

doi:10.3799/dqkx.2012.075

珠江口盆地深水区 23.8 Ma 构造事件地质响应及其形成机制

吴景富¹, 张功成¹, 王璞珺², 谢晓军¹, 胡圣标³, 漆家福⁴

1. 中海油研究总院, 北京 100027

2. 吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061

3. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

4. 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029

摘要: 南海珠江口盆地深水区 23.8 Ma 发育一次重大构造事件并同时形成了重要的不整合界面。研究表明:(1)23.8 Ma 构造事件是珠江口盆地珠二坳陷新生代构造演化的转换面,它是盆地裂陷阶段和裂后阶段的分界面,23.8 Ma 之前为断裂控盆,盆地以伸展和走滑断裂系统为主;23.8 Ma 之后为断裂和热作用共同控盆,到晚期以热作用为主。(2)23.8 Ma 构造事件导致盆地沉积充填的突变,通过微量元素和同位素分析,23.8 Ma 以前盆地物源来自东南沿海花岗岩源区,23.8 Ma 以后物源来自青藏东侧及云贵高原源区。23.8 Ma 界面是南海北部陆架坡折从白云主凹南侧向北侧跳跃的分界面,相应地沉积环境由浅海陆架沉积突变为陆坡深水沉积环境。(3)23.8 Ma 构造事件是盆地热体制的转折面,典型钻井热史定量恢复揭示地温梯度在 23.8 Ma 附近明显存在一个突变面,以 23.8 Ma 为界,新生代早期到渐新世末显示地温梯度上升,指示盆地经历了拉张过程;23.8 Ma 之后显示地温梯度下降,指示盆地经历热沉降过程。(4)23.8 Ma 构造事件是火山活动的转化面,23.8 Ma 之前显示成分单一的大规模玄武质岩浆喷发作用逐渐增强,而之后玄武质岩浆喷发作用逐渐减弱。总结了 23.8 Ma 构造事件的动力学模型,提出了软流圈流动主导的地幔热底辟作用是南海破裂成洋的动力来源,南海扩张脊的跃迁及地幔热底辟作用改变是导致 23.8 Ma 构造事件的主因。

关键词: 南海;珠江口盆地;深水区;23.8 Ma 构造事件;地球化学;构造。

中图分类号: P542

文章编号: 1000-2383(2012)04-0654-13

收稿日期: 2011-11-20

Geological Response and Forming Mechanisms of 23.8 Ma Tectonic Events in Deepwater Area of the Pearl River Mouth Basin in South China Sea

WU Jing-fu¹, ZHANG Gong-cheng¹, WANG Pu-jun², XIE Xiao-jun¹, HU Sheng-biao³, QI Jia-fu⁴

1. CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China

2. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

3. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

4. State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract: An important tectonic event and associated unconformity surface occurred in deepwater area of the Pearl River Mouth basin, South China Sea. Research results indicate: (1) The 23.8 Ma tectonic events is the convert face of Cenozoic tectonic evolution in Zhu II depression of the basin, which divides the Paleogene syn-rifting stage and Neogene post-rifting stage. In the former, the basin-forming mechanisms are dominated by the stretching and strike-slip faults systems, however, in the later, faulting and geothermal effect (late in geothermal effect primarily) control the basin evolution. (2) The 23.8 Ma tectonic events resulted in great change in basin sedimentary filling. Through the analysis of trace elements and isotope, the sediment provenance comes from the southeast coastal granite materials before the 23.8 Ma, but from the east of the Qinghai-Tibet plateau and the Yunnan-Guizhou plateau after 23.8 Ma. At the same time, the slope-break surface jumps from south to north in the

基金项目: 国家科技重大专项(No. 2008ZX05025-002).

作者简介: 吴景富(1963-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事海洋石油天然气勘探和深水油气地质的相关研究工作。

E-mail: wujf1@cnooc.com.cn

Baiyun depression, and sedimentary facies change also from shallow continental shelf to deepwater slop environments. (3) The 23.8 Ma tectonic events is a transferring surface of basin geothermal system. The quantitative restore of typical drilling thermal history shows geothermal gradient obviously changes at the 23.8 Ma. Through the thermal history inversion in deepwater area of the Pearl River Mouth basin, geothermal gradient rising process occur during the Paleogene, indicating the basin underwent extensional process, and the geothermal gradient falls clearly after 23.8 Ma, indicating the basin underwent a geothermal subsidence process. (4) The 23.8 Ma tectonic events reveals a great change in volcanic activity, the single ingredient of large basaltic magma eruption gradually strengthened before the 23.8 Ma, and the eruption gradually weakened after the surface. A dynamic model of the 23.8 Ma tectonic events is established. The mantle diapir from the asthenosphere flowing is regarded as the power source for the South China Sea spreading. The 23.8 Ma tectonic events resulted from the jumping of the South China Sea spreading and change in mantle diapir possibly related with the deep magma escaping.

Key words: South China Sea; Pearl River Mouth basin; deepwater area; 23.8 Ma tectonic events; geochemistry; tectonics.

南海位于欧亚板块、菲律宾板块和印度洋板块 3 大板块的交汇处,是西太平洋最大的边缘海。南海北部陆缘现今的深水区发育规模巨大的盆地(水深大于 300 m),由于其巨大的油气远景而受到国内外石油公司的重视(张功成等,2007,2010;朱伟林,2009,2010a,2010b;朱伟林等,2009,2010)。珠江口盆地深水区主要位于南海北部珠二坳陷内,包括白云凹陷、荔湾凹陷、开平凹陷和顺德凹陷。坳陷北部以番禺低隆起、神狐隆起与珠一、珠三坳陷相隔,南部以南部隆起为界,东部与东沙隆起相邻,西部以神狐隆起为界。坳陷整体呈 NE-SW 向展布,水深为 0.2~2.0 km,面积约为 $4 \times 10^4 \text{ km}^2$,跨越大陆边缘的陆坡—深海平原区,即洋陆过渡带,发育巨厚的新

生代沉积物,具有良好的油气资源前景(图 1)。盆地新生代经历过 5 次大的构造运动,分别为珠琼运动一幕、珠琼运动二幕、南海运动、白云运动和东沙运动(金庆焕,1992;金庆焕和李唐根,2000;林长松等 2007;董冬冬等,2009),其中南海运动对南海海域现今格局的形成产生了巨大的影响。

何廉声(1984)在研究南海北部构造运动时,发现在渐新世和中中新世地层之间存在一个区域不整合面,他认为此期间南海存在一次构造运动,是海底扩张前的构造运动,因此将其命名为“南海运动”。不同的学者对南海运动发生的时间及形成机制存在不同的观点(吴长林,1984;姚伯初,1993;詹文欢,1993;姚永坚等,2002;万玲等,2003;钟志洪等,

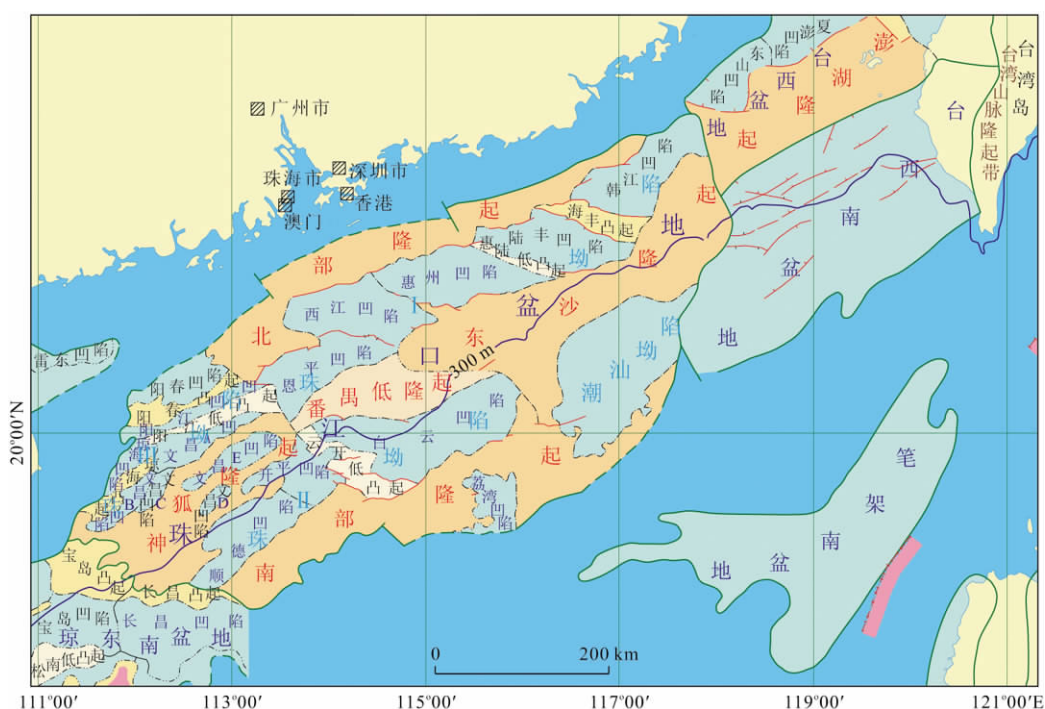


图 1 珠江口盆地深水区及其周边区域构造划分

Fig. 1 Structural units of deepwater and its surrounding area in the Pearl River Mouth basin

