

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.地球物理学报,2011,54(12):3004~3015,DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.12.003

Li J B, Ding W W, Gao J Y, et al. Cenozoic evolution model of the sea-floor spreading in South China Sea: new constraints from high resolution geophysical data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(12):3004~3015, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.12.003

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

李家彪^{1,2},丁巍伟^{1,2},高金耀^{1,2},吴自银^{1,2},张 洁^{1,2}

1 国家海洋局第二海洋研究所,杭州 310012

2 国家海洋局海底科学重点实验室,杭州 310012

摘 要 根据高分辨率重、磁测网数据的分析,结合多波束海底地貌的构造解释,南海海盆新生代经历了两期不同动力特征的海底扩张,25 Ma 的沉积-构造事件是其重要分界。早期扩张从约 33.5 Ma 开始至 25 Ma 停止,在东部海盆南、北两侧和西北海盆形成了具有近 E-W 向或 NEE 向磁条带的老洋壳,是近 NNW-SSE 向扩张的产物;晚期扩张从 25 Ma 开始至 16.5 Ma 结束,在东部海盆中央区和西南海盆形成了具有 NE 向磁条带的新洋壳,是 NW-SE 向扩张的产物。南海海盆分区特点明显,南北分区,东西分段。从南到北可进一步分为 3 个亚区,南、北亚区由早期扩张产生,而晚期扩张的中央亚区从东到西又可进一步分为 6 个洋段,中间均由 NNW 或 NW 向断裂分割,是扩张中脊分段性的表现。南海晚期扩张具有渐进式扩张的特点,虽然它们均于磁条带异常 C5c 停止扩张,但开始扩张的时间从东部的 C6c(23.5 Ma),到中部的 C6b(22.8 Ma),一直变新到西部的 C5e(18.5 Ma)。东部海盆与西南海盆之间的 NNW 向断裂是分割两海盆的边界断裂,不仅切割了磁条带异常,控制了两海盆不同的地球物理场特征,而且还使扩张中脊左行平移约 95km,造成扩张中心和磁条带不连续。南海海盆扩张期间,其东部没有菲律宾群岛封闭,当时是一个面向大洋的港湾,与亚丁湾洋盆可以对比,是洋中脊向大陆边缘入侵的产物。

关键词 南海海盆,渐进式扩张,构造演化模式,新生代

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.12.003

中图分类号 P541

收稿日期 2011-08-17,2011-11-01 收修定稿

Cenozoic evolution model of the sea-floor spreading in South China Sea: new constraints from high resolution geophysical data

LI Jia-Biao^{1,2}, DING Wei-Wei^{1,2}, GAO Jin-Yao^{1,2}, WU Zi-Yin^{1,2}, ZHANG Jie^{1,2}

1 *Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China*

2 *Key Laboratory of Submarine Geoscience, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China*

Abstract Based on investigations of the new high resolution gravity and magnetic data, combined with swath bathymetry, the Cenozoic evolution model of the South China Sea is revised. Two major sea-floor spreading stages were revealed with different dynamic mechanisms, separated by a remarkable tectonic-sedimentary event near 25 Ma. Sea-floor spreading started firstly in the East and Northwest Sub-basins from ~33.5 Ma to 25 Ma, and formed the original oceanic crust with

基金项目 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2007CB411704)和国家自然科学基金重点课题(91028006)资助。

作者简介 李家彪,男,1961 年生,研究员,973“南海大陆边缘动力学及油气资源潜力”项目首席科学家,主要从事海洋地质与地球物理方面研究。E-mail:jbli@sio.org.cn

E-W or NEE-oriented magnetic anomalies in the northern and southern side of the East Sub-basin nowadays and whole Northwest Sub-basin. Since 25 Ma the sea-floor spreading continued with different direction until 16.5 Ma. The later NW-SE-oriented spreading made the NE oriented magnetic anomalies in the central East Sub-basin and Southwest Sub-basin. Different tectonic areas developed during these two spreading episodes in the oceanic basin. The whole oceanic basin could be divided into three subregions from north to south. The northern and southern subregions are related to the first episodic sea-floor spreading, while the central one was formed during the later sea-floor spreading. And the central subregion could be separated into six segments further bounded with NW-NNW-oriented transform faults. Evidence from magnetic anomalies showed that the sea-floor spreading in the later episode began in the east segments with C6c anomaly (23.5 Ma), and continued with C6b (22.8 Ma) in the middle segments and with C5e (18.5 Ma) in the west. We indicated that between 25 Ma and 16.5 Ma, the central part of the East Sub-basin and Southwest Sub-basin experienced rifting propagation from east to west, and the spreading direction changed in each segment. A NNW-trending transform fault separated the East and Southwest Sub-basins. It not only cuts the magnetic anomalies with different directions, but also makes a nearly 95 km sinistral offset of the spreading ridge. Before the collision of the Luzon arc with and Eurasia Plate, the South China Sea was a gulf-shape marginal sea opening to the Pacific Ocean, resulting from westward propagation of a spreading center inside the Sunda Continent, as in the case of the western Gulf of Aden.

Keywords South China Sea basin, Rifting propagation, Tectonic evolution model, Cenozoic

1 引 言

南海海盆是西太平洋大陆边缘中的一个大型边缘海盆. 根据地质、地球物理特征, 南海海盆又可进一步分为东部海盆(中央海盆)、西北海盆和西南海盆三个次级海盆(图 1). 南海海盆是全球少数几个分布于低纬度地区的大型深水海盆, 水深总体在 3700~4400 m 之间变化, 东部海盆和西北海盆相对较浅, 西南海盆相对较深. 早期的声纳浮标和双船折射研究^[1, 2]表明, 南海深水海盆的地壳为洋壳结构, 并在后期的地球物理观测中被进一步证实^[3~8]. 海盆构造上呈海底扩张的特征, 三个次海盆均有自己的扩张中心. 东部海盆是南海最大的次级海盆, 其沉积地层由南、北两侧大陆边缘向中央总体逐渐减薄, 基底逐渐抬升, 断块构造对称分布, 磁条带近 E-W 向延伸^[9, 10], 扩张中心目前已被近 E-W 向的黄岩海山链占据; 西北海盆是南海最小的次级海盆, 沉积地层和基底构造也呈对称分布, 磁条带走向 NE, 扩张中心有双峰海山等侵入、喷发^[11]; 西南海盆呈三角形海盆, 具有从东北向西南逐步扩张的构造演化特征, 扩张中心总体表现为水深达 4400 m 的中央裂谷槽地, 两侧的磁条带、沉积地层和基底构造对称分

布, 呈 NE 向延伸, 构造形式从东北向西南从海底扩张逐步转化为陆缘张裂.

南海海盆的新生代海底扩张是南海构造演化研究的重要组成部分, 记录了大量大陆边缘张裂到区域地质演化的重要信息. 由于目前没有直接的钻探, 南海海盆的形成演化历史和动力学模式主要基于磁异常条带的识别和对比, 并且一直是争论的焦点:

(1) 南海海盆开始扩张的最老年龄问题. 由于磁条带特征相对清晰, Taylor 和 Hayes^[9]最早在东部海盆进行了较为可信的地磁条带识别, 从南、北两侧向中央鉴别出 C11~C5d 的磁异常, 认为扩张总体沿 15°N 附近的近 E-W 向黄岩海山链为残留扩张中心对称分布, 扩张时代为 32~17 Ma. 之后 Briaies 等^[10]对 1990 年以前的南海磁异常资料进行了详细对比和综合分析, 验证了 Taylor 和 Hayes 的磁异常条带划分的观点, 并在扩张中心附近又鉴别出 C5c 磁条带, 因此南海海盆扩张年龄为 30~16.5 Ma (磁异常年代根据 Cande 和 Kent^[12]发表的新地磁倒转年表进行了修正). 西北海盆作为东部海盆的西延, 通常被认为是与东部海盆一起由 N-S 向扩张形成的^[9, 10, 13]. 但近期在西北海盆扩张中脊的双峰海山上获得的粗面岩 30 Ma 的 K-Ar 年龄说明, 海盆应该在 30 Ma 前已经扩张, 在扩张中心的两侧应该能

