

ISSN 0253-3782

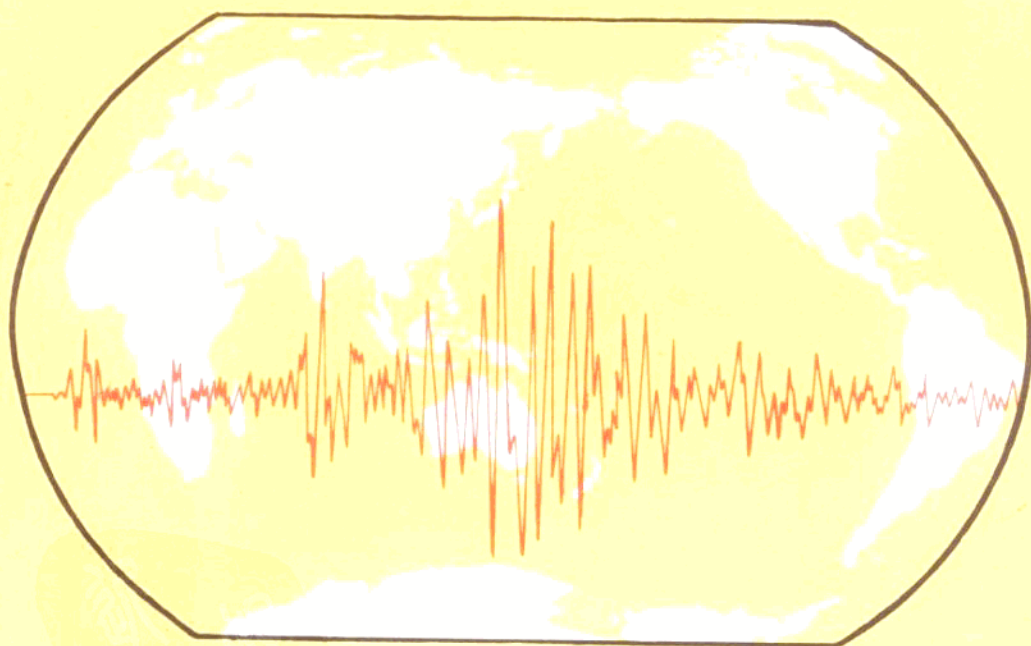
第 21 卷

第 2 期

1999 年

# 地震学报

ACTA  
SEISMOLOGICA  
SINICA



ISSN 0253-3782



中国地震学会主办

地震学报期刊社出版

# 地震学报

中文版

第 21 卷 第 2 期

## 目 次

|                                          |                           |
|------------------------------------------|---------------------------|
| 地震矩张量反演在地震快速反应中的应用 .....                 |                           |
| ..... 刘瑞丰 陈运泰 周公威 涂毅敏 陈培善                | (115)                     |
| 中国大陆及其周边地区构造应力场的数值计算及其在地震活动性解释上的应用 ..... |                           |
| ..... 焦明若 张国民 车 时 刘 杰                    | (123)                     |
| 中国大陆岩石层动力学数值模型的边界条件 .....                | 张东宁 许忠淮 (133)             |
| 华北地区三维构造应力场 .....                        | 陈连旺 陆远忠 张 杰 许桂林 郭若眉 (140) |
| 云南三次强震前后环境剪应力场动态变化 .....                 | 王绍晋 龙晓帆 (150)             |
| 唐山、邢台地震序列特征与三维速度结构的关系 .....              |                           |
| ——兼论强震群型地震的预测问题 .....                    | 梅世蓉 薛 艳 尹京苑 (159)         |
| 地震活动性参数的数理基础、相关性及筛选 .....                | 程万正 (166)                 |
| 云南丽江峡谷的场地放大 .....                        |                           |
| ..... 李白基 秦嘉政 罗娉华 叶建庆 陈敏恭 蔡绍平 刘学军        | (175)                     |
| 地电阻率各向异性度的动态演化图象与地震孕育过程 .....            |                           |
| ..... 毛桐恩 胥广银 范思源 赵 明 孙景芳                | (180)                     |
| 地电中期前兆异常特征及其对强震中期趋势的判断 .....             |                           |
| ..... 王志贤 张学民 李永庆 李玉春 李洪流                | (187)                     |
| 张北-尚义地震的地下流体异常场及其成因分析 .....              | 车用太 鱼金子 刘五洲 易立新 (194)     |
| 多维观测系统的地震综合信息提取 .....                    | 杜 方 程万正 吴 江 吴碧春 (202)     |
| [研究简报]                                   |                           |
| 华北地区地震学指标的定量对比筛选及其综合预报方法研究 .....         |                           |
| ..... 周翠英 朱元清 王红卫 梁凯莉 李 平 郭爱香            | (208)                     |
| 动态损伤 $D(t)$ 及其作为地震活动状态量的物理意义 .....       | 程万正 (214)                 |
| 故障诊断法在地震预报中的应用 .....                     | 戴英华 刘永强 孙佩卿 (218)         |
| * * *                                    |                           |
| 全球大震和中国及邻区中强地震活动(1998 年 10~11 月) .....   | 陈培善 (222)                 |
| 征稿简则 .....                               | ( I )                     |

## 前 言

中国地震局“九五”地震预报攻关项目“强地震预测预报技术研究”的子专题研究已近尾声，许多子专题取得了可喜的进展。为集中展示这些成果，同时也为科研人员和广大地震工作者提供相互借鉴和交流的园地，我们组织了 15 篇“九五”攻关研究较优秀的论文发表在本期《地震学报》。

“九五”地震预报攻关研究，既是对“六五”、“七五”乃至“八五”攻关成果的继承和清理，也是以往工作的延续和拓展。由经验型或称统计型地震预报向物理型地震预报迈进，是老一代地震预报工作者矢志不移的奋斗目标；在新世纪的曙光中，更应是新一代地震预报工作者义不容辞的责任。随着观测资料的日益丰富、高新技术的引入和计算机软、硬件功能的飞速发展，在地震科技工作者的不懈努力下，“九五”攻关研究一定能够加深我们对地震的孕育和发生过程的认识，并将地震预报的水平提高到新的高度。

中国地震局监测预报司

## 序

中国地震局从 80 年代初期至今,对“地震预报”这一科学难题已经精心组织 4 次攻关性的大型科学研究,从“六五”计划开始的清理攻关、“七五”的实用化攻关、“八五”的短临预报攻关,到目前“九五”正在进行的中短期(一年尺度)的攻关,其主攻目标各有侧重、各具特色。前 3 次攻关研究都出版了相应的论文集或专著:《地震监测与预报方法清理成果汇编》、《地震预报方法实用化研究文集》、《地震短临预报的理论与方法——‘八五’攻关三级课题论文集》、《大陆地震预报的方法和理论——中国‘八五’地震预报研究进展》。这些论文成果不仅为第一线分析预报人员提供了强有力的“武器”支持,为地震预报注入了新的内容,推动了中国地震预报的深入发展,而且也为世界性的科学前沿——地震预报科学的发展增添了新的色彩。