2004;李文勇和李东旭,2006;林长松等,2006,2007;詹文欢等,2006;蔡周荣等,2010).姚伯初等(2004)认为南海中央海盆扩张的时间为 32~17 Ma,由于太平洋板块向欧亚板块俯冲,俯冲的大洋岩石圈已达 700 km 深,阻挡了欧亚大陆上地幔往东南方向流动,从而转向南流动,引起南海地区南北向扩张,产生了南海中央海盆.南海运动过程中的 23.8 Ma(古近系与新近系的分界面)对珠江口盆地深水区具有

重要地质意义.本文首次系统地分析了珠江口盆地深水区 23.8 Ma 构造事件及其地质响应,并提出了 23.8 Ma 构造事件的动力学模型.

1 23.8 Ma 为盆地构造演化转换面

珠江口盆地珠二坳陷新生代经历了 4 个构造演化阶段:前新生代盆地演化阶段、古近纪裂陷阶段、

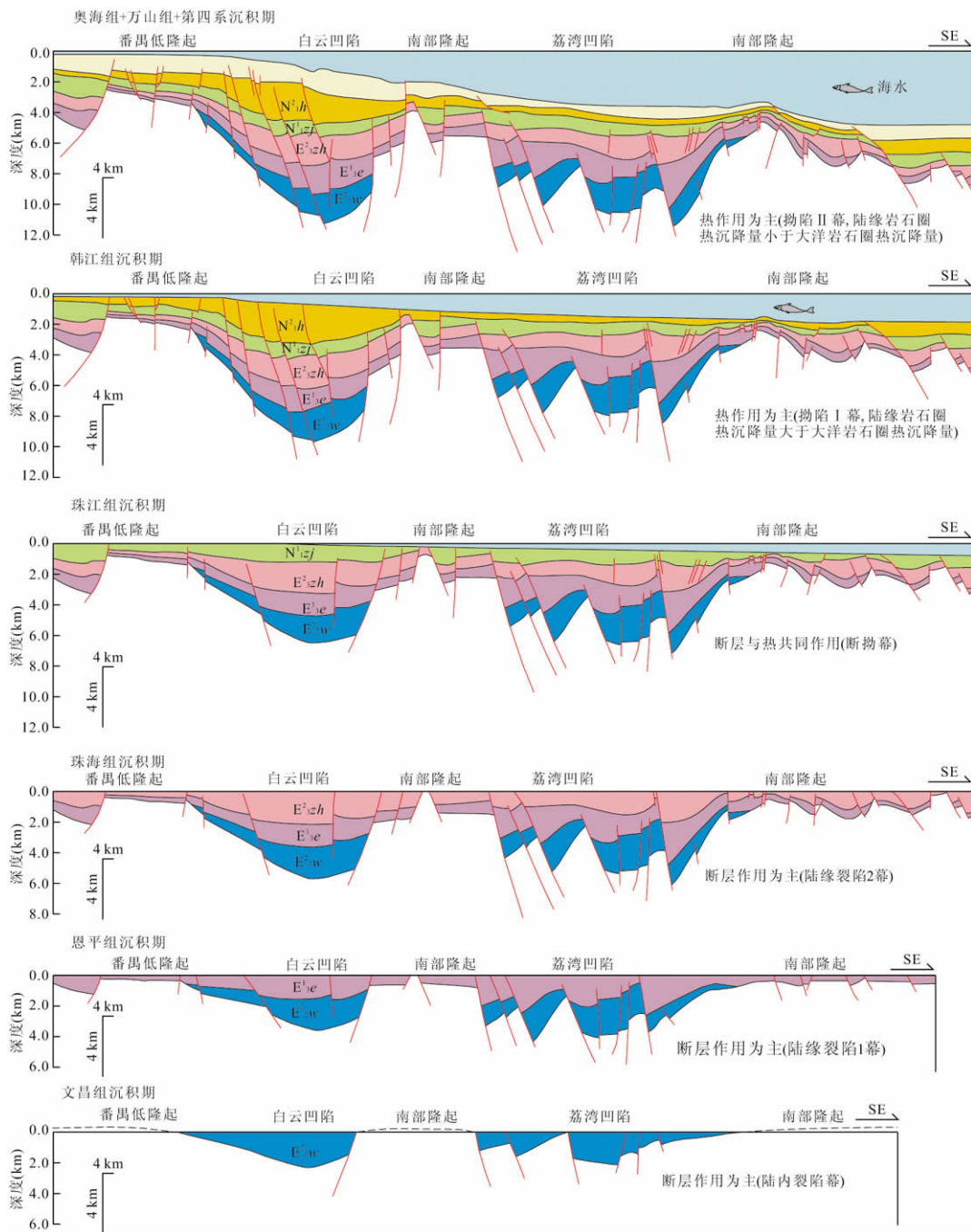


图 2 珠江口盆地深水区构造演化剖面

Fig. 2 Structural evolution of deepwater area in the Pearl River Mouth basin

新近纪裂后拗陷阶段和新近纪裂后加速沉降阶段(图 2)。

1.1 前新生代演化阶段(50 Ma 之前)

钻井资料与地震剖面揭示了南海海域存在中生代地层,沉积地层以陆缘碎屑地层为主(王嘹亮等,2009)。中生代末构造运动以中特提斯洋的闭合为主要特征,其中在南海东北部发育一条隐伏的俯冲带,并且被 NW 向基底断裂错断(陈汉宗等,2005)。根据地震剖面判断,中生代地层与新生代地层呈大角度相交,表明中生代末白云凹陷及其南部可能受俯冲带影响而出现盆地挤压反转。

1.2 新生代裂陷阶段

珠二拗陷裂陷演化阶段的划分具有很强的区域性特点,不同地域裂陷演化阶段经历的时间不同,开平—顺德凹陷及白云凹陷北部番禺低隆起上 T70 反射界面以下盆地为明显的半地堑结构,受断层活动影响,地层向隆起及凸起处减薄,而白云凹陷及荔湾凹陷内部 T60 以下为明显的半地堑结构。因此,开平—顺德凹陷及番禺低隆起裂陷阶段可以划分为 2 个裂陷幕,而白云凹陷及荔湾凹陷裂陷阶段则划分为 3 个裂陷幕。

(1)始新世(50~40 Ma)裂陷 1 幕:该时期南海北部盆地强烈伸展,开平—顺德凹陷、白云凹陷及荔湾凹陷的盆地雏形形成,盆地内部断层活动速率及沉降速率较大,开平—顺德凹陷及荔湾凹陷盆地形态表现为地堑及半地堑结构,而白云凹陷则表现为中部下凹的“断拗”型盆地。总体上看,裂陷 1 幕断层活动较少,除凹陷边界断层活动外,凹陷内部断层并不发育,仅局部凹陷内发育次级断层。

(2)早渐新世(40~30 Ma)裂陷 2 幕:该时期盆地仍然表现出强烈活动特征,盆地内断层活动速率及沉降速率较大,盆地范围扩大至北部及南部隆起

之上,各凹陷仍然表现出半地堑的形态。盆地内部断层数量增多,仍然以开平—顺德凹陷、白云凹陷及荔湾凹陷为沉积中心。

(3)晚渐新世(30~23.3 Ma):该时期盆地表现出明显的差异演化特征,白云凹陷、荔湾凹陷仍然处于裂陷阶段,继续保持较强的断层活动速率及沉降速率,而番禺低隆起及开平—顺德凹陷的活动速率明显减弱,盆地进入了裂后拗陷期。

