

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020052002

南海西南次海盆两侧陆缘新生代构造沉降特征及演化过程

朱荣伟^{1,2,3}, 刘海龄², 姚永坚^{1,3}, 聂鑫^{1,3}, 徐子英^{1,3}

1. 自然资源部海底矿产资源重点实验室, 广州海洋地质调查局, 广州 510760
2. 中国科学院边缘海与大洋地质重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458

摘要: 构造沉降史分析有助于认识盆地的形成演化过程, 是盆地分析的重要基础。为对比分析南海西南次海盆两侧陆缘新生代构造演化特征, 本文选取了横穿南海西南次海盆两侧陆缘的多道地震剖面测线, 其中 NH973-3 测线横跨西南次海盆北侧陆缘中-西沙地块, NH973-1+SO27-04 联合剖面跨越西南次海盆南侧陆缘南沙地块, 在震地层解释的基础上, 采用回剥法和平衡剖面技术分析了西南次海盆两侧陆缘构造沉降特征及伸展过程。分析结果表明: (1) 西南次海盆两侧陆缘的构造沉降曲线特征表现为裂陷初期曲线斜率平缓, 裂陷强烈期和末期曲线斜率较陡, 断-拗转换期和拗陷期曲线斜率又回归相对平缓的反“S”形多段式特征; (2) 两侧陆缘的构造沉降具有一定的延迟滞后性, 造成此现象的原因可能与西南次海盆两侧陆缘岩石圈的分层差异伸展及南海西缘断裂的右旋走滑活动有关, 且南海西缘断裂的右旋走滑活动造成两侧陆缘的构造沉降中心向南迁移; (3) 两侧陆缘盆地主要形成于晚渐新世, 北侧陆缘因受晚渐新世南海西缘断裂右旋走滑活动的改造影响而形成伸展-走滑相关的沉积盆地, 南侧陆缘在早中新世因受到挤压碰撞的改造影响而形成伸展-挠曲复合型沉积盆地。这些研究成果可为南海西南次海盆两侧陆缘沉积盆地的油气和天然气水合物的勘探开发提供重要的科学背景支持。

关键词: 构造演化; 伸展过程; 构造沉降; 共轭陆缘; 南海西南次海盆

中图分类号: P736.15 **文献标识码:** A

Cenozoic tectonic subsidence of the continental margins of southwest sub-basin, South China Sea and its evolution

ZHU Rongwei^{1,2,3}, LIU Hailing², YAO Yongjian^{1,3}, NIE Xin^{1,3}, XU Ziyang^{1,3}

1. Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Natural Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China
2. CAS Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science, Guangzhou 510301, China
3. Guangdong Laboratory of Marine Science and Engineering, Guangzhou 511458, China

Abstract: Tectonic subsidence analysis is helpful for understanding the origin and evolution of a basin, which are critical for basin analysis. In order to reveal the characteristics of Cenozoic tectonic evolution of the continental margins of the southwest sub-sea basin, South China Sea, the multi-channel seismic profile lines, NH973-3 and NH973-1+SO27-04 across the continental margins, were selected as research targets. The structures of the continental margins are studied using the methods of back stripping and balanced profile. It is observed that: (1) the structural subsidence curves of the above-mentioned continental margins are characterized by a multiple segment pattern in a reversed “s” shape, with a gentle slope in the initial rifting stage, a steep slope in the strong rifting stage and the end stage. The slope of the curve return to the relatively gentle during the transitional period from fault-depression to subsidence; (2) the tectonic subsidence along the continental margins have certain time delay, probably due to the layered differentiation and the extension of lithosphere and the dextral strike slip movement of the faults on the

资助项目: 中国科学院边缘海与大洋地质重点实验室开放基金项目“南海南部中生界构造变形特征及其大地构造意义”(OMG2019-05); 中国地质调查局项目: 中国大地构造演化和国际亚洲大地构造图编制(广州海洋地质调查局)(DD20190366), 南海文昌和东方海域 1:25 万海洋区域地质调查(DD20190627), 全国陆域及海区地质图件更新与共享(广州海洋地质调查局)(DD20190378), 天然气水合物数据库更新与服务(DD20190216), 南部海域 1:100 万海洋区域地质调查成果与应用研究(DD20160138); 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项“大洋钻探科学研究——南海重大基础地质问题与首钻选址”(GML2019ZD0201); 国家自然科学基金项目“南海北缘琼南缝合带构造分段性变形机制多尺度研究”(41776072)。

作者简介: 朱荣伟(1988—), 男, 博士, 主要从事海洋构造地质与油气地质方面研究, E-mail: zhurongwei1209@126.com

通讯作者: 刘海龄(1958—), 博士, 研究员, 主要从事南海构造地质研究, E-mail: liuh82@126.com

收稿日期: 2020-05-20; **改回日期:** 2020-07-09 文凤英编辑

western margin of the South China Sea. The dextral strike slip movement of the faults on the western margin of the South China Sea might have resulted in the southward migration of the tectonic subsidence centers; (3) The basins on the continental margins were mainly formed in Late Oligocene, as the basins related to extensional strike slip on the northern margin of the South China Sea were formed due to the modification of the dextral strike slip movement of the west margin fault in Late Oligocene, whereas the flexure-extensional complex basins formed on the southern margin of the South China Sea due to the compression and collision in Early Miocene. The research results have provided important scientific background for the exploration and development of hydrocarbon and gas hydrate in the sedimentary basins on both sides of the southwest sub basin of the South China Sea.

Key words: tectonic evolution; extension process; tectonic subsidence; conjugated continental margins; Southwest sub-basin of South China Sea

南海位于欧亚板块、印-澳板块和太平洋-菲律宾海板块相互作用的交汇处, 新生代经历了陆缘张裂、海底扩张到俯冲碰撞的复杂演化过程, 被认为是研究张裂大陆边缘形成演化与海底扩张的理想天然场所^[1-3]。晚白垩世后, 由于太平洋板块的后撤, 南海区域应力场由原先的压扭性应力场反转为张性应力场^[4-10], 南海北部陆缘开始发生张裂作用, 随着岩石圈伸展减薄直至破裂以及南海海盆的形成, 中—西沙以及南沙等微地块与华南大陆分离并逐渐向南漂移至现今位置^[11]。在这期间, 南海地区先后发生了礼乐运动、西卫运动、南海运动和南沙运动等 4 次重要的区域构造运动^[12-14], 并且发育形成了一系列新生代裂陷盆地。然而, 由于南海不同部位边界条件和新生代以来构造活动特征存在明显差异^[15-16], 使得南海不同部位的沉积盆地具有不同的构造特征和演化历史, 因而精准地了解各个盆地新生代构造沉降特征及演化过程对各个盆地矿产资源勘探开发尤为重要。

本文拟结合南海西南次海盆两侧陆缘地质资料和多道地震剖面等地球物理资料, 在地震地层解释的基础上, 采用回剥法和平衡剖面技术分析西南次海盆两侧陆缘构造沉降特征及伸展过程, 以此来对比分析西南次海盆两侧陆缘的新生代构造演化过程, 以期对南海西南次海盆两侧陆缘沉积盆地的油气和天然气水合物的勘探开发提供重要的科学背景支持。

1 区域地质概况

依据地质、地球物理特征, 南海新生代海盆可进一步划分为东部次海盆、西北次海盆和西南次海盆^[13,17]。其中, 西南次海盆是位于南海西南部的一个呈 V 型的三角形盆地, 从东北向西南方向延伸, 形态由宽变窄^[17](图 1), 是研究南海中—新生代构造演化历史和进行南海共轭边缘对比研究的有利区域^[18-19]。西南次海盆两侧发育一对非对称的共轭