中国地震局“九五”重点攻关项目“强地震预测预报技术研究”也是“九五”国家科技攻关项目,它的主攻目标是,一年尺度的中短期预报方法和理论的研究,经过二年多的努力,先期组织的 100 多项子专题已经取得了丰硕成果。其中,中短期前兆识别准则和评价研究、强震孕育中短期特征的研究及实用化、判断中短期地震危险区动态场及其跟踪方法研究等取得了重要或重大进展,为实现该项目的总目标打下了坚实基础。

中国地震局预测预防司现将已完成的部分较优秀论文分别在《中国地震》、《地震学报》、《地震》等杂志集中发表,为科技人员提供最新研究成果和广泛的交流,加快成果的推广应用,以便更好地发展有中国特色的地震预报科学,为人类的防震减灾事业做出我们应有的贡献。

# 地震矩张量反演在地震快速反应中的应用<sup>\*</sup>

刘瑞丰 陈运泰 周公威 涂毅敏 陈培善

(中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所)

**摘要** 利用地震矩张量反演的方法,对 1996 年 11 月~1998 年 1 月发生于我国境内的 10 次  $M_s \geq 5.2$  地震的震源机制进行了快速测定,并以“地震震源参数简报”的形式将测定结果及时发送中国地震局震情值班室和有关省地震局,在大震的快速反应中发挥了作用。

**关键词** 地震矩张量 反演 震源机制 断层面解 地震监测

## 引言

中等以上地震( $M_s > 5.0$ )发生后,地震监测预报部门最紧迫的工作,就是在尽可能短的时间内定出发震时刻、震源位置(经度、纬度、深度)和震级,并判断震情发展趋势。一般情况下,我国的地震速报台网可以对国内  $M_s \geq 5.0$ 、中国邻区  $M_s \geq 6.0$  地震,在地震发生后半小时左右定出发震时刻、震源位置和震级,而震情的发展趋势则需要对许多的资料进行综合分析判断后才能得出。在对震情发展趋势的判断中,震源机制解是一项重要的资料。快速测定中等以上地震的震源机制,对于地震快速反应、减轻地震灾害具有实际意义。

震源机制可以用 P 波初动法来确定,但用这种方法精确测定震源机制,必须用大量台站的 P 波初动符号。如果是模拟记录,则收集资料所需的时间就比较长,不适宜在大地震的快速反应中应用。

1974 年以来,利用数字地震资料测定震源机制的研究工作得到了迅速的发展。80 年代以后,有些方法已可以快速地确定中等以上地震的地震矩张量和震源的其它动力学参数。如哈佛大学(HRV)的 Dziewonski 等(1981,1983,1992)和美国地质调查局(USGS)的 Sipkin 等(1982,1986)把中强地震的地震矩张量、断层面解、主应力轴的方位、倾角和标量地震矩等参数,连同地震的时、空、强参数,作为地震的基本参数在地震报告中列出。对于 5.8 级以上地震,他们在震后大约两个多小时就可以得出结果,并快速地把测定的结果通过电子邮件的方式发往世界各地。这些资料在分析强震的震源机制和成因、预测强地震发生时地面的应力状态和运动情况以及判断震情的发展趋势等方面发挥了重要的作用。

我国在 80 年代初期引进了数字地震仪。迄今,中美合作的中国数字化地震台网(CDSN)已正常运行了 10 多年(周公威等,1997)。利用数字地震资料(包括 CDSN 资料),

<sup>\*</sup> 中国地震局“九五”重点项目(95-01-01-11),中国地震局地球物理研究所论著 99AC1018。  
1998-05-08 收到初稿,1998-09-11 决定采用。

许多研究者进行了测定地震矩张量的研究工作<sup>①</sup>(陈运泰等, 1994; 倪江川, 1991; 方韶东, 陈培善, 1993; 姚振兴等, 1994; 许力生等, 1997; 刘瑞丰等, 1997). 在我国, 地震矩张量反演工作亟待从研究工作向常规处理阶段转化.

针对我国地震工作的实际需要和 CDSN 台站波形数据的传输情况, 我们把线性反演地震矩张量的方法应用于大震快速反应中. 自从 1996 年 11 月以来, 我们对发生在我国境内的 10 次地震, 进行了地震矩张量的快速反演. 其中有些地震是在因特网(Internet)尚未给出结果之前, 即向中国地震局震情值班室和有关省地震局进行了速报, 为快速判断震后趋势提供了科学依据, 也为确定应力场方向和判断断层的活动类型提供了约束, 在大震快速反应中起到了良好的作用.

## 1 方法概述

一般类型的地震震源所产生的位移场可表示为(Aki, Richard, 1980)

$$U_n = M_{ij}G_{m,j} \quad (n, i, j = 1, 2, 3) \quad (1)$$

式中,  $U_n$  为在场点  $n$  方向质点的位移,  $M_{ij}$  为地震矩张量的分量. 地震作为一种内源, 应满足净力和净力矩为零的条件, 所以地震矩张量是一对称张量, 有 6 个独立分量.  $G_{m,j}$  为在直角坐标系中格林函数  $G_m$  对震源坐标  $j$  分量的微商, 在物理上等效于在源点的力偶  $(i, j)$  在场点产生的  $n$  方向的位移. 对于力的 3 个分量和 3 个可能的力臂方向, 有 9 个力偶, 因此, 对于一般的地震点源的等效力, 可表示为 9 个力偶组合.

在圆柱坐标系下, 一般类型的地震点源的垂向  $z$ 、径向  $r$  和切向  $\theta$  的位移表达式为

$$\begin{cases} w_z(t) = \frac{1}{4\pi\rho} \frac{d}{dt} [D(t) \sum_{m=0}^2 A_m W_m(t)] \\ q_r(t) = \frac{1}{4\pi\rho} \frac{d}{dt} [D(t) \sum_{m=0}^2 A_m Q_m(t)] \\ v_\theta(t) = \frac{1}{4\pi\rho} \frac{d}{dt} [D(t) \sum_{m=0}^2 A_m V_m(t)] \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} A_0 = \frac{1}{2} M_{33} \\ A_1 = -(M_{13} \cos\theta + M_{23} \sin\theta) \\ A_2 = M_{11} \cos^2\theta + M_{22} \sin^2\theta + M_{12} \sin 2\theta \\ A_4 = M_{13} \sin\theta - M_{23} \cos\theta \\ A_5 = -\frac{1}{2} (M_{11} - M_{22}) \sin 2\theta + M_{12} \cos 2\theta \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $D(t)$  为震源时间函数的微商,  $W_m(t)$ 、 $Q_m(t)$  和  $V_m(t)$  分别是由力偶  $(i, j)$  线性组合构成的在圆柱坐标系中的垂向、径向和切向介质响应, 即格林函数;  $\rho$  为震源处介质的密度. 在利用广义射线理论计算远场的 P 波格林函数时, 要采用初动近似解或高频渐近解. 在这种近似条件下, 可合并一些解答形式相同的格林函数, 令

