

杨小秋, 施小斌, 许鹤华. 台湾海峡及其邻区现今构造应力场数值模拟. 地球物理学报, 2012, 55(7): 2307-2318, doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 07. 016.

Yang X Q, Shi X B, Xu H H. Numerical modeling of the current tectonic stress field in Taiwan strait and its adjacent regions. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(7): 2307-2318, doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 07. 016.

台湾海峡及其邻区现今构造应力场数值模拟

杨小秋, 施小斌, 许鹤华

中国科学院边缘海地质重点实验室, 南海海洋研究所, 广州 510301

摘 要 本文将台湾海峡及其邻区划分为多个具有不同弹性参数的等厚区块, 并利用基于弹性理论的有限元数值模型, 以 GPS 观测速度和由震源机制解(FMS)得到的主应力轴方向为约束条件, 计算了该研究区的现今构造应力场. 结果表明: (1) 最大主应力轴在台湾海峡中部和台湾岛弧中部大致为 NW—SE 向, 在东北部呈顺时针旋转, 而在南部呈逆时针旋转; (2) 研究区水平位移场大致以 23°N 为界, 南强北弱, 且在北部呈顺时针旋转, 南部呈逆时针旋转; (3) 东沙—澎湖—北港隆起因强度大于周边盆地区而成为“阻挡带”, 导致在其南北出现两个反向的构造逃逸区, 并且隆起东南区形变特别强烈, 而其西北区则相对较弱.

关键词 台湾海峡, 构造应力场, 数值模拟, GPS 速度场, 震源机制解(FMS)

doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 07. 016

中图分类号 P541

收稿日期 2011-04-28, 2012-06-15 收修定稿

Numerical modeling of the current tectonic stress field in Taiwan strait and its adjacent regions

YANG Xiao-Qiu, SHI Xiao-Bin, XU He-Hua

CAS Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology,
Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China

Abstract This paper presents the current tectonic stress field in the Taiwan Strait and its adjacent regions, which was calculated with a 3D finite element model based on the elastic theory. When doing so, we divided the study area into several sub-regions which had same thickness but were assigned different elastic parameters, and the model was constrained by GPS observed velocity data and the directions of principal stress axes deduced from focal mechanism solutions (FMS). The results show that: (1) The direction of the maximum principal stress is about NW-SE in the centers of the Taiwan Strait and Taiwan mountain belt, and experiences clockwise rotation in the northeastern part, and anticlockwise rotation in the southern part, respectively. (2) The horizontal displacement field can be divided into two areas by the Latitude 23°N and it is much stronger in the southern area than in the northern one. In the northern area, the displacement field shows clockwise rotation, while it shows anticlockwise rotation in the southern area. (3) The Dongsha-Penghu-Peikang Basement High becomes a barrier because it is stronger than surrounding regions. As a result, there are two tectonic escapes in the north and the south of the High. And the deformation is much stronger in the southeastern part of the High than its northwestern part.

Keywords Taiwan Strait, Tectonic stress field, Numerical modeling, GPS velocity field, Focal mechanism solution (FMS)

1 引言

台湾海峡及其邻区位于欧亚板块与菲律宾海板块汇聚区(图 1), 华南陆块受印藏碰撞的影响而往东南方向逃逸挤出, 而菲律宾海板块往北西向快速推挤. 研究区在此双重挤压下构造运动及地壳变形强烈、地震活动频繁. 鉴于地震活动与构造应力分布关系密切, 许多学者对该区的构造应力场开展了卓有成效的研究. 这些研究主要可以分为两类. 一类是利用观测数据来开展应力场、应变场的研究, 如利用断层滑动等古应力分析, 获得了台湾岛各历史时期构造应力场的区域分布特征^[1-6]; 利用钻孔崩落、震源机制解(FMS)等应力分析方法, 获得了台湾岛现今构造应力场^[7-8]. 近年随着 GPS 观测及其数据的积累, 利用 GPS 观测数据获得了研究区现今地壳的运动特征^[9-27], 以及应变场及其分布特征^[21, 26-27]. 另一类是利用数值方法计算应力场, 对区域或局部构造的动力学成因机制进行探讨^[2, 28-37]. 这些研究中, 有些工作^[29-32]因为开展较早, 缺乏 GPS 数据的有效约束, 而且文献^[29-31]的研究范围包括南海及其邻区, 而文献^[32]着重研究的是华南滨海断裂带的构造应力场, 而有些模拟工作虽然结合了 GPS 数据, 但着重计算的是台湾岛及其以东地区的应力场^[2, 28, 33-37]. 由此可知, 以台湾海峡为重点开展的构造应力场及其分布特征研究还比较薄弱. 然而, 区域构造应力场的获取是地球动力学和地震预测领域不可或缺的核心科学问题, 特别是在地震触发机制研究中尤为重要. 因此, 本文尝试将台湾海峡及其邻区作为一个研究整体, 利用有限元程序自动生成系统 FEPG 软件(<http://www.fegensoft.com/>), 建立基于弹性理论的有限元数值模型, 在地表(或地壳浅部)用 GPS 观测速度场, 而在地壳深部则用由震源机制解(FMS)获取的挤压(P)、拉张(T)应力轴参数对计算结果进行约束, 力求获得符合实际的构造应力场分布特征, 为探讨研究区动力学机制及防震减灾工作提供可靠的区域基础数据.

2 区域地质背景

研究区位于南海北部大陆边缘的东北部. 南海

北部大陆边缘在晚白垩世—早第三纪期间经历多次张裂作用, 并于 30 Ma 左右发生破裂, 南海海底扩张一直延续到 16 Ma 左右, 北部陆缘也因此进入被动大陆边缘的演化阶段^[38-40]. 作为被动大陆边缘的一部分, 推测研究区具有典型的陆架-陆坡结构, 并在其上发育了一系列 NE、NNE 向张裂型盆地^[41]. 在中中新世早期, 北西向运动的菲律宾海板块仰冲到南海洋壳上, 使得洋壳沿马尼拉海沟向东消减^[42]. 晚中新世, 欧亚大陆与吕宋岛弧在南海东北部发生弧陆碰撞和台湾造山运动^[43], 随着台湾造山带的西向推进, 原来陆坡部分不断被卷入到造山带中. 在海峡东部与台湾岛海岸平原, 因造山作用而发育的台西前陆盆地叠加在早期发育的张裂型盆地上^[44-45]. 前人研究显示台湾造山运动正往南扩展^[46]. 台湾东北海域, 自晚中新世—早上新世开始, 菲律宾海板块沿琉球海沟向北俯冲消减于欧亚板块之下, 产生东西向沟(琉球海沟)弧(琉球岛弧)盆(冲绳海槽)系统^[47-48].

3 有限元数值模型

3.1 构造区划与模型建立

为模拟获得研究区现今构造应力场分布特征, 将 $116^{\circ}\text{E}-123^{\circ}\text{E}$ 、 $21^{\circ}\text{N}-27^{\circ}\text{N}$ 作为本文有限元数值模拟区域(图 1). 研究区的构造格局以 NE 及 NNE 走向为主, 其次为 NW 及 EW 向, 形成 NE 分带、NW 成块的格局. 为方便起见, 并考虑研究区域的地壳厚度、莫霍面埋深及沉积层厚度等变化特点, 我们将研究区自西向东划分为以下 5 个构造区块(图 1):

华南大陆边缘隆起区(I), 是指闽粤滨海断裂带以西地区, 主要由上元古界至下古生界巨厚变质岩系(西部)和上侏罗统至下白垩统酸、中性火山岩及燕山期花岗岩(东部)组成. 其地壳厚度自西向东逐渐减薄, 至福建沿海地壳厚度约为 30 km ^[49].

