

南海复蘑菇状地幔低速柱结构及其地幔动力学

蔡学林^{1,2} 朱介寿^{2,3} 程先琼² 曹家敏²

(1. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059; 2. 成都理工大学地球探测与信息技术教育部重点实验室, 四川 成都 610059; 3. 成都理工大学油气藏地质与开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要:运用高分辨率天然地震面波层析成像和体波层析成像技术,研究东亚西太平洋地区及全球地幔三维速度结构时发现南海地区地幔存在深达 2000 km 以上的巨型复蘑菇状地幔低速柱,结合地质、地球化学和地球物理相关标志,将复蘑菇状地幔低速柱称为南海复蘑菇状地幔柱。本文在论述南海复蘑菇状地幔柱的地质地球物理特征基础上,将地幔柱划分为柱头、柱体、柱尾、幔枝和热点等部分,建立起地幔柱三维几何结构模型,探讨了复蘑菇状地幔柱在南海海盆扩张过程中的主导作用以及欧亚板块、菲律宾海板块和印度洋板块相互作用对南海演化过程的影响。

关键词:复蘑菇状地幔低速柱;复蘑菇状地幔柱;岩石圈;软流圈;下地幔;地幔动力学;南海

中图分类号:P541 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2010)02-0268-12

东亚及西太平洋边缘海或陆缘海的形成与演化是地球科学研究的热点。其中南海的形成和演化又是该热点的前沿课题之一,许多地质学家进行过系统研究^[1-12],曾提出多种动力学模式,主要包括 3 种观点:南海是太平洋板块或菲律宾海板块向西俯冲形成的弧后盆地^[1,7];南海是印度板块与欧亚板块发生碰撞引起东亚大陆逃逸形成的伸展盆地^[8,9];南海的形成可能与地幔对流或地幔柱活动有关^[5-6,10-13]。这些认识主要是根据地壳或岩石圈研究获得,缺乏对该区及邻区地幔三维结构的研究,为此,笔者运用高分辨率天然地震面波层析成像和体波层析成像技术,对东亚西太平洋地区地幔及全球地幔三维结构研究时,发现南海地区地幔存在巨大的复蘑菇状低速柱,结合该区地质学、构造地质学、地球化学和地球物理相关标志的研究,提出南海存在复蘑菇状地幔柱(图 1~4)。在研究南海复蘑菇状地幔柱地质地球物理特征的基础上,将南海地幔柱划分为柱头、柱体、柱尾、幔枝和热点等组成部分,初步建立起南海地幔柱三维几何结构模型(图 5),并认为南海的形成与扩张主要是新生代以来复蘑菇状地幔柱的上升

活动引起的。本文重点论述复蘑菇状地幔柱三维几何结构模型的地质、地球物理和地球化学特征及其地幔动力学意义。

1 复蘑菇状柱头结构特征

通过东亚西太平洋地区岩石圈与软流圈 $2^\circ \times 2^\circ$ 面波层析成像三维 V_s 结构的构造解析发现,南海地区软流圈存在巨大的“工”字型低速异常体^[14-16](图 1),全球地幔体波层析成像^[17-19]研究地球三维结构时,发现南海地区地幔深达 2000 km 以上的巨型复蘑菇状地幔低速异常柱(图 4),因此从地幔整体结构来看,南海地区存在复蘑菇状地幔低速柱。软流圈内的巨大“工”字型低速异常体(图 1~3)实为南海复蘑菇状地幔柱的柱头^[20](图 5)。

2.1 软流圈及其低速异常体含义

软流圈是地球上地幔地震波速度相对较低的部分,又称低速带(LVZ)^[21]或上地幔低速层,它界于岩石圈与固结圈^[16,22]之间。软流圈内面波速度值一般低于上覆岩石圈底部的速度值,亦低于下伏固结圈的面波速度值(图 1~3)。根据南海及邻区 $2^\circ \times 2^\circ$ 面波层

收稿日期:2010-01-20;改回日期:2010-02-08

基金项目:国家自然科学基金重点项目(49734150;40234047;40674035)及国土资源部专项计划项目(2001010206)资助。

作者简介:蔡学林,男,1935年生,教授,从事构造地质学和深部地质研究与教学工作;E-mail: caixuelin1935@sohu.com。

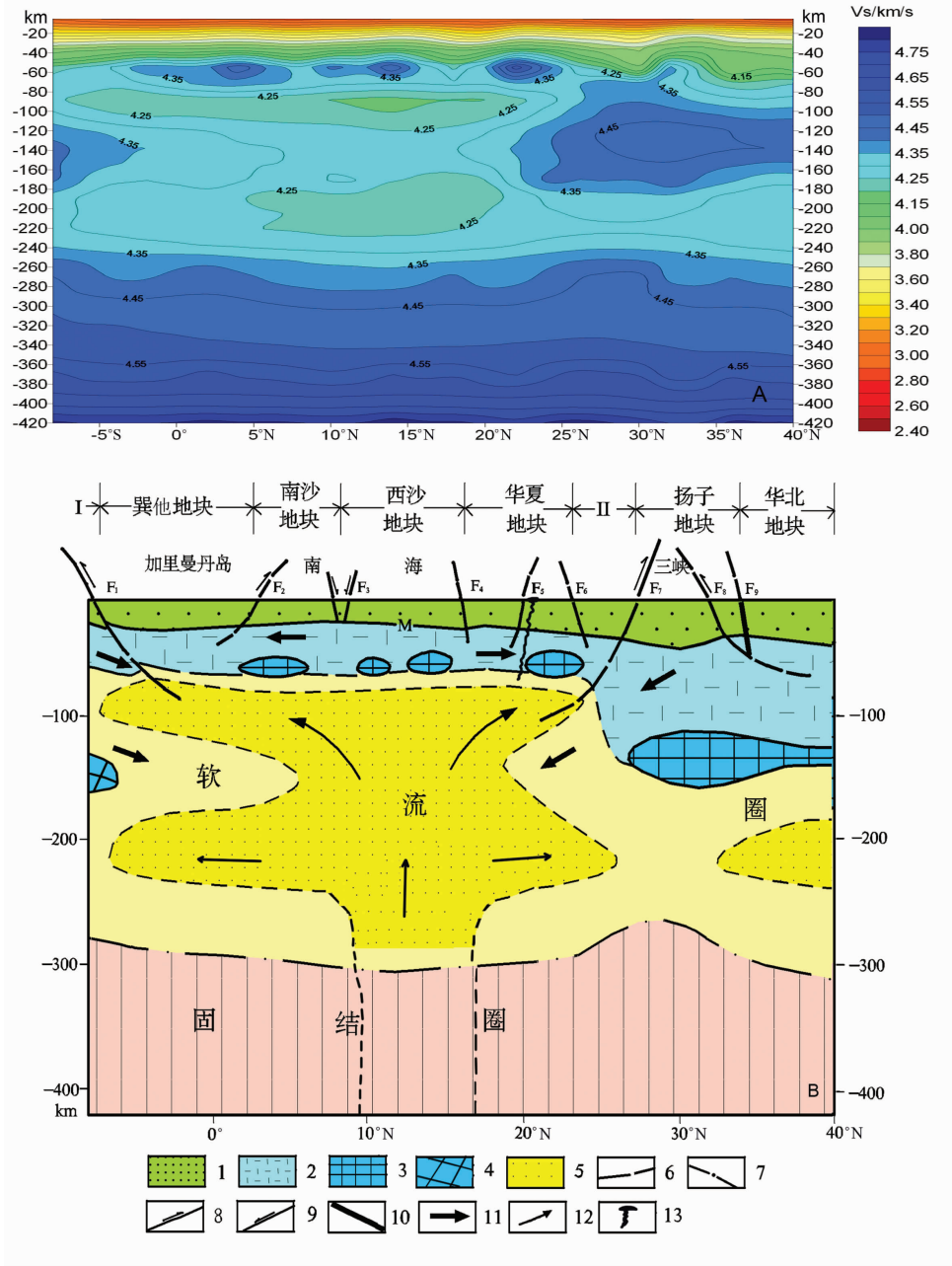


图 1 加里曼丹—南海—三峡地区(110°E)岩石圈及软流圈结构和地幔动力学模式

A—面波层析成像 V_s 速度结构剖面(110°E); B—构造解析剖面; 1—岩石圈地壳; 2—岩石圈上地幔; 3—欧亚板块岩石圈中下部高速块体或幔块构造; 4—澳大利亚板块岩石圈中下部高速块体或幔块构造; 5—软流圈内低速异常体; 6—岩石圈底界面; 7—软流圈底界面; 8—俯冲碰撞带及大型逆冲断裂带; 9—伸展断裂带; 10—碰撞缝合带; 11—板块及块体相对运动方向; 12—软流圈内物质流变方向; 13—雷琼幔枝及玄武岩热点; M—莫霍界面; F_1 —苏门答腊海沟俯冲带; F_2 —东纳土纳俯冲带; F_3 —西南海盆边缘伸展断裂带; F_4 —南海北缘断裂带; F_5 —琼北断裂带; F_6 —宁化—大湾断裂带; F_7 —溁浦—黔阳逆冲断裂带; F_8 —青峰逆冲断裂带; F_9 —桐商碰撞缝合带; I—澳大利亚板块; II—赣湘桂构造带