① 陈运泰, 顾浩鼎. 1990. 震源物理. 中国地震局地球物理研究所, 中国科技大学研究生院教材.

$$M = (M_{11}, M_{12}, M_{13}, M_{22}, M_{23}, M_{33})^T = (M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_6)^T$$

以垂直向为例,由式(2)得

$$w_z(t) = \sum_{m=1}^6 C_m(\theta, t) M_m \quad (4)$$

这样,我们就可以把位移表达式(2)变成关于地震矩张量的线性方程组。利用不同震中距、不同方位角的观测资料  $O(t, \theta)$ , 就可以得到线性方程

$$CM = O \quad (5)$$

式中,  $C$  是  $N \times 6$  矩阵,  $M$  是  $6 \times 1$  矩阵,  $O$  是  $N \times 1$  矩阵,  $N$  是观测资料的采样点个数。

我们利用矩张量与观测资料的上述线性关系,首先利用奇异值分解法解方程(5),反演出地震矩张量,然后求其本征值,最后得到有关的震源参数。

## 2 速报结果

### 2.1 资料

我们利用中国数字化地震台网(CDSN)的长周期垂直向 P 波资料,对南黄海地震、新疆伽师地震序列、西藏玛尼地震、河北张北地震进行了震源机制的快速测定。由地球物理研究所九室测定的地震基本参数如表 1 所示。

表 1 地震基本参数

| 编号 | 日期<br>年-月-日 | 发震时刻<br>时:分:秒 | 震中位置                   |                        | 震级<br>$M_s$ | 震源深度<br>/ km | 参考地区 |
|----|-------------|---------------|------------------------|------------------------|-------------|--------------|------|
|    |             |               | $\varphi_N / (^\circ)$ | $\lambda_E / (^\circ)$ |             |              |      |
| 1  | 1996-11-09  | 21:56:06.7    | 31.76                  | 123.25                 | 6.1         | 29           | 南黄海  |
| 2  | 1997-01-21  | 09:47:14.5    | 39.38                  | 76.94                  | 5.9         | 19           | 新疆伽师 |
| 3  | 1997-03-01  | 14:04:14.8    | 39.39                  | 76.85                  | 5.5         | 23           | 新疆伽师 |
| 4  | 1997-04-06  | 07:46:19.1    | 39.60                  | 76.82                  | 5.9         | 32           | 新疆伽师 |
| 5  | 1997-04-06  | 12:36:23.3    | 39.44                  | 77.02                  | 6.1         | 20           | 新疆伽师 |
| 6  | 1997-04-11  | 13:34:42.9    | 39.46                  | 76.96                  | 6.3         | 16           | 新疆伽师 |
| 7  | 1997-04-13  | 05:09:09.3    | 39.39                  | 76.94                  | 5.2         | 21           | 新疆伽师 |
| 8  | 1997-04-16  | 02:19:10.2    | 39.59                  | 77.01                  | 6.0         | 23           | 新疆伽师 |
| 9  | 1997-11-08  | 18:03:02.6    | 35.90                  | 87.50                  | 7.5         | 10           | 西藏玛尼 |
| 10 | 1998-01-10  | 11:50:39.0    | 41.10                  | 114.30                 | 6.2         | 10           | 河北张北 |

### 2.2 速报结果

这 10 次地震的波形拟合结果如图 1~10 所示,每组曲线上面的粗线为地震记录,下面的细线为合成地震图,曲线右侧的两个数为记录图和合成图峰值的数字数,左侧的数为相关系数。下半球等面积投影图中粗实线表示矩张量解的节面,细实线表示最佳双力偶的节面。表 2 列出了由矩张量解求得的震源参数。其中,  $A$ ,  $P$  ( $T$  轴、 $B$  轴和  $P$  轴)表示的是方位角和倾角;  $\theta$ ,  $\delta$  和  $\lambda$  分别为最佳双力偶节面 1 和节面 2 的方位角、倾角和滑动角。