大陆边缘裂谷区(II), 夹于滨海断裂带与屈尺—老浓断裂之间^[49-53], 主要由 NE 向第三系盆地组成, 自北向南有东海陆架盆地(II 1)、海峡盆地(II 2)、东沙—澎湖—北港隆起带(II 3)及台西南盆地(II 4)^[49-53], 其间被 NW 向马祖—基隆断裂^[50]、NEE 向澎湖—北港隆起断裂和义竹断裂分隔^[49-53].

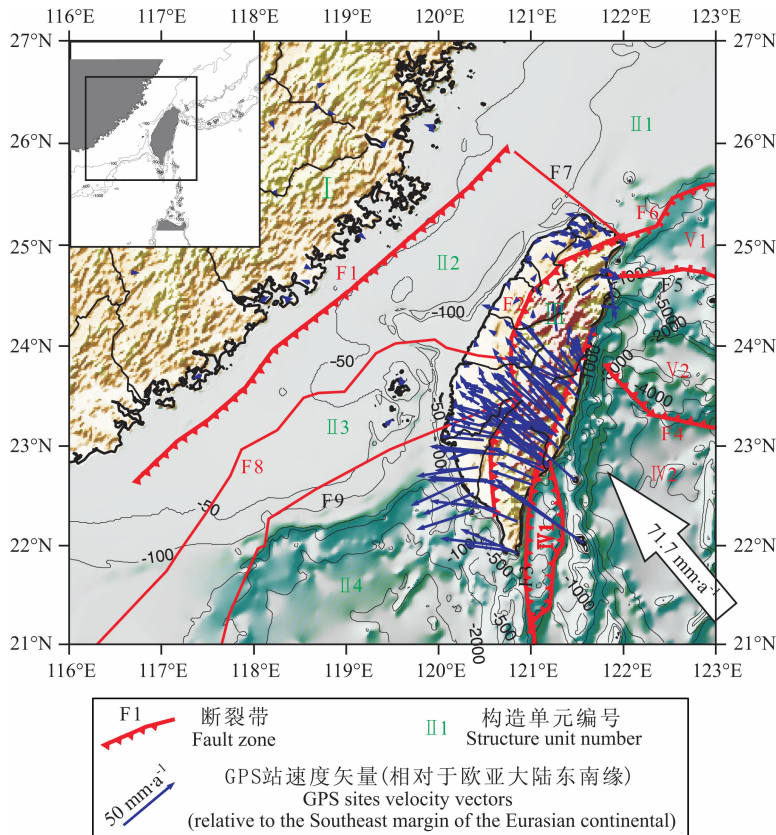


图 1 研究区构造框架及主要构造单元区划

F1: 闽粤滨海断裂; F2: 屈尺—老浓断裂; F3: 台东纵谷; F4: 琉球海沟; F5: 冲绳海槽南缘断裂; F6: 冲绳海槽北缘断裂; F7: 马祖—基隆断裂; F8: 东沙—澎湖—北港隆起北缘断裂; F9: 东沙—澎湖—北港隆起南缘断裂。I: 华南大陆边缘隆起区; II 1: 东海陆架盆地; II 2: 海峡盆地; II 3: 东沙—澎湖—北港隆起; II 4: 台西南盆地; III: 台湾岛弧褶皱区; IV 1: 海岸山脉—吕宋岛弧北段; IV 2: 菲律宾海盆; V 1: 冲绳海槽盆地; V 2: 琉球岛弧。

Fig. 1 Tectonic framework and main structural units in the study area

F1: Littoral Fault; F2: Quchi-Laonong Fault; F3: Longitudinal Valley; F4: Ryukyu Trench; F5: Southern Fault of Okinawa Trough; F6: Northern Fault of Okinawa Trough; F7: Mazu-Jilong Fault; F8: Northern Fault of Dongsha-Penghu-Peikang High; F9: Southern Fault of Dongsha-Penghu-Peikang High; I: South China continental Margin; II 1: Donghai shelf Basin; II 2: Strait Basin; II 3: Dongsha-Penghu-Peikang High; II 4: Taiwan Southwest Basin; III: Taiwan Arc; IV 1: Coastal Range-North Luzon Arc; IV 2: Philippine Sea Basin; V 1: Okinawa Trough; V 2: Ryukyu Arc.

东海陆架盆地地壳厚度为 30~27 km^[54-56], 莫霍面埋深为 28~29 km^[56]. 海峡盆地基底为片岩、大理岩, 盖层主要为第三纪陆相碎屑沉积, 并且自西向东逐渐增厚^[51]. 其地壳厚度为 28~25 km^[49,57]. 东沙—澎湖—北港隆起带基底主要由砂岩和玄武岩组成, 被很薄的新生代沉积层和火山岩不整合覆盖^[50-51], 其地壳厚度为 27~26 km^[49]. 台西南盆地基底主要由侏罗纪陆相厚层黑色页岩和白垩纪三角洲相—浅海相页岩夹砂岩组成, 新生代沉积物厚度超过 3 km^[50-51]. 该区北部地壳厚度为 26~18 km, 往东南减薄到 20~14 km, 属过渡型地壳, 盆地南部地壳厚度小于 12 km, 属洋壳^[58]. 因此可推测: 东沙—澎湖—北港隆起带 (II 3) 相对于周围的海峡盆地 (II 2) 和台西南盆地 (II 4) 具有较大的力学强度。

台湾岛弧褶皱区 (III), 即中央山脉变质岩带, 其西界是屈尺—老浓断裂, 东界是台东纵谷, 主要有西部第三纪板岩带和东部前第三纪片岩带组成. 早期的沉积环境和沉积历史与西侧的海峡裂谷相同, 大地构造上归属东亚大陆边缘^[50]. 该区因褶皱隆起, 其地壳厚度约 36 km^[49].

菲律宾海盆区 (IV), 其西界为台东纵谷、北界为琉球海沟, 包括海岸山脉—吕宋岛弧北段 (IV 1) 和菲律宾海盆 (IV 2). 海岸山脉—吕宋岛弧主要由火山岩组成^[49-50], 其地壳厚度为 20~25 km, 属以陆壳为主的过渡型地壳^[59], 而菲律宾海盆为典型的洋壳, 其地壳厚度约为 5~9 km^[56,59], 莫霍面埋深仅为 12~13 km^[56].

琉球岛弧区 (V), 以琉球海沟为南界, 包括冲绳

海槽盆地(V1)和琉球火山岛弧(V2),主要由深海相沉积岩和火山岩组成^[49].冲绳海槽盆地由一系列张性正断层构成的地堑盆地组成^[47],地壳厚度为13~22 km^[47,55-56],莫霍面深度为16~22 km^[47,56],属过渡型地壳;而琉球火山岛弧地壳厚度为18~24 km^[55-56],莫霍面埋深为19~25 km^[56].