陆缘, 其西北缘为中—西沙地块, 东南缘为南沙地块^[20]。其中, 中—西沙地块西侧以南海西缘断裂为界, 与印支半岛相邻, 北侧为西沙海槽和西北次海盆, 东南隔西南次海盆与南沙地块相望; 南沙地块内部海底地形复杂, 岛礁分布密集, 其西侧以廷贾断裂为界, 东侧与菲律宾巴拉望岛相接, 东南边缘则是古南海的俯冲消减带, 目前只留下南沙海槽的痕迹^[21]。

在构造演化方面, 南海内散落的中-西沙地块、南沙地块等微地块曾是华南大陆的一部分^[11, 22-28]。自晚白垩世开始, 南海区域应力场由挤压反转为拉张, 软流圈物质上涌, 地壳-岩石圈拉张减薄, 至晚渐新世南海开始扩张, 同时华南-印支地块出现向洋离散作用, 中-西沙以及南沙等微地块开始向东南-南方向裂离印支-华南古陆; 至中新世, 随着南沙地块与婆罗洲和西北巴拉望俯冲碰撞, 南海扩张停止^[11]。关于南海扩张期次, 多数学者认为南海至少存在两期海底扩张^[1-2, 29-30], 在 ~32 Ma 时, 南海北部的西北和东部次海盆发生近 N-S 向海底扩张, 在 ~23 Ma 时, 南海扩张脊向南跃迁至西南次海盆发生第二次海底扩张, 并且扩张方向由近 N-S 向变为 NW-SE 向, 至 ~15 Ma 时南海扩张停止^[1-2, 29-30]。同时, 伴随着晚白垩世—新近纪地壳拉张减薄及周缘断裂的伸展、走滑等作用, 西南次海盆两侧陆缘形成了中建南盆地、南薇西盆地和北康盆地等为代表的新生代沉积盆地。

在地层方面, 西南次海盆两侧陆缘新生代地层自下而上可识别出 T_g 、 T_8 、 T_7 、 T_6 、 T_5 、 T_3 、 T_2 、 T_1 及 T_0 (海底) 等多个地震反射界面(图 2)。结合区域构造运动, 研究区地层自上而下可划分为上、中、下三套构造层。其中, 上构造层(T_0 — T_5)为裂后的披覆沉积; 中构造层(T_5 — T_g)又可分为裂陷期(T_6 — T_g)和断-拗转换期(T_5 — T_6), 为新生代早期的裂陷充填沉积和局部范围内的披覆沉积, T_6 界面下伏地层表现为断陷充填沉积的特点, 上覆地层为断拗充填特征^[31-32]; 下构造层(T_g 界面之下)为裂前沉

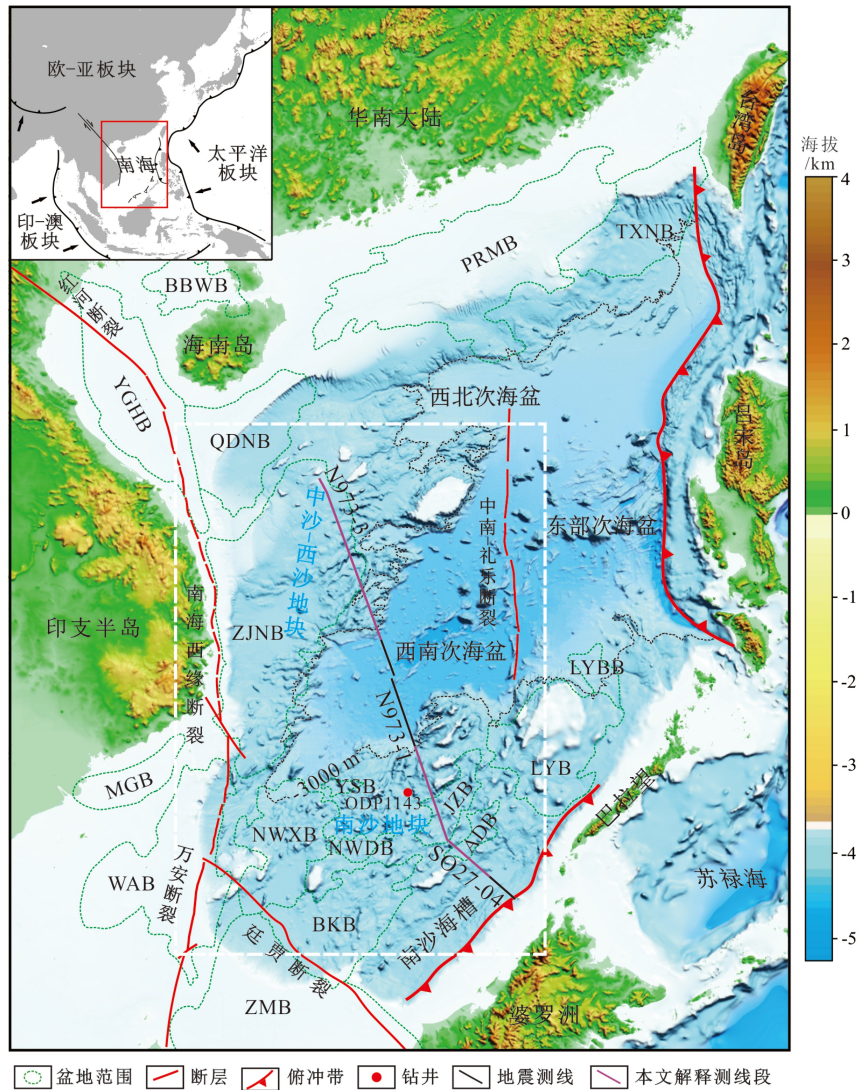


图1 研究区区域位置及测线分布图

TXNB-台西南盆地; PRMB-珠江口盆地; QDNB-琼东南盆地; BBWB-北部湾盆地; YGHB-莺歌海盆地; ZJNB-中建南盆地; MGB-眉公盆地; WAB-万安盆地; NWXB-南薇西盆地; ZMB-曾母盆地; BKB-北康盆地; JZB-九章盆地; YSB-永暑盆地; ADB-安渡盆地; LYB-礼乐盆地; LYBB-礼乐北盆地

Fig.1 The locations of study area and MCS profiles

积,该构造层分布较局限,地层厚度相对较大,且内部存在褶皱、逆冲断裂等挤压构造变形^[24-28, 33-37]。

2 方法与数据

2.1 构造沉降量计算方法

沉降作用是盆地形成的前提条件。一般而言,沉积盆地的总沉降量主要与构造作用、沉积物压实、均衡作用、沉积基准面变化或古水深变化等因素有关,盆地的总沉降可表述为:总沉降(基底沉降)=构造沉降+(沉积物和水负载沉降+沉积物压实沉降+海平面/古水深变化)^[38-43]。因此,盆地

的构造沉降量可通过回剥法得到总沉降量后经过去压实、古水深、载荷、海平面变化等一系列校正后获得^[38]。

假设研究区的沉降机制符合艾里均衡,则某时刻载水构造沉降 S_{tt} 可表示为^[38-39]:

$$S_{tt} = S_t \frac{\rho_m - \rho_s}{\rho_m - \rho_w} - \Delta S_L \frac{\rho_m}{\rho_m - \rho_w} + (W_d - \Delta S_L) \quad (1)$$

式中, S_{tt} 为构造沉降量, S_t 为去压实后的沉积厚度, W_d 为古水深, ΔS_L 为古海平面相对于现今海平面的高度; ρ_m 、 ρ_s 和 ρ_w 分别表示地幔密度、沉积物平均密度和水密度,参考前人研究成果^[37-38],本文中 ρ_m 、 ρ_s 和 ρ_w 依次取为3.3、2.8和1.03 kg/m³。

