

# 海南地幔柱与南海形成演化

鄢全树<sup>1,2</sup>, 石学法<sup>1</sup>

(1.海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室 国家海洋局, 第一海洋研究所, 青岛 266061;

2.中国科学院 海洋研究所, 青岛 266071)

**摘要:** 东南亚上地幔地震层析成像表明, 海南岛周围之下存在地幔柱, 近垂直的低波速柱体位于海南岛及南海之下, 从浅部向下穿越660 km的不连续面处(上下地幔的分界面)并一直延伸到1 900 km。南海及周边地区包括雷琼半岛、海南岛、北部湾盆地、广西北海涠洲岛、以及中南半岛等地, 分布有一定量的新生代碱性玄武岩, 它们的地球化学数据显示出OIB的特点并具有DUPAL异常, 表明其源区较深。此外, 由南海新生代碱性玄武岩中的橄榄石-流体平衡所推导的南海底地幔潜在温度(1 661℃)位于夏威夷(1 688℃)与冰岛热点(1 637℃)相应值之间, 为海南岛地幔柱的存在提供了岩石学及矿物化学方面的约束。基于以上地球物理学、地球化学及矿物化学方面的证据, 结合数字模拟实验资料, 表明在海南岛及邻近区域之下存在地幔柱。建立了一个南海形成演化的初步模型: (1) 50~32 Ma, 印度洋板块-欧亚板块碰撞及其所导致的太平洋板块后退的综合效应为南海地区提供了一个伸展环境, 进而为地幔柱物质的上升提供了通道; (2) 32~21 Ma, 当地幔柱柱头到达软流圈时, 由于侧向物质流与扩张中心发生相互作用, 促进了南海的扩张, 并在26~24 Ma期间发生了洋脊重新就位, 使扩张中心从原来的18°N附近(即现今西北海盆的中心)调整到15.5°N附近(即现今的东部亚盆); (3) 21~15.5 Ma, 随着地幔柱效应的逐渐增强, 热点-洋脊相互作用越来越强烈, 在大约21 Ma发生了洋脊的再次重新就位事件, 诱发了西南海盆的扩张; (4) 15.5 Ma~现在, 由于印澳板块前缘与巽他大陆碰撞, 使得南海大约在15.5 Ma停止扩张, 并沿着南沙海槽及吕宋海沟向菲律宾岛弧及巴拉望地块之下俯冲, 而南海热点继续活动, 直到第四纪还有碱性玄武岩喷出地表。

**关键词:** 海南地幔柱; 碱性玄武岩; 南海形成演化; 柱脊相互作用

**中图分类号:** P542.4; P588.145

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-7493(2007)02-0311-12

## 1 引言

西太平洋集中发育了全球75%的边缘海盆地, 这些盆地形成于始新世、渐新世—中新世和晚中新世、第四纪3个边缘海扩张幕(任建业和李思田, 2000)。研究表明, 这些边缘海盆的动力学背景既存在共性, 也存在个性, 因此其形成演化的模型不能一概而论。南海是西太平洋最大的边缘海盆之一, 对其深入研究有助于正确揭示南海形成演化以及南海地区周缘油气盆地形成的动力学问题。截止目前, 前人对于南海的研究(尤其是地球物理学方面)积累了丰富的资料(Xia et al, 1994; Wei and Chung, 1995; Zhou et al, 1995; Schluter et al, 1996; Ludmann and Wong, 1999; Wang et al, 2000; 张健和汪集扬, 2000; Clift and Lin, 2001; Yan et al, 2001;

Qiu et al, 2001; Clift et al, 2002; Shi et al, 2003; Zhu et al, 2004; 万玲等, 2005; 姚伯初等, 2005; Braitenberg et al, 2006), 但有关南海的形成演化的观点众多, 其关键点在于不同学者对南海形成演化的动力源认识不一(Karig, 1971; Taylor and Hayers, 1980, 1983; Tapponnier, 1986; 陈国达, 1988; Briaies et al, 1993; 李思田等, 1998)。近来获得的有关地球物理学(Lebedev et al, 2000; Lebedev and Nolet, 2003; Montelli et al, 2005, 2006; Nolet et al, 2006, 2007)、数值模拟实验(夏斌等, 2005)以及南海及周边地区的岩石学(Tu et al, 1992; Hoang et al, 1996; 张明等, 1992; Zhou and Mukasa, 1997; 贾大成等, 2003; 李昌年等, 2005)资料有助于我们重新审视南海形成演化的动力学背景。基于以上的资料, 结合笔者对南海新生代玄武岩的研究, 在肯定地幔柱假说的前提下,

收稿日期: 2007-02-28; 修回日期: 2007-03-27

基金项目: 科技基础性工作和社会公益研究专项项目(2003DIB3J114)的成果

作者简介: 鄢全树, 男, 1976年生, 博士研究生, 主要从事海洋地质学和岩石学研究; E-mail: yanquanshu@163.com

本文从新的角度对南海形成演化进行了的探讨,期望对正确认识南海形成演化提供一些线索。

## 2 海南地幔柱

Maruyama(1994)首先指出东南亚大陆之下存在“越南地幔柱”,然而只限于概念性阶段;曾维军(1997)通过整合地质、地球物理学资料,提出中南半岛地区之下存在地幔柱,并命名为“印支地幔柱”,指出其位置大致与Maruyama(1994)的“越南地幔柱”相当。赵海玲等(2004)指出中国东南沿海存在地幔柱,并识别出了一条热点轨迹,其初始端位于南海地区。由于地球物理技术的限制,以上所提出的地幔柱主要是在上地幔(660 km地震不连续面以上)的层面进行讨论,即其源区可能位于上地幔底部,按照Anderson(2005)的观点,可以利用浅部的板块构造效应替代它们而进行相关解释,但即便如此,早期的研究也已为我们提供了南海及周边地区可能存在地幔柱的有益信息。以Davies为首的一批学者肯定地幔柱假说

(Davies, 2005),并指出通过地球物理学技术可以提供地幔柱假说的深部信息,而地表熔岩(主要为玄武岩类)的地球化学特征可以反映地幔柱上升到浅部后所发生的物理化学过程等重要信息。

近来,越来越多的地球物理学、岩石学资料表明南海及周边地区可能存在地幔柱,地球物理学资料表明低速带主要存在于海南岛附近(Lebedev and Nolet, 2003),因此把此地幔柱定义为“海南地幔柱”,其影响范围主要通过地表出露的新生代碱性岩为依据,包括南海、雷琼半岛以及中南半岛等地区,影响范围大致以红河断裂带与越东断裂的交汇点为中心的圆形区域内(图1),其中东、东南边界分别为以挤压性质为特征的马尼拉海沟和南沙海槽,面积达400万km<sup>2</sup>以上。

### 2.1 海南岛周边地区的地球物理学证据

地震层析成像技术之所以重要,不仅是因能获得地幔柱的图象,而且可获得地幔柱的规模、形状和温度异常等可靠信息(Nolet et al, 2007)。通过利用地震层析成像技术,Lebedev et al