由上可知,本研究区地壳厚度由北西向东南大体呈现厚(I区:~30 km)—薄(II区:30~12 km)—厚(III区:~36 km)—薄(IV:25~5 km)的格局,但本研究区平面上的尺寸远大于厚度方向的尺寸,因此我们拟采用弹性三维等厚的薄壳模型,即将上述各构造区块(图1)抽象为20 km等厚的弹性体,并依据研究区构造区划将有限元模型划分为对应区块(图2).图3是模型的有限元网格,共有8800个六面体单元,11455个节点.

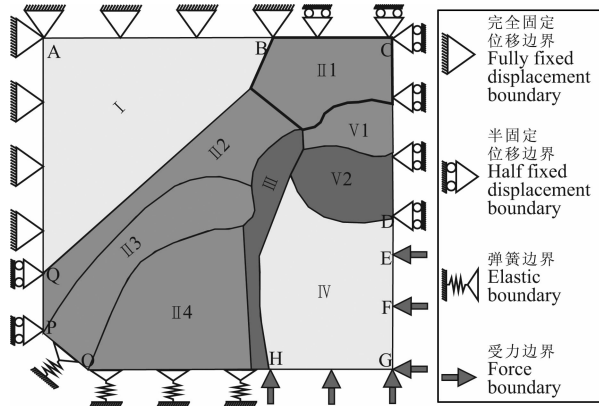


图2 研究区地质模型及边界类型设置示意图

(区块划分与图1一致. 各区块的弹性力学参数详列于表1)

Fig. 2 Schematic diagram of geo-model (numerical model) for the study area and its boundary conditions

(The sub-regions are the same as Fig. 1. Mechanic parameters of sub-regions are listed in Table 1)

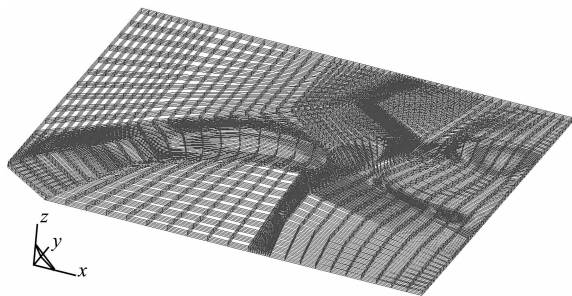


图3 研究区有限元模型网格剖分

Fig. 3 Mesh of the finite element model for the study area

3.2 材料参数

根据各区块地壳厚度、岩性变化及沉积层厚度等综合对比可知:华南大陆边缘隆起区(I)、东沙—澎湖—北港隆起(II3)、台湾岛弧褶皱区(III)、海岸

山脉—吕宋岛弧北段(IV1)及琉球岛弧(V2)具有较强的力学强度,而东海陆架盆地(II1)、海峡盆地(II2)、台西南盆地(II4)、菲律宾海盆(IV2)及冲绳海槽盆地(V1)的力学强度相对较弱.而表征弹性力学强弱程度的两个基本参数分别为杨氏模量(E)和泊松比(ν).通常情况下,力学强度较高的材料,其杨氏模量(E)较大、泊松比(ν)较小;反之,其杨氏模量(E)较小、泊松比(ν)较大.因此,根据上述各区块力学强度的定性分析,同时参考文献[35-37]中采用的弹性力学参数,我们将各区块的等效弹性力学参数设置如表1.

表1 各区块等效弹性力学参数

Table 1 Equivalent elastic parameters of each sub-region

等效力学参数	I	II1	II2	II3	II4	III	IV1	IV2	V1	V2
杨氏模量 E/GPa	60	6	6	50	6	50	60	60	6	50
泊松比 ν	0.2	0.25	0.25	0.2	0.25	0.2	0.2	0.2	0.25	0.2

同时,依据各区块地壳厚度(D)分布情况,我们可大致获得各区块的平均地壳厚度(D_{mean}),若取平均地壳密度(ρ_{mean})为 $2700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,则将各区块抽象为20 km等厚的弹性体后,其各区块等效密度(ρ_{equi})可据 $\rho_{\text{equi}} = \rho_{\text{mean}} \cdot D_{\text{mean}}/20$ 来估算(详见表2).将此估算获得的等效密度赋予数值模型中对应的各区块,则可自动计算地层自身重力所产生的内部体力,也即地层自身重力的作用及其对模拟结果的影响在模型已得到考虑.

3.3 边界设置

研究区GPS观测数据表明:华南大陆沿海诸岛以 $11.2 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速度往SEE方向运动,而菲律宾海板块整体向北西推挤,在台湾岛大致以 24°N 为界,以北区域(台北一带)以 $15 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 往 109° 方向运动,而以南区域的台湾东海岸则以 $53 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速度往 312° — 322° 方向运动^[13,17,19,26,36].由此可知华南大陆边缘隆起区的运动速度相对较小,因此模型中将华南区(I)设置成稳定的块体,其西边界(AQ)和北边界(AB)设置为完全固定位移边界.东海陆架盆地(II1)北边界(BC)和海峡盆地(II2)西边界(PQ)分别设为南北向自由而东西向固定和东西向自由而南北向固定的位移边界.琉球岛弧区(V2)及其以北的东边界(CD)为南北向自由而东西向固定的位移边界.菲律宾海盆区(IV2)东边界(DEF G)和南边界(GH)设为构造挤压受力边界,大陆边缘裂谷区(II)南边界(HOP)设为弹簧边界(图2).

表 2 各区块等效密度
Table 2 Equivalent density of each sub-region

	I	II 1	II 2	II 3	II 4	III	IV 1	IV 2	V 1	V 2
地壳厚度 D/km	>30	30~27	28~25	26~27	14~26	~36	20~25	5~9	13~22	18~24
平均地壳厚度 $D_{\text{mean}}/\text{km}$	35	28.5	26.5	26.5	20	36	22.5	7	17.5	21
等效密度 $\rho_{\text{equi}}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	4725	3848	3578	3578	2700	4860	3038	945	2363	2835

自然条件下,地球表面是自由的,不存在位移和应力的约束,因此,我们将研究区对应模型的顶界面设置为自由边界.考虑到东沙—澎湖—北港隆起带(II 3)相对于周围的海峡盆地和台西南盆地具有较大的力学强度,且 Hu 等^[35]的计算结果揭示了该断隆带水平位移量远小于周围块体.故将该断隆带底界面设置成重力方向上和水平方向上都固定的位移边界,而其他区块底界面则设置为重力方向上固定而水平方向上自由的位移边界.

3.4 约束条件

为了有效地约束上述有限元模型(FEM)模拟结果,我们收集了计算区域内 183 个 GPS 站速度数据和 941 条震源深度在 40 km 以内的震源机制解(FMS)记录,分别用于对模拟结果的水平位移场和最大主应力(P)轴及最小主应力(T)轴分布进行有效的对比约束.所收集 GPS 站速度数据中有 140 个来自台湾 GPS 网于 1990—1995 年观测结果(相对于澎湖白沙(S01R))^[13],18 个来自台湾—吕宋 GPS 网于 1996、1997 和 1998 年观测结果(相对于 ITRF96 框架)^[14],25 个来自福建沿海 GPS 网于 1995、1997 和 1999 年观测结果(相对于 ITRF97 框架)^[22].利用文献[22]中提到的方法对这 3 批 GPS 观测结果进行参考框架统一处理后(详见 4.1 节),获得整个研究区相对于华南大陆东南缘的 GPS 站速度分布(图 1).本文共收集的 941 条 FMS 记录中,位于华南大陆东南缘地震较少,FMS 记录仅有 54 条,且其震级总体上相对也较小,其中,12 条来自文献[60](震级为 2.0~3.3),36 条来自文献[61]($M_s=3.0\sim 5.9$),6 条来自文献[62]($M_L=3.0\sim 4.2$),其余 887 条记录都位于台湾海峡及其以东地区,且震级较大,其中收集自美国哈佛大学(HRV)(<http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>)有 110 条($M_s \geq 4.0$, $\text{depth} \leq 40 \text{ km}$)(1976 年 1 月 1 日至 1995 年 7 月 4 日),收集自台湾地区宽频地震站(<http://bats.earth.sinica.edu.tw/>)的有 777 条($M_L \geq 4.0$, $\text{depth} \leq 40 \text{ km}$)(1995 年 7 月 5 日至 2008 年 6 月 11 日).

