

DOI:10.16562/j.cnki.0256-1492.2017.06.003

南海北部晚新生代岩浆活动的发育特征与构造意义

夏少红¹, 范朝焰^{1,2}, 孙金龙¹, 曹敬贺¹, 赵芳¹, 万奎元¹

(1. 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;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:南海北部陆缘具有极其独特的岩浆活动特征,其岩浆活动在大陆张裂和破裂期间表现的较为薄弱,而在裂后期尤其是海底扩张停止之后的晚新生代时期却变得极为强烈。通过总结南海北部晚新生代玄武岩的岩石学、年代学、地球物理学等方面的研究成果,从发育规模、物质属性、构造模式以及通道特征等方面系统揭示了岩浆活动的发育特征及其隐含的构造意义。结果显示:(1)南海北部晚新生代玄武岩均显示洋岛玄武岩(OIB)的物质属性,且与世界典型热点火山 OIB 具有相似的同位素分布范围;(2)南海北部海底火山的侵入和喷出体积量与世界典型的大火成岩省具有可对比性;(3)岩石圈伸展过程中所形成的张性断裂可能为后期玄武岩的活动提供了良好的通道;(4)沉积地层中所发现的岩脉与岩墙复合体与海底火山活动应该具有相同的岩浆来源;(5)全球和区域地震层析成像结果均显示了一条清晰的深部低速通道,暗示了南海北部晚新生代玄武岩活动可能与深部地幔柱存在紧密联系。

关键词:玄武岩作用;地幔柱;海底火山;南海北部;晚新生代

中图分类号: P736.1

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2017)06-0025-09

南海是西太平洋最大的边缘海之一,位于欧亚、印-澳和太平洋三大板块的交汇处,其演化过程经历了晚中生代俯冲到新生代大陆张裂、破裂及海底扩张,以及随后洋壳俯冲等一系列完整的构造演变过程,集聚了从陆到洋、从俯冲输入到岩浆输出到再俯冲输入等极具特色的构造叠加景观,是开展洋-陆构造变迁和地球深—浅循环演变的极佳场所,也是我国走向深海研究的重要突破口^[1]。南海四周大陆边缘的类型特征各具特色,东侧为正在活动的俯冲大陆边缘^[2],西侧受红河断裂带的影响主要表现为走滑-伸展型陆缘特征^[3],南部在海底扩张运动过程中发生了陆陆碰撞挤压作用^[4],只有北部陆缘属于典型的张裂型大陆边缘,其不仅是目前保存南海张裂演化过程和构造特征最为完整的大陆边缘,也是晚中生代俯冲作用过渡到新生代南海海盆破裂、扩张这两个重大构造事件的衔接点。从世界范围来看张裂大陆边缘被划分为火山型^[5]和非火山型^[6]两个端元,其判别的标准主要是大陆在张裂或破裂期间是否受到了强烈岩浆作用的主导。火山型大陆边缘的

张裂、破裂过程主要受强烈岩浆活动的控制,其地球物理特征主要表现为由玄武岩组成的向海倾斜反射层系和下伏底侵物质组成的巨厚下地壳高速层;非火山型大陆边缘则表现为弱火山活动,岩石圈拉张减薄占主导地位,上地壳以脆性断裂和断块作用为主,下地壳—上地幔以塑性拉伸变形为主。

已有的研究成果^[7]显示南海北部陆缘不仅具有较为强烈的岩浆活动,而且保留有较厚的中生代沉积地层甚至还可能有古洋壳、古俯冲带的存在^[8]。自 20 世纪 60 年代以来,国内外学者就十分重视南海北部沉积盆地、岩浆活动和构造属性的研究^[9-11],虽然取得的重要成果极大地提高了我们对南海扩张过程和演化机制的认识和了解,但还存在较多的问题。造成这些问题的最主要原因之一是南海北部多条深地震探测剖面均显示上地壳有火山活动而下地壳存在高速层^[12-15],但反射地震剖面上却没有火山型陆缘特有的向海反射层系的发育,且与世界上典型的火山或非火山型大陆边缘相比,南海北部陆缘具有极其独特的岩浆活动特征,其岩浆活动在大陆张裂和破裂期间表现的较为薄弱,反而在裂后期尤其是海底扩张停止之后的晚新生代时期变得极为强烈。现有的研究已经揭示了南海北部海底、周缘的印支和华南沿海在晚新生代时期均发生了强烈的玄武质岩浆作用^[16,17],但这些火山岩浆的规模到底有多大,是否可以与世界典型大火成岩省相匹配? 这

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(XDA13010101);国家自然科学基金(41576041,91328206);广东省自然科学基金(2017A030311015)

作者简介:夏少红(1981—),男,研究员,研究方向为海洋地球物理,E-mail: shxia@scsio.ac.cn

收稿日期:2017-11-04;**改回日期:**2017-11-20. 文凤英编辑

些岩浆受到哪一深度层面地幔的控制和影响? 这些焦点问题有待深入研究。本文拟综合分析南海北部晚新生代玄武岩浆的地球化学、岩石学、地震学等研究成果,系统揭示该地区海底岩浆和火山活动的发育时代、规模、组成以及构造特征,阐述晚新生代岩浆的起源与通道特征。

