

# 南海海盆东-西部地质特征存在巨大差异

李春峰,李志康,李亚清,刘宇涛,彭希,温永林

浙江大学海洋科学系,舟山 316021

**摘要** 南海中部存在巨大的中南断裂将南海海盆分割为东-西两部分,至少自1亿年以来,在沉积环境与沉积厚度、洋陆边界的属性与特征、大陆破裂的时代、岩浆活动的来源与程度、减薄大陆架和大陆坡的宽度、洋壳年龄与磁性层结构、磁异常条带特征、岩石化学等诸多方面都存在巨大差异,它们主要受控于早期地质构造背景的差异、东西部大陆减薄伸展速率的变化以及海底扩张的构造环境的不同,并深刻影响了之后的区域沉积分区和沉降特征。

**关键词** 南海;伸展速率;海底扩张;大陆岩石圈破裂;洋陆边界

南海区域构造演化经历前张裂期、大陆张裂期、大陆破裂期、海底扩张期和后扩张期5个主要阶段,发生了大陆的分离,深部高温岩浆喷溢到地表并冷却后形成高密度的大洋地壳,是中国邻海唯一发育深水大洋地壳的区域。最近10年,国家自然科学基金重大研究计划以及国际大洋发现计划在南海开展了大量深入的研究<sup>[1]</sup>,对南海演化的诸多细节获得更多突破性认识,发现大致以从北部的白云凹陷到南沙礼乐滩的中南断裂为界,南海东-西部差异明显,本文概括这些差异特征并给出可能的成因解释。

## 1 大陆破裂阶段差异

南海大陆的最终破裂和大洋扩张的开始并非

在东-西部同时发生,而是由东向西递进式扩张<sup>[2]</sup>,且经历了从局部离散到整体相连的扩张演化过程<sup>[3]</sup>,如图1、图2<sup>[4-5]</sup>所示。大陆的最终破裂和大洋扩张的开始是很大的地质事件,可以反映在沉积记录中,形成破裂不整合面,在大陆边缘一般为盆地的断陷-拗陷转换面。东部破裂不整合面在~34 Ma形成,中部最明显的不整合面是23.6 Ma,代表了西南次海盆开始扩张,而西部最晚破裂不整合面形成于大约16 Ma,与南海西南端停止扩张的年代重叠,呈现由东向西南的迁移(表1、图2)。

洋陆过渡边界提供了从大陆破裂到大洋扩张过程的关键信息,对其位置和属性存在很多不同认识,洋陆过渡边界的岩石类型非常复杂,包括大陆物质、大洋物质、深部地幔抬升上来的物质以及大陆坡快速沉积物质。目前发现南海存在较窄的洋

收稿日期:2020-04-05;修回日期:2020-05-26

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划重点项目(91028007);国家自然科学基金集成项目(91428309);国际合作重点项目(41761134051)

作者简介:李春峰,教授,研究方向为海洋地质与地球物理学,电子信箱:cfl@zju.edu.cn

引用格式:李春峰,李志康,李亚清,等.南海海盆东-西部地质特征存在巨大差异[J].科技导报,2020,38(18):40-45;doi:10.3981/j.

