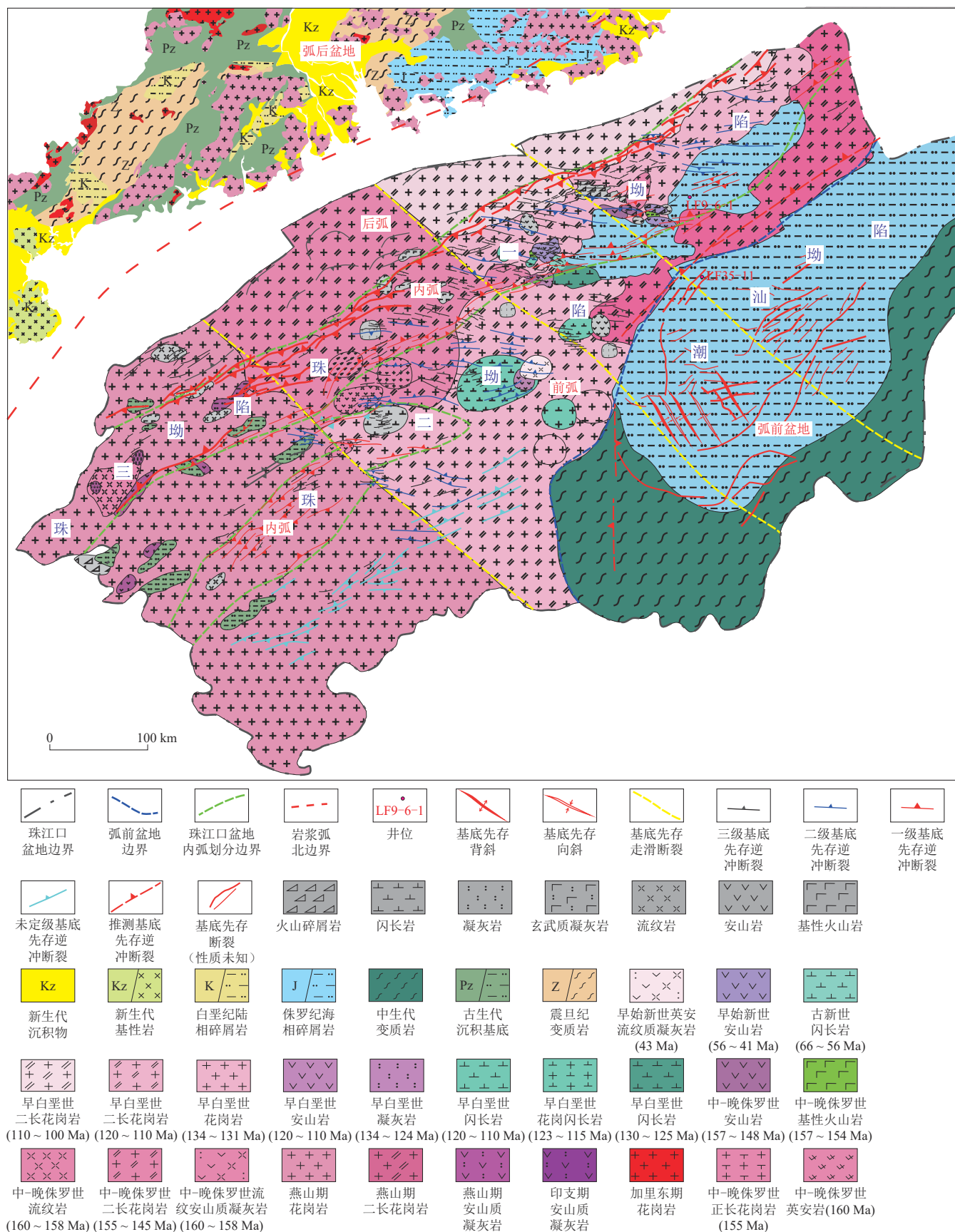


图1 珠江口盆地基底地质概况及中生代陆缘岩浆弧结构分带平面分布

Fig. 1 Geological overview of the basement and structural zoning of the Mesozoic continental-margin magmatic arcs in the PRMB

[岩浆弧北边界定位来自 Taylor 和 Hayes(1983)。]

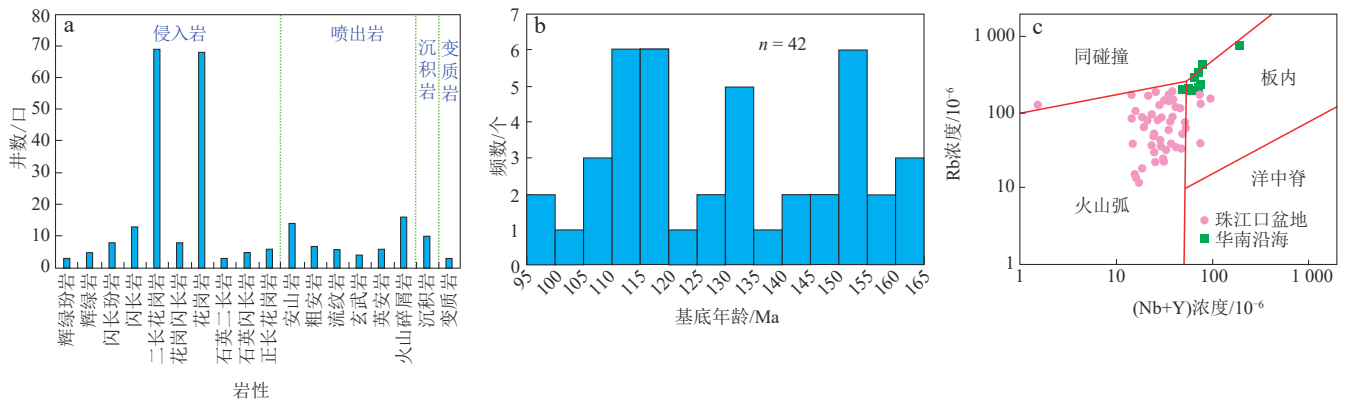


图2 珠江口盆地基底地质概况

Fig. 2 Basement overview of the PRMB

a. 钻遇不同岩性的钻井数量柱状图; b. 花岗岩锆石 U-Pb 同位素定年频数分布直方图; c. 花岗岩发育的大地构造环境划分图版

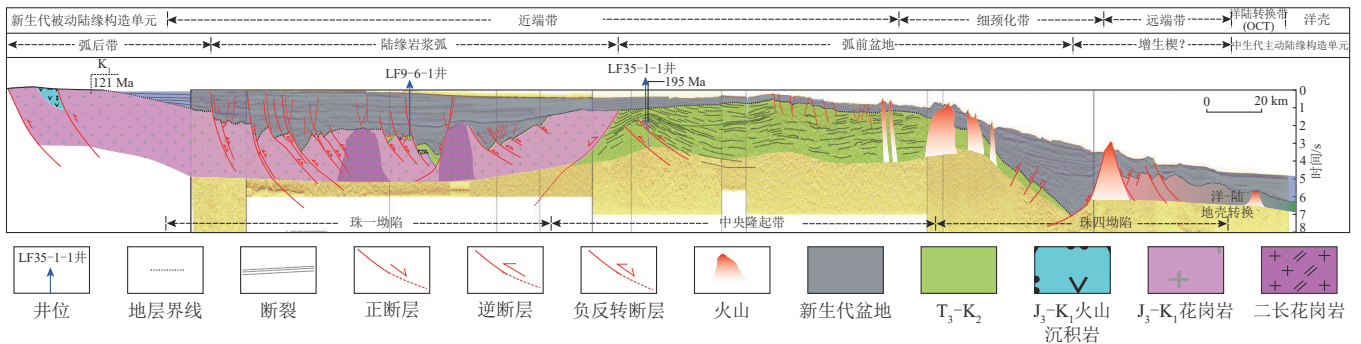


图3 南海北部陆缘地震解释剖面及单元划分

Fig. 3 Interpretation of the seismic profile showing tectonic units along the continental margin of the northern South China Sea

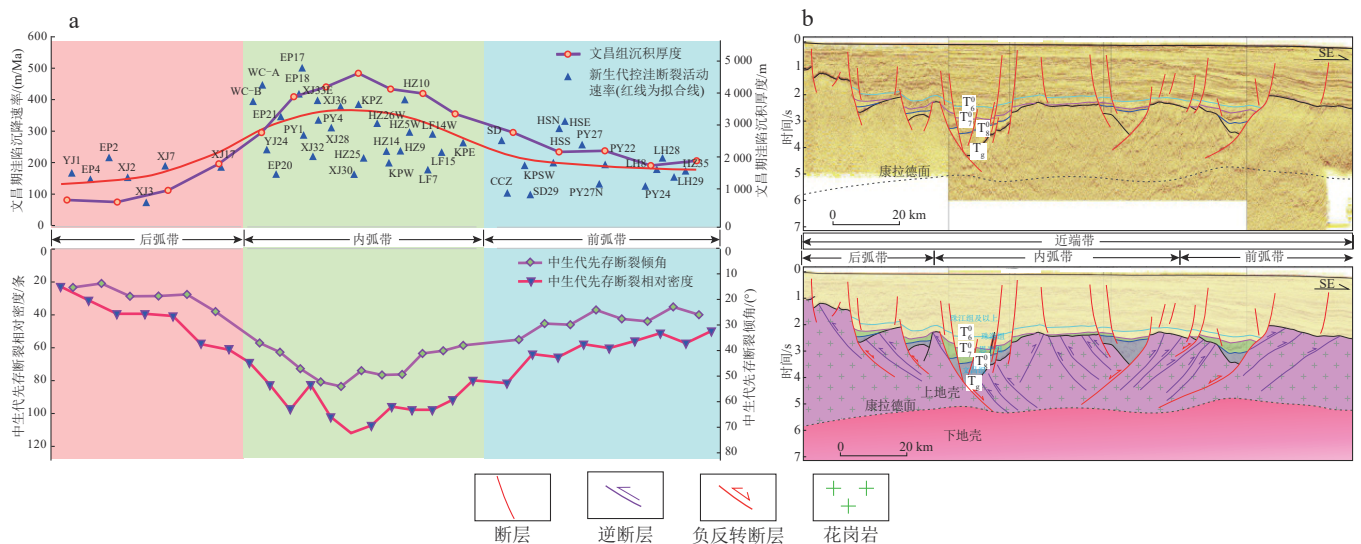


图4 珠江口盆地岩浆弧不同带构造特征与新生代洼陷结构发育特征

Fig. 4 Structural characteristics of the various zones of magmatic arcs and developmental characteristics of the Cenozoic sub-sags in the PRMB

a. 先存断层密度、倾角与新生断裂强度关系; b. 岩浆弧不同带新生代洼陷结构特征典型剖面

(T₀⁰, T₇⁰, T₈⁰ 分别为珠海组、恩平组、文昌组和基底顶面地震反射界面。)

