

RESEARCH OF

GEOLOGICAL SOUTH CHINA SEA

南海地质研究

地质矿产部广州海洋地质调查局情报研究室编

9

南海地质研究

GEOLOGICAL RESEARCH OF SOUTH CHINA SEA

(九)

地质矿产部广州海洋地质调查局情报研究室 编

中国地质大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

南海地质研究(九)/曾维军等著.
武汉:中国地质大学出版社,1997.12
ISBN 7-5625-1281-7

- I. 南…
- II. 曾…
- III. 南海-海洋地质-研究-文集
- IV. P 736.527-53

中国地质大学出版社出版发行

(武汉市鲁磨路31号,邮编430074)

责任编辑:任菊泉 龙祥符

责任校对:冯汉英

中国地质大学出版社印刷厂印

开本 787×1092 mm 1/16 印张 7.375 字数 188 千字 图版 2 印数 850 册
1997年12月第1版 1997年12月第1次印刷

定价:15.00元

目 录

南海区域的上地幔活动特征及印支地幔柱

曾维军 李振五 吴能友 陈艺中 杜德莉 温喜文 李国胜..... (1)

南海西南海盆的海底扩张及其构造意义

姚伯初 (20)

南海中建南盆地地质构造特征与油气远景

邱 燕 姚伯初 李唐根 鲍才旺 龚跃华 钟和贤 (37)

南海西南部人字形走滑断裂体系和曾母盆地的旋转构造

吴进民 (54)

南海海域万安盆地层序地层分析

王嘹亮 钟广见 吴进民 (67)

含油气系统及其在南海南部海域油气勘探中的应用

刘振湖 (78)

南海北部全新世以来的古气候演变

李学杰 韩建修 唐荣革 陈 芳 方小波 陈超云 李国胜 (86)

应用克里格法评价多金属结核不同勘查阶段的勘探网度及资源量

朱克超 (105)

GEOLOGICAL RESEARCH OF SOUTHCHINA SEA(Memoir 9)

CONTENTS^①

The Upper Mantle Activation in South China Sea and the Indosinian Mantle Plume <i>Zeng Weijun, Li Zhenwu, Wu Nengyou, Chen Yizhong, Du Deli, Wen Xiwen and Li Guosheng</i>	(1)
The Sea Floor Spreading in the SW Subbasin of South China Sea and It's Tectonic Significance <i>Yao Bochu</i>	(20)
Geologic and Tectonic Features and Hydrocarbon Potential of the Zhongjian Nan Basin, South China Sea <i>Qiu Yan, Yao Bochu, Li Tanggen, Bao Caiwang, Gong Yuehua and Zhong Hexian</i>	(37)
The 人-Type Strikeslip Fracture System and the Convolute Structure of Zengmu Basin in Southwestern South China Sea <i>Wu Jinmin</i>	(54)
Sequence Stratigraphy Analysis of Wan'an Basin <i>Wang Liaoliang, Zhong Guangjian and Wu Jinmin</i>	(67)
Oil- & Gas-bearing System and Its Application for Hydrocarbon Exploration in the Southern Part of South China Sea <i>Liu Zhenhu</i>	(78)
Holocene Palaeoclimatic Changes in the Northern South China Sea <i>Li Xuejie, Han Jianxiu, Tang Rongge, Chen Fang, Fang Xiaobo, Chen Chaoyun and Li Guosheng</i>	(86)
The Kriging Assessment of the Exploration Grid and Mineral Resources in Different Exploration Stage <i>Zhu Kechao</i>	(105)

① The English of this book is translated or revised by Long Xiangfu, the editor.

南海区域的上地幔活动特征及印支地幔柱

曾维军 李振五 吴能友 陈艺中 杜德莉 温喜文 李国胜

摘 要 根据不同阶次的卫星模型重力异常计算岩石层下的地幔拖曳力场,揭示南海区域存在三种尺度的地幔对流是控制其地球动力学的主要因素。其中大尺度和中等尺度的地幔对流模型已为震波层析成像的资料所证实,并可用现行的地幔柱概念进行解释。本文着重讨论了印支地幔柱的表现形式、成因和时代以及对沉积盆地中的有机质转化和烃类富集等所起的重要作用。