1 晚新生代岩浆的活动范围与物质属性

晚新生代岩浆活动具有规模大、分布广的特点。已有的调查研究显示雷琼、广东沿海以及印支半岛等陆域地区出露较大规模的玄武岩,南海北部以及中央海盆也发育了大量的海底火山(图 1),这些岩浆活动主要以基性玄武岩为主,少数也有火山碎屑岩、中酸性喷出岩等。在珠江口盆地,新近纪—第四纪火山岩集中在珠三凹陷北部、珠二凹陷东部的隆起带和东沙隆起的南缘,规模相对较大,跨度达数十公里^[18],其岩石学特征表现为钙碱性系列向碱性和拉斑玄武岩发展,岩浆中深源物质具有逐渐增多的趋势^[19-21],白云凹陷 BY7-1-1 钻孔遇到复合凝灰岩层及玄武岩,包含大量的层状凝灰岩和角砾岩,反映了高频喷发的现象^[22],其玄武岩定年结果为晚渐新世至早中新世(23.8~17.6 Ma)。在海山区,西北次海盆双峰海山钻探获得粗面岩样品,⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年的结果为晚渐新世(23.29~23.80 Ma)^[23];台湾西南海域浦元海山附近拖网获得的碱性玄武岩样品,⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年的结果为早中新世(22~21 Ma)^[24]。雷琼地区具有广泛且大量的岩浆喷发,包括石英拉斑玄武岩和碱性玄武岩,其火山活动大致可以分为 16.7~11.7 Ma(石英拉斑玄武岩)、约 6.6 Ma(石英拉斑玄武岩)、4~6 Ma(碱性玄武岩)、以及小于 1 Ma(碱性玄武岩)等 4 个期次^[25, 26]。北部湾地区出露的碱性玄武岩主要发育于 5.4~2.7 Ma 和第四纪期间^[27, 28]。

我们将海南、印支越东、广东沿海以及南海北部海山等玄武岩样品测试所获取的 Pb、Nd、Sr 等同位素数据进行了统计,其结果显示⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 与¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd、²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 与⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 以及²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 与²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 的关系图(图 2a-2d)均处于全球典型的洋岛玄武岩(OIB)范围^[29]。为了进一步探索研究区玄武岩浆的物质组成和成因机制,我们将南海北部海、陆玄武岩样品获得的同位素数据与全球典型的热点火山地区也进行了对比,发现南海北部所有岩石样品的同位素组成均分布在全球典型的热点火山区域内

(图 2e, f),如 Hawaii、Reunion、Samoa 等热点火山区。从以上岩石学的统计结果我们可以得到以下几点认识:(1)南海北部晚新生代大规模玄武岩具有相似的物质组成和成因机制,均属于 OIB 属性;(2)南海北部晚新生代玄武岩与南海扩张期洋盆的 MORB 型玄武岩具有明显的差异,暗示了两者的截然不同的成因归属;(3)南海北部玄武岩与全球典型热点火山区的岩石样品具有相似的同位素属性,暗示了南海北部晚新生代大规模玄武岩浆活动在成因上与全球典型热点区可能具有相似的成因机制,暗示了深部地幔柱作用的成因机制。

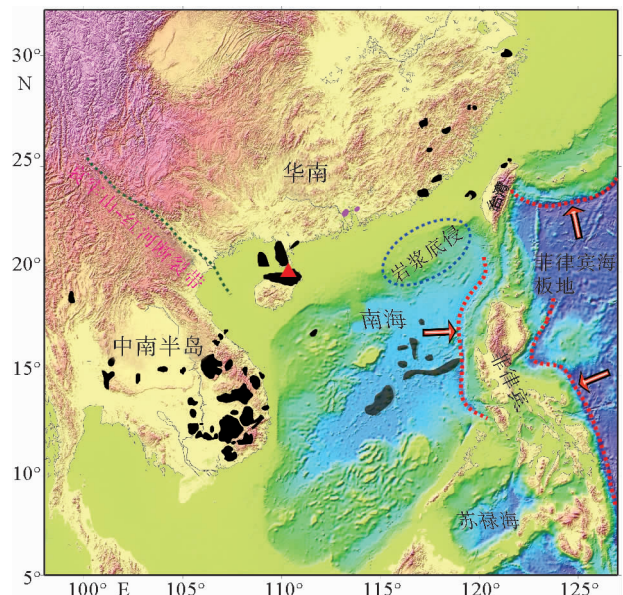


图 1 南海北部晚新生代岩浆活动范围

(据文献[12, 13, 16, 20-22]等资料)

图中黑色阴影为出露的玄武质火成岩和海底火山;

虚线椭圆为南海北部陆缘海底火山和地下壳底侵育区

Fig. 1 Distribution of the Late Cenozoic magmatic activities in the northern margin of South China Sea

The black shadows show the location of basaltic igneous rocks and submarine volcanoes. The dashed ellipse labels the area of the submarine volcanoes and the lowermost crustal magmatic intrusion in the northern margin of South China Sea

2 海底火山的发育规模与特征

据玄武岩浆分布图(图 1),晚新生代岩浆活动覆盖范围很广,但是其规模到底有多大,能否定量描述岩浆活动规模等问题还有待深入研究。从野外地质调查和大体估算结果来看,华南沿海和雷琼地区晚新生代岩浆岩覆盖面积超过 7 000 km²,岩浆沿着北东走向的伸展裂缝喷发^[30]。但由于海水的覆盖,海底到底发育了多少火山,这些火山的规模到