issn.1000-7857.2020.18.006

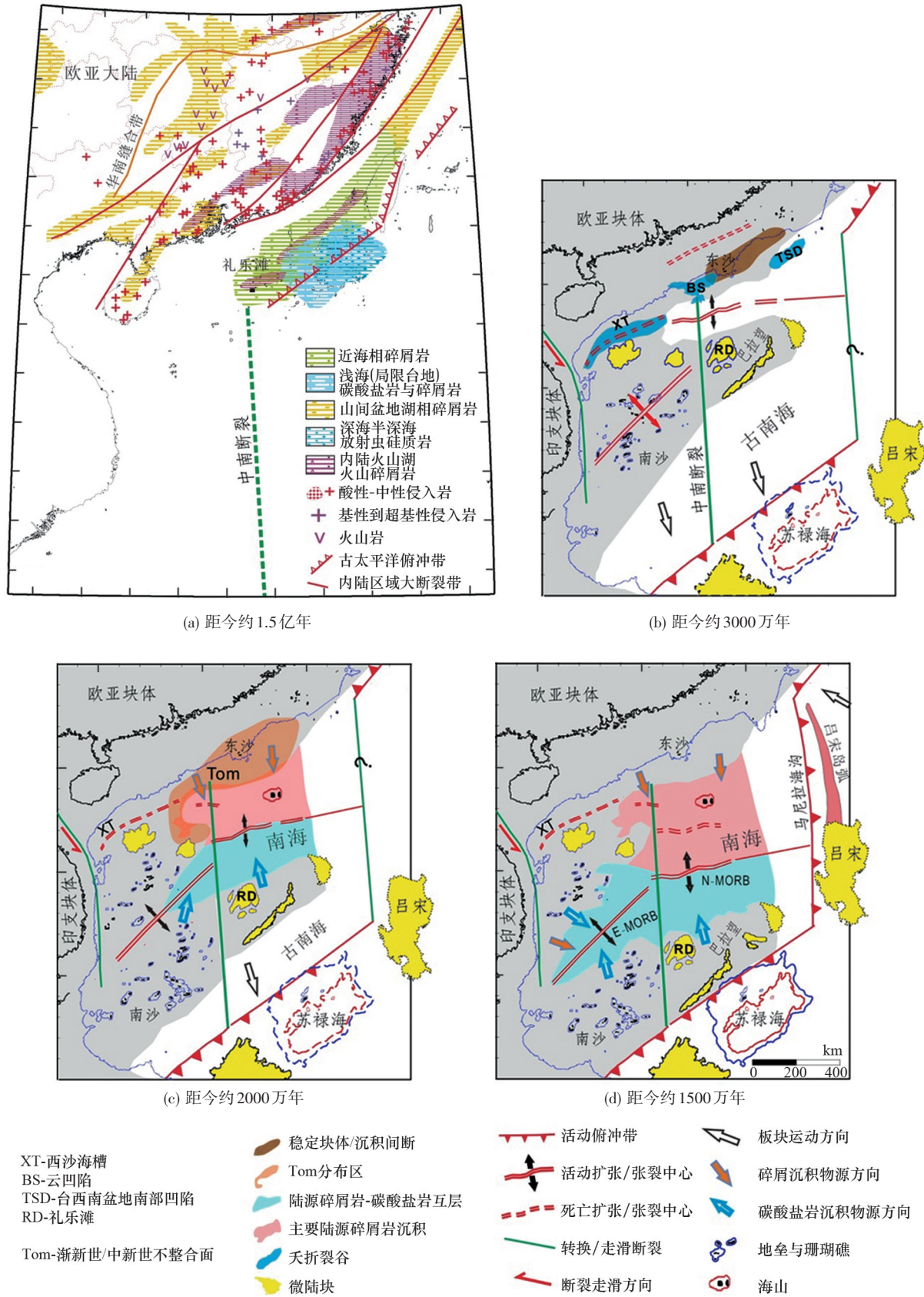
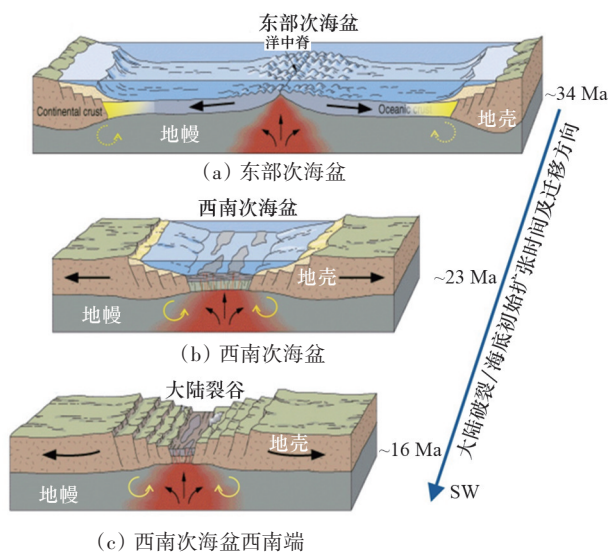