关键词: 上地幔活动,印支地幔柱,油气资源,南海。

板块构造学是对地球表面(尤其是对大洋及其边缘区)运动学的总结,为解决其驱动机制问题,60年代后期,地球动力学才受到普遍重视并作为科学命题开展研究。至今地球动力学的研究已取得长足进展,并成为当代地球科学发展的前沿和生长点。以全球三维地震层析成像^[7]作为基础而建立的地幔柱大地构造学^[11]或“全球大地构造学”^[9],已将地球动力学的研究推向从整个地球系统(包括软流圈、中圈和地核)讨论地球动力及其演变的新阶段。

南海属西太平洋的主要边缘海之一,向来以其重要的地理位置、独特的地质内涵和丰富的矿产资源瞩目于世。出于不同目的参与南海地质、地球物理调查研究的国家众多,机构复杂,已积累大量的资料,有关著述颇丰。综观前人成果可以发现,以往调查深度限于地壳层,所研究的问题多属地质构造的几何形态及其运动学,很少涉及地球动力学。为改变这一状态,地质矿产部于80年代后期以来加强了对南海深部地质的调查、研究工作。1992—1995年间,笔者承担了由地质矿产部科学技术司直接下达的“南海盆地形成与演化研究”项目,其重点是探讨南海及其围区岩石圈演化和地球动力学。在此期间我们发现印支中南部存在一个强烈的地幔发散中心,并参照现行的地幔柱概念而命名为“印支地幔柱”。本文是在完成上述项目的基础上写成,重点讨论南海区域的地幔活动特征及印支地幔柱。

1 深部信息

本次研究进行了南海区域天然地震面波层析成像(SVCT)和不同阶次地幔流场计算分析,所获大量信息拓宽了该区的深部研究领域。

1.1 天然地震面波层析成像 (SVCT)

面波频散方法目前仍是研究地球内部纵、横向不均一性的有效手段,利用震波层析成像技术,可直接探测地下不同深度物质分布的非均一性。对地球内部的速度结构进行三维填图,有助于研究地球动力学的一些基本问题。针对南海区域的具体条件,本次计算是利用我国海南岛的琼中和台湾的台北、泰国的清迈和印度尼西亚的伦邦四个数字地震台站所记录的能量适中、震级为 5.1—7.1 级的长周期天然地震 55 次记录。根据 TFAN-DEF 方法计算瑞利波群速度,从而选出周期在 10—100 s 范围内垂向分辨率较好的频散曲线进行三维层析反演。成图范围 104° — 122° E, 0° — 24° N, 共获不同深度的水平切片 13 张和不同方向(基本上分别沿经向和纬向每隔 2° 切一张)的垂向切片 20 张,基本上控制了南海区域上地幔上部的面波(V_s)三维结构。由于这项工作的初衷是了解岩石圈结构及其下低速带的分布状态,故最大计算深度仅限于 170 km。这项工作由成都理工学院地球物理系的朱介寿教授等承担,在这之前他们已出色地完成了青藏高原和中国全境的 SVCT 计算工作。

从图 1 和图 2 所附部分切片不难发现,该区 V_s 结构存在明显的纵向分层和横向分块性。

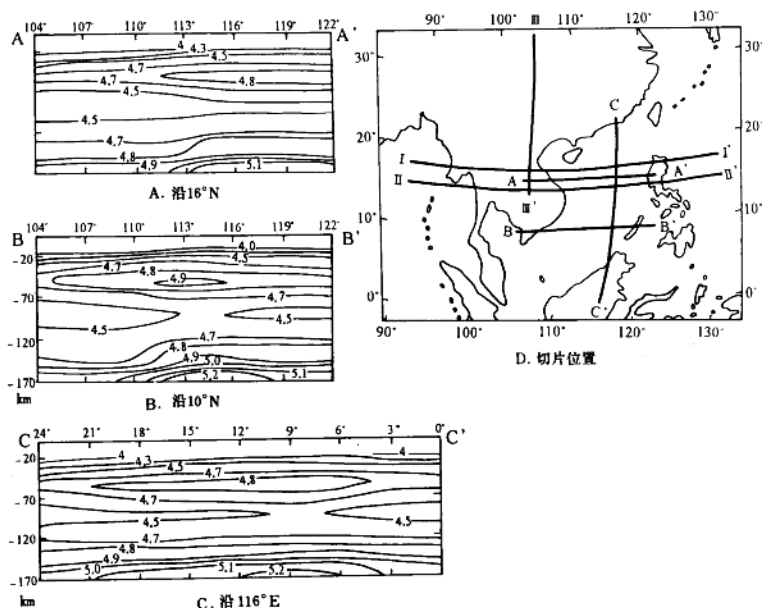


图 2 V_s 纵向切片图(等值线单位: km/s)