1.3 早中新世(23.3~16 Ma)裂后拗陷阶段

该时期盆地沉降速率及断层活动速率减弱,盆地表现为垂向沉降特征,珠江组在全区均匀分布厚度差别较小。该时期盆地隆凹相间的格局进一步减弱,盆地内大部分裂陷期断层停止活动。

1.4 中中新世—第四纪(16 Ma 至今)裂后加速沉降阶段

该阶段构造活动进一步增强。盆地地层向南倾斜,表现为南部强烈沉降。断层活动速率与沉降速率均再度增大,盆地内形成陆架—陆坡—深海平原的沉积格局,在陆坡处沉积地层明显增厚,盆地表现为向南部减薄的“挠曲”盆地形态。其中在黄流组沉积期白云凹陷及北部番禺低隆起处发育一系列次级断层,部分断层向下切割至基底。

从盆地的整体构造演化过程可以看出,23.8 Ma 前后,盆地的控盆机制发生了重大的转变。23.8 Ma 之前为裂谷阶段,盆地以断层作用为主,表现为断陷特征。23.8 Ma 之后为非典型被动陆缘阶段,拗陷早期(珠江组沉积时期)受断层和热共同作用,拗陷晚期(珠江组沉积以后)以热作用为主。

珠江口盆地深水区主要存在 3 个断裂系统,不同的断裂系统发育于不同的构造层系(图 3)。23.8 Ma 以前的断裂系统主要为伸展和走滑(或伸展走滑)断裂系统,其中伸展断裂系统主要影响断陷

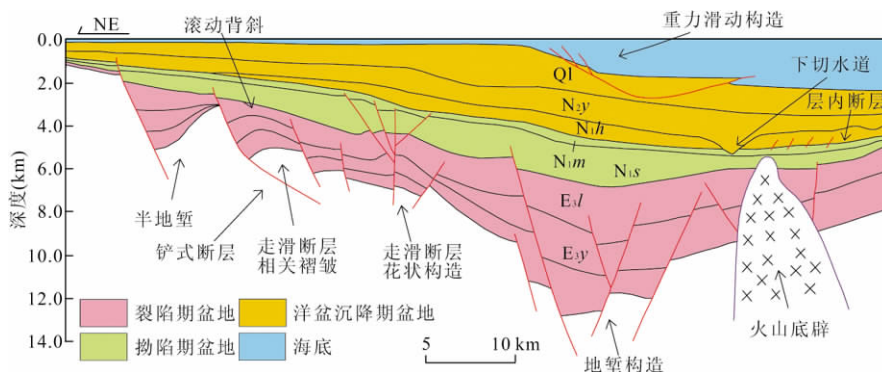


图 3 珠江口盆地深水区新生代盆地构造样式及其分布模式

Fig. 3 Cenozoic structural and distribution pattern of deepwater area in Pearl River Mouth basin

期构造层,走滑(或伸展走滑)断裂系统则影响到断陷和断拗期构造层;23.8 Ma 以后的断裂系统主要为重力滑动断裂系统,主要发生在断拗构造层和晚期的挠褶拗陷构造层同沉积期(图 3)。

2 23.8 Ma 为盆地沉积充填突变面

白云凹陷位于中生代俯冲带的构造软弱带,处于减薄的洋陆过渡地壳和盆地构造转换带位置,此处是构造变形集中区,在区域拉张背景下,幔源物质上升,岩浆活动较强烈,地壳减薄,导致岩石圈强度急剧降低并发生韧性变形,在经历了较短暂的脆性变形、发育一系列半地堑之后即进入“又断又拗”的韧性伸展阶段,产生了垂向沉降变形,形成大型的断—拗凹陷。

通过白云凹陷 LW3-1-1 井、PY33-1-1 井地球化学分析可以看出,尽管这 2 口井的微量元素存在多次改变,但其最大的变化界面均在 23.8 Ma,与 ODP1148 站沉积物反映的构造事件完全相同,说明 23.8 Ma 反映的重要构造事件在南海北部地区普遍存在(邵磊等,2004,2005)(图 4)。

图 5 和图 6 显示,1148 站沉积物 Nd 同位素值完全落入华南地块的范畴,其沉积物源应为华南地区。1148 站 Nd 同位素值有随时间发生改变的现象,尤其是在 485~476 m, Lu 同位素 $\epsilon_{Nd}(0)$ 值,从早渐新世的 -11~-9 降至中新世的 -13~-12,说明当时南海的沉积源区发生了较大的改变。

LH19-4-1 井的 Nd 同位素分析取自深度 1 685~2 621 m 之间,为早—中中新世地层,相当于 1148 站深度 305~400 m 左右的沉积地层,其 Nd 同位素平均值为 -11.958 7,与同时代 1148 站的数值

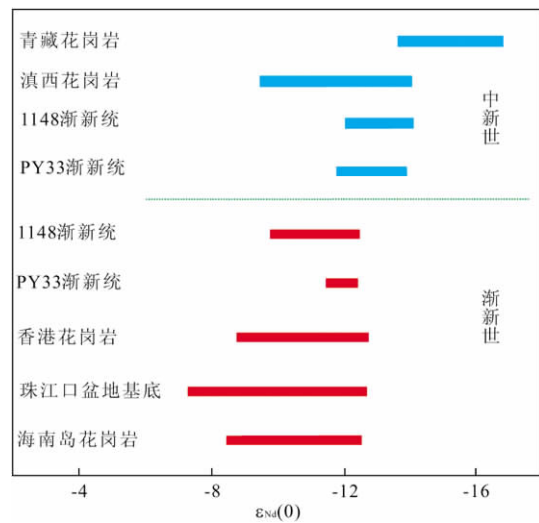


图 5 南海周边及可能源区 Nd 同位素分布示意

Fig. 5 Distribution of isotope Nd in South China Sea and other possible provenance

完全相同。同时, PY33-1-1 井沉积物 Nd 同位素值随时间演化的规律与 1148 站也完全相同,这些分析结果表明 1148 站沉积物与珠江口盆地具有相同的源区。

图 6 中反映出, PY33-1-1 钕同位素 $\epsilon_{Nd}(0)$ 值与 1148 站一样,以 23.8 Ma 为界可以分为 2 个阶段,在恩平—珠海组时期钕同位素 $\epsilon_{Nd}(0)$ 值较高,平均为 -10 左右,至中新世则降为 -13~-12,同样说明当时南海沉积源区发生了较大改变,表明在沉积物源演化上 1148 站与珠江口盆地的一致性。

$\epsilon_{Nd}(0)$ 值与岩石类型直接相关,来自地幔岩浆岩的 $\epsilon_{Nd}(0)$ 值相对较高,如 LH19-4-1 井的闪长岩基底, $\epsilon_{Nd}(0)$ 值为 -5.846 113,而 PY27-1-1 井花岗岩伟晶岩基底的 $\epsilon_{Nd}(0)$ 值为 -6.636 604,总体这些基底岩石的 $\epsilon_{Nd}(0)$ 值为 -8.297 765~-3.226 026。这些