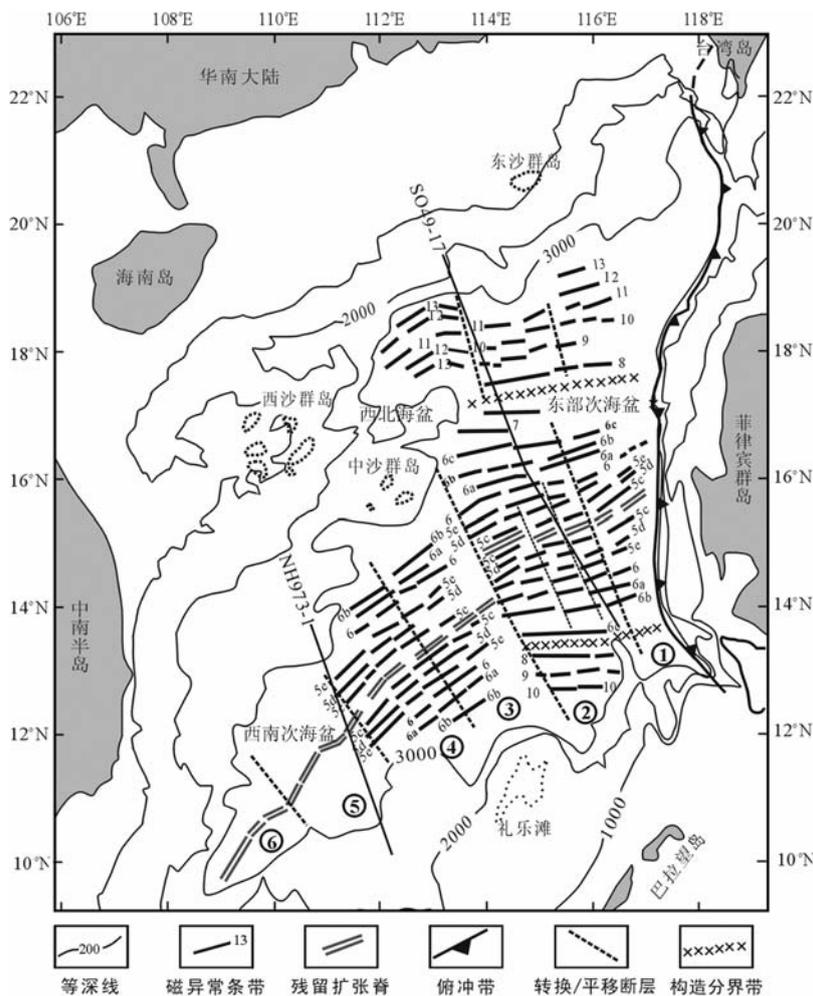


图1 南海海盆构造分区与磁异常条带分布图

①~⑥为6个洋段。

Fig. 1 Tectonic divisions and distribution of magnetic anomalies of the South China Sea basin

够发现大于 C11 的磁条带异常。考虑到绝大多数海山均为后扩张期的产物,因此最早的扩张年龄还应该更早。姚伯初^[14]利用地震资料推断西北海盆扩张甚至发生在晚始新世。

(2)早、晚期扩张的转换机制问题。Taylor 和 Hayes^[9]认为南海海盆在早期 N-S 向扩张的过程中,约在 27 Ma(磁条带异常 C7a)前后的扩张中脊发生了一次向南迁移的跳跃,造成海盆南部磁条带异常, C7a~C7 缺失,但晚期扩张仍然保持了 N-S 向扩张。Briaies 等^[10]支持扩张中脊向南跳跃这一设想,只是将这种跳跃的时间修改为 25 Ma,并认为之后南海海盆发生了 NW-SE 向扩张,而且这种扩张进一步向西南方向延伸,从而开始西南海盆的扩张。通常洋脊跳跃发生在同一动力体制内,仍然会延续原来的扩张方向,但如果早期扩张为 N-S 向,而晚期扩张则转为 NW-SE 向,这种转换机制到底是洋脊跳跃还是实际上发生了动力特征不同的两期扩

张,这一直是值得研究的重要问题。李家彪等^[15]对南海东部海盆的高分辨率全覆盖多波束构造地貌研究表明,虽然东部海盆东侧海区的磁条带和基底构造平行一致,均为 NE 向,证实晚期确实存在 NW-SE 向扩张,但东部海盆西侧海区的海底线性构造和磁条带异常走向一直来被认为存在不一致性。该区存在近 E-W 向磁条带被认为是一个既定认识^[9, 13],但同时又发现了 NE 向海底构造现象的存在,以至于 Briaies 等^[10]推断是由于存在大量 NW 向转换或平移断层有规律切错 NE 向构造,从而造成原来 NE 向的磁条带被改造成为近 E-W 向的磁条带。由于这些推断都是建立在稀疏、不完整的磁力异常和地形资料基础上的,是否真的存在均匀有规则的 NW 向构造膝折带?其动力机制又是什么?为什么只发生在东部海盆的西侧而不发生在其他海区?磁条带和中央海山链真的被平移成 E-W 向了么?检验和回答这些问题无疑是构建南海海盆演化模式的关键,

也将十分有赖于新的技术手段和新的资料。

(3)西南海盆扩张历史的重建及其与东部海盆的关系一直存在诸多意见分歧. Taylor 和 Hayes^[13]将西南海盆磁异常条带识别为 C6b~C5c, 即 23~16 Ma, 为 NW-SE 向扩张, 但与东部海盆扩张方向不同. Briaies 等^[10]认为西南海盆在 25 Ma 左右洋脊向南跃迁后扩张, 年代与 Taylor 和 Hayes^[13]类似, 演化通过 NW 向构造膝折带与东部海盆的晚期扩张存在成因联系. 然而姚伯初等^[4,16]在西南海盆比东部海盆多识别出一套变形沉积层, 结合磁条带对比, 西南海盆的扩张应发生在更早的 42~35 Ma, 并认为西南海盆和西北海盆古近纪共同经历了近 NW-SE 向的陆缘裂解, 而后开始发生海底扩张, 在其扩张结束后东部海盆才开始 N-S 向扩张, 海盆之间通过 116°E 近 N-S 向走滑断层分割. 此外, Ru 等^[17, 18]根据海水深度和热流值、吕文正等^[18]根据磁条带都得出了磁异常 M32~27(70~63 Ma)的观点. 虽然张健等^[19]通过对西南次海盆热模拟得出海盆一次扩张持续时间不会超过 15 Ma, 但其究竟放在哪个时间段尚没有形成统一意见. 究其原因, 除了海盆构造演化自身的复杂性外, 研究者使用分辨率类似的较老数据集也是一个重要原因. 为此我们利用最新获得的地球物理数据, 结合海盆其他构造、沉积记录, 在构造分区和动力学分析基础上开展南海全海盆构造动力演化模式的重新研究.

2 数据与方法

针对南海海盆海底扩张构造演化模式中存在的争议和不确定性, 我们引入了最新完成的高密度重力、磁力异常数据集和高分辨率的多波束海底地形地貌数据.

南海重力、磁力异常数据主要来源于 2003~2007 年在南海深海盆区域进行的 1:50 万, 部分达到 1:20 万的重力和磁力测量, 同时结合了南海地质地球物理补充调查(1996~2000)、南海中部地质地球物理调查(1983~1986)和中德南海合作调查研究(1986~1996)项目的成果, 周边数据空白区重力利用了卫星测高数据, 磁力利用 NGDC 数据. 重力测量主要采用 KSS-31、KSS-5、L&R Air-Sea system II 和 GSS-2 四种海洋重力仪系统, 测量中 1067 个交叉测线交点均方误差优于 $\pm 1.85 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$; 磁力测量主要采用 G-880/G882 海洋铯光泵磁力仪、SeaSPY 质子旋进式磁力仪和 G-801 质子旋进式磁力仪, 测

线 1077 个交点均方误差优于 $\pm 6.69 \text{ nT}$. 数据经过归一化处理, 最终形成南海海区 20 km×20 km 测网的新的重力和磁力异常数据.