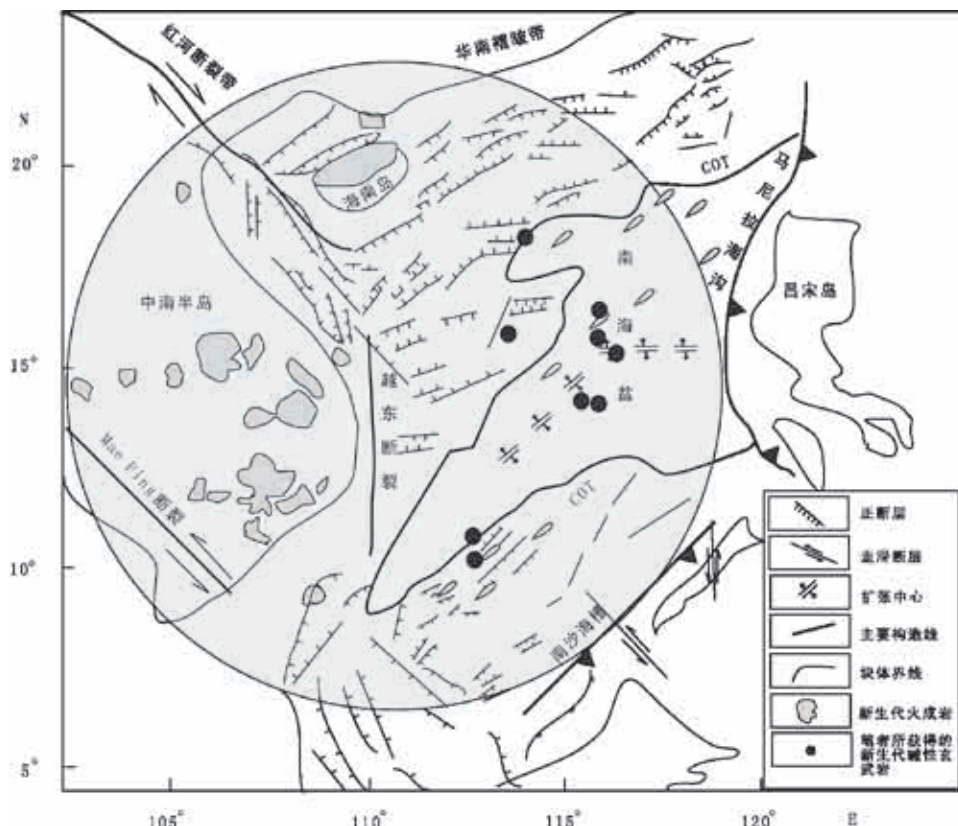


图1 南海及周边地区地质简图及新生代碱性玄武岩分布区(资料据黄福林, 1986; 李思田等, 1998; Hoang et al, 1996; Ren et al, 2002; Shi et al, 2003; 万玲等, 2005; Braitenberg, 2006)

Fig.1 Simplified geological map of the South China Sea and adjacent areas and distribution pattern of Cenozoic basalts

(2000) 和 Lebedev and Nolet (2003) 研究指出, 海南岛之下存在地幔柱, 近垂直的低波速柱体位于海南岛及南海之下, 从浅部一直延伸到660 km的不连续面处(上下地幔的分界面), 即模型的底界, 并指出地幔柱的物质源区可能是大约200 Ma之前与华北碰撞后大陆岩石圈俯冲并停滞在过渡带(410~660 km)至今。从图2可见, 在470 km和600 km深度处海南岛周围呈现明显不同于中国东部的低速区域(Lebedev and Nolet, 2003)。Nolet et al (2006) 进一步研究指出在670 km之下仅可见斑点状低速体, 暗示堆积在过渡带的少量古老物质可能穿透了660 km这一相界面(即相当于地震不连续面), 或者可能是来自深部核-幔边界的深地幔柱逐渐失去地幔柱尾部而使地幔柱趋于消失(Montelli et al, 2005, 2006)。新的有限元S波速地震层析图象(PRI-S05模型中的地幔柱半径接近实际情况(400 km))显示海南之下的低速异常可达到中地幔深度(1900 km)(图3)(Montelli et al, 2006), 地幔柱可能因为尾部太小而不能在下地幔底部被观察到, 但是图象也与已经耗尽源区的“即将死亡的地幔柱”的解释(Montelli et al, 2005)是一致的。

不管其源区在哪里, 海南岛地幔柱存在的地球物理证据相当充分。而南海及周边地区南海停止扩张以来喷发的大量碱性玄武岩可能表明地幔柱并非正在消亡。南海及周边地区(Lebedev and

Nolet, 2003; Karason and van der Hilst, 2000) 与中国东部大陆之下的地震层析图象有着明显差别, 这是否表明两者所处的主构造控制域有着明显差别, 如中国东部可能主要受控于西太平洋俯冲带(Niu, 2005), 而远离俯冲带的南海可能主要受其它深部过程(如地幔柱等)的控制, 而这些深部过程的差异完全可以从喷出于地表的火山岩中找到证据。

## 2.2 南海及周边地区新生代碱性玄武岩地质学及岩石学证据

南海及周边地区包括雷琼半岛、海南岛、北部湾盆地、广西北海涠洲岛、越南、泰国以及南海等地(图1), 分布有一定量的新生代碱性玄武岩(Tu et al, 1992; 张明等, 1992; 邹和平等, 1995; Zhou and Mukasa, 1997; Hoang et al, 1996; 贾大成等, 2003; 李昌年等, 2005)。一般认为, OIB(洋岛玄武岩)的来源较深, 主要属于碱性玄武岩系列, 可能与地幔柱有关。

Hoang and Flower (1998) 进一步研究指出越南中南部可能存在一个“分散的火成岩省”(?)。因此本文从已有文献中主要选取了碱性玄武岩方面的相关资料。这些玄武岩的年龄值范围从22.9 Ma到现在(表1), 表明碱性玄武岩的喷发年龄持续时间较长。限于篇幅, 作者只从同位素地球化学角度对以上所提及的南海及周边地区的新生代玄武岩(除朱炳泉和王慧芳(1989)外, 主要为碱性玄武岩)源

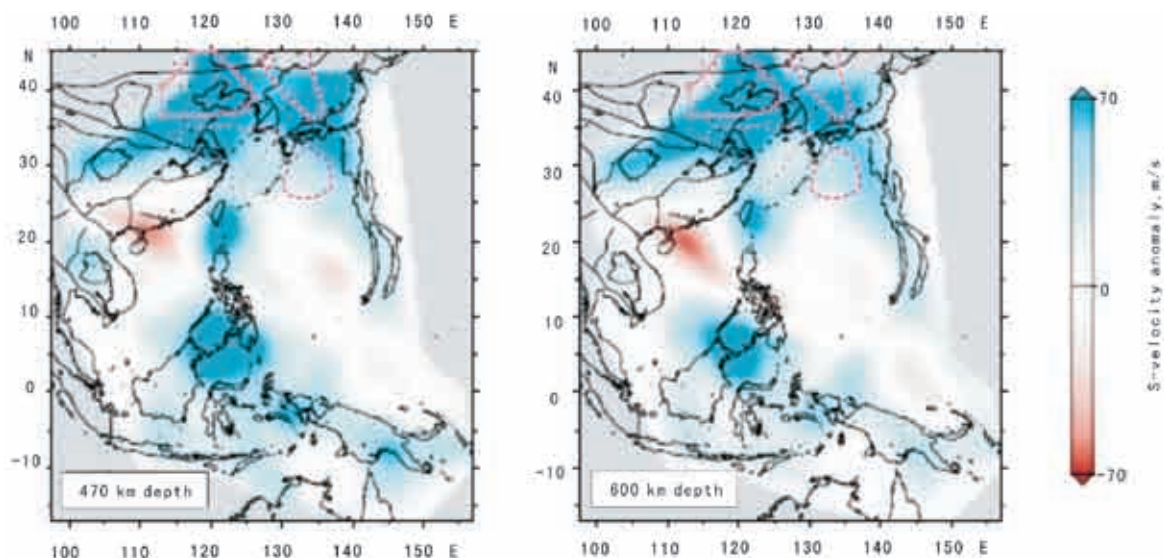


图2 穿越亚洲东南—西太平洋过渡带470和600 km深度横截面地震波速图象(据Lebedev and Nolet, 2003)

Fig.2 Constant depth cross sections through the SE Asia transition zone at two depths (470 km, 600 km) (after Lebedev and Nolet, 2003)