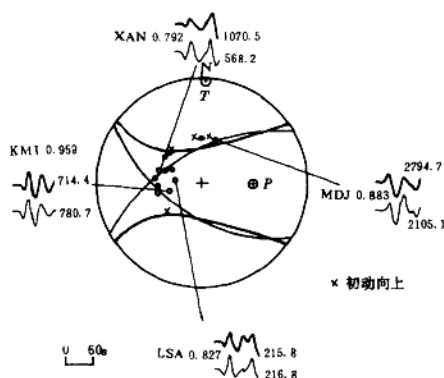


图 1 1996 年 11 月 9 日南黄海地震 P 波长周期记录与合成地震图的比较, 这次地震用了 16 个台的数据, 其中有 12 个台的模拟记录的初动资料

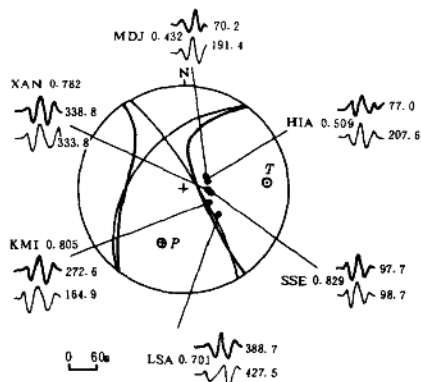


图 2 1997 年 1 月 21 日新疆伽师地震 P 波长周期记录与合成地震图的比较

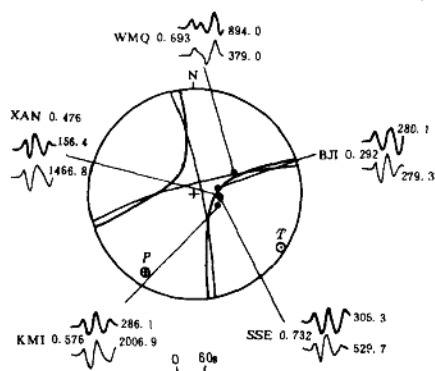


图 3 1997 年 3 月 1 日新疆伽师地震 P 波长周期记录与合成地震图的比较

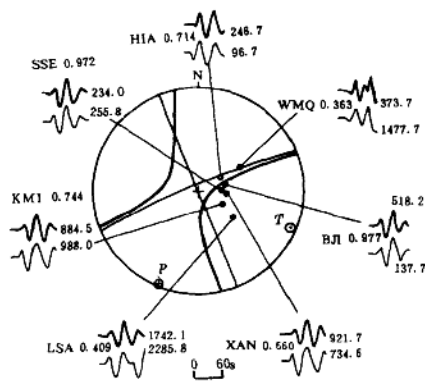


图 4 1997 年 4 月 6 日 7 时新疆伽师地震 P 波长周期记录与合成地震图的比较

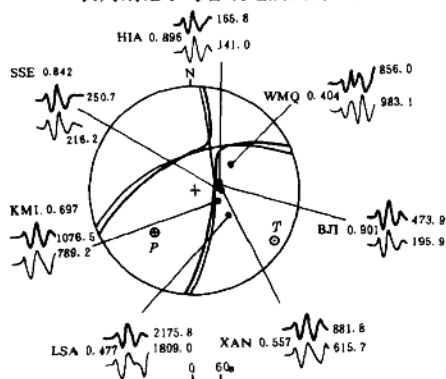


图 5 1997 年 4 月 6 日 12 时新疆伽师地震 P 波长周期记录与合成地震图的比较

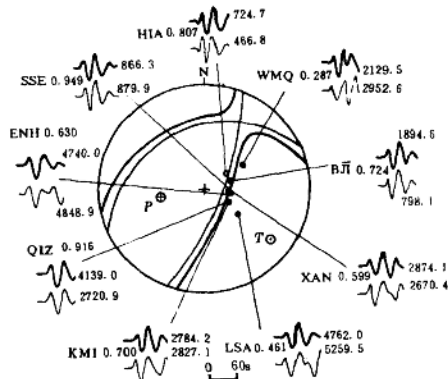


图 6 1997 年 4 月 11 日新疆伽师地震 P 波长周期记录与合成地震图的比较

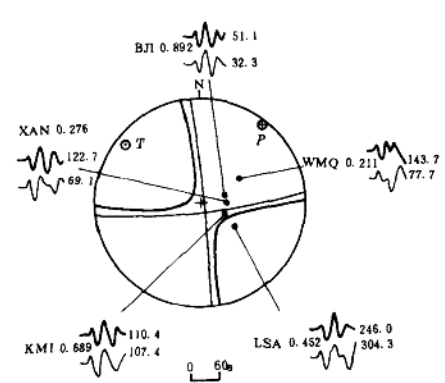


图 7 1997 年 4 月 13 日新疆伽师地震 P 波长周期记录与合成地震图的比较

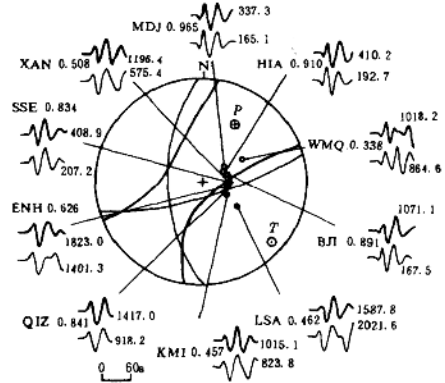


图 8 1997 年 4 月 16 日新疆伽师地震 P 波长周期记录与合成地震图的比较

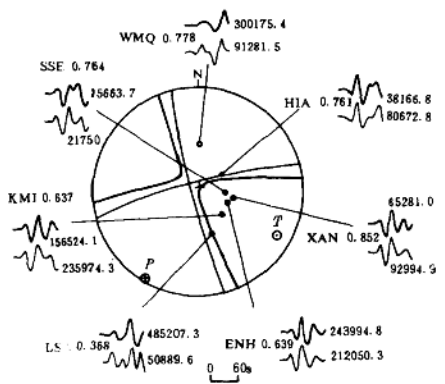


图 9 1997 年 11 月 8 日西藏玛尼地震 P 波长周期记录与合成地震图的比较

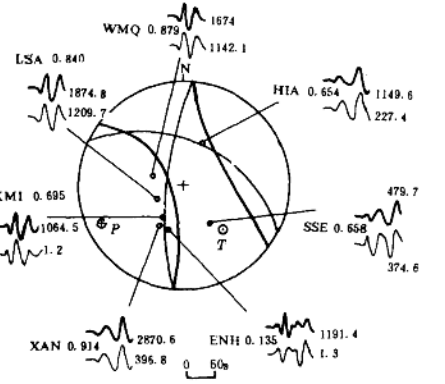


图 10 1998 年 1 月 10 日河北张北地震 P 波长周期记录与合成地震图的比较

表 2 由矩张量解求得的震源参数

| 编号 | T 轴            |                | B 轴            |                | P 轴            |                | 节面 1                |                     |                      | 节面 2                |                     |                      | $M_w$ |
|----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------------|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------|----------------------|-------|
|    | $A/(^{\circ})$ | $P/(^{\circ})$ | $A/(^{\circ})$ | $P/(^{\circ})$ | $A/(^{\circ})$ | $P/(^{\circ})$ | $\theta/(^{\circ})$ | $\delta/(^{\circ})$ | $\lambda/(^{\circ})$ | $\theta/(^{\circ})$ | $\delta/(^{\circ})$ | $\lambda/(^{\circ})$ |       |
| 1  | 1              | 1              | 270            | 36             | 92             | 54             | 122                 | 55                  | -44                  | 241                 | 56                  | -135                 | 5.5   |
| 2  | 85             | 22             | 340            | 34             | 202            | 48             | 329                 | 75                  | -125                 | 219                 | 38                  | -25                  | 5.5   |
| 3  | 122            | 2              | 23             | 75             | 212            | 15             | 348                 | 81                  | -168                 | 256                 | 78                  | -9                   | 5.5   |
| 4  | 119            | 12             | 266            | 76             | 27             | 7              | 162                 | 77                  | 177                  | 253                 | 87                  | 13                   | 6.0   |
| 5  | 125            | 9              | 28             | 41             | 226            | 48             | 253                 | 51                  | -32                  | 5                   | 66                  | -136                 | 5.9   |
| 6  | 127            | 23             | 29             | 18             | 263            | 60             | 248                 | 28                  | -47                  | 22                  | 70                  | -110                 | 6.3   |
| 7  | 134            | 8              | 356            | 79             | 225            | 7              | 179                 | 89                  | 169                  | 269                 | 79                  | 1                    | 5.4   |
| 8  | 130            | 12             | 233            | 48             | 29             | 40             | 177                 | 53                  | -158                 | 74                  | 73                  | -39                  | 5.9   |
| 9  | 120            | 13             | 316            | 77             | 211            | 3              | 256                 | 79                  | 1                    | 165                 | 83                  | 169                  | 7.3   |
| 10 | 139            | 47             | 351            | 38             | 247            | 16             | 186                 | 71                  | 131                  | 296                 | 44                  | 27                   | 5.7   |