浅水陆架凹陷(如珠一坳陷和珠三坳陷)的地壳厚度在 20.0 km 左右,表明地壳减薄不明显。盆地深水陆架的

隆起或低凸起的地壳厚度在 17.0 ~ 24.0 km,指示地壳减薄有限。而盆地深水陆架凹陷(如白云凹陷、荔湾凹

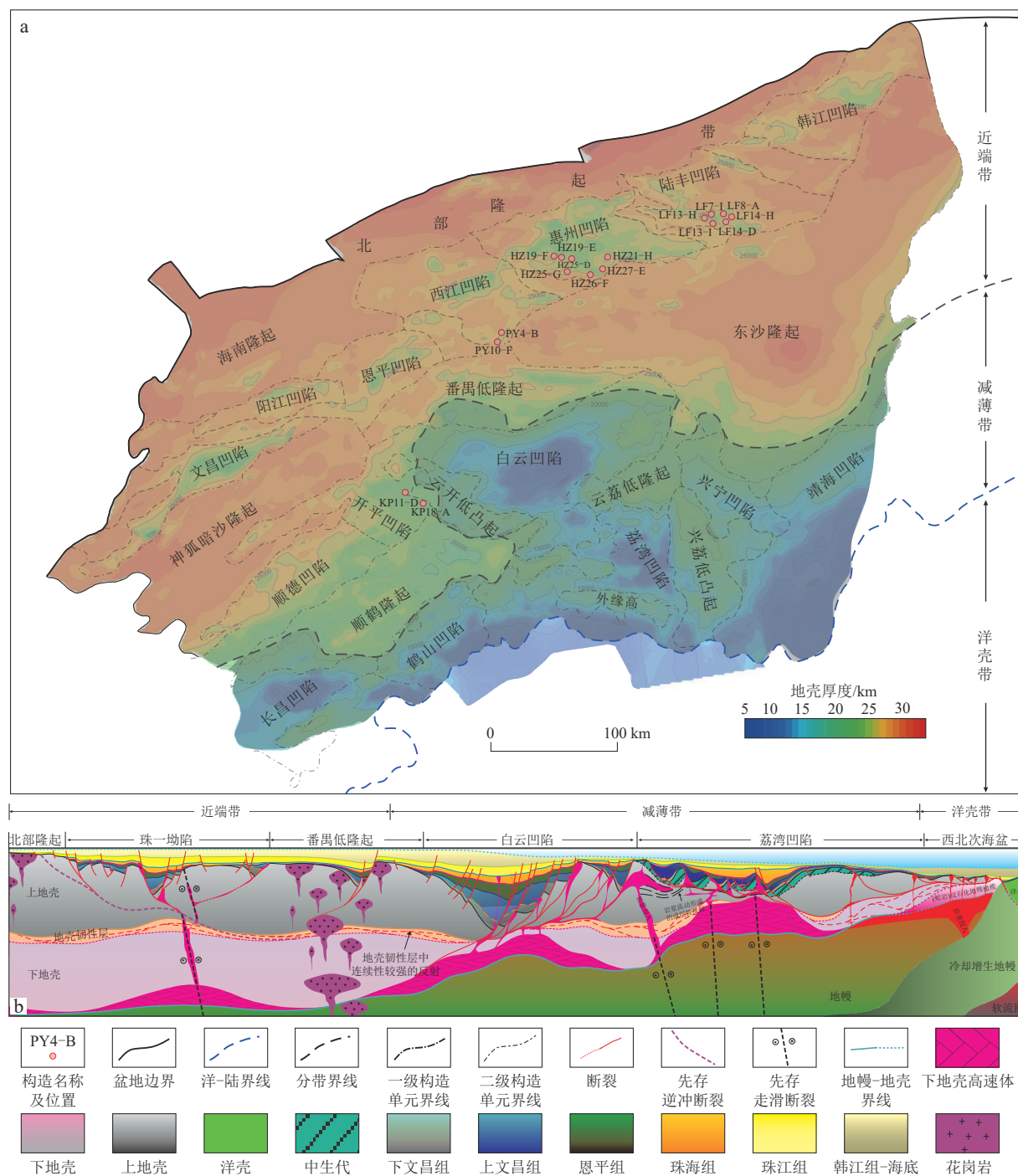


图5 南海北部陆缘中段“洋-陆”体系平面分布(a)和剖面特征(b)

Fig. 5 Planar distribution (a) and cross-sectional characteristics (b) of the ocean-continent system in the central section of the continental margin of the northern South China Sea

陷、鹤山凹陷和长昌凹陷)的地壳厚度仅为5.5~8.0 km,说明其地壳发生了强烈的减薄作用。洋陆转换带内,由陆向洋,地壳厚度逐渐变小,最小地壳厚度约5.0 km。

1.2.2 南海北部新生代被动陆缘洋-陆体系划分及特征

南海北部在新生代经历了完整的岩石圈伸展、减

薄、破裂及后续的洋壳增生阶段,形成了被动大陆边缘洋-陆体系。整个洋-陆体系由陆向洋依据地壳减薄程度简单划分为近端带(地壳厚度>20 km)、减薄带(地壳厚度0~20 km)和洋壳带(图5b)。

近端带主要集中在珠江口盆地浅水陆架区域(如珠一坳陷、珠三坳陷和番禺低隆起等),地壳伸展量有限,以上地壳的脆性变形为主,平均地壳厚度在20.0 km

左右。盆地结构主要是地堑和半地堑。局部区域伴随同裂陷期的岩浆作用,对凹陷结构产生了一定程度的改造。减薄带主要集中在盆地深水和超深水区域,如白云凹陷、荔湾凹陷、鹤山凹陷和长昌凹陷等。减薄带的主要特点是莫霍面的显著抬升以及强烈的地壳薄化,伴随深入下地壳韧性层的大型低角度拆离断层(或切穿地壳的高角度断层,如长昌凹陷)。具体而言,白云凹陷以宽、深沉积中心为特征,其南部以一系列大型的向陆倾斜的拆离断层为界,这些拆离断层将结晶基底切割成众多旋转断块,伴随着地层掀斜,并最终收敛至深部下地壳。强烈的伸展造成白云凹陷的地壳减薄程度非常高,凹陷中心最薄处的地壳厚度仅为5.5 km左右。荔湾凹陷位于云荔低凸起和外缘高隆起之间,一个水平位移大于65.0 km的亚水平、向洋倾斜的拆离断层切割基底并将外缘高从云荔低凸起向南移除,最终形成一个非常宽的裂谷^[28]。此外,该区域的裂陷期岩浆作用非常活跃^[29-30],至少存在3期活动^[30],在凹陷基底形成众多穹隆。

1.3 珠江口复合陆缘盆地特征及成盆机制

本文首次把南海北部陆缘定义为一个由新生代被动陆缘叠合在中生代主动陆缘基础上发展而来的典型复合陆缘。其内涵是指由两个以上的大陆边缘在动力上转换、空间上叠加、演化上继承、发育中改造的大陆边缘,通常表现为主动陆缘体系和被动陆缘体系的相互交替与转变,具有复杂的构造与沉积特征。

具体而言,南海北部在中生代属于东南亚主动大陆边缘,发育典型的弧-盆体系;然而,进入新生代后,区域应力由挤压转变为伸展,南海北部随着持续的大陆张裂、减薄及后续的海洋扩张,最终演化成了典型的被动陆缘体系。原本的中生代“弧-盆结构”被新生代“洋-陆体系”所取代,形成了“原位叠合、极性反转”的复合陆缘类型。这个过程中伴随复杂的转换、继承和改造作用,最终导致南海北部(尤其是珠江口盆地)的盆地形成与发育具有明显的复杂性与独特性。

1.3.1 盆地结构特征

从分布范围来看,珠江口盆地新生代裂陷主体均在中生代陆缘岩浆弧上叠合发育,且在岩浆弧的3个分带(前弧、内弧和后弧)均有发育。然而,其发育密度却呈现出显著的差异性(图6),表现在内弧带发育的新生代裂陷最为密集,其裂陷期地层厚度最大,同时控凹断裂的平均活动速率也最大,达到300 m/Ma(图6b₂);前弧带发育的新生代裂陷密度与规模均稍次之,控凹

断裂平均活动速率在200 m/Ma左右(图6b₃),新生代裂陷的整体发育强度居中;而在后弧带,洼陷数量最少且相对孤立分布;控凹断裂的平均活动强度也最小,约150 m/Ma(图6b₁)。

从裂陷结构来看(图4b,图6a),后弧带发育的新生代洼陷以半地堑为主,控凹断裂倾向几乎全部向南,半地堑结构整体北断-南超,为先存NE向逆冲断层反转控制下的半地堑;内弧带发育的新生代洼陷的控凹断裂对倾,呈南、北双断复式半地堑结构,为中生代对倾先存断层重新活化的结果;前弧带发育的新生代洼陷控注断裂主体向北倾,呈南断-北超的总体结构特征。因此,从上述断裂倾向与裂陷整体结构可看出,珠江口盆地新生代裂陷结构在南北方向上呈现出一个“包心菜”结构样式(图4b,图6a),与中生代陆缘岩浆弧“包心菜”结构样式相匹配。

1.3.2 成盆机制

现有的数值模拟研究已经证明先存构造对裂陷盆地演化的影响^[31-32],表明先存构造对裂陷发育位置、几何形状和发育规模等均会产生区域尺度的控制作用。南海新生代被动陆缘空间上叠合在中生代古太平洋向欧亚大陆俯冲形成的陆缘岩浆弧之上,古俯冲带的地壳内部通常会形成薄弱带,并控制后期裂陷的形成^[33-35],进而促进新生代被动陆缘洋陆体系继承与改造中生代主动陆缘弧盆体系,形成复合陆缘。因此,珠江口盆地新生代裂陷的几何结构和运动学演化等均受到中生代的陆缘岩浆弧的结构及其差异性的显著影响,且在后续洋-陆体系发育过程中受到强烈的改造作用。

具体而言,南海北部复合陆缘盆地的形成受控于“基底先存断裂反转活化”与“构造变革改造”2个方面,分别代表了盆地裂陷早期的继承作用与裂陷晚期的改造作用。中生代,内弧带密集且剧烈的岩浆活动形成了一系列高角度逆冲先存断裂,因此在新生代构造早期阶段由先存构造反转活化主导洼陷差异发育的背景下,内弧带更易形成宽、深湖盆。与之相比,前弧带的逆冲断裂的密度与规模均相对较小,但又整体强于后弧带。因此,早文昌期的前弧带裂陷规模大于后弧带,但小于内弧带。此外,新生代裂陷的断裂倾向和整体结构与中生代岩浆弧的“包心菜”结构存在高度一致性,表现出显著的构造继承关系。裂陷中-晚期(43 Ma左右),南海周缘板块运动发生显著变化,导致南海北部陆缘在该时期同步发生了重要的构造变革,即惠州运动^[36]。新生代裂陷结构因此受到强烈改造,

凹陷的沉积层被强烈掀斜、揉皱和变形,主要体现在裂陷迁移、断块旋转、下地壳韧性隆升(如开平凹陷等)和岩浆改造等方面。

2 珠江口复合陆缘盆地深部控藏作用

当前,全球已发现的深层油气田主要分布于被动陆缘盆地,占据了深层探明储量的50%以上^[37]。其中,以大西洋陆缘盆地群(墨西哥湾盆地和桑托斯盆地等)的深部油气资源最为丰富,现已探明一系列大型-巨型深层油气田,这类盆地普遍具有构造活动稳定和保存条件极佳的优势,其发育巨厚盐岩和膏岩盖层,对深部油气资源形成强力封堵^[38]。与上述被动陆缘盆地不同,珠江口复合陆缘盆地经历的构造活动更为强烈,盆地深部呈现高温、高压、流体活动复杂、储层相对低渗以及区域盖层薄且破坏作用强的地质特征,故以往常认为该盆地深部难以形成大规模油气聚集。然而,自2020年以来,珠江口复合陆缘盆地深层领域陆续获得一系列重大油气勘探突破,打破了“强活动复合陆缘盆地深部难以大规模聚集成藏”的认知。其中,2023年探明的开平18-A油气田为珠江口盆地深水深层领域首个高产轻质油的中型油气田,也再次印证了复合陆缘盆地深层油气的巨大勘探前景。因此,亟需探索复合陆缘盆地的成盆机制对深部油气成藏的控制作用。

2.1 珠江口复合陆缘盆地烃源特征与成烃机制

珠江口复合陆缘盆地不同构造带和构造段裂陷结构的分异性体现在裂陷分布、形态、面积及演化过程等方面,这些差异进一步控制了湖盆发育位置、深浅、宽窄及演化,从而决定了其建造期是否具备烃源能力,以及烃源发育层段、环境、品质和类型的差异,还决定了其改造期是否发生变形和变位等。

2.1.1 烃源特征

珠江口盆地大量钻遇烃源岩,油-源对比分析表明,主力烃源岩为张裂期始新统文昌组的湖相泥岩^[39]。

始新世,受太平洋板块向欧亚板块俯冲影响,珠江口盆地在NW-SE向拉张应力场之下,基底逐渐张裂,形成NE向半地堑断陷湖盆群。早始新世,拉张作用形成了由陡倾正断层控制的箕状断陷盆地。盆地北部地壳初步伸展,呈现隆-凹相间、分割性强和连通性差的特点。中始新世,随着伸展强度增加,北部形成复式半地堑结构,南部如白云凹陷则发育大规模伸展拆离