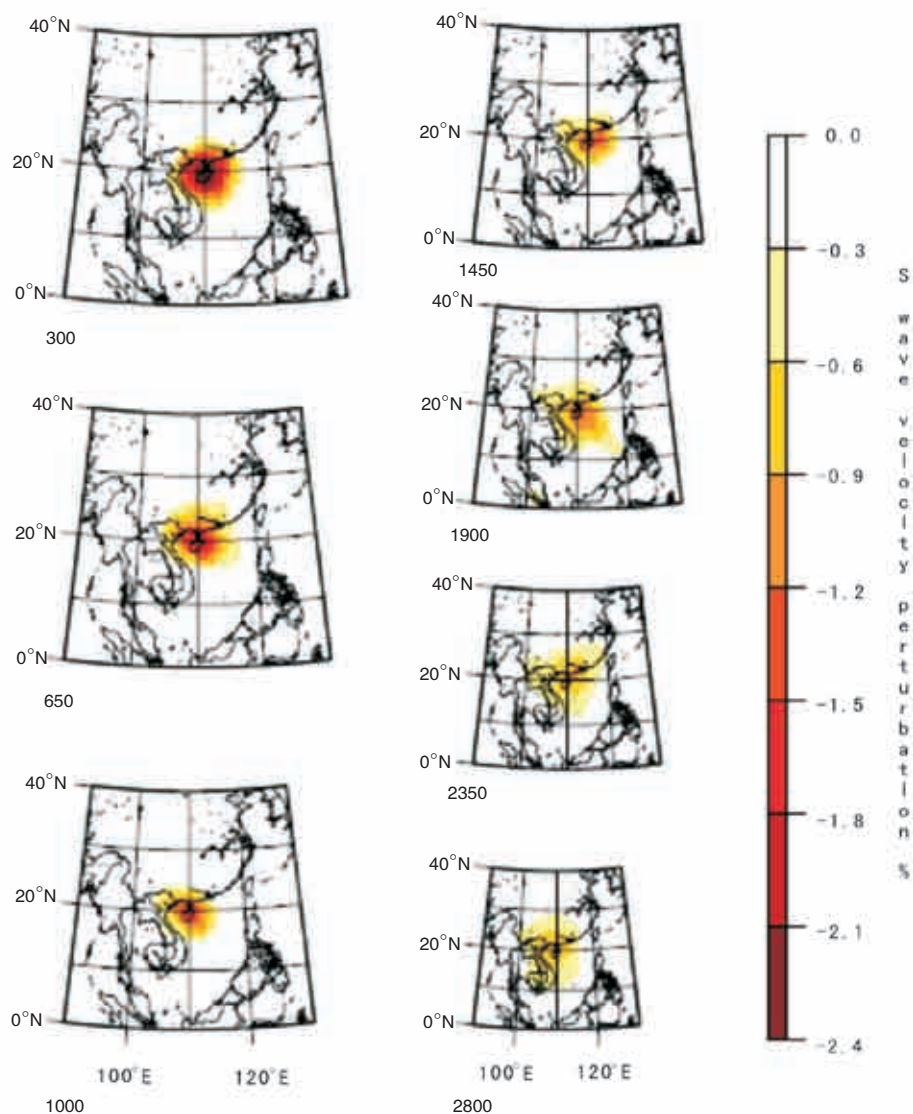


图3 地震层析成像技术揭示海南地表之下的低速异常情况  
(据Montelli et al, 2006)

Fig.3 Low S-velocity anomaly beneath Hainan indicated by New finite-frequency tomographic images (after Montelli et al, 2006)

表1 南海及周边地区新生代玄武岩年代学数据  
Table 1 Geochronological data for Cenozoic basalts from the South China Sea and adjacent areas

	南海	雷琼地区	北部湾	珠江口	广西涠洲岛	越南	泰国
年龄值 (Ma)	22.9~3.5	11.7~16.7	5.9~2.4	17.1±2.5	第四纪	13.3~0	0.9
测年方法	K-Ar	K-Ar	K-Ar	K-Ar	C14	K-Ar/Ar-Ar	K-Ar
资料来源	李兆麟等,1991及 本次研究	朱炳泉和王慧 芳,1989	贾大成等, 2003	邹和平等, 1995	李昌年等,2005	Hoang et al, 1996	Zhou and Mukasa,1997

区进行总结和探讨，玄武岩Sr,Nd,Pb同位素数据列于表2中，并编制了同位素比值变异图（图4）。

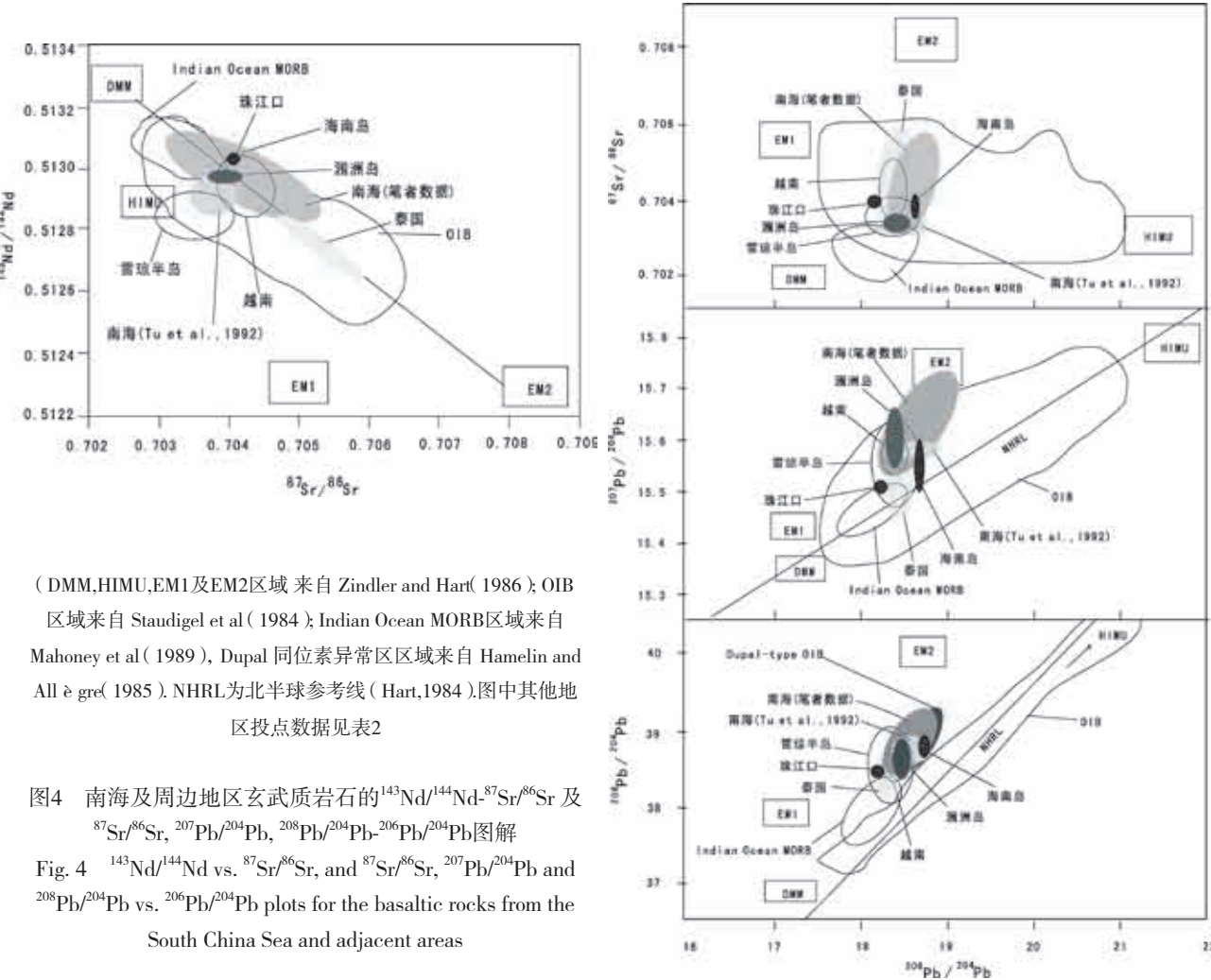
2.2.1 南海地区

作者在执行调查项目过程中，获得了从南海南大陆坡至北大陆坡的大量碱性玄武岩样品，因此这么多数量的样品足以代表南海新生代碱性玄

武岩的特点。玄武岩的K-Ar年龄表明其为中新世以来喷发的产物，笔者对本区玄武岩中的钛质单斜辉石斑晶研究结果表明，本区碱性玄武岩源自上地幔软流圈，与李兆麟等（1991）研究结果一致。南海玄武质岩石的主微量元素地球化学特征表明，本区玄武岩具有OIB型玄武岩特点（Niu

表2 南海及周边地区新生代玄武岩同位素数据  
Table 2 Isotopic data for Cenozoic basalts from the South China Sea and adjacent areas