有关压实校正中孔隙度与深度的关系采用式(2)

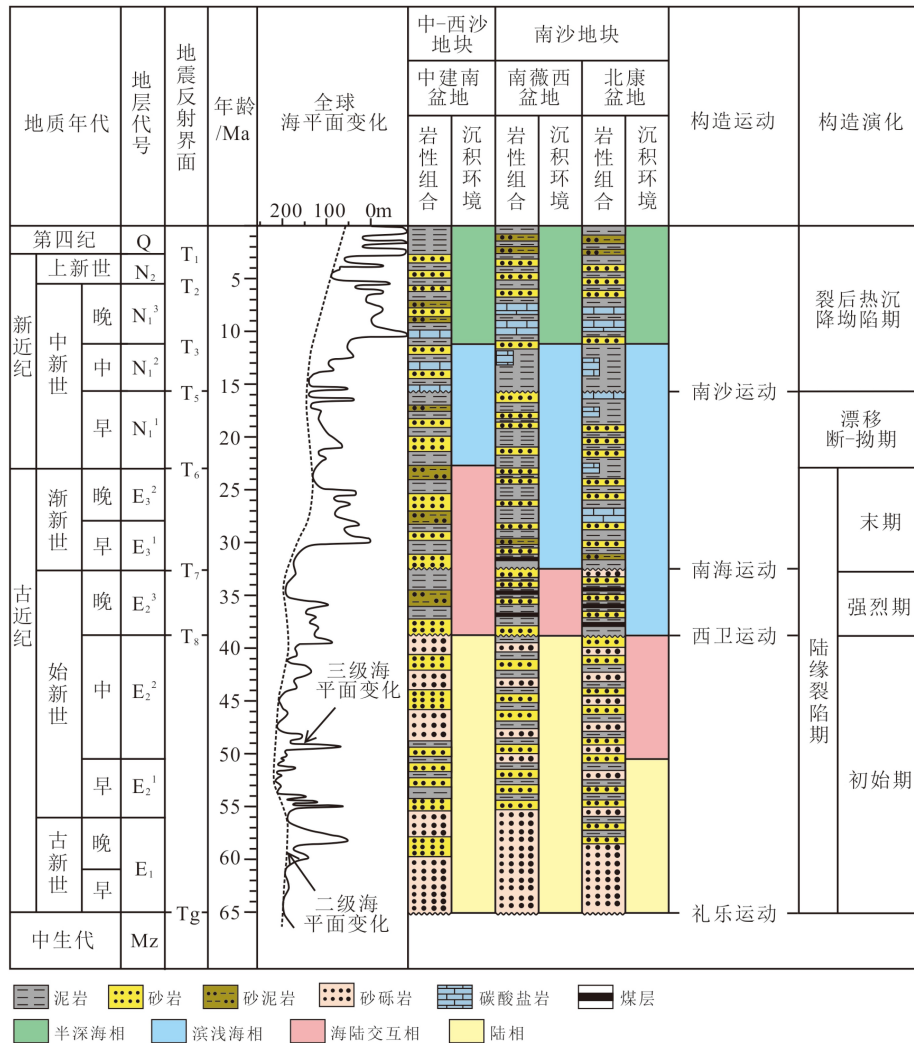


图 2 南海西南次海盆两侧陆缘盆地地层柱状图与构造演化简图 (岩性组合及沉积环境参考文献 [15-16], 地质年代参考 2018 年地质年代表 [36], 全球海平面变化曲线引自文献 [37])

Fig.2 Integrated stratigraphic column showing tectonic evolution stage of the Continental marginal basins of the Southwestern Sub-basin, South China Sea

的指数形式:

$$\phi = \phi_0 e^{-cy} \quad (2)$$

式中, ϕ 为地层埋深 y 时的孔隙度; ϕ_0 为原始孔隙度; c 为压实系数, 岩性不同, 其取值不同; y 为地层埋深。不同岩性的孔隙度、压实系数和密度主要参考北海地区的实测结果 [41]。古水深可通过对沉积相和古生物组合等的综合分析进行估计 [42-44] (表 1)。海平面变化参考全球海平面变化曲线 [37], 取三级层序对应的海平面值, 若海平面上升则减去上升量, 若海平面下降则加上下降量 [44]。

2.2 伸展系数、伸展量、伸展速率的计算

借助 2D move 软件中非运动学算法“单剪切去褶皱法”和运动学算法“斜剪切法”去除地震剖面中新生代地层对现今地质剖面进行平衡剖面恢复, 计

表 1 不同类型沉积相古水深参考值

Table 1 Paleo-depth reference values for different types of sedimentary facies

沉积相类型	古水深参考值
冲积—河流相	0 m
滨湖相	<5 m
浅湖相	5~20 m
深湖相	20~30 m 或更深
扇三角洲相	≤30 m
海陆交互相	<15 m
滨浅海相	<30 m
浅海相	30~200 m
半深海相	200~500 m
深海相	>500 m

算现今地质剖面各发育时期剖面长度,在此基础上求取总的伸展系数(β)、各时期伸展速率(R_i)和伸展量 ΔL_i 。在平衡剖面恢复过程中,同样需要进行去压实、古水深和古海平面变化等校正,其参数选取与构造沉降计算所采用的参数相同。

伸展系数可用来表征盆地总体伸展特征,即盆地在整个断陷发育过程中因伸展作用而引起的拉张作用累积效应,计算公式为:

$$\beta = L_1 / L_0 \quad (3)$$

其中, L_0 为伸展前的剖面长度(km), L_1 为伸展后的剖面长度(km)。

不同沉积时期盆地的伸展情况可以用伸展量和伸展速率来衡量,计算公式分别为:

$$L_i = L_{it} - L_{ib} \quad (4)$$

$$R_i = (L_{it} - L_{ib}) / T_i \quad (5)$$

式中, L_{it} 为第*i*层顶界面沉积时的剖面长度(km); L_{ib} 为第*i*层底界面沉积时的剖面长度(km); ΔT_i 为第*i*层的沉积时间(Ma)。

由于地震剖面分辨小断层的能力有限, Walsh

等(1991)指出约40%的拉张是无法通过地震剖面求得的^[45], Clift和Sun(2006)在研究琼东南盆地的拉张情况时也提出小断层引起的水平伸展最大有40%未被发现^[46]。因此,通过地震剖面求得的拉张强度是实际拉张强度的60%,为了解决这一误差,本文将平衡剖面计算得到的剖面长度除以60%来加以修正。

2.3 数据的选取

为了对比分析南海西南次海盆两侧陆缘沉积盆地新生代构造沉降和伸展特征,本文选取了横穿南海西南次海盆两侧陆缘的多道地震剖面测线NH973-3(图3)和NH973-1+SO27-04联合剖面(图4),并在多道测线上选取15个测点抽取层位信息生成伪井数据,选取其中 T_0 、 T_5 、 T_6 、 T_7 、 T_8 和 T_g 等6个界面进行回剥计算,界面深度根据中海石油研究中心提供南沙地区地震波走时数据拟合成的时间-深度转换公式的基础上进行了适当修正,公式为:

$$Y = -5.1578(X - X_s)^3 + 133.48(X - X_s)^2 + 712.06(X - X_s) + 750X_s \quad (6)$$