表 3 哈佛大学测定的震源参数

| 编号 | T 轴          |              | B 轴          |              | P 轴          |              | 节面 1              |                   |                    | 节面 2              |                   |                    | $M_w$ |
|----|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------|
|    | $A/(^\circ)$ | $P/(^\circ)$ | $A/(^\circ)$ | $P/(^\circ)$ | $A/(^\circ)$ | $P/(^\circ)$ | $\theta/(^\circ)$ | $\delta/(^\circ)$ | $\lambda/(^\circ)$ | $\theta/(^\circ)$ | $\delta/(^\circ)$ | $\lambda/(^\circ)$ |       |
| 1  | 无            |              |              |              |              |              |                   |                   |                    |                   |                   |                    |       |
| 2  | 无            |              |              |              |              |              |                   |                   |                    |                   |                   |                    |       |
| 3  | 无            |              |              |              |              |              |                   |                   |                    |                   |                   |                    |       |
| 4  | 113          | 5            | 330          | 83           | 203          | 4            | 158               | 89                | 173                | 248               | 83                | 1                  | 5.8   |
| 5  | 126          | 9            | 32           | 25           | 236          | 64           | 243               | 42                | -51                | 16                | 59                | -119               | 5.9   |
| 6  | 119          | 15           | 21           | 25           | 237          | 60           | 240               | 37                | -45                | 9                 | 65                | -118               | 6.1   |
| 7  | 无            |              |              |              |              |              |                   |                   |                    |                   |                   |                    |       |
| 8  | 121          | 1            | 212          | 47           | 30           | 43           | 175               | 60                | -147               | 67                | 62                | -34                | 5.9   |
| 9  | 126          | 11           | 331          | 78           | 217          | 5            | 262               | 79                | 4                  | 171               | 86                | 169                | 7.6   |
| 10 | 184          | 58           | 343          | 30           | 78           | 9            | 200               | 44                | 136                | 324               | 61                | 55                 | 5.8   |

注:以上结果是哈佛大学的快速矩心矩张量(CMT)解,通常会与经过校核复算的地震报告上的结果略有不同。对于有些地震,虽然哈佛大学没有快速 CMT 结果,但在以后的地震报告中给出了震源机制解。

由于利用了观测资料与地震矩张量之间的线性关系式(5),采用了线性反演地震矩张量的方法,从而真正做到了快速测定中等大小地震的震源机制。在中国地震局预测预防司、地球物理研究所和 CDSN 台网的共同努力下,CDSN 的数据传输能力得以不断改善,CDSN 台网的数据管理中心(DMC)可以通过拨号电话的方式调用大部分台站的波形数据,为快速测定大震的震源机制创造了条件。通过几次地震的实践,在各方面的积极配合下,使快速反应的速度不断提高。从表 4 可以看出,我们测定的结果与哈佛大学的结果是一致的。在这 10 次地震中,有 4 次哈佛大学没有进行测定,有 4 次是在哈佛大学上网公布结果后我们才进行测定的,有 2 次是在哈佛大学的結果上网公布前报出的。特别是对 1998 年 1 月 10 日的河北张北地震,我们的速报工作取得了较好的效果。该震的发震时刻是 11 时 50 分 39.0 秒,我们收集和转换数据用了 2 小时 15 分,实际计算用了 2 小时 25 分,到 10 日 16 时 30 分把结果报给中国地震局震情值班室为止,共用了 4 小时 40 分。而我们在 11 日 8 时 34 分才收到美国哈佛大学的 CMT 结果。一般情况下,从得到波形数据到计算出震源机制解大约需要 2~3 小时,如果能够得到实时或准实时的波形资料,就可以在收到国外的震源机制解之前得出并公布我们的测定结果。

### 3 结论

我们利用地震矩张量反演的方法和 CDSN 台网收集到的宽频带数字地震资料,快速测定了发生于我国境内的 10 次地震的震源机制解,并以“地震震源参数简报”的形式将结果及时发送给中国地震局震情值班室和有关省地震局,在大震的快速反应中发挥了作用。由于采用了线性反演方法,提高了计算速度,使地震矩张量反演由研究工作向常规处理工作转变迈出了重要的一步。今后,这项工作要向两个方向发展:一是使地震矩张量反演速度进一步加快,对于国内地震争取在地震发生以后 4 小时得出我们的结果,尽快为分析预报部门提供基础资料;二是降低震级的下限,在现有的条件下,争取使震级的下限降到  $M_s=5.0$ ,因为对于发生在中国境内  $M_s=5.0\sim 5.8$  地震,哈佛大学和 USGS 一般不进行地震矩张量的快速测定,而这样的地震如果发生在我国境内或周边的经济发达地区或人口稠密地区,将会产生较大的损失和影响。

表 4 本文(IGCSB)得到的结果与哈佛大学(HRV)结果的比较

| 编号 | IGCSB 结果                                                                            | IGCSB 报出时间                    | HRV 结果                                                                              | 收到 HRV 结果时间                 |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| 1  |    | 1996 年 11 月 11 日<br>10 时 10 分 | 无速报结果                                                                               |                             |
| 2  |    | 1997 年 1 月 22 日<br>10 时 50 分  | 无速报结果                                                                               |                             |
| 3  |    | 1997 年 3 月 4 日<br>11 时 20 分   | 无速报结果                                                                               |                             |
| 4  |    | 1997 年 4 月 7 日<br>16 时 40 分   |    | 1997 年 4 月 6 日<br>23 时 10 分 |
| 5  |    | 1997 年 4 月 8 日<br>10 时 10 分   |    | 1997 年 4 月 7 日<br>23 时 34 分 |
| 6  |   | 1997 年 4 月 11 日<br>18 时 40 分  |   | 1997 年 4 月 11 日<br>18 时 0 分 |
| 7  |  | 1997 年 4 月 13 日<br>14 时 45 分  | 无速报结果                                                                               |                             |
| 8  |  | 1997 年 4 月 16 日<br>12 时 0 分   |  | 1997 年 4 月 16 日<br>12 时 5 分 |
| 9  |  | 1997 年 11 月 9 日<br>14 时 0 分   |  | 1997 年 11 月 9 日<br>2 时 20 分 |
| 10 |  | 1998 年 1 月 10 日<br>16 时 30 分  |  | 1998 年 1 月 11 日<br>8 时 34 分 |