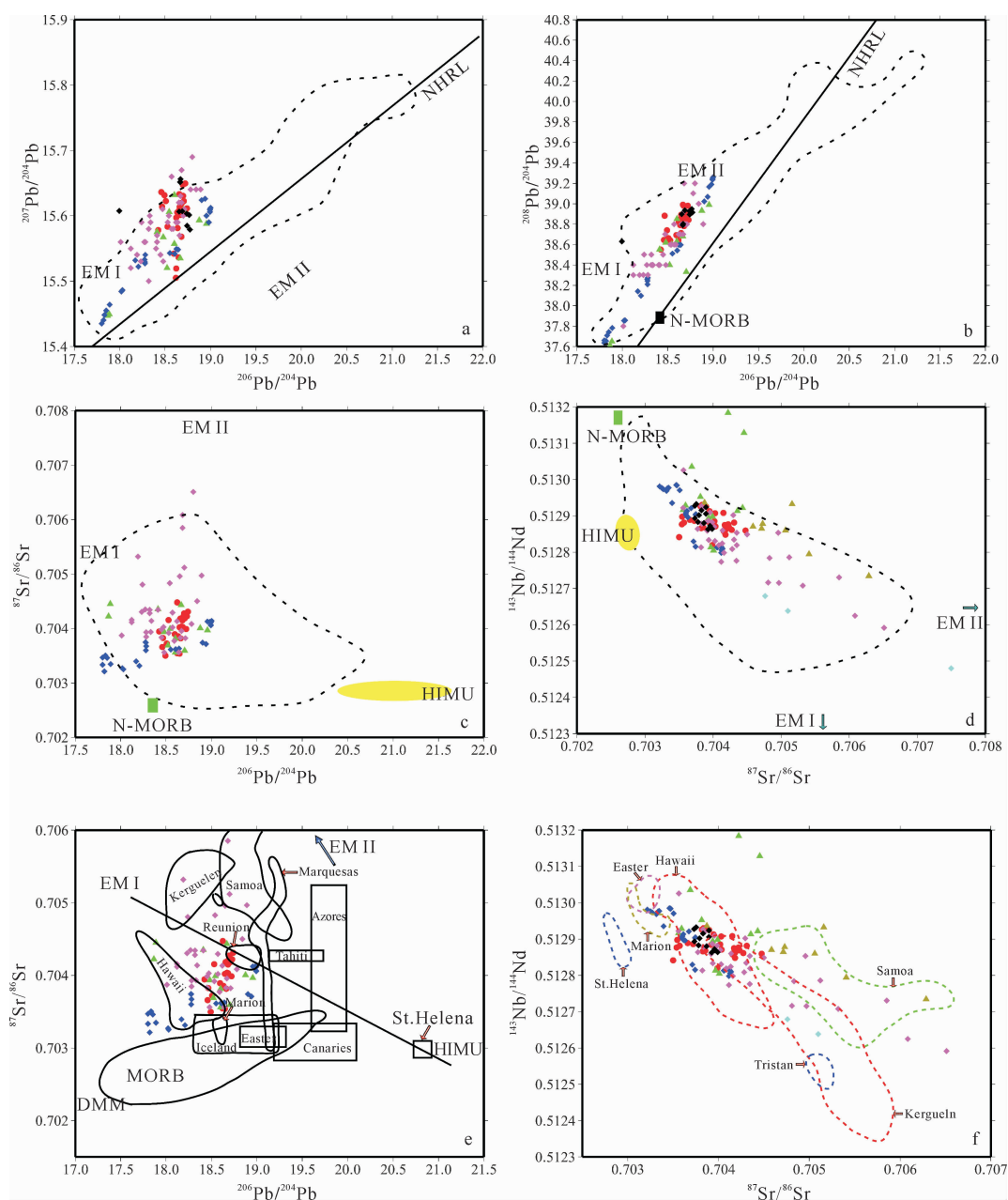


图 2 南海北部晚新生代玄武岩样品同位素对比

(a)-(d)为南海北部不同地区样品的同位素分析图;(e)-(f)为南海北部样品与全球典型热点火山区样品的对比图。

南海北部样品数据主要来自文献[16,20-22]等;全球数据主要来自文献[25]

Fig 2 Isotope comparison of late Cenozoic basalts in the northern margin of South China Sea

(a)-(d) is the isotopic analysis of samples from different regions in the northern margin of South China Sea;

(e)-(f) is the comparison between the samples in the northern margin of South China Sea and typical hotspots in the world. Sample data in the northern margin of South China Sea mainly from the refs. [16,20-22]; Global data from the ref. [25]

底有多大等问题一直没能得到很好的回答。无论从全球海底地形地貌数据,还是多波束数据中我们都可以看到海底存在大量的高山地形,这些高地中有许多是岩浆喷发至海底形成的海底火山。海底火山是全球海洋地形地貌中广泛存在的一种构造体,一般是指高出洋底超过 50 m 的活火山或死火山^[31, 32],海底火山的形成演化与海洋构造作用、地

球深浅物质循环及全球板块动力学等存在紧密联系,是研究地球深部过程与地表地质作用的重要纽带。南海北部海山内部的主要物质组成为玄武质火山岩,与周围沉积岩具有明显不同的地球物理特征。基于此,我们结合前人的研究成果建立了一套南海北部海山形态特征识别标准^[21],其中包括:(1)海山相对海底隆起高度超过 100 m;(2)海山外部具有高

振幅的地震反射相;(3)海山内部具有低振幅且杂乱的地震反射相;(4)海山周围地层具有明显隆起;(5)海山上方的重力异常表现为正高值;(6)海山上方的磁异常规律不明显,一般表现为正高或负高值,也有部分低磁性。利用全球 15 s 分辨率的水深数据、南海北部多波束数据、新采集的 16 条单道地震数据以及前人发表的百余条多道地震测线,我们识别出南海北部海底高地 74 个,确定其中 45 个为海山(图 3)。利用椭圆锥拟合每个海山的形态特征,并计算了每个海山露出海底的体积,从而估算出南海北部 45 座海山的岩浆喷出体积达到 $2\,436.16\text{ km}^3$,平均每座海山的体积达到 54.1 km^3 。值得注意的是,实际岩浆上涌进入地壳的体积应该远远超过这个数值,因为埋藏在沉积物之下以及地壳岩浆通道的体积仍未被计算进来。为了估算岩浆涌入地壳的体

积,我们假设每座海山的岩浆通道是近似垂直的圆柱体,那么岩浆涌入地壳的体积将达到 0.15 Mkm^3 ,超过全球大火成岩省的判断标准(0.10 Mkm^3),海山圈闭的平面面积也将达到 0.15 Mkm^2 ,同样也超过全球大火成岩省的判断标准(0.10 Mkm^2)。虽然这样的假定条件存在一定的偏差,但也能从另外一个角度暗示南海北部晚新生代玄武岩浆的规模与全球大火成岩省具有可对比性。

