

文章编号: 0253-3782(2001)05-0492-10

# 东亚地区现今构造应力图的编制

许忠淮

(中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所)

**摘要** 利用 2 993 个浅源地震的地震矩张量解、404 个 P 波初动方向震源机制解和 47 个深井孔的孔壁崩落资料, 编制了东亚地区现今地壳构造应力场主应力方向和应力类型分布图。按 200 km 的等距格点, 算出有资料地区各格点半径为 200 km 范围内的平均应力方向, 绘制了平均主应力方向分布图, 并绘制了东亚地区的震源机制解分布图。主应力方向分布特征表明, 东亚地区的现今构造应力场除受印度-欧亚板块碰撞的强烈影响外, 俯冲带的弧后扩张亦有重要影响。喜马拉雅山弧处的大陆碰撞和缅甸山弧处的弧后扩张之联合作用可能形成了青藏高原东南部主应力方向的显著转动。菲律宾海板块与欧亚板块在台湾的碰撞与琉球岛弧弧后扩张的联合作用影响了中国东部的应力场。爪哇海沟俯冲带的弧后大片地区现今没有强震活动, 这里的弧后扩张可能是造成东南亚地区物质容易向南运动的因素。青藏高原内部大致以昆仑山为界, 北部和东北部是大陆内部的宽阔挤压带, 南部和西南部地壳上部主要处于正断层型应力状态中。

**关键词** 构造应力 东亚地区 应力图

**中图分类号:** P315.72<sup>+</sup> **文献标识码:** A

## 引言

从地球构造角度, 东亚地区指以下 3 条活动构造带所围地区: 东侧是太平洋西缘俯冲带, 主要包括日本海沟、琉球海沟、菲律宾海沟俯冲带; 西南侧是喜马拉雅大陆碰撞带和缅甸山弧—爪哇海沟俯冲带; 西北侧是天山—贝加尔大陆变形带(图 6)。这里是世界上现今发生板内构造变形最强烈的地区之一。研究这个地区的现今构造应力场对探讨该地区的构造动力过程和地震成因有重要意义。

国际性的世界应力图研究计划(1986~1990 年)成果中包含了东亚地区现今构造应力场的内容(Zoback, 1992)。该项研究对全球(也包含东亚地区)板块内部构造应力场的认识取得了显著进展。然而, 近年来的认识深化和新资料的迅速积累, 使编制东亚地区改进的现今构造应力图成为可能。

在编制新的东亚地区现今构造应力图时, 本研究试图在以下几方面作出改进。

1) 1992 年版世界应力图(下称原图; Zoback, 1992)将不同深度的应力测量(包括多个浅于 100 m 的套芯法和水压致裂法应力测量)结果放在一张图上。事实上, 近地表应力方

\* 国家科技部攀登计划预选项目(95-S-05-01-03)资助。中国地震局地球物理研究所论著 01AC1013。  
2001-01-08 收到初稿, 2001-07-27 收到修改稿并决定采用。

向测量结果常常变化较大。例如, 唐山附近地区, 所测最大水平主压应力  $S_H$  (以下只记为  $S_H$ ) 方向, 北西向和北东向的皆有(李方全, 1992); 有的测定方向与由深部地震资料推断的应力方向相差很大。例如, 山西地区原地应力测量得到的  $S_H$  方向有的近南北向, 有的北西向(李方全, 1992), 而由震源机制推断的方向为北东向(图 1, 4)。浅层应力测量结果可能受局部不均匀地质条件影响较大, 由于本研究着重关心的是能反映深层应力状态的区域性应力场, 而不是研究某特定地点(如某工程场地)的局部应力场, 因而, 本研究不用浅层应力测量结果。

2) 本文补充利用了近年来哈佛大学等研究机构发表的大量地震矩张量解资料、原图以及原图的改进版(可从网址 <http://www-wsm.physik.uni-karlsruhe.de> 查到)未充分利用这批资料。

3) 东亚地区也包含板块边界地区, 原图未含的这些地区应力方向的资料, 本文将包含进来。

4) 原图未给出区域性的平均应力方向图。原始数据在某些地方表现出一定的零乱性。对任一地点, 其主应力方向是确定的, 原始资料的离散和矛盾并不是真实应力的反映, 本文将排除矛盾数据的影响, 给出由原始资料求出的平均应力方向分布图。

5) 对部分地区的数据作出更正。例如, 原图东海地区  $S_H$  方向根据井孔崩落资料定为 NW-SE 向为主(高建理等, 1992), 后来的研究结果说明, 东海地区  $S_H$  方向应是 NE-SW 为主(许忠淮等, 1999)。又如, 原图准噶尔盆地由井孔崩落资料给出的  $S_H$  方向与附近震源机制资料给出的方向相差甚大。高阿甲等(1993)研究认为, 克拉玛依油田井孔崩落主要反映了当地的局部应力场, 本文遂不使用这部分数据。

此外, 原图用的是 Mercator 圆柱投影, 高纬度地区地域形状畸变较大。由于东亚区域较大, 本文采用 Lambert 等面积投影图作底图, 这样可减少地区面积的畸变。

## 1 资料

编制应力图所使用的数据共有 3 542 条, 包括以下几部分: ① 哈佛大学发布的 1976~1999 年东亚地区震源深度小于 60 km 的浅源地震的地震矩张量解, 利用解的主轴方向 2 993 个; ② 经筛选增订的 1920~1999 年中国浅源地震的震源机制解相应力轴方向 404 个, 其中 1987 年前的数据是“八五”计划期间的工作结果(汪素云等, 1993); 1987 年后的数据来自有关文献(由于所搜集资料条目太多, 一条数据可能来自一个文献, 此处无法一一列出)。③ 由多个地震求得的若干地区的平均主应力方向(Xu *et al.*, 1992)及贝加尔地区平均主应力轴方向(Petit *et al.*, 1996), 共 94 个; ④ 少地震区深井孔(深于 1 000 m)孔壁崩落方向 47 个, 其中中国东北地区 5 个数据是根据郭启良等(1991)的结果, 按小区域取的多个井孔数据的平均值。