地 区	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd	<sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	<sup>207</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	<sup>208</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	资料来源
南海	0.70342~0.70517	0.51266~0.51297	18.372~18.807	15.534~15.718	38.443~39.240	本次研究
	0.70394~0.70435	0.51281~0.51291	18.411~18.875	15.567~15.593	38.55~38.93	Tu et al,1992
雷琼半岛	0.70310~0.70400	0.51274~0.51293	18.141~18.685	15.466~15.638	38.100~39.051	朱炳泉和王慧芳, 1989
海南岛	0.70354~0.70417	0.51287~0.51290	18.615~18.661	15.506~15.607	38.64~38.89	张明等,1992
珠江口	0.704	0.513	18.078	15.555	38.561	邹和平等,1995
广西涠洲岛	0.70352~0.70395	0.51291~0.51287	18.35~18.49	15.546~15.659	38.369~38.864	李昌年等,2005
越南	0.70356~0.70431	0.51283~0.51303	18.23~18.48	15.53~15.61	38.3~38.7	Hoang et al, 1996
泰国	0.70354~0.70573	0.51268~0.51295	18.239~18.535	15.448~15.584	38.107~38.630	Zhou和Mukasa,1997



(DMM,HIMU,EM1及EM2区域 来自 Zindler and Hart( 1986 ); OIB 区域来自 Staudigel et al ( 1984 ); Indian Ocean MORB区域来自 Mahoney et al ( 1989 ), Dupal 同位素异常区区域来自 Hamelin and All è gre( 1985 ). NHRL为北半球参考线 ( Hart,1984 ).图中其他地区投点数据见表2

图4 南海及周边地区玄武质岩石的<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd-<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 及 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr, <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb, <sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb-<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb图解  
Fig. 4 <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd vs. <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr, and <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr, <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb and <sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb vs. <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb plots for the basaltic rocks from the South China Sea and adjacent areas

and O’Hara, 2003; Niu, 2005 ), 岩浆在源区或上升期间经历少量的部分熔融作用, 并伴有结晶分异现象, 个别样品在喷出海底之后可能受到了海水蚀变作用的影响。同位素地球化学揭示源区存在不均一性, 岩石源区可能有两个, 一个为中等亏损的似印度洋MORB型的软流圈地幔, 另一个

为具EM2特征的源区, 且南海底新生代碱性玄武岩源区类似于印度洋DUPAL异常区 ( Hart, 1984; Castillo,1998 ) ( 图4 ), 与Tu et al ( 1992 ) 的研究结论基本一致。  
2.2.2 雷琼地区  
Tu et al ( 1991 ), Flower et al ( 1992 ) 和张明等

(1992)对海南岛北部的新生代玄武岩研究指出,海南玄武岩类似于Dupal型洋岛玄武岩(图4),反映了EM2与NMORB地幔源区之间的混合,并进一步指出EM2源于大陆底岩石圈或者软流圈容库,受到地壳伸展前的俯冲作用的富集。朱炳泉和王慧芳(1989)通过Nd-Sr-Pb同位素研究指出雷琼地区地幔特征相近于南海地幔,是中国大陆最亏损的地幔区域,也与全球最亏损的大陆地幔端元相一致。同位素与岩石化学资料表明该区地幔源具有MORB与OIB的过渡特征,同时受到古俯冲带物质加入的影响。以上研究表明雷琼地区喷发的玄武岩可能受到了来自深部地幔柱(?)物质的影响,从而使得由玄武质熔岩所揭示出来的源区变得复杂。

### 2.2.3 华南大陆南缘

邹和平等(1995)研究指出,珠江口盆地的新生代玄武岩Pb同位素组成具有DUPAL异常特征,并指出岩石圈底层剥落或层离作用可能是南海北部新生代陆缘扩张的一种重要的动力学机制。贾大成等(2003)研究指出北部湾地区玄武岩具有OIB型微量元素配分模式,形成于较均一的地幔源区,具有以EM2型地幔端元为主、混有HIMU和EM1型端元的地幔源区性质,反映其岩浆活动起源于亏损的但可能受到地幔交代作用富集的地幔源区(图4)。李昌年等(2005)研究指出,广西北海涠洲岛地区深部存在一个从属于南海盆地地幔热柱的地幔亚热柱,该亚热柱的中心应位于涠洲岛。并进一步指出,在尾柱的中央,原有的大陆边缘岩石圈因伸展强烈而导致破裂,使该地幔热柱在局部位置不能发生与岩石圈底界的相互作用而直接构成软流圈或地幔热柱的窗口。以上证据与华南大陆自晚白垩世以来一直处于伸展的区域构造背景是一致的。

### 2.2.4 中南半岛地区

Hoang and Flower(1998)指出,越南境内溢流玄武岩是富EM1软流圈同减薄的欧亚岩石圈相互作用的结果,本区新生代玄武岩在上升期间受到了地壳混染(Koszowska et al, 2006)。Zhou and Mukasa(1997)指出泰国境内的新生代玄武岩存在两个源区,一个是中等亏损的印度洋似MORB同位素特征,源于软流圈地幔,并受到大陆岩石圈地幔的极其轻微的混染;另一个是似EM2特征,源

于岩石圈地幔,是高放射性Sr、Pb与非放射性Nd物质之间混合作用的产物(图4)。研究表明,喷发于大陆地壳的新生代碱性玄武岩源区可以受到有别于大洋岩石圈的大陆岩石圈地幔的影响。

以上有关南海及周边地区新生代玄武岩的岩石学和地球化学研究表明,本区存在一个潜在的“大火成岩省”(LIP),玄武岩地球化学特征显示板内OIB型特点(Niu and O'Hara, 2003; Niu, 2005),其主要形成于地幔柱或地幔热点的构造环境,在大陆地区出现的碱性玄武岩受到了大陆岩石圈的轻微混染,而在洋盆中只表现为MORB与EM2的两个源区的混合,并具有类似于DUPAL的同位素特点(图4)。本区地幔柱的主要物质源区可能是大约200 Ma之前与华北碰撞后大陆岩石圈俯冲并停滞在过渡带至今(Lebedev and Nolet, 2003)。

## 2.3 南海地幔潜在温度

地幔温度是对地幔柱假说进行检验的一个重要方面,橄榄石-流体之间的平衡提供了一个估计地幔温度的重要方式(Putirka, 2005; Putirka et al, 2007)。地幔潜在温度( $t_p$ )是指地幔在未减压和未熔融的前提下上升到地表过程的假设温度(Putirka, 2005),根据Putirka(2005)的方法,笔者利用南海新生代碱性玄武岩中的橄榄石斑晶推算出了本文所计算的地幔潜在温度平均为1 661℃,位于夏威夷( $t_p=1\ 688^\circ\text{C}$ )与冰岛热点( $t_p=1\ 637^\circ\text{C}$ )之间(Putirka, 2005)。虽然由于取样难度大的原因而未获得南海扩张中心及其附近的洋中脊玄武岩的样品,但与正常洋中脊系统下的地幔潜在温度相比,南海地幔潜在温度明显偏高,其平均差值( $\Delta T_p$ )约为200℃,此值也位于夏威夷和冰岛与正常洋中脊系统地幔潜在温度的平均差值(分别为213℃和162~184℃);(Putirka, 2005)之间,类似于由地幔热上涌的地球动力学模型所要求的估计值150~300℃(Sleep, 1990; Ruedas et al, 2004),为地幔柱提供了强有力的证据(另文详细讨论)。

此外,李思田等(1998)对南海北缘的盆地研究指出本区可能存在地幔柱;夏斌等(2005)的数值模拟实验表明板块碰撞与地幔上涌的综合作用最有利于南海的扩张,但未指出地幔上涌为主动上涌还是被动上涌。



### 3 南海形成演化

南海位于菲律宾板块、欧亚板块和印-澳板块三者的接壤部位,地质现象复杂,南海的形成经历了一系列的地质事件,如裂谷作用、地壳薄化和海底扩张。南海是研究岩浆作用、岩石圈伸展和地幔动力学之间联系的优良天然实验室(Briaies et al, 1993; Taylor and Hayers, 1983; 李思田等, 1998)。

