

南海及邻域现代构造应力场的数值模拟*

詹文欢 钟建强 丘学林** 陆成斌

(中国科学院南海海洋研究所, 广州)

提 要 将南海及邻域的现代构造应力问题视为弹性板的平面应力问题, 用有限元法对现代构造应力场进行计算。以海沟俯冲带为主要边界, 全区离散成 1130 个单元和 612 个节点。根据各单元的地壳厚度、P 波速度、密度以及泊松比将区内地壳分成 5 种类型。考虑了 4 种外力作用方式, 这些外力分别反映了印澳板块和菲律宾海板块对研究区的作用力大小和方向。将计算得出的最大主压应力方向与震源机制解的 P 轴方向进行比较, 选择一种和后者符合最好的边界条件和计算结果作为可取模式, 并分析了南海及邻域现代构造应力场的分布格局。

关键词 现代构造应力场 数值模拟 南海及邻域

1 前 言

构造应力场是指一定空间范围内构造应力的分布, 它是地球中与构造运动有关的各种动力作用于地质体的综合反映, 并与构造运动及动力源问题的研究密切相关。揭示构造应力场的展布规律不仅有助于对各种构造现象的解释, 而且可为探讨地球构造运动的力源问题提供重要线索。因此古今构造应力场及其演化研究一直作为大地构造学和地球动力学的重要内容, 特别是对现代构造应力场的研究, 更是有利对新构造运动、区域稳定性和地震危险性等问题的进一步认识。

2 研究现状和研究方法

对南海及其邻域的起源和演化已有不少研究^[1,2], 其中多少涉及到构造应力场问题; 另外也有一些文章论述过华南沿海地区、中国西南地区、菲律宾岛弧地区以及印度尼西亚—爪哇海沟地区的现代构造应力场分布特征^[3-6], 采用的方法主要有区域断裂构造分析、震源机制研究和河流流向统计等, 都属定性分析方法, 而采用定量的数值模拟方法, 目前还处

* 第一作者: 男 29 岁 硕士 助研

* 本文是中国科学院南海海洋研究所所长基金课题 (890401) 阶段成果之一。

** 现在英国剑桥大学攻读博士学位

本文承蒙刘以宣研究员的悉心指导, 特此致谢。

本文 1992 年 2 月 22 日收稿

在探索阶段。

构造应力场是地质体内部构造应力状态的空间分布,可作为连续介质中的力学问题来研究。近年来,由于地质学、地球物理学和力学的发展,多种学科的相互结合,并随着计算机技术的发展及离散式数值算法如有限元法的广泛应用,使有关构造应力场、构造运动和各种力学模式可能得到数学模拟和检验。本文就是采用数学力学方法模拟南海及邻域的现代构造应力场。首先综合地质、地球物理等方面资料,确定计算模型,并计算求解应力分布状态,将计算结果和已知的数据资料对比,反复调整介质参数,改变边界条件,修改计算模型,直到计算结果和已知资料相符,这就是数学力学模拟的通常作法。这种方法综合多方面资料,从研究区内某些已知的应力状态和边界力,求出其它未知的应力状态和边界力的数值结果,从而能够对研究区的构造应力场及产生这一构造应力场的动力进行定量分析。

在数学模拟中数值求解采用有限元法。它的解题过程,包括离散化、单元分析和总体分析三个步骤^[7]。根据问题的具体特点,本文将地质模型简化为弹性板的平面应力问题求解,并采用线性三角形单元。

3 地质模型和计算模型的建立

作为反演模拟计算的第一步,是要根据研究区的地质情况建立地质模型,进而根据研究问题的特点抽象出计算模型。

3.1 地质模型

南海是东亚的一个陆缘海,它和周围地区的大陆边缘构成一舌状地块从欧亚板块向南楔入印澳板块与菲律宾海板块之间,地块受到三大板块的共同作用,其边界既是板块的分界线,也是地震活动带。