Fig.1 Lithospheric and asthenospheric structures and mantle dynamic model of the Kalimantan-South China Sea-Three Gorges region (110°E)

A— V_s velocity section (110°E) of surface wave tomographic imaging; B—Section of structural analysis; 1—Lithospheric crust; 2—Lithospheric upper mantle; 3—High-velocity block or mantle block tectonics in the middle and lower lithosphere of the Eurasian Plate; 4. High-velocity block or mantle block tectonics in the middle and lower lithosphere of the Australian Plate; 5—Low-velocity anomaly in the asthenosphere; 6—Base of the lithosphere; 7—Base of the asthenosphere; 8—Subduction-collision zone or large thrust zone; 9—Extensional fault zone; 10—Collisional suture zone; 11—Direction of plate and block motion; 12—Direction of material flow in the asthenosphere; 13—Mantle apophysis and basalt hot spot of Leizhou-Hainan; M—Moho; F_1 —Sumatera sea trench subduction zone; F_2 —Dongnashina subduction zone; F_3 —Extensional fault zone on the margin of the Southwest Sea basin; F_4 —Fault zone of the northern margin of the South China Sea; F_5 —Fault zone of the northern margin in Hainan; F_6 —Ninghua-Dawan fault zone; F_7 —Xupu-Qianyang thrust zone; F_8 —Qingfeng thrust zone; F_9 —Tongshang collisional suture zone. I—Australian plate; II—Jiangxi-Hunan-Guangxi tectonic zone

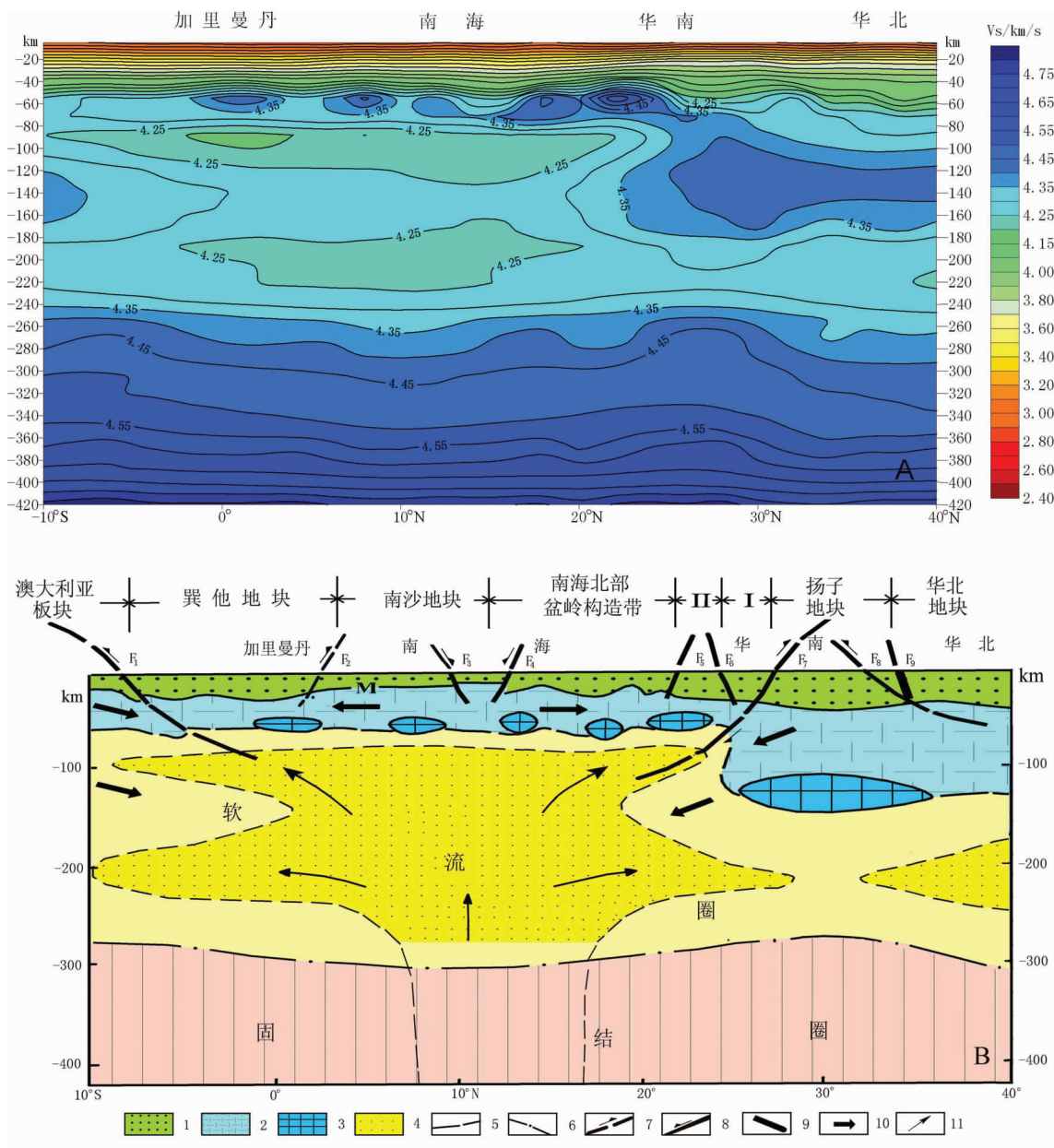


图2 南海—华北地区(112°E)岩石圈及软流圈结构与地幔动力学模式

A—面波层析成像 V_s 速度剖面(112°E); B—构造解析剖面; 1—岩石圈地壳; 2—岩石圈上地幔; 3—岩石圈中下部高速块体或幔块构造; 4—软流圈内低速异常体; 5—岩石圈底界面; 6—软流圈底界面; 7—俯冲碰撞带及大型逆冲断裂带; 8—伸展断裂带; 9—碰撞缝合带; 10—板块及块体运移方向; 11—软流圈内物质流动方向; I—赣湘桂构造带; II—云开地块; M—莫霍界面; F_1 —苏门答腊俯冲带; F_2 —武吉米辛俯冲带; F_3 —西南海盆南缘伸展断裂带; F_4 —西南海盆北缘伸展断裂带; F_5 —南海北缘断裂带; F_6 —宁化—大湾断裂带; F_7 —淑浦—黔阳逆冲断裂带; F_8 —青峰逆冲断裂带; F_9 —桐商碰撞缝合带

Fig.2 Lithosphere and asthenosphere structures and mantle dynamic model of the South China Sea—North China region (112°E)
 A— V_s velocity section (112°E) of surface wave tomography; B—Profile structural analysis: 1—Crust of lithosphere; 2—Upper mantle of lithosphere; 3—High-velocity block of middle-lower lithosphere or mantle block tectonics; 4—Low-velocity anomaly of asthenosphere; 5—Bottom boundary of lithosphere; 6—Bottom boundary of asthenosphere; 7—Underthrusting-collision zone or large-size thrust zone; 8—Tensional fault zone; 9—Collision-suture zone; 10—Motion direction of plate and massif; 11—Direction of material flow in the asthenosphere; I—Jiangxi-Hunan-Guangxi tectonic zone; II—Yunkai massif; M—Moho; F_1 —Sumatera subduction zone; F_2 —Wujimixin subduction zone; F_3 —Extensional fault zone on the southern margin of the Southwest Sea basin; F_4 —Extensional fault zone of the northern margin of the Southwest Sea basin; F_5 —Fault zone of the northern margin of the South China Sea; F_6 —Ninghua—Dawan fault zone; F_7 —Xupu—Qianyang thrust zone; F_8 —Qingfeng thrust zone; F_9 —Tongshang collision-suture zone