面,演变为宽、深断陷系统。

构造变形差异导致各凹陷区沉积特征存在较大不同(图7)。在东部陆丰和惠州凹陷,控洼断裂主要为高角度正断层,沉积物呈NE向窄条带状分布,物源自NW向沿断裂带输入,形成典型断陷型沉积体系^[40-42]。湖盆范围自文(文昌组)五段逐渐扩展,至文四段达到最大,显示盆地沉积范围扩大及湖泊环境稳定发展;文三段后,半深湖-深湖亚相沉积范围逐步缩小,反映构造活动减弱、沉积环境收敛(图7)。中部及南部的恩平、西江、阳江和开平凹陷的控洼断裂以低角度正断层为主,半深湖-深湖亚相沉积范围较广,除番禺4洼外,沉积厚度呈北厚、南薄特征,体现物源与沉积速率的区域差异。文四段沉积时期,半深湖-深湖亚相分布最广,但各洼陷沉积特征仍存在差异,与控洼断裂活动和物源供给变化密切相关。

珠江口盆地文昌组烃源岩的层段分布与品质在凹陷间呈现显著分异。文五段烃源岩品质差异较小;文四段在不同凹陷中均为半深湖-深湖亚相优质烃源岩,品质稳定,属好-很好烃源岩。从文三段开始,品质逐渐分异,不同凹陷之间烃源岩类型和品质存在明显差异,番禺4洼和陆丰凹陷为好-很好烃源岩,而开平、恩平和西江凹陷品质较差;文一段和文二段烃源岩品质进一步降低,生烃潜力减弱(图8a—d)^[43-44]。烃源岩类型也存在明显差异,文昌组下段烃源岩以I型和II型干酪根烃源岩为主,生烃潜力较强;而上文昌组烃源岩则以II型干酪根为主,生烃潜力相对较弱(图8e—i)。总体而言,珠江口盆地多数凹陷发育文昌组优质烃源岩,但随着层位变浅,烃源岩品质下降,凹陷间差异性逐渐显现,反映了沉积环境及构造演化的区域分异。

各层段烃源岩厚度在纵向和平面上均呈现显著差异。纵向上,从文五段到文二段,烃源岩厚度逐渐减薄;平面上,各凹陷文昌组烃源岩厚度分布不均。文五段烃源岩厚度普遍小于500 m,文四段烃源岩厚度增加至700~1 000 m。晚文昌期,西部阳江、开平和恩平凹陷以及番禺4洼烃源岩厚度较大,显著高于东部惠州和陆丰凹陷。这一分布特征不仅反映了东、西部凹陷物源供给的差异,也揭示了沉积速率的空间变化。

珠江口盆地始新统泥岩沉积环境呈现明显演化特征,有机地球化学指标(姥鲛烷/植烷含量比值和重排甾烷含量)揭示了湖盆环境的变化(图8j—m)^[45-48]。早文昌期湖盆环境相对均一,物源输入多样,反映多种地质因素共同作用下的湖相沉积特征。晚文昌期沉积环境逐渐分异,湖盆格局显著变化。恩平期湖盆环境再

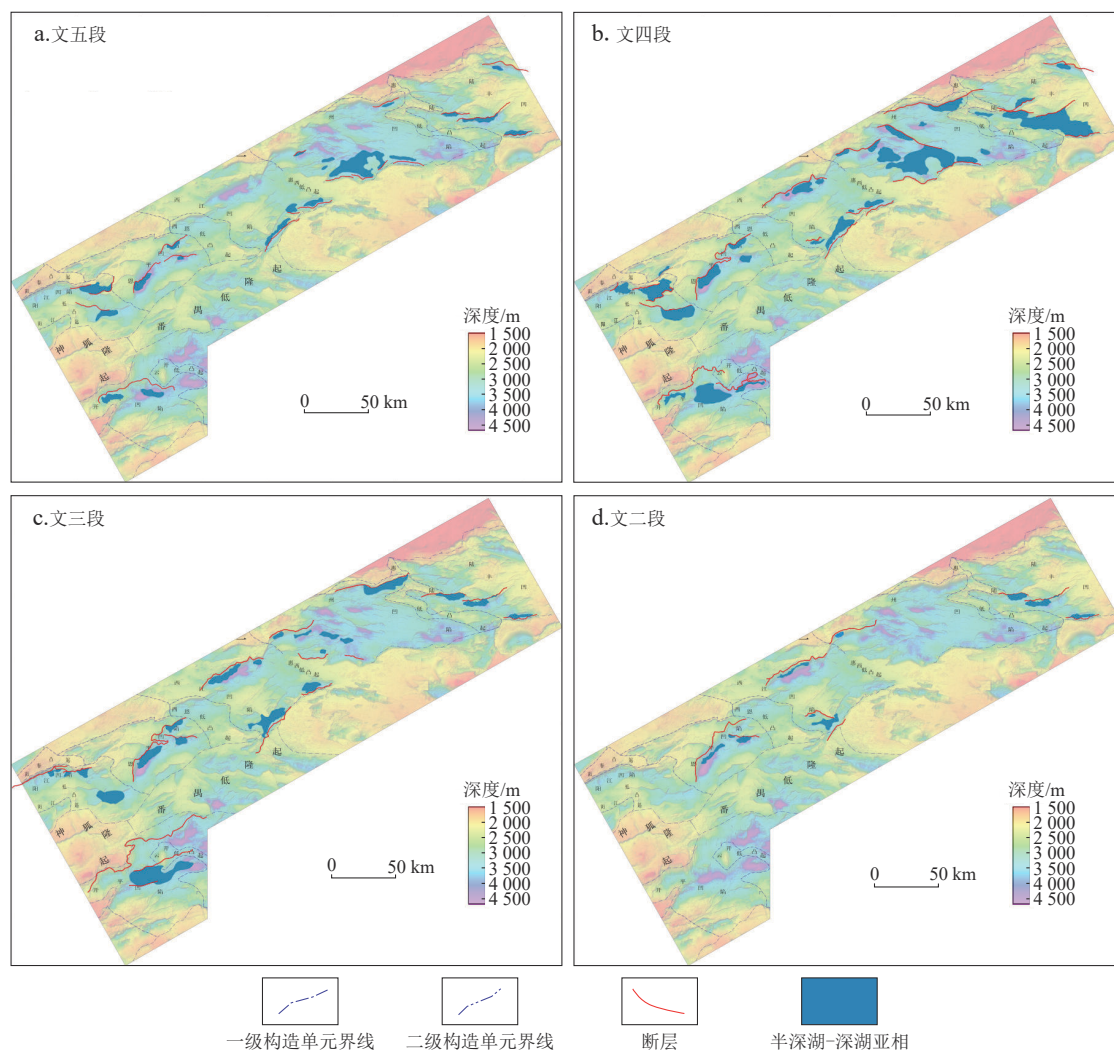


图7 南海北部珠江口盆地始新统文昌组半深湖-深湖亚相区域展布特征

Fig. 7 Regional distribution of semi-deep to deep lacustrine subfacies in the Eocene Wenchang Formation, PRMB, northern South China Sea

次趋于均一,沉积环境参数回归统一,可能反映出区域气候趋稳和湖泊水体条件的再平衡。总体而言,这一演化过程揭示了构造、气候及物源输入对沉积环境的显著影响,体现了始新统湖盆环境从统一到分异再到重趋一致的复杂过程。

2.1.2 成烃机制

珠江口复合陆缘盆地的差异成烃机制主要体现在早文昌期“建造成烃”和晚文昌期“改造控源”2个方面,分别对应烃源岩的形成与后期改造控制过程。

早文昌期,“建造成烃”反映了复合陆缘盆地在构造活动与沉积环境共同作用下的生烃过程。早期张裂阶段,中生代陆缘弧盆体系的先存构造方向与新生代张裂期区域应力方向共同决定了湖盆展布格局,形成有利于有机质堆积和保存的环境。构造运动和沉积动

力学共同塑造了多样沉积体系,形成富含有机质的烃源岩层。氧化还原条件、沉积速率和有机质来源等因素的组合,使盆地内烃源岩在丰度、类型和品质上呈现显著差异(图9)。

晚文昌期,“改造控源”指张裂晚期或拆离-岩浆期构造活动对已形成烃源岩的改造与控制。不同构造单元因变形强度和构造格局差异,导致烃源岩埋藏深度、热演化程度及封闭条件发生变化,影响生烃成熟度及油气生成与保存能力。惠州运动强烈改造早期洼陷结构,富生烃洼陷中心在断块掀斜或韧性下地壳隆升作用下发生变形和迁移,使早文昌期湖盆中心的烃源岩变位至斜坡区(图9)。以开平凹陷为例,自西向东,韧性下地壳隆升改造程度逐渐增强,烃源岩分布呈现规律性变化:西部早文昌期烃源岩主要分布在北坡,层厚大且连续分布;中部北坡沉积南撤,形成南、北两坡

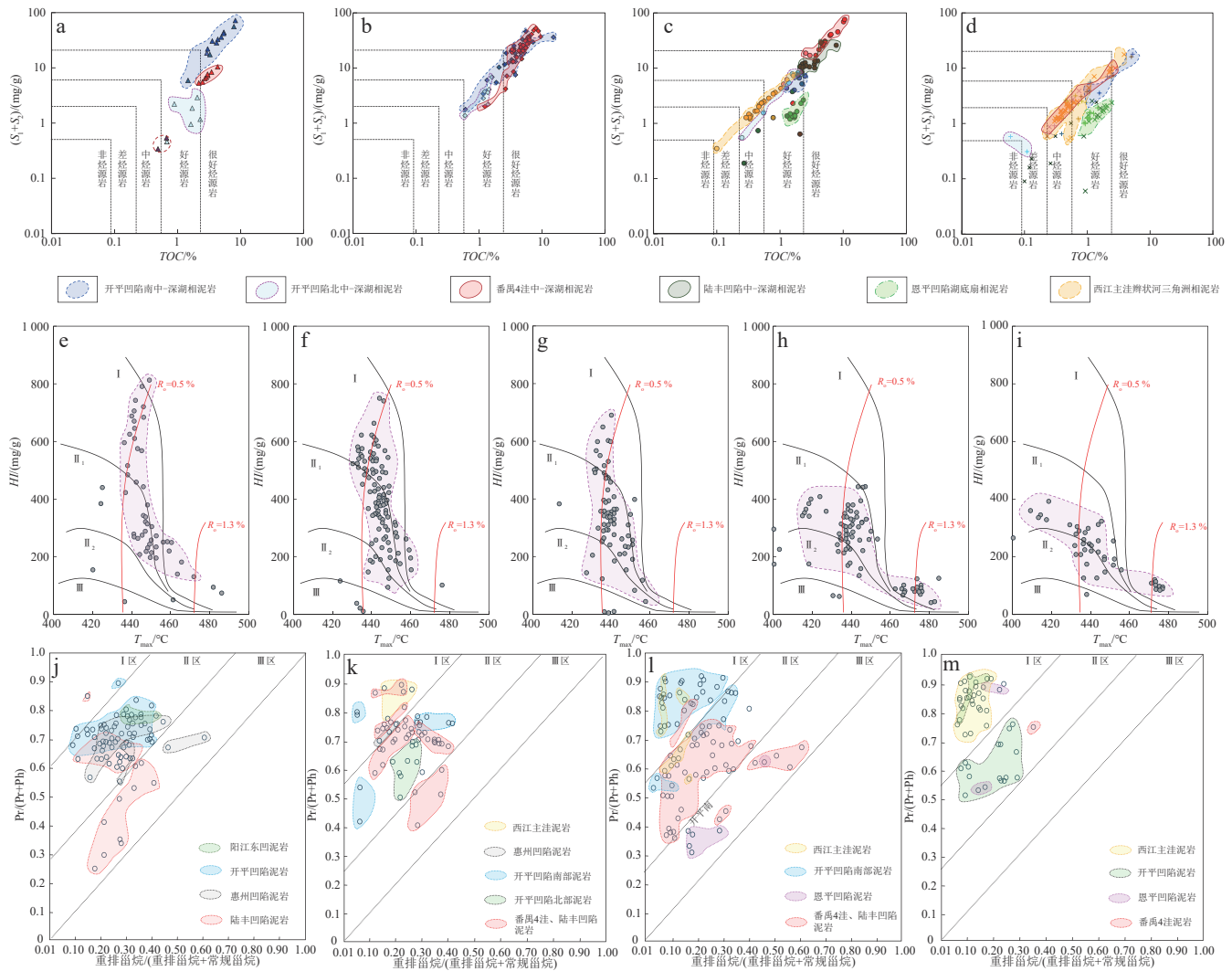


图8 珠江口盆地不同洼陷、不同层段文昌组烃源岩品质、干酪根类型及始新世环境差异性对比

Fig. 8 Comparison of the quality and kerogen types of source rocks at varying intervals of the Wenchang Formation and differences in the Eocene environments in different sub-sags within the PRMB

a—d. 分别为文五段、文四段、文三段和文一段—文二段烃源岩品质; e—i. 分别为文五段—文一段干酪根类型; j—m. 分别指示始新世下文昌组、文三段、文一段—文二段和恩平组的沉积环境