地磁异常计算过程中, 首先将地磁数据与定位数据进行合并, 其次对地磁数据编辑去噪, 进行磁力仪探头位置改正, 利用陆地固定台站和海上流动台站的地磁日变资料进行地磁日变改正, 台站与测区距离控制在 300 km 的有效范围, 并采用 IGRF 国际地磁正常场公式改正, 最后求取磁力异常. 对不同系统、不同年份、不同航次获得的数据进行归一化处理, 最终生成 500 m 间距的网格化数据文件, 为便于分析, 磁力异常成图过程中还叠加了海底地形的灰度(图 2). 空间重力异常计算过程中, 首先将定位数据进行坐标转换, 其次对重力数据编辑去噪, 进行零点漂移改正和空间改正(改正参数为 0.3086), 利用多点滑动平均计算航速和航向并进行厄特渥斯改正, 采用 1985 年国际正常场公式改正, 最后求取空间重力异常. 同样, 对不同系统、不同年份、不同航次获得的数据进行归一化处理, 最终生成 500 m 间距的网格化数据文件, 为便于分析, 空间重力异常成图过程中也叠加了海底地形的灰度(图 3). 这是南海

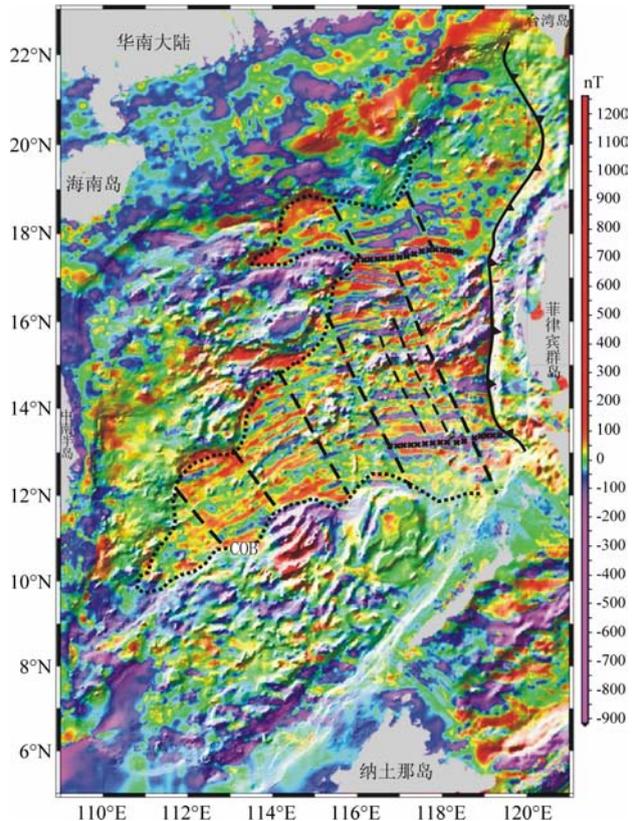


图 2 南海磁力(ΔT)异常及其构造分区(图例同图 1)
Fig. 2 Magnetic anomalies map (ΔT) and tectonic divisions in South China Sea (share the same labels with Fig. 1)

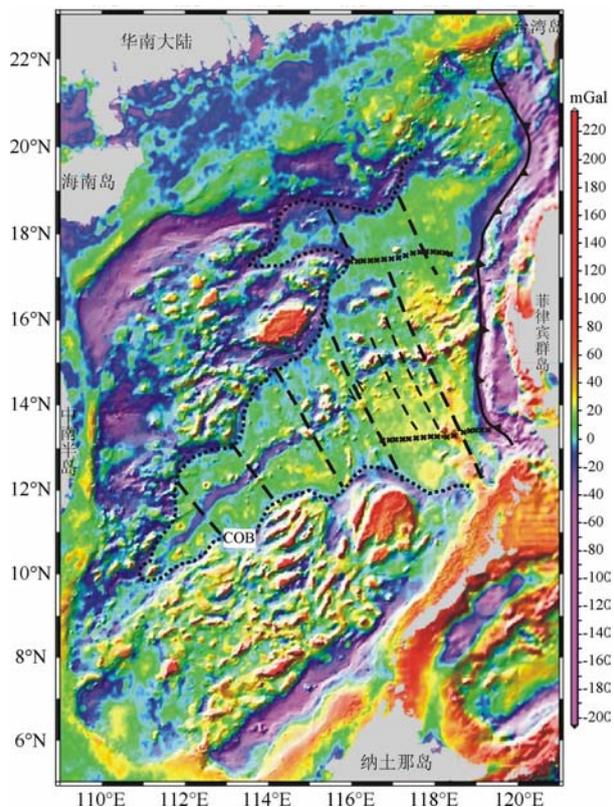


图3 南海空间重力异常及其构造分区(图例同图1)
Fig. 3 Free-air gravity map and tectonic divisions in South China Sea (share the same labels with Fig. 1)

海盆迄今为止精度和分辨率最高的重、磁异常图件,空间重力异常清晰地反映了南海海盆扩张中心的走向变化,磁力异常清晰地给出了南海海盆磁异常条带的空间分布,在 Briais 等^[10]提出的磁条带模型框架的基础上,对南海海盆的磁异常数据重新进行了磁条带识别和定位,其结果见图1。

南海海盆东部与西南海盆的交接区是分析两区构造演化联系和动力学机制的关键地区,为此选取了该区多波束全覆盖海底地形数据.该数据采集系统为 SeaBeam1211 多波束系统,工作频率 12kHz,每个 Ping 包含 151 个波束,波束宽度 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$,最大扇区宽度 150° .数据经过编辑、去噪,进行船姿、罗经和 GPS 延迟校正,以及声速剖面、船只吃水等改正后,被处理成海底地貌阴影图(图4,假想光照从北东方向与水平面呈 45° 照射),以期揭示海盆表层构造地貌特征与深部磁条带分布特征之间的联系,确定东、西两部分海盆的构造演化过渡关系,深化海盆扩张动力过程的认识。

本文选取了横跨南海海盆的两条多道地震代表性剖面,其中 SO49-17 测线跨越了东部海盆, NH 973-1 测线跨越了西南海盆. SO49-17 测线为

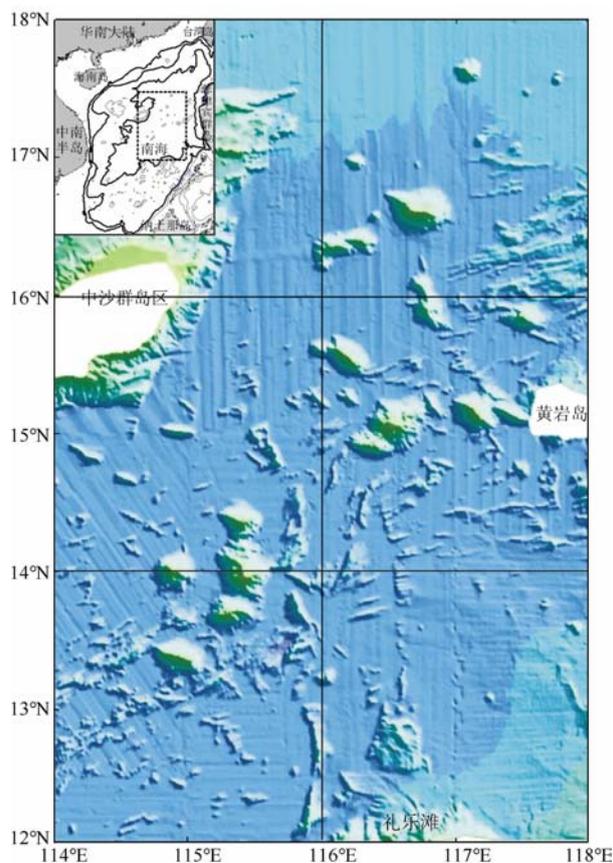


图4 南海中部多波束全覆盖地形图
Fig. 4 Multibeam shaded relief image of the central part of the South China Sea