Fig. 2 The V_s longitudinal section

横向上总体可以划分出两个低速异常区和一个高速异常区：一个低速异常区位于华南和印支半岛及其毗邻陆缘区，其中心部位在印支中南部；另一个低速异常区占据婆罗洲大部 and 北巽他陆架区；高速异常区以南沙海域为中心向深海平原过渡，它像一楔子往西嵌入上述两个低速区之间。三区之间为速度变化梯阶带。在纵向上， V_s 从地表往下增高，到一定深度开始降低，大致在 70—140 km 深度范围存在一低速层；再往下 V_s 又增高。在 170 km 深度范围内可以看到 V_s 呈高一低一高三层相间格局，并在横向上这三层的厚度和 V_s 值都有明显变化。若以 $V_s = 4.7 \text{ km/s}$ 作为划分岩石圈底界的近似值，则可根据 V_s 三维模型进一步绘制岩石圈底界（以下简称 L-面）深度图（图 3）；若以此值限定低速带的底界，同样可绘制岩石圈之下低速层的等厚度图（图 4）。图 3 和图 4 集中反映了 L-面埋深与其下低速层的发育程度密切相关。最为引人注目的是印支中南部及近岸海区 L-面的埋藏深度小于 60 km，其下低速层又特别发育，最大厚度达 90 km 以上，这与其毗邻的南沙海域形成鲜明对比。不言而喻，印支中南部的上地幔具有较强的活动性。

图 5 是美国加州大学张禹慎博士最近为研究华南及邻区上地幔活动状态所计算的部分面波层析结果^[4]，其作图范围虽然仅限于 15°E 以北，但仍有助于从更大深度上了解南海北部及邻区上地幔的 V_s 结构。综观全局，印支中南部和南海已连成统一的低速异常区，由此向华南大陆内部高速区（相当于扬子克拉通）渐变过渡，而向菲律宾海及印度洋高速区则是突变接触，而且其突变带就是现代俯冲带。南海的低速层底界为 300—400 km，而印支中南部的低速层更为发育，其底界在 500 km 以下，似乎还有“根”相连，这与图 4 所展示印支中南部岩石圈下低速层最为发育的趋势是一致的。

1.2 地幔流场

地球内部物质密度的不均一性是产生物质运动的基础，因而是研究地球动力学的重要依据之一。卫星模型重力资料不仅具有全球性覆盖的优势，而且能以较大的信噪比揭示地球内部物质密度的分布状态。利用卫星异常直接研究地幔的流动性，Runcon^[12]进行了开拓性的工作。他首先建立了全球大地水准面异常和全球地幔热对流的基本模型，导出其相关方程，并在此基础上给出地幔对流作用于岩石圈底部所产生的拖曳力方程。Runcon 最初是利用 2—8 阶重力位系数进行计算，随着卫星模型阶数的不断提高和诸多地球物理学家的努力，这一方法已被广泛用于研究不同尺度的地幔对流形式和岩石圈应力场。业已发表的一些研究成果表明，这一方法与地震波层析成像方法相配合将有助于探讨地球动力学的若干问题。

南海区域不同阶次地幔流场的计算工作由中国科学技术大学傅容珊教授承担，在此之前他已就有关的方法发表过大量的研究成果^[3,8]。图 6, 7, 8 是分别根据低阶（2—12 阶）、中阶（13—25 阶）和高阶（26—30 阶）重力位系数计算的地幔流场剖面及其对岩石圈底界所产生的拖曳力场平面图。它们分别反映了不同尺度、不同强度和不同形式的地幔活动状态。图 6A 展示地幔对流对岩石圈底界所产生的拖曳力场总体上是西北往东南方向运动，图 6B 进一步显示地幔对流活动在不同深度和不同区间存在明显的变化规律，大致可分出浅、深两层流体；浅层流体从西北流向东南，矢量近于水平，厚度由陆向海减薄；深层流体相对于浅层流体呈斜向下插之势，在两者转折处显示深层流体对浅层流体的拖曳作用。这种大尺度（> 1000 km）的层状对流形式符合于目前公认的岩石圈板块俯冲模式，转折处又刚好位于太