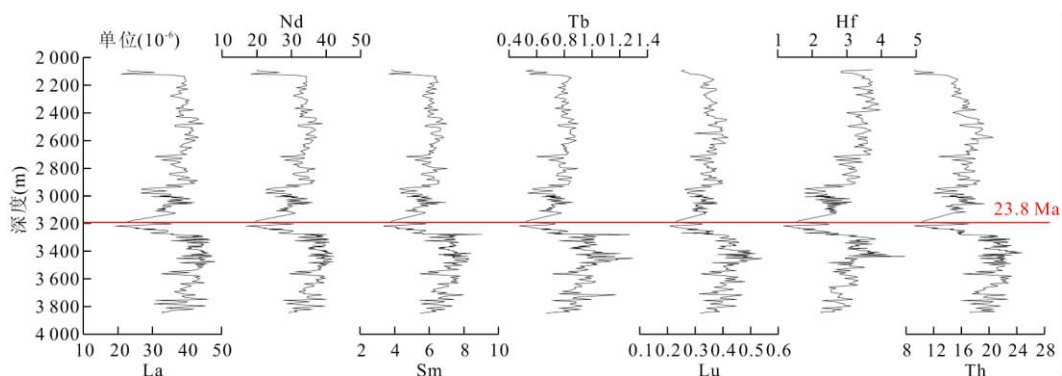


图 4 LW3-1-1 井沉积物微量元素变化特征

Fig. 4 Trace elements variation of sediment in LW3-1-1

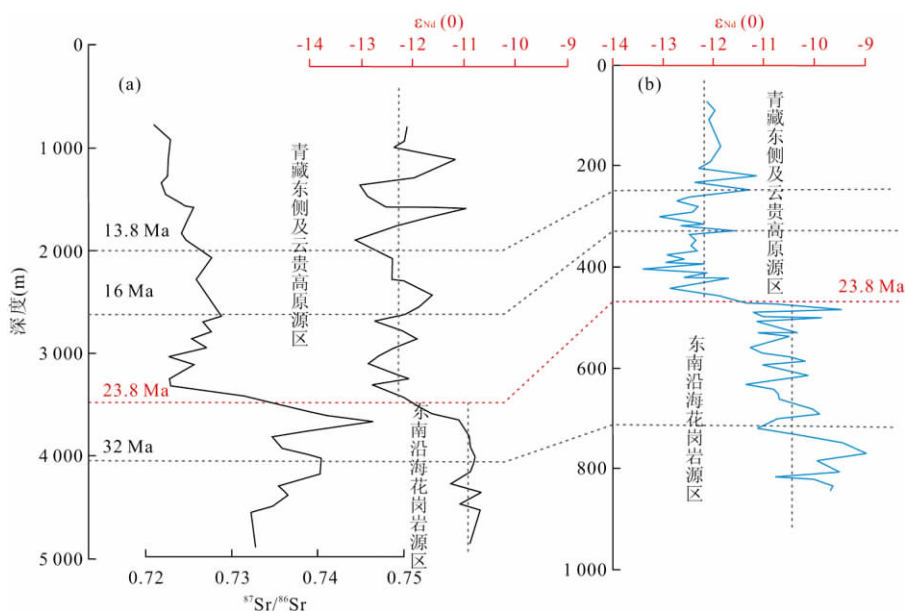


图 6 PY33-1-1 井(a)及 1148 站(b)钕及锶同位素演变特征及可能源区

Fig. 6 Evolution of isotope Nd and Sr in PY33-1-1 (a) and 1148 (b), and possible provenance

探井之上覆盖的沉积岩地层 $\epsilon_{Nd}(0)$ 值则随时代由老变新逐步变小, 如在 PY16-1-1 井珠海组为 $-7.573\ 229$, 到珠江组降为 $-11.728\ 654$. 由于在我国东南沿海地区普遍发育中生代岩浆岩, 因此, 可以认为在渐新世时期 1148 站地区以及珠江口盆地主要以近源的华南沿海地体为主要物源区, 当时中生代岛弧岩体为珠江口盆地以及南海北部提供了大量的沉积物, 造成同时期 $\epsilon_{Nd}(0)$ 值较大. 由于在盆地形成初期, 各构造单元以相邻隆起区为物源区, 不同构造单元物源供给上的差异, 使不同地区的 $\epsilon_{Nd}(0)$ 值略有差异. 从恩平期到珠海期由于源区剥蚀范围逐步扩大, $\epsilon_{Nd}(0)$ 值也逐步变小. 经过新生代剧烈的构造运动, 南海北部地区出现大范围的沉降运动, 河流逆源侵蚀突然加剧, 造成沉积物源区供给范围急剧扩大, 使华南地块古老沉积岩区成为南海北部地区的主要源区, 使钕同位素 $\epsilon_{Nd}(0)$ 值也发生突然明显的下降.

可以认为在渐新世时期珠江口盆地主要以近源的华南沿海地体为主要物源区, 当时中生代岛弧岩体为珠江口盆地和南海北部提供了大量的沉积物, 钕同位素 $\epsilon_{Nd}(0)$ 值相对偏高. 经过古近纪与新近纪间剧烈构造运动, 南海北部地区出现大范围的沉降运动, 使河流逆源侵蚀加剧, 沉积物源区供给范围扩大, 华南地块沉积岩区成为南海北部地区的主要源区, 造成钕同位素 $\epsilon_{Nd}(0)$ 值明显下降.

白云凹陷新近系深水陆坡地层的层序地层格架

显示, 23.8 Ma 以来南海北部陆架坡折维持在白云凹陷的北侧, 与今天的陆架坡折带位置基本一致, 白云凹陷属陆坡深水环境. 但在珠海组 (32 ~ 23.8 Ma) 时期则不相同, 沉积层表现为大套的自北向南前积反射地震相, 具有典型三角洲斜交—S 型前积组合反射结构, 前积体的顶超面与下超面的水平落差可达 100~400 m, 这表明晚渐新世珠海组是一套增长速度快、沉积厚、砂泥互层频繁、分布面积巨大的浅海陆架三角洲沉积组合. 结合凹陷北侧探井证实的珠江三角洲分布特点, 可以认为, 当时的浅海陆架三角洲向南延伸推进到白云主凹的南侧, 陆架坡折带位于白云主凹的南侧, 以大型 S 型前积反射 (前积体的顶超面与下超面的水平落差达到 400~600 m) 的形式出现. 因此, 渐新统/中新统 23.8 Ma 界面是南海北部陆架坡折从白云主凹南侧向北侧跳跃的分界面. 由于陆架坡折带的迁移, 造成 ODP1148 孔 23.8 Ma 前后沉积速率的突变和滑塌变形沉积带的出现. 23.8 Ma 以前, 陆架坡折带位于白云凹陷南侧, ODP1148 孔以近源沉积为主, 表现出较高的沉积速率, 而 23.8 Ma 以后陆架坡折向北退缩, 陆源碎屑主要沉积于白云凹陷, 远离物源的 ODP1148 孔沉积速率大为降低, 且突变事件使得当时的陆坡环境出现大量以滑塌为主的重力流沉积.

南海北部珠江口盆地渐新统一中新统界面 (23.8 Ma) 代表一个重大地质事件. LW3-1-1、LW4-1-1 以及 LW9-1-1 井揭示, 白云凹陷 23.8 Ma

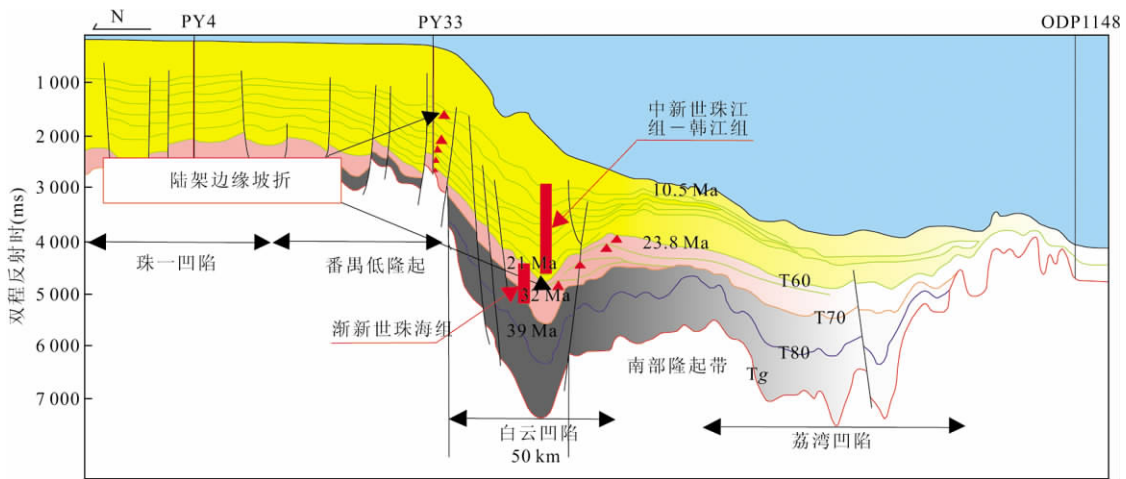


图 7 珠江口盆地近南北向地震解释剖面及陆架坡折迁移示意

Fig. 7 Interpreted longitudinal seismic profile showing the migration of slope break of the Pearl River Mouth basin