#### 3.1 前人有关南海形成演化模式

截止目前,关于南海的成因观点较多。张训华等(1997)和谢建华等(2005)分别总结了前人关于南海形成演化的主要研究成果。按南海形成演化的动力源不同,主要包括以下几种代表性模式:(1)碰撞挤出模式(Karig, 1971),此模式的动力源是印度洋板块与欧亚板块的碰撞;(2)弧后扩张模式(Tapponnier, 1986),此模式的动力源是太平洋板块向欧亚板块的俯冲;(3)洋中脊扩张模式(Taylor and Hayes, 1980, 1982; Briaies et al, 1993),动力源为岩石圈伸展减薄后的软流圈物质上涌;(4)地幔柱模式(黄福林, 1986; 李思田等, 1998),动力源为多分枝的地幔柱上升及其引起的局部对流和向东及向南东的侧向地幔流;(5)陆缘扩张模式(陈国达, 1988),其深部过程的动力源类似于模式(4)。一个模式的正确与否,重要指标之一是此模式是否能合理解释大多数的地表地质现象,而以上每个模式在解释南海地区地质现象过程中都存在一定的缺陷。

#### 3.2 地幔柱与洋中脊(扩张中心)相互作用

地幔柱与洋中脊的相互作用是地幔柱与板块构造这两大动力系统之间的联系纽带<sup>①</sup>。在全球三大洋中都存在有洋中脊(扩张中心)-地幔柱热点相互作用的例子(鄢全树和石学法, 2006),典型的例子如太平洋洋中的Juan de Fuca脊和Cobb热点,大西洋中的Iceland热点和MAR以及印度洋东南脊中的Kerguelen热点和SEIR。在这些典型例子中,那些脊旁热点与洋中脊之间的过渡区域出露的玄武岩显示了OIB与MORB之间的过渡类型,而脊上玄武岩也显示了热点的某些特点,这反映洋中脊玄武岩受到

了无论位于轴旁还是轴上的热点的影响,总之,两者之间的相互作用地表表现形式为地球化学异常、抬升的洋脊地形、重力负异常、洋脊不对称扩张(Müller et al, 1998)、离轴火山特征以及洋脊重新就位事件。两者之间相互作用的强度差异可能与洋脊扩张速率等因素有关。海南地幔柱与南海扩张中心之间是否存在相互作用,关键在于两者的相互作用是否能很好地揭露南海的形成演化规律及其解释在地表所出现的地质现象。

#### 3.3 南海形成演化模型

基于以上分析,作者认为在构造背景相对复杂的南海地区,地幔柱对南海的形成演化起着重要的作用,为此我们建立了一个新的南海形成演化模型(图5):

(1) 50~32 Ma, 印度洋板块-欧亚板块碰撞及其所导致的太平洋板块后退的综合效应启动了南海的扩张(32 Ma; Briaies et al, 1993),此伸展环境为地幔柱物质的上升提供了通道。中-晚始新世,太平洋板块的运动方向从NNW转变为NWW(转变的准确年龄来自夏威夷-皇帝海岭的弯曲顶点处火山岩定年结果,最近的结果显示为50 Ma(Sharp and Clague, 2006)),与此同时,印度板块与欧亚板块碰撞,使东亚大陆向东和东南蠕散。在这个区域构造背景下,南海地区软流圈上涌,已经在燕山晚期构造域体制发生转变过程中发生大规模减薄的地壳进一步减薄。此区域构造环境可能诱发了全地幔对流框架下的柱状体的上升。同时,地幔柱可能对第三系裂陷盆地的形成有着重要影响(李思田等, 1998)。

(2) 32~21 Ma, 南海的扩张活动主要发生在西北海盆和东部亚盆(Briaies et al, 1993)。当地幔柱柱头到达岩石圈底部时通过侧向物质流开始同地壳薄弱区(如中特提斯时期的古缝合线或张性岩石圈断裂等)发生相互作用,促进了南海的扩张,扩张轴方位为近EW向。这种作用类似于模拟实验中的洋脊(扩张中心)与脊旁热点之间的相互作用(Kincaid et al, 1995),地幔柱物质主要沿着倾斜的流变学边界层(Sloping RBL)向扩张中心迁移,同时地幔柱头的高热量熔蚀其上的软流圈,

<sup>①</sup>鄢全树, 石学法. 2005. 全国岩石学和地球动力学研讨会论文集(杭州). 91-92.

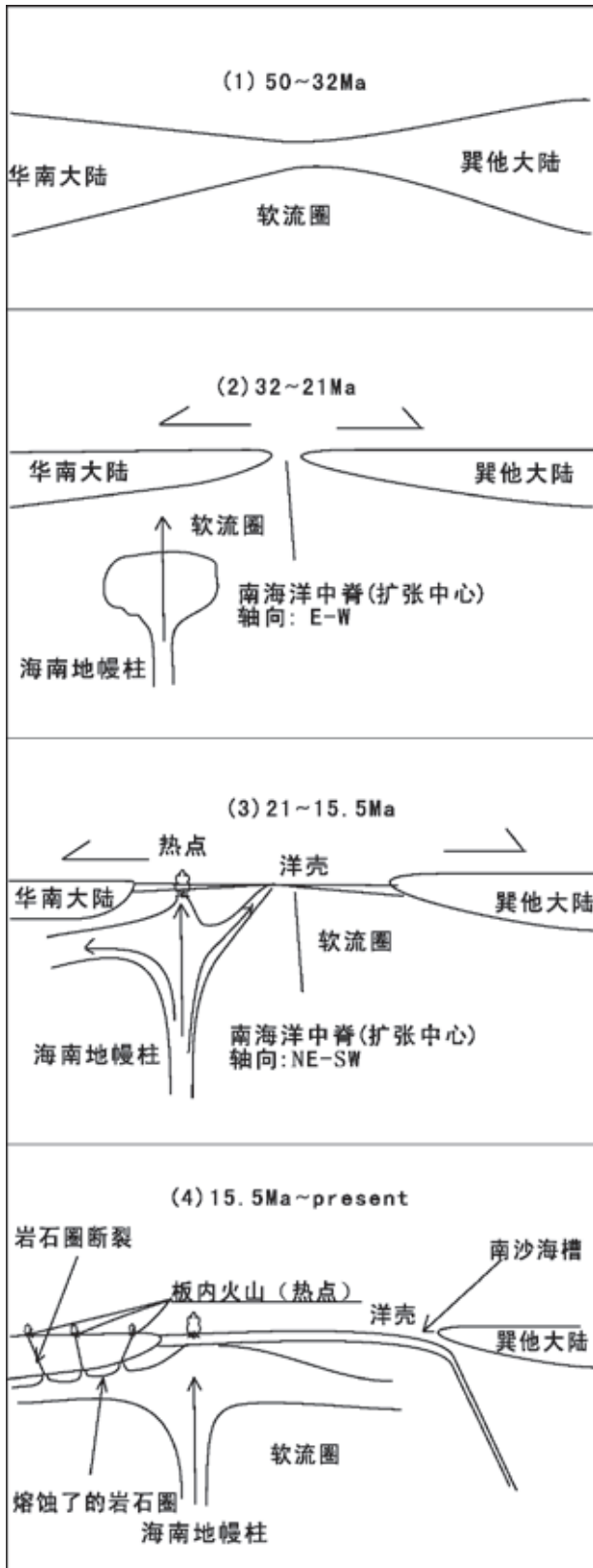


图5 南海形成演化简化模型

Fig.5 Simplified model of formation and evolution of the South China Sea

使得岩石圈进一步减薄,被熔蚀的岩石圈物质加入地幔柱向扩张中心迁移的物质流,从而复杂化了扩张中心附近的早期喷发的熔岩的地球化学特征。在本阶段的26~24 Ma期间发生了第一次洋脊跳跃 (Briais et al, 1993),使扩张中心从原来的18°N附近(即现今西北海盆的中心)调整到15.5°N附近(即现今的东部亚盆),扩张轴方位为近EW向。地幔柱物质最早到达地表的年龄可能为22.9Ma(已知南海底玄武岩的最老年龄(李兆麟等,1991)),在岩性上更富Si,可能为地幔柱与岩石圈地幔相互作用的强度大有关,导致地幔柱头物质同DMM发生一定程度的混染并在岩性上表现为碱度相对低的橄榄拉斑玄武岩。