本研究得到了李强研究员、吴忠良研究员以及任克新、杨辉、党京平、张德存、王红、黎明、李卫东等同志的大力支持,笔者在此一并表示衷心地感谢。

### 参 考 文 献

- 陈培善. 1995. 地震矩张量及其反演. 地震地磁观测与研究, 16(5): 19~53
- 陈运泰, 赵明, 李旭, 等. 1994. 青海共和地震震源过程的复杂性. 见: 陈运泰等主编. 中国固体地球物理学进展. 北京: 海洋出版社, 287~303
- 方韶东, 陈培善. 1993. 用地震波形资料反演中国大陆六个中强地震的矩张量和震源机制. 地震学报, 15(3): 261~267
- 刘瑞丰, 党京平, 方韶东, 等. 1997. 用广义射线理论线性反演一般地震点源的地震矩张量. 地震学报, 19(2): 202~207
- 倪江川, 陈运泰, 陈祥熊. 1991. 地震矩张量及其反演. 地震地磁观测与研究, 12(5): 1~17
- 许力生, 陈运泰, Fasthoff S. 1997. 1996年2月3日云南丽江  $M_S=7.3$  地震震源过程的时空复杂性. 见: 陈运泰等主编. 中国地震学研究进展——庆祝谢毓寿八十寿辰. 北京: 地震出版社, 91~105
- 姚振兴, 郑天愉, 温联星. 1994. 用P波波形资料反演中强地震地震矩张量的方法. 地球物理学报, 37(1): 36~45
- 姚振兴, Helmberger D V. 1985. 测定断层面解的地震波形反演方法. 地震, (3): 46~53
- 周公威, 陈运泰, 吴忠良. 1997. 中国数字地震台网的数据在中国地震学中的应用. 地震地磁观测与研究, 18(5): 68~79
- Aki K, Richards P G. 1980. *Quantative Seismology: Theory and Methods*, 1. San Francisco: Freeman W. H. and Company
- Chen Y T, Xu L S, Li X, et al. 1996. Source process of the 1990 Gonghe, China, earthquake and tectonic stress field in the northeastern Qinghai-Xizang(Tibetan) plateau. *Pure Appl Geophys*, 146(3/4): 697~715
- Dziewonski A M, Chou T A, Woodhouse J H. 1981. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity. *J Geophys Res*, 86: 2 825~2 852
- Dziewonski A M, Friedman A, Giardini D, et al. 1983. Centroid-moment tensor solutions for 308 earthquakes 1981. *Phys Earth Planet Inter*, 33: 76~90
- Dziewonski A M, Ekstrom G, Salganik M P. 1992. Centroid-moment tensor solutions for July-September 1991. *Phys Earth Planet Inter*, 72: 1~11
- Sipkin S A. 1982. Estimation of earthquake source parameters by the inversion of waveform data: Synthetic waveforms. *Phys Earth Planet Inter*, 30: 242~259
- Sipkin S A. 1986. Estimation of earthquake source parameters by the inversion of waveform data: Global seismicity 1981~1983. *Bull Seism Soc Amer*, 76: 1 515~1 541

# 中国大陆及其周边地区构造应力场的 数值计算及其在地震活动性 解释上的应用<sup>\*</sup>

焦明若 张国民 车 时 刘 杰

(中国北京 100036 中国地震局分析预报中心)

**摘要** 利用粘弹性有限元模型,采用最新发表的边界位移速率结果,对中国大陆及其邻区的基本构造应力场进行了数值模拟。主要内容有:最大剪应力及其变化速率的模拟、最大剪应变及其变化速率的模拟和剪应变能密度及其变化速率的模拟。针对中国大陆及其邻区地震活动在时空分布上高度不均匀之特点,将中国大陆东西部地震能量释放进行归一化处理,即得到归一化的本底能量值,并将模拟结果与实际地震活动进行对比。结果表明,用上述模拟结果可以较好地解释中国大陆及其邻区地震分布的特点。

**关键词** 构造应力场 数值模拟 地震活动 中国大陆

## 引言

中国大陆位于欧亚板块东南部,为印度洋板块、太平洋板块和菲律宾海板块所夹持,又同时处于世界两大地震活动带之间。与两大地震带所表现的地震沿板块边界呈带状分布不同,中国大陆及其周边地区地震活动具有独特的特征,表现为强度大、频度高、分布广、震源浅、破坏重、类型多和时空分布极不均匀等特点(梅世蓉,车时,1993)。这些特点无疑与中国大陆所处的独特的构造环境和地球动力学环境有密切关系。为了解释这种地震活动特征,有必要从地球动力学的角度来分析其成因。地震的孕育和发生是地壳内应力、应变长期积累和释放的结果,用数值模拟方法研究现代应力场的形成和发展过程,是研究地震活动成因机理的重要手段之一。为此,自70年代以来,许多学者从不同角度对我国及其邻区的构造应力场分布特征进行了探索性研究。汪素云和陈培善(1980)率先应用有限元数值模拟方法反演板块边界作用力的大小。考虑了5种应力和位移边界条件,将计算得到的最大主应力方向与震源机制解 $P$ 轴方向进行对比,从中选择符合最好的边界条件来模拟现代构造应力场。当然,上述模拟研究也有许多不足,如没有考虑到板块边界的耦合差异性、材料分区过于简单,以及模型中也没有考虑到时间因素等。王仁和梁海华(1985)基于弹性小变形的假定,采用线性叠加原理反演东亚应力场。许忠淮等(1992)根据观测到的应力方向,利用有限单元方法,反演中国大陆东部及附近地区板块边界作用力的大小。汪素云等(1996)使用平滑方法,对最新中国及邻区地震震源机制解资料进行分析,并反演了中国大

<sup>\*</sup> 中国地震局“九五”重点项目(95-04-03-03)。  
1998-07-15收到初稿,1998-11-14收到修改稿并决定采用。

陆及其邻区的板块作用力的相对大小. 梅世蓉和车时(1993)利用马克斯威尔模型, 对中国及其邻区现代构造应力场进行了模拟. 许忠淮和吴少武(1997)分析了南黄海和东海地区 18 口石油勘探钻井的井孔崩落特征, 结合对琉球岛弧和冲绳海槽地区浅源地震震源机制的分析, 确认了南黄海地区与我国华北地区有类似的现代构造应力场特征, 并推断我国东部地区并未受到菲律宾海板块俯冲的水平推挤作用, 而是可能受到垂直于冲绳海槽走向的拉伸作用的影响. 以上模拟结果基本取得以下共识: 中国大陆及其周边地区现代构造应力场的形成是印度洋板块、太平洋板块和菲律宾海板块三大板块联合作用的结果, 并认为印度洋板块基本控制了我国及其邻区现代构造应力场的分布格局; 其次为太平洋板块, 其运动主要影响到东北和华北地区; 菲律宾海板块的作用最小, 对东南亚板块及华北亚板块的南部地区有一定影响. 菲律宾海板块沿琉球岛弧对中国东部的挤压力不会太大.

近年来, 针对三大板块与欧亚板块的作用方式, 对中国大陆及其邻区地震活动性的影响也引起了许多学者的重视. 臧绍先等(1989, 1992, 1994)、臧绍先和宁杰远(1996)、傅征祥和姜立新(1997)详细地研究了中国周边板块的相互作用方式、会聚边界的转换及俯冲带耦合情况与地震活动分布的关系. 结果表明, 三大板块与欧亚板块的耦合方式存在明显的分段差异性, 即耦合的不均匀性. 这种耦合的不均匀性同时控制了大陆地震活动的不均匀性. Sato 等(1996)利用三维有限元方法, 对喜马拉雅弧形体进行了应力场的数值模拟, 发现应力积累主要集中在弧形块体的东西两侧, 这与地震空间分布图象是一致的. 时振梁等(1982)根据板块理论, 探讨了我国地震分区与周边板块运动的关系, 并提出了不同地震区地震活动有不同的重复周期. 张国民(1989)对板块边界活动与我国大陆强震活动进行了研究, 并指出西太平洋北段活动与我国北部 8 级大震存在明显的相关关系, 而西部地区地震活动则与印度板块边界作用更为密切.