图1 南海区域过去1.5亿年的地质演化概图

表1 南海东西部构造差异对比

属性特征	南海西部	南海东部	构造期
1. 中生界厚度	薄	厚	
2. 局部地温梯度	高	低	前张裂期
3. 大陆岩石圈强度	低	高	(>100 Ma)
4. 大陆下地壳强度	低	高	
5. 伸展陆壳宽度	宽	窄	张裂期
6. 夭折裂谷类型	裂谷迁移型	同张裂竞争型	(100—35 Ma)
7. 伸展速度	较慢	较快	
8. 洋陆边界属性	较弱地幔抬升与水化	较强地幔抬升与水化	破裂期
9. 破裂年龄	23—16 Ma	34 Ma	(35—16 Ma)
10. 下地壳高速层	不发育	发育	
11. 洋壳年龄	西北次海盆: ~30 Ma; 西南次海盆: 23.6—16 Ma	34—15 Ma	
12. 磁异常条带走向	北东-南西向	东-西向	扩张期
13. 磁异常强度	弱	强	(34—15 Ma)
14. 重力异常强度	稍低, 残留洋中脊负异常	较强, 残留洋中脊正异常	
15. 大洋玄武岩	E-MORB	N-MORB	
16. 晚期岩浆活动	东侧强, 沿残留洋中脊未发育海山链	较强, 沿残留洋中脊发育海山链	
17. 居里面	东侧最浅	较浅, 南北不对称	
18. 热膨胀和热扩散系数	南北对称	南北不对称, 热扩散系数与太平洋的接近	后扩张期
19. 碳酸盐岩沉积	普遍发育	残留洋中脊南部更发育	(< 15 Ma)
20. 主要碎屑物源	西部与南部块体	北部: 欧亚大陆和台湾岛 南部: 南部块体	



黄色箭头指示大陆物质进入大洋岩浆系统并影响初始大洋的岩石地球化学与物理属性。水可以沿着大陆边缘断裂进入地幔, 造成地幔岩石水化。

图2 南海不同次海盆初始扩张的迁移示意

陆过渡带, 洋陆边界应该定在更加向海盆一侧<sup>[6]</sup>。在北部陆缘中西侧的最新国际大洋发现计划 (IODP) 367/368 航次并未直接揭露地震剖面上解释出可能的深部地幔抬升或剥露<sup>[7]</sup>, 但是在东北部最新的地震速度结果显示, 洋陆过渡边界存在显著的地幔抬升和部分程度的深部地幔物质水化 (图 2)<sup>[8-9]</sup>, 显示了南海从大陆到大洋初始扩张过程中洋陆边界的地球动力学过程存在较大的横向变化, 推测 IODP 367/368 航次在洋陆边界上的一些站位钻遇的玄武岩是破裂晚期的岩浆, 厚度不会很大, 可能直接覆盖在深部隆升但未被钻探到的地幔物质之上。

大陆伸展破裂阶段, 岩石层压力降低, 在相同温度下岩浆熔融的程度会加强, 来自深部地幔具有较高的地震速度和密度的岩浆物质可以附着在大陆边缘深部。这类物质的存在与否反映了大陆伸