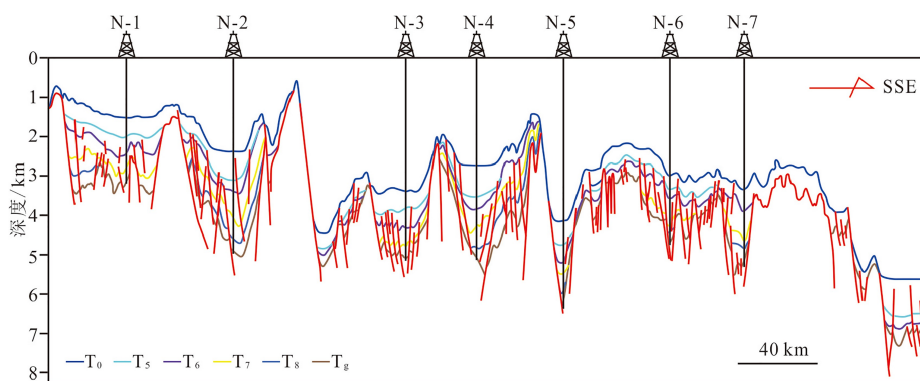


图3 NH973-3测线的伪井位置分布(测线位置见图1,剖面据文献[47]修改)

Fig.3 Distribution of pseudo-wells from the line NH973-3

(The line location is shown in Fig. 1)

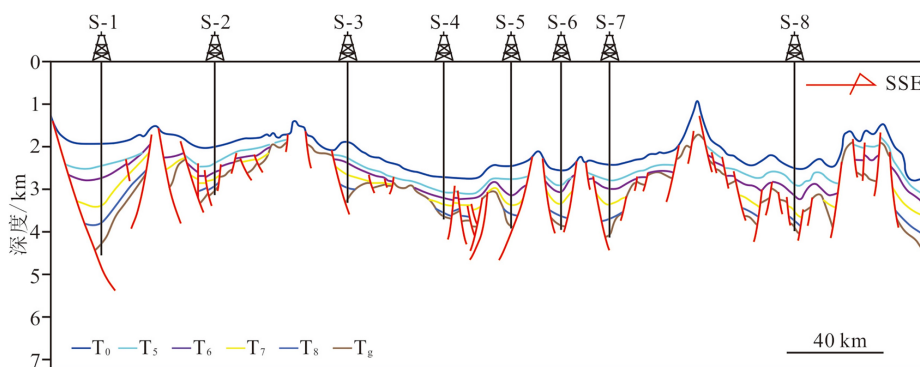


图4 NH973-1+SO27-04测线伪井位置分布

(测线位置见图1,剖面据文献[48]修改)

Fig.4 Distribution of pseudo-wells from the line NH973-1+SO27-04 (The line location is shown in Fig. 1)

式中, Y 代表地层深度, 单位为 m ; X 代表双程走时, 单位为 s ; X_s 代表海底(T_0)双程走时, 单位为 s , 海水速度按照 1500 m/s 计算。

根据这些伪井的构造沉降量计算结果绘制了构造沉降曲线(图 5), 以及各伪井不同时期的构造沉降量和沉降速率(图 5 和图 6)以及不同时期的伸展系数、伸展量、伸展速率(图 7)。

3 结果

3.1 两侧陆缘新生代构造沉降特征

由南海西南次海盆南北两侧陆缘测线上伪井生成的构造沉降曲线可知(图 5), 西南次海盆两侧陆缘的构造沉降曲线特征不同于典型被动裂陷盆地构造沉降曲线的两段式, 均表现为裂谷初始期曲线斜率平缓, 裂谷强烈期和末期曲线斜率较陡,

断-坳转换期和坳陷期曲线斜率又回归相对平缓的反“S”形的多段式特征。根据南海西南次海盆两侧陆缘构造沉降的周期性变化, 可将西南次海盆两侧陆缘构造沉降过程划分为 5 个沉降幕(图 5, 图 6)。

第一沉降幕: 古新世—中始新世沉积期($E_1-E_2^2$, $65\sim38.5\text{ Ma}$), 南海陆缘开始张裂, 西南次海盆北侧陆缘具有北部凹陷(N-2 伪井)和中部凹陷两个沉降中心(N-4 伪井), 其构造沉降量分别约为 400 和 350 m , 沉降速率总体上表现为陆架大于陆坡; 南侧陆缘仅有一个构造沉降中心(S-1 伪井), 位于北部凹陷, 其构造沉降量约为 670 m , 沉降速率总体上表现为陆坡大于陆架。两侧陆缘构造平均沉降速率并无较大差异, 其中北侧陆缘的平均构造沉降速率约为 10 m/Ma ; 南侧陆缘的平均构造沉降速率约为 11 m/Ma 。

第二沉降幕: 晚始新世—早渐新世沉积期($E_2^3-E_3^1$, $38.5\sim32.0\text{ Ma}$), 随着西南次海盆两侧陆缘岩石

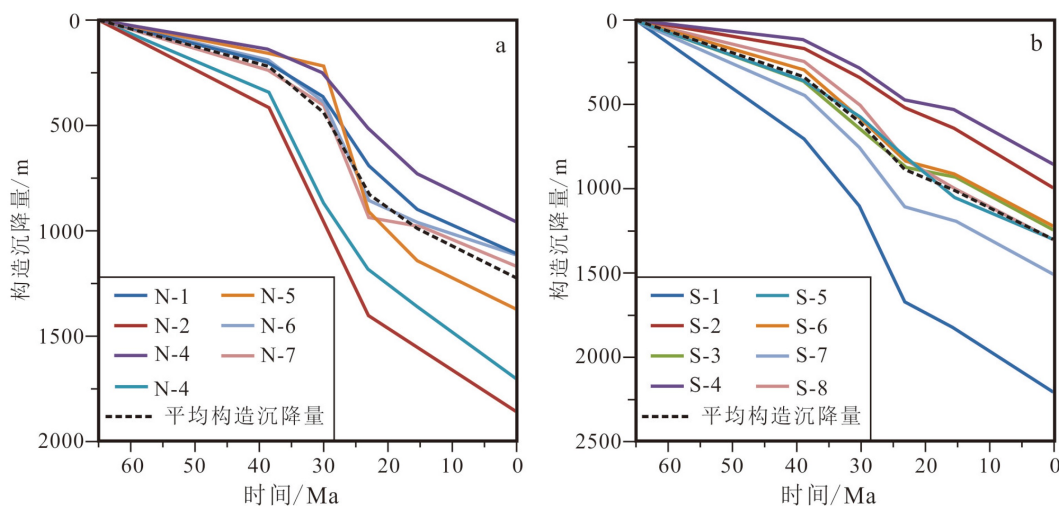


图 5 NH973-3 测线 (a) 和 NH973-1+SO27-04 测线 (b) 伪井构造沉降曲线

Fig.5 Tectonic subsidence curve of the pseudo-wells from the lines NH973-3 (a) and NH973-1+SO27-04 (b)

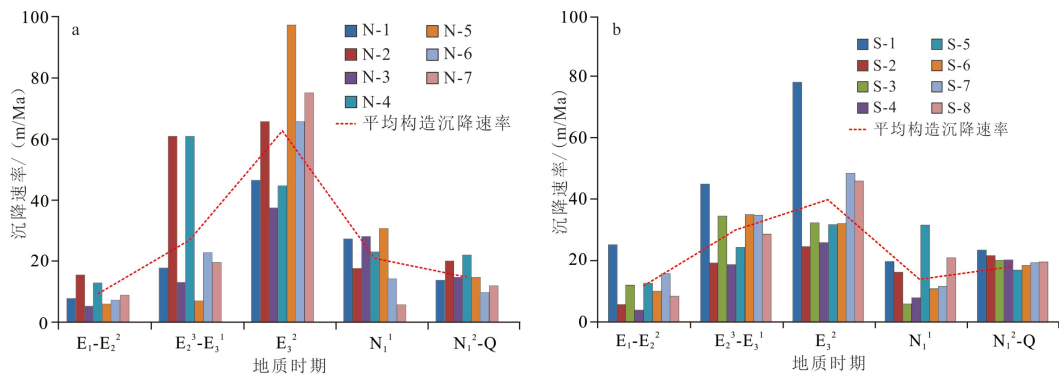


图 6 NH973-3 测线 (a) 和 NH973-1+SO27-04 测线 (b) 各伪井不同地质时期构造沉降速率

Fig.6 Tectonic subsidence rates of the pseudo-wells from the lines NH973-3 (a) and NH973-1+SO27-04 (b) in different geologic periods