4 计算结果分析与讨论

本文通过调整模型中大陆边缘裂谷区(II)南边界(HOP)的弹性系数和菲律宾海区块东、南边界的受力大小,发现当按表 3 所列比例设置弹簧边界和受力边界时,模拟得到的水平位移场、最大主应力(P)和最小主应力(T)方向与观测结果较为一致(图 4 和图 5).

表 3 有限元模型边界设置

Table 3 Boundary values of the finite element model

弹簧边界	HOP	受力边界	DE	EF	FG	GH
弹性系数 K $/(N \cdot m^{-1})$	5.0×10^8	挤压力 F $/\text{GPa}$	0.6	0.7	0.8	0.6

4.1 水平位移场

由于本文收集的 3 批 GPS 站速度数据处于不同的参考框架,因此,我们首先利用李延兴等提到的两个 GPS 网参考框架统一的方法^[22],将福建沿海 GPS 网和台湾—吕宋 GPS 网中各站速度统一到 ITRF97 框架下,获得澎湖白沙 GPS 站(S01R)相对于华南大陆东南缘的站速度,最后将该相对站速度与台湾 GPS 网中 140 个 GPS 站速度叠加,从而获得整个研究区相对于华南大陆东南缘的站速度(图 1、图 4).本文采用的是弹性力学模型,其计算结果为位移场,而上述处理得到的 GPS 观测结果为速度场.位移场是速度场在特定时间内的累积效应,都可用于反映研究区地表运动趋势.因此,将模拟结果与 GPS 观测结果作对比分析前,我们先进行如下处理:即将上述参考框架统一处理后获得的 GPS 站速度比上其中最大的站速度值,从而获得整个研究区相对于华南大陆东南缘的 GPS 站速度比值分布(图 4a 中绿色箭头);同理,我们也将本文弹性力学模型计算得到的位移值比上其中最大的位移值,获得研究区水平位移场比值分布(图 4a 中蓝色箭头).

通过图 4a 将模拟结果与观测结果进行对比分析可知,FEM 模拟获得的水平位移场与 GPS 观测

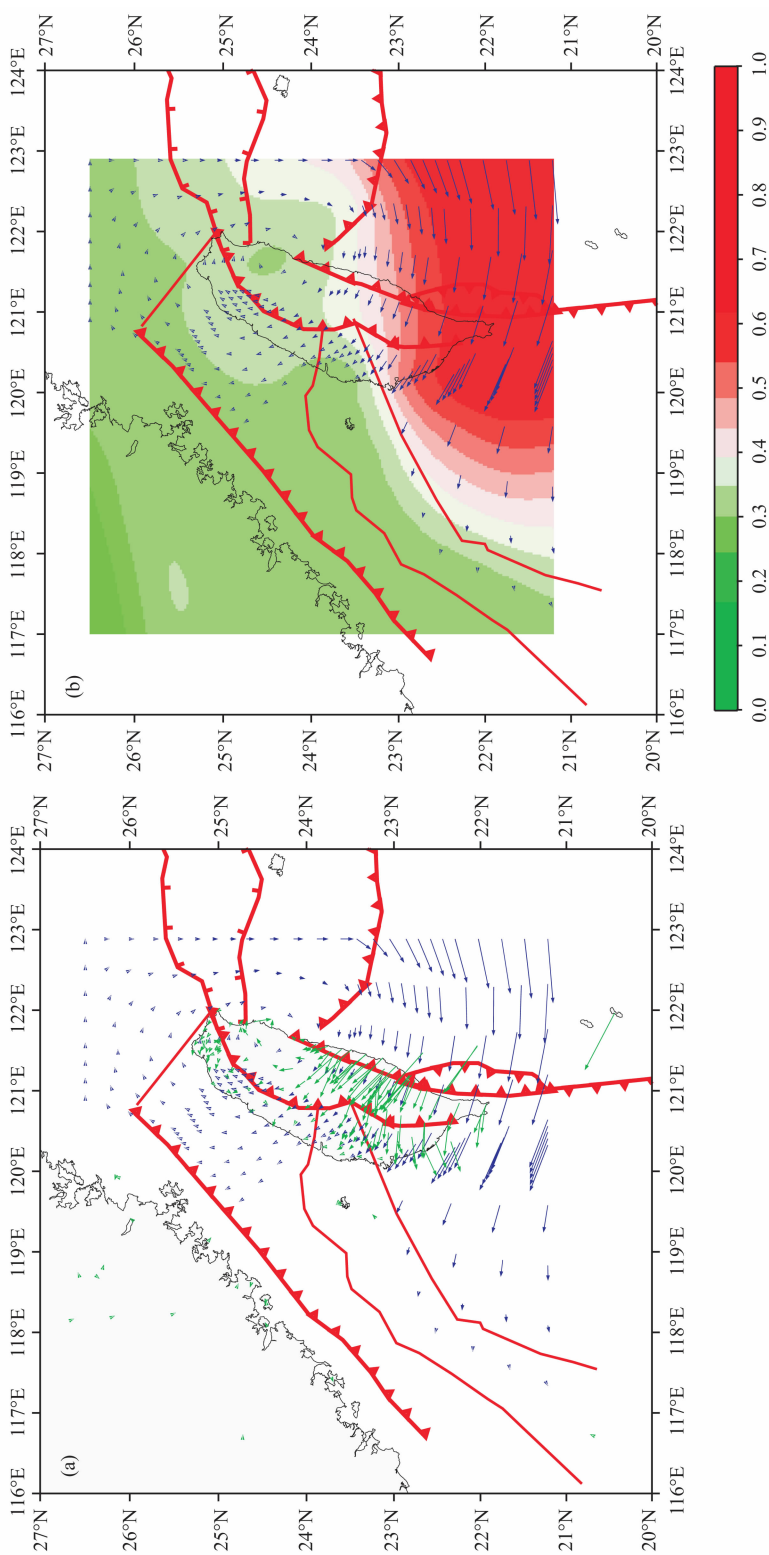


图4 研究区地表水平位移场(相对于欧亚大陆东南缘)

(a) GPS观测速度场(绿色箭头)与FEM模拟位移场(蓝色箭头)对比图; (b)水平位移场分布图(比例尺显示的是水平位移值与其最大值之比).

Fig. 4 Horizontal displacement field at the surface in the study area (relative to the Southeast margin of the Eurasian continental)

(a) Comparison between GPS observed velocity field (green arrows) and FEM predicted displacement field (blue arrows);

(b) Contour fill of the FEM predicted horizontal displacement field (the scale shows the ratio of horizontal displacement to their maximal value).