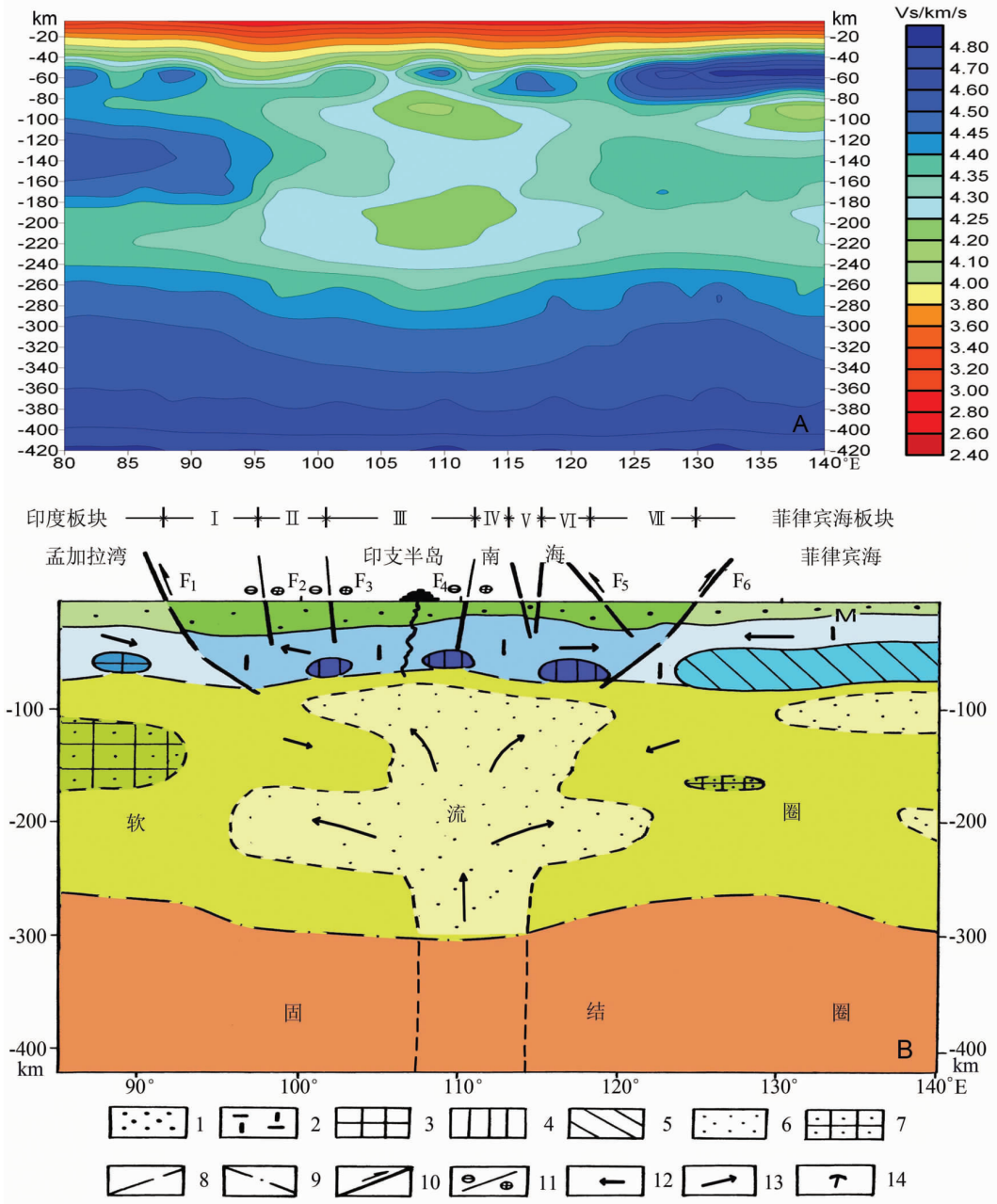


图 3 孟加拉湾—南海—西太平洋地区岩石圈与软流圈结构及地幔动力学模式

A—面波层析成像 V_s 速度剖面(14°N), B—构造解析剖面: 1—岩石圈地壳; 2—岩石圈上地幔; 3—印度板块岩石圈中下部高速块体或幔块构造; 4—欧亚板块岩石圈中下部高速块体或幔块构造; 5—菲律宾海板块岩石圈中下部高速块体或幔块构造; 6—软流圈内低速异常体; 7—软流圈内高速块体; 8—岩石圈底界面; 9—软流圈底界面; 10—俯冲碰撞带及大型逆冲断裂带; 11—大型走滑断裂带; 12—板块及块体运动方向; 13—软流圈物质流动方向; 14—印支幔枝及玄武岩热点; M—莫霍界面; I—安达曼岛弧构造带; II—掸泰地块; III—印支地块; IV—西沙地块; V—南海中央扩张带; VI—南沙地块; VII—菲律宾岛弧构造带; F₁—安达曼海沟俯冲带; F₂—安达曼海走滑断裂带; F₃—澜沧江—清莱断裂带; F₄—南海西缘走滑断裂带; F₅—马尼拉海沟俯冲带; F₆—菲律宾海沟俯冲带

Fig.3 Lithospheric and asthenospheric structures and mantle dynamic model of the Bangal Bay—South China Sea—Philippines
A— V_s velocity section (14°N) of surface wave tomographic imaging; B—Section of structural analysis: 1—Lithosphere crust; 2—Lithosphere upper mantle; 3—High-velocity block or mantle block tectonics in the middle and lower lithosphere of the Indian plate; 4—High-velocity block or mantle block tectonics in the middle and lower lithosphere of the Eurasian plate; 5—High-velocity block or mantle block tectonics in the middle and lower lithosphere of the Philippine Plate; 6—Low-velocity anomaly in the asthenosphere; 7—High-velocity block in the asthenosphere; 8—Base of the lithosphere; 9—Base of the asthenosphere; 10—Subduction-collision zone or large thrust zone; 11—Large strike-slip fault zone; 12—Direction of plate and block motion; 13—Direction of material flow in the asthenosphere; 14—Mantle apophysis and basalt hot spot of the Indo-Sinian block; M—Moho; I—Andaman island arc tectonic zone; II—Shan-Thai block; III—Indo-Sinian block; IV—Xishan block; V—Spreading zone of the centers of the South China Sea; VI—Nanshan block; VII—Philippine island arc tectonic zone. F₁—Andaman trench subduction zone; F₂—Andaman Sea strike-slip fault zone; F₃—Lancangjiang—Qinglai fault zone; F₄—Strike-slip fault zone on the western margin of the South China Sea; F₅—Manila trench subduction zone; F₆—Philippine trench subduction zone