3.1.1 板块边界特征

本区最大的特点是地块的东、南、西三个方向的岛弧系都由海沟俯冲带与印澳板块、菲律宾海板块隔开。西面是安达曼海沟、尼科巴海沟和苏门答腊海沟;南面是爪哇海沟和班达海槽;东面则是菲律宾海沟。因而地质模型的东、南、西面就以海沟为天然边界。北面,东南亚地块与欧亚板块相连,因此人为地由台湾北部至缅甸北部取一直线作为边界,由于刚体运动不产生内力,所以假设这条直线在外力作用下Y方向位移为零,两端X方向位移亦为零,也就是以欧亚板块作为参照物,假设它静止不动,欧亚板块阻止着东南亚地块向北运动。

本区东南角伊里安岛的苏朗一带无明显海沟俯冲带,此段与区外的伊里安岛、澳大利亚连成一体,阿鲁海槽尽管在构造走向上与帝汶海槽一致,但此处俯冲作用已经停止,地壳不是处于挤压而是拉张状态^[8]。在班达海南侧的塞拉姆海槽地壳向南俯冲。所有这些现象都说明班达海在向北移动时受到拉力和阻力,所以东南角取Y方向位移为零。

由于本文讨论的范围较大,比例尺较小,因此区内的其它深大断裂未考虑到模型中,只是在分区时尽量考虑以深大断裂为边界。

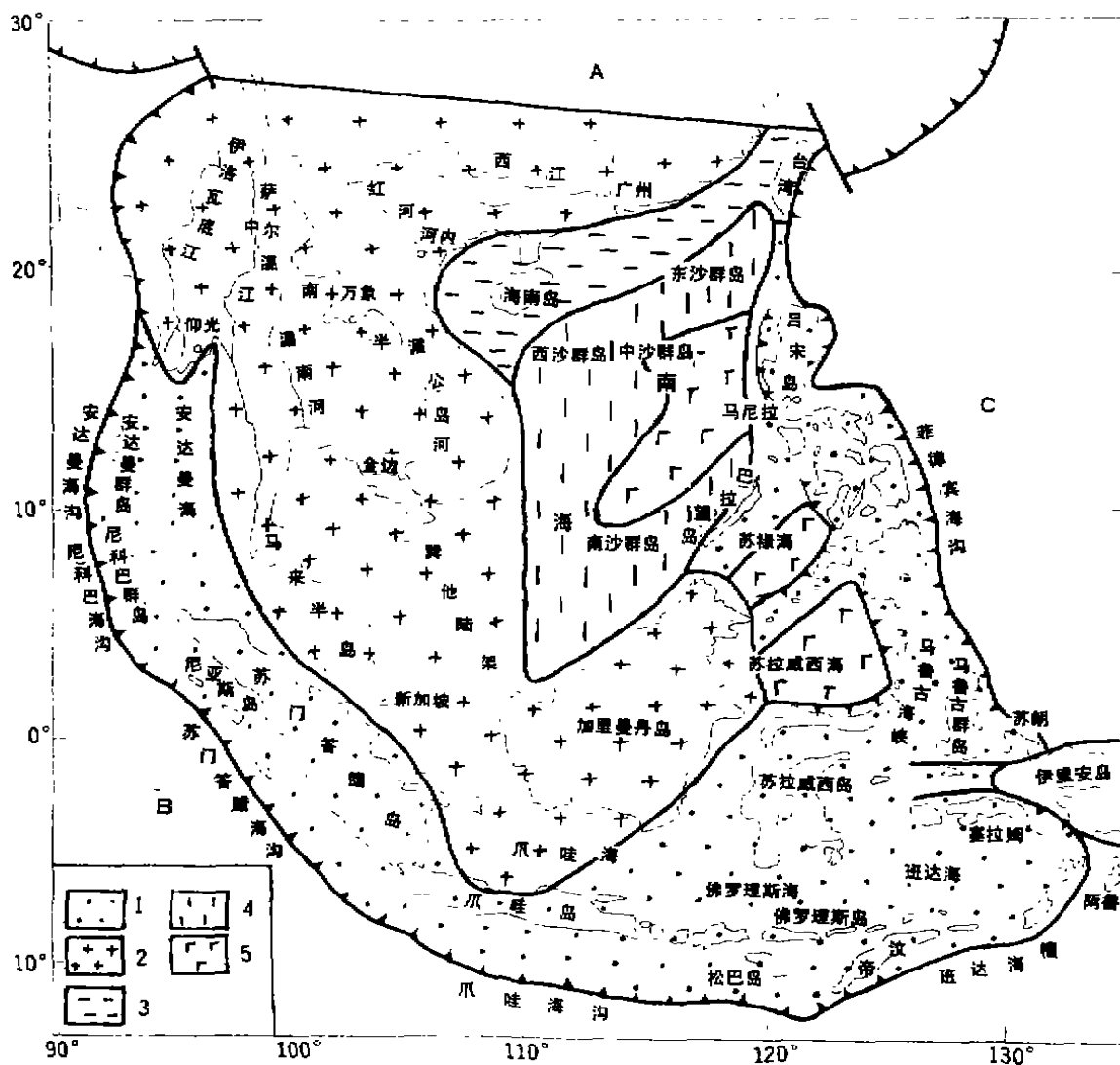


图1 南海及邻域地块边界及地壳结构分区

Fig. 1 The boundary of South China Sea and its adjacent areas and the division of crustal structure

1. 岛弧区 (过渡壳); 2. 大陆区 (陆壳); 3. 陆架区 (次陆壳); 4. 陆坡区 (次洋壳); 5. 海盆区 (洋壳)

A. 欧亚板块; B. 印度洋—澳大利亚板块; C. 菲律宾海板块

南海及邻域经过漫长的演化历史, 地壳结构十分复杂, 陆壳、洋壳、过渡壳共存于一体, 地壳厚度变化大, 因而在模型中必须考虑不同地区地壳结构的差异性。近年来, 大量的地球物理工作使得对本区的地壳结构特征有了初步的认识。根据地壳结构特征、大地构造性质以及断裂构造等因素, 把本区划分为岛弧区、大陆区、陆架区、陆坡区和洋盆区5部分 (图1)。根据目前所收集到的资料, 选取各区各层的厚度、速度和密度参数 (表1), 由

于岩石圈厚度在 60—100 km 之间,且岩石圈底面与莫氏面同步变化,所以取莫氏面到岩石圈底面的厚度为 50 km, P 波速度为 8.1 km/s, 密度为 3.38/cm³。

3.1.3 岩石力学性质