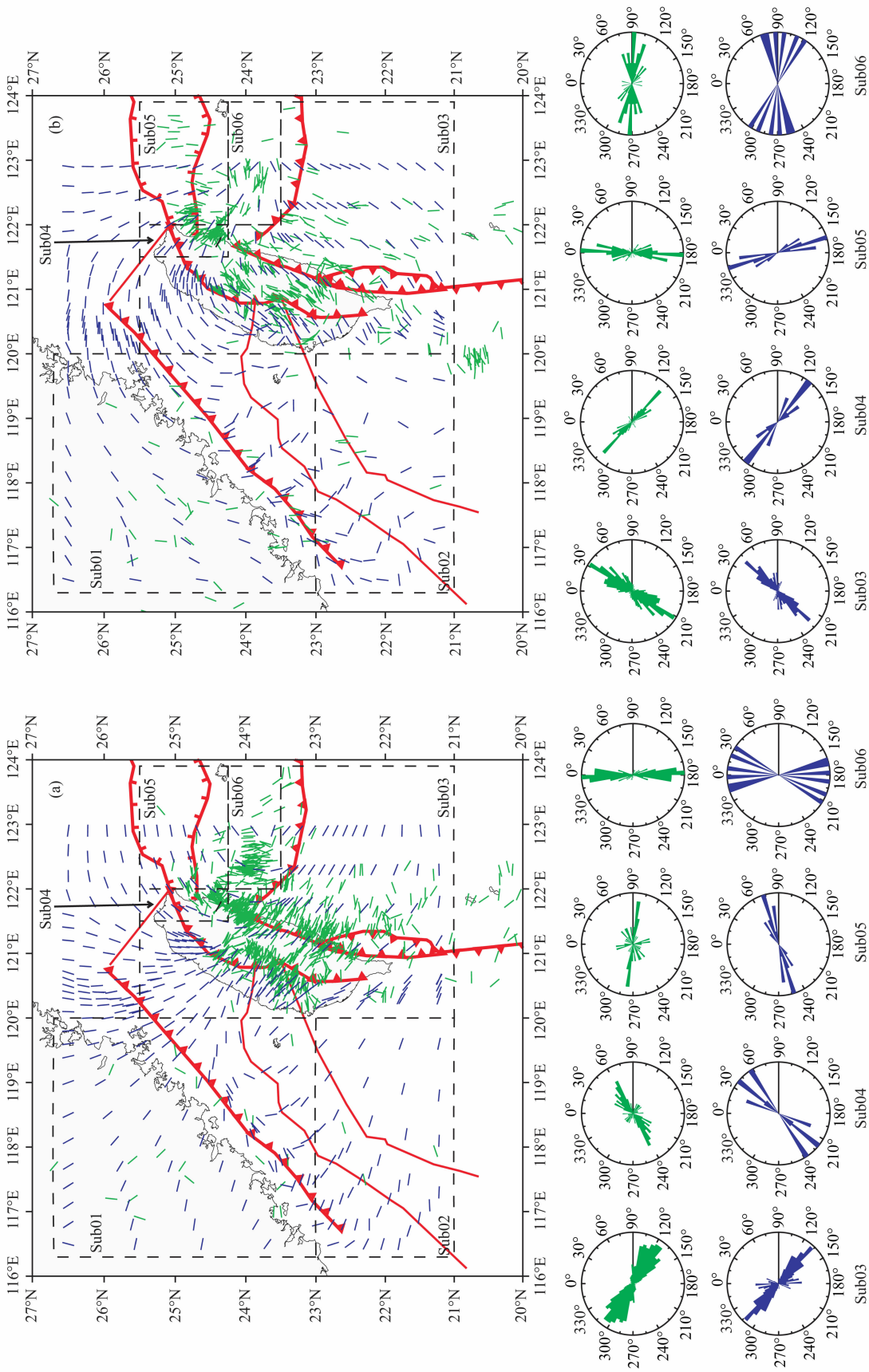


图5 研究区最大主应力(a)和最小主应力(b)方向分布图(绿线表示FMS结果, 蓝线表示FEM在5 km深度处的模拟结果)

Fig.5 Distribution of the directions of maximum principal stress (a) and minimum principal stress (b) in the study area (Green lines represent for the FMS results, blue lines for the FEM simulated results at 5 km depth)

速度场所反映的研究区地表运动特征及趋势基本吻合,大致都以 23°N 为界,在其以北地区水平位移场较弱,并大体以台湾东北部宜兰县为中心呈顺时针旋转(图 4);而在 23°N 以南地区水平位移场非常强烈,且整体呈逆时针旋转,但自东向西逐渐减弱,在东沙—澎湖—北港隆起的东南侧,其水平运动急剧减弱,且其西北地区的水平运动几近于静止(图 4). 这正体现了东沙—澎湖—北港隆起强度大于周边盆地地区而成为“阻挡带”,导致在其南北出现两个反向的构造逃逸区,且该隆起带东南区形变特别强烈,而其西北区则相对较弱.

虽然上述模拟结果与 GPS 观测结果所反映的运动趋势整体上基本一致,但在局部区域还是存在差异,例如台南屏东平原地区(图 4a). 这可能主要是由于屏东平原存在较复杂断层组合,其中主要有右旋的尺山断层、左旋的潮州断层、左旋的高屏断层、六龟断层、小岗山断层和高屏断层^[63-64],而本文的有限元模型中还未能考虑这些局部断层的复杂影响.

4.2 构造应力场

为更具体地分析各构造区块构造应力场分布特征,我们根据 FMS 获得的最大主应力(P)轴和最小主应力(T)轴分布的大体特征,将有 FMS 记录的区域分成如下六个区块:Sub01 区块主要包括华南大陆东南缘及台湾海峡西部,Sub02 区块主要为台西南盆地及其以西区域,Sub03 区块主要为台湾岛和菲律宾海板块,Sub04 区块为台湾岛东北部,Sub05 区块主要是冲绳海槽,Sub06 主要为琉球火山岛弧(图 5). 同时,为有效地约束 FEM 模拟结果,并且较好地反映研究区地壳水平构造应力场分布特征,我们只利用研究区震源深度在 40 km 以内,且 P 轴或 T 轴倾伏角在 30° 以内的 FMS 记录,表 4 为各区块 P 、 T 轴倾伏角在 30° 以内的 FMS 记录统计情况.

表 4 各区块 P 、 T 轴倾伏角在 30° 以内的 FMS 记录统计

Table 4 Statistics about the FMS recorders with plunge of P or T axis less than 30°

主应力	Sub01	Sub02	Sub03	Sub04	Sub05	Sub06
P 轴	21	3	432	62	32	114
T 轴	28	8	317	61	56	33

由表 4 各区块的 FMS 记录统计情况可知:Sub02 区块内的 FMS 记录非常少;而 Sub01 区块内 FMS 记录虽然达到 20 条以上,但其分布范围非常大,且该区域内收集到的天然地震震级大多在 4.0 以

下,这些震级较小的震源机制解所反映的 P 轴或 T 轴的参数误差相对较大,不适合用于构造应力场特征分析及约束 FEM 模拟结果. 因此,本文只对 Sub03—Sub06 四区块内的 FEM 模拟应力场与 FMS 所获取的构造应力场进行对比分析. 同时,为直观起见,我们将各区块内通过 FEM 模拟和 FMS 解算获得的 P 轴和 T 轴空间走向进行玫瑰花图对比分析(图 5).