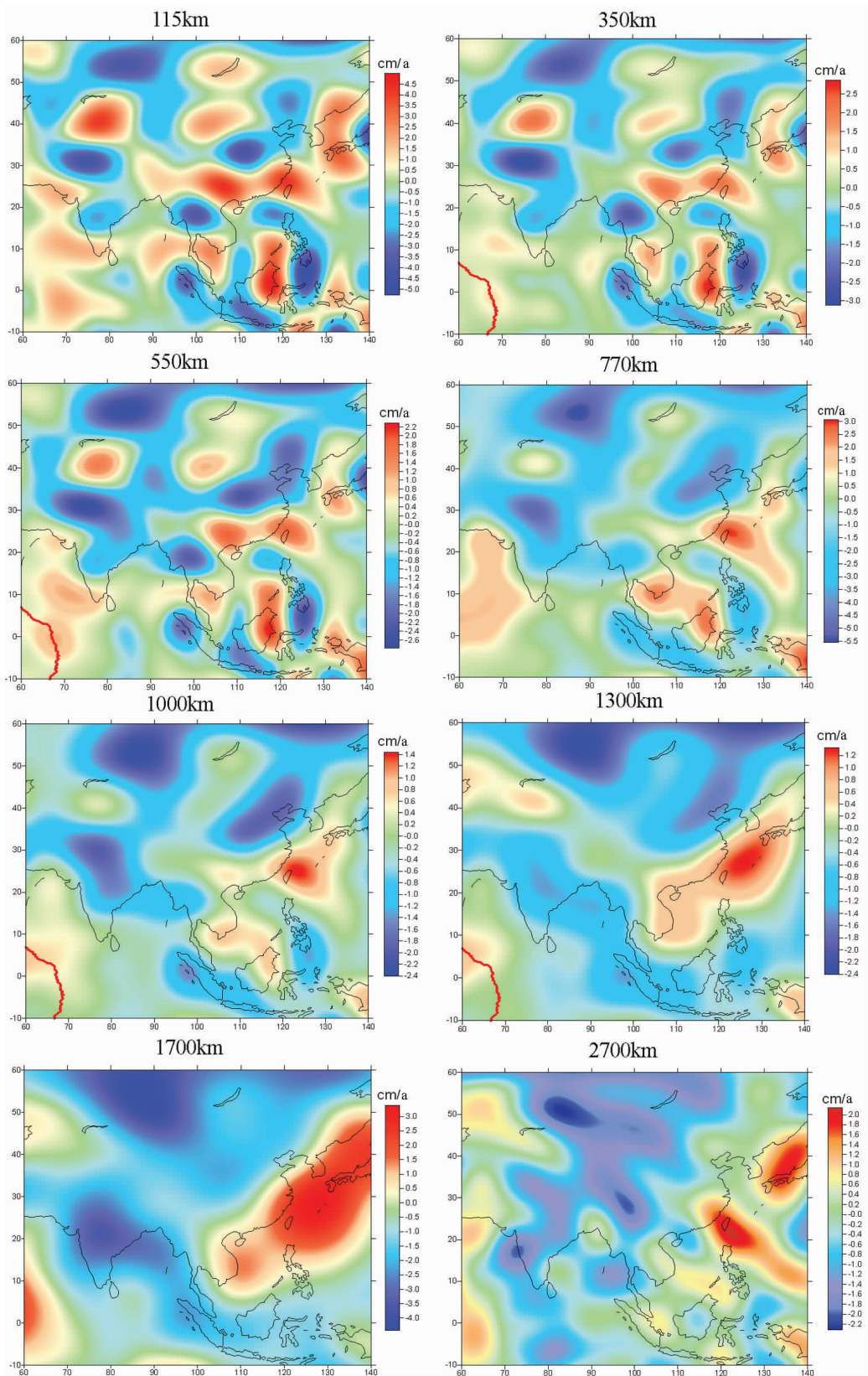


图 4 东亚地区不同深度地幔垂直流动速度图^[18,19]

Fig.4 Vertical mantle flow velocities at various depths in East Asia (after Cheng Xianqiong et al., 2006)

析成像资料研究表明,一般将速度值 4.35~4.40 km/s 作为减薄型岩石圈^[16,23]底界或软流圈顶面的判别标志,将速度值 4.45~4.50 km/s 作为软流圈底界面的判别标志。为了研究软流圈内的细结构,将软流圈内面波速度值在 4.30 km/s 以下的区域称为低速异常体^[14,24],南海地区软流圈内的低速异常体呈巨大的复蘑菇状低速异常体(图 1~3)。

1.2 复蘑菇状柱头几何结构

与典型地幔柱柱头呈蘑菇状型式不同,南海地幔柱柱头在南海及邻区岩石圈以下的软流圈上地幔中呈复蘑菇状柱头型式(图 1,5)发育。它不仅从东经 100°~122°每隔两度的南北向面波速度结构剖面上(图 1~2),而且从南纬 6°至北纬 20°每隔两度的东西向面波速度结构剖面上(图 3),软流圈内低速异常体均表现为复蘑菇状柱头型式。复蘑菇状柱头东西宽 1800~2500 km,南北宽 2500~2800 km。平面上呈椭圆形,近南北向延伸,与南海近似,亦与东亚西太平洋巨型裂谷体系^[24]延伸方向近于平行。柱头的

中心大体在南海中部 6°~16°N,110°~116°E 的区域内。复蘑菇状柱头顶界面埋深较浅,一般为 68~80 km,其中越南多乐地区埋深仅 65 km 左右(图 3),雷琼地区埋深仅 67 km 左右(图 1)。

2 柱体及柱尾结构

一般将地幔柱柱头以下部分统称为柱尾^[25],根据笔者研究将柱头以下部分分为柱体和柱尾 2 部分。程先琼^[18,19]根据地震层析成像模型 PMEAN 和黏度模型 new03 研究地幔对流后认为,上地幔 350 km 至下地幔 2000 km 系南海复蘑菇状地幔柱的柱体范围(图 4),它呈近椭圆柱体与地球半径近平行延伸于地幔中,椭圆柱体直径大体为 800~1200 km,柱体边缘垂直上升流动速度较慢,其垂直上升流动速度为 1~1.5 cm/a;柱体中心地幔垂直流动速度较快,在其中下部 2000~1000 km,垂直上升流动速度为 1.5~2.5 cm/a;在上部 1000~400 km,地幔垂直上升流动速度最快,为 3.0~5.5 cm/a(图 4)。新一代地震层析成像显示,南海地幔柱体内的低速异常柱延深在 1000 km、1350 km、2100 km 之间还非常明显^[26,27]。柱体外围地幔物质呈垂直下降流动状态(图 4)。2000 km 以下为柱尾,南海复蘑菇状地幔柱的柱尾与一般地幔柱上部呈喇叭形^[11,12]相似,在 2400 km 附近柱尾有加大趋势,但到 2700 km 深处减小至逐渐消失^[19],柱尾底部形似箕状并在下地幔中呈缓慢上升流动的态势,在 2700 km 深左右,基本停止上升活动(图 4)。

在南海及邻区,2700 km 以下到核幔边界(CMB)的地幔一侧存在高速异常体^[17,27,28]。新一代地震层析成像显示,2750 km 深处下地幔底部,在南海及邻区有高速异常体分布^[27],推断该高速异常体可能是古海洋板块俯冲到下地幔,在核幔边界(CMB)积聚成毯状或片状的岩石圈残留物^[17,27,28]。由此表明,新一代地震层析成像地幔速度异常分布特征,显示支持全地幔对流模式,即地幔内部物质流可以直接流向下地幔^[17,27]。此外,新生代晚期以来,南海及邻区核幔边界(CMB)已不存在超低速异常带(ULVZ)或高热异常区,而被俯冲的高速异常体取代,这可能是南海洋盆内不存在规模巨大的海洋玄武岩台地的原因之一。

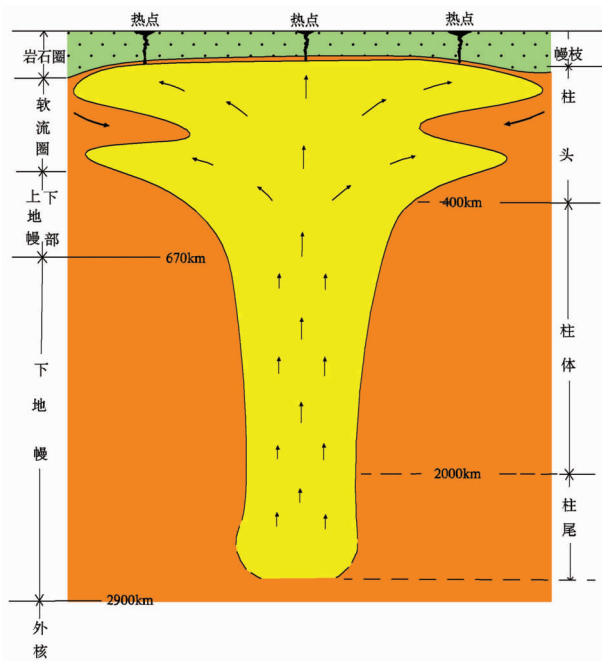


图 5 南海复蘑菇状地幔柱几何结构模型

Fig.5 Geometric structure model of the composite mushroom-shaped mantle plume in the South China Sea