(Pr为姥鲛烷; Ph为植烷; S_1+S_2 为生烃潜量; HI为氢指数。)

“V”字型分布; 东部烃源岩主要分布在南坡, 北坡沉积显著减少。这一过程揭示出复合陆缘盆地“早洼晚坡”的烃源岩分布规律, 突破了传统断陷湖盆烃源岩集中在湖盆中心的认识。

综上, 复合陆缘盆地的差异成烃机制是“建造成烃”和“改造控源”共同作用的结果, 不仅决定了烃源岩的质量与空间分布, 还对油气富集模式产生了深远影响, 为油气勘探提供了理论依据和实际指导。在“建造成烃”和“改造控源”的叠合作用下, 复合陆缘盆地古近系广泛发育优质湖相烃源岩, 为烃类的爆发式生成奠定了物质基础, 因此, 优质的烃源条件是深层油气大规模成藏的基础条件。

2.2 珠江口复合陆缘盆地深部储层特征与成储机制

复合陆缘构造背景不仅控制了珠江口盆地富烃凹陷的形成与烃源岩的展布, 同样对碎屑岩储层沉积与成岩演化产生了深远影响。一方面, 中生代弧—盆体系形成的花岗质岩浆弧与残余碎屑岩母岩为被动陆缘盆地碎屑岩储层提供了差异物质条件(图1); 另一方面, 受新生代洋—陆体系地壳减薄影响, 珠江口盆地地温梯度普遍高于 $33\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$, 属于典型中国东部“热盆”, 高地温条件下低渗化对深部有效储层的发育提出了挑战^[48-49]。此外, 两大体系转换导致断裂活动复杂, 成岩流体活跃, 对储层产生重要改造作用。因此, 在复合陆缘构造演化

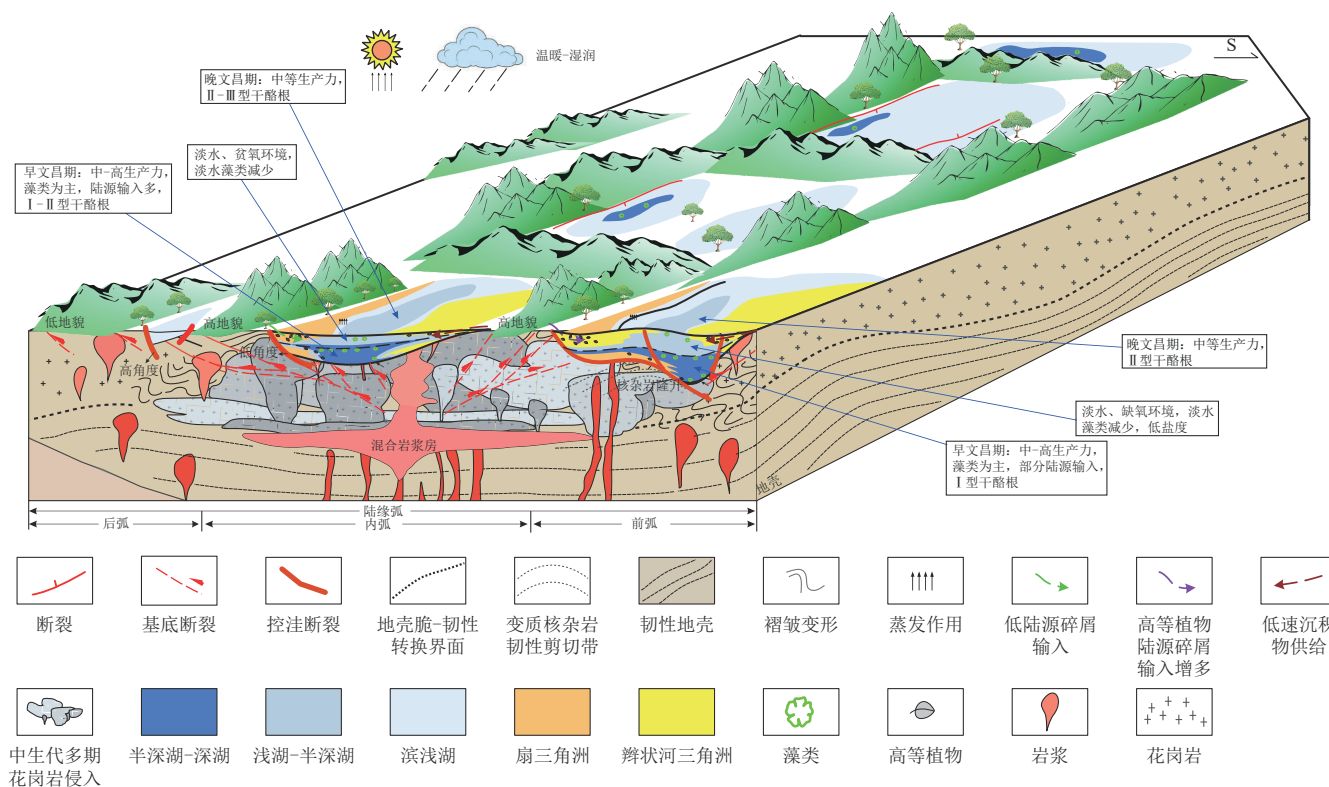


图9 珠江口复合陆缘盆地背景下差异成烃机制示意图

Fig. 9 Schematic diagram showing differential hydrocarbon generation mechanisms in the setting of the PRMB, a composite continental-margin basin

控制下,珠江口盆地形成了差异物源体系-高地温条件-强流体活动的特色成岩体系与储层发育模式。

2.2.1 珠江口盆地复合陆缘控制下的岩矿特征与差异低渗成因

珠江口盆地复合陆缘控制下,钻井揭示盆地西部储层长石富集,含量高达44.5%,成岩过程中溶蚀作用显著;伴随长石溶蚀,黏土矿物中高岭石含量迅速增加(图10a),充填喉道,渗透率随深度增加迅速降低,整体由中-高渗降低至低渗-特低渗;与之不同,盆地东部残留较大规模中生代富石英碎屑岩母岩(图1),储层组分中石英含量高,平均含量高于80.0%。当地层温度达到120℃时(埋深约3300m),黏土矿物中伊利石含量多超过60.0%,进入中成岩A₂期,受丝片状伊利石充填与搭桥影响,渗透率持续降低,储层物性整体由中-高渗降低至低渗-特低渗(图10b)。整体来看次生高岭石产生与黏土矿物伊利石化是造成盆地西部与东部低渗的关键因素。

2.2.2 珠江口盆地优质储层发育特征与成储机制

尽管西区次生高岭石与东区黏土矿物伊利石化成

为高地温背景下储层低渗的关键因素,但通过对勘探实践中优质储层解剖发现,受不同母岩、沉积相带和流体环境的综合影响,复合陆缘背景下差异母岩与差异含钾流体相互作用可以实现对高温储层低渗化的有效抑制,基于此,综合源-汇体系与成岩流体系统分析,揭示了珠江口盆地深部高温碎屑岩储层-含钾流体抑制黏土保渗机制,有效指导了复合陆源特殊地质背景下深层油气勘探。

1) 西部优质储层发育特征与富钾流体抑制溶蚀高岭石成储机制

受花岗质岩浆弧母岩控制,长石是珠江口盆地西部常见矿物,经典成岩理论与勘探实践证实长石在酸性环境下易溶蚀并形成次生高岭石,堵塞喉道,降低渗透率。但盆地西部HZ19-F构造揭示了以洲-滩复合体相带为主的高渗储层,渗透率可高达 $3276 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。优质储层镜下可见斜长石强烈溶蚀,但喉道干净,次生溶孔内少见高岭石充填(图11a)。且自生钾长石环绕微斜长石核部加大生长,加大边之间呈点-线状接触,其支撑作用显著降低了压实对储层破坏性作用(图11b,c)。针对该储层特征,设计了不同含钾流体环境下成岩数值模拟与溶蚀实验。模拟结果显示:在

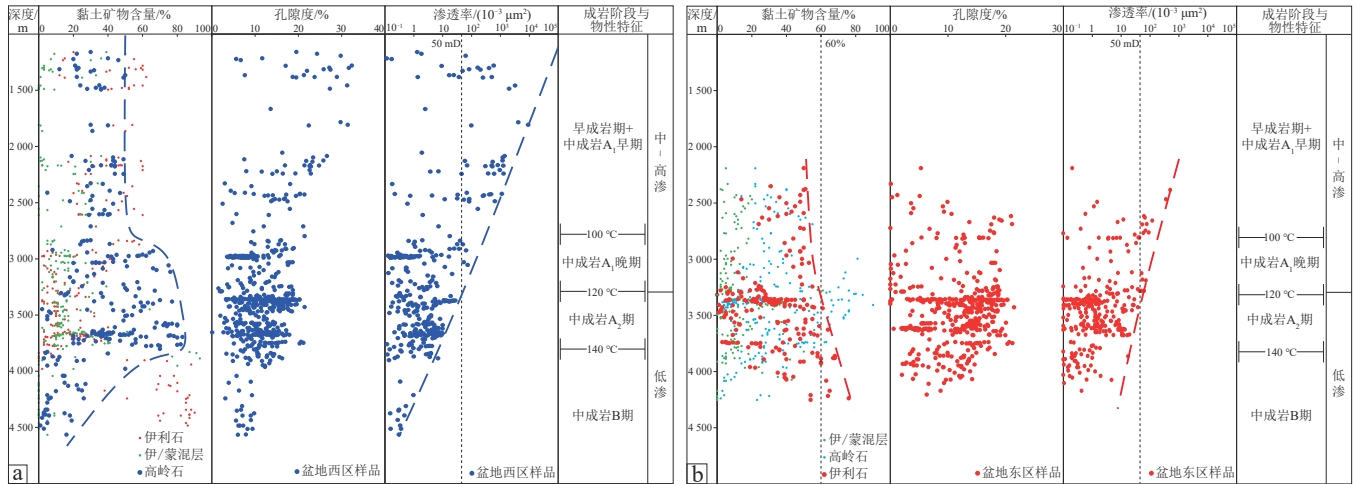


图10 珠江口盆地西部(a)与东部(b)黏土矿物含量与物性随深度变化特征

Fig. 10 Clay mineral content and physical properties varying with depth in the western (a) and eastern (b) parts of the PRMB

斜长石溶蚀过程中(以钠长石为例),伴随流体中 K^+ 浓度逐渐增加,产物中高岭石含量逐渐降低,而自生钾长石含量逐渐增加。当 K^+ 浓度达到300 mg/L时,富 K^+ 流体环境对斜长石溶蚀过程中的高岭石沉淀产生强烈抑制作用,溶蚀产物以形成自生钾长石加大为主(图12a—d)。

储层微观分析与成岩数值模拟证实长石溶蚀过

程中富钾流体抑制高岭石的产生,形成自生钾长石加大边。储层内黏土矿物含量较低、孔隙干净,钾长石加大边之间相互支撑保护孔喉、抑制压实,使得深层储层在温度大于120℃时渗透率仍可保持达西级别,成为优质储层发育的重要控制因素。基于区域背景与流体活动分析,建立了西部优质储层的含钾流体富集模型:二长花岗岩作为母岩为沉积区提供