由图 5 可知,无论是 FEM 模拟结果还是 FMS 解算结果,Sub03—Sub06 四区块内的 P 轴和 T 轴空间走向总体上吻合得非常好. 就整体而言,研究区最大、最小主应力方向分布较为规律:最大主应力(P 轴)方向在东北区呈顺时针旋转,而在南区呈逆时针旋转(图 5a);最小主应力(T 轴)方向主要呈现为 NE—SW 和 NEE—SWW 方向(图 5b). 但各区块内最大、最小主应力方向分布还是存在较大差异. 在台湾岛和菲律宾海板块(Sub03 区块), P 轴方向主要呈现 NWW—SEE 向(280° — 310°), T 轴方向则大致为 NE—SW 向(30° — 50°),往东北区,与这一区域水平位移场旋转特征类似, P 轴也出现了顺时针旋转,在台湾北部的宜兰地区(Sub04 区块), P 轴已经变为 NE—SW 向(40° — 60°),而 T 轴则已变为 NW—SE 向(305° — 315°),再往东到冲绳海槽(Sub05),其 P 轴已旋转至近 EW 向分布,而 T 轴方向由 NW—SE 向逐渐旋转至近 SN 向分布,这正揭示了菲律宾海板块沿琉球海沟向北俯冲导致琉球岛弧以北的冲绳海槽近南北向拉张裂开这一实际特性. 在琉球火山岛弧(Sub06), P 轴近 SN 向分布,而 T 轴则近 EW 向,而在台东纵谷一带,其 P 轴基本垂直于 NNE 向的台东纵谷,这体现了菲律宾海板块在向西北推进的过程中,与欧亚板块在琉球海沟一带发生近南北向俯冲碰撞,而在台东纵谷一带发生近东西向的强烈挤压碰撞.

5 结 论

上述计算结果虽然在局部区域和边界上与观测结果仍然存在一定的差异,但总体变化趋势基本一致. 通过对计算结果与观测结果的对比与分析,我们获得以下主要认识:

(1) 研究区最大主应力轴分布较为规律,在台湾海峡中部和台湾岛弧中部主要呈现为 NW—SE,在东北部呈顺时针旋转,而在南部呈逆时针旋转.

(2) 研究区水平位移场大致以 23°N 为界,在其

以北地区水平位移场较弱,但整体呈顺时针旋转,而在其以南地区非常强烈,且整体呈逆时针旋转,但自东向西逐渐减弱,在东沙—澎湖—北港隆起的东南侧,其水平运动急剧减弱,而其西北地区的水平运动几近于静止。

(3) 上述构造应力场和水平位移场特征,恰好反映了在菲律宾海板块向西北推进,并于台东纵谷和琉球海沟一带发生强烈碰撞的构造背景下,东沙—澎湖—北港隆起因强度大于周边盆地区而成为“阻挡带”,导致在其南北出现两个反向的构造逃逸区,且该隆起的东南区形变特别强烈,而其西北区则相对较弱。

本文模型忽略了各区块垂向差异,而将其视为等厚的弹性块体处理,通过赋给不同的弹性参数来表征它们在力学性质的差异;同时模型未考虑区内各断裂的空间产状和接触摩擦效应,虽然这些简化对计算结果的总体变化趋势上影响不是很大,但在一定程度上会丢失局部细节特征。因此,为获得与实际观测更为吻合的模拟结果,进一步考虑上述各因素,是我们今后的努力方向。

致 谢 国家地震局第一地形变监测中心 李延兴

研究员在本文的 GPS 数据处理过程中给予指导;中国科学院研究生院计算地球动力学重点实验室张怀副教授和台湾学者胡植庆在本文的数值模型建立过程中给予了有益意见和指导,并为本文初稿进行详细修改;台湾学者饶瑞钧和梁文宗在由震源机制解获取主应力轴参数工作中给予指导和建议;北京飞箭软件有限公司杨小军高级工程师在有限元计算过程中给予指导和帮助,在此一并致谢!同时也感谢审稿专家中肯的修改意见和建议,图 1、4 和 5 是利用 Generic Mapping Tools (GMT) (Wessel & Smith, 1995)绘制的。

参考文献 (References)

- [1] Barrier E, Angelier J. Active collision in eastern Taiwan: the Coastal Range. *Tectonophysics*, 1986, 125(1-3): 39-72.
- [2] Angelier J, Barrier E, Chu H T. Plate collision and paleostress trajectories in a fold-thrust belt: the Foothills of Taiwan. *Tectonophysics*, 1986, 125(1-3): 161-178.
- [3] Angelier J, Bergerat F, Chu H T, et al. Tectonic analysis and the evolution of a curved collision belt: the Hsüehshan Range, northern Taiwan. *Tectonophysics*, 1990, 183(1-4): 77-96.
- [4] Lee C T. Methods of stress analysis and paleostress changes in northern Taiwan due to arc-continent collision [Ph. D. thesis]. Taipei, China: Nat. Taiwan Univ., 1986.
- [5] Rocher M, Lacombe O, Angelier J, et al. Mechanical twin sets in calcite as markers of recent collisional events in a fold-and-thrust belt: evidence from the reefal limestones of Southwestern Taiwan. *Tectonics*, 1996, 15(5): 984-996.
- [6] Lacombe O, Angelier J, Chen H W, et al. Syndepositional tectonics and extension-compression relationships at the front of the Taiwan collision belt: A case study in the Pleistocene reefal limestones near Kaohsiung, SW Taiwan. *Tectonophysics*, 1997, 274(1-3): 83-96.
- [7] Suppe J. Kinematics of arc-continent collision, flipping of subduction, and back-arc spreading near Taiwan. *Mem. Geol. Soc. China*, 1984, 6: 21-33.
- [8] Yeh Y H, Barrier E, Lin C H, et al. Stress tensor analysis in the Taiwan area from focal mechanisms of earthquakes. *Tectonophysics*, 1991, 200(1-3): 267-280.
- [9] Letouzey J, Kimura M. Okinawa trough genesis: structure and evolution of a backarc basin developed in a continent. *Marine and Petroleum Geology*, 1985, 2(2): 111-130.
- [10] Liu C C, Yu S B. Vertical crustal movements in eastern Taiwan and their tectonic implications. *Tectonophysics*, 1990, 183(1-4): 111-119.
- [11] 刘序俨, 林继华, 王志鹏等. 福建沿海地壳运动与 GPS 测量结果初步分析. 地壳形变与地震, 1999, 19(3): 40-47.
- Liu X Y, Lin J H, Wang Z P, et al. Primary analysis of the crustal movement and GPS observation data in Fujian coast. *Crustal Deformation and Earthquake* (in Chinese), 1999, 19(3): 40-47.
- [12] 伍绍祖, 丁学仁, 李祖宁等. 福建地区现今地壳运动变化特征研究. 华南地震, 2005, 25(3): 87-94.
- Wu S Z, Ding X R, Li Z N, et al. A study on the variation characteristics of modern crustal movement in Fujian. *South China Journal of Seismology* (in Chinese), 2005, 25(3): 87-94.
- [13] Yu S B, Chen H Y, Kuo L C. Velocity field of GPS stations in the Taiwan area. *Tectonophysics*, 1997, 274(1-3): 41-59.
- [14] Yu S B, Kuo L C, Punongbayan R S, et al. GPS observation of crustal deformation in Taiwan-Luzon region. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(7): 923-926.
- [15] 邵占英, 刘经南, 姜卫平等. 高精度 GPS 观测及其在福建东南沿海地壳形变研究中的应用. 地壳形变与地震, 1999, 19(4): 39-44.
- Shao Z Y, Liu J N, Jiang W P, et al. High precise GPS observation and its application to the crustal deformation studies in southeast coast of Fujian province. *Crustal Deformation and Earthquake* (in Chinese), 1999, 19(4): 39-44.
- [16] 周硕愚, 吴云, 秦小军等. 基于多种 GPS 数据研究福建及其邻近海域 1994—1997 年地壳水平运动. 地球物理学报, 2000, 43(4): 471-479.
- Zhou S Y, Wu Y, Qin X J, et al. Study on the crustal horizontal movement in Fujian and its neighbouring sea region