3 幔枝和玄武岩热点展布态势

3.1 南海强减薄型岩石圈三维结构

南海地区的隆起带与裂谷盆地、海槽和洋盆呈相间排列,多沿近北东东—南西西向延伸,南海东缘和西缘沉积盆地呈近南北向延伸。在南海北部的隆起带和裂谷盆地、海槽呈有规律相间分布,在岩石圈地壳表现为北北西—南南东向拉伸而呈北东东—南西西向展布的大陆边缘隆坳相间的盆岭结构^[30]。高分辨率面波层析成像显示,从岩石圈三维几何结构分析,西沙、中沙和南沙地块岩石圈下部存在互不相连的、规模较小的透镜状高速块体,其内部的面波速度值一般为4.35~4.50 km/s(图 1~3)。结合构造地质学研究,将岩石圈下部的高速块体称为幔块构造^[23,24,31]。这些高速块体或幔块构造控制西沙、中沙和南沙地块岩石圈浅部的构造变形,相邻海槽和裂谷盆地的岩石圈下部无高速块体,其面波速度值较小,仅为4.30~4.40 km/s,这些互不相连的高速块体在岩石圈内构成碎块状结构^[23](图 1~3)。面波层析成像表明,南海地区岩石圈减薄幅度较大,现今岩石圈厚度多为59~71 km。例如,珠江口盆地岩石圈厚度为69 km,西沙海槽为68 km,中沙海槽为65 km,神狐隆起为71 km,西沙隆起为71 km,中沙隆起为70 km,南沙地块为71 km。在南海中央海盆岩石圈厚度最小,平均约为59 km^[32],从岩石圈演化分析看,南海巨大的复蘑菇状柱头以上的岩石圈应属强减薄型碎块状岩石圈^[23,31]。

3.2 幔枝和玄武岩热点分布规律

从上述分析可知,南海地区这些互不相连的透镜状高速块体之间的低速带成为玄武岩浆上升的通道,按地幔柱观点,这些玄武岩浆垂直上升的通道在岩石圈内称为三级^[12]或幔枝^[33],幔枝向下延伸与柱头的上蘑菇体互通,向上在地壳浅部或地表发育玄武岩热点(图 1~3,5)。层析成像研究表明,雷琼幔枝和印支幔枝(越南多尔地区)发育较典型,印支地幔柱^[34]实为印支幔枝。印支幔枝与其中的中新世末至中更新世大规模拉斑玄武岩和碱性玄武岩岩浆喷出活动^[35]可能为南海巨大的复蘑菇状柱头以上众多幔枝及玄武岩热点的一个实例(图 3),该幔枝位于印支地块与西沙地块之间,在岩石圈中下部面波速度值最低,仅为4.25~4.30 km/s。雷琼幔枝底部埋深仅67 km,并与柱头上蘑菇体联通,幔枝在岩石圈中下部的面波速度值仅为4.30~4.35 km/s(图 1),软流圈

上涌的玄武岩浆通过幔枝在地表形成雷琼地区上新世至全新世拉斑玄武岩^[36]。

玄武岩浆喷溢活动是地幔热柱活动的直接标志之一。通过对南海中央海盆及两侧的玄武岩热点的研究,发现玄武岩主要发育在两个时期:一是与扩张同时形成的玄武岩。南海北缘普遍出现早中新世玄武岩。例如,南海珠江口盆地内碱性玄武岩钾—氩法年龄值分别为 (17.1 ± 2.5) Ma 和 (20.2 ± 3.0) Ma^[9]。在南海中央除形成洋壳外,还发育众多玄武岩海山,如宪北海山碱性玄武岩钾—氩法年龄值为15.26~22.09 Ma^[37],尖峰海山粗安质浮岩形成年龄为 (18.6 ± 4.88) Ma,玳瑁山拉斑玄武岩形成年龄为 (14.1 ± 1.14) Ma^[38],研究表明由扩张中心向北时代逐渐变老,酸性程度有所增加^[38]。二是在主扩张后形成的玄武岩,分布很广。在中央海盆分布有黄岩海山橄榄玄武岩,形成时代为9.7 Ma^[9],中南海山碱性玄武岩形成年龄为 (3.49 ± 0.58) Ma^[38]。在南海西缘印支(多乐)地区和北缘雷琼地区发育大量晚中新世至全新世玄武岩^[35,36],在澎湖列岛有上新世至晚更新世碱性玄武岩^[9],莺歌海盆地北侧 Y32-1-1 井中有早上新世晚期115 m 厚的石英拉斑玄武岩,其钾—氩法年龄值为3.85 Ma^[5,6]。这些地区的玄武岩及其中的深源包体的岩石地球化学研究表明,玄武岩浆作用与地幔热柱活动引起的岩石圈扩张有关^[39],而与俯冲作用无关^[40]。

4 南海形成演化的地幔动力学探讨

从上面南海复蘑菇状地幔柱三维结构的系统论述可知,复蘑菇状地幔热柱的发育在南海的形成和演化过程中起主导作用,南海主扩张以后周边板块的相互作用有重要影响,据此将南海的形成和演化过程作如下地幔动力学推断(图 6)。

在晚白垩世后期至始新世末期(85~32Ma),南海地幔热柱物质和热源可能来自于核幔边界(CMB)地幔一侧的超低速层(ULVZ)^[17,28,29]或核幔边界的质量异常^[42]。由于热扰动形成的地幔热柱以单波脉冲运动逐渐上升到上地幔中^[25,41](图 6-A)。当受到此时期厚岩石圈的阻挡时,形成两种效应:一是引起地壳与岩石圈的隆起和开裂,另一是地幔热柱物质上升受阻产生侧向流变,在岩石圈底部的软流圈内形成蘑菇状柱头(图 6-A)。由于蘑菇状柱头内物质侧向流动造成岩石圈的底蚀以及岩石圈的伸展减薄,于是岩石圈沿薄弱带裂隙,形成南海裂谷盆地(图 6-A),并构成东亚巨

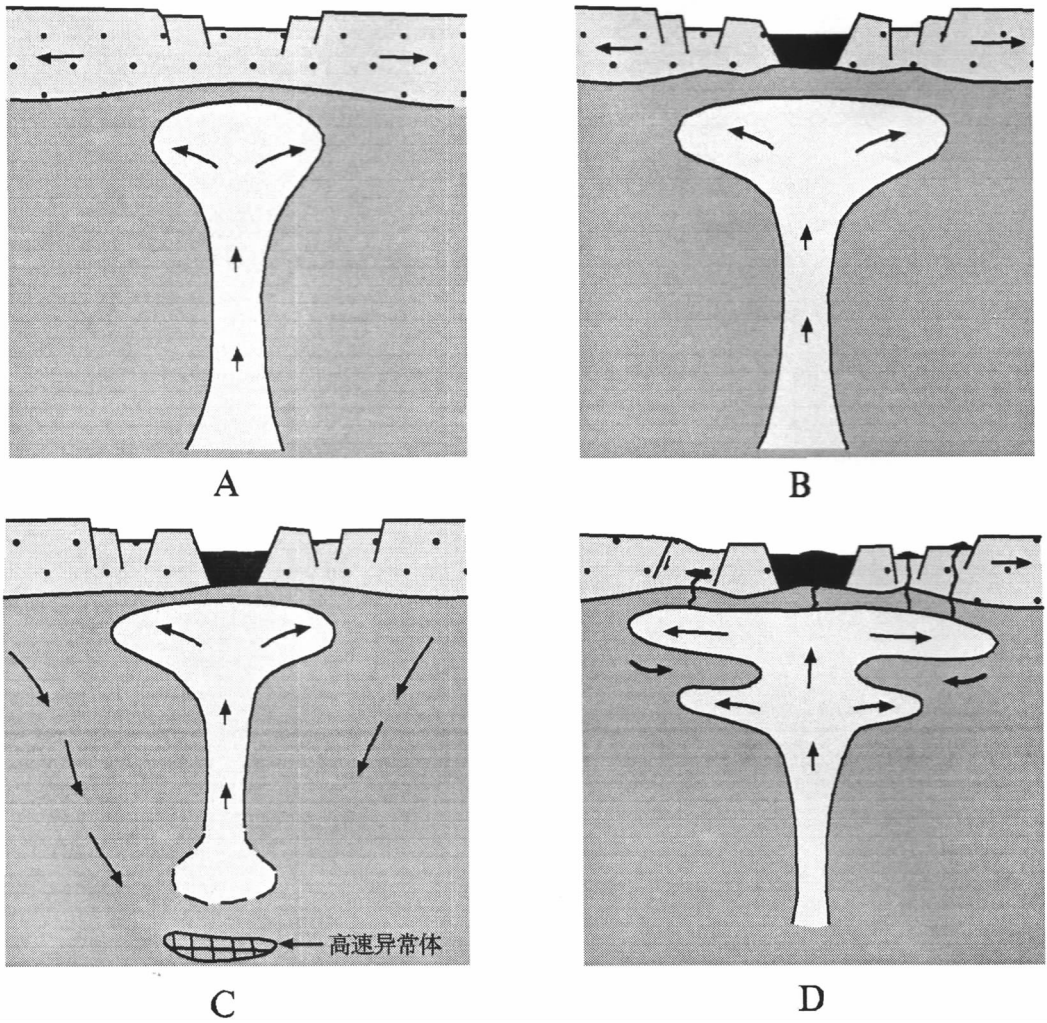


图 6 南海形成与复蘑菇状地幔柱演化模式

Fig.6 Formation and evolution model of the composite mushroom-shaped mantle plume in the South China Sea