以前为浅海陆架沉积,但随着南海扩张脊向南跃迁, 23.8 Ma 以来的白云凹陷深部地幔上隆产生强烈热沉降,陆架坡折带由 23.8 Ma 以前位于白云凹陷南侧突变跳跃到凹陷北侧;白云凹陷也由渐新世晚期浅海陆架环境转为陆坡深水环境(图 7)。

晚渐新世,南海北部深水区在从断拗向拗陷过渡阶段发育了一套海相沉积,白云凹陷—顺德—开平凹陷的海水可能由东部进入,由东向西发生海进。白云—顺德凹陷珠海组沉积受古地形控制,具有明显的填平补齐现象。白云凹陷珠海组在白云主凹沉积厚度大,沉积中心厚度达到 1000 m 左右,该期属于海相沉积,为盆地沉积演化第 3 旋回发育期。根据岩性和沉积旋回特征,珠海层序可分为 3 段,包括低位体系域、海侵体系域和高位体系域。

23.8 Ma 重要事件使得中新世以后海平面不断向陆地推进,由渐新世晚期的浅海陆架环境演变成陆坡深水环境,到了晚中新世—上中新世沉积环境变为半深海—深海,发育陆坡深水沉积,多口钻井揭

示这一时期泥岩粒度极细,分布范围很广,是良好的区域性盖层。

3 23.8 Ma 为盆地热体制的转折面

为确定南海北部的古热流史,选用了珠江口盆地 3 口典型钻井进行热史定量恢复。PY33-1-1 井位于白云凹陷北部的 PY33-1 构造,井深 5104 m,重建的单井古地温剖面显示:下构造层曾经经历较高地温,其对应的古地温梯度为 39.4 °C/km,有效古热流为 90.8 mW/m²(图 8),与现今地温梯度(35.6 °C/km)相比表现为一个下降过程(图 9)。同样,位于番禺低隆起南部的 PY28-2-1 井和南海北部惠州凹陷的 HZ23-2-1 井,均揭示地温梯度在 23.8 Ma 附近明显存在一个突变面(图 9),古近系地层沉积时经历较高古地温和古热流,而新近系地温梯度明显下降(图 8)。

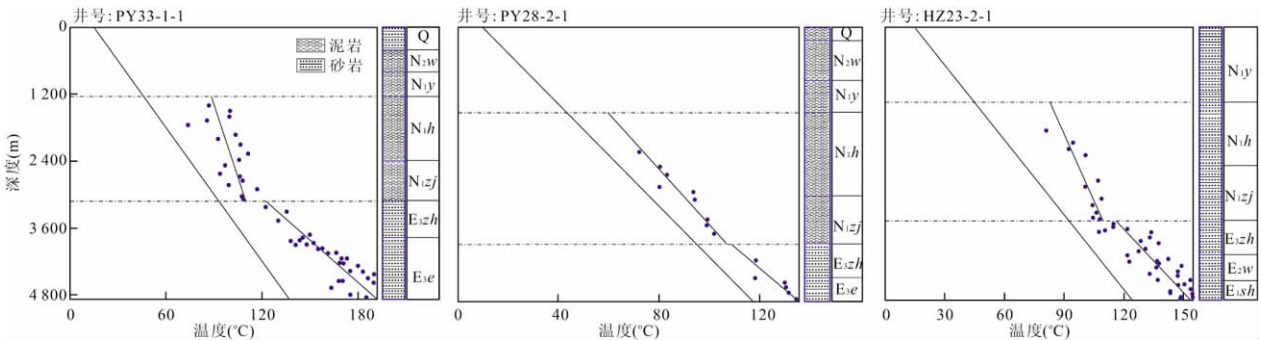


图 8 珠江口盆地钻井古地温剖面

Fig. 8 Drilled paleo geothermal profile in Pearl River Mouth basin

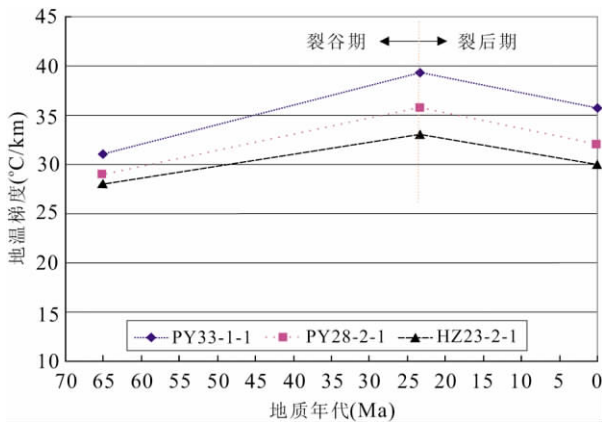


图 9 珠江口盆地单井热历史

Fig. 9 Thermal history of drilled wells in Pearl River Mouth basin

采用古地温梯度法进行热史恢复结果表明:南海北部珠江口盆地目前所能恢复的最高古地温梯度出现在古近纪末,3 口钻井当时古地温梯度分别是:39.4 °C/km(PY33-1-1)、35.8 °C/km(PY28-2-1)和 33 °C/km (HZ23-2-1),对应古热流分别是 90.8 mW/m²、81.0 mW/m² 和 77.0 mW/m²,自渐

新世末以来经历了一个持续冷却的过程.反演热史反映珠江口盆地深水区以 23.8 Ma 为界,新生代早期到渐新世末为地温梯度上升阶段,说明盆地经历拉张过程;23.8 Ma 以后为地温梯度下降的过程,说明盆地经历热沉降的构造演化特征(图 9).

4 23.8 Ma 为火山活动的转化面

南海北部尤其是珠江口盆地新生代构造运动十分活跃,伴随有频繁的岩浆活动,形成了火山喷出岩,目前珠江口盆地已知有 24 口井钻遇新生代火山岩(邹和平等,1995).从分布位置看,火山岩主要分布于珠一坳陷、珠三坳陷和神狐、东沙隆起(图 10).

珠一坳陷恩平凹陷、西江凹陷、惠州凹陷、陆丰凹陷、韩江凹陷、惠陆低凸起、海丰凸起均揭示有新生代火山岩,其中以陆丰凹陷和惠陆低凸起钻井最多.岩石类型主要为中基性玄武岩、安山岩、粗面岩及其凝灰岩和角砾岩,见少量的英安斑岩(HZ21-1-1)和流纹质/英安质凝灰岩(LF1-1-1),发育于古近系—新近系地层,以神狐组为主.