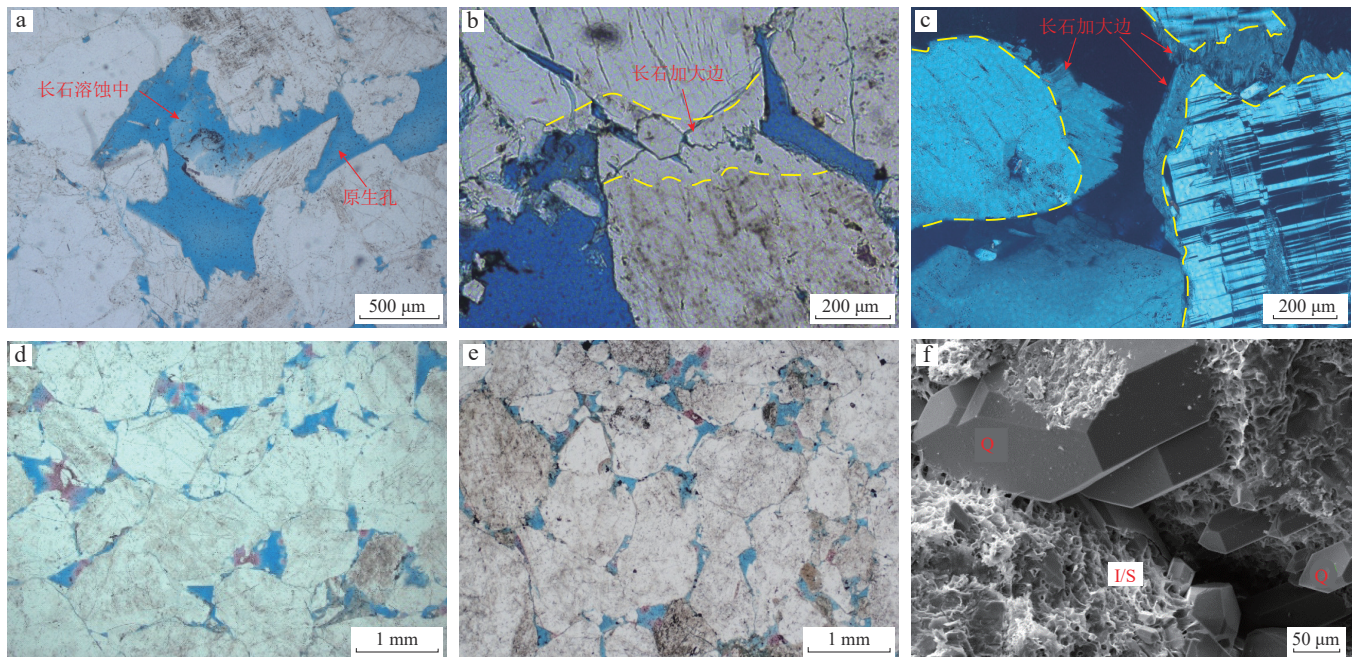


图11 珠江口盆地西部(a—c)和东部(d—f)优质储层发育典型特征显微照片

Fig. 11 Micrographs showing the typical characteristics of high-quality reservoirs in the western (a—c) and eastern (d—f) parts of the PRMB

a. 长石溶蚀无高岭石产物,埋深4 317.40 m, HZ-A井,单偏光,铸体薄片;b. 长石加大边发育,埋深4 317.70 m, HZ-A井,单偏光,铸体薄片;c. 长石加大边围绕微斜长石发育,埋深4 317.40 m, HZ-A井,正交光,铸体薄片;d. 粗砂岩,原生孔隙发育,孔隙度为12.18%,渗透率为 $263.74 \times 10^{-3} \mu m^2$,埋深4 156.75 m, LF14-D-b井,单偏光,铸体薄片;e. 砾质砂岩,原生孔隙发育,孔隙度为11.47%,渗透率为 $87.41 \times 10^{-3} \mu m^2$,埋深4 158.26 m, LF14-D-b井,单偏光,铸体薄片;f. 伊/蒙混层发育,喉道干净联通,埋深4 168.22 m, LF14-D-b井,扫描电镜(Q为石英;I/S为伊/蒙混层)

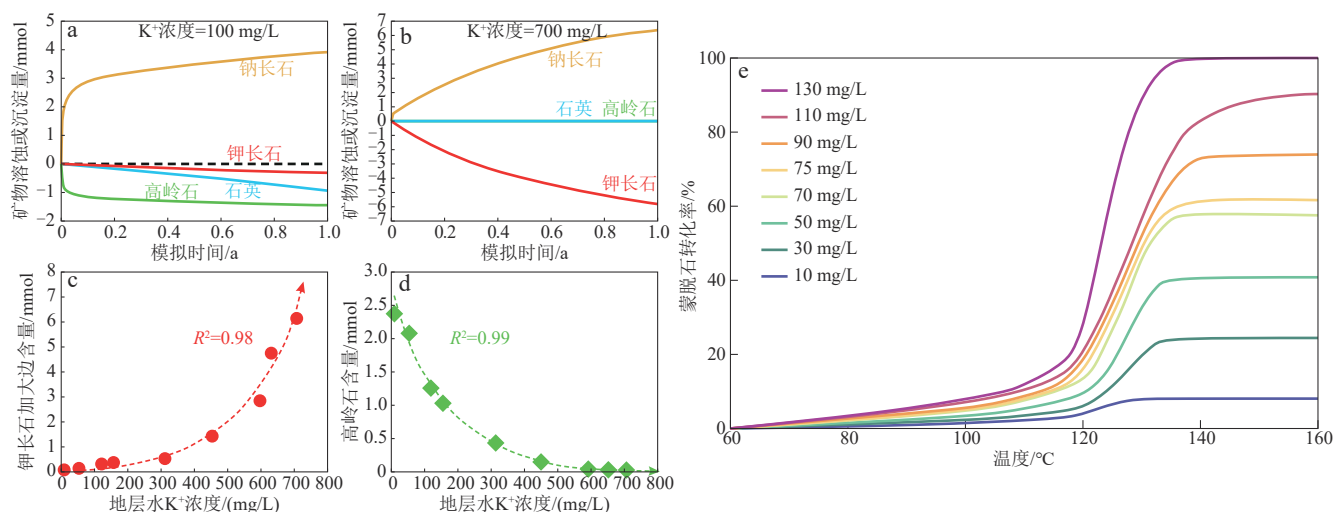


图12 珠江口盆地西部富钾与东部贫钾流体背景下地球化学反应路径模拟结果

Fig. 12 Simulation results of geochemical reaction pathways in the presence of potassium-rich and potassium-poor fluids in the western and eastern parts of the PRMB, respectively

a, b. 分别为100 mg/L和700 mg/L两种K⁺浓度的代表性流体中矿物的溶解量和沉淀量变化(正值表示矿物溶解,负值表示矿物沉淀);c, d. 分别为9个不同K⁺浓度流体中钾长石加大边和高岭石沉淀量变化的拟合曲线;e. 不同K⁺浓度流体的成岩数值模拟结果(模拟通过Geochemist's Workbench® Pro version 13.0完成)

大量的长石, 辫状河三角洲平原和前缘中, 大量长石溶蚀产生K⁺与高岭石, K⁺向远源低势区富集。此外, 富长石背景下的母岩体系中深部富K⁺流体也可通过断裂进入高渗透性远端洲滩复合体中(图13a)。斜长石颗粒在酸性流体条件下产生强烈溶蚀, 但在富

K⁺流体作用下, 产物不以高岭石为主, 而在钾长石颗粒的周围形成大量的钾长石加大边支撑粒间孔隙, 从而对储层产生重要保护作用。

2) 东部优质储层发育特征与富石英-贫钾流体抑制伊利石化成储机制

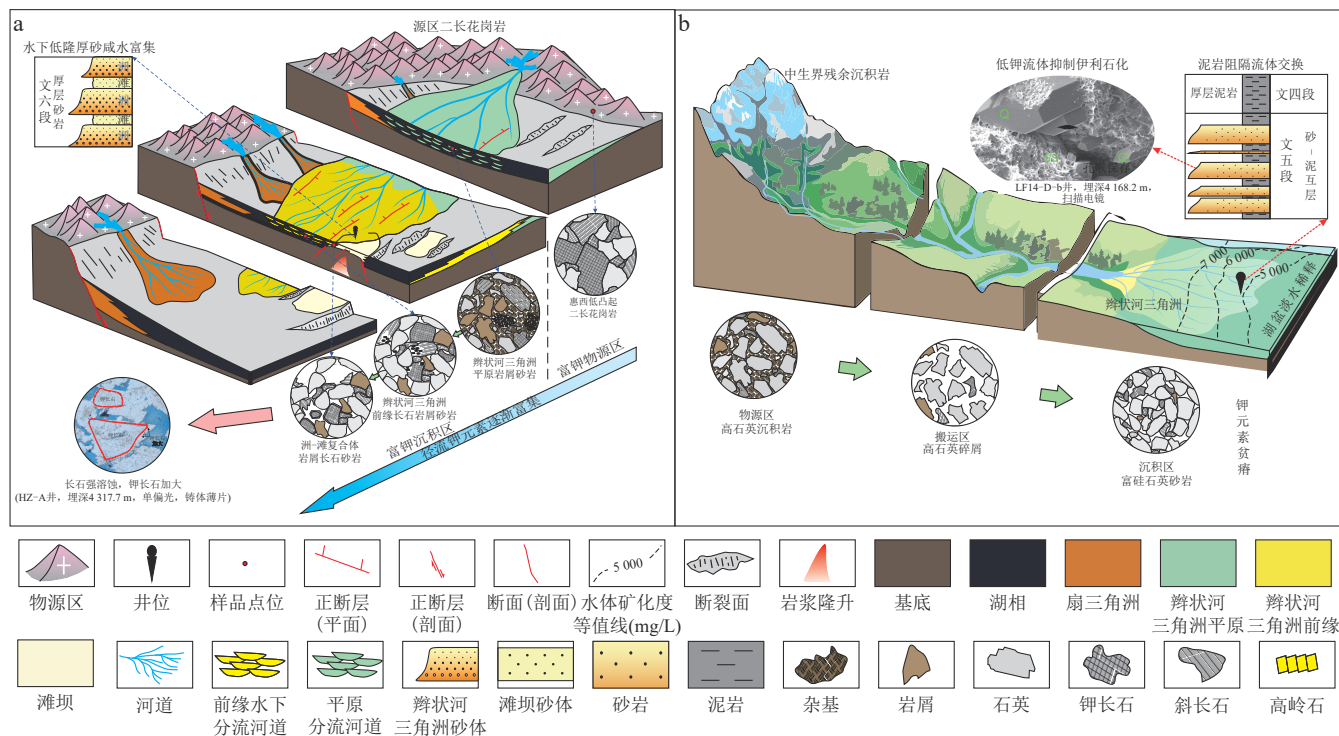


图13 珠江口盆地西区(a)与东区(b)岩矿与流体成因演化模式

Fig. 13 Genetic evolution models of rock-mineral assemblages and fluids in the western (a) and eastern (b) parts of the PRMB

在珠江口盆地东部黏土矿物伊利石化是导致深层储层渗透率下降的关键因素。而在东部 LF14-D 构造,以文五段为代表的辫状河三角洲前缘沉积相中,虽然地层温度达到 147 °C,远远高于 120 °C,但粒间黏土矿物仍以伊/蒙混层为主,伊利石含量低,孔喉联通,发育优质储层(图 11d—f)。

研究发现,伊利石的形成除了与温度相关外, K^+ 浓度也是至关重要的因素。地层水分析揭示 LF14-D 构造目标层位呈现极低矿化度特征, K^+ 浓度多低于 50 mg/L。因此,基于地层水资料与储层微观分析,设计基于地层水和黏土矿物转化率的成岩数值模拟实验,实验揭示:相同温度条件下,随着地层水中 K^+ 浓度逐渐降低,蒙脱石转化率不断降低。储层温度超过 120 °C、 K^+ 浓度小于 70 mg/L 时,高地温下贫钾流体可使黏土矿物伊利石转化率降低到常规流体条件下的 60 % 以下(图 12e)。模拟实验与储层微观特征证实,当储层流体中 K^+ 浓度较低,无法完成蒙脱石的层间阳离子交换反应,可导致伊利化作用停滞,伊利石转化率大大降低。因此,贫钾流体可以抑制高温伊利石化,即使地温大于 120 °C 时,仍保持孔隙连通性,形成优质储层。

结合区域母岩背景与沉积特征,建立了珠江口盆地东部贫钾流体贫化作用模型(图 13b)。在盆地东部中生界富石英沉积岩的母岩供给下,储层中石英含量高,长石含量低,水-岩反应弱,沉积水体矿化度低。沉积区辫状河三角洲前缘砂体颗粒经历较长距离的搬运后,储层中石英颗粒更加富集,且砂体靠近湖盆淡水,沉积水体受到进一步稀释作用。文五段砂岩以砂-泥互层为主,且上覆厚层文四段泥岩,阻隔了后期成岩流体交换,保持了低矿化度流体条件。最终储层成岩环境中 K^+ 浓度低,抑制了黏土的伊利石化,成为