型裂谷体系的一部分^[14,24],还伴随以中酸性岩浆为主、中基性岩浆次之的侵入和喷出活动。

从早渐新世到早中新世末,即 32~17 Ma 时期,是南海的主导扩张期^[43]。由于地幔热柱物质继续快速上升,地幔热柱蘑菇状柱头向周围继续扩展,并对岩石圈施加巨大的拉伸作用力,岩石圈迅速伸展减薄、南海及周边岩石圈高速块体减薄拉断,从而形成岩石圈内碎块状结构^[23]。现今的西沙、中沙、南沙地块中岩石圈下部均有碎块状高速块体(图 1~3),并控制以后的发展。与此同时引起减压熔融,地幔熔融物质沿岩石圈薄弱带上涌,推开南海中央两侧的陆壳,逐渐形成南海中央海盆新生洋壳(图 6-B),由于洋盆逐渐向两侧扩展,从而形成从南海中央到边缘玄武岩由新到老的分布格局^[37],同时发育众多的伸

展裂陷沉积盆地,盆地内沉积了大量含有机质黑褐色泥岩^[9];并为南海某些无机成因天然气^[40]的形成与聚集提供了有利的深部构造环境与通道。

自中中新世 17 Ma 以来,在澳大利亚板块、印度板块、欧亚板块和菲律宾海板块的联合作用下,南海周边上地幔开始由伸展构造环境逐渐转变为相对挤压的构造环境(图 6-C),此时南海地幔热柱上升活动减慢,于是南海海盆逐渐停止扩张。初步估算,南海地幔热柱的上升活动时间较短,仅有 70 Ma 左右,比典型的地幔热柱活动时期 100 Ma^[45]少了约 30 Ma。在整个中中新世 17~10 Ma 时期,南海及周边地区基性岩浆喷出活动微弱^[9],因此未能形成大面积玄武岩台地。相反,在南海某些沉积盆地中,特别在南海南部的万安盆地、曾母盆地、北康盆地等中形成了

大型的碳酸盐台地^[46-47]。关于南海停止扩张的原因有不同的认识,根据笔者的初步研究作如下推断:在南海地幔热柱上升的同时,由于澳大利亚板块向北俯冲下沉到地幔底部^[17,27,28],在 17 Ma 以来该区地幔底部的超低速层(ULVZ)可能逐渐被俯冲下沉的板片构成的高速异常体^[28,29]所置换(图 6-C),因此,该地幔热柱因缺少地幔底部的热源逐渐减慢上升活动,这可能是 17 Ma 以来南海扩张活动减弱最基本的深部地幔动力学原因之一,亦可能是未形成南海大面积玄武岩台地的基本原因之一。

晚中新世初 10 Ma 以来,在西部的印度板块与东部的菲律宾海板块和北部的欧亚板块与南部的澳大利亚板块相向俯冲碰撞作用下(图 1~3),南海周边板块岩石圈内的高速块体继续俯冲、断离到软流圈中,在 100~300 km 软流圈内围绕南海发育众多高速块体^[9],造成对南海软流圈内蘑菇状柱头中部的强烈挤压变形,激发地幔柱头再度活动,并引起蘑菇状柱头上下部分侧向拉张扩展,从而出现两种结果:一是形成南海上地幔软流圈内复蘑菇状柱头(图 6-D);二是再度引起南海地区岩石圈伸展减薄以及南海中部、北缘和西缘地区的局部^[2,46,47]扩张。中沙海槽扩张可能使中沙地块和西沙地块分离,形成局部有洋壳性质的中沙海槽^[4],当上述作用继续进行,再次引起软流圈物质减压熔融上涌,沿岩石圈内高速块体之间低速带穿过岩石圈及地壳形成复蘑菇状柱头以上的若干幔枝及玄武岩热点,例如,在南海海盆中 9.7~3.6 Ma 发育的玄武岩海山和南海北缘、西缘中新世至更新世发育的若干玄武岩热点,这可能是南海北缘和西缘,特别是雷琼和印支大规模玄武岩发育最基本的地幔动力学原因之一。在南海南缘中中新世末由于澳大利亚板块对欧亚板块俯冲挤压引起的万安运动^[48]造成巽他地块与南沙地块发生碰撞,在南海南部诸沉积盆地中产生了强烈的影响,引起曾母残留洋盆地洋壳消失,从而在晚上新世以来转变为前陆沉积盆地^[48]。与此同时,在南海东北部,晚中新世以来,包括南海洋壳在内的欧亚板块,沿马尼拉海沟对菲律宾海板块向东俯冲,吕宋弧相对欧亚板块向西仰冲运移^[49,50],在中新世末发生海岸山脉运动,引起吕宋弧的北段在台湾中、南部与欧亚板块发生弧陆碰撞形成台湾中央造山带和海岸造山带,在台湾南部西侧深处有南海洋壳物质^[51],吕宋弧的南部南海海盆继续沿马尼拉海沟向东俯冲消减在吕

宋弧之下,因此马尼拉增生楔之下有南海洋壳部分。与此同时马尼拉海沟向西后退,现今南海的面积比 15 Ma 前的面积缩小了大约 2/3^[49]。通过上述构造作用,最终形成现代南海具有中部、北缘和西缘伸展,南缘和东缘挤压变形的构造格局。

5 结 论

(1)通过高分辨率面波和体波层析成像的地质解析发现:南海地区地幔存在深达 2000 km 以上的巨型复蘑菇状地幔柱,它的发现对南海的形成和演化有重要意义。

(2)初步建立起南海复蘑菇状地幔柱的三维几何结构模型,将地幔柱划分为柱头、柱体、柱尾、幔枝和玄武岩热点等组成部分,并论证了复蘑菇状地幔热柱的地质、地球物理和地球化学特征。

(3)提出复蘑菇状地幔柱的上升活动在南海形成和演化过程中的主导作用,周边欧亚板块、菲律宾海板块、印度板块和澳大利亚板块的相互作用对南海的形成和演化有重要影响。

上述认识仅是初步的,有待于进一步研究、修正和补充。

致谢:研究过程中,得到李廷栋院士、袁学诚教授、姚伯初研究员、曾维军研究员、万玲研究员的指导与帮助,在此表示深切感谢!

参考文献(References):

- [1] 郭令智,施央申,马瑞士.西太平洋中生代活动大陆边缘和岛弧构造的形成和演化[J].地质学报,1983,57(1):11-21.
Guo Lingzhi, Shi Yangshen, Ma Ruishi. On the formation and evolution of the Mesozoic-Cenozoic active continental margin and island arc tectonics of the Western Pacific Ocean[J]. Acta Geologica Sinica, 1983, 57(1):11-21(in Chinese with English abstract).
- [2] 姚伯初,曾维军, Hayes D E, 等.中美合作调研南海地质专报[M].武汉:中国地质大学出版社,1994:1-206.
Yao Bochu, Zeng weijun, Hayes D E, et al. The Geological Memoir of South China Sea Surveyed Jointly by China and USA [M]. Wuhan:China University of Geosciences Press, 1994:1-206 (in Chinese with English abstract).
- [3] 刘以宜.南海新构造与地壳稳定性[M].北京:科学出版社,1994:72-84,134-150.
Liu Yixuan. Neotectonics and Crust Stability in the South China Sea[M]. Beijing: Science Press, 1994:72-84, 134-150(in Chinese).
- [4] 刘照蜀,赵焕庭,范时清,等.南海地质[M].北京:科学出版社,2002:494-502.
Liu Zhaoshu, Zhao Huanting, Fan Shiqing, et al. Geology of South