1987 年中德南海地球科学合作研究 SO49 航次采集获得, NH973-1 测线为 2009 年南海 973 航次采集获得,采集参数见表1,测线位置见图1所获取的地震数据均以 SEG-Y 格式记录,进行了包括振幅补偿、静态校正、增益处理、反褶积处理、去除多次波、速度分析、剩余静态校正及频谱分析在内的叠前处理,其后对叠加数据进行了叠后反褶积及高通滤波处理,从而获得了高质量的叠后偏移剖面。

表1 地震测线的采集参数

Table 1 Acquisition parameters for seismic lines used in this study

测线名称	SO49-17	NH973-1
调查船	SONNE(太阳号)	探宝号
采集时间	1987	2009
电缆道数	48	480
记录长度(s)	12.0	12.0
采样间隔(ms)	4	2
炮间距(m)	50	37.5
气枪容量(立方英寸)	1562	5080

3 海盆构造分区

综合多波束构造地貌、重力异常和磁力异常可以看出,南海海盆从北到南可分为 3 个区,从东到西又可分为 6 个段(图 1~4).南海海盆的南北分区主要以磁条带异常 C8(约 25 Ma)为界,是早、晚两期扩张的反映;东西分段主要分布在磁条带异常 C8 以来的中央区的晚期扩张区域,各段构造特征和演化阶段明显不同,之间均被 NNW 或 NW 向断裂带分割,是洋脊分段性的表现.

3.1 地磁异常分区

南海海盆的地磁异常以条带磁异常为特征,显示其为洋盆属性,这已经得到地质学界的共识. Li 等^[20]利用日本地质调查局和东亚、东南亚海洋地球科学合作委员会(CCOP)1996 年完成的东亚 1:400 万地磁异常数据进行了延拓、功率谱、三维解析信号等的详细分析和分区研究.本次研究使用最新船测 1:50 万磁力数据,虽然总体上有相似的特征,但在细节、连续性和精度上有了很大的提高.东部海盆磁条带特征最为显著,从南北两侧向扩张中心,磁条带走向有从近 E-W 向转为 NE 向和 NEE 向的趋势(图 2).这些条带状线性异常具有短波长、高振幅、陡梯度的特点,并正负交替剧烈起伏变化.异常变化幅值一般为-200~400 nT,最大可达 700 nT.局部异常较为发育,与海山出露和基底隆起有密切联系.东部海盆可以以磁条带异常 C8 为界,即对应 Li 等^[20]所指的南、北特征负磁异常带 M1 和 M2,进一步分为三个亚区.南、北两个亚区代表约 25 Ma 以前的早期扩张,它们内部磁条带平行排列,变化连续.一般认为南海早期扩张均为 N-S 向扩张,然而新的磁测资料表明,东部海盆南区磁条带走向虽然是近 E-W 向的,但北区磁条带的走向却是 NEE 向的,反映南区洋壳形成后在晚期扩张过程中又发生了一定的顺时针旋转,因此南海早期扩张的方向严格来说应该是 NNW-SSE.

东部海盆中央亚区为约 25 Ma 以来的晚期扩张,内部磁条带 NE 向或 NEE 向展布,与南北两区不连续变化,尤其在该亚区的西北角部分,内部可进一步分为东西两个部分,之间被 NNW 向断裂所分割.东侧的洋段①与重力异常类似,磁条带与 NE 向海山和基底构造平行展布,延伸方向还与西南海盆磁条带方向一致,并一直向东俯冲到马尼拉海沟之下.西侧的洋段②磁条带延伸方向逐渐从其东侧的

NE 向转为 NEE 向,这种 NEE 向延伸的磁条带在扩张中心的北侧比南侧更为明显.东西两洋段相比较来看,东部海盆西侧的洋段②的磁条带异常是本区最为显著的,磁条带不仅幅值稳定而且空间连续性极好,磁条带方向变化和空间接触关系也十分清晰.

西南海盆磁力异常主要以 NE 向的磁条带异常为特征.这些条带状异常空间上正负交替,变化幅值在-150~150 nT 之间,比东部海盆的变化幅值要小,说明两海盆具有构造动力背景的差别.西南海盆的磁条带总体连续性较好,一些靠近扩张中心的磁条带还可以全海盆追踪.西南海盆沿走向磁条带存在一系列 NNW 或 NW 向转换/平移断裂的切错,使一些区段磁条带的空间展布受到有规律的终止和平移.根据构造地球物理特征,西南海盆可进一步分为 4 个洋段,之间均为 NNW 或 NW 向断裂所分割.东侧洋段③海盆宽度最大,扩张中心虽主要被海山所占据,但仍可辨认出中央裂谷的特征;向西的洋段④海盆宽度变窄,扩张中心有一条醒目的中央裂谷所代表;东侧的这两个洋段磁条带均平行与扩张中心对称分布,也与基底构造走向一致.西侧的洋段⑤和洋段⑥是西南海盆中海底扩张向陆缘张裂的过渡区域.根据 NH973-1 剖面,这两个区段海盆扩张已不再具有沉积厚度中间薄两边厚的特点,表现为不均匀的基底断块构造活动,包括中央裂谷在内的一些重要基底断裂长期活动,控制了基底和沉积特征(图 5 中 NH973-1 测线).进一步分析表明,虽然在重力异常上,洋段⑤和洋段⑥均有明显的中央裂谷线性异常存在,但在磁力异常上,洋段⑤虽仍存在条带磁异常但已很难识别年代,而洋段⑥已不具有条带磁异常了,说明构造机制从洋段⑤的初始海底扩张为主,已逐步转变为洋段⑥的陆缘张裂为主.

西北海盆被认为是东部海盆北区老洋壳向西延伸的一部分.海盆中央为双峰海山,呈 NEE 向展布,被认为是该海盆的扩张中心.由于海盆宽度小,磁条带识别困难,但其总体走向与海盆中央的双峰海山基本一致.西北海盆的磁异常强度明显弱于其东侧的东部海盆的磁异常,中间应该存在平移断裂分割,也同样反映存在有差别的扩张动力背景.

3.2 空间重力异常分区

南海东部海盆空间重力异常总体为一个低幅值的正异常分布区($0 \sim 20 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$).东部海盆扩张中心已被近 E-W 向的黄岩岛海山链所占据,并在两侧海盆中发育了大量线状和孤立海山.对应于黄岩岛海山链及其两侧线状和孤立海山,重力上表现为

线状或椭圆状的尖峰正异常($(50\sim 120)\times 10^{-5}\text{ m/s}^2$),并同时均被负或低的异常圈闭环绕.代表早、晚两期扩张的分界线(磁条带异常 C8)在重力异常图上也有所反映,表现为异常梯度带和构造分界线(图 3).东部海盆北区沉积较厚,出露海山较少,重力异常变化小;南区沉积较薄,基底起伏大,重力异常变化较大(图 5 中 SO49-17 测线).新的空间重力异常资料显示东部海盆中央亚区还可进一步分为东、西两个部分.东侧的洋段①从扩张中心海山链到两侧海盆基底构造,NE 向构造走向特征均十分明显;而西侧的洋段②代表扩张中心的黄岩岛海山链虽然近 E-W 向展布,但单个海山仍表现出长轴呈 NEE 和 NW 走向的特征,同时海盆基底构造和海山也仍然主要表现为 NEE 走向的异常圈闭,虽然连续性和清晰程度不如东侧的洋段①.重力异常还反映出东部海盆基底明显受 NNW 向转换/平移断层的切错,这些大型 NNW 向断裂切过黄岩岛海山链,使其正异常圈闭扭曲,排列方向转为近 E-W 向.