地质体在各种外力作用下都会产生变形并产生相应的内力来抵抗外力。变形可分为弹性变形和塑性变形。弹性变形发生于岩石变形的初步阶段,即外力作用较小,且作用时间较短的情况下;塑性变形则发生于岩石变形的第二阶段,即外力作用较大且作用时间较长的情况下,地质体中各种构造形迹就是在漫长的地质时期中由于岩石的塑性变形而产生的。本文只研究近几千年来现代构造应力场,这相对于漫长的地质时期是一个非常短暂的时间,同时研究区的应力较小,未达到岩石的弹性极限,因此把地质模型简化为弹性体分析较为合理。由于三大岩类的泊松比都在 0.2—0.3 之间,所以泊松比取 0.25 作为平均值,杨氏模量可以由 P 波速度、密度以及泊松比求得。

表 1 南海及邻域地壳性质和岩石圈结构

Tab. 1 Crustal types in South China Sea and its adjacent areas and the lithosphere structure

类 别			大陆区	陆架区	岛弧区	陆坡区	海盆区
地壳性质			陆壳	次陆壳	过渡壳	次洋壳	洋壳
地壳厚度(km)			40	30	25	20	8
岩石圈结构	第一层	厚度(km)	10	10	10	5	3
		速度(km/s)	6.1	6.1	5.7	5.1	5.0
		密度(g/cm ³)	2.7	2.7	2.7	2.4	2.4
	第二层	厚度(km)	30	20	15	15	5
		速度(km/s)	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7
		密度(g/cm ³)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	第三层	厚度(km)	50	50	50	50	50
		速度(km/s)	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1
		密度(g/cm ³)	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3

3.2 计算模型

将南海及邻域地块的地质模型进行抽象和简化,得出计算模型具有下列几个特点:

3.2.1 模型的边界由板块作用边界——海沟确定,北面和东南角无海沟处定为 Y 方向零位移约束边界。由于着重研究现代构造应力场,时间尺度相对较短,且属静态分析,所以将研究区看作线弹性分析。

3.2.2 由于岩石圈底面因地幔对流引起的粘滞拖曳力较小可以忽略,且不考虑静压应力的影响,岩石圈顶底面都有自由面,地块中的构造应力状态与垂直方向无关,由震源机制解得到的应力场也说明以水平应力为主,因此可简化为平面应力问题。模型中各区的岩石力学参数均取各层的平均值来计算。