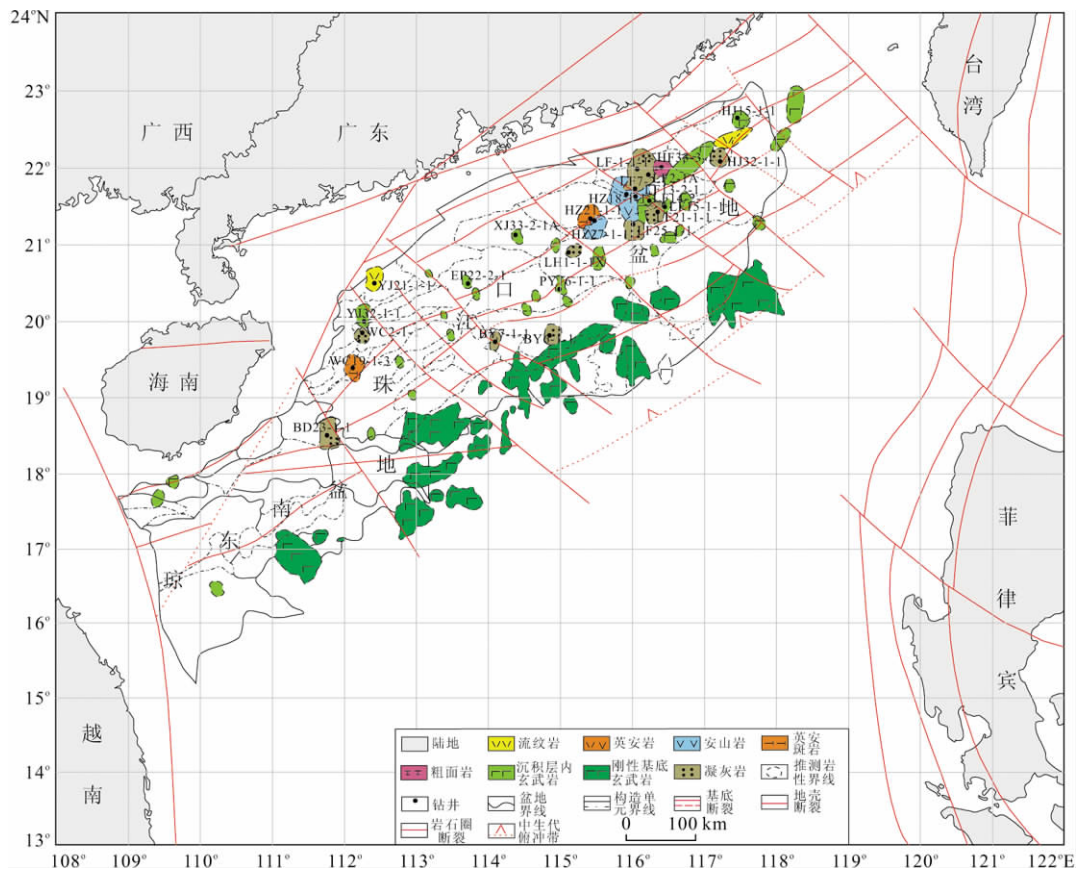


图 10 珠江口盆地及邻区新生代火山岩平面分布

Fig. 10 Distribution of Cenozoic volcanic rocks in Pearl River Mouth basin and its adjacent area

珠三拗陷火山岩主要分布在西部地区. 阳春凹陷西北部 YJ21-1-1 井附近主要为文昌组的流纹质凝灰熔岩. 阳江低凸起 YJ32-1-1 井附近发育珠海组玄武岩, 向北一直延伸至阳春凸起; 阳江低凸起东部与恩平凹陷交界处发育小规模玄武岩体. 文昌 A 凹陷、琼海凹陷交界处 WC2-1-1 井附近分布有文昌组的凝灰岩. 文昌 B 凹陷与文昌 C 凹陷交界处的 WC19-1-3 井附近发育有神狐组的英安斑流岩和蚀变珍珠岩.

神狐隆起发育 3 个规模较小的玄武岩体, 分别位于文昌 E 凹陷与文昌 D 凹陷之间、神狐隆起东北部与恩平凹陷交界处附近、文昌 E 凹陷东北部与开平凹陷之间. 南部隆起及其盆地以南火山岩最发育、以玄武岩为主, 规模大、分布广、海山较多.

东沙隆起中部火山岩较发育, 其次为西部, 东部地区相对较少. 主要以中—基性岩为主. 东沙隆起西部与惠州凹陷交界处分布有 1 个神狐组的安山岩体; 在 LH1-1-1X 井附近分布有神狐组的玄武岩、集块岩和凝灰岩, 在该井东南方向分布有 2 个小规模的玄武岩体. 东沙隆起东北部发育有 3 个小规模的玄武岩体.

此外, 珠二拗陷和潮汕拗陷局部均发育火山岩. 在珠二拗陷云开低凸起 (BY7-1-1) 和白云凹陷 (BY6-1-1) 钻遇厚层火山岩, 前者厚度约 500 m, 后者厚度约 140 m, 岩石类型主要为凝灰岩和玄武岩,

其次为安山质凝灰熔岩和火山角砾岩, 属于古近系和新近系中新统地层. BY7-1-1 井及其附近火山活动非常频繁, 在文昌组发育有安山质凝灰熔岩, 在恩平组发育有火山角砾岩, 珠江组火山岩最发育, 揭示凝灰岩和玄武岩厚度在 400 m 以上, 整体呈 NW 向分布, 与凸起展布方向大致相同. 潮汕拗陷西部、东北部与东沙隆起界线附近分布有 2 个小规模的玄武岩体, 潮汕拗陷东南部一直到盆地外侧, 为一个规模很大的玄武岩区, 局部地区还形成了海底火山.

图 11 是对钻遇火山岩井段的岩性和时代统计结果. 从时代看, 中生代火山岩以酸性岩为主, 古新世和始新世以中基性岩为主, 中新世及以后均为单一成分玄武岩. 23.8 Ma 的火山作用与成盆及盆地充填的关系 (珠江口盆地), 表现出以下特点: 首先, 以 28.3 Ma 为界面, 界面之前成分单一的大规模玄武岩浆喷发作用逐渐增强, 界面之后玄武岩浆喷发作用逐渐减弱; 其次, 23.8 Ma 开始, 随着大规模玄武岩浆活动, 盆地开始大规模造礁作用.

5 23.8 Ma 构造事件的动力学机制讨论

Briaies *et al.* (1993) 认为印度—澳大利亚板块向北运动可能是南海扩张的主要动力. 一方面, 岩石圈板块运动可以带动下伏软流圈流动; 另一方面, 软

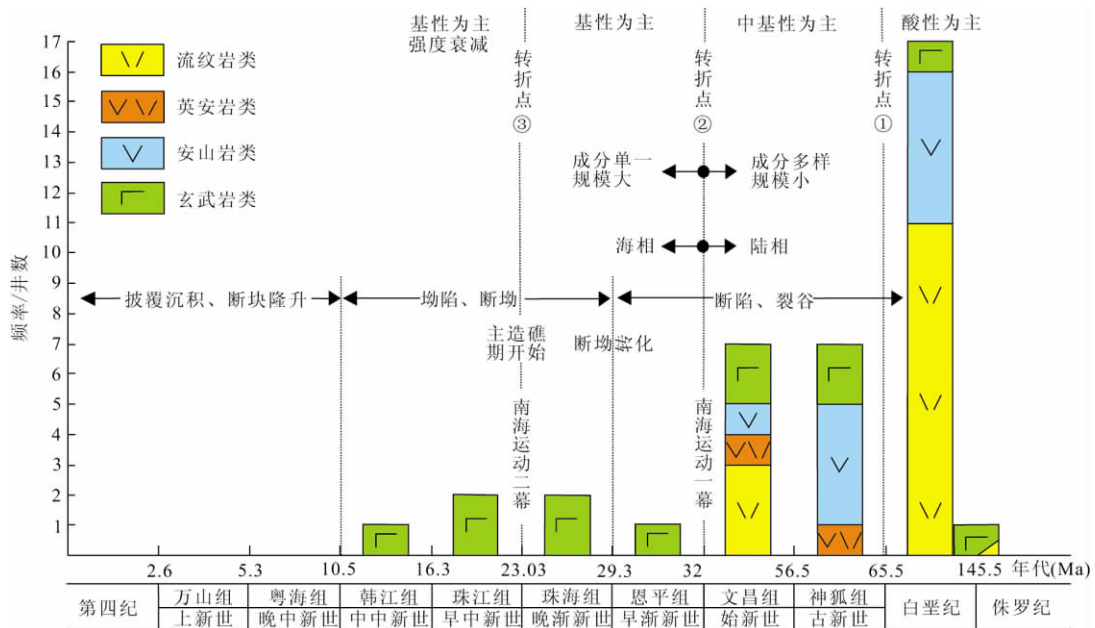


图 11 珠江口盆地火山活动与盆地演化、区域构造关系

Fig. 11 The relationship between volcanic activities, basin evolution, and regional structure in Pearl River Mouth basin

流圈的流动也可以驱使上覆岩石圈的运动。在澳大利亚—印度板块向北运动过程中,印度岩石圈板块俯冲驱使中国大陆西南及东南亚地区岩石圈下伏软流圈挤出并拖曳上覆岩石圈发生离散运动,并促成南海的软流圈地幔热底辟作用最终导致岩石圈破裂和新南海洋壳的形成。

本文认为南海的扩张受多种区域构造因素影响,包括印度—澳大利亚板块与欧亚板块碰撞过程印支地区陆块的滑移、印度洋向北俯冲诱导的弧后扩张、菲律宾板块俯冲(或仰冲)引起南海地区的横向扩张等,但是最终体现在南海地区岩石圈下伏软流圈的热作用。图 12 表示了南海北部地区新生代的岩石圈动力学模型,这一模型突出了软流圈流动主导的地幔热底辟作用是南海破裂成洋的动力来源。模型设想软流圈物质主要是由北向南流动的,软流圈物质流动导致热底辟作用引起岩石圈引张,发生伸展变形形成裂陷盆地直至破裂形成洋盆。南海破裂形成洋盆后,软流圈物质流动仍然是导致洋盆扩张的动力源,同时软流圈物质的流动还可以导致上覆岩石圈进一步破裂。南海北部大陆边缘在南海洋盆扩张的同时依然有较强的裂陷作用,支持由于印度板块向北运动过程中挤出的软流圈热物质向南东方向流动的设想。这一动力学模型将新特提斯洋关闭、青藏高原的形成与南海的扩展等区域大地构造演化联系在一起,强调澳大利亚—印度板块与欧亚板块碰撞过程印支地区的岩石圈在下伏软流圈流动过程中发生滑移、裂解是主导的动力学机制,同时也