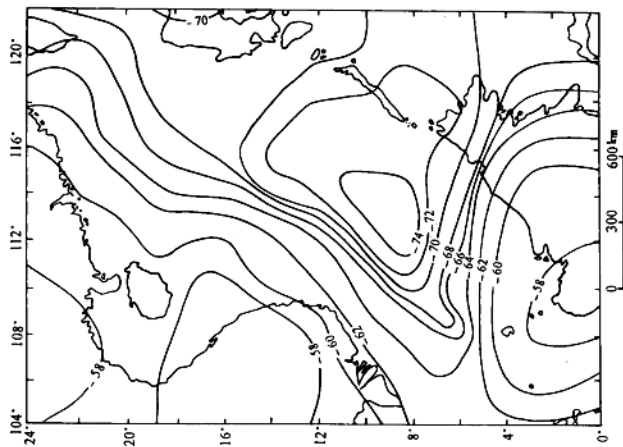


图 3 岩石圈底界埋深图

Fig. 3 Isobath map of the lithospheric basal plane
此图以 $V_s = 4.7$ km/s 为标志绘制而成, 等值线单位: km

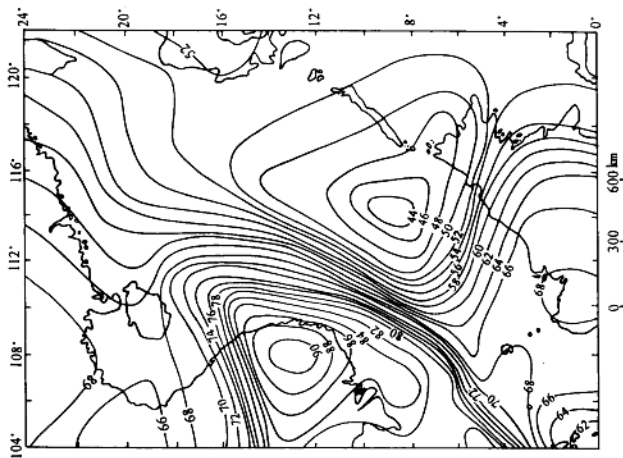


图 4 岩石圈下低速层厚度图

Fig. 4 Isopach map of low-velocity layer under the lithosphere
低速层的顶、底界面均以 $V_s = 4.7$ km/s 为标志, 等值线单位: km

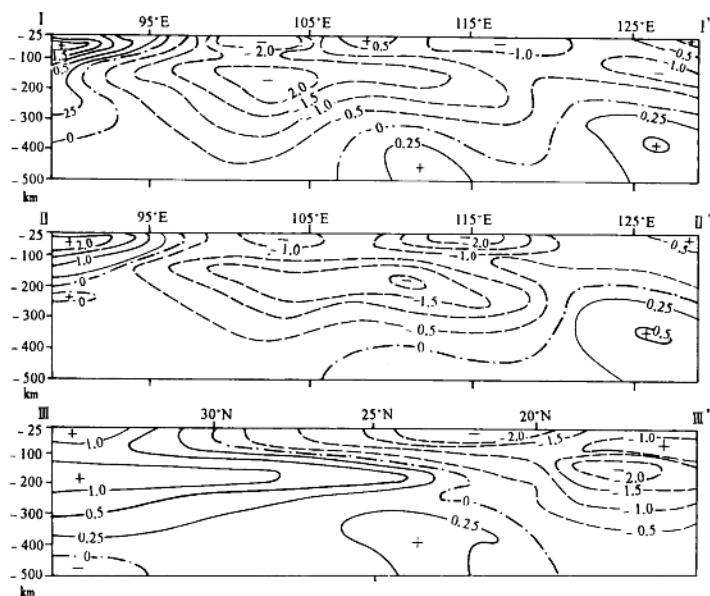


图5 华南及邻区 V_p 纵向切片图

Fig.5 The V_p longitudinal section of South China and adjacent area

此图据文献 [4] 所附部分彩色图版复制。切片位置见图 2 之 d, 单位: %

图中: 0 线为正常值, 实线为高于正常值, 虚线为低于正常值

洋的俯冲边缘。由此可见, 大尺度的低阶地幔流场基本上反映了太平洋板块对欧亚板块的俯冲作用已波及东亚边缘海及其毗邻大陆的地幔深部。由于全阶 (2—30 阶) 地幔流场计算结果与图 6 近似, 这意味着整个地幔对流活动是以低阶场在强度上占绝对优势, 据估算可能比中阶场和高阶场的强度大 1—2 个数量级。