3.2.3 计算模型主要考虑地壳厚度、岩石力学性质等参数,着重研究边界作用力对区内构造应力场的影响,以震源机制解资料作为主要判据。

4 反演计算及结果分析

计算模型确定之后, 还要进行离散化和边界力设计才能进行计算和分析。

4.1 单元划分

在地质模型和计算模型的基础上, 将全区分成 1130 个三角形单元, 共有 612 个节点。根据各单元的地壳厚度、P 波速度及密度的不同分为 5 个区 (图 1, 表 2), 表 2 中平均密度由各层密度和厚度按下式求得:

$$\bar{\rho} = (H_1\rho_1 + H_2\rho_2 + H_3\rho_3)/(H_1 + H_2 + H_3)$$

平均 P 波速度由各层速度和厚度按下式求得:

$$\bar{P} = (H_1 + H_2 + H_3)/(H_1/P_1 + H_2/P_2 + H_3/P_3)$$

杨氏模量可由各区的平均 P 波速度 \bar{P} , 平均均密度 $\bar{\rho}$ 和泊松比 ν 按下式求得:

$$E = [(1-2\nu)(1+\nu)\bar{\rho}\bar{P}^2]/(1-\nu)$$

表 2 南海及邻域岩石圈特征参数

Tab. 2 The lithosphere parameters of South China Sea and its adjacent areas

类 别	大陆区	陆架区	岛弧区	陆坡区	海盆区
岩石圈厚度 (km)	90	80	75	70	58
平均 P 波速度 (km/s)	7.32	7.41	7.38	7.45	7.71
平均密度 (g/cm ³)	3.15	3.17	3.18	3.19	3.25
泊松比	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
杨氏模量 (N/cm ²)	1.407×10^7	1.450×10^7	1.443×10^7	1.475×10^7	1.610×10^7

4.2 边界力的设计

在地质模型确定之后, 边界作用力就是决定构造应力场基本形态的主要因素, 这样就使得有可能结合判据在反演应力场的同时反演边界力的作用方式。

根据本区周缘板块运动方向与作用力大小的估计^[9-12], 在试探方案中设计了 4 种模式 (表 3)。

表 3 边界力的 4 种模式

Tab. 3 Four models for boundary force

模式	北部	东南角	印度洋—澳大利亚板块		菲律宾海板块
			西部	南部	
I	y 方向位移为 0	x, y 方向位移为 0	$2 \times 10^7 P_0, 50^\circ$	$2 \times 10^7 P_0, 50^\circ$	$2 \times 10^7 P_0, 290^\circ$
II	同上	同上	$2 \times 10^7 P_0, 10^\circ$	$2 \times 10^7 P_0, 10^\circ$	$1.5 \times 10^7 P_0, 250^\circ$
III	同上	同上	$2 \times 10^7 P_0, 20^\circ$	$2 \times 10^7 P_0, 0^\circ$	$1.0 \times 10^7 P_0, 270^\circ$
IV	同上	同上	$2 \times 10^7 P_0, 30^\circ$	$2 \times 10^7 P_0, 30^\circ$	$2 \times 10^7 P_0, 290^\circ$

4.3 计算结果分析

要进行应力场反演计算, 必须对研究区的应力场基本特征有大概的了解, 作为判别计算结果好坏的依据。

对南海及邻域现代构造应力场研究的资料比较分散^{[13][3][5]}, 但综合分析现有资料, 仍能看出其构造应力场的基本特征。现收集到南海及邻域震源机制解 318 个, 并将主压应力轴水平投影绘制成图 (图 2)。由统计结果可知, 主压应力轴和主张应力轴的仰角都比较小, 前者平均 26° , 后者平均 33° , 说明本区构造应力场近于水平, 震源错动方式以水平剪切错动为主。