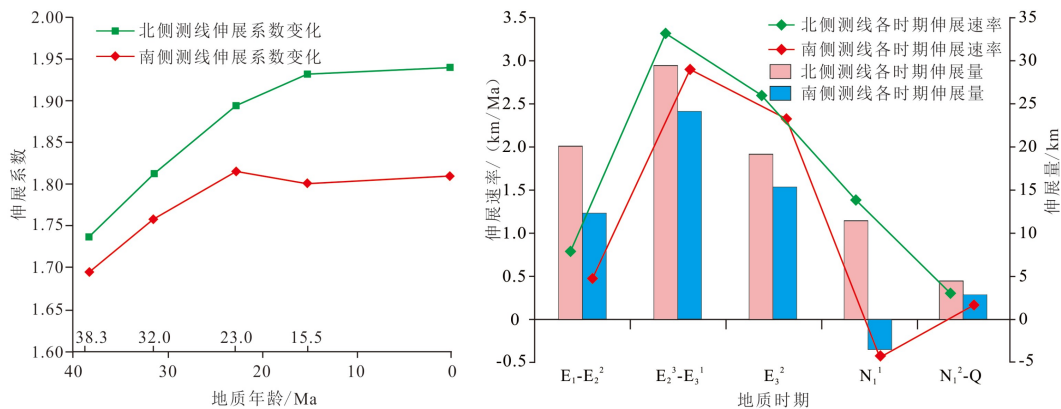


图7 南海西南次海盆南北两侧陆缘伸展系数、拉张量和拉张速率变化

Fig.7 Variation of the extension coefficient, extension amount and the extension rate of the continental margins of the southwest sub-basin, South China Sea

圈持续拉张,断裂活动增大,裂隙作用增强,两侧陆缘沉降速率增大,沉降速率增大幅度从陆架至陆坡表现为逐渐增大趋势。该阶段北侧陆缘的平均构造沉降速率约为29 m/Ma;南侧陆缘的平均构造沉降速率约为30 m/Ma。

第三沉降幕:晚渐新世沉积期(E_3^2 , 32.0~23.0 Ma)南海北部陆缘岩石圈发生破裂,洋壳开始增生,但此阶段西南次海盆两侧陆缘岩石圈未发生破裂,断层仍具有一定活动强度。在此阶段西南次海盆两侧陆缘构造沉降速率均达到高峰,并且北侧陆缘构造沉降速率明显大于南侧陆缘,其中北侧陆缘的平均构造沉降速率约为63 m/Ma,南侧陆缘的平均构造沉降速率约为40 m/Ma。另外,在该阶段西南次海盆两侧陆缘构造沉降中心明显向南部迁移,在北侧陆缘南端靠近陆坡处的构造沉降速率快速增大,高达约77 m/Ma,形成新的构造沉降中心;在北侧陆缘南端陆架区最大沉降速率高达约49 m/Ma。

第四沉降幕:早中新世沉积期(N_1^1 , 23.0~15.5 Ma),随着南海海盆自东向西南方向的扩张,西南次海盆两侧陆缘岩石圈在该阶段发生破裂分离,仅有部分断层仍具有较小的活动强度。在该阶段,西南次海盆两侧陆缘构造沉降速率降低,尤其在两侧陆缘靠近洋盆处表现得更为明显,但该阶段北侧陆缘的平均构造沉降速率仍大于南侧陆缘。其中,北侧陆缘的平均构造沉降速率约为21 m/Ma,南侧陆缘的平均构造沉降速率约为14 m/Ma。

第五沉降幕:中中新世至今(N_1^2-Q , 15.5~0 Ma),随着南沙地块与婆罗洲和西北巴拉望的俯冲碰撞,西南次海盆扩张停止,西南次海盆两侧陆缘进入热稳定沉降期。在该阶段,北侧陆缘构造沉降速率继续降低,平均构造沉降速率约为16 m/Ma;南侧陆缘

构造沉降速率相对上一阶段略微增大,平均构造沉降速率约为18 m/Ma,这可能与该时期南侧陆缘挤压强度减弱,岩石圈回弹,前隆降低有关^[49]。

3.2 两侧陆缘新生代伸展特征

根据南海西南次海盆两侧陆缘测线(NH973-3测线和NH973-1+SO27-04测线)各时期的伸展特征(伸展系数、伸展量和伸展速率)(图7),可将西南次海盆两侧陆缘新生代伸展过程划分为5个阶段:初始裂陷期($E_1-E_2^2$, 65~38.5 Ma),裂陷强烈期($E_2^3-E_3^1$, 38.5~32.0 Ma),裂陷末期(E_3^2 , 32.0~23.0 Ma),断-拗转换期(N_1^1 , 23.0~15.5 Ma),裂后热沉降期(N_1^2-Q , 15.5~0 Ma)。

西南次海盆两侧陆缘测线各时期的伸展系数变化结果表明(图7),两侧陆缘新生代拉张作用主要发生于裂陷期,其中北侧陆缘在新生代呈持续伸展状态,且总伸展系数大于南侧陆缘,其值高达约1.92,暗示了北侧陆缘深部构造活动较剧烈,岩石圈减薄程度要大于南侧陆缘。南侧陆缘的伸展系数在渐新世末期(23.0 Ma)达到最大,随后,出现较低幅度减小的现象,表明南侧陆缘在渐新世之后,南侧陆缘地壳发生一定程度的挤压增厚现象,这可能与早中新世期间,西南次海盆扩张,古南海俯冲殆尽,南部陆缘与婆罗洲发生碰撞这一构造运动有关。

西南次海盆两侧陆缘测线各时期的伸展速率和伸展量变化结果表明(图7),两侧陆缘拉张速率和拉张量的高峰期均出现于裂陷强烈期($E_2^3-E_3^1$ 时期),而西南次海盆两侧陆缘构造沉降高峰期并未出现在陆缘裂陷强烈期,而是出现在陆缘裂陷末期(E_3^2 时期),具有一定的延迟滞后性。受西南次海盆扩张和古南海俯冲碰撞影响,南侧陆缘伸展速率

和伸展量在晚渐新世末期之后发生大幅度的减小,并且在早中新世沉积期间出现负值现象。

4 讨论

4.1 两侧陆缘构造沉降作用延迟机制探讨

南海西南次海盆两侧陆缘构造沉降特征和伸展特征分析结果表明,西南次海盆两侧陆缘构造沉降高峰期与伸展裂陷作用高峰期不对应,具有一定的延迟滞后性。关于构造异常沉降,前人提出了许多成因机制,如深部热异常^[42,50-51]、岩浆活动^[4]、岩石圈强度^[38]、岩石圈分层伸展差异^[38,42]以及沉积物负载引起的下地壳流^[52]等。