(3) 21~15.5 Ma,随着地幔柱效应的逐渐增强,热点-洋脊相互作用越来越强烈,且在大约21 Ma发生了洋脊的再次重新就位事件(Pautot et al, 1986),扩张轴方位从EW向转变为NE—SW向,诱发了西南海盆的扩张,在地表可能表现为西沙—中沙微陆块与南沙微陆块之间古缝合线的重新活化。

(4) 由于印澳板块前缘与巽他大陆碰撞,使得南海在大约15.5 Ma (Briais et al, 1993) 停止扩张,自32 Ma以来形成的南海洋壳开始沿着南沙海槽及吕宋海沟向菲律宾岛弧及巴拉望地块之下俯冲,而南海热点继续活动,受其影响,在西沙海槽处表现为一个正在进行裂解或活化的伸展大地构造现象(Wissmann et al, 1996),且至第四纪时,地表还有碱性玄武岩喷出(李昌年等,2005)。而上新世碱性玄武岩的分布面积不大及其分布样式,可能是因为各大板块的碰撞加厚了本地区软流圈或岩石圈的厚度、且地幔柱的大部分能量消耗在了与软流圈或岩石圈的相互作用上并只能沿着先期深大断裂(地壳断裂或岩石圈)向上运移至地表所致。

虽然李兆麟等(1991)在文中指出,南海盆中的玄武岩形成年龄由北向南逐渐变新,由于周围几大板块运动方向的相对复杂性,因此并不能识别出明显的热点轨迹。总体上,洋盆的年龄老于海南岛及北部湾地区,表明华南大陆的整体向南或东南方向运移状况。华南大陆的向南或东南方向运移与海南地幔柱热点作用的双重效应可能是导致南海扩张不对称的原因。



当然, 此模型的正确与否还需要南海深海盆内的洋壳处的玄武岩地球化学和年代学的资料作佐证。

## 4 结语

在西太平洋众多的边缘海盆中, 由于各自所处的构造环境的差异, 因此不能一概而论地讨论它们形成演化的模型, 而应该在区域大地构造尺度上, 从各自的具体情况出发, 深入研究各个边缘海盆形成演化, 然后综合对比其共同点和差异, 以充分了解西太平洋边缘海盆形成演化的原因。南海是西太平洋最大的边缘海盆之一, 远离西太平洋俯冲带, 构造环境复杂, 本文综合了已有的地球物理学、岩石学及数值模拟资料, 探讨了本区的大地构造环境, 建立了一个新的南海形成演化模型, 该模型反映了浅部过程(即岩石圈尺度之上的板块构造学说)与深部过程(地幔柱假说)的相互结合, 能合理解释地表出现的地质现象, 同时表明本区是研究板块构造与地幔柱假说之间相互联系的理想地区。然而, 目前取样工作的难度较大, 还需要进一步的研究工作来对作者建立的模型进行佐证, 比如南海底的海南岛地幔柱与南海扩张中心之间的精细的岩石学取样和研究, 以及地幔柱上升通量及地幔柱与软流圈/岩石圈地幔作用(Storey et al, 1988; 肖龙等, 2003)的强度和方式等。此外, 海南地幔柱活动的地质效应, 除影响着南海的形成演化外, 对南海北缘、西缘盆地的油气资源富集和烃类的快速产生起着重要作用。因此, 对海南地幔柱的研究不仅有助于我们理解南海地区的地球动力学特征, 还有着潜在的经济利益。

## 参考文献 [References]:

Anderson D L. **2005**. Scoring hotspots: The plume and plate paradigms. In: Foulger G R, Natland J H, Presnall D C, et al eds. *Plates, Plumes, and Paradigms: Geological Society of America Special*, 388, 31–54.

Briaux A, Patriat P, Tapponnier P. **1993**. 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*, 98 (B4): 6 299–6 328.

Braitenberg C, Wienecke S, Wang Y. **2006**. Basement structures from satellite-derived gravity field: South China Sea Ridge, *Journal of*

*Geophysical Research*, 111, B05407, doi:10.1029/2005JB003938.

Castillo P. **1998**. The Dupal anomaly as a trace of the upwelling lower mantle. *Nature*, 336: 667–670.

陈国达. 1988. 中国东部后地台造山带新生代盆地成因—解. 大地构造与成矿学, 12 (1): 1–5.

[Chen Guoda. **1988**. An explanation on the formation cause of the Cenozoic basins in the post-platform orogenic belts of East China. *Geotectonica et Metallogenia*, 12(1): 1–5. (in Chinese with English abstract)]

Clift P, Lin J. **2001**. Preferential mantle lithospheric extension under the South China margin. *Marine and Petroleum Geology*, 18: 929–945.

Clift P, Lin J, Barchhausen U. **2002**. Evidence of low flexural rigidity and low viscosity lower continental crust during continental break-up in the South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 19: 951–970.

Davies G F. **2005**. A case for mantle plumes. *Chinese Science Bulletin*, 50: 1541–1554.

Flower F J, Zhang M, Chen C Y, et al. **1992**. Magmatism in the South China Basin 2. Post-spreading Quaternary basalts from Hainan Island, south China. *Chemical geology*, 97(1–2): 65–87.

Hamelin B, Allègre C J. **1985**. Large scale regional units in the depleted upper mantle revealed by an isotopic study of the south-west Indian ridge. *Nature*, 315: 196–198.

Hart S R. **1984**. A large-scale isotope anomaly in the southern hemisphere mantle. *Nature*, 309: 753–757.

Hoang N, Flower M, Carlson R W. **1996**. Major, trace element, and isotopic compositions of Vietnamese basalts: interaction of hydrous EM1-rich asthenosphere with thinned Eurasian lithosphere. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(22): 4329–4351.

Hoang N, Flower M. **1998**. Petrogenesis of Cenozoic basalts from Vietnam: implication for origins of a ‘Diffuse Igneous Province’. *Journal of Petrology*, 39(3): 369–395.

黄福林. 1986. 论南海的地壳结构及深部过程. 海洋地质与第四纪地质, 6(1): 31–40.

[Huang Fulin. **1986**. Study on the crustal structure and deep processes of the South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 6(1): 31–40. (in Chinese with English abstract)]

贾大成, 丘学林, 胡瑞忠, 等. 2003. 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. 热带海洋学报, 22(2): 30–39.

[Jia Dacheng, Qiu Xuelin, Hu Ruizhong, et al. **2003**. Geochemical nature of mantle reservoirs and tectonic setting of basalts in Beibu Gulf and its adjacent region. *Journal of Tropical Oceanography*, 22(2): 30–39. (in Chinese with English abstract)]

Karason H, van der Hilst R. **2000**. Constraints on mantle convection from seismic tomography. *Geophys. Monogr.*, 121: 277–288.

Karig D E. **1971**. Origin and development of marginal basin in the western Pacific. *Journal of Geophysical Research*, 76: 2543–2561.

Kincaid C, Ito G, Gable C. **1995**. Laboratory investigation of the interaction of off-axis mantle plumes and spreading centers. *Nature*, 376: 758–761.

Koszowska E, Wolska A, Zuchiewicz W, et al. **2005**. Crustal contamination of Late Neogene basalts in the Dien Bien Phu Basin, NW Vietnam: Some insights from petrological and geochronological studies. *Journal of Asian Earth Sciences*, doi: 10.1016/j.jseas.2005.12.003.