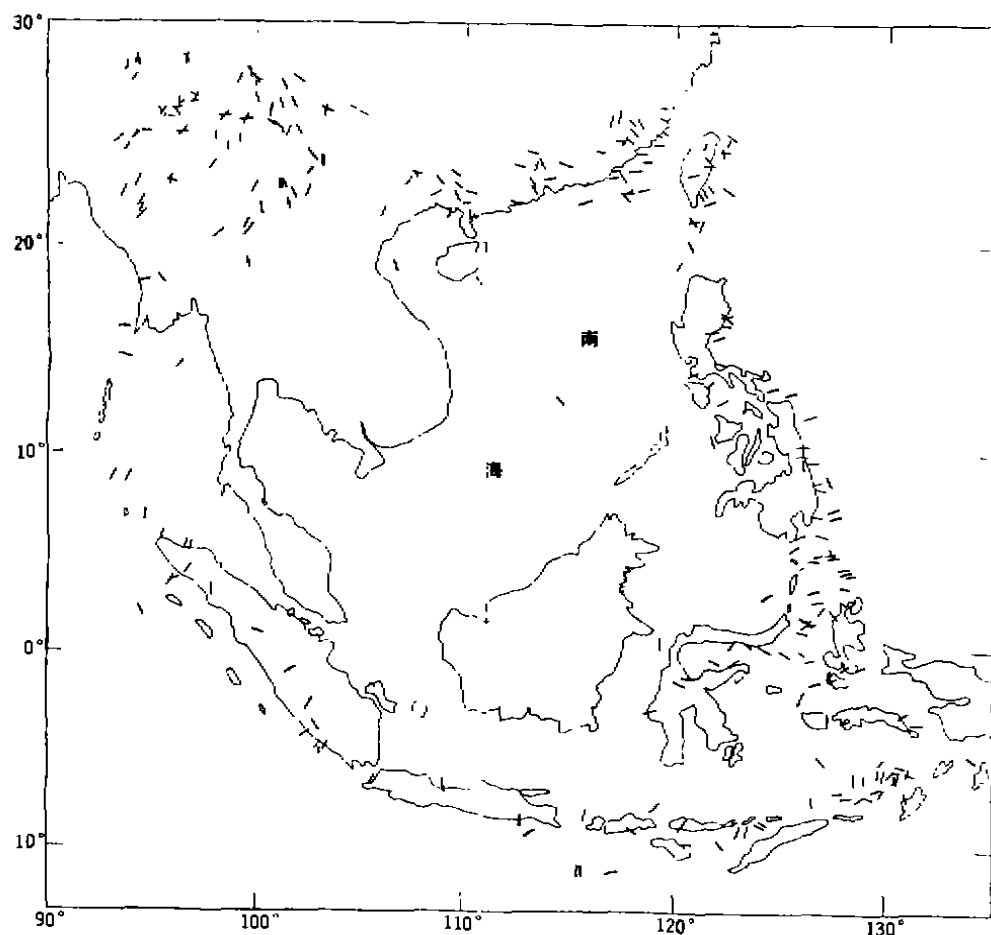


图 2 南海及邻区震源机制解主压应力轴分布

Fig. 2 The distribution of compressive principle stress axes of focal mechanism solutions in South China Sea and its adjacent areas

由于计算的应力场精度不高, 且震源机制解的测定也包含一定误差, 因此要使计算得到的最大主压应力方向与震源机制解 P 轴方向完全一致是不可能的, 但要求两者之夹角越

小越好。现分别计算出每个震源机制解 P 轴方向与该震中所在三角形单元在每种作用力模式下计算出的最大主压应力轴方向之间的锐夹角 $\Delta\theta$ ，并计算 $\Delta\theta$ 的平均值得：模式 I 为 42.5° ；模式 II 为 38.4° ；模式 III 为 37.4° ；模式 IV 为 32.8° 。统计得出 4 种模式 $\Delta\theta$ 在 0° - 90° 之间的分布（表 4），这里规定 $\Delta\theta$ 在 45° 以内者内基本符合，模式 IV 中 $\Delta\theta$ 小于 45° 的地震数最多，约占总数 70%。这样我们可以把模式 IV 作为南海及邻域现代构造应力场的反演模式。

5 现代构造应力场的分布格局

模式 IV 的计算结果反映了这样一幅最大主压应力轴分布图象（图 3），整个南海及邻域现代构造应力场的分布具有明显的区域特征，大约以北纬 5° 为界将本区分为南北两部分。