我们对南海北部断裂的走向进行了玫瑰花图统计(图 3),其结果显示断裂走向主要分布在 $N045^\circ\sim N090^\circ$ 之间,这与南海北部拉伸和裂解方向正交,证实了陆缘拉伸和裂解期间南海北部形成了大规模的张性断裂系统,这些 NE、NEE 向断裂强烈活动,是地壳中的构造薄弱带。而我们模拟获取的南海北部海山的底面长轴也呈现 $N045^\circ\sim N090^\circ$ 向优势方位

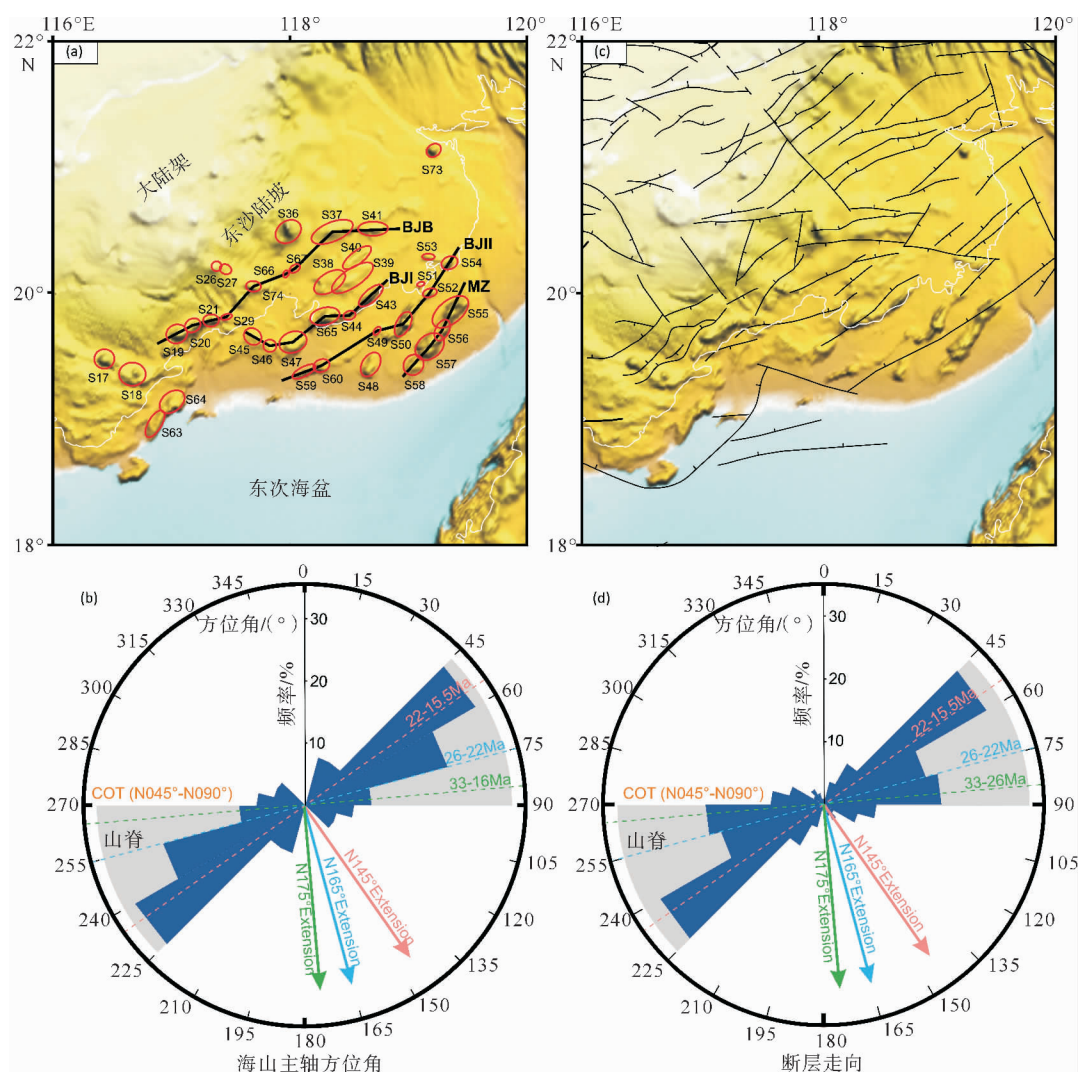


图 3 南海北部断裂与海山底面长轴优势方向统计图(据文献[17]修改)

Fig. 3 Long axis direction of at the bottom of the seamount and the fault strikes in the northern margin of South China Sea (modified after reference[17])

(图 3),该方向与断裂走向非常一致,推测南海张裂期形成的断裂带为后期的岩浆提供了上升通道,这一结果也从侧面验证了岩浆活动年代应该晚于断裂形成的年代,属于南海裂后期的产物。通过上覆沉积地层的接触关系,也能推断出海山的喷发时间非常晚,可能晚于海底扩张停止之后^[30],且此海山发育区的地壳拉张减薄程度剧烈,莫霍面快速抬升,并且有大型拆离断层发育,部分断层切断整个地壳^[33],这样的构造环境给晚新生代岩浆活动减小了上覆压力,同时也提供了充足的岩浆通道,为本期岩浆活动提供了优越的喷发条件。