徐行等(2018)通过分析南海西南次海盆及其相邻陆缘的87个有效地热流数据以及一些测站沉积物热导率、生热率等实测地热参数^[53],结果显示西南次海盆南北两侧陆缘平均热流值分别为 79 ± 15.5 Mw/m^2 和 78 ± 15.6 Mw/m^2 ,表明西南次海盆两侧陆缘不存在深部热异常。通过分析前人有关西南次海盆两侧陆缘深部构造特征结果可知^[30,54-55],西南次海盆两侧陆缘上地壳中存在许多张性正断层,部分断层向下角度变低,为梨式正断层,这些断层多收敛于同一滑脱面上,形成拆离断层;而下地壳中多发生塑性变形,形成“布丁构造”,且南部陆缘伸展因子计算结果表明南部陆缘在纵向上的伸展不均一,其上地壳脆性伸展因子与全地壳伸展因子之间存在较大差异^[32,56]。这种上地壳与全地壳的伸展减薄程度不一致现象在南海珠江口盆地、琼东南盆地等地区均有发现^[56-58]。综合以上分析,可初步判断南海西南次海盆两侧陆缘岩石圈的伸展与深度相关,即其上、下地壳的伸展减薄程度存在差异。这种岩石圈分层的差异可能导致西南次海盆两侧陆缘的构造沉降在裂陷强烈期沉降不足,存在明显亏损,后期的快速沉降可能是对前期沉降亏损的补偿。

另外,在晚渐新世沉积期间(E_3^2 , 32.0~23.0 Ma),位于西南次海盆西侧的南海西缘断裂右旋走滑活动强烈^[59-61],断裂的走滑活动也可导致构造沉降速率增大^[62]。因此,西南次海盆两侧陆缘在晚渐新世沉积期间的快速沉降可能也受南海西缘断裂右旋走滑活动影响,而且南海西缘断裂的右旋走滑活动也可能是造成西南次海盆两侧陆缘的构造沉降中心向南迁移的重要原因。此外,西南次海盆南侧陆缘在晚渐新世沉积期构造沉降速率明显小于北侧

陆缘,这种差异也可能与西南次海盆南侧陆缘因相对远离南海西缘断裂而受其右旋走滑活动影响较小有关。

4.2 两侧陆缘构造沉降对南海形成演化过程的响应

本文研究结果表明南海西南次海盆两侧陆缘构造沉降与南海形成演化过程紧密相关,受到南海陆缘伸展和南海西缘断裂走滑活动等因素的复合影响。

在古新世—中始新世沉积期间,西南次海盆两侧陆缘位于华南大陆南部,属于华南大陆的一部分^[11,22-25]。此期间南海陆缘开始张裂,两侧陆缘基底受区域拉张作用的影响形成了一系列坳垒构造,由于拉张作用和地壳性质的不均一性,局部地区强烈伸展并且快速沉降,形成沉降中心并开始接受沉积。

至晚始新世—早渐新世,断裂活动强度增大,伸展作用进一步加强,伸展速率和伸展量在此阶段达到高峰,两侧陆缘构造沉降量也快速增大。由于在古新世至早渐新世期间西南次海盆两侧陆缘并未分离,因此在晚渐新世前南海西南次海盆两侧陆缘的平均构造沉降速率并未表现出较大差异。

晚渐新世沉积期间,南海北部开始海底扩张^[1,2,26-27],西南次海盆两侧陆缘的伸展速率和伸展量较上一时期均有所减小,但西南次海盆两侧陆缘构造沉降速率在此阶段均达到高峰,并且由于西南次海盆两侧陆缘岩石圈的分层差异伸展以及南海西缘断裂的右旋走滑活动造成西南次海盆两侧陆缘的平均构造沉降速率开始出现较大差异。从构造沉降速率结果可知,该时期是西南次海盆两侧陆缘沉积盆地的主要形成期。同时,位于北侧陆缘由于受到南海西缘断裂右旋走滑活动改造的影响而形成与走滑-伸展作用相关的中建南盆地。

早中新世沉积期间,西南次海盆开始发生海底扩张^[1,2,26-27],西南次海盆两侧陆缘进入断-拗转换沉降期,两侧陆缘伸展速率和伸展量表现为快速减小,并且受西南次海盆扩张和古南海向婆罗洲地块俯冲碰撞影响,南侧陆缘遭受挤压^[1,2,18,35,56],伸展速率和伸展量出现负值。此阶段,西南次海盆南侧陆缘因受到挤压碰撞改造的影响而形成北康盆地、南薇西盆地等相关的伸展-挠曲复合型盆地。

中中新世至今,西南次海盆扩张停止,西南次海盆两侧陆缘大部分断裂停止活动,北侧陆缘伸展速率和伸展量继续减小,南侧陆缘伸展速率和伸展量略微增大,两侧陆缘构造沉降进入热稳定沉降期。

5 结论

(1)南海西南次海盆两侧陆缘的构造沉降曲线特征不同于典型的被动陆缘裂陷盆地构造沉降曲线的两段式,均表现为裂陷初始期曲线斜率平缓,裂陷强烈期和末期曲线斜率较陡,断-拗转换期和拗陷期曲线斜率又回归相对平缓的反“S”形的多段式特征。

(2)南海西南次海盆两侧陆缘的构造沉降高峰期与两侧陆缘伸展裂陷高峰期不对应,具有一定的延迟滞后性,造成此现象的原因可能与西南次海盆陆缘岩石圈的分层差异伸展及晚渐新世南海西缘断裂的右旋走滑活动有关,并且该时期南海西缘断裂的右旋走滑活动导致西南次海盆两侧陆缘的构造沉降中心向南迁移以及两侧陆缘构造沉降速率出现较大差异。

(3)南海西南次海盆两侧陆缘沉积盆地的主要形成期为晚渐新世,北侧陆缘在晚渐新世因受南海西缘断裂右旋走滑活动的改造影响而形成伸展-走滑相关的沉积盆地,南侧陆缘在早中新世因受到挤压碰撞改造影响而形成伸展-挠曲复合型的沉积盆地。

参考文献 (References)

