

南海成因: 岩石圈破裂与俯冲带相互作用新认识

林间^{1,2,3,4}, 孙珍^{1,3,5}, 李家彪⁶, 周志远^{1,3,5}, 张帆^{1,3,5}, 罗怡鸣^{1,3,4}

1. 中国科学院南海海洋研究所边缘海与大洋地质重点实验室, 广州 510301
2. 美国伍兹霍尔海洋研究所地质与地球物理系, 马萨诸塞州伍兹霍尔 02543
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458
4. 南方科技大学海洋科学与工程系, 深圳 518055
5. 中国科学院南海生态环境工程创新研究院, 广州 510301
6. 自然资源部第二海洋研究所, 杭州 310012

摘要 南海深部计划与国际大洋钻探航次取得了一系列创新进展与重大突破: 1) 发现南海陆缘岩石圈减薄之初未出现地幔蛇纹岩出露, 且岩浆迅速出现; 2) 新提出南海不是“小大西洋”, 而是“板缘张裂”盆地, 与经典的大西洋型“板内张裂”陆缘模式不同; 3) 揭示南海受到俯冲带的强烈控制, 提出俯冲诱发地幔上涌并影响南海岩浆活动。

关键词 南海; 大陆岩石圈破裂; 板缘张裂; 环南海俯冲; 国际大洋钻探

地球上的边缘海地处大陆与大洋之间, 对认知地球多圈层相互作用以及人类生息至关重要。全球 2/3 的边缘海盆地集中在西太平洋, 其中南海的规模最大^[1-3](图 1^[1])。南海夹在欧亚大陆、印-澳板块与太平洋板块之间, 经历了几千万年的构造与岩浆演化, 是研究边缘海动力学极佳的天然实验室。自 2011 年起, 国家自然科学基金委实施了南海深海过程演变重大研究计划^[2](简称“南海深部计

划”); 同时国际大洋发现计划(IODP)分别于 2014、2017 与 2018 年在南海实施了 IODP349、367/368 与 368X 钻探航次^[4-6]。在这些重大计划的支持下, 科学家们在南海成功进行了一系列创新研究, 包括深拖磁异常观测、深部地震实验、地球化学分析和大尺度地球动力学模拟等, 大量创新成果相继涌现^[1-2], 中国科学家已在南海研究中起到领军作用。概述近年来在南海大陆岩石圈破裂以及与周边俯

收稿日期: 2020-05-11; 修回日期: 2020-06-19

基金项目: 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(GML2019ZD0205); 国家自然科学基金项目(41890813, 91628301, 41706056, 41976066, 41976064, U1606401); 中国科学院项目(Y4SL021001, QYZDY-SSW-DQC005, 133244KYSB20180029)

作者简介: 林间, 特聘研究员, 研究方向为海洋地球物理, 电子信箱: jianlin@scsio.ac.cn

引用格式: 林间, 孙珍, 李家彪, 等. 南海成因: 岩石圈破裂与俯冲带相互作用新认识[J]. 科技导报, 2020, 38(18): 35-39; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.18.005

冲带相互作用这一重大科学问题上的新突破、新认识与新理论。

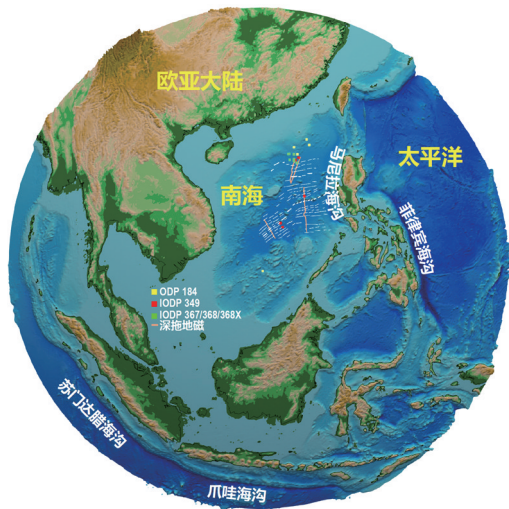


图1 南海构造背景及IODP钻探站位分布

1 新发现:大洋钻探揭示南海与大西洋不同

近年来,国际大洋发现计划(IODP)在南海开展了四个半航次,其中2014年的349航次聚焦南海海底扩张^[4],2017—2018年的367/368、368X航次聚焦南海大陆边缘的裂解过程^[5-6](图2)。结合钻探航次与地震观测数据,对比大西洋经典的非火山型陆缘—伊比利亚,获得了以下关键认识:1)在大陆裂解过程中,南海从陆缘变为海盆时间短、速度快、