晚新生代岩浆活动不仅在地表喷发,而且在沉积地层中也表现为广泛分布的岩席及岩墙复合体。通过近几十年的多道地震勘探,目前南海北部具有密集的地震测线覆盖。前人通过识别火成岩典型的地震反射特征,结合地层接触关系,标定了南海北部晚新生代岩浆活动侵入范围^[21, 34]。值得注意的是,这些侵入的岩浆岩剩磁异常特征(大于 50 nT)与玄武岩特征具有相似性^[21]。白云凹陷 BY7-1-1 钻孔也获得沉积地层中的玄武岩样品,证实了晚新生代岩浆侵入体与地表海山一致,都是玄武质岩浆。大部分玄武质岩浆侵入体也都分布于南海北部陆坡区,并且从三维多道地震勘探的结果看,这些侵入体也沿着断裂分布^[22, 35],与海底海山的分布在空间上具有连续性。此外,地球化学的分析结果显示,浦沉海山(台西南盆地)与白云凹陷地层中的玄武岩定年结果接近,且都具有 OIB 的特征。因此,我们推测地表海山与沉积地层中的侵入体都是晚新生代岩浆活动的表现,且都具有相似的地幔岩浆来源。

3 深部壳幔结构

为了研究南海北部海山及其下方的深部地壳结构,我们在东沙海域跨越陆架区和陆坡区开展了三维 OBS 深地震探测,并进行二/三维速度结构模拟。最新的速度结构剖面显示(图 4),南海东北部由厚约 25 km 的减薄型陆壳向东南方向快速减薄至 15 km 厚的超级减薄型陆壳。地壳等厚线的方向约为 N045°,与前人定义的洋陆过渡带走向基本一致。该区地壳结构大致可划分为 4 层:新生代沉积层(2.2~3.5 km/s)、中生代沉积层(3.5~5.5 km/s)、上下地壳(5.5~6.9 km/s)及下地壳高速层(7.0~7.5 km/s)。顶部为新生代沉积层,在陆架区的沉积厚度极薄,厚度平均 1~2 km;陆坡区厚度明显增加,厚度平均 3~5 km。由于陆坡区海山密

集,岩浆上涌至沉积物中,导致局部沉积物厚度只有 0.5~1.0 km。中生代沉积层位于地壳与新生代沉积物之间,分布范围仅仅局限于东沙隆起及潮汕凹陷附近,陆坡区并未发现该层位;其中该层在东沙隆起的厚度约为 2~3 km,在潮汕凹陷明显增厚,厚度约为 3~5 km,局部厚度可达 7 km。上下地壳层由东沙隆起向东沙陆坡减薄,在海山下方的地壳速度等值线呈现上凸趋势,推测与岩浆上涌有关,可能是地壳岩浆通道的表现。下地壳高速层整体表现为陆架区厚陆坡区薄,厚度从 5 km 变化到 0.5 km,在接近海盆处尖灭,与前人多条二维 OBS 探测结果类似(如 OBS1993, OBS2006-3)^[12, 15]。

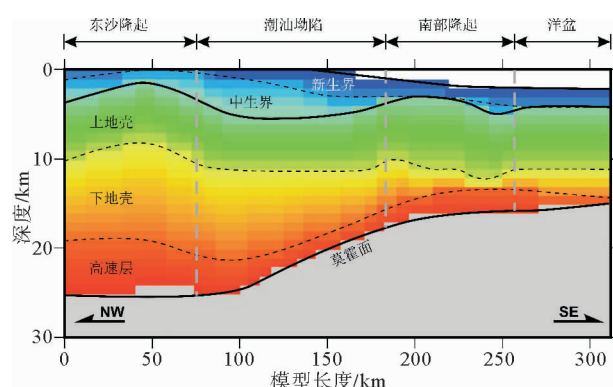


图 4 南海东北部穿越东沙隆起与潮汕凹陷地壳结构剖面
Fig. 4 Crustal structure across the Dongsha uplift and Chaoshan depression in the northeastern South China Sea

由地壳速度结构可知,高速层在南海北部陆缘陆架区与陆坡区都有分布。为了揭示高速层的物质组成, OBS2001 测线及 OBS2006-3 测线分别做了 P 波和 S 波速度结构,并获得了高速层的横纵波速比信息^[36, 37]。由波速比信息可以判断南海东北部高速层成分偏向高铁镁质,属于地幔岩浆底侵下地壳的产物。我们利用南海北部沿海地区的地震台网记录的远震 P 波数据,开展了南海北部海陆过渡区的远震层析成像研究,获得了研究区深至 1 100 km 的地幔速度结构^[38]。其结果显示南海北部晚新生代岩浆活动区存在一条起源于下地幔的连续低速通道,且低速通道穿越处的地幔转换带具有明显减薄的特征。该低速通道的三维透视图揭示出了清晰且倾斜上升的蘑菇头式地幔柱岩浆通道,但该通道形态特征随深度而发生较大变化,呈现成层式的变化特征,即在下地幔低速通道表现为直径约 200~300 km 的柱状体结构,反映地幔柱尾巴特征;当上升至地幔转换带处时,低速通道发生横向扩散,表现为地幔柱头的结构特征;但在上地幔中部,横向扩展的低

速体被裂解成多个斑点状异常体,直到岩石层底部再次发生汇聚。我们所揭示的岩浆通道与经典地幔热柱所提出的垂直通道存在较大差异。我们的结果显示南海东北部地幔存在低速异常,且该低速异常与南海北部海山、下地壳高速层在三维空间上具有连续性。同时,我们总结了不同学者利用不同数据和方法所获得的全球和区域成像结果,发现这些研究在南海北部都获得了很清晰的地幔低速通道(图 5),由此我们提出了南海北部晚新生代岩浆活动可

能受深部地幔柱的控制和影响,其海山形成的一种可能机制是:南海北部陆缘在张裂及扩张期间处于伸展的构造环境,产生一系列 NE-NEE 向断层,之后深部地幔柱的东沙分支上升至岩石圈底部并横向扩散,随之穿透岩石圈地幔并底侵下地壳,形成下地壳高速层,这些底侵的岩浆进一步上涌,沿着先存的 NEE 或 NE 的断层通道上升,从而在地表形成底面椭圆长轴沿 NEE 或 NE 分布的大规模海山群。