- China Sea[M]. Beijing:Science Press, 2002:494-502(in Chinese).
- [5] 龚再升, 李思田, 等. 南海北部大陆边缘盆地油气成藏动力学研究[M]. 北京:科学出版社, 2004:9-45.
- Gong Zaisheng, Li Sitian, et al. Study of Dynamics of Petroleum Entrapment on the Continental Marginal Basin of Northern South China Sea[M]. Beijing:Science Press, 2004:9-45(in Chinese).
- [6] 李思田, 林畅松, 张启明, 等. 南海北部大陆边缘盆地幕式裂陷的动力学过程及 10 Ma 以来的构造事件 [J]. 科学通报, 1998, 43(8):797-810.
- Li Sitian, Lin Changsong, Zhang Qiming, et al. The dynamic process of screen rift of continental marginal basin in the North South China Sea and the tectonic events since 10 Ma [J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(8):797-810.
- [7] Karig D E. Origin and development of marginal basin in the Western Pacific [J]. Journal of Geophysical Research, 1971, 76: 2543-2561.
- [8] Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y, et al. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticene[J]. Geology, 1982, 10:611-616.
- [9] Replumax A, Karason H, Van der Hilst R D, et al. 4-D evolution of SE Asia's mantle from geological reconstructions and seismic tomography[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 221:103-115.
- [10] Fukao Y, Obyashi M, Inoue H, et al. Subducting slabs stagnant in the mantle transition zone [J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97 (B4):4809-4822.
- [11] Fukao Y, M aruyama S, Obayashi M, et al. Geologic implication of the whole mantle P-wave tomography [J]. J. Geol. Soc. Japan, 1994, 100(1):4-23.
- [12] Marayama S. Plume tectonics[J]. J. Geol. Soc. Japan, 1994, 100(1): 24-49.
- [13] 金翔龙, 高金耀. 西太平洋卫星测高重力场与地球动力学特征 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21(1):1-6.
- Jin Xianglong, Gao Jinyao. The satellite altimetry gravity field and the geodynamic feature in the west Pacific [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2001, 21 (1):1-6 (in Chinese with English abstract).
- [14] 朱介寿, 曹家敏, 蔡学林, 等. 东亚西太平洋边缘海高分辨率面波层析成像[J]. 地球物理学报, 2002, 45(5):646-664.
- Zhu Jieshou, Cao Jiamin, Cai Xuelin, et al. High resolution surface wave tomography in East Asia and West Pacific marginal seas [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2002, 45 (5):646-664 (in Chinese with English abstract).
- [15] 蔡学林, 朱介寿, 曹家敏, 等. 南海地区软流圈“工”字型低速异常带特征及构造意义 [C]//中国地球物理学会年刊 (2002). 北京:地震出版社, 2002:247.
- Cai Xuelin, Zhu Jieshou, Cao Jiamin, et al. The Characteristics and Implications of “工” Type Low Velocity Zone in Asthenosphere of South China Sea [C]//Annual of the Chinese Geophysical Society(2002). Beijing: Seismological Press, 2002:247(in Chinese).
- [16] 蔡学林, 朱介寿, 曹家敏, 等. 中国及邻近陆地地区软流圈三维结构及其与岩石圈的相互作用[J]. 中国地质, 2006, 33(4):804-815.
- Cai Xuelin, Zhu Jieshou, Cao Jiamin, et al. 3D structure of the asthenosphere beneath China and adjacent land and sea areas and its interaction with the lithosphere[J]. Geology in China, 2006, 33(4): 804-815(in Chinese with English abstract).
- [17] 朱介寿. 下地幔及核幔边界结构及地球动力学 [J]. 地球科学进展, 2000, 15(2):139-142.
- Zhu Jieshou. Structure of lower mantle and core-mantle boundary region and its geodynamics[J]. Advance in Earth Sciences, 2000, 15 (2):139-142(in Chinese with English abstract).
- [18] 程先琼, 朱介寿, 蔡学林. 全球地幔垂直流动速度研究 [J]. 地球物理学报, 2006, 49(4):1022-1028.
- Cheng Xianqiong, Zhu Jieshou, Cai Xuelin. A study of global vertical velocity of mantle flow [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49[4]:1022-1028(in Chinese with English abstract).
- [19] 程先琼, 朱介寿, 蔡学林. 东亚地幔流动速度研究 [J]. 中国地质, 2006, 33(4):896-905.
- Cheng Xianqiong, Zhu Jieshou, Cai Xuelin. Mantle flow vertical of East Asia[J]. Geology in China, 2006, 33(4):896-905(in Chinese with English abstract).
- [20] 蔡学林, 朱介寿, 程先琼. 南海复蘑菇状地幔柱的发现及其动力学意义[C]//中国地球物理学术年会(2005)会议论文集. 长春:吉林大学出版社, 2005:396.
- Cai Xuelin, Zhu Jieshou, Cheng Xianqiong. et al. Discovery and geodynamics significance of the compound mushroom mantle plumes of South China Sea [C]//Annual of the Chinese Geophysical Society (2005). Changchun:Jilin of University Press, 2005:396(in Chinese).
- [21] 安德森 D L. 地球的理论[M]. 关华平, 等译, 北京:地震出版社, 1993, 58-73.
- Anderson D L. Theory of the Earth [M]. Guan Huaping, et al (translator). Beijing: Seismological Press, 1993:58-73(in Chinese).
- [22] 毛桐恩, 刘新美, 赵明, 等. 地球内部层圈耦合作用研究进展[J]. 科学导报, 1999, 6:28-30.
- Mao Tongen, Liu Xinmei, Zhao Ming, et al. Progress in the research of coupling action between the layer and sphere in the Earth interior[J]. Science and Technology Review, 1999, 6:28-30 (in Chinese).
- [23] 蔡学林, 朱介寿, 曹家敏, 等. 东亚西太平洋岩石圈三维结构及其地幔动力学[J]. 地学前缘, 2007, 14(3):21-38.
- Cai Xuelin, Zhu Jieshou, Cao Jiamin, et al. Three-dimensional tectonics of lithosphere and mantle dynamics of East Asia west Pacific[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(3):21-38(in Chinese with English abstract).
- [24] 蔡学林, 朱介寿, 曹家敏, 等. 东亚西太平洋巨型裂谷体系岩石圈与软流圈结构及动力学[J]. 中国地质, 2002, 29(3):234-235.
- Cai Xuelin, Zhu Jieshou, Cao Jiamin, et al. Structure and dynamics of lithosphere and asthenosphere in the gigantic East Asian-West