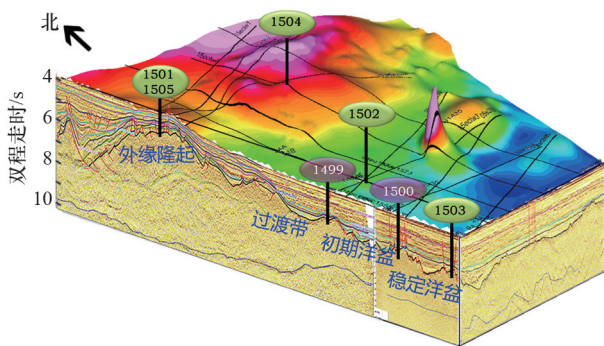


图2 南海北部陆缘部分大洋钻探站位、主要构造单元与地震剖面

玄武岩型岩浆量较大^[7];2)南海北缘暂未钻探到地幔剥露物质,可能与大西洋地幔剥露的经典模型不同^[8];3)南海的岩浆具有俯冲带物质的特征,表明其发育过程受到了俯冲作用的影响;4)岩石地球化学分析发现,俯冲带物质从地幔深部到达海底的时间大约在25 Ma(距今2500万年前)左右。

2 新认识:边缘海与开阔大洋机制不同

2.1 南海岩浆“先贫后富”

全球大陆边缘研究表明,岩浆和水在大陆裂解过程中起着关键作用。经典的大西洋模式将被动大陆边缘划为2种端元类型,即贫岩浆(非火山)型和富岩浆(火山)型。不同时具备岩浆的底侵、侵入和喷发3个特征的所有陆缘都被划分为贫岩浆型,传统上南海被划分为贫岩浆型。但近年的研究表明,南海北部大陆边缘有别于经典的大西洋贫岩浆型陆缘,南海兼具贫岩浆和富岩浆的双重性质,并表现出“先贫后富”特征^[9],在张裂早期地壳强烈变薄,而在后期高速下地壳底侵厚度较大。南海海山岩浆的主量与微量元素都显示出富集组分特征,带有强烈的俯冲板块信号。地震层析成像结果解释为在南海地幔过渡带处存在一个掉落的俯冲板块^[9]。在该板块北缘,岩石圈内强烈的P波负异常可能指示地幔上涌。上涌的深地幔物质可能在裂谷过程中被拉向变薄的岩石圈^[1],引起岩浆底侵、侵入和喷发。因此,南海在张-破裂过程中表现出岩浆从贫到富的转变,且推测深源岩浆体受俯冲作用的影响。

2.2 大洋盆地“板内型”与边缘海裂谷“板缘型”

众多西太平洋边缘海自成一个系统,形成机制与南海类似,而与北大西洋为典型代表的大洋盆地具有显著差异^[9]:1)边缘海与大洋形成于威尔逊旋回的不同阶段,大洋产生于板块“拉张”的大环境,而边缘海处于板块“俯冲”的大环境;2)大洋裂谷盆地起源于板块内部,而边缘海盆地起源于板块边缘;3)大洋盆地时间跨度可达数亿年,而边缘海盆地仅为几千万年;4)大洋盆地可能对应于深地幔

对流,而边缘海多为上地幔对流,且与板块俯冲相互作用有关;5)大洋盆地的面积通常比边缘海盆地大1~2个数量级。因此,板内型(大洋)海盆与板缘型(边缘海)海盆揭示了截然不同的岩石圈、裂谷作