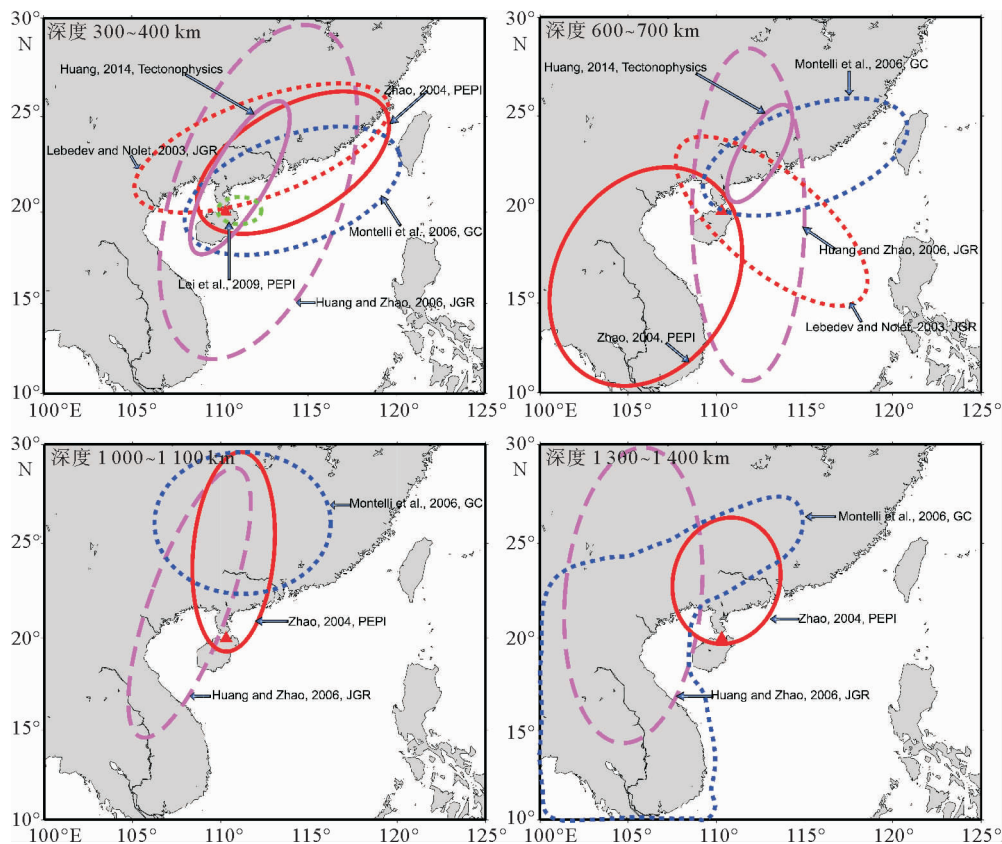


图 5 不同学者地震成像所获得的南海北部低速分布范围(据文献[39-44]研究成果综合分析)

Fig. 5 Low-speed distribution in the northern of South China Sea obtained by seismic imaging of different scholars

4 结论

(1) 新生代早期,南海北部陆缘从华南块体伸展裂解,此期岩浆活动有限,从而在南海北部形成非火山型大陆边缘。新生代中晚期,南海南北陆缘破裂,岩浆活动开始发育,使得现今的南海北部陆缘看起来既不像全球典型的火山型大陆边缘,也不像典型的非火山型大陆边缘。若研究南海张破裂过程,仍然应当将其视为非火山型陆缘,因为目前尚未发现同张裂期大规模的岩浆活动(如似海底反射层 SDRs)。

(2) 晚新生代,南海进入裂后期,尤其是海底扩张停止之后岩浆活动开始大规模、大范围地喷发至地表或侵入沉积地层中。雷琼、广东沿海、印支半岛等陆域地区出露较大规模的玄武岩,南海北部以及中央海盆也发育了大量的海底火山及火山复合体。这些岩浆活动整体具有沿着 NE—SW 向的空间排列特征,与张裂期的构造走向一致(如大型拆离断层走向,地壳厚度等值线走向)。张裂期岩石圈发生大规模伸展减薄,在地壳形成一系列地壳薄弱带(如断层位置、莫霍面快速抬升地壳急剧减薄的位置)。这些薄弱带作为后期岩浆上涌/喷发的通道,不仅减小

了上覆压力而且缩短了岩浆运移的距离,为晚新生代岩浆活动创造了极佳的构造环境。

(3)南海北部晚新生代大规模岩浆喷发或侵入的岩浆具有相似的物质组成(玄武岩),偏向 OIB 型的地化特征,而且与全球典型热点火山区的岩石样品具有相似的同位素属性,表明南海北部晚新生代大规模玄武岩岩浆活动的物质来源于深部地幔,与全球典型热点区可能具有相似的成因机制。此外,人工震源、远震层析成像等地球物理方法不仅揭示了晚新生代岩浆活动在地壳中的表现(如高速异常体、上凸的速度等值线),也揭示了源自下地幔的岩浆通道。对岩石学、地球化学及地球物理等资料的综合分析,认为南海北部晚新生代岩浆活动受控于热点地幔柱的可能性很大。

(4)南海破裂之后,陆缘岩石圈和软流圈相对张裂期都更趋于稳定,但是为什么地幔柱选择在此相对稳定的期间上涌而非在张裂“不稳定”的时期上涌?地幔柱的产生是随机的还是受控于地幔软流圈局部扰动?玄武岩定年跨度较大(约 22~1 Ma)是地幔柱持续长时间的作用还是地幔柱的迁移?这些问题一直未能得到较好的解释,也是未来研究南海北部晚新生代岩浆活动的重点。期待更多的工作加入,从而为南海北部晚新生代岩浆活动建立更完善的形成机制。