- in 1994 to 1997 based on several kinds of GPS surveying data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2000, 43(4): 471-479.
- [17] 周硕愚, 吴云, 施顺英等. 中国大陆东南边缘海现时地壳运动与地震动力学综合研究. *地壳变形与地震*, 2001, 21(1): 1-14.
Zhou S Y, Wu Y, Shi S Y, et al. Integrated research on current crustal movement and earthquake dynamics in marginal sea, southeast of China continent. *Crustal Deformation and Earthquake* (in Chinese), 2001, 21(1): 1-14.
- [18] 刘与锬, 郭逢英, 陈兆煌等. 福建省现代地壳垂直运动与断裂活动. *地壳形变与地震*, 1998, 18(4): 68-73.
Liu Y K, Guo F Y, Chen Z H, et al. Recent crustal vertical movement and fault activity of Fujian province. *Crustal Deformation and Earthquake* (in Chinese), 1998, 18(4): 68-73.
- [19] 丁学仁, 林继华, 刘序俨等. 福建沿海、台湾海峡 GPS 观测分析及地球动力学特征研究. *华南地震*, 2002, 22(2): 16-23.
Ding X R, Lin J H, Liu X Y, et al. The observation and analysis of GPS and the study of the geodynamic characteristic of the coast of Fujian and Taiwan Strait. *South China Journal of Seismology* (in Chinese), 2002, 22(2): 16-23.
- [20] 李延兴, 胡新康, 帅平等. 中国大陆地壳水平运动统一速度场的建立与分析. *地震学报*, 2001, 23(5): 453-459.
Li Y X, Hu X K, Shuai P, et al. Establishment analysis of the unified horizontal crustal velocity fields on the China continent. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2001, 23(5): 453-459.
- [21] 李延兴, 黄斌, 胡新康等. 板内块体的刚性弹塑性运动模型与中国大陆主要块体的应变状态. *地震学报*, 2001, 23(6): 565-572.
Li Y X, Huang C, Hu X K, et al. The rigid and elastic-plastic model of the blocks in intro-plate and strain status of principal blocks in the continent of China. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2001, 23(6): 565-572.
- [22] 李延兴, 胡新康, 李智等. 台海地区的地壳运动与变形. *地震学报*, 2002, 24(5): 487-495.
Li Y X, Hu X K, Li Z, et al. Crustal movement and deformation in Taiwan and its coastal area. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2002, 24(5): 487-495.
- [23] 李延兴, 张静华, 李智等. 由 GPS 网融合得到的中国大陆及周边地区的地壳水平运动. *测绘学报*, 2003, 32(4): 301-307.
Li Y X, Zhang J H, Li Z, et al. Horizontal crustal movement in China's mainland and its surrounding areas obtained from the combined GPS network. *Acta Geodaetica Et Cartographic Sinica* (in Chinese), 2003, 32(4): 301-307.
- [24] 李延兴, 李智, 张静华等. 中国大陆及周边地区的水平应变场. *地球物理学报*, 2004, 47(2): 222-231.
Li Y X, Li Z, Zhang J H, et al. Horizontal strain field in the Chinese mainland and its surrounding areas. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(2): 222-231.
- [25] 顾国华, 张晶, 王武星. 中国地壳运动观测网络 GPS 观测得到的地壳运动结果. *测绘通报*, 2005, (7): 1-7.
Gu G H, Zhang J, Wang W X. Crustal movement result from GPS observations of China Crustal Movement Observation Network. *Bulletin of Surveying and Mapping* (in Chinese), 2005, (7): 1-7.
- [26] Ching K E, Rau R J, Lee J C, et al. Contemporary deformation of tectonic escape in SW Taiwan from GPS observations, 1995—2005. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 262(3-4): 601-619.
- [27] Hou C S, Hu J C, Ching K E, et al. The crustal deformation of the Ilan Plain acted as a westernmost extension of the Okinawa Trough. *Tectonophysics*, 2008, 466(3-4): 344-355.
- [28] Huchon P, Barrier E, de Breaecker J C, et al. Collision and stress trajectories in Taiwan: a finite element model. *Tectonophysics*, 1986, 125(1-3): 179-191.
- [29] 詹文欢, 钟建强, 丘学林. 南海及邻区现代构造应力场与形成演化. 北京: 科学出版社, 1993.
Zhan W H, Zhong J Q, Qiu X L. The Modern Tectonic Stress Field and Its Evolution in South China Sea and Its Adjacent Areas (in Chinese). Beijing: Science Press, 1993.
- [30] 詹文欢. 南海西北部现代活动构造及其生态环境灾害. 北京: 科学出版社, 2004: 51-69.
Zhan W H. Modern Active Tectonics and Environmental Disaster of Northwestern South China Sea (in Chinese). Beijing: Science Press, 2004: 51-69.
- [31] 刘以宣. 南海新构造与地壳稳定性. 北京: 科学出版社, 1994.
Liu Y X. Neotectonics and Crustal Stability of South China Sea (in Chinese). Beijing: Science Press, 1994.
- [32] 丁原章, 黄新辉. 华南滨海断裂带地震危险性的数学模拟. *华南地震*, 1995, 15(1): 12-20.
Ding Y Z, Huang X H. Mathematical simulation after the seismic risk on the coastal fault zone in the South China Sea. *South China Journal of Seismology* (in Chinese), 1995, 15(1): 12-20.
- [33] Hu J C, Angelier J, Lee J C, et al. Kinematics of convergence, deformation and stress distribution in the Taiwan collision area; 2-D finite-element numerical modeling. *Tectonophysics*, 1996, 255(3-4): 243-268.
- [34] Hu J C, Angelier J. Modeling of stress-deformation relationships in a collision belt: Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 1996, 7(4): 447-465.
- [35] Hu J C, Angelier J, Yu S B. An interpretation of the active deformation of southern Taiwan based on numerical simulation and GPS studies. *Tectonophysics*, 1997, 274(1-3): 145-169.
- [36] Hu J C, Yu S B, Angelier J, et al. Active deformation of Taiwan from GPS measurements and numerical simulations. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106(B2): 2265-2280.