- Lebedev S, Chevrot S, Nolet G, et al. **2000**. New seismic evidence for a deep mantle origin of the S. China basalts (the Hainan Plume?) and other observations in SE Asia. *Eos Trans. AGU*, 81 (48), Fall Meeting Supplement.
- Lebedev S, Nolet G. **2003**. Upper mantle beneath Southeast Asia from S velocity tomography. *Journal of Geophysical Research*, 108(B1), 2048, doi:10.1029/2000JB000073.
- 李昌年, 王方正, 钟称生. 2005. 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. *岩石矿物学杂志*, 24(1):1-11.
- [Li Changnian, Wang Fangzheng, Zhong Chensheng. **2005**. Geochemistry of Quaternary basaltic volcanic rocks of Weizhou island in Beihai City of Guangxi and a discussion on characteristics of their source. *Acta Petrologia et Mineralogia*, 24(1): 1-11. (in Chinese with English abstract)]
- 李思田, 林畅松, 张启明, 等. 1998. 南海北部大陆边缘盆地幕式裂陷的动力过程及10 Ma 以来的构造事件. *科学通报*, 43 (8): 797-810.
- [Li Sitian, Lin Changsong, Zhang Qiming, et al. **1998**. Dynamic process of episodic rifting in continental marginal basin and tectonic events since 10 Ma in South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 43(8): 797-810. (in Chinese)]
- 李兆麟, 丘志力, 秦社彩, 等. 1991. 南海海山玄武岩形成条件研究. *矿物学报*, 11(4):325-334.
- [Li Zhaolin, Qiu Zhili, Qin Shecai, et al. **1991**. Study on formation conditions for seamount basalts in the South China Sea. *Acta Mineralogica Sinica*, 11(4): 325-334. (in Chinese with English abstract)]
- Ludmann T, Wong H K. **1999**. Neotectonic regime on the passive continental margin of the northern South China Sea. *Tectonophysics*, 311: 245-253.
- Mahoney J J, Natland J H, White W M, et al. **1989**. Isotopic and geochemical provinces of western Indian Ocean spreading centers. *Journal of Geophysical Research*, 94: 4033-4052.
- Maruyama S. **1994**. Plume tectonics. *Jour. Geol. Soc. Japan*, 100(1): 24-29.
- Montelli R, Nolet G, Dahlen F A. **2005**. Deep plumes in the mantle: geometry and dynamics. *EGU, Geophysical Research Abstracts*, 7: 02473.
- Montelli R, Nolet G, Dahlen F A, et al. **2006**. A catalogue of deep mantle plumes: New results from finite frequency tomography. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 7, Q11007, doi:10.1029/2006GC001248.
- Müller R D, Roest W R, Royer J Y. **1998**. Asymmetric sea-floor spreading caused by ridge-plume interactions. *Nature*, 396: 455-459.
- Niu Y L, O'Hara M J. **2003**. Origin of ocean island basalts: A new perspective from petrology, geochemistry, and mineral physics considerations. *Journal of Geophysical Research*, 108(B4), 2209, doi:10.1029/2002JB002048.
- Niu Y L. **2005**. Generation and evolution of basaltic magmas: some basic concepts and a new view on the origin of Mesozoic-Cenozoic basaltic volcanism in eastern China. *Geological Journal of China Universities*, 11(1):9-46.
- Nolet G, Karato S I, Montelli R. **2006**. Plume fluxes from seismic tomography. *Earth and Planetary Science Letters*, 248, 685-699.
- Nolet G, Allen R, Zhao D P. **2007**. Mantle plume tomography. *Chemical Geology*, (in press).
- Pautot G, Rantin C, Briais A, et al. **1986**. Spreading direction in the South China Sea. *Nature*, 321:151-154.
- Putirka K D. **2005**. Mantle potential temperatures at Hawaii, Iceland, and the mid-ocean ridge system, as inferred from olivine phenocrysts: Evidence for thermally driven mantle plumes. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 6, Q05L08, doi:10.1029/2005GC000915.
- Putirka K D, Perfit M, Ryerson FJ, et al. **2007**. Ambient and excess mantle temperatures, olivine thermometry, and active vs. passive upwelling. *Chemical Geology*, (in press).
- Qiu X L, Ye S Y, Wu S M, et al. **2001**. Crustal structure across the Xisha Trough, northwestern South China Sea. *Tectonophysics*, 341:179-193.
- 任建业, 李思田. 2000. 西太平洋边缘海盆地的扩张过程和动力学背景. *地学前缘*, 7(3):203-213.
- [Ren Jianye, Li Sitian. **2000**. Spreading and dynamic setting of marginal basins of the western pacific. *Earth Science Frontiers*, 7(3): 203-213. (in Chinese with English abstract)]
- Ren J Y, Tamaki K, Li S T, et al. **2002**. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas. *Tectonophysics*, 344: 175-205.
- Ruedas T, Schmeling H, Marquart G, et al. **2004**. Temperature and melting of a ridge-centred plume with application to Iceland. Part I: Dynamics and crust production. *Geophys. J. Int.*, 158:729-743.
- Schluter H U, Hinz K, Block M. **1996**. Tectono-stratigraphic terranes and detachment faulting of the South China Sea and Sulu Sea. *Marine Geology*, 130: 39-78.
- Sharp W D, Clague D A. **2006**. 50Ma initiation of Hawaiian-Emperor Bend records major change in Pacific Plate Motion. *Nature*, 313: 1281-1284.
- Shi X B, Qiu X L, Xia KY, et al. **2003**. Characteristics of surface heat flow in the South China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22: 265-277.
- Sleep N H. **1990**. Hotspots and mantle plumes: Some phenomenology. *Journal of Geophysical Research*, 95: 6715-6736.
- Staudigel P, Zindler A, Hart S R, et al. **1984**. The isotope systematics of a juvenile intra-plate volcano: Pb, Nd and Sr isotope ratios of basalts from Loihi Seamount, Hawaii. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 69:13-29.
- Storey M, Saunders AD, Tarney J, et al. **1988**. Geochemical evidence for plume-mantle interactions beneath Kerguelen and Heard Islands, Indian Ocean. *Nature*, 336: 371-374.
- Tapponnier P. **1986**. On the mechanics of the collision between India and Asia. *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 19: 115-157.
- Taylor B, Hayers D E. **1980**. The tectonic evolution of the South China Sea. In : Hayers D E, ed. The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands. 1. Am. Geophys. Union, Washington, D C, 89-104.
- Taylor B, Hayers D E. **1983**. The tectonic evolution of the South China Sea. In: Hayers D E ed. The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands. 1. Am. Geophys. Union, Washington, D C, 23-56.
- Tu K, Flower M F, Zhang M. **1991**. Sr, Nd, and Pb isotopic compositions of Hainan basalts (south China): Implications for a subcontinental lithosphere Dupal source. *Geology*, 19(6): 567-569.
- Tu K, Flower F J, Carlson R W, et al. **1992**. Magmatism in the South China Basin 1. Isotopic and trace-element evidence for an endogenous Dupal mantle component. *Chemical Geology*, 97(1-2): 47-63.