综上所述, 针对三大板块各自对中国大陆及邻区的影响范围、程度、边界动力的反演结果及边界耦合的差异性取得了许多共识. 本文在上述基本认识基础上, 根据最新边界动力观测结果(如琉球弧后撤、动力边界耦合差异等), 利用粘弹性标准线性固体模型, 对中国大陆及其邻区的构造应力场进行模拟. 其中, 首次给出了中国大陆及其邻区剪应力、剪应变、应变能密度的时间演化速率图象. 在将模拟结果与实际强震对比时, 考虑到中国大陆及其邻区地震活动在时间上分布很不均匀的特点, 本文首次提出了“均一化地震能量释放”思想, 即西部地区使用 100 年的强震能量释放结果(主要考虑到西部地区大于 7 级地震有仪器记载只有 100 年的历史这一事实), 东部使用 600 年的强震能量释放结果(考虑到东部地区有仪器记载的大于 7 级地震有 600 年的历史), 并除以 6 得到 100 年的值, 使得东西部本底能量处在同一水平上, 并将模拟结果与之比较. 这样能更合理地认识中国大陆及其邻区地震活动的分布特点, 使模拟结果解释实际地震活动规律更有效果.

## 1 构造应力场的计算

考虑到震源机制解所得到的应力场以水平力为主, 以及所研究的区域大范围之特点, 我们将模型简化为平面应力问题. 本文计算使用了梁北援的 GLFEMP 有限元程序.

### 1.1 计算范围与单元材料划分

计算范围为东经  $55^{\circ} \sim 160^{\circ}$ , 有限元网格从 1:800 万的《亚欧地震构造图》上描绘下来. 根据《中国岩石圈动力学纲要》, 将我国及其邻区划分为 6 个亚板块: 青-藏亚板块、新

疆亚板块、蒙古亚板块、黑龙江亚板块、华北亚板块和华南亚板块(马杏垣, 1987). 将全区划分成 489 个单元, 共 275 个节点(图 1). 图中同时给出了各板块边界位置、分段情况以及边界位移的相对大小和方向. 其中, A 边界为印度洋与欧亚板块边界,  $A_1, A_2, A_3, A_4$  分别为边界的西、中、东、东南段; B 边界为太平洋与欧亚板块边界,  $B_1, B_2$  分别为其北段和南段; C 边界为菲律宾海板块与欧亚板块边界,  $C_1, C_2, C_3, C_4$  分别为该边界的北段、中段、南段和东南段; D 为南部边界,  $D_1, D_2$  分别为南部边界的西段和东段. 边界条件的详细情况见表 2.

## 1.2 力学模型

采用标准线性固体模型. 所谓标准线性固体模型可以看成由一个弹簧和一个开尔文体的串联组成(图 2).

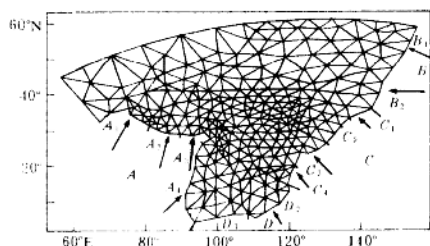


图 1 有限单元计算网格图

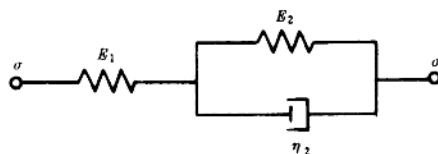


图 2 标准线性固体模型

对于弹簧和开尔文体分别写出其本构方程为

$$\sigma = E_1 \epsilon_1 \quad (1)$$

$$\sigma = E_2 \epsilon_2 + \eta_2 \dot{\epsilon}_2 \quad (2)$$

由于总应变  $\epsilon$  为弹簧应变  $\epsilon_1$  和开尔文体应变  $\epsilon_2$  之和, 即

$$\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2 \quad (3)$$

联立方程式(1)、(2)和(3), 得

$$(E_1 + E_2)\sigma + \eta_2 \dot{\sigma} = E_1 E_2 \epsilon + E_1 \eta_2 \dot{\epsilon} \quad (4)$$

式(4)即为标准线性固体模型本构方程.

我们把 6 个亚板块看成 6 个材料区, 各材料区的物性参数列于表 1 中. 在计算时将两个弹簧的杨氏模量和剪切模量看成相等.

表 1 各材料区的物性参数值

| 材料号 | 材料区名   | 杨氏模量<br>/GPa | 泊松比  | 剪切模量<br>/GPa | 粘滞系数<br>/ $10^{22}$ Poise |
|-----|--------|--------------|------|--------------|---------------------------|
| 1   | 青-藏亚板块 | 87           | 0.25 | 34.8         | 0.4                       |
| 2   | 新疆亚板块  | 92           | 0.25 | 36.8         | 2                         |
| 3   | 蒙古亚板块  | 90           | 0.25 | 36.0         | 1.6                       |
| 4   | 黑龙江亚板块 | 92           | 0.25 | 36.8         | 1.4                       |
| 5   | 华北亚板块  | 87           | 0.25 | 34.8         | 2                         |
| 6   | 华南亚板块  | 92           | 0.25 | 36.8         | 4                         |

### 1.3 边界条件

采用位移边界条件, 主要基于边界力无法知道, 而板块边界的运动速率是可以观测到的. 我们规定北部边界向北运动的位移为零, 西部边界则在东西向上固定. 在西南边界, 由于印度板块与欧亚板块正面相撞, 所以可以直接把印度板块与欧亚板块的相对运动速率作为边界条件. 在东部边界, 太平洋板块和菲律宾海板块与欧亚板块以俯冲方式接触, 则位移速率按俯冲角度进行分解, 取其在平面上的投影作为该处的边界条件. 另外, 近似认为板块边界运动方向垂直于边界线. 在计算区域的南部边界, 因其不在板块边界上, 则给出了较小的估计值(表 2). 位移边界数据主要参考了马杏垣(1987)、梅世蓉和车时(1993)、傅征祥和姜立新(1997)以及许忠淮和吴少武(1997)的有关文献.

表 2 边界条件

| 边 界        | 边界条件                                  |           |
|------------|---------------------------------------|-----------|
|            | 位移速率/ $\text{cm} \cdot \text{a}^{-1}$ | 运动方向      |
| 欧亚-印度板块边界  | 西段                                    | NE30°     |
|            | 中段                                    | NE15°     |
|            | 东段                                    | NE5°      |
|            | 东南段(缅甸山弧)                             | NE45°~50° |
| 欧亚-太平洋板块边界 | 北段                                    | NW70°     |
|            | 南段                                    | EW        |
| 欧亚-菲律宾板块边界 | 北段                                    | NW50°     |
|            | 中段(琉球弧)                               | 0         |
|            | 南段(台湾附近)                              | NW45°     |
|            | 东南段(吕宋弧)                              | NW45°     |
| 南部边界       | 东段                                    | NW30°     |
|            | 西段                                    | 自由边界*     |

\* 主要考虑在印度板块碰撞时, 由于西藏高原在北面阻挡, 物质有南移趋势(臧绍先, 1987).