南海西南海盆空间重力异常沿中央裂谷存在一条醒目的负异常带(可低于 $-20\times 10^{-5}\text{ m/s}^2$),而两侧海盆则是低幅值的正异常($0\sim 20\times 10^{-5}\text{ m/s}^2$),与东部海盆相似.该中央裂谷负异常带总体呈 NE 走向,在整个西南海盆连续分布,是海盆海底扩张中心在重力场上的表现,具有明显的分段性,各中脊段长度 80~150 km 不等,各段之间中央裂谷走向有 $5^\circ\sim 10^\circ$ 的变化,反映出与扩张相关的 NNW 或 NW 向转换/平移断层的存在和重要控制作用.综合分析,西南海盆可进一步分为 4 个特征不同的洋段.虽然中央裂谷在海底地貌上只延伸到洋段④的西侧,向西已被沉积所完全覆盖,但在空间重力异常上可进一步向西追踪到 110° E 的海盆西侧边缘,延伸方向存在分段变化,并且进入越西大陆边缘,仍然表现为呈 NE 走向的正负异常圈闭相间分布($(-20\sim 20)\times 10^{-5}\text{ m/s}^2$)的裂谷构造带.

南海西北海盆空间重力异常总体偏负,有东高($-20\times 10^{-5}\text{ m/s}^2$)西低($-40\times 10^{-5}\text{ m/s}^2$)的趋势,等值线走向呈 NEE 向.双峰海山是本区最大的中央海山带,总体也呈 NEE 向展布的正异常圈闭,被认为是西北海盆扩张后期岩浆活动沿扩张中心喷发形成的产物.

3.3 多波束构造地貌综合分析

南海海盆代表早期扩张的南、北两个亚区由于形成历史相对较长,沉积覆盖较厚,海底地貌现象较为简单.而海盆中央的晚期扩张地区由于沉积覆盖

少,仍然保留了大量海底构造的信息,因此结合重力、磁力和地震剖面资料,能够从东到西进一步将南海海盆分为 6 个洋段(图 1),各洋段之间均被 NNW 或 NW 向断裂带分割,这组断裂带走向大致为 NE 130° ,垂直洋中脊并大致以等间距分布,错断了 NE 向构造,同时也错断了磁力异常条带,表明其为海底扩张期间的转换/平移断层.东侧的洋段①为相对隆起区,中脊海山链及其两侧的基底构造十分清晰、连续且 NE 走向,沉积覆盖相对较少,线性构造带在两侧较大范围的海盆中均能较好地追踪.向西的洋段②为相对沉降区,岩浆活动强烈,中脊区域已被一系列近 E-W 向展布的孤立的大型海山所占据,但单个海山的走向则主要呈 NW 向或 NE 向分布;另一个重要现象是该区段海盆内部的线性构造走向仍主要是 NEE 向,说明海盆扩张方向较东侧的洋段①有一定的变化.洋段③进入了西南海盆,岩浆活动仍较强烈,扩张中脊已基本被海山所占据,西南海盆中的大型海山也主要分布在该洋段,延续了东侧的洋段②的岩浆活动特点.洋段④的扩张中脊为典型的中央裂谷,表现出大西洋型慢速扩张的特征,岩浆活动明显减少.洋段⑤的洋中脊的中央裂谷已被丰富的陆缘沉积所覆盖,洋盆扩大,海底线性构造依然明显.最西侧的洋段⑥是陆缘初始扩张海盆,表现为海底扩张向陆缘裂谷发展的过渡区域.地磁条带从洋段①~⑤均有存在,但只在洋段①~④之间可清楚识别,说明代表海盆和西南海盆的东侧的洋段①~④经历了较为典型的海底扩张构造演化.

南海海盆中部的多波束构造地貌图及线性构造解释图(图 4,6)清晰显示了东部和西南海盆之间的构造地貌特征及其过渡关系,区域上主要跨越洋段②~③.西南海盆的突出特点是其东侧的洋段③~④之间十分醒目的分布了一条 NE 向的中央裂谷,裂谷两侧基底相对隆起,并被平行排列的断崖所占据.裂谷中央盆地是该海盆水深最大的部分,内部地形比较平坦,向东沿裂谷火山喷发逐步增强,有一系列大型海山在西南海盆东侧的洋段③上分布.中央裂谷在空间上具有分段性,表现为段间构造走向有明显变化,相应地海盆中的线性构造带的走向也随之变化,反映本区 NNW 向构造带的存在.中央裂谷两侧的海盆上分布了大量线性构造带,总体走向在 NE $45^\circ\sim 55^\circ$ 之间,大致以扩张轴为中心对称分布.与反射地震剖面对比表明,这些表层线性构造与基底断块构造有良好的对应关系,是它们在海底表面的反映.

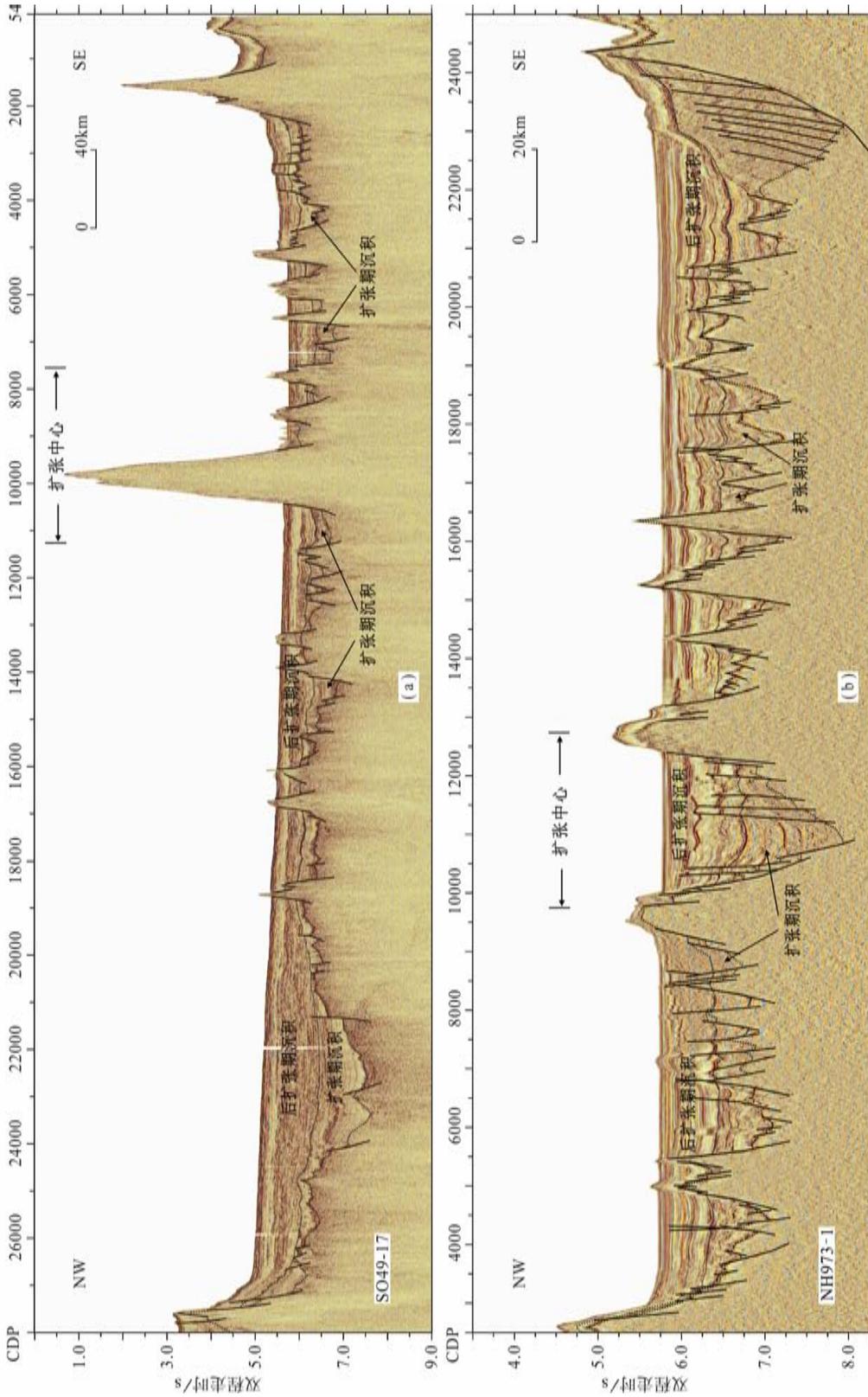


图 5 跨越南海盆地反射地震剖面解释图

(a) SO49-17; (b) NH973-1.