可能存在印度洋向北俯冲诱导的弧后扩张、菲律宾板块俯冲(或仰冲)引起南海地区的横向扩张对南海洋盆扩展的贡献,但是终究是体现在南海地区岩石圈下伏软流圈地幔热底辟作用上。

南海北部新生代盆地是在印度板块、欧亚板块和菲律宾板块的相互作用引起的南海洋盆扩张过程中形成和演化的,在盆地尺度上的岩石圈动力学过程中,古近纪属于主动裂陷作用阶段,即软流圈地幔热物质底辟导致区域地壳引张发生伸展变形,形成裂陷盆地,新近纪—第四纪属于被动大陆边缘盆地阶段,即南海洋盆的扩张使北部大陆边缘发生热沉降。南海南北新生代盆地形成和演化的主控因素应该为地幔物质上涌引起上覆地壳受热伸展变形。琼东南盆地与珠江口盆地珠二坳陷受不同的次软流圈地幔热底辟作用影响,表现为 2 个不同的伸展系统。由于受基底性质、先存断裂、南海扩张等因素的影响,南海北部盆地东西部表现出差异性演化特征。

南海北部新生代盆地具有非典型被动大陆边缘盆地动力学过程,主要表现在 3 个方面:一是南海中央洋盆扩张的同时北部大陆边缘仍有较强的断裂活动和火山活动;二是与南海中央洋盆渐新世扩张有关的漂移期热沉降不明显,但晚新生代洋盆岩石圈冷却作用对北部大陆边缘的沉降有明显影响;三是南海北部大陆边缘的构造演化沿轴向表现出差异性。南海北部新生代非典型被动大陆边缘的形成可能与印度板块向北运动诱导的软流圈地幔主动向东南逃逸并拖曳上覆岩石圈开裂过程有关,受红河断

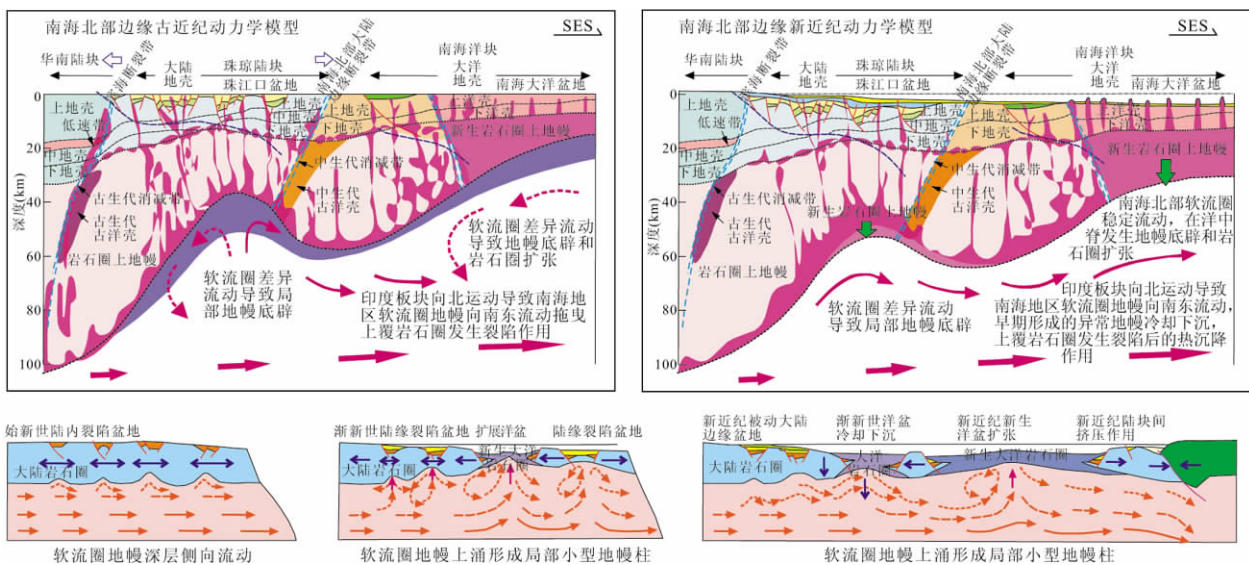


图 12 南海北部大陆边缘新生代动力学模型

Fig. 12 Cenozoic geodynamic model of continental margin in the north of South China Sea

裂带的活动及菲律宾板块的俯冲等区域性构造事件的影响,表现出特有的被动大陆边缘演化特征。南海腹部地区岩石圈在渐新世初破裂形成洋盆并没有抑制南海北部岩石圈的裂陷作用,只是使南海北部由陆内裂陷演变成为陆缘裂陷,南海洋盆在渐新世晚期扩张脊方向的改变使陆缘裂陷区的伸展方向随之发生变化,早期控制断陷的 NE-NEE 向正断层演化为右旋走滑正断层。中新世晚期以后、特别是上新世以来受南海洋盆冷却下沉的影响,南海北部边缘的新生代盆地发生挠曲拗陷。受区域大地构造位置、地壳结构、先存构造等因素影响,琼东南盆地和珠江口盆地在地壳裂陷伸展变形方式上有一定的差异,前者主干基底断层位移引起的断陷沉降更明显,后者岩石圈冷却引起的热沉降更明显。

总之,23.8 Ma 构造事件可能与深部岩浆逃逸作用相关。26~24 Ma 期间南海扩张脊向南跃迁代表了深部地幔产生了异常涌动并使得南海北部出现了大范围滑塌沉积和沉积间断,23.8 Ma 南海扩张脊完成了向南跃迁的过程,使南海南部的岩浆活动加强而北部的岩浆活动减弱停止,白云凹陷地区因深部地幔涌动停止而产生强烈沉降,使盆地水深突然加大。

6 结论

(1)23.8 Ma 构造事件为珠江口盆地深水区重要的地质界面,该界面为盆地裂谷与裂后典型被动陆缘演化阶段的分界面,既是盆地沉积物源、沉积坡折带和沉积环境的突变面,也是盆地热体制的转折面和火山活动强度的突变面。

(2)23.8 Ma 构造事件的动力学机制分析,提出了软流圈流动主导的地幔热底辟作用是南海破裂成洋的动力来源,南海扩张脊的跃迁及地幔热底辟作用改变是导致 23.8 Ma 构造事件的主因。

References

- Briaies, A., Patriat, P., Tapponnier, P., 1993. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the South China Sea; implications for the Tertiary tectonics of Southeast Asia. *Journal of Geophysical Research*, 98 (B4): 6299 - 6328. doi: 10.1029/92JB02280
- Cai, Z. R., Liu, W. L., Wan, Z. F., et al., 2010. Determination of Cenozoic tectonic movement in the northern South China Sea and the relationship between oil-gas reservoir and tectonic movement. *Marine Science Bulletin*, 29 (2): 161 - 165 (in Chinese with English abstract).
- Chen, H. Z., Wu, X. J., Zhou, D., et al., 2005. Meso-Cenozoic faults in Zhujiang River Mouth basin and their geodynamic background. *Journal of Tropical Oceanography*, 24 (2): 52 - 61 (in Chinese with English abstract).
- Dong, D. D., Wang, D. W., Zhang, G. C., et al., 2009. Cenozoic tectonic and sedimentary evolution of deepwater area, Pearl River Mouth basin. *Journal of China University of Petroleum (Natural Science)*, 33 (5): 17 - 29 (in Chinese with English abstract).
- He, L. S., 1984. Polycyclic plate tectonic movements and the Cenozoic tectonics of South China Sea. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 9: 65 - 74 (in Chinese with English abstract).
- Jin, Q. H., 1992. The Geology and hydrocarbon resources in the South China Sea. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Jin, Q. H., Li, T. G., 2000. Regional geologic tectonics of the Nansha Sea area. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 20 (1): 55 - 64 (in Chinese with English abstract).
- Li, W. Y., Li, D. X., 2006. Tectonic characteristics on the sedimentary basins with different plate margins in the South China Sea. *Geoscience*, 20 (1): 19 - 29 (in Chinese with English abstract).
- Lin, C. S., Chu, F. Y., Gao, J. Y., et al., 2007. On tectonic movement in the South China Sea during the Cenozoic. *Acta Oceanologica Sinica*, 29 (4): 87 - 96 (in Chinese with English abstract).
- Lin, C. S., Yu, X. J., He, Y. H., et al., 2006. Question on the spreading of the South China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 28 (1): 67 - 76 (in Chinese with English abstract).
- Shao, L., Lei, Y. C., Pang, X., et al., 2005. Tectonic evolution and its controlling for sedimentary environment in Pearl River Mouth basin. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 33 (9): 1177 - 1181 (in Chinese with English abstract).
- Shao, L., Li, X. H., Wang, P. X., et al., 2004. Sedimentary record of the tectonic evolution of the South China Sea since the Oligocene; evidence from deep sea sediments of ODP site 1148. *Advances in Earth Science*, 19 (4): 539 - 544 (in Chinese with English abstract).
- Wan, L., Wu, N. Y., Yao, B. C., et al., 2003. Cenozoic tectonic movement and the genetic discussion in Nansha