参考文献(References)

- [1] 汪品先. 南海——我国深海研究的突破口[J]. 热带海洋学报, 2009, 28(3): 1-4. [WANG Pinxian. Toward scientific breakthrough in the South China Sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2009, 28(3): 1-4.]
- [2] Bautista B C, Bautista M L, Oike K, et al. A new insight on the geometry of subducting slabs in northern Luzon, Philippines[J]. Tectonophysics, 2001, 339(3-4): 279-310.
- [3] 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.]
- [4] 丁巍伟, 李家彪. 南海南部陆缘构造变形特征及伸展作用: 来自两条 973 多道地震测线的证据[J]. 地球物理学报, 2011, 54(12): 3038-3056. [DING Weiwei, LI Jiabiao. Seismic stratigraphy, tectonic structure and extension factors across the southern margin of the South China Sea: evidence from two regional multi-channel seismic profiles[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(12): 3038-3056.]
- [5] Geoffroy L. Volcanic passive margins[J]. Comptes Rendus Geoscience, 2005, 337(16): 1395-1408.
- [6] Péron-Pinvidic G, Van Wijk J, Shillington D J, et al. The structure, evolution and symmetry of the magma-poor rifted margins of the North and Central Atlantic: A synthesis[J]. Tectonophysics, 2009, 468(1-4): 1-5.
- [7] 李家彪. 南海大陆边缘动力学: 科学实验与研究进展[J]. 地球物理学报, 2011, 54(12): 2993-3003. [LI Jiabiao. Dynamics of the continental margins of South China Sea: scientific experiments and research progresses[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(12): 2993-3003.]
- [8] 周蒂, 王万银, 庞雄, 等. 地球物理资料所揭示的南海东北部中生代俯冲增生带[J]. 中国科学-地球科学, 2006 (36): 209-218. [ZHOU Di, WANG Wanyin, PANG Xiong, et al. Mesozoic subduction-accretion zone in northeastern South China Sea inferred from geophysical interpretations[J]. Science in China Series D, 2006, 49(5): 471-482.]
- [9] 姚伯初, 曾维军, 陈艺中, 等. 南海北部陆缘东部中生代沉积的地震反射特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1995, 15(1): 81-90. [YAO Bochu, ZENG Weijun, CHEN Yizhong, et al. Seismic reflection characteristics of Mesozoic sediments on the eastern continental margin in the north of the South China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1995, 15(1): 81-90.]
- [10] Yan P, Di Z, Liu Z S. A crustal structure profile across the northern continental margin of the South China Sea[J]. Tectonophysics, 2001, 338(1): 1-21.
- [11] Nissen S S, Hayes D E, Buhl P, et al. Deep penetration seismic soundings across the northern margin of the South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1995, 100(B11): 22407-22433.
- [12] Wang T K, Chen M K, Lee C S, et al. Seismic imaging of the transitional crust across the northeastern margin of the South China Sea[J]. Tectonophysics, 2006, 412(3-4): 237-254.
- [13] 卫小冬, 阮爱国, 赵明辉, 等. 穿越东沙隆起和潮汕坳陷的 OBS 广角地震剖面[J]. 地球物理学报, 2011, 54(12): 3325-3335. [WEI Xiaodong, RUAN Aiguo, ZHAO Minghui, et al. A wide-angle OBS profile across Dongsha Uplift and Chaoshan Depression in the mid-northern South China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(12): 3325-3335.]
- [14] Hoang N, Flower M. Petrogenesis of Cenozoic basalts from Vietnam: Implication for origins of a Diffuse igneous province [J]. Journal of Petrology, 1998, 39(3): 369-395.
- [15] Zhang B, Wang P J, Zhang G C, et al. Cenozoic volcanic rocks in the Pearl River Mouth and Southeast Hainan basins of South China Sea and their implications for petroleum geology[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(6): 704-713.
- [16] 张屿. 南海北部陆缘新生代岩浆活动及构造意义[D]. 北京: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2014. [ZHANG Qiao. Cenozoic magmatism in the northern continental margin of the South China Sea and its Implication for the Tectonic Evolution of the Rifted Margin[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanology),