东部优质储层发育的重要机理。

在上述机理控制下,复合陆源盆地深部发育大规模优势储集空间,为深部油气的充注与保存提供了有效场所,因此,储层条件是深层油气大规模聚集成藏的基础条件。

2.3 复合陆缘盆地深部油气分布与成藏机制

珠江口复合陆缘成盆机制不仅决定了珠江口盆地特殊的成烃与成储环境,而且通过调控油气的运移与保存条件,控制了盆内深部油气的差异成藏。

2.3.1 深部油气分布与成藏特征

优质烃源岩与规模有效储层为深部区域性油气规模成藏奠定了基础。在复合陆缘多期构造叠加与多源流体改造的影响下,盆内不同洼陷烃源岩资源潜力与储层分布具有较强的非均质性。目前,珠江口复合陆缘盆地深层已探明的大-中型油气田主要分布于 4 个富生烃洼陷,分别为惠州 26 洼、陆丰 13 洼、番禺 4 洼和开平主洼。此外,深部的油气分布呈现“多相态共存”的特征,并以油相为主导、局部富气(图 14)。

尽管 4 大富生烃洼陷主导了盆内深部油气成藏,但在烃源岩展布、古地理格局、超压发育、断裂分布和特殊岩性盖层等因素的耦合作用下,不同洼陷深部油气成藏过程及特征较为复杂,并呈现显著差异:开平主洼深部呈现“早洼晚坡、混相流体促运”的成藏特征^[16];惠州 26 洼以“断裂控运、物性控聚”为特色^[15];番禺 4 洼具有“断脊联运、钙砂增封”的特征^[17];陆丰 13 洼则以“超压控运、断裂控聚”为特点^[13]。

相较区域性成藏特征的对比,层系视角的成藏分析可为深部油气成藏差异性的探讨提供更为清晰和准确的认知:文昌期强裂陷作用形成了“深洼高隆”的古

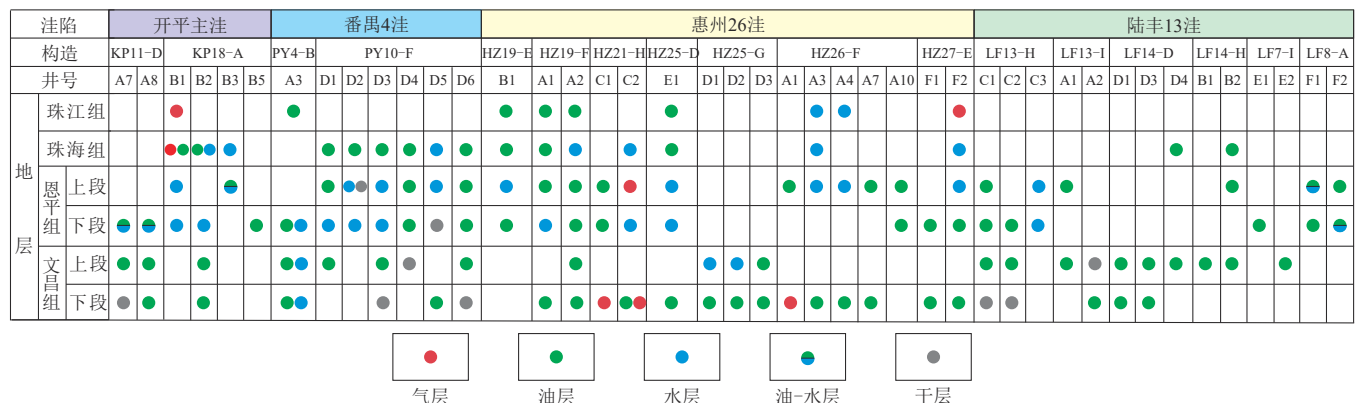


图 14 珠江口盆地重点洼陷典型构造新生界油气显示统计

Fig. 14 Cenozoic oil and gas shows in typical structures within key sub-sags of the PRMB

地理格局,在这一背景下,不同洼陷普遍不同程度地发育半深湖亚相优质源岩,加之该时期三角洲沉积体系的规模有限,导致文昌组烃源充足,但泥多砂少,低渗储层相对更为发育,故烃类的高效运移充注是深部文昌组规模成藏的关键;而恩平期不同洼陷具有“浅水广盆”的古地理格局,尽管恩平组难充当区内的主力烃源岩,但其发育大型浅水三角洲沉积体系,具有盆广富砂、盖层有限的特点,因此,跨层系(文昌组-恩平组)运移与有效保存是深部恩平组规模成藏的主要控制因素。

2.3.2 深部控藏要素及其作用

上述研究表明,优势的烃源与储层条件是复合陆缘盆地深部成藏的基础要素,为深部成藏提供了烃类来源与优势储集空间。在此背景下,运移(输导)条件与保存(封盖)条件是决定复合陆缘盆地深部差异成藏的主控因素。

1) 低渗背景下的高效运移

深部低渗储层的形成与物源、沉积体系和成岩作用具直接关联,而低渗储层背景下易形成局限-束缚的流体场,油气充注需克服毛细管压力与吸附力的双重影响,对充注动力的要求更高。在此背景下,超压与 CO_2 为深部油气高效充注提供了重要保障。其中,成藏期以生烃增压为主的区域性超压,为珠江口盆地深层低渗储层的油气充注奠定了动力基础,通过流体传导作用可将剩余压力有效传递至储层中。而“超临界 CO_2 促运”是复合陆缘盆地深部油气高效充注过程中最具特色的环节,也是提升低渗储层充注效率的关键。

复合陆缘岩浆弧背景下,珠江口盆地深部岩浆活动频繁,并伴生大量 CO_2 ,数百个天然气样的地球化学分析显示,盆内 CO_2 含量非常丰富,最大可达99.5%,平均值为17.2%。与此同时,不同区域新生界储层中均广泛分布幔源无机成因的 CO_2 ,以开平凹陷 CO_2 含量最为丰富(平均值为32.7%)。传统观点常认为, CO_2 流体对原生油气藏具有驱替或破坏作用,不利于油气藏的形成与保存^[44,50]。实际上, CO_2 临界温度仅为31.26℃,临界压力仅需7.2 MPa^[51],因此,其在深部地层极易达到超临界状态。超临界 CO_2 流体具有独特的物理化学性质,具有较低的黏度与极强的溶解能力和扩散能力等^[52-54]。

超临界状态的 CO_2 可大幅度提高烃类流体的流动能力,当超过10%的 CO_2 与高熟液态烃混溶后,混合流体的相态便可由液相变为气相(图15),大大增强了混

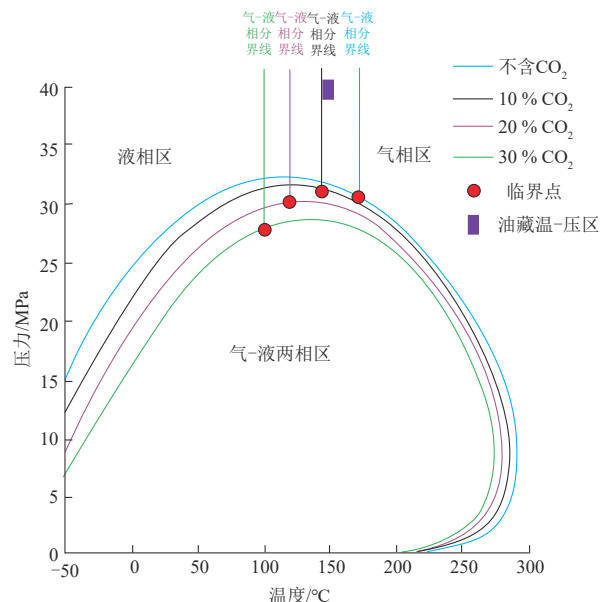


图15 珠江口盆地深部混合流体温度-压力相态图

Fig. 15 Pressure-temperature (P-T) phase diagram of deep mixed fluids in the PRMB

合流体的流动性。与此同时,超临界 CO_2 还能显著降低油气运移的阻力。实验结果表明(图16), CO_2 的大量加入使不同级别低渗储层的原油充注效率(含油饱和度)提升了3.3%~10.8%,充注效率的最大提升幅度达到21%。分子动力学模拟研究表明^[55],含超临界 CO_2 的天然气与原油的混合流体进入储层后, CO_2 因其更强的吸附能力会优先占据储层表面空间,大幅度降低了原油运移过程的毛细管阻力。因此,深部超临界 CO_2 流体对油气运移具有“润滑效应”,即深部 CO_2 -烃类超临界混合流体能够促进油气运移。而在开平主洼、惠州26洼和陆丰13洼等岩浆活跃区,深部层系 CO_2 含量丰富,充注过程中与烃类流体相混合,强化了深部油气的运移动力。

2) 富砂背景下的有效封盖

传统观点认为,区域性的厚层泥岩盖层是实现油气封盖与有效保存的重要保障。但在复合陆缘强改造背景的影响下,珠江口盆地深部并未发育区域性的巨厚泥岩盖层。不仅如此,作为深部主力产层之一的恩平组具有“广盆富砂”的特点,泥岩普遍发育欠佳,这一现象在西江凹陷番禺4洼尤为凸显。在恩平期多期海侵背景下,形成钙质砂岩与常规砂岩的储-盖耦合体,极大程度上弥补了复合陆缘盆地深部薄层泥岩垂向封盖能力的不足。新生代多期海侵作用形成了广泛分布的钙质砂岩,大幅度提升了番禺4洼和惠州26洼富砂层系的有效封盖能力。

以番禺4洼为例,其周缘恩平组不仅储层物性好,

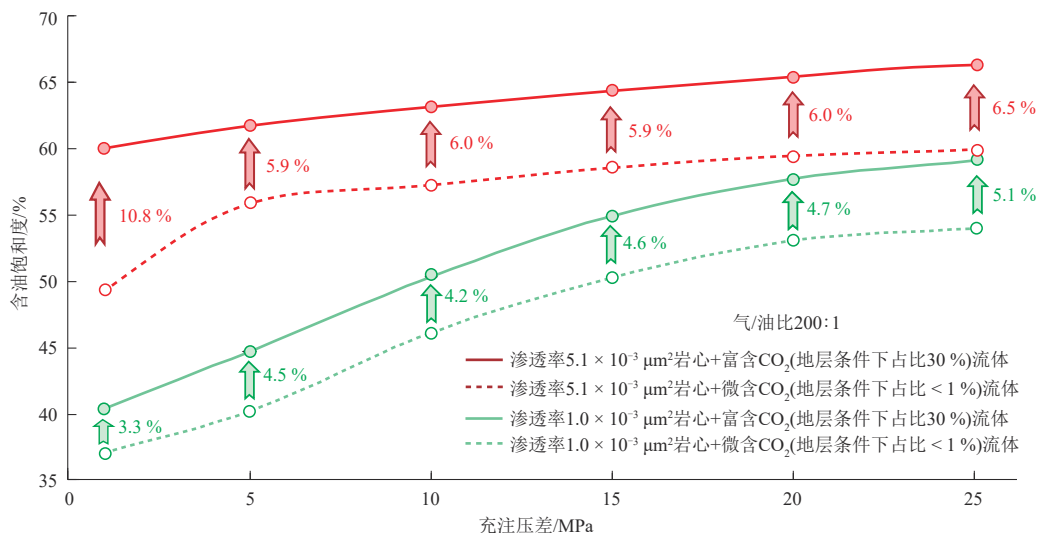


图16 珠江口盆地低渗储层充注效率动态演化特征

Fig. 16 Dynamic evolution of the hydrocarbon charging efficiency in low-permeability reservoirs in the PRMB
(地层条件下占比表示在地层实际地温与压力背景下,CO₂在油-气混相流体中的体积占比。)

而且含砂率高达61.0%~98.5%,在此“富砂贫盖”背景下,如何实现垂向上的有效封盖是恩平组形成有效圈闭的关键。最新钻探结果显示,番禺4注恩平组上段钻遇了一类特殊的砂岩——钙质砂岩,这类钙质砂岩并非零星出现,在多口钻井均有揭示。此外,这类钙质砂岩呈现“强胶结致密、高排替压力”的特点,其与下伏正常砂岩的排替压力差为0.6~1.3 MPa,理论上可封盖127~418 m的油柱高度,具有较强封盖能力,可对泥岩盖层形成有效补充。