Fig. 5 Geological interpretation of Cross-sections in the South China Sea basin

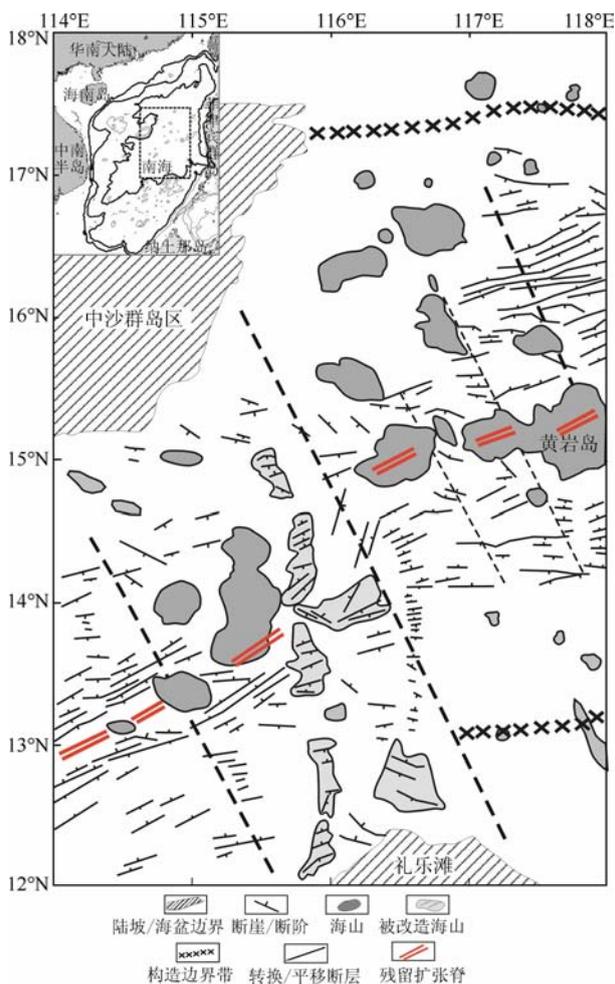


图 6 南海中部多波束线性构造解释图

Fig. 6 Linear morpho-structural interpretation of multibeam swath bathymetrical data of the central part of the South China Sea

东部海盆代表扩张中心的黄岩海山链虽然近 E-W 向展布于海盆中央洋段②区域,但其两侧的深海盆地中仍可以发现大量 NEE 和 NE 向的线性构造带.与磁条带异常分布特征不同的是,这些 NEE 和 NE 向的线性构造带不仅在东部海盆中脊的北侧较为明显,而且在南侧也十分清晰.与反射地震剖面对比表明(图 5 中 SO49-17 测线),这些表层线性构造主要与基底断块构造相对应,也是扩张过程中基底断裂在海底表面的反映^[15].进一步分析,线性构造带的走向还存在有规律的变化.总体来说,东部海盆西侧的洋段②的线性构造走向主要为 NEE 向,而东侧的洋段①主要为 NE 向;同时从扩张中心向南,线性构造的走向有逐渐转为近 E-W 向的趋势,与磁条带异常的分布相一致.

Yan 等^[17, 21~24]通过对南海全球卫星测高数据和地形、构造特征的分析,指出东部海盆存在数条重

要的 NNW 向走滑断裂,并认为东部海盆与西南海盆之间也由近 NNW 向断裂分割,虽然该两个海盆之间的断裂展布与我们的分析有所不同.事实上,无论是在重力、磁力还是海底构造地貌特征上均清晰表明,南海东部和西南海盆之间的分界断裂并非 N-S 向,而应是 NNW 向的.正是该 NNW 向转换/平移断层的存在使得南海东部和西南两个海盆扩张中脊被切错 95 km,并且区分了两个海盆磁条带异常和海底线性构造走向的分区.

4 动力模式讨论

南海大陆边缘在中生代强烈构造挤压、俯冲碰撞和大规模地块拼合的基底格局基础上,开始了从主动大陆边缘到被动大陆边缘的性质转变,新生代发生了强烈的陆缘张裂,一系列裂谷盆地相继萌生、陆壳分裂并最终导致海底扩张,现代南海形成^[17, 21~24].在新生代南海构造演化模式研究中,南海海盆的构造演化占据重要地位,它自身不仅具有复杂演化历史和构造动力过程,而且也是大陆边缘演化的一个重要侧面和独立限定.南海海盆的早期扩张从什么时间开始,又从什么地方开始?海盆扩张过程中经历的是中脊的跳跃还是二次扩张?东部海盆与西南海盆之间的分割断裂是 N-S 向的还是 NW 向的?东部海盆的磁条带与基底构造走向是否一致,还是如 Briais 等^[10]认为的存在 NW 向的走滑膝折带?对上述问题的合理解释一直是南海构造演化的重要科学主题.

4.1 南海海盆扩张的地质事件

根据 Taylor 和 Hayes^[9]的地磁条带识别,南海海盆最早的扩张年龄约为 30 Ma,对应磁条带异常 C11,并主要分布在东部海盆的南北两侧.然而根据 ODP184 航次在南海北部大陆边缘深水区钻探的 1148 井的研究表明^[25],早渐新世为深海相高速沉积(> 60 m/Ma),TOC 也特别高,井底年代已达 33 Ma,而 30 Ma 前后并没有发生重大环境变化,从沉积间断事件来看,30 Ma 也不是一个重要界面,并没有发现有重大沉积间断,说明南海海盆的扩张比传统认识的 30 Ma 要早,可能在 33 Ma 前就已经开始了.同时位于西北海盆扩张中心的双峰海山,与海盆其他海山岩浆活动一样,被认为是扩张期后的火山活动的产物,该海山取样获得的粗面岩经测定,两个 K-Ar 年龄分布为 28.12±0.57 Ma,30.38±0.94 Ma,平均为 29.25 Ma,也说明海盆最早的扩张年龄应大

于 30 Ma. 本次磁条带识别表明,在磁条带异常 C11 与北部陆坡坡脚之间以及西北海盆还存在磁条带异常 C12 和 C13,进一步说明了南海海盆的扩张可能始于约 33.5 Ma.

同时,晚渐新世 1148 井在南海记录到了一个重要的构造事件,即在 27~23 Ma 间发生的大量坍塌沉积和 4 个沉积间断面,至少失去 2 Ma 的地层记录,沉积速率 < 5 m/Ma,地震剖面上表现为明显的“双反射层”^[25]. 该井的陆源物质来源分析表明,在 25 Ma 前后(对应磁条带异常 C8 和 C7 之间)发生了重要的变化,陆源物质从原来的南部来源变为北部来源. 同时沉积环境也发生了巨大变化,从早期的深海相转变为后期的碳酸盐沉积相^[26]. 事实上,从南海磁条带异常反映的海盆扩张来看,磁条带异常 C8 和 C7 之间确实存在重大构造变动. 相对来说,磁条带异常 C11~C8 之间海底扩张较为连续,扩张方向和空间连续性变化较小. 然而从磁条带异常 C7 开始,扩张方向和空间连续性均有较大调整,表现为磁条带异常 C7 呈 NWW 走向,分布仅局限在晚期扩张的西北角;磁条带异常 C6c~C5c 期间,磁条带方向逐步从近 E-W 向转为 NEE 向和 NE 向,反映出前期受到近 N-S 向早期扩张基础的影响较大,后期影响减少的特点. 因此从磁条带分区特征来看,25 Ma 应是划分南海海盆扩张新老两个时代的重要分界,它开创了新的南海海底演化阶段.