- [37] Hu J C, Angelier J. Stress permutations: Three-dimensional distinct element analysis accounts for a common phenomenon in brittle tectonics. *J. Geophys. Res.*, 2004, 109, B09403, doi: 10.1029/2003JB002616.
- [38] Ru K, Pigott J D. Episodic rifting and subsidence in the South China Sea. *AAPG Bulletin*, 1986, 70(9): 1136-1155.
- [39] Taylor B, Hayes D E. Origin and history of the South China sea Basin. // Hayes D E ed. *The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands: Part 2. Geophys. Monogr. Ser.*, 1983, 23: 89-104.
- [40] Briais A, Patriat P, Tapponnier P. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the South China Sea: Implications for the Tertiary tectonics of Southeast Asia. *J. Geophys. Res.*, 1993, 98(B4): 6299-6328.
- [41] Teng L S, Lin A T. Cenozoic tectonics of the China continental margin: insights from Taiwan. *Geological Society, London, Special Publications*, 2004, 226(1): 313-332.
- [42] Bachman S B, Lewis S D, Schweller W J. Evolution of a forearc basin, Luzon Central Valley, Philippines. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1983, 67(7): 1143-1162.
- [43] Teng L S. Geotectonic evolution of late Cenozoic arc-continent collision in Taiwan. *Tectonophysics*, 1990, 183(1-4): 57-76.
- [44] Yu H S, Chou Y W. Characteristics and development of the flexural forebulge and basal unconformity of Western Taiwan foreland basin. *Tectonophysics*, 2001, 333(1-2): 277-291.
- [45] Lin A T, Watts A B, Hesselbo S P. Cenozoic stratigraphy and subsidence history of the South China Sea margin in the Taiwan region. *Basin Research*, 2003, 15(4): 453-478.
- [46] Huang C Y, Yuan P B, Tsao S J. Temporal and spatial records of active arc-continent collision in Taiwan: A synthesis. *GSA Bulletin*, 2006, 118(3-4): 274-288.
- [47] Lee C S, Shor G G, Bibee L D, et al. Okinawa Trough: Origin of a back-arc basin. *Marine Geology*, 1980, 35(1-3): 219-241.
- [48] Letouzey J, Kimura M. The Okinawa Trough: Genesis of a back-arc basin developing along a continental margin. *Tectonophysics*, 1986, 125(1-3): 209-230.
- [49] 黄慈流, 苏达权, 陈汉宗等. 台湾海峡西部地质、地球物理和地球化学综合调查研究. 厦门: 厦门大学出版社, 1997.
- Huang C L, Su D Q, Chen H Z, et al. *The Comprehensive Investigation and Study on Geology, Geophysics and Geochemistry in the Western Taiwan Strait (in Chinese)*. Xiamen: Xiamen University Press, 1997.
- [50] 中国科学院南海海洋研究所台湾海峡课题组, 福建海洋研究所台湾海峡课题组. 台湾海峡西部石油地质地球物理调查研究. 北京: 海洋出版社, 1989.
- South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Fujian Oceanic Institute. *The Investigation and Study on Petroleum Geology and Geophysics in the Western Taiwan Strait (in Chinese)*. Beijing: Ocean Press, 1989.
- [51] 高天钧, 黄辉. 台湾海峡地质构造特征及演化. *地质学报*, 1994, 68(3): 197-207.
- Gao T J, Huang H. Tectonic characteristics and evolution of the Taiwan Strait. *Acta Geologica Sinica (in Chinese)*, 1994, 68(3): 197-207.
- [52] 杨肖琪, 宋文隆, 陈承惠. 台湾海峡地质构造特征. *台湾海峡*, 1996, 15(2): 127-136.
- Yang X Q, Song W L, Chen C H. Characteristics of geological structure in Taiwan Strait. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait (in Chinese)*, 1996, 15(2): 127-136.
- [53] 刘振湖, 王英民, 王海荣. 台湾海峡盆地的地质构造特征及演化. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(5): 69-75.
- Liu Z H, Wang Y M, Wang H R. Characteristics and evolutions of geologic structures in the Taiwan Strait Basin. *Marine Geology & Quaternary Geology (in Chinese)*, 2006, 26(5): 69-75.
- [54] 郝天珧, 刘建华, 郭锋等. 冲绳海槽地区地壳结构与岩石层性质研究. *地球物理学报*, 2004, 47(3): 462-468.
- Hao T Y, Liu J H, Guo F, et al. Research on crustal structure and lithosphere property in the Okinawa trough area. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2004, 47(3): 462-468.
- [55] 江为为, 刘少华, 郝天珧等. 应用重力资料估算东海冲绳海槽地壳厚度. *地球物理学进展*, 2002, 17(1): 35-41.
- Jiang W W, Liu S H, Hao T Y, et al. Using gravity data to compute crustal thickness of East China Sea and Okinawa Trough. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 2002, 17(1): 35-41.
- [56] 韩波, 张训华, 裴建新等. 东海及其邻域壳-幔结构与展布特征. *地球物理学进展*, 2007, 22(2): 376-382.
- Han B, Zhang X H, Pei J X, et al. Characteristics of crust-mantle in East China Sea and adjacent regions. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 2007, 22(2): 376-382.
- [57] 王椿镛, 陈运泰, 邵占英. 中国东南陆缘的深部结构与动力学过程. *地壳变形与地震*, 1998, 18(2): 1-8.
- Wang C Y, Chen Y T, Shao Z Y. Deep structure and its geodynamics in southeast continental margin of China. *Crustal Deformation and Earthquake (in Chinese)*, 1998, 18(2): 1-8.
- [58] 何廉声, 陈邦彦. 南海地质构造图: 南海地质地球物理图集. 广州: 广东地图出版社, 1987.
- He L S, Chen B Y. *The Tectonic Map: the South China Sea Geological and Geophysical Atlas (in Chinese)*. Guangzhou: Guangdong Cartographic Press, 1987.
- [59] 梁锡武, 高德章, 喻普之等. 中国东海及邻近海域一条剖面的地壳速度结构研究. *地球物理学进展*, 2001, 16(2): 28-34.
- Luan X W, Gao D Z, Yu P Z, et al. The crust velocity structure of a profile in the area of East China Sea and its vicinity. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 2001, 16(2):

- 28-34.
- [60] 林纪曾, 梁国昭, 赵毅等. 东南沿海地区的震源机制与构造应力场. *地震学报*, 1980, 2(3): 245-257.
Lin J Z, Liang G Z, Zhao Y, et al. Focal mechanism and tectonic stress field of coastal southeast China. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1980, 2(3): 245-257.
- [61] 魏柏林, 冯绚敏, 陈定国等. 东南沿海地震活动特征. 北京: 地震出版社, 2001: 425-457.
Wei B L, Feng X M, Chen D G, et al. Characteristics of Seismic Activity in Southeast Coast Area (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2001: 425-457.
- [62] 康英, 杨选, 吕金水等. 广东及邻区地震的震源机制特征. *中国地震*, 2005, 21(3): 320-331.
Kang Y, Yang X, Lü J S, et al. Characteristics of focal mechanism in the Guangdong and its adjacent areas. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 2005, 21(3): 320-331.
- [63] Shyu J B H, Sieh K, Chen Y G, et al. Neotectonic architecture of Taiwan and its implications for future large earthquakes. *J. Geophys. Res.*, 2005, 110: B08402, doi: 10.1029/2004JB003251.
- [64] Hu J C, Hou C S, Shen L C, et al. Fault activity and lateral extrusion inferred from velocity field revealed by GPS measurements in the Pingtung area of southwestern Taiwan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2007, 31(3): 287-302.

(本文编辑 何 燕)