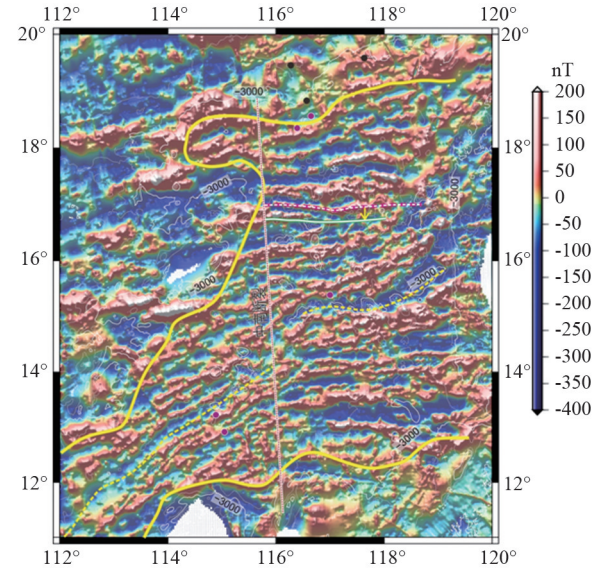
展速率和温度场的差异,以及地幔物质组分的不同,是判断被动大陆边缘类型的重要标志之一。目前对南海的地震探测显示南海东北部陆缘大范围出现下地壳高速层,而西部陆缘则缺失这种特征<sup>[10]</sup>。在洋陆边界处的下地壳高速层也可能与地幔抬升和水化有关,而更靠近大陆一侧的下地壳高速层也可能形成于1亿年前的古太平洋俯冲相关的岩浆活动<sup>[11]</sup>。

## 2 海底扩张阶段构造差异

南海大陆伸展到一定程度后,大陆破裂,深部岩浆达到地表,海底扩张形成大洋地壳,南海东北部的初始海底扩张始于约34 Ma,但是沿北部洋陆边界略有1—2 Ma的变化,归因于大陆边缘的复杂性和横向不均一性<sup>[12]</sup>。南海东部岩石圈局部可能具有时间相对长且稳定的破裂过程,造成了一定程度的大陆地幔抬升和部分水化。到了中部和西北部,初始扩张过程中岩浆作用可能增强,陆壳破裂到初始洋壳形成快速转换。23.6 Ma时在东部次海盆发生了一次向南约20 km的洋中脊跃迁(图3),这一时间沿古洋脊也略有不同,与此同时西南次海盆开始海底扩张,表现出由东向西,由局部向整体的陆缘张裂到海底扩张的演化模式(图1、图2),在~23.6—21.5 Ma内扩张中心轴向西南延伸传播了约400 km(图2)。东部次海盆与西南次海盆海底扩张的结束时间分别为~15 Ma和~16 Ma<sup>[12]</sup>。

海盆东部比西部磁异常强度明显变大,东部磁异常条带走向为近东西向,宽度大。而西南海盆的磁异常主要表现为NE-SW走向,宽度短(图3<sup>[12-13]</sup>)。最新大洋钻探岩石地球化学成果进一步验证了早期的推测,即早期东部的海底扩张更多地继承了先存的区域大洋岩石圈的性质,东部次海盆海底大洋玄武岩受大陆深部物质作用不明显,可能形成于已有的大洋岩石圈;而西部次海盆形成于大陆裂谷和大陆边缘的岩石圈破裂(图1、图2),岩浆受大陆深部物质侵染的影响明显,大洋地壳岩石铁镁物质含量相对低,岩石磁化强度偏低。仔细观察发现,东部次海盆靠近大陆的部分,包括西北次海盆的大洋

岩石圈的磁化强度较低,与西南次海盆类似,符合这一地球动力学模型推测<sup>[13]</sup>。



磁异常条带像地质录音带记录了南海的历史演化信息。黄色实线为洋陆边界的位置,黄色虚线为残留的洋中脊位置,黄色箭头显示的是23.6 Ma的洋中脊跃迁。圆点代表大洋钻探的站位置。白色等高线及其标注的数字为水深。nT为磁异常单位纳特。

图3 南海不同次海盆的磁异常条带特征的显著差异

矿物岩石地球化学也给出相同的证据,除了矿物结晶程度的差异外,从微量元素来看,东部次海盆的IODP U1431站位的大部分玄武岩微量元素配分主要显示出正常型洋中脊玄武岩N-MORB的特征,而西南次海盆的IODP U1433和U1434站位的玄武岩则主要为富集型洋中脊玄武岩E-MORB的特征(图1(d)),富含了易熔组分<sup>[14]</sup>,可能混入较多的大陆下地壳物质组分(图2)。