- Sea area. *Geological Research in the South China Sea*, 8—16 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L. L., Cheng, R. H., Li, F., et al., 2009. The Mesozoic sedimentary sequences, correlation and geological significance for petroleum of the north margin of South China Sea. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 39(2): 175—182 (in Chinese with English abstract).
- Wu, C. L., 1984. Nanhai (the South China Sea) movement and development of basins in the South China Sea. *Marine Science Bulletin*, 3(2): 47—53 (in Chinese with English abstract).
- Yao, B. C., 1993. The Cenozoic tectonics investigation in the northern margin of the South China Sea. *Geological Research in the South China Sea*, (5): 1—12 (in Chinese).
- Yao, B. C., Wan, L., Wu, N. Y., 2004. Cenozoic plate tectonic activities in the Great South China Sea area. *Geology in China*, 31(2): 113—122 (in Chinese).
- Yao, Y. J., Jiang, Y. K., Zeng, X. H., 2002. Cenozoic tectonic movements in Nansha area, South China Sea. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 16(2): 113—117 (in Chinese with English abstract).
- Zhan, W. H., 1993. The modern tectonic stress field and its formation and evolution in the South China Sea and adjacent areas. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Zhan, W. H., Zhu, Z. Y., Sun, L. T., et al., 2006. The epoch and diversities of Neotectonic movement in the South China Sea. *Acta Geologica Sinica*, 80(4): 491—496 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. C., Mi, L. J., Wu, S. G., et al., 2007. Deepwater area—the new prospecting targets of northern continental margin of South China Sea. *Acta Petrolei Sinica*, 28(2): 15—21 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. C., Zhu, W. L., Mi, L. J., et al., 2010. The theory of hydrocarbon generation controlled by source rock and heat from circle distribution of outside-oil fields and inside-gas fields in South China Sea. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(5): 987—1005 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, Z. H., Wang, L. S., Li, X. X., et al., 2004. The plaeogene basin-filling evolution of Qiongdongnan basin and its relation with seafloor spreading of the South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 24(1): 29—36.
- Zhu, W. L., 2009. Some key geological issues on oil and gas exploration in the northern deepwater area of the South China Sea. *Acta Geologica Sinica*, 83(8): 1059—1064 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, W. L., 2010a. Advancements of oil and gas exploration in China offshore area: overview and perspective. *China Engineering Science*, 12(5): 18—24 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, W. L., 2010b. Petroleum geology in deepwater area of northern continental margin in South China Sea. *Acta Petrolei Sinica*, 31(4): 521—527 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, W. L., Mi, L. J., Gao, Y. D., et al., 2009. Recent features and future directions of offshore hydrocarbon exploration in China. *China Offshore Oil and Gas*, 21(1): 1—8 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, W. L., Zhang, G. C., Zhong, K., et al., 2010. South China Sea: oil and gas outlook. *China Engineering Science*, 12(5): 46—50 (in Chinese with English abstract).
- Zou, H. P., Li, P. L., Rao, C. T., 1995. Geochemistry of Cenozoic volcanic rocks in Zhujiangkou basin and its geodynamic significance. *Geochimica*, 24(Suppl.): 33—45 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蔡周荣, 刘维亮, 万志峰, 等, 2010. 南海北部新生代构造运动厘定及与油气成藏关系探讨. *海洋通报*, 29(2): 161—165.
- 陈汉宗, 吴湘杰, 周蒂, 等, 2005. 珠江口盆地中新生代主要断裂特征和动力背景分析. *热带海洋学报*, 24(2): 52—61.
- 董冬冬, 王大伟, 张功成, 等, 2009. 珠江口盆地深水区新生代构造沉积演化. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 33(5): 17—29.
- 何廉声, 1984. 多旋回的板块构造运动与南海新生代构造. *中国地质科学院院报*, 9: 65—74.
- 金庆焕, 1992. 南海地质与油气资源. 北京: 科学出版社.
- 金庆焕, 李唐根, 2000. 南沙海域区域地质构造. *海洋地质与第四纪地质*, 20(1): 55—64.
- 李文勇, 李东旭, 2006. 中国南海不同板块边缘沉积盆地构造特征. *现代地质*, 20(1): 19—29.
- 林长松, 初凤友, 高金耀, 等, 2007. 论南海新生代的构造运动. *海洋学报*, 29(4): 87—96.
- 林长松, 虞夏军, 何拥华, 等, 2006. 南海海盆扩张成因质疑. *海洋学报*, 28(1): 67—76.
- 邵磊, 雷永昌, 庞雄, 等, 2005. 珠江口盆地构造演化及对沉积环境的控制作用. *同济大学学报(自然科学版)*, 33(9): 1177—1181.
- 邵磊, 李献华, 汪品先, 等, 2004. 南海渐新世以来构造演化的沉积记录—ODP1148 站深海沉积物中证据. *地球科学进展*, 19(4): 539—544.

- 万玲,吴能友,姚伯初,等,2003.南沙海域新生代构造运动特征及成因探讨.南海地质研究,8-16.
- 王嘹亮,程日辉,李飞,等,2009.南海北部陆缘中生代沉积层序、对比和油气地质意义.吉林大学学报(地球科学版),39(2):175-182.
- 吴长林,1984.南海运动与南海诸盆地的发育.海洋通报,3(2):47-53.
- 姚伯初,1993.南海北部陆缘新生代构造运动初探.南海地质研究,(5):1-12.
- 姚伯初,万玲,吴能友,2004.大南海地区新生代板块构造运动.中国地质,31(2):113-122.
- 姚永坚,姜玉坤,曾祥辉,2002.南沙海域新生代构造运动特征.中国海上油气(地质),16(2):113-117.
- 詹文欢,1993.南海及邻区现代构造应力场与形成演化.北京:科学出版社.
- 詹文欢,朱照宇,孙龙涛,等,2006.试论南海新构造运动的时限及其差异性.地质学报,80(4):491-496.
- 张功成,米立军,吴时国,等,2007.深水区——南海北部大陆边缘盆地油气勘探新领域.石油学报,28(2):15-21.
- 张功成,朱伟林,米立军,等,2010.“源热联控论”:来自南海海域油气田“外油内气”环带有序分布的新认识.沉积学报,28(5):987-1005.
- 钟志洪,王良书,李绪宣,等,2004.琼东南盆地古近纪沉积充填演化及其区域构造意义.海洋地质与第四纪地质,24(1):29-36.
- 朱伟林,2009.南海北部深水油气勘探关键地质问题.地质学报,83(8):1059-1064.
- 朱伟林,2010a.中国近海油气勘探进展.中国工程科学,12(5):18-24.
- 朱伟林,2010b.南海北部深水油气地质特征.石油学报,31(4):521-527.
- 朱伟林,米立军,高阳东,等,2009.中国近海近几年油气勘探特点及今后勘探方向.中国海上油气,21(1):1-8.
- 朱伟林,张功成,钟锴,等,2010.中国南海油气资源前景.中国工程科学,12(5):46-50.
- 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(增刊):33-45.