4.2 早期和晚期扩张的关系

南海东部海盆的晚期扩张方向存在不同的认识. Taylor 和 Hayes^[9] 认为东部海盆的晚期扩张依然是南北向的,所以才有近 E-W 向的黄岩海山链作为其扩张中心. 之后, Briais 等^[10] 利用多波束测深剖面发现的 NEE 向或 NE 向海底线性构造,认为扩张可能是 NW-SE 向的,是由于大量 NW 向的走滑膝折带的存在,使得磁条带的空间表现形式从 NE 向转为了近 E-W 向. 需要指出的是, Briais 等^[10] 的磁条带分析是建立在与 Taylor 和 Hayes^[9] 相同的数据集上的,他们没有怀疑近 E-W 向分布的磁条带的正确性. 然而根据本文新的南海磁异常图(图 2),东部海盆晚期扩张的磁条带也主要是 NEE 向或 NE 向的,尤其是在扩张中心的两侧区域. 事实上,东侧的洋段①的磁条带与基底线性构造十分吻合,均表现为 NE 走向,即便是西侧的洋段②,也同样是磁条带与基底线性构造走向一致,只不过走向为 NEE 向. 因此,准确的说,东部海盆晚期扩张不存在如 Briais 等^[10] 所建议的膝折带,只是存在少量几条大

型平移走滑断层,它们的活动使东部海盆洋段②区域的 NE 走向的扩张中心被错位成近 E-W 向.

在南海海盆早期扩张向晚期扩张过渡时,比较主流的认识是当时扩张中脊发生了向南的跃迁^[10],虽然这种中脊的向南跳跃的机制和过程仍不清楚. 理论上讲,大洋中脊在相同扩张动力系统中发生相同扩张方向的跃迁,其机制是可以理解的,因此 Taylor 和 Hayes^[10] 建议了一个早、晚期扩张均在 N-S 向扩张的动力背景下的中脊向南发生的跳跃. 然而如果早期是 N-S 向扩张,而晚期转变为 NW 向扩张^[10],这之间仍用跳跃来解释,就这不仅涉及空间上的跳跃,还涉及动力体制的变化,其机制和过程就十分复杂而难以理解,因此与其说是洋脊发生跳跃还不如将其解释为扩张动力机制不同的两次扩张.

4.3 东部海盆与西南海盆的演化关系

东部海盆晚期扩张是否与西南海盆的扩张存在成因关系? 它们是在同一动力机制下的扩张还是分属不同扩张机制? 上述问题的核心是两个海盆之间的断裂活动关系. 从海盆重、磁异常和多波束构造地貌数据(图 2~4)可以看出,南海海盆除与扩张走向相同的中央裂谷和断块构造外,NNW 向的平移断裂占据了海盆活动的主体地位. 这些断裂不仅是同扩张期的转换断层,也是控制海盆各洋段构造活动的边界,并且同样也调节了东部海盆和西南海盆的扩张活动.

东部海盆与西南海盆之间一直以来被认为是由近 N-S 向的大致沿 116°E 分布的断裂所分割^[16],这种断裂的展布形式衍生出的海盆动力学演化过程,认为西南海盆扩张要早于东部海盆. 从多波束地貌图及解释图(图 4,6)上,确实可以看出存在一条醒目的大致沿 116°E 分布的线性排列的隆起带,并由 4~5 个基底隆起和/或海山段落组成. 进一步分析表明,该隆起带各组成部分又均已被 NE 向断裂切割,形成了与其海盆内部线性构造带走向基本一致的次级断层崖地貌,形态较为破碎,说明受到了海盆同扩张期的改造. 其中有些段落的 NW 向走向也说明了该构造带的复杂组成,可能是不同成因产物的组合体. 该隆起带东侧还存在一个规模相对较小的近 N-S 向断裂带,它大致沿 116.5°E 分布,向北逐步过渡到 NW 走向,与海盆的线性构造走向近于垂直. 事实上,真正控制东部与西南海盆的断裂应该是 NNW 向断裂,该断裂虽然在海底地貌上没有表现出一个较明显的地形凸起,但它实际切割了东部和西南海盆的磁异常条带,分割了东部和西南海盆两

类不同的重力场和磁力场特征区域,并使扩张中心左旋走滑 95 km.

4.4 南海海盆的渐进式扩张

西南海盆平面形态上呈 V 型盆地,有被推断为渐进式扩张海盆^[27],认为海盆的扩张是从东向西逐步推进演化形成的.然而东部海盆也与西南海盆一样发生了晚期扩张,那么它们之间是否存在一致的自东向西的渐进式扩张?如前所述,25 Ma 前后的重要构造事件划分了南海海盆的早期和晚期扩张.虽然南海海盆均大致在 C5c 停止扩张,但晚期扩张区域最老扩张年龄则从东向西,从东部(洋段①~②)的磁异常 C6c(23.5 Ma)或更早在 C7a~C7,到中部(洋段③)的 C6b(22.8 Ma),一直变新到西部(洋段④)的 C5e(18.5 Ma),具有明显的渐进式扩张特征(图 1、2).这种渐进式扩张的动力学特征在空间展布上也具有连续性和统一性,同时也受到早期扩张老洋壳边界的影响.晚期扩张总体方向是 NW-SE 向的,表现在从东侧(洋段①)的中脊走向为 NE 向,向西受老洋壳边界的影响(洋段②),扩张方向发生调整,中脊走向变为 NEE 向.再向西(洋段③~⑥)进入西南海盆,由于没有了两侧老洋壳的影响,扩张方向再次回调,中脊走向又变为 NE 向(图 1、3).

在观察南海海盆南、北两侧早期扩张老洋壳分布区时(图 2)可以发现,北侧洋区的磁条带走向总体并不是如前人所说的 E-W 走向,而是表现出 NEE 向的特征,这不仅在东部海盆而且还在西北海盆均有明显反映.另一方面,南侧洋区的磁条带走向则总体均呈 E-W 走向,并且空间延伸十分稳定.南海海盆早期扩张南、北两侧的扩张方向为什么存在一个角度的差别?这不可能是同期扩张的产物,而是后期改造的结果.正是因为晚期存在渐进式扩张,东侧扩张量大,西侧扩张量小,从而晚期扩张在南、北老洋壳之间由东向西推进发展时,南侧老洋壳发生了顺时针的转动,将原本 NEE 向的磁条带方向转变为 E-W 方向.

5 结 论

根据新近获得的南海中部高分辨率重力和磁力测网数据的分析,结合多波束海底地貌的构造解释和 184 航次 1148 井的研究成果,南海海盆新生代经历了早、晚两期不同动力特征的海底扩张,25 Ma 前后的沉积-构造事件是其主要分界.该分界面对应沉积上的多次间断和构造上的垮塌事件,沉积环境从

早期的持续深海沉积相转变为晚期的稳定碳酸盐台地相,陆源物质来源也经历了来自南部转为来自北部,磁条带走向发生跃变(磁异常 C8 与 C7 之间),反映扩张方向的不连续变化.早期扩张从约 33.5 Ma(磁异常 C13)开始至 25 Ma(磁异常 C8)停止,在东部海盆南、北两侧和西北海盆形成了具有近 E-W 向和 NEE 向磁条带的老洋壳,是 NNW-SSE 向扩张的产物;晚期扩张从 25 Ma(磁异常 C8)开始至 16.5 Ma(磁异常 C5c)结束,在东部海盆中央区和西南海盆形成了具有 NE 向磁条带的新洋壳,是 NW-SE 向扩张的产物.