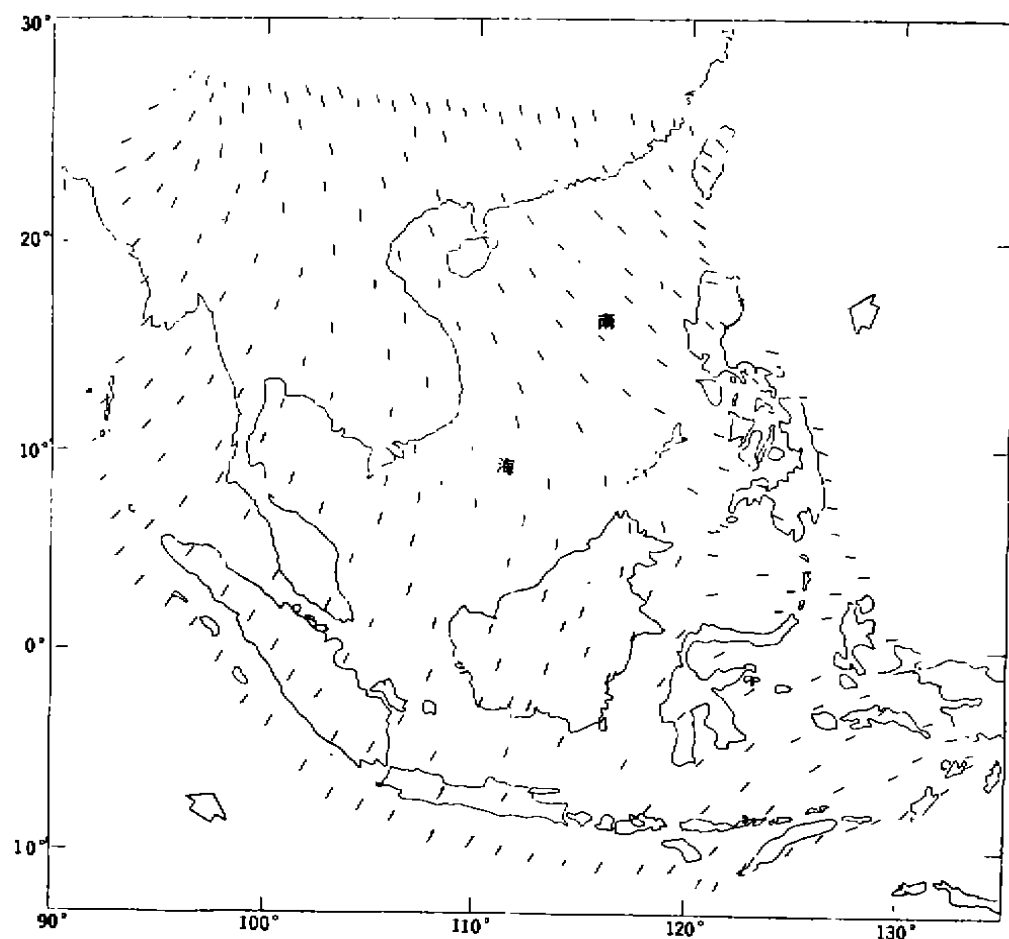


图 3 模式 IV 最大主压应力轴分布图

Fig. 3 The distribution of maximum compressive principal stress axes of model IV

北部地区，主压应力轴方向由西往东从北东向变为南北向再变为北西向，在棉兰老岛

地区甚至变为近东西向、在东经 105°附近主压应力轴分布呈南北向，这说明西面受印澳板块的作用为主，属特提斯——喜马拉雅构造域，东部受菲律宾海板块作用为主，属滨太平洋构造域，中和区位于东经 105°附近，这与前人根据震源机制解推测的结果一致。

南部地区，由西往东主压应力轴由北东变为北东东和东西向。爪哇、佛罗理斯地区的北东向主压应力方向直接和马鲁古群岛地区的的东西向主压力方向相衔接，而没有象以往分析的那样，由北东向渐变为南北向再变为北北向、东西向而把爪哇地区的北北东向主压应力方向与华南中部地区的南北向主压应力方向衔接起来。这说明班达海、苏拉威西海地区同时受到印澳板块和菲律宾海板块的共同作用，其主压应力轴方向必须同时顺应两大板块的作用力方向。