- 万玲,姚伯初,吴能友,等. 2005. 南海西部海域新生代地质构造. 海洋地质与第四纪地质, 25(2):45-52.
- [Wan Ling, Yao Bochu, Wu Nengyou, et al. 2005. Cenozoic geological characteristics in the west of the South China Sea, *Marine Geology & Quaternary Geology*, 25(2): 45-52. (in Chinese with English abstract)]
- Wang P L, Lo C H, Chung S L, et al. 2000. Onset timing of left-lateral movement along the Ailao Shan Red River Shear Zone:  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating constraint from the Nam Dinh Area, northeastern Vietnam. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(3): 281-292.
- Wei B Z, Chung W Y. 1995. Strike-slip faulting on the northern margin of the South China Sea: evidence from two earthquakes offshore of Hainan Island, China, in December 1969. *Tectonophysics*, 241: 55-66.
- Wissmann, G, Kudrass H, Hinz K. 1996. Continuing rifting on the south China margin. *Geowissenschaften*, 16(7-8): 310-312.
- 夏斌,崔学军,张宴华,等. 2005. 南海扩张的动力学因素及其数值模拟讨论. 大地构造与成矿学, 29(3):328-333.
- [Xia Bin, Cui Xuejun, Zhang Yanhua. 2005. Dynamic factors for the opening of South China Sea and a numerical modeling discussion. *Geotectonica et Metallogenia*, 29(3): 328-333. (in Chinese with English abstract)]
- Xia K Y, Huang C L, Jiang S R, et al. 1994. Comparison of the tectonics and geophysics of the major structural belts between the northern and southern continental margins of the South China Sea. *Tectonophysics*, 235(1-2): 99-116.
- 肖龙, 徐义刚, 何斌. 2003. 峨眉地幔柱-岩石圈的相互作用来自低钛和高钛玄武岩的Sr-Nd和O同位素证据. 高校地质学报, 9(2):207-217.
- [Xiao Long, Xu Yigang, He Bin. 2003. Emei mantle plume - subcontinental lithosphere Interaction: Sr-Nd and O isotopic evidences from low-Ti and high-Ti basalts. *Geological Journal of China Universities*, 9(2):207-217. (in Chinese with English abstract)]
- 谢建华,夏斌,张宴华,等. 2005. 南海形成演化探究. 海洋科学进展, 23(2):212-218.
- [Xie Jianhua, Xia Bin, Zhang Yanhua, et al. 2005. Study on formation and evolution of the South China Sea. *Advances in Marine Science*, 23(2): 212-218. (in Chinese with English abstract)]
- Yan P, Zhou D, Liu Z S. 2001. A crustal structure profile across the northern continental margin of the South China Sea. *Tectonophysics*, 338: 1-21.
- 鄢全树,石学法. 2006. 洋中脊与地幔柱热点相互作用研究进展. 海洋地质与第四纪地质, 26(5):131-138.
- [Yan Quanshu, Shi Xuefa. 2006. Ridge-plume (hotspot) interaction. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 26(5): 131-138. (in Chinese with English abstract)]
- 姚伯初,万玲,吴能友. 2005. 南海新生代构造演化及岩石圈三维结构特征. 地质通报, 24(1):1-8.
- [Yao Bochu, Wan Ling, Wu Nengyou. 2005. Cenozoic tectonic evolution and the 3D structure of the lithosphere of the South China Sea. *Geological Bulletin of China*, 24(1): 1-8. (in Chinese with English abstract)]
- 曾维军,李振五,吴能友,等. 1997. 南海区域的上地幔活动特征及印支地幔柱. 南海地质研究, 9:1-19.
- [Zeng Weijun, Li Zhenwu, Wu Nengyou, et al. 1997. The upper mantle activation of South China Sea and the Indosinian mantle plume. *Geological Research of South China Sea*, 9:1-19. (in Chinese with English abstract)]
- 张健,汪集杨. 2000. 南海北部陆缘带构造扩张的深部地球动力学特征. 中国科学(D辑), 30(6):563-569.
- [Zhang Jian, Wang Jiyang. 2000. Geodynamical characteristics of deep-part of spreading in northern continental margin of the South China Sea. *Science in China (Series D)*, 30(6): 563-569. (in Chinese)]
- 张明,涂勘,解广轰,等. 1992. 海南岛新生代玄武岩微量元素和同位素地球化学. 见:刘若新主编. 中国新生代火山岩年代学与地球化学. 北京:地震出版社,246-268.
- [Zhang Ming, Tu Kan, Xie Guanghong, et al. 1992. Trace element and isotope geochemistry of Cenozoic basalts from Hainan island, In: Liu Ruoxin. *Geochronology and Geochemistry of Cenozoic Volcanic Rocks in China*. Beijing: Seismological Publishing House, 246-268. (in Chinese)]
- 张训华,李延成,蔡振华,等. 1997. 南海海盆形成演化模式初探. 海洋地质与第四纪地质, 17(2):1-7.
- [Zhang Xunhua, Li Yancheng, Qi Zhenhua. 1997. An approach to the formation and evolution model of South China Sea basin, *Marine Geology & Quaternary Geology*, 17(2):1-7. (in Chinese with English abstract)]
- 赵海玲,狄永军,刘振文,等. 2004. 东南沿海地区新生代火山作用和地幔柱. 地质学报, 78(6):781-788.
- [Zhao Hailing, Di Yongjun, Liu Zhenwen, et al. 2004. Cenozoic volcanism and mantle plume along southeast coast of China. *Acta Geologica Sinica*, 78(6): 781-788. (in Chinese with English abstract)]
- Zhou D, Ru K, Chen H Z. 1995. Kinematics of Cenozoic extension on the South China Sea continental margin and its implications for the tectonic evolution of the region. *Tectonophysics*, 251: 161-177.
- Zhou P B, Mukasa S B. 1997. Nb-Sr-Pb isotopic, and major- and trace-element geochemistry of Cenozoic lavas from the Khorat Plateau, Thailand: sources and petrogenesis. *Chemical Geology*, 137: 175-193.
- 朱炳泉,王慧芳. 1989. 雷琼地区MORB-OIB过渡型地幔源火山作用的Nd-Sr-Pb同位素证据. 地球化学, 3:193-201.
- [Zhu Bingquan, Wang Huifang. 1989. Nd-Sr-Pb isotopic evidence for MORB-OIB transitional type mantle-source volcanism in Leiqiong region. *Geochimica*, 3: 193-201. (in Chinese with English abstract)]
- Zhu B Q, Wang H F, Chen Y W, et al. 2004. Geochronological and geochemical constraint on the Cenozoic extension of Cathaysian lithosphere and tectonic evolution of the border sea basins in East Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 163-175.
- Zindler A, Hart S R. 1986. Chemical geodynamics. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci. Lett.*, 14: 493-571.
- 邹和平,李平鲁,饶春涛. 1995. 珠江口盆地新生代火山岩地球化学特征及其地球动力学意义. 地球化学, 24(增): 33-45.
- [Zou Heping, Li Pinglu, Rao Chuntao. 1995. Geochemistry of Cenozoic volcanic rocks in Zhujiangkou Basin and its geodynamic significance. *Geochimica*, 24(suppl.): 33-45. (in Chinese with English abstract)]



# Hainan Mantle Plume and the Formation and Evolution of the South China Sea

YAN Quan-shu<sup>1,2</sup> and SHI Xue-fa<sup>1</sup>

(1. Key Lab of Marine Sedimentary and Environment Geology, The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China;

2. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China )

**Abstract:** Seismic tomographic images obtained from the mantle under the southeast Asia region indicate there may exist a mantle plume beneath and around the Hainan island. A sub-vertical low-velocity column is imaged beneath the Hainan and the South China Sea, and extends from shallow depths to 660-km seismic discontinuity (i.e., the interface between upper mantle and lower mantle), and continuously to a depth of 1900 km. There is a large quantity of Cenozoic alkali basalts distributed in the South China Sea and its adjacent areas which include Leiqiong Peninsula, Hainan Island, Beibuwan Basin, Weizhou Island in Guangxi province and Indochina block. The geochemical data for these basalts show the characteristics of OIB-type basalt and DUPAL-like isotopic anomaly, and imply its deep-seated origin. In addition, the average value of  $T_p$  (mantle potential temperature) for the South China Sea inferred from olivine-fluid equilibrium, is 1661 °C, which is higher than that of MORB and lies between the corresponding values of Hawaii hotspot and Iceland hotspot. Based on evidences mentioned above, combined with numerical model experimental data, it shows that there does exist a mantle plume beneath the Hainan Island and adjacent areas. Until recently, scholars have developed many models about the formation and evolution of the South China Sea, and the debating issue is the geodynamic source. We suggest that the Hainan plume may be a significant geodynamical source for the formation and evolution of the South China Sea. Here the Hainan plume is introduced into our preliminary model about the formation and evolution of the South China Sea. The model is as follows: (1) 50–32 Ma, Integrated effects of collision between the Indian Ocean plate and Euro-Asian plate resulted in retrogression of Pacific plate, created an extensional tectonic setting, and provided a channel for ascent of the mantle plume; (2) 32–21 Ma. When the head of mantle plume arrived at asthenosphere, it immediately interacted with the spreading center of the South China Sea by lateral material flow, which enhanced spreading speed. During 26–24 Ma, there took place a ridge jump, which adjusted the spreading center from nearby 18° N (i.e., present-day center of NW sub-basin) to nearby 15.5° N (i.e., present-day center of East sub-basin); (3) 21–15.5 Ma. With the mantle plume effect gradually enhancing, the hotspot-spreading center interaction became more and more intensive, and at about 21 Ma, there took place a ridge jump again, and induced the opening of SW sub-basin; (4) 15.5–0 Ma. Due to collision between the Indo-Australian plate and the Sunda continent, the spreading stopped. Subsequently, the earlier formed oceanic crust subducted along Nansha trench and Manila trench. However, the mantle plume still existed up to now. An actual evidence is: since the Pliocene a large amount of alkali basalt erupted in the South China Sea and its adjacent areas.

**Key words:** Hainan plume; alkali basalt; formation and evolution of the South China Sea; ridge-plume interaction