南海海盆分区特点明显,南北分区,东西分段.从南到北可进一步分为 3 个亚区,南、北亚区由早期扩张产生,而晚期扩张的中央亚区从东到西又可进一步分为 6 个洋段,中间均由 NNW 或 NW 向断裂分割,是扩张中脊分段性的表现.南海晚期扩张具有渐进式扩张的特点,虽然它们均于磁条带异常 C5c(16.5 Ma)停止扩张,但开始扩张的时间从东部的 C6c(23.5 Ma),到中部的 C6b(22.8 Ma),一直变新到西部的 C5e(18.5 Ma).早期扩张洋区的北侧磁条带走向 NEE,而南侧走向 E-W 向,两者之间存在一个向东敞开的交角也进一步佐证了晚期扩张的渐进式动力演化型式.东部海盆与西南海盆之间的 NNW 向断裂是分割两海盆的边界断裂,不仅切割了磁条带异常,控制了南海海盆不同的地球物理场特征,而且还使扩张中脊左行平移约 95 km,造成扩张中心和磁条带不连续.

目前南海海盆扩张形成的洋盆已有部分沿着东侧边缘的马尼拉海沟俯冲消亡,使南海海盆看似一个封闭的边缘海.然而在渐新世到早中新世南海海盆海底扩张期间,其东部却只是一个开阔的大洋,尚没有菲律宾群岛封闭^[28],因此南海海盆可能当时是一个东侧面向大洋的港湾,与同样渐进式扩张的亚丁湾洋盆的演化对比^[29],是洋中脊向大陆边缘入侵的产物.

参考文献(References)

- [1] Ludwig W J, Kumar N, Houtz R E. Profiler-sonobuoy measurements in the South China Sea Basin. *Journal of Geophysical Research*, 1979, **84**(B7): 3505~3518
- [2] 姚伯初,王光宇.南海海盆的地壳结构.中国科学(B辑),1983,(2):177~186
Yao B C, Wang G Y. Crustal structure of the South China Sea basin. *Science in China (Series B)* (in Chinese), 1983, (2): 177~186
- [3] Nissen S S, Hayes D E, Buhl P, et al. Deep penetration

- seismic soundings across the northern margin of the South China Sea. *Journal of Geophysical Research*, 1995, **100** (B11): 22407~22433
- [4] 姚伯初, 曾维军, Hayes D E 等. 中美合作调研南海地质专报. 武汉: 中国地质大学出版社, 1994
Yao B C, Zeng W J, Hayes D E, et al. The Geological Memoir of Joint Survey of South China Sea by China and USA (in Chinese). Wuhan: China University of Geosciences Press, 1994
- [5] 刘光鼎. 中国海区及邻域地质地球物理系列图 (1:500 万). 北京: 地质出版社, 1989
Liu G D. Series of Geological and Geophysical Maps in China Sea and Adjacent Regions (1:5000000) (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1989
- [6] 刘光鼎. 中国海区及邻域地质地球物理特性. 北京: 科学出版社, 1992
Liu G D. Geological and Geophysical Characteristics in China Sea and Adjacent Regions (in Chinese). Beijing: Science Press, 1992
- [7] 李家彪. 中国边缘海形成演化与资源效应. 北京: 海洋出版社, 2008
Li J B. Origin and Evolution of Chinese Marginal Seas and Resources Effect (in Chinese). Beijing: Ocean Press, 2008
- [8] 郝天珧, 黄松, 徐亚等. 南海东北部及邻区深部结构的综合地球物理研究. 地球物理学报, 2008, **51**(6): 1785~1796
Hao T Y, Huang S, Xu Y, et al. Comprehensive geophysical research on the deep structure of Northeastern South China Sea. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(6): 1785~1796
- [9] Taylor B, Hayes D E. The tectonic evolution of the South China Sea basin. In: Hayes D E, ed. The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands, Part 1. Washington DC: Geophys Monogr, AGU, 1980, **23**: 89~104
- [10] Briaux 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. *Journal of Geophysical Research*, 1993, **98**(B4): 6299~6328
- [11] Ding W W, Li M B, Zhao L H, et al. Cenozoic tectono-sedimentary characteristics and extension model of the Northwest Sub-basin, South China Sea. *Geoscience Frontiers*, 2011, **2**(4): 509~517
- [12] Candes S C, Kent D V. Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the Late Cretaceous and Cenozoic. *Journal of Geophysical Research*, 1995, **100** (B4): 6093~6095
- [13] Taylor B, Hayes D E. Origin and history of the South China Sea basin. In: Hayes D E, ed. The Tectonic and Geologic Evolution of the Southeast Asian Seas and Islands: Part 2. Washington DC: Geophys Monogr, AGU, 1983, **27**: 23~56
- [14] 姚伯初. 南海西北海盆的构造特征及南海新生代的海底扩张. 热带海洋, 1999, **18**(1): 7~15
Yao B C. Tectonic characteristics of Northwest Subbasin and seafloor spreading history of South China Sea in Cenozoic. *Tropic Oceanology* (in Chinese), 1999, **18**(1): 7~15
- [15] 李家彪, 金翔龙, 高金耀. 南海东部海盆晚期扩张的构造地貌研究. 中国科学 (D 辑), 2002, **32**(3): 239~248
Li J B, Jin X L, Gao J Y. Morpho-tectonic study on late-stage spreading of the Eastern Subbasin of South China Sea. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 2002, **32**(3): 239~248
- [16] 姚伯初. 南海西南海盆的海底扩张及其构造意义. 南海地质研究, 1997, **9**: 20~36
Yao B C. The sea floor spreading in the SW subbasin of South China Sea and its tectonic significance. *Geological Research of South China Sea* (in Chinese), 1997, **9**: 20~36
- [17] Ru K, Pigott J D. Episodic rifting and subsidence in the South China Sea. *AAPG Bull.*, 1986, **70**(9): 1136~1155
- [18] 吕文正, 柯长志, 吴声迪等. 南海中央海盆条带磁异常特征及构造演化. 海洋学报, 1987, **9**(1): 69~78
Lue W Z, He C Z, Wu S D, et al. The characteristics of magnetic anomalies and its tectonic significance in Central Basin of South China Sea. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 1987, **9**(1): 69~78
- [19] 张健, 宋海斌, 李家彪. 南海西南海盆构造演化的热模拟研究. 地球物理学报, 2005, **48**(6): 1357~1365
Zhang J, Song H B, Li J B. Thermal modeling of the tectonic evolution of the southwest subbasin in the South China Sea. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48**(6): 1357~1365
- [20] Li C F, Zhou Z Y, Li J B, et al. Structures of the northeasternmost South China Sea continental margin and ocean basin: geophysical constraints and tectonic implications. *Marine Geophysical Research*, 2007, **28**(1): 59~79
- [21] Zhou D, Ru K, Chen H Z. Kinematics of Cenozoic extension on the South China Sea continental margin and its implications for the tectonic evolution of the region. *Tectonophysics*, 1995, **251** (1-4): 161~177
- [22] Lüdmann T, Wong H K. Neotectonic regime on the passive continental margin of the northern South China Sea. *Tectonophysics*, 1999, **311**(1-4): 113~138
- [23] Clift P, Lin J. Preferential mantle lithospheric extension under the South China margin. *Marine and Petroleum Geology*, 2001, **18**(8): 929~945
- [24] Cullen A, Reemst P, Henstra G, et al. Rifting of the South China Sea; new perspectives. *Petroleum Geoscience*, 2010, **16**(3): 273~282
- [25] Wang P, Prell W L, Blum P. Proceedings of the Ocean Drilling Program. Initial Reports Volume 184, 2000
- [26] Li X H, Wei G J, Shao L, et al. Geochemical and Nd isotopic variations in sediments of the South China Sea; a response to Cenozoic tectonism in SE Asia. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, **211**(3-4): 207~220
- [27] Huchon P, Hguyen T N H, Chamot-Rooke N. Propagation of continental break-up in the southwestern South China Sea. *Geological Society*, 2001, **187**(1): 31~35
- [28] Hall R. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions, model and animations. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, **20**(4): 353~431
- [29] Manighetti I, Tapponnier P, Courtillot V, et al. Propagation of rifting along the Arabia-Somalia plate boundary: the gulfs of Aden and Tadjoura. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**(B2): 2681~2710