如果说在强度上占绝对优势的大尺度低阶地幔流场主要表现为层状对流形式, 那么中—高阶地幔流场则以发育中 (1 000—500 km) 小 (< 500 km) 尺度的发散和聚敛中心为特征。图 7 最引人注目的是印支半岛中南部出现了一个强劲的地幔发散中心, 由此发散的地幔流体向四周波及甚远, 并在 120°E 附近与来自其它方向的流体形成聚敛带。令人深思的是, 此发散中心与 SVCT 所揭示的岩石圈下低速层最发育的部位 (图 4) 相叠合, 这充分说明印支低速异常区的出现与局部地幔的强烈上涌活动密切相关。高阶地幔流场 (图 8) 突出反映了更次一级的地幔对流活动特征。多个聚敛中心和发散中心的出现, 使流场格局复杂多变, 在剖面图上, 这些局部流场随深度而变化, 大多在上地幔软流层内形成对流环。进一步计算 2—180 阶的地幔流场也出现类似的结果, 说明小尺度的地幔对流活动主要集中在上地幔的软流层内。

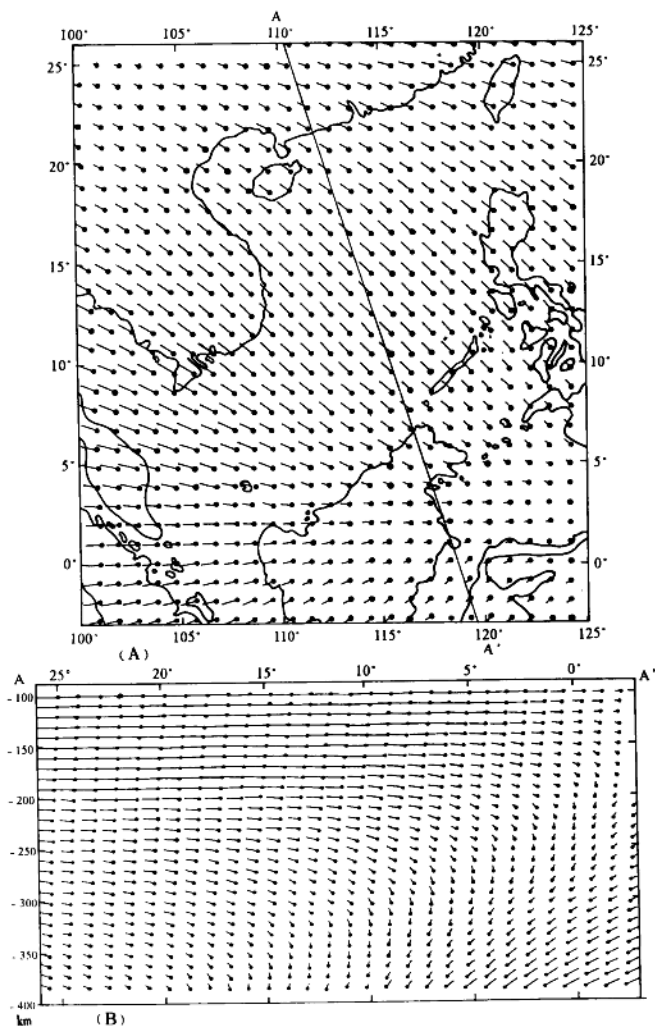


图6 岩石圈下地幔流拖曳力场图 (A) 及地幔流场图 (B) (据 2—12 阶卫星模型重力异常计算)

Fig.6 The drag-force field of mantle-flow (A) and mantle-flow field (B)
under lithosphere (Based on 2 - 12 order satellite gravity anomaly)