## 3 海底扩张后构造差异

海底扩张停止之后,岩浆活动广泛分布在南海海盆及大陆坡地区。南海东部次海盆比西南次海盆的空间重力异常偏高,部分反映了东部次海盆较浅的高密度基底、东部南海岩石圈俯冲形成的弯曲以及晚期较强烈岩浆活动。沿东部次海盆死亡扩张中心形成近东西向的黄岩岛海山链,在两侧海盆中存在大量海山,表现为线状或椭圆状的尖峰正重

力异常。西南次海盆的死亡中央裂谷则具有明显的重力负异常,高密度基底埋深大,沿着死亡裂谷的薄弱带发育的晚期海山很少。这些岩浆活动主要是南海停止扩张后形成的,其中一种可能成因是南海海盆热冷却造成的冷却收缩和热应力,造成的大陆边缘区域伸展和断层活化,以及海盆内薄弱带(死亡洋中脊)的活化,诱发扩张后大规模减压熔融和岩浆活动,而地幔柱的存在或影响的证据与可能性不大。

磁异常反演可以获得居里面深度,是岩石温度到达一定温度后的退磁界面,对应大约 550℃,居里面深度可以反映深海盆现在的热状态,结果显示南海东部次海盆死亡扩张中心北部比南部海盆热<sup>[13]</sup>,可能受控于洋中脊南迁,与区域岩浆活动分布吻合。西南次海盆东侧岩石圈温度显示是整个南海较高的区域,这些结果与区域热流观测结果和晚期海山的分布相吻合。

据 IODP 349 航次结果发现,东、西南次盆地的沉积特征和计算沉降量存在差异<sup>[15]</sup>。东部残留洋中脊北部发育大量来自欧亚大陆和台湾岛的蒙脱石等细粒黏土矿物,而碳酸盐岩沉积更多发生在残留洋中脊南侧,接受了更多的来自南部陆块的碳酸盐岩碎屑。西南次海盆整体的碳酸盐岩沉积相对较发育,因为其周围的碳酸盐岩台地广泛分布,为其提供了大量浊流碳酸盐颗粒沉积物<sup>[3]</sup>。通过对南海表层沉积物取样分析,发现南海东部次海盆表层沉积物微量元素中 Sr、Ba 等较高,而西南部次海盆 Th、Cr、Sc、Zn 等元素含量较高。

由于物源供应的增加导致海盆沉积速率自 5.3 Ma 发生明显的增大。然而东部次海盆和西南次海盆分别在第四纪和上新世经历了沉积速率的高峰<sup>[15]</sup>,这个差异可能是由于受到局部构造活动影响而造成,如台湾造山带的隆升以及东部陆缘的俯冲活动为东部次海盆提供了大量的物源,导致了东部次海盆南部第四纪地层厚度快速增加。

此外,从海盆晚期沉降特征分析看,南海东部和西南次海盆的冷却过程也不同。西南次海盆残留洋中脊南部和北部的体积热膨胀系数和热扩散系数相似,表明南海海盆具有对称的热性质。而东

南次海盆残留洋中脊南部的热膨胀系数比北部要大得多,这表明东部次海盆的非对称扩张过程或热性质<sup>[16]</sup>。与西南次海盆相比,东部次海盆的热扩散系数与太平洋更接近,进一步吻合西南次海盆可能受到大陆扩张和侵染影响更大的观点<sup>[13,16]</sup>。

## 4 结论

南海东-西部诸多地质差异受控于多种因素,包括 1 亿年前南海区域构造背景的差异以及晚期大陆破裂的由东向西迁移的过程。南海东西部存在块体强度的不同和温度的差异会导致晚期不同的伸展速率、岩浆活动程度、裂谷类型以及伸展大陆岩石圈的宽度。中南断裂控制了其两侧海盆的扩张方向,同时扩张中心由具有较广阔的东部海盆向西迁变为陆内裂谷,形成了东-西部不同的大洋玄武岩类型以及磁性和热力学参数的差异。岩浆活动形成的海岭进一步控制了海盆沉积物的分区特征。