地质历史时期大规模的海侵事件为恩平组钙质砂岩的形成奠定了沉积环境基础,晚期的成岩改造促进了区域性钙质砂岩层的发育。在构造沉降作用的主导下,珠江口复合陆缘盆地在始新世晚期发生3次规模海侵。恩平末期,珠江口盆地处于复合陆缘岩浆弧中段,地壳差异薄化作用引发了盆地内部的台阶式沉降^[56-57],促使海水由南向北沿三角洲侧翼通道推进至北部拗陷带,发生3次规模化海侵事件,而这一事件已被恩平组的微区元素数据、指相矿物和化石资料所证实。间歇海侵事件为碳酸盐胶结沉淀提供了丰富的Mg²⁺和Ca²⁺来源,并在成岩期形成2期胶结物,即早成岩期过饱和早期方解石/白云石,以及中-晚成岩期弱碱性环境下形成的铁白云石,导致砂岩胶结致密(图17)。因此,复合陆缘断陷湖盆具有“间歇海侵咸化、钙砂薄泥交互”的双盖层成因机制,海侵钙质砂岩与薄层泥岩在时-空范围内有效叠置、交互联封,显著增强了恩平组的封盖能力。上述封盖理论的提出为“富砂贫盖”背景下的油气大规模成

藏奠定了理论基础,丰富了富砂层系的油气富集保存机理。

在珠江口复合陆缘强改造背景下,运移条件和保存条件成为珠江口盆地深部油气大模成藏的两大主控因素,岩浆活动与断裂体系协同控制的超临界CO₂-烃类混合流体可强化运移,而湖相砂岩海侵旋回主导的钙质砂岩可构成沉积-成岩分异的储-盖耦合体,从不同角度保障了珠江口复合陆缘盆地深部油气的富集成藏。

3 结论

1) 揭示了珠江口盆地由弧-盆体系(主动)演化为洋-陆体系(被动)的复合陆缘构造属性。综合解析了基底岩浆弧内部先存断裂的几何学和运动学特征,提出了岩浆弧后弧-内弧-前弧“三元”结构,建立了逆冲断层控制下的岩浆弧背冲分带模式。基于岩浆弧不同结构单元先存断裂倾角、密度与裂隙规模的相关分析,建立了早文昌期内弧带高角度逆冲断层“反转深断”形成大型宽、深断陷湖盆的演化模式。

2) 珠江口盆地惠州运动对应于始新世中期(约43 Ma)周缘板块运动速率、方向和角度的重大转变,导致早文昌期湖盆发生大规模的掀斜改造。惠州运动的掀斜改造,导致早文昌期位于湖盆中心的烃源岩变形、变位至斜坡区,发现了复合陆缘盆地“早洼晚坡”的烃源岩分布规律,突破了断陷湖盆烃源岩主要位于湖盆中心的传统认识。

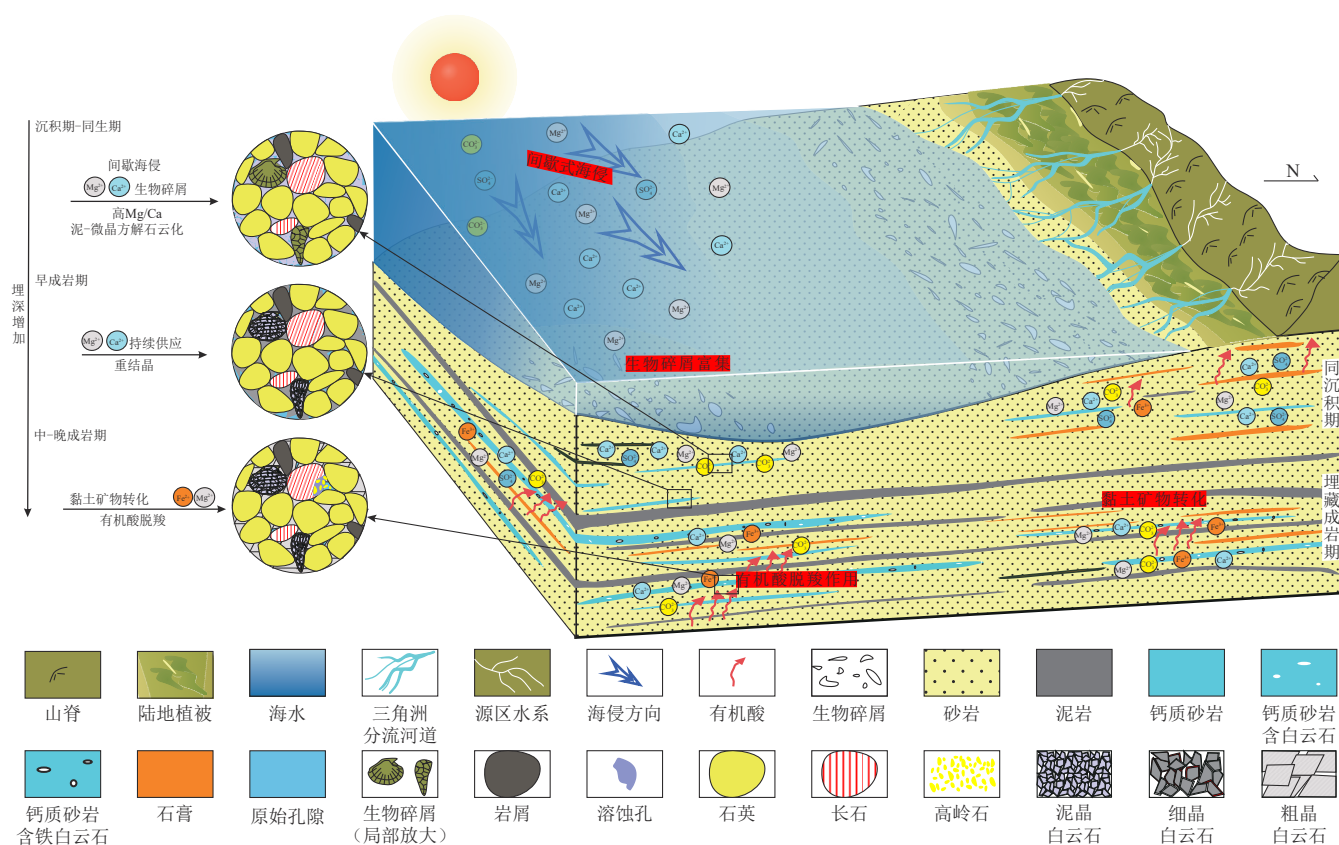


图17 珠江口盆地恩平组海侵钙质砂岩和泥岩双盖层成因模式示意图

Fig. 17 Schematic diagram showing the genetic model of dual cap rocks (i. e., transgressive calcareous sandstones and mudstones) for the Enping Formation, PRMB

3) 复合陆缘盆地深部岩浆弧结构造就富石英和富长石两大物源体系控制了碎屑岩矿物组构与贫钾-富钾成岩流体场差异分布。富长石储层酸性溶蚀环境下,高 K^+ 流体可抑制斜长石强溶蚀过程中高岭石沉淀。富石英储层中,超过 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高地温下,贫钾流体可使黏土伊利石转化率降低到常规流体条件下的60%以下。

4) 从不同尺度揭示了珠江口复合陆缘盆地深部油气成藏特征,提出优质烃源与优势储层是复合陆缘盆地深部油气成藏的基础条件,而运移与保存条件是控制深部油气差异成藏的关键要素。其中,超临界状态的 CO_2 大幅度提高烃类的充注效率,解决了深部源内低渗难充注与源外难运移的问题,而钙质砂岩-泥岩双盖层体系为富砂背景下的油气规模成藏提供了重要保障。

参 考 文 献

- [1] FRANKE D. Rifting, lithosphere breakup and volcanism: Comparison of magma-poor and volcanic rifted margins [J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 43: 63-87.
- [2] ZHU Junjiang, QIU Xuelin, KOPP H, et al. Shallow anatomy of a continent-ocean transition zone in the northern South China Sea from multichannel seismic data [J]. Tectonophysics, 2012, 554/557: 18-29.
- [3] LARSEN H C, MOHN G, NIRRENGARTEN M, et al. Rapid transition from continental breakup to igneous oceanic crust in the South China Sea [J]. Nature Geoscience, 2018, 11 (10): 782-789.
- [4] 孙珍, 李付成, 林间, 等. 被动大陆边缘张-破裂过程与岩浆活动: 南海的归属[J]. 地球科学, 2021, 46(3): 770-789.
SUN Zhen, LI Fucheng, LIN Jian, et al. The rifting-breakup process of the passive continental margin and its relationship with magmatism: The attribution of the South China Sea [J]. Earth Science, 2021, 46(3): 770-789.
- [5] WANG Pinxian, HUANG Chiyue, LIN Jian, et al. The South China Sea is not a mini-Atlantic: plate-edge rifting vs intra-plate rifting [J]. National Science Review, 2019, 6(5): 902-913.
- [6] FAN Chaoyan, XIA Shaohong, CAO Jinghe, et al. Seismic constraints on a remnant Mesozoic forearc basin in the northeastern South China Sea [J]. Gondwana Research, 2022, 102: 77-94.
- [7] LI Fucheng, SUN Zhen, YANG Hongfeng. Possible spatial distribution of the Mesozoic volcanic arc in the present-day South China Sea continental margin and its tectonic implications [J].

- Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2018, 123(8): 6215–6235.
- [8] SUO Yanhui, LI Sanzhong, JIN Chong, et al. Eastward tectonic migration and transition of the Jurassic-Cretaceous Andean-type continental margin along Southeast China [J]. Earth-Science Reviews, 2019, 196: 102884.
- [9] 高阳东, 张向涛, 张丽丽, 等. 珠江口盆地中生代陆缘岩浆弧地质特征及构造背景[J]. 地球科学, 2022, 47(7): 2317–2327.
- GAO Yangdong, ZHANG Xiangtao, ZHANG Lili, et al. Geological characteristics and tectonic settings of Mesozoic continental margin magmatic arc in Pearl River Mouth Basin [J]. Earth Science, 2022, 47(7): 2317–2327.
- [10] 张成晨, 许长海, 何敏, 等. 东海到南海晚中生代岩浆弧及陆缘汇聚体制综述[J]. 地球科学进展, 2019, 34(9): 950–961.
- ZHANG Chengchen, XU Changhai, HE Min, et al. Late Mesozoic convergent continental margin with magmatic arc from east to South China Seas: A review [J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(9): 950–961.
- [11] 朱伟林, 徐旭辉, 王斌, 等. 华南晚中生代陆弧迁移与海域盆地演化[J]. 地学前缘, 2022, 29(6): 277–290.
- ZHU Weilin, XU Xuhui, WANG Bin, et al. Late Mesozoic continental arc migration in southern China and its effects on the evolution of offshore forearc basins [J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(6): 277–290.
- [12] 高阳东, 刘军, 彭光荣, 等. 珠江口盆地油气勘探新领域及资源潜力[J]. 石油学报, 2024, 45(1): 183–201.
- GAO Yangdong, LIU Jun, PENG Guangrong, et al. New fields and resource potential of oil and gas exploration in Pearl River Mouth Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(1): 183–201.
- [13] 刘军, 蔡哲, 庞雄奇, 等. 珠江口盆地陆丰凹陷古近系多动力-多期次-多要素复合成藏区定量预测与评价[J]. 地球科学, 2022, 47(7): 2481–2493.
- LIU Jun, CAI Zhe, PANG Xiongqi, et al. Quantitative prediction and evaluation of Paleogene favorable hydrocarbon accumulation areas with multi-dynamic-stage-factor combination in Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Earth Science, 2022, 47(7): 2481–2493.
- [14] 王梓颐, 李洪博, 郑金云, 等. 珠江口盆地番禺27洼裂陷期构造演化及其对源-汇系统的控制[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3): 626–636.
- WANG Ziyi, LI Hongbo, ZHENG Jinyun, et al. Structural evolution and its control on source-to-sink system of Panyu 27 Sag in Pearl River Mouth Basin during rifting [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 626–636.
- [15] 徐长贵, 高阳东, 刘军, 等. 南海东部富砂砾型大中型油气田发现与启示——以珠江口盆地惠州26洼古近系恩平组为例[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(1): 14–27.
- XU Changgui, GAO Yangdong, LIU Jun, et al. Discovery and inspiration of large- and medium-sized glutenite-rich oil and gas fields in the eastern South China Sea: An example from Paleogene Enping Formation in Huizhou 26 subsag, Pearl River Mouth Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(1): 14–27.
- [16] 徐长贵, 高阳东, 刘军, 等. 珠江口盆地开平南大型深水深层油田发现与认识创新[J]. 中国海上油气, 2024, 36(1): 1–13.
- XU Changgui, GAO Yangdong, LIU Jun, et al. Discovery of large deep-water and deep-formation oilfield in South Kaiping Sag of Pearl River Mouth Basin and new geological understandings [J]. China Offshore Oil and Gas, 2024, 36(1): 1–13.
- [17] 徐长贵, 高阳东, 刘军, 等. 珠江口盆地西江凹陷番禺4洼古近系勘探重大发现及其意义[J]. 石油学报, 2024, 45(7): 1031–1043.
- XU Changgui, GAO Yangdong, LIU Jun, et al. Major discoveries and significance of hydrocarbon exploration in the Paleogene reservoirs of Panyu 4 subsag, Xijiang Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(7): 1031–1043.
- [18] LI Zhengxiang, LI Xianhua. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model [J]. Geology, 2007, 35(2): 179–182.
- [19] LI Zhengxiang, LI Xianhua, CHUNG S L, et al. Magmatic switch-on and switch-off along the South China continental margin since the Permian: Transition from an Andean-type to a Western Pacific-type plate boundary [J]. Tectonophysics, 2012, 532/535: 271–290.
- [20] XU Changhai, SHI Hesheng, BARNES C G, et al. Tracing a late Mesozoic magmatic arc along the southeast Asian margin from the granitoids drilled from the northern South China Sea [J]. International Geology Review, 2016, 58(1): 71–94.
- [21] XU Changhai, ZHANG Lu, SHI Hesheng, et al. Tracing an Early Jurassic magmatic arc from south to east China seas [J]. Tectonics, 2017, 36(3): 466–492.
- [22] CUI Yuchi, SHAO Lei, LI Zhengxiang, et al. A Mesozoic Andean-type active continental margin along coastal South China: New geological records from the basement of the northern South China Sea [J]. Gondwana Research, 2021, 99: 36–52.
- [23] 彭光荣, 王绪诚, 陈维涛, 等. 珠江口盆地惠州26洼东南缘古近系恩平组上段断-拗转换期源-汇系统及勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3): 613–625.
- PENG Guangrong, WANG Xucheng, CHEN Weitao, et al. Source-to-sink system during rifting-depression transition period and its exploration significance: A case study of the Upper Enping Formation at southeastern margin of Huizhou 26 sub-sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 613–625.
- [24] BUSBY C J, INGERSOLL R V. Tectonics of sedimentary basins [M]. Cambridge, Mass.: Blackwell Science, 1995.