用(图3)。板缘型裂谷盆地是大陆破裂理论的补充与延伸,其形成过程中,与周边俯冲系统相互作用密不可分。

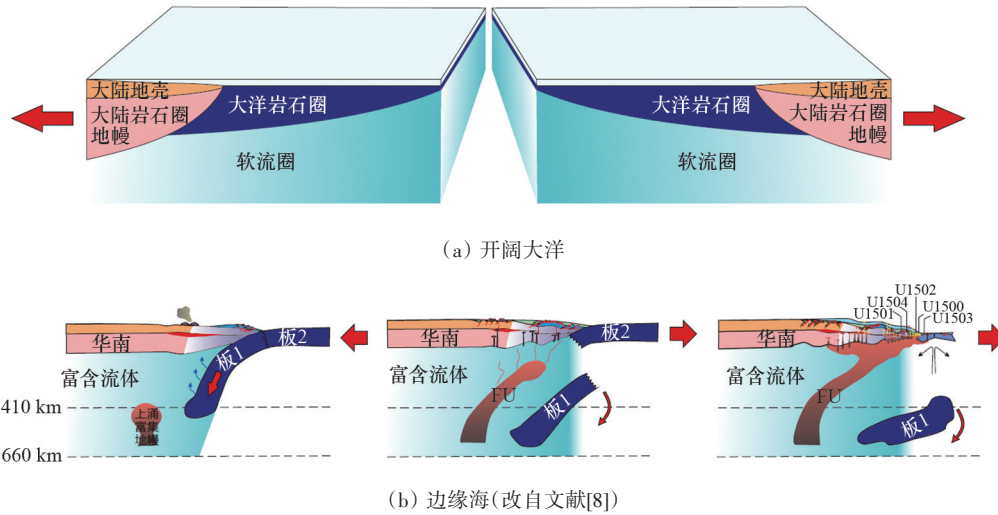


图3 不同类型的大陆岩石圈破裂机制

3 新机制:俯冲带控制南海的特征

南海三面受到俯冲带的包围,包括西边苏门达腊俯冲带、南边爪哇俯冲带、东边菲律宾与马尼拉俯冲带(图4)。地球物理观测与理论研究结果表明,南海构造演化过程与周边俯冲系统的相互作用密不可分:1) 西边苏门达腊俯冲带的俯冲物质在

下地幔深度可能已到达南海的边缘;2) 南边爪哇俯冲带向北俯冲同样可能在一定深度进入南海底下;3) 东边菲律宾与马尼拉俯冲带正分别从2个方向俯冲到菲律宾岛弧与吕宋海峡下;4) 南海北部可能存在一个较大范围的地幔上涌区,并推测其与周边俯冲相关^[3];5) 印支半岛地震各向异性研究表明,西南边印度板块的俯冲引发地幔上涌,可能为南海演化提供新生代岩浆源。

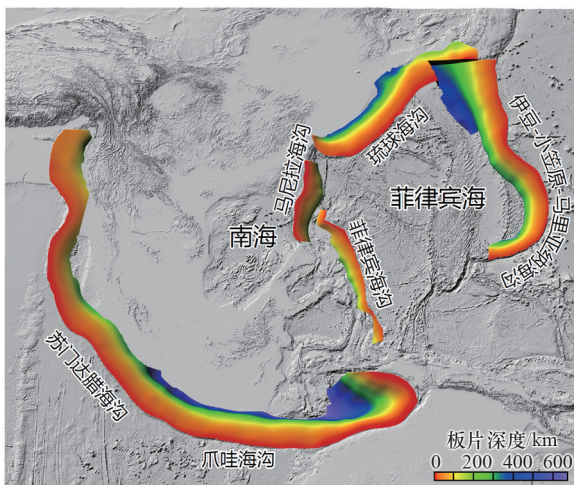


图4 南海被周边俯冲带包围

近年来,针对南海北部地幔上涌机制问题,一系列的三维地球动力学模拟研究取得了新突破。研究发现深部上涌物质可能源于太平洋西部核幔边界的D''层^[10],随着菲律宾海板块俯冲被分割为东、西两部分,西部的物质跟随板块运动迁移到南海北部之下。南海与周边俯冲系统的地幔三维地球动力学模拟研究发现^[3,11],南海地幔至少有2种上涌模式(图5^[3]):1) 浅部(<200 km)由板块扩张诱发的地幔上涌;2) 深部(最深达600 km或更深)由多向俯冲诱发的大规模区域性地幔上涌。模型指出南海周边的俯冲系统是诱发南海北部与印支半岛地幔上涌的可能机制(图6),这为解释在不同时