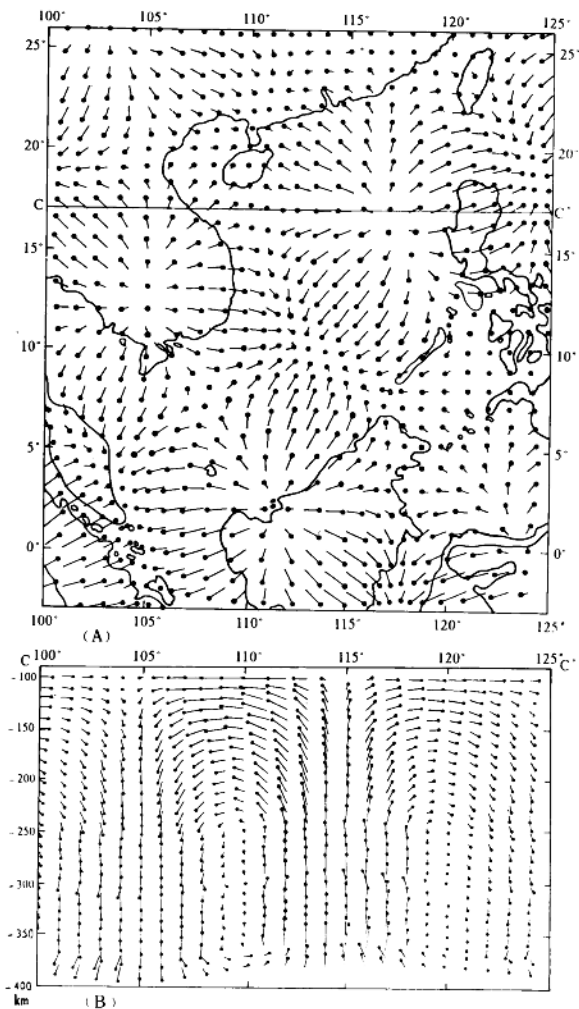


图7 岩石圈下地幔流拖曳力场图(A)及地幔流场图(B)(据13—25阶卫星模型重力异常计算)

Fig.7 The drag-force field of mantle flow (A) and mantle flow field (B) under lithosphere (Based on 13-25 order satellite gravity anomaly)

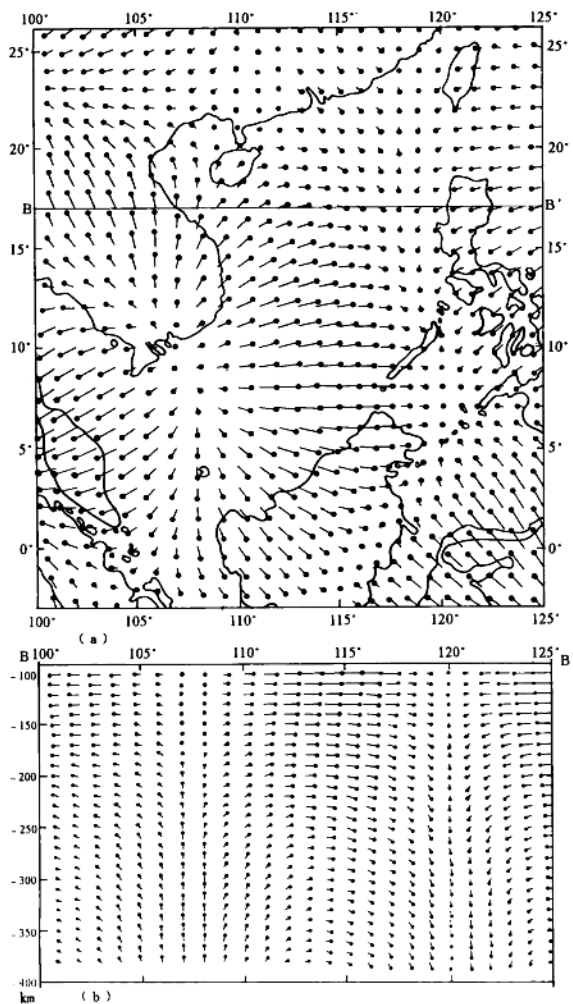


图 8 岩石圈下地幔流拖曳力场图 (A) 及地幔流场图 (B) (据 26—30 阶卫星板型重力异常计算)

Fig. 8 The drag-force field of mantle flow (A) and mantle flow field (B) under lithosphere (Based on 26—30 order satellite gravity anomaly)

1.3 大地热流背景

南海现已统计的大地热流数据 584 个, 其中钻孔测量数据 359 个, 海底探针测量数据 225 个。这些数据的分布虽然不尽合理, 但从总体看来还是可以反映南海的热状态。仔细分析南海热流分布趋势图(图 9)可以发现以下重要现象: 第一, 全区热流平均值约 77.4