- [25] YE Qing, MEI Lianfu, SHI Hesheng, et al. The Late Cretaceous tectonic evolution of the South China Sea area: An overview, and new perspectives from 3D seismic reflection data [J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 187: 186–204.
- [26] YE Qing, MEI Lianfu, SHI Hesheng, et al. The influence of pre-existing basement faults on the Cenozoic structure and evolution of the proximal domain, northern South China Sea rifted margin [J]. *Tectonics*, 2020, 39(3): e2019TC005845.
- [27] YAN Pin, ZHOU Di, LIU Zhaoshu. A crustal structure profile across the northern continental margin of the South China Sea [J]. *Tectonophysics*, 2001, 338(1): 1–21.
- [28] DENG Hongdan, REN Jianye, PANG Xiong, et al. South China sea documents the transition from wide continental rift to continental break up [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 4583.
- [29] SUN Zhen, LIN Jian, QIU Ning, et al. The role of magmatism in the thinning and breakup of the South China Sea continental margin: Special topic: The South China Sea ocean drilling [J]. *National Science Review*, 2019, 6(5): 871–876.
- [30] HAO Shihao, MEI Lianfu, PANG Xiong, et al. Rifted margin with localized detachment and polyphase magmatism: A new model of the northern South China Sea [J]. *GSA Bulletin*, 2022, 135(7/8): 1667–1687.
- [31] 吴克强, 解习农, 裴健翔, 等. 超伸展陆缘盆地深部结构及油气勘探意义——以琼东南盆地为例 [J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(3): 651–661.
- WU Keqiang, XIE Xinong, PEI Jianxiang, et al. Deep architecture of hyperextended marginal basin and implications for hydrocarbon exploration: A case study of Qiongdongnan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(3): 651–661.
- [32] PONGWAPEE S, MORLEY C K, WON-IN K. Impact of pre-existing fabrics and multi-phase oblique extension on Cenozoic fault patterns, Wichianburi sub-basin of the Phetchabun rift, Thailand [J]. *Journal of Structural Geology*, 2019, 118: 340–361.
- [33] WILSON J T. Did the Atlantic close and then re-open? [J]. *Nature*, 1966, 211(5050): 676–681.
- [34] HUERTA A D, HARRY D L. Wilson cycles, tectonic inheritance, and rifting of the North American Gulf of Mexico continental margin [J]. *Geosphere*, 2012, 8(2): 374–385.
- [35] TOMMASI A, VAUCHEZ A. Continental rifting parallel to ancient collisional belts: An effect of the mechanical anisotropy of the lithospheric mantle [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 185(1/2): 199–210.
- [36] 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): 447–461.
- SHI Hesheng, DU Jiayuan, MEI Lianfu, et al. Huizhou movement and its significance in Pearl River Mouth Basin, China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(3): 447–461.
- [37] 张光亚, 马锋, 梁英波, 等. 全球深层油气勘探领域及理论技术进展 [J]. *石油学报*, 2015, 36(9): 1156–1166.
- ZHANG Guangya, MA Feng, LIANG Yingbo, et al. Domain and theory-technology progress of global deep oil & gas exploration [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(9): 1156–1166.
- [38] 张功成, 纪沫, 陈莹, 等. 琼东南盆地“气聚集带”的成藏特征与勘探潜力 [J]. *石油学报*, 2024, 45(1): 226–240.
- ZHANG Gongcheng, JI Mo, CHEN Ying, et al. Accumulation characteristics and exploration potentials of gas accumulation belt in Qiongdongnan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2024, 45(1): 226–240.
- [39] 史玉玲, 龙祖烈, 张向涛, 等. 珠江口盆地恩平凹陷恩平17洼油气动态成藏过程 [J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(5): 1279–1289.
- SHI Yuling, LONG Zulie, ZHANG Xiangtao, et al. Exploring the dynamic hydrocarbon accumulation process of the Enping 17 subsag in the Enping Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(5): 1279–1289.
- [40] 马兵山. 南海北部珠江口盆地新生代构造特征及其演化 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
- MA Bingshan. The Cenozoic structural characteristics and tectonic evolution of the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea [D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2020.
- [41] PETERS K E. Guidelines for evaluating petroleum source rock using programmed pyrolysis [J]. *AAPG Bulletin*, 1986, 70(3): 318–329.
- [42] 朱俊章, 施和生, 舒誉, 等. 珠江口盆地烃源岩有机显微组分特征与生烃潜力分析 [J]. *石油实验地质*, 2007, 29(3): 301–306.
- ZHU Junzhang, SHI Hesheng, SHU Yu, et al. Organic maceral characteristics and hydrocarbon-generating potentials of source rocks in the Pearl River Mouth Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2007, 29(3): 301–306.
- [43] PETERS K E, WALTERS C C, MOLDOWAN J M. The biomarker guide. Volume 1, Biomarkers and isotopes in the environment and human history [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [44] LIU Zhaoqian, MOLDOWAN J M, NEMCHENKO-ROVENSKAYA A, et al. Oil families and mixed oil of the North-Central West Siberian Basin, Russia [J]. *AAPG Bulletin*, 2016, 100(3): 319–343.
- [45] 刘豪, 徐长贵, 高阳东, 等. 断陷湖盆低勘探区源-汇系统与烃源岩预测——以珠江口盆地珠一坳陷北部洼陷区为例 [J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(3): 565–583.
- LIU Hao, XU Changgui, GAO Yangdong, et al. Source-to-sink system and hydrocarbon source rock prediction of underexplored areas in rifted lacustrine basins: A case study on northern lows in Zhu I Depression, Pearl River Mouth Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(3): 565–583.

- [46] 操应长, 远光辉, 杨海军, 等. 含油气盆地深层—超深层碎屑岩油气勘探现状与优质储层成因研究进展[J]. 石油学报, 2022, 43(1): 112–140.
- CAO Yingchang, YUAN Guanghui, YANG Haijun, et al. Current situation of oil and gas exploration and research progress of the origin of high-quality reservoirs in deep-ultra-deep clastic reservoirs of petroliferous basins[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(1): 112–140.
- [47] 唐晓音, 钟畅, 杨树春, 等. 中国海及邻区盆地现今地温场特征及其影响因素[J]. 地质学报, 2023, 97(3): 911–921.
- TANG Xiaoyin, ZHONG Chang, YANG Shuchun, et al. Characteristics and influence factors of the present geothermal field for basins in China's offshore and adjacent areas[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(3): 911–921.
- [48] 远光辉, 彭光荣, 张丽丽, 等. 珠江口盆地白云凹陷古近系深层高变温背景下储层成岩作用与低渗致密化机制[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(1): 44–64.
- YUAN Guanghui, PENG Guangrong, ZHANG Lili, et al. Diagenesis and low-permeability tightening mechanisms of the deep Paleogene reservoirs under high temperature and highly variable geothermal gradients in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(1): 44–64.
- [49] NADEAU P H, SUN Shaoqing, EHRENBORG S N. The “Golden Zone” temperature distribution of oil and gas occurrence examined using a global empirical database[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2023, 158(Part A): 106507.
- [50] 马文睿. 丽水凹陷幔源CO₂充注对油气成藏的影响[J]. 复杂油气藏, 2023, 16(3): 282–288.
- MA Wenrui. Influence of mantle-source CO₂ charging on hydrocarbon accumulation in Lishui Sag[J]. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 2023, 16(3): 282–288.
- [51] ZHU Dongya, LIU Quanyou, MENG Qingqiang, et al. Enhanced effects of large-scale CO₂ transportation on oil accumulation in oil-gas-bearing basins—Implications from supercritical CO₂ extraction of source rocks and a typical case study[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 92: 493–504.
- [52] HOU Dali, JIA Ying, SHI Yunqing, et al. Experimental study on the effect of CO₂ on phase behavior characteristics of condensate gas reservoir[J]. *Journal of Chemistry*, 2020, 2020(1): 6041081.
- [53] ZHANG Angang, FAN Zifei, ZHAO Lun. An investigation on phase behaviors and displacement mechanisms of gas injection in gas condensate reservoir[J]. *Fuel*, 2020, 268: 117373.
- [54] 李威, 窦立荣, 文志刚, 等. 幔源CO₂对中非裂谷系油气成藏的影响: 以 Palogue 油田为例[J]. 地球科学, 2024, 49(10): 3488–3498.
- LI Wei, DOU Lirong, WEN Zhigang, et al. Effect of mantle-derived CO₂ on hydrocarbon accumulation in Central African rift system: A case study of Palogue Oilfield[J]. *Earth Science*, 2024, 49(10): 3488–3498.
- [55] 王璐, 张一帆, 刘逸盛, 等. 页岩储层原油赋存特征及CO₂–原油竞争吸附机制分子动力学[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023, 47(4): 128–136.
- WANG Lu, ZHANG Yifan, LIU Yisheng, et al. Molecular dynamics analysis on occurrence characteristics of shale oil and competitive adsorption mechanism of CO₂ and oil[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2023, 47(4): 128–136.
- [56] 许淑梅, 吴鹏, 张威, 等. 南海关键地质历史时期的古海岸线变化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(1): 1–10.
- XU Shumei, WU Peng, ZHANG Wei, et al. Paleo-coastline changes in South China Sea in some critical times[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2013, 33(1): 1–10.
- [57] 高阳东, 林鹤鸣, 汪旭东, 等. 幕式裂陷控注背景下的烃源岩分布及岩浆改造——以珠—坳陷番禺4洼为例[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2021, 41(3): 151–160.
- GAO Yangdong, LIN Heming, WANG Xudong, et al. Source rock distribution pattern in an episodic rifting sag and later stage magmatic reformation: A case from Panyu 4 Sag, Zhu I Depression[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41(3): 151–160.

(编辑 许 诺)