期观测到的南海及周边系统的岩浆活动提供了新见解。

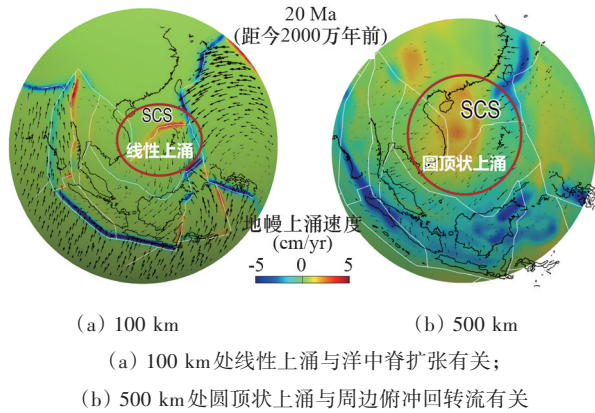


图5 地球动力学模拟显示 20 Ma(距今 2000 万年前)时的地幔上涌

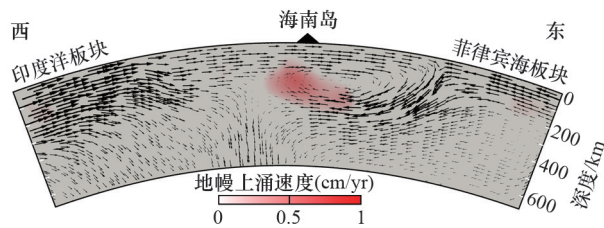


图6 地球动力学模拟揭示了南海北部地幔上涌受周边俯冲带控制

4 结论

通过南海深部计划与南海国际大洋钻探,科学家们取得了一系列创新进展和重大突破,标志着中国海洋地质与地球物理研究正走向国际前沿。

1) 大洋钻探发现,南海陆缘岩石圈减薄之初未发现缓慢破裂造成的蛇纹岩出露,而且岩浆迅速出现,新提出南海岩石圈破裂过程中岩浆“先贫后富”。

2) 新提出南海不是“小大西洋”,而是“板缘张裂”盆地,与经典的大西洋型“板内张裂”陆缘模式不同,俯冲作用是二者形成机制的关键区别。

3) 地球化学证据与地球动力学模拟都显示南海的岩浆形成受到周边俯冲带的影响,俯冲诱发地幔上涌可能是解释南海岩浆活动的新机制。

目前,中国的海洋地球科学正在进入崭新的发

展阶段,有望以南海为基点,将研究扩展到南海周边区域,注重南海与周边大洋板块相互作用以及西太平洋边缘海宏观演化,并通过主导国际大洋钻探合作以及建设中国大洋钻探平台,进一步提升中国在南海、太平洋与印度洋海洋地质科学研究的引领地位。

特以本文纪念姚伯初先生对南海构造与岩浆研究做出的开创性贡献。感谢国际大洋钻探 349、367、368、368X 全体参加人员作出的贡献。感谢汪品先、徐义刚、杨胜雄、翦知湓、黄奇瑜、周蒂、黄小龙、李春峰、夏少红、解习农、丁巍伟、陈永顺、张国良、赵明辉、姚永坚等的讨论与建议。

参考文献 (References)

- [1] 林间, 李家彪, 徐义刚, 等. 南海大洋钻探及海洋地质与地球物理前沿研究新突破[J]. 海洋学报, 2019, 41(10): 125-140.
- [2] 汪品先, 翦知湓. 探索南海深部的回顾与展望[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(10): 590-1606.
- [3] Lin J, Xu Y G, Sun Z, et al. Mantle upwelling beneath the South China Sea and links to surrounding subduction systems[J]. National Science Review, 2019, 6(5): 877-881.
- [4] 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.
- [5] Sun Z, Jian Z M, Stock J M, et al. South China Searifted margin[Z]. Proceedings of the International Ocean Discovery Program, 367/368: College Station, TX (International Ocean Discovery Program), 2018, <https://doi.org/10.14379/iodp.proc.367368.2018>.
- [6] Childress L, Expedition 368X Scientists. Expedition 368X preliminary report: South China Sea rifted margin[Z]. International Ocean Discovery Program, 2019, <https://doi.org/10.14379/iodp.pr.368X.2019>.
- [7] 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.
- [8] Sun Z, Lin J, Qiu N, et al. The role of magmatism in thinning and breakup of the South China Sea continental mar-

- gin[J]. *National Science Review*, 2019, 6(5): 871–876.
- [9] Wang P X, Huang C Y, Lin J, 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.
- [10] Zhang N, Li Z X. Formation of mantle “lone plumes” in the global downwelling zone – A multiscale modelling of subduction-controlled plume generation beneath the South China Sea[J]. *Tectonophysics*, 2018, 723: 1–13.
- [11] Zhou Z Y, Lin J. 3D mantle upwelling beneath the South China Sea and Southeast Asia: Insights from geodynamic modeling[C]//AGU Fall Meeting Abstracts. Washington, DC: AGU, 2019.

South China Seabasin opening: Lithospheric rifting and interaction with surrounding subduction zones

LIN Jian^{1,2,3,4}, SUN Zhen^{1,3,5}, LI Jiabiao⁶, ZHOU Zhiyuan^{1,3,5}, ZHANG Fan^{1,3,5}, LUO Yiming^{1,3,4}

1. Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China
2. Department of Geology and Geophysics, Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, MA 02543, USA
3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China
4. Department of Ocean Science and Engineering, Southern University of Science and Technology of China, Shenzhen 518055, China
5. Innovation Academy of South China Sea Ecology and Environmental Engineering, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China
6. Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China

Abstract The South China Sea (SCS) is the largest marginal sea in the western Pacific Ocean. Significant breakthroughs have been made in the SCS researches, especially through the South China Sea Deep Initiative and International Ocean Discovery Program (IODP). One of the surprising discoveries is that the expected mantle serpentinites at the IODP drill sites are not found at the northern SCS continental margin; instead, the magma is found to erupt rapidly, indicating the significant magmatism at the SCS soon after the continental rifting and probably due to the strong influence of surrounding subduction zones. Thus, the SCS might be regarded as a new type of rift basin of “plate-edge rifting”, different from the classic Atlantic type of “intra-plate rifting”. It is also suggested that the subduction-induced mantle upwelling is likely to play an important role in the magmatism of the SCS.

Keywords South China Sea; continental breakup; plate rifting; subduction; IODP ocean drilling ●



(责任编辑 祝叶华)