从整个主压应力轴分布格局看，主压应力轴方向的变化大部分比较协调，呈渐变关系，只是在苏禄海、苏拉威西海附近，主压应力轴方向由西往东由近南北突变为近东西向，比较此处的最大主应力和最小主应力的数值大小，发现两主应力值几乎相等。由于呈东西向的主应力由西往东逐渐增大，使最小主应力逐渐增大最终超过原来的最大主应力方向的应力值而使最大主应力轴方向发生突变。

表 4 各模式 $\Delta\theta$ 分布表

Tab. 4 The distribution of various models ($\Delta\theta$)

类别	0°—15°	16°~30°	31°~45°	46°~60°	61°~75°	76°~90°
I	57	64	53	50	52	42
II	88	61	46	36	46	41
III	91	53	59	43	35	37
IV	92	74	53	54	23	22

将南海及邻域的最大的剪应力值分成烈、强、中和弱四等，烈应力区大于 $250 \times 10^5 P_0$ ，强应力区为 $125 \times 10^5 P_0 - 250 \times 10^5 P_0$ ，中应力区为 $63 \times 10^5 P_0 - 125 \times 10^5 P_0$ ，弱应力区小于 $63 \times 10^5 P_0$ 。(图 4)。从图 4 中可以看到应力区的分布呈环带状，由外向内最大剪应力值逐渐减小，烈应力区、强应力区、中应力区依次排列。烈应力区分布于缅甸西部、安达曼——尼科巴群岛、台湾东北部及菲律宾群岛东部、马鲁古群岛、帝汶——阿鲁群岛一带；强应力区分布于烈应力内侧、沿缅甸东部、安达曼海、民大威群岛、爪哇岛南侧、班达海、马鲁古海峡、菲律宾群岛中部到台湾海峡呈环形分布；中应力区分布范围较宽，大部分沿强应力区内侧分布，从中国云南经越南北部、老挝北部、泰国、马来半岛、苏门答腊岛、爪哇岛、佛罗理斯海、苏拉威西岛和苏拉威西海东部、菲律宾群岛西部到南海北部及粤东、福建一带，最后沿华南沿海地区向西穿过琼州海峡与中应力区的另一端汇合成环带状分布；弱应力区大部分位于中部的南海、印支半岛；巽他陆架、加里曼丹岛地区，四周为烈、强和中应力区所环绕，另有部分弱应力区分布于桂、湘和粤西等地区。