## 2 计算结果对比与分析

印度洋板块、太平洋板块及菲律宾海板块对欧亚板块的推挤已经历了上亿年的时间, 并在欧亚板块内形成了一个基本构造应力场. 然而, 由于我们无法估计该基本应力场的绝对数值, 考虑到我们所讨论问题的相对性, 并使问题简化, 我们把印度板块等运动 5 000 年的位移一次加在板块边界上, 并把这个应力场作为我们计算的初始应力场. 为检验上述边界条件的合理性, 将计算结果(剪应力及其变化速率、应变能密度及其变化速率、剪应变及其变化速率)与地震活动进行对比. 考虑到中国地震活动的特点(图 3), 对中国大陆及其邻区的四大地震区(中亚地震区、南北地震区、华北地震区和东南沿海地震区)的模拟计算结果列于表 3 中. 为便于地震区与无震区之间的比较, 将无震区的模拟计算结果也一并列入. 此外, 正如第 1 部分所讨论的那样, 考虑到我国东、西部地区大地震( $M_s \geq 7$ )复发周期的差异, 我们在计算实际地震能量释放时做了均一化处理: 计算东部地区  $M_s \geq 7.0$  地震 600 年的能量释放, 并将其结果除以 6, 得到 100 年的实际地震平均能量释放值, 再与西部地区  $M_s \geq 7.0$  地震 100 年的实际地震能量释放结果进行比较, 计算结果也一同列于表 3 中(最后一列). 需说明的是, 在以下讨论中, 剪应力、剪应变、应变能密度是初始时刻的应力场值(即 5 000 年的位移一次加到板块边界上的零时刻值), 而其相应的变化速率值的计算

则是经过 200 年时间后得到的值与初始时刻值相减再除以 200 年得到的年变化速率值。

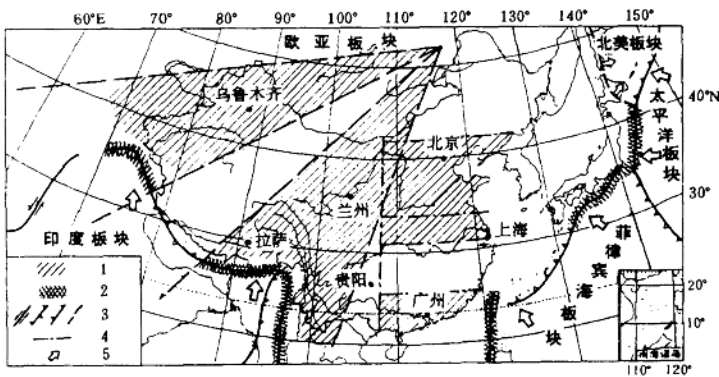


图 3 中国大陆及其邻区近代浅源强震空间分布不均匀性和边界耦合不均匀性示意图

( $h \leq 6.0 \text{ km}$ ,  $M_s = 7.0 \sim 7.9$ , 1900~1993 年;  $M_s \geq 8$ , 1500~1993 年。

地震活动分区引自傅征祥, 姜立新, 1997)

1. 强地震活动区; 2. 板间强耦合段; 3. 板块边界;  
4. 中国大陆及邻区地震分区界线; 5. 板块相对运动方向

表 3 中国大陆各区实际计算结果与模拟结果一览表

|            | $\tau_0$ | $\epsilon_0$         | $E_0$                            | $\dot{\tau}$                       | $\dot{E}$                                             | $\dot{\epsilon}$                | $\Sigma_j$ | $\Sigma/E_j$ |
|------------|----------|----------------------|----------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------|------------|--------------|
|            | /MPa     | ( $\times 10^{-5}$ ) | / $\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$ | / $\text{kPa} \cdot \text{a}^{-1}$ | / $\text{mJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$ | / $10^{-8} \cdot \text{a}^{-1}$ | /EJ        |              |
| 中国东部       | 3.70     | 4.9                  | 83.6                             | 0.75                               | 33                                                    | 1.0                             | 9.2        | 0.343        |
| 中国西部       | 6.28     | 10.0                 | 368.0                            | 1.25                               | 132                                                   | 1.95                            | 64         | 4.015        |
| 中亚地震区      | 4.38     | 11.2                 | 150.0                            | 1.0                                | 2.15                                                  | 109                             | 10.2       | 2.41         |
| 南北地震区      | 7.23     | 9.76                 | 414.3                            | 1.4                                | 2.15                                                  | 179                             | 72         | 2.23         |
| 华北地震区      | 3.0      | 2.32                 | 10.4                             | 0.625                              | 0.5                                                   | 5                               | 0.24       | 0.0968       |
| 东南沿海地震区    | 5.98     | 15.19                | 379.2                            | 1.65                               | 2.45                                                  | 115.5                           | 0.7        | 0.0926       |
| 华南无震区      | 2.0      | 6.34                 | 35.0                             | 0.25                               | 0.85                                                  | 20                              | 0          | 0            |
| 喜马拉雅少震区    | 3.12     | 8.3                  | 110.0                            | 0.3                                | 1.7                                                   | 42.5                            | 5.0        | 0.0327       |
| 北纬 45°以北地区 | 3.0      | 4.0                  | 27.0                             | 0.55                               | 0.8                                                   | 13                              |            |              |

注:  $\tau_0$  为模拟平均最大剪应力,  $\epsilon_0$  为模拟平均最大剪应变,  $E_0$  为模拟平均能量密度,  $\dot{\tau}$  为模拟剪应力变化速率,  $\dot{E}$  为模拟应变能密度变化速率,  $\dot{\epsilon}$  为模拟剪应变变化速率,  $\Sigma$  为实际地震平均能量释放值,  $\Sigma_j$  为模拟计算的平均应变能。

2.1 最大剪切应力值分布与强震活动对比

图 4a 是模拟计算给出的中国及其邻区初始基本应力场(最大剪应力等值线图)。从图中可以看出, 大致以东经 105° 为界将我国分成东西两大部分。西部应力水平高, 相对值平均在 6.3 MPa 以上, 而东部地区相对值平均在 3.7 MPa 左右(见表 3)。西部地区的应力值比东部地区大约高出近 2 倍。那么, 与强震实际能量释放结果进行比较, 西部地区为  $4.0 \times 10^{18} \text{ J}$ , 东部地区为  $3.43 \times 10^{17} \text{ J}$ , 西部比东部高一个数量级, 这与上述模拟结果是一致的。张国民(1987)在研究了中国大陆强震分布特点时指出, 从频度上看, 87% 的强震发生在西部地区, 约为 9:1。除了大的分区具有上述特点外, 表 3 中给出的各子区(地震区和少震区或无震区)模拟计算结果也表现出同样的特征, 即应力水平高的区域实际地震活动及能量