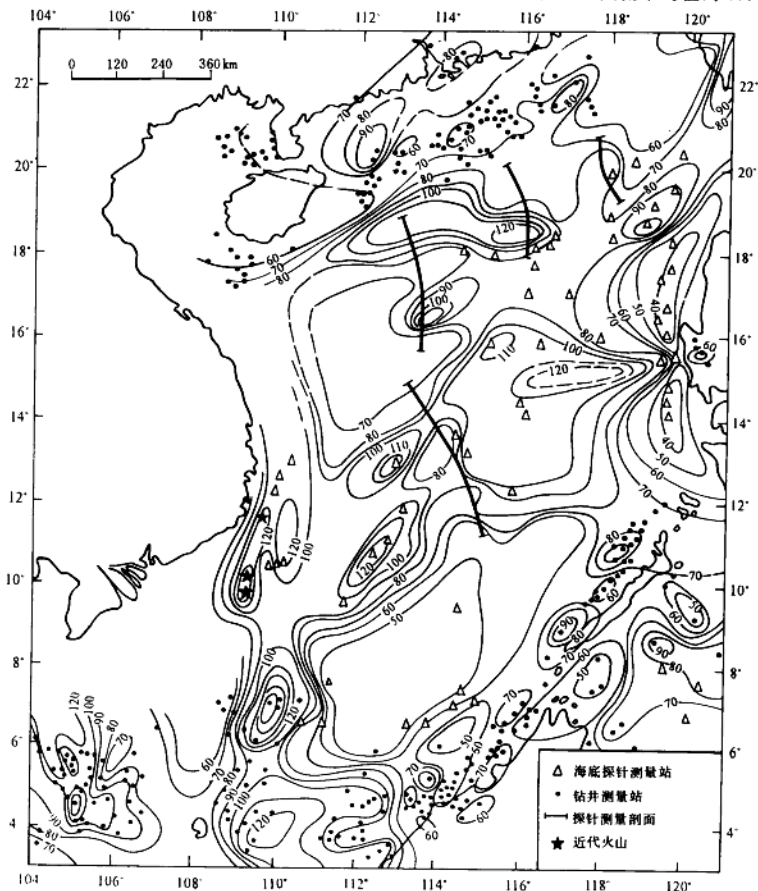


图9 南海大地热流趋势图(等值线单位: mW/m^2)

Fig.9 Trend map of telluric heat-flow of South China Sea

mW/m^2 , 深海平原约 85 mW/m^2 , 大大高于全球平均热流值 ($62\text{--}63 \text{ mW/m}^2$), 说明这个新生代中期由海底扩张形成的边缘海盆^[2,14]至今仍保持较高的热状态, 这与该区上地幔内低速异常十分发育的特点(图 5)相印证; 第二, 不同区间的热流背景值差异, 主要取决于其构造活动背景, 如现在仍具消减性质的马尼拉海沟—西吕宋海槽的平均热流值仅 39 mW/m^2 , 而张性活动强烈的南海西南边缘区的平均热流值高达 108 mW/m^2 ; 第三, 高值热异常呈线性分布, 其位置与活动断裂带相吻合, 例如越东断裂带就是一条醒目的高值热异常带, 并伴有中期火山活动, 在平顺岛和加堆克火山岛, 热流值高达 340 mW/m^2 以上。图 10 可具体说明局部高热流值异常带的出现与近期断裂和岩浆活动相关, 具有明显的叠加性。区域构造沉降分析表明, 南海边缘上的热沉降时常被断裂事件所中断^[10], 而且以南海西南边缘因断裂事件而引起热扰动最为强烈。

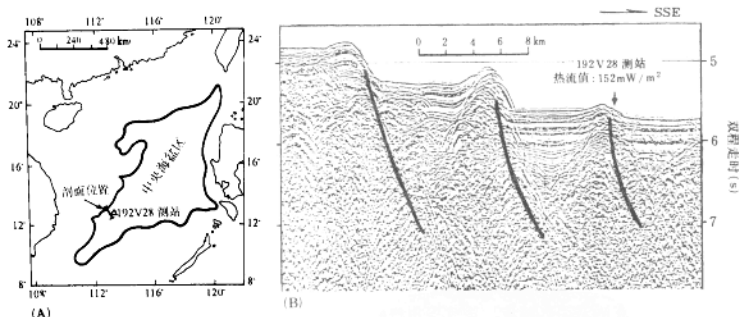


图 10 南海西南次海盆北缘断阶带的高热流异常

Fig. 10 The high heat-flow anomaly in the northern marginal step-fault zone of the SW Subbasin of South China Sea