南海及邻域现代构造应力场的研究是一个重要而又困难的课题，本文只是在前人工作基础上作一些探讨，在许多方面仍需继续深入研究。

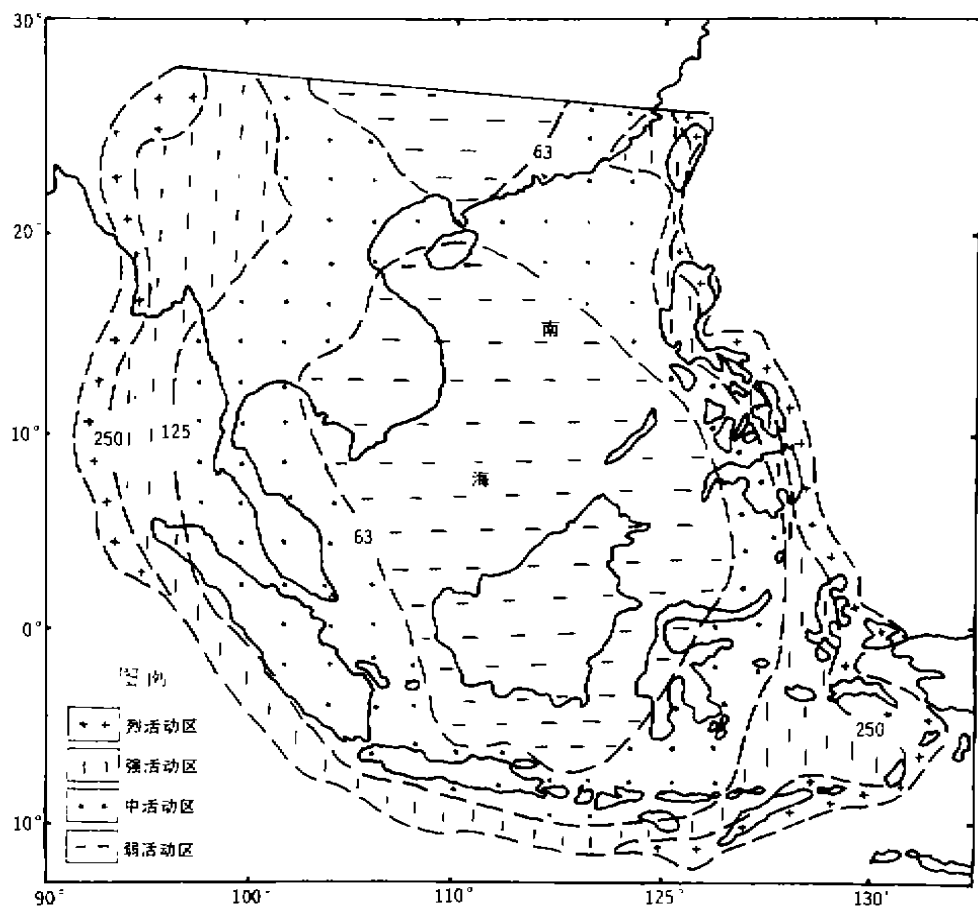


图4 南海及邻域最大剪应力值的分布 (单位: $n \times 10^5 P_a$)

Fig. 4 The distribution of maximum shear stress value (unit, $n \times 10^5 P_a$)

参 考 文 献

- 1 刘以宣. 南海大地构造与陆缘活化. 大地构造与成矿学, 1984, 8 (3), 1-12
- 2 唐鑫. 从板块构造观点论南海的成因. 地球物理学报, 1981, 24 (4).
- 3 林纪曾, 等. 东南沿海地区的震源机制和构造应力场. 地震学报, 1980, 2 (3), 245-253.
- 4 刘以宣. 华南沿海区域断裂构造分析 9-11. 地震出版社, 1981.
- 5 阎荣举, 等. 我国西南地区现代构造活动特征的探讨. 地球物理学报, 1977, 20 (2).
- 6 艾南山, 等. 东南沿海水系及新构造应力场. 地理学报, 1982, 37 (2), 111-117.
- 7 王仁, 等. 固体力学基础. 地质出版社, 1979.
- 8 C. O. Bowin. Arc-continent collision in the Banda sea region, Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 1980, 64, 868-915.
- 9 邓起东, 等. 中国构造应力场特征及其与板块运动的关系. 地震地质, 1979, 1, 11-20.
- 10 鄢家全等. 中国及邻区现代构造应力场的区域特征. 地震学报, 1979, 1, 9-24.
- 11 汪家云等. 中国及邻区现代构造应力场的数值模拟. 地球物理学报, 1980, 23, 35-45.
- 12 M. A. Churnery, The strength of the Earth's Crust under horizontal shear stress, J. G. R., 1964, 69, 2085-2089.
- 13 T. Seno, The instantaneous rotation vector of the Philippine Sea plate relative to Eurasian plate, Tectonophysics, 1977, 42, 209-226.

A NUMERICAL SIMULATION OF THE RECENT TECTONIC STRESS FIELD IN SOUTH CHINA SEA AND ITS ADJACENT AREAS

Zhan Wenhuan, Zhong Jianqiang, Qiu Xuelin and Lu Chengbin

(Institute of South China Sea Oceanology, Academia Sinica)

Abstract

The Recent tectonic stress field in South China Sea and its adjacent areas is considered as a problem of plane stress on elastic plate, which is calculated by finite element method. Taking the trench—subduction zone as a main boundary, the studied region is composed of 5 parts. According to the different crustal thickness, P—wave velocity, density and Poisson's ratio, it is divided into 1130 trigonal elements with 612 points. Four modes of boundary forces, which represent the forces exerted on the studied region by Indian—Australian Plate and Philippine Sea Plate respectively, are tested. The direction of maximum principal compressive stress obtained from the calculation is compared with that of P—axis from focal mechanism solutions. The model which fits most satisfactorily with focal mechanism is selected as an available model. At last, the distribution framework of the recent tectonic stress field in South China Sea and its adjacent areas is analysed in this paper.

Key words: Recent tectonic stress field; Numerical simulation; South China Sea and its adjacent areas