## 参考文献 (References)

- [1] 汪品先. 追踪边缘海的生命史:“南海深部计划”的科学目标[J]. 科学通报, 2012, 57(20): 1807-1826.
- [2] 李家彪, 丁巍伟, 吴自银, 等. 南海西南海盆的渐进式扩张[J]. 科学通报, 2012, 57(20): 1896-1905.
- [3] Song T, Li C F. Rifting to drifting transition of the Southwest Subbasin of the South China Sea[J]. Marine Geophysical Research, 2015, 36: 167-185.
- [4] Shi H, Li C F. Mesozoic and early Cenozoic tectonic convergence-to-rifting transition prior to opening of the South China Sea[J]. International Geology Review, 2012, 54: 1801-1828.
- [5] Li C F, Li J, Ding W, et al. Seismic stratigraphy of the central South China Sea basin and implications for neotectonics[J]. Journal of Geophysical Research, 2015, 120(3): 1377-1399.
- [6] Song T, Li C F, Wu S, et al. Extensional styles of the conjugate rifted margins of the South China Sea[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2019, 177: 117-128.
- [7] Sun Z, Jian Z, Stock J M, et al. South China Sea Rifted Margin[J]. Proceedings of the International Ocean Discov-

- ery Program, 2018, 367/368: 1–15.
- [8] Wan X, Li C F, Zhao M, et al. Seismic velocity structure of the magnetic quiet zone and continent-ocean boundary in the northeastern South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2019, 124: 11866–11899.
- [9] Hou W, Li C F, Wan X, et al. Crustal S-wave velocity structure across the northeastern South China Sea continental margin: Implications for lithology and mantle exhumation[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2019, 3: 314–329.
- [10] Qiu X L, Ye S Y, Wu S M. Crustal structure across the Xisha Trough, northwestern South China Sea[J]. *Tectonophysics*, 2001, 341: 179–193.
- [11] Wan K, Xia S, Cao J, et al. Deep seismic structure of the northeastern South China Sea: Origin of a high-velocity layer in the lower crust[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2017, 122: 2831–2858.
- [12] 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: 4958–4983.
- [13] 李春峰, 宋陶然. 南海新生代洋壳扩张与深部演化的磁异常记录[J]. *科学通报*, 2012, 57(20): 1879–1895.
- [14] Zhang G L, Luo Q, Zhao J, et al. Geochemical nature of sub-ridge mantle and opening dynamics of the South China Sea[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 489: 145–155.
- [15] Li C F, Lin J, Kulhanek & the Expedition 349 Scientists. South China Sea Tectonics[J]. *Proceedings of the International Ocean Discovery Program*, 2015, 349: 1–300.
- [16] Cao Y, Li C F, Yao Y. Thermal subsidence and sedimentary processes in the South China Sea Basin[J]. *Marine Geology*, 2017, 397: 30–38.

## Large geological differences between the East and Southwest Subbasins of the South China Sea

LI Chunfeng, LI Zhikang, LI Yaqing, LIU Yutao, PENG Xi, WEN Yonglin

Department of Marine Sciences, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China

**Abstract** The South China Sea is roughly divided by the Zhongnan Fault into the eastern and western parts, with big differences in the Mesozoic sedimentation and the residual thickness, the nature and the characteristics of the continent–oceanic boundary, the age of the continental breakup, the width of the thinned continental lithosphere, the age and the magnetic layer structure of the oceanic crust, the magnetic anomaly, the lithochemistry, and the magmatic activity. They are mainly controlled by the east–west difference in the pre-rift tectonic background, the lithospheric extension rates, and the tectonic settings related with seafloor spreading. These factors profoundly affect the subsequent regional sedimentary zonation and thermal subsidence.

**Keywords** South China Sea; extension rate; seafloor spreading; continental breakup; continent–ocean boundary ●



(责任编辑 祝叶华)