2014.]
- [17] Lüdmann T, Wong H K. Neotectonic regime on the passive continental margin of the northern South China Sea[J]. *Tectonophysics*, 1999, 311(1-4): 113-138.
- [18] Yan P, Deng H, Liu H L, et al. The temporal and spatial distribution of volcanism in the South China Sea region[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, 27(5): 647-659.
- [19] Fan C Y, Xia S H, Zhao F, et al. New insights into the magmatism in the northern margin of the South China Sea: Spatial features and volume of intraplate seamounts[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2017, 18(6): 2216-2239.
- [20] Zhao F, Alves T M, Wu S G, et al. Prolonged post-rift magmatism on highly extended crust of divergent continental margins (Baiyun Sag, South China Sea)[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 445: 79-91.
- [21] Li X H, Li J B, Yu X, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of seamount trachytes from the South China Sea and implications for the evolution of the northwestern sub-basin[J]. *Geoscience Frontiers*, 2015, 6(4): 571-577.
- [22] Wang K L, Lo Y M, Chung S L, et al. Age and geochemical features of dredged basalts from offshore SW Taiwan: the coincidence of intra-plate magmatism with the spreading south China Sea[J]. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2012, 23(6): 657-669.
- [23] Zhu B Q, Wang H F. Nd-Sr-Pb isotopic and chemical evidence for the volcanism with MORB-OIB source characteristics in the Leiqiong area, China[J]. *Geochimica*, 1989(3): 193-201.
- [24] Flower M F J, Zhang M, Chen C Y, et al. Magmatism in the south china basin. 2. post-spreading quaternary basalts from Hainan island, south China[J]. *Chemical Geology*, 1992, 97(1-2): 65-87.
- [25] 贾大成, 丘学林, 胡瑞忠, 等. 北部湾玄武岩地幔源区性质的地球化学示踪及其构造环境[J]. *热带海洋学报*, 2003, 22(2): 30-39. [JIA Dacheng, QIU Xuelin, HU Ruizhong, et al. Geochemical nature of mantle reservoirs and tectonic setting of basalts in beibu gulf and its adjacent region[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2003, 22(2): 30-39.]
- [26] 李昌年, 王方正, 钟称生. 广西北海涠洲岛(含斜阳岛)第四纪玄武质火山岩的地球化学性质及其源区特征[J]. *岩石矿物学杂志*, 2005, 24(1): 1-11. [LI Changnian, WANG Fangzheng, ZHONG Chengsheng. Geochemistry of Quaternary basaltic volcanic rocks of Weizhou island in Beihai City of Guangxi and a discussion on characteristics of their source [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2005, 24(1): 1-11.]
- [27] Hart S R. Heterogeneous mantle domains: signatures, genesis and mixing chronologies[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1988, 90(3): 273-296.
- [28] Zhang Q, Wu S G, Dong D D. Cenozoic magmatism in the northern continental margin of the South China Sea: evidence from seismic profiles [J]. *Marine Geophysical Research*, 2016, 37(2): 71-94.
- [29] Kim S S, Wessel P. New global seamount census from altimetry-derived gravity data[J]. *Geophysical Journal International*, 2011, 186(2): 615-631.
- [30] Smith D K, Cann J R. Hundreds of small volcanoes on the median valley floor of the mid-atlantic ridge at 24-30°N[J]. *Nature*, 1990, 348(6297): 152-155.
- [31] Hayes D E, Nissen S S, Buhl P, et al. Throughgoing crustal faults along the northern margin of the South China Sea and their role in crustal extension[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1995, 100(B11): 22435-22446.
- [32] Song X X, Li C F, Yao Y J, et al. Magmatism in the evolution of the South China Sea: Geophysical characterization[J]. *Marine Geology*, 2017, doi: 10.1016/j.margeo.2017.07.021.
- [33] Zhao F, Wu S G, Sun Q L, et al. Submarine volcanic mounds in the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea[J]. *Marine Geology*, 2014, 355: 162-172.
- [34] 卫小冬, 赵明辉, 阮爱国, 等. 南海中北部 OBS2006-3 地震剖面中横波的识别与应用[J]. *热带海洋学报*, 2010, 29(5): 72-80. [WEI Xiaodong, ZHAO Minghui, RUAN Aiguo, et al. Identification and application of shear waves along the profile OBS2006-3 in the mid-northern South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2010, 29(5): 72-80.]
- [35] Zhao M H, Qiu X L, Xia S H, et al. Seismic structure in the northeastern South China Sea: S-wave velocity and V_p/V_s ratios derived from three-component OBS data[J]. *Tectonophysics*, 2010, 480(1-4): 183-197.
- [36] Xia S H, Zhao D P, Sun J L, et al. Teleseismic imaging of the mantle beneath southernmost China: New insights into the Hainan plume[J]. *Gondwana Research*, 2016, 36: 46-56.
- [37] Lebedev S, Nolet G. Upper mantle beneath Southeast Asia from S velocity tomography[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2003, 108(B1): 2048, doi: 10.1029/2000JB000073.
- [38] Lei J S, Zhao D P, Steinberger B, et al. New seismic constraints on the upper mantle structure of the Hainan plume [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2009, 173(1-2): 33-50.
- [39] Montelli R, Nolet G, Dahlen F A, et al. A catalogue of deep mantle plumes: New results from finite-frequency tomography[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2006, 7(11): Q11007, doi: 10.1029/2006GC001248.
- [40] Huang J L, Zhao D P. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(B9): B09305, doi: 10.1029/2005JB004066.
- [41] Huang J L. P-and S-wave tomography of the Hainan and surrounding regions: Insight into the Hainan plume[J]. *Tectonophysics*, 2014, 633: 176-192.
- [42] Zhao D P. Global tomographic images of mantle plumes and subducting slabs: insight into deep Earth dynamics[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2004, 146(1-2): 3-34.

CHARACTERISTICS OF LATE CENOZOIC MAGMATIC ACTIVITIES ON THE NORTHERN MARGIN OF SOUTH CHINA SEA AND THEIR TECTONIC IMPLICATIONS

XIA Shaohong¹, FAN Chaoyan^{1,2}, SUN Jinlong¹, CAO Jinghe¹, ZHAO Fang¹, WAN Kuiyuan¹

(1. CAS Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology,

Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The northern margin of South China Sea is characterized by unique magmatic activities. They were weak during the period of continental rifting and breakup but intense in the late Cenozoic of post-rifting stage, particularly after the cessation of seafloor spreading. In this paper, studied are the characteristics of magmatic activities in the late Cenozoic including the scale, material properties, tectonic pattern and conduit features by summarizing the previous research results of petrology, chronology and geophysics. Our results show that: (1) The Late Cenozoic basalts on the northern margin of South China Sea is a kind of oceanic island basalts (OIB), having similar isotopic distribution pattern with the typical hotspot OIB of the world; (2) The volume and scale of the submarine volcanism on the northern margin of South China Sea are comparable to the typical igneous rocks of the world; (3) The tensile faults formed during the extension and rifting of the lithosphere may provide a good conduit for the basaltic magma to move upward; (4) The dyke and dike complexes found in the sedimentary strata have the same magmatic source as the submarine volcanism; (5) Global and regional seismic tomography results show a clear deep low-speed channel, suggesting that the Late Cenozoic basaltic magmatism on the northern margin of South China Sea may be closely related to a deep mantle plume.

Key words: northern margin of South China Sea; basaltic magmatism; Late Cenozoic; mantle plume; submarine volcanoes