A. 地震剖面及热流测站位置图(据文献[2]); B. 地震剖面为中美合作调查南海第二阶段成果, 192V28 是维玛号第 28 航次热流测站。注意三条阶梯状边缘断层一直贯穿海底, 断层带上的丘状扰射波很可能反映岩浆浅层侵入-喷溢

2 讨论

上述信息对认识南海区域的深部地质作用奠定了基础。现综合其它地质、地球物理资料, 重点讨论南海区域的上地幔活动特征及印支地幔柱。

2.1 南海区域的上地幔活动特征

震波层析成像从 V_p 的三维结构上揭示了南海区域上地幔的不均一性, 即具有纵向分层和横向分块特征。在纵向上, 可在 170 km 深度范围见 V_p 值呈现明显的高—低—高三层变化。如果将其上部高速层解释为地幔岩石圈或上地幔盖层, 其下部高速层当属上地幔软流圈中的高速夹层。图 5 则进一步揭示在 300—400 km 的深度范围仍属低速异常带, 可能由于分

分辨率不够而未能将其中的高速夹层反映出来。由此可进一步推测软流圈中可能存在两个低速层。无独有偶，宋文尧和苏达权等^[1]针对南海重力资料选用线性均衡模型计算其单位体积地形的补偿密度函数时发现，南海存在两个质量补偿层（图 11）；深部补偿密度是集中在 450—560 km 深处，这是主要的密度质量补偿层，而 250—450 km 的深度范围则是主要的负补偿质量层，其物质密度小于正常的球层密度；浅部补偿密度在 150—200 km 深处，A 区较浅，B 区较深，这可能相当于软流圈中的高速夹层。

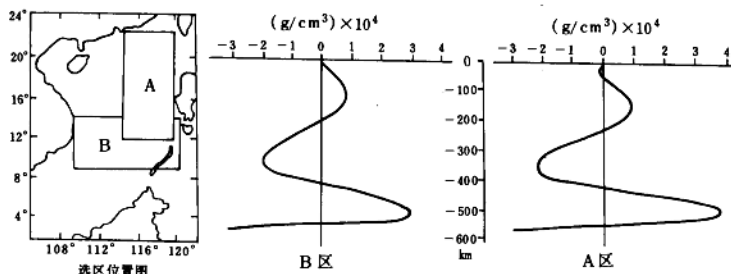


图 11 南海 A 区和 B 区单位体积地形的补偿密度函数 $\Delta\rho(Z)$

选用线性均衡模型计算结果（据文献 [1]）

Fig.11 The compensatory density function of unit-volume topography in sections A, B of South China Sea

地幔流场分析计算，进一步揭示上地幔的不均一性是其热对流活动的产物，其复杂性在于各种类型的对流以重叠形式发生。以上所划分的大尺度地幔对流当属主流，其它两种尺度的对流可喻为支流或局部湍流，均可用现行的地幔柱构造概念讨论其形成机制。“地幔柱构造”这一术语最初被 Davies 等^[6]简单地描述为热点或板内火山作用的潜在源，目前建立在全球 P 波层析成像（PVCT）基础上的地幔柱构造^[7]内涵已衍及地球内部不稳定边界层产生的各种冷、热柱状块体或孤立的岩浆团。

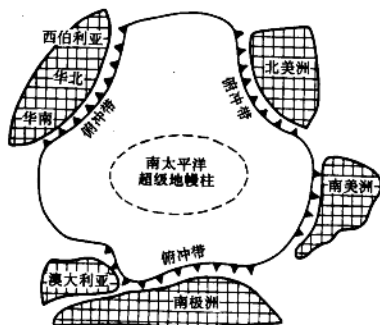


图 12 南太平洋超级热地幔柱与太平洋周边 450—0 Ma 造山带

Fig.12 The circum-Pacific 450 - 0 Ma orogenic zones in relation with the South Pacific Super Mantle Plume

Maruyama 认为，南太平洋超级地幔柱出现于距今 700—600 Ma，太平洋由此诞生。450 Ma 以来太平洋对其周边的俯冲作用形成一系列的造山带（据文献 [11]）