- Pacific rift system [J]. *Geology in China*, 2002, 29 (3):234-245(in Chinese with English abstract).
- [25] 滕吉文, 张中杰, 白武明, 等. 岩石圈物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2004:813-861.
Teng Jiwen, Zhang Zhongjie, Bai Wuming, et al. *Geophysics of Lithosphere*[M]. Beijing: Science Press, 2004:813-867(in Chinese).
- [26] 黄金利. 中国大陆周边板块深部结构及其动力学意义[C]//中国地球物理学会年会. 长春: 吉林大学出版社, 2005: 34-35.
Huang Jinli. The Deep Structure of Plates around China and its Geodynamic Implications from Tomographic Results [C]//Annual of the Chinese Geophysial Society (2005). Changchun: Jilin of University Press, 2005:34-35(in Chinese).
- [27] Van der Hilst R D, Widlyantoro S, Creager K C, et al. Deep subduction and aspherical variations in P-wave speed at the base of earth's mantle [C]//The Core -Maule Boundary Region. *Geodynamics Series Vol 28. Am. Geophys. Un.*, 1998:5-20.
- [28] Garnero E J, Revenaugh J, Williams Q, et al. Ultralow velocity zone at the core -Mantle boundary [C]//The Core -Mantle Boundary Region. *Geodynamics Series. Vol. 28. Am. Geophys. Un.*, 1998:319-334.
- [29] Lay T, Williams Q, Garnero E J, et al. Seismic wave Anisotropy in the D" Region and its Implications[C]//Gurnis M et al(eds). *The Core -Mantle Boundary Series, 28. Am. Geophys. Un.*, 1998: 299-318.
- [30] 邹和平. 南海北部陆缘张裂—岩石圈拆沉的地壳响应[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2001, 21(10):39-44.
Zou Heping. Continental marginal rifting along the Northern South China Sea: The crustal response to the lower lithospheric delamination[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2001, 21 (1):39-44(in Chinese with English abstract).
- [31] 蔡学林, 朱介寿, 曹家敏, 等. 华南地区岩石圈三维结构类型与演化动力学[J]. *大地构造与成矿学*, 2003, 27(3):301-302.
Cai Xuelin, Zhu Jiushou, Cao Jiaming, et al. Three-dimensional tectonic type and evolutionary dynamics of lithosphere of South China region[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2003, 27(3):301-312 (in Chinese with English abstract).
- [32] 蔡学林, 朱介寿, 曹家敏, 等. 中国东南大陆边缘带岩石圈三维结构—动力学型式[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2005, 25(3):25-34.
Cai Xuelin, Zhu Jiushou, Cao Jiaming, et al. Three-dimensional structural and dynamic types of the continental margin lithosphere in southeast China [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2005, 25(3):25-34(in Chinese with English abstract).
- [33] 牛树银, 李红阳, 孙爱群, 等. 幔柱构造理论与找矿实践 [M]. 北京: 地震出版社, 2002:1-44.
Niu Shuyin, Li Hongyang, Sun Aiqun, et al. *The Theories and Exploration of the Mantle Apophysis Tectonics* [M]. Beijing: Seismological Press, 2002:1-14(in Chinese).
- [34] 曾维军, 李振五, 吴能友, 等. 南海区域的上地幔活动特征及印支地幔柱[J]. *南海地质研究*, 1997, 9:1-19.
Zeng Weijun, Li Zhenwu, Wu Nengyou, et al. The upper mantle activation in South China Sea and Indosinian sante plume [J]. *Geological Research of South China Sea*, 1997, 9:1-19(in Chinese with English abstract).
- [35] Lee T Y, Lo Chinghua, Chung Sunlin, et al. ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating result of Neogene basalts in Vietnam and its tectonic implication [C]// Flower M F(ed.) *J. Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia*, 1998:317-330.
- [36] 樊祺诚, 孙谦, 李霓, 等. 琼北火山活动分期与全新世岩浆演化[J]. *岩石学报*, 2004, 20(3):533-544.
Fan Qicheng, Sun Qian, Li Ni, et al. Periods of volcanic activity and magma evolution of Holocene in North Hainan island[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(3):533-544(in Chinese with English abstract).
- [37] 梁德华, 李扬. 南海宪北海山玄武岩中超镁铁质岩包体[J]. *南海地质研究*, 1991, 4:122-133.
Liang Dehua, Li Yang. Ultra-mafic inclusions in the basalt from Xianbei seamount of the South China Sea[J]. *Geological Research of South China Sea*, 1991, 4:122-133(in Chinese with English abstract).
- [38] 李兆麟, 丘志力, 秦社彩, 等. 南海海山玄武岩形成条件研究[J]. *矿物学报*, 1991, 11(4):325-333.
Li Zhaolin, Qiu Zhili, Qin Shecai, et al. A study on the forming conditions of basalts in seamounts of the South China Sea [J]. *Acta Mineralogica Sincia*, 1991, 11(4):325-333(in Chinese with English abstract).
- [39] 赵海玲, Frey F A, Hang Shichun, 等. 东南沿海地区第四纪大陆岩石圈地幔的特征[J]. *现代地质*, 2002, 16(4):347-352.
Zhao Hailing, Frey F A, Hang Shichun, et al. The mantle characteristics of Quaternary continental lithosphere, Southeast coast of China [J]. *Geoscience*, 2002, 16 (4):347-352 (in Chinese with English abstract).
- [40] 徐义刚, 黄小龙, 颜文, 等. 南海北缘新生代构造演化的深部制约(1)幔源包体[J]. *地球化学*, 2002, 31(3):230-242.
Xu Yigang, Huang Xiaolong, Yan wen, et al. Constraints on Cenozoic tectonic evolution of northern South China Sea (I): Mantly derived xenoliths[J]. *Geochimica*, 2002, 31(3):230-242(in Chinese with English abstract).
- [41] 马宗晋, 杜品仁, 冯汉净. 地球构造与动力学[M]. 广州: 广东科学技术出版社, 2003:65-125.
Ma Zongjin, Du Pinren, Feng Hanjing. *Earth Tectonics and Dynamics*[M]. Guangzhou:Guangdong of Science and Technology Press, 2003:65-125(in Chinese).
- [42] 袁学诚. 再论岩石圈地幔蘑菇云构造及其深部成因 [J]. *中国地质*, 2007, 34(5):738-758.
Yuan Xuecheng. Mushroom structure of the lithosphere mantle and its genesis at depth:revisited [J]. *Geology in China*, 2007, 34 (5):738-758(in Chinese with English abstract).
- [43] Taylor B, Hayes D E. The tectonoic evolution of the South China Sea[J]. *Geophysical Monograph*, 1980, 23:89-104.
- [44] 万玲, 姚伯初, 曾维军, 等. 南海岩石圈结构与油气资源分布[J]. *中国地质*, 2006, 33(4):874-884.

- Wan Ling, Yao Bochu, Zeng weijun, et al. Lithospheric structure and petroleum distribution in the South China Sea [J]. *Geology in China*, 2006, 33(4):814-884(in Chinese with English abstract).
- [45] 王登红. 地幔柱及其成矿作用[M]. 北京:地震出版社, 1998:1-44.
Wang Denghong. *Mantle Plume and Mineralization* [M]. Beijing: Seismological Press, 1998:1-44(in Chinese).
- [46] 吕炳权, 徐国强, 王红罡, 等. 南海新生代碳酸盐台地淹没事件记录的海底扩张[J]. *地质科学*, 2002, 37(4):405-414.
Lv Bingquan, Xu Guoqiang, Wang Honggang, et al. Sea floor spreading recorded by drowning events of Cenozoic carbonate platforms in the South China Sea [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2002, 31(4):405-414(in Chinese with English abstract).
- [47] 姚伯初, 万玲, 刘振湖, 等. 南海南部海域新生代万安运动的构造意义及其油气资源效应[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2004, 24(1):69-77.
Yao Bochu, Wan Ling, Liu Zhenhu, et al. Tectonic significance and its petroleum effect of the Wan'an tectonic movement in the South of the South China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2004, 24(1):69-77(in Chinese with English abstract).
- [48] 杜德莉, 吴能友, 朱本铎. 南海南部盆地地球动力学分类与油气资源 [C]//中国地球物理学会年会. 西安:西安地图出版社, 2004:259.
Du Deli, Wu Nengyou, Zhu Benduo. The Geodynamic Types and its Petroleum Resource of Basin in the South of the South Chinese Sea[C]//Annual of the Chinese Geophysical Society. Xi'an:Xi'an Cartographic Publishing House, 2004:259(in Chinese).
- [49] Sibuet J C, Hsu S K, Pichon X L, et al. East Asia Plate tectonics since 15Ma:constraints region[J]. *Tectonophysics*, 2002, 344:103-134.
- [50] 蔡学林, 朱介寿, 曹家敏, 等. 四川黑水—台湾花莲断面岩石圈与软流圈结构[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2004, 31(5):441-451.
Cai Xuelin, Zhu Jieshou, Cao Jiamin, et al. Structures of lithosphere and asthenosphere in Heishui of Sichuan—Hualian of Taiwan profile [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2004, 31(5):441-451(in Chinese with English abstract).
- [51] Huang C Y, Xia K Y, Yuan P B, et al. Structural evolution from Paleogene extension to Late Miocene—Recent arc—continent collision offshore Taiwan: comparison with on land geology [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2001, 19:619-639.

The structure of the composite mushroom-shaped mantle plume in the South China Sea and its mantle dynamics

CAI Xue-lin^{1,2}, ZHU Jie-shou^{2,3}, CHENG Xian-qiong², CAO Jia-min²

(1. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. Key Laboratory of Erath Exploration and Information Techniques of MOE, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 3. National Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract: In the study of the 3-D velocity structure in the mantle of East Asia, West Pacific Ocean and the globe using the high-resolution tomographical techniques of both natural seismic surface and body wave, the authors discovered a giant composite mushroom-shaped low-velocity mantle plume with the depth of over 2000 km, which, combined with the indicators of geology, geochemistry, and geophysics, is named the South China Sea composite mushroom-shaped mantle plume. This paper describes geological, geochemical, and geophysical features of the plume, divides it into such parts as the tail, the main body, the head, the mantle apophysis, and the basalt hot spot, develops a tentative 3-D geometric structural style for the plume, and discusses the dominant role that the plume and its derived mantle dynamics have played in the basin spreading of the South China Sea and the impact of the interaction among the Eurasian, the Philippine, and the Indian-Australian plates on the basin evolution.

Key words: composite mushroom-shaped low-velocity mantle plume; composite mushroom-shaped mantle plume; lithosphere; asthenosphere; lower mantle; mantle dynamics; South China Sea

About the first author: CAI Xue-lin, male, born in 1935, professor, mainly engages in the study of structural geology and deep geology; E-mail: caixuelin1935@sohu.com.