- [1] Taylor B, Hayes D E. Origin and history of the South China Sea Basin [C]//Hayes D E. The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands, Geophysical Monograph Series 27. Washington, DC: American Geophysical Union, 1983: 23-56.
- [2] Taylor B, Hayes D E. The tectonic evolution of the South China Basin [C]//Hayes D E. The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands, Geophysical Monograph Series 23. Washington, DC: American Geophysical Union, 1980: 89-104.
- [3] 李家彪, 丁巍伟, 高金耀, 等. 南海新生代海底扩张的构造演化模式: 来自高分辨率地球物理数据的新认识 [J]. *地球物理学报*, 2011, 54(12): 3004-3015. [LI JiaBiao, DING Weiwei, GAO Jinyao, et al. Cenozoic evolution model of the sea-floor spreading in South China Sea: New constraints from high resolution geophysical data [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(12): 3004-3015.]
- [4] Shi X B, Burov E, Leroy S, et al. Intrusion and its implication for subsidence: A case from the Baiyun Sag, on the northern margin of the South China Sea [J]. *Tectonophysics*, 2005, 407(1-2): 117-134.
- [5] Northrup C J, Royden L H, Burchfiel B C. Motion of the Pacific plate relative to Eurasia and its potential relation to Cenozoic extension along the eastern margin of Eurasia [J]. *Geology*, 1995, 23(8): 719-722.
- [6] 郭令智, 施央申, 马瑞士. 西太平洋中、新生代活动大陆边缘和岛弧构造的形成及演化 [J]. *地质学报*, 1983, 57(1): 11-21. [GUO Lingzhi, SHI Yangshen, MA Ruishi. On the formation and evolution of the Mesozoic-Cenozoic active continental margin and island arc tectonics of the Western Pacific Ocean [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1983, 57(1): 11-21.]
- [7] Schlüter H U, Hinz K, Block M. Tectono-stratigraphic terranes and detachment faulting of the South China Sea and Sulu Sea [J]. *Marine Geology*, 1996, 130(1-2): 39-78.
- [8] 朱伟林, 吴景富, 张功成, 等. 中国近海新生代盆地构造差异性演化及油气勘探方向 [J]. *地质前缘*, 2015, 22(1): 88-101. [ZHU Weilin, WU Jingfu, ZHANG Gongcheng, et al. Discrepancy tectonic evolution and petroleum exploration in China offshore Cenozoic basins [J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(1): 88-101.]
- [9] 包汉勇, 郭战峰, 张罗磊, 等. 太平洋板块形成以来的中国东部构造动力学背景 [J]. *地球科学进展*, 2013, 28(3): 337-346. [BAO Hanyong, GUO Zhanfeng, ZHANG Luolei, et al. Tectonic dynamics of eastern China since the formation of the Pacific plate [J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(3): 337-346.]
- [10] 谢文彦, 王涛, 张一伟. 南沙群岛海域断裂体系构造特征及其形成机制 [J]. *热带海洋学报*, 2007, 26(6): 26-33. [XIE Wenyan, WANG Tao, ZHANG Yiwei. Structural features and formation mechanism of fault systems in Nansha sea area [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2007, 26(6): 26-33.]
- [11] Liu H L, Zheng H B, Wang Y L, et al. Basement of the South China Sea area: tracing the Tethyan Realm [J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 2011, 85(3): 637-655.
- [12] 姚伯初. 南海南部地区的新生代构造演化 [J]. *南海地质研究*, 1994(6): 1-15. [YAO Bochu. Tectonical evolution on the southern margin of South China Sea [J]. *Geological Research of South China Sea*, 1994(6): 1-15.]
- [13] 姚伯初, 万玲, 吴能友. 大南海地区新生代板块构造活动 [J]. *中国地质*, 2004, 31(2): 113-122. [YAO Bochu, WAN Ling, WU Nengyou. Cenozoic plate tectonic activities in the Great South China Sea area [J]. *Geology in China*, 2004, 31(2): 113-122.]
- [14] 姚永坚, 姜玉坤, 曾祥辉. 南沙海域新生代构造运动特征 [J]. *中国海上油气(地质)*, 2002, 16(2): 113-117, 124. [YAO Yongjian, JIANG Yukun, ZENG Xianghui. Cenozoic tectonic movements in Nansha area, South China Sea [J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 2002, 16(2): 113-117, 124.]
- [15] 解习农, 任建业, 王振峰, 等. 南海大陆边缘盆地构造演化差异性及其与南海扩张耦合关系 [J]. *地质前缘*, 2015, 22(1): 77-87. [XIE Xinong, REN Jianye, WANG Zhenfeng, et al. Difference of tectonic evolution of continental marginal basins of South China Sea and relationship with SCS spreading [J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(1): 77-87.]
- [16] 解习农, 张成, 任建业, 等. 南海南北大陆边缘盆地构造演化差异性对油气成藏条件控制 [J]. *地球物理学报*, 2011, 54(12): 3280-3291. [XIE Xinong, ZHANG Cheng, REN Jianye, et al. Effects of distinct tectonic evolutions on hydrocarbon accumulation in northern and southern continental marginal basins of South China Sea [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(12): 3280-3291.]
- [17] Li J B, Ding W W, Wu Z Y, et al. The propagation of seafloor spreading in the southwestern subbasin, South China Sea [J]. *Chinese*

- Science Bulletin*, 2012, 57(24): 3182-3191.
- [18] Ding W W, Li J B. Propagated rifting in the Southwest Sub-basin, South China Sea: Insights from analogue modelling [J]. *Journal of Geodynamics*, 2016, 100: 71-86.
- [19] 赵长煜, 宋海斌, 李家彪, 等. 南海西南次海盆NH973-1测线地震解释[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(12): 3258-3268. [ZHAO Changyu, SONG Haibin, LI Jiabiao, et al. Tectonic and seismic interpretation of line NH973-1 along southwest sub-basin in South China Sea [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(12): 3258-3268.]
- [20] 姚伯初. 南海西南海盆的岩石圈张裂模式探讨[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1999, 19(2): 37-48. [YAO Bochu. On the lithospheric rifting model in the southwest subbasin of South China Sea [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 1999, 19(2): 37-48.]
- [21] 丘学林, 赵明辉, 敖威, 等. 南海西南次海盆与南沙地块的OBS探测和地壳结构[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(12): 3117-3128. [QIU Xuelin, ZHAO Minghui, AO Wei, et al. OBS survey and crustal structure of the Southwest Sub-basin and Nansha Block, South China Sea [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(12): 3117-3128.]
- [22] Hall R. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions, model and animations [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, 20(4): 353-431.
- [23] 刘海龄, 阎贫, 张伯友, 等. 南海前新生代基底与东特提斯构造域[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2004, 24(1): 15-28. [LIU Hailing, YAN Pin, ZHANG Boyou, et al. Pre-Cenozoic basements of the South China Sea and eastern Tethyan realm [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2004, 24(1): 15-28.]
- [24] 刘海龄, 阎贫, 孙岩. 南沙微板块的层块构造[J]. *中国地质*, 2002, 29(4): 374-381. [LIU Hailing, YAN Pin, SUN Yan. Layer-block tectonics of the Nansha microplate [J]. *Geology in China*, 2002, 29(4): 374-381.]
- [25] 赵美松, 刘海龄, 吴朝华. 南海南北陆缘中生代地层—构造特征及碰撞造山[J]. *地球物理学进展*, 2012, 27(4): 1454-1464. [ZHAO Meisong, LIU Hailing, WU Chaohua. Mesozoic stratigraphic and structural features and collisional orogeny between the northern and southern continental margins of South China Sea [J]. *Progress in Geophysics*, 2012, 27(4): 1454-1464.]
- [26] Zhu R W, Liu H L, Yao Y J, et al. Mesozoic deformation and its geological significance in the southern margin of the South China Sea [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2018, 17(4): 835-845.
- [27] 朱荣伟, 刘海龄, 姚永坚, 等. 南海中-西沙地块前新生代构造变形特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(2): 67-74. [ZHU Rongwei, LIU Hailing, YAO Yongjian, et al. A preliminary analysis of pre-cenozoic tectonic deformation of Zhongsha-Xisha block in South China Sea [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2017, 37(2): 67-74.]
- [28] 朱荣伟, 刘海龄, 姚永坚, 等. 南沙海域中生代构造挤压及其成因[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(6): 57-64. [ZHU Rongwei, LIU Hailing, YAO Yongjian, et al. Mesozoic tectonic compression and its genesis in the sea area of Nansha [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2017, 37(6): 57-64.]
- [29] Briais A, Patriat P, Tapponnier P. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the South China Sea: Implications for the tertiary tectonics of Southeast Asia [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1993, 98(B4): 6299-6328.
- [30] Li C F, Xu X, Lin J, et al. Ages and magnetic structures of the South China Sea constrained by deep tow magnetic surveys and IODP Expedition 349 [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2014, 15(12): 4958-4983.
- [31] Franke D, Savva D, Pubellier M, et al. The final rifting evolution in the South China Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 58: 704-720.
- [32] Ding W W, Li J B, Clift P D, et al. Spreading dynamics and sedimentary process of the Southwest Sub-basin, South China Sea: Constraints from multi-channel seismic data and IODP Expedition 349 [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 115: 97-113.
- [33] 吴朝华, 赵美松, 刘海龄. 南沙中部海域沉积地层特征及其构造成因[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 2011, 36(5): 853-860. [WU Chaohua, ZHAO Meisong, LIU Hailing. Characteristics of sedimentary strata in Central Nansha Sea area and its tectonic origin [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2011, 36(5): 853-860.]
- [34] Wang Y L, Qiu Y, Yan P, et al. Seismic evidence for Mesozoic strata in the northern Nansha waters, South China Sea [J]. *Tectonophysics*, 2016, 677-678: 190-198.
- [35] Yan P, Liu H L. Tectonic-stratigraphic division and blind fold structures in Nansha Waters, South China Sea [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2004, 24(3): 337-348.
- [36] Cohen K M, Finney S C, Gibbard P L, et al. The ICS international chronostratigraphic chart [J]. *Episodes*, 2013, 36(3): 199-204.
- [37] Haq B U, Hardenbol J, Vail P R. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic [J]. *Science*, 1987, 235(4793): 1156-1167.
- [38] Dong D D, Wu S G, Zhang G C, et al. Rifting process and formation mechanisms of syn-rift stage prolongation in the deepwater basin, northern South China Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(23): 3715-3725.
- [39] Watts A B, Ryan W B F. Flexure of the lithosphere and continental margin basins [J]. *Tectonophysics*, 1976, 36(1-3): 25-44.
- [40] Bond G C, Kominz M A. Construction of tectonic subsidence curves for the early Paleozoic miogeocline, southern Canadian Rocky Mountains: implications for subsidence mechanisms, age of breakup, and crustal thinning [J]. *GSA Bulletin*, 1984, 95(2): 155-173.
- [41] Sclater J G, Christie P A F. Continental stretching: an explanation of the Post-Mid-Cretaceous subsidence of the central North Sea basin [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1980, 85(B7): 3711-3739.
- [42] 杨军, 施小斌, 王振峰, 等. 琼东南盆地张裂期沉降亏损与裂后期快速沉降成因[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2015, 35(1): 81-90. [YANG Jun, SHI Xiaobin, WANG Zhenfeng, et al. Origin of syn-rift subsidence deficit and rapid post-rift subsidence in Qiongdongnan Basin [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2015, 35(1): 81-90.]
- [43] 张云帆, 廖杰, 孙珍, 等. 南海海域构造沉降特征[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 2011, 36(5): 949-955. [ZHANG Yunfan, LIAO Jie,

- SUN Zhen, et al. Characteristics of tectonic subsidence Nansha Area [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2011, 36(5): 949-955.]
- [44] 蔡佳, 王华, 崔敏. 琼东南盆地古近系沉降特征[J]. *海洋地质前沿*, 2014, 30(4): 14-19, 27. [CAI Jia, WANG Hua, CUI Min. Subsidence character of the Paleogene Qiongdongnan Basin [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2014, 30(4): 14-19, 27.]
- [45] Walsh J, Watterson J, Yielding G. The importance of small-scale faulting in regional extension [J]. *Nature*, 1991, 351(6325): 391-393.
- [46] Lü C C, Hao T Y, Lin J, et al. The role of rifting in the development of the continental margins of the southwest subbasin, South China Sea: Insights from an OBS experiment [J]. *Marine Geophysical Research*, 2017, 38(1-2): 105-123.
- [47] Ding W W, Franke D, Li J B, et al. Seismic stratigraphy and tectonic structure from a composite multi-channel seismic profile across the entire Dangerous Grounds, South China Sea [J]. *Tectonophysics*, 2013, 582: 162-176.
- [48] Clift P D, Sun Z. The sedimentary and tectonic evolution of the Yinggehai-Song Hong basin and the southern Hainan margin, South China Sea: Implications for Tibetan uplift and monsoon intensification [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2006, 111(B6): B06405.
- [49] 赵中贤, 孙珍, 陈广浩, 等. 南沙海域新生代构造特征和沉降演化[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 2011, 36(5): 815-822. [ZHAO Zhongxian, SUN Zhen, CHEN Guanghao, et al. Cenozoic structural characteristics and subsidence evolution in Nansha [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2011, 36(5): 815-822.]
- [50] Shi X B, Jiang H Y, Yang J, et al. Models of the rapid post-rift subsidence in the eastern Qiongdongnan Basin, South China Sea: implications for the development of the deep thermal anomaly [J]. *Basin Research*, 2017, 29(3): 340-362.
- [51] 陈梅, 施小斌, 刘凯, 等. 南海北缘珠三坳陷新生代构造沉降特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(6): 47-56. [CHEN Mei, SHI Xiaobin, LIU Kai, et al. Cenozoic tectonic subsidence of the Zhu III depression in the Pearl River Mouth basin, Northern South China Sea [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2017, 37(6): 47-56.]
- [52] Zhao Z X, Sun Z, Wang Z F, et al. The dynamic mechanism of post-rift accelerated subsidence in Qiongdongnan Basin, northern South China Sea [J]. *Marine Geophysical Research*, 2013, 34(3-4): 295-308.
- [53] 徐行, 姚永坚, 彭登, 等. 南海西南次海盆的地热流特征与分析[J]. *地球物理学报*, 2018, 61(7): 2915-2925. [XU Xing, YAO Yongjian, PENG Deng, et al. The characteristics and analysis of heat flow in the Southwest sub-basin of South China Sea [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(7): 2915-2925.]
- [54] Savva D, Meresse F, Pubellier M, et al. Seismic evidence of hyper-stretched crust and mantle exhumation offshore Vietnam [J]. *Tectonophysics*, 2013, 608: 72-83.
- [55] 汪俊, 邱燕, 阎贫, 等. 跨南海西南次海盆OBS、多道地震与重力联合调查[J]. *热带海洋学报*, 2019, 38(4): 81-90. [WANG Jun, QIU Yan, YAN Pin, et al. A joint investigation using OBS, multi-channel seismic and gravity data across the Southwestern Sub-basin of the South China Sea [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2019, 38(4): 81-90.]
- [56] 张云帆, 孙珍, 周蒂, 等. 南海北部陆缘新生代地壳减薄特征及其动力学意义[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2008, 51(3): 422-430. [ZHANG Yunfan, SUN Zhen, ZHOU Di, et al. Stretching characteristics and its dynamic significance of the northern continental margin of South China Sea [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, 51(3): 422-430.]
- [57] 雷超, 任建业, 佟殿君. 南海北部洋陆转换带盆地发育动力学机制[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(4): 1287-1299. [LEI Chao, REN Jianye, TONG Dianjun. Geodynamics of the ocean-continent transition zone, northern margin of the South China Sea: Implications for the opening of the South China Sea [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(4): 1287-1299.]
- [58] 佟殿君, 任建业, 雷超, 等. 琼东南盆地深水区岩石圈伸展模式及其对裂后期沉降的控制[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 2009, 34(6): 963-974. [TONG Dianjun, REN Jianye, LEI Chao, et al. Lithosphere stretching model of deep water in Qiongdongnan Basin, northern continental margin of South China Sea, and controlling of the post-rift subsidence [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2009, 34(6): 963-974.]
- [59] 安慧婷, 李三忠, 索艳慧, 等. 南海西部新生代控盆断裂及盆地群成因[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(6): 95-111. [AN Huiting, LI Sanzhong, SUO Yanhui, et al. Basin-controlling faults and formation mechanism of the Cenozoic basin groups in the western South China Sea [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2012, 32(6): 95-111.]
- [60] 高红芳. 南海西缘断裂带走滑特征及其形成机理初步研究[J]. *中国地质*, 2011, 38(3): 537-543. [GAO Hongfang. A tentative discussion on strike-slipping character and formation mechanism of western-edge fault belt in South China Sea [J]. *Geology in China*, 2011, 38(3): 537-543.]
- [61] 刘海龄, 姚永坚, 沈宝云, 等. 南海西缘结合带的贯通性[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 2015, 40(4): 615-632. [LIU Hailing, YAO Yongjian, SHEN Baoyun, et al. On linkage of western boundary faults of the South China Sea [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2015, 40(4): 615-632.]
- [62] 袁玉松, 杨树春, 胡圣标, 等. 琼东南盆地构造沉降史及其主控因素[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(2): 376-383. [YUAN Yusong, YANG Shuchun, HU Shengbiao, et al. Tectonic subsidence of Qiongdongnan Basin and its main control factors [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(2): 376-383.]