此外, 原地应力测量数据只选用了中国两个最深井孔的水压致裂应力测量结果: 一个是三峡 800 m 深孔  $S_H$  方向测量的平均值 N79°W, 另一个是云南剑川 800 m 深孔在 668~751 m 间  $S_H$  方向测量的平均值 N6°W(翟青山等, 1989)。

利用地质断层擦痕资料分析求得的第四纪中、晚期以来的构造应力场, 虽然大部分方向测量结果的区域分布特征与用现今地震资料推断的结果基本一致(谢富仁等, 1999), 但

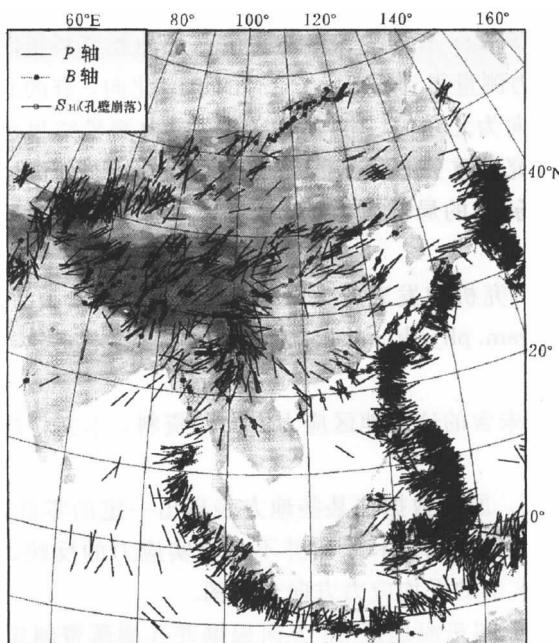


图 1 东亚地区观测的最大水平主压应力方向分布图  
 $P$ ,  $T$ ,  $B$  轴是地震震源机制解的力轴,  $S_H$  是井孔  
 崩落指示的最大水平主压应力方向

(图 1) 和最小主压应力方向的力轴( $T$  轴)分布图(图 2). 图 1 和图 2 中, 当最大或最小主压应力方向在某处为垂直于地表时, 该地点的中等主应力( $B$  轴)方向用虚线表示. 虚线中间的黑点分别表示直立的  $P$  或  $T$  轴, 即图 1 中绘出  $B$  轴方向的地点表明该处  $P$  轴直立, 发生了正断层地震, 图 2 中绘出  $B$  轴方向的地点表明该处  $T$  轴直立, 发生了逆断层地震. 对井孔崩落数据, 在图 1 和图 2 中分别标出了最大( $S_H$ )和最小( $S_h$ )水平主压应力方向.

对原始应力方向资料进行了区域平滑处理, 编制了东亚地区平均主应力方向图. 在全区按 200 km 的相等间距设置格点, 对每个格点周围 200 km 半径范围内有 2 个以上应力方向数据的小区, 求出每个小区的平均主应力方向. 由于主应力轴矢量方向可用两个相差 180°的方向来表示, 为保证能给出几个矢量所夹锐角的(而不是所夹钝角的)平均方向, 受 Hansen 和 Mount(1990)所使用算法的启发, 本研究采用了如下的求平均方向的算法:

$$Q = \sum_{i=1}^n [\mathbf{V}^T \mathbf{P}_i]^2 = \sum_{i=1}^n \mathbf{V}^T (\mathbf{P}_i \mathbf{P}_i^T) \mathbf{V} = \mathbf{V}^T \mathbf{A} \mathbf{V} \Rightarrow \text{Max} \quad (1)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \sum P_{i1} P_{i1} & \sum P_{i1} P_{i2} \\ \sum P_{i2} P_{i1} & \sum P_{i2} P_{i2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{12} & A_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,  $\mathbf{P}_i$  是给定小区中的第  $i$  个水平方向观测矢量, 其在二维直角坐标下的两个分量分别为  $P_{i1}$  和  $P_{i2}$ ;  $\mathbf{V}$  是待求的平均矢量,  $n$  是该小区观测矢量总数,  $Q$  表示目标函数. 对每个区, 根据观测方向数据构成矩阵  $\mathbf{A}$  后, 即可根据最优化问题(1)解出矢量  $\mathbf{V}$  来,  $Q$  的最大化避

已发现有些地区二者所得的应力状态不一致. 例如, 中国滇西地区和四川西昌-马边地区, 一些测点断层擦痕分析报道了逆断层应力状态(谢富仁等, 1993); 在广东潮汕地区, 断层擦痕法也给出了第四纪第 II 期为逆断层应力状态(谢富仁等, 1991); 而根据现代地震资料, 这些地区尚未发现这一特征. 事实上, 本研究曾加上这些数据编制过应力图, 而该应力图在总体应力方向特征上与不含这些数据的结果无多大差异, 但影响对某些地点关于应力状态的推断. 在百万年尺度上区域性的构造应力场会不会发生变化, 目前尚不能肯定. 本文是编制现今构造应力场图, 遂未包含由地质断层擦痕计算的应力数据.

## 2 应力图编制

根据搜集的原始数据, 绘制了反映最大主压应力方向的力轴( $P$  轴)分布图

CONSTRUCTIVE

STRESS FIELD

MAP

OF

ASIA

AND

PACIFIC

REGIONS

IN

CHINA

AND

NEARBY

REGIONS

OF

ASIA

AND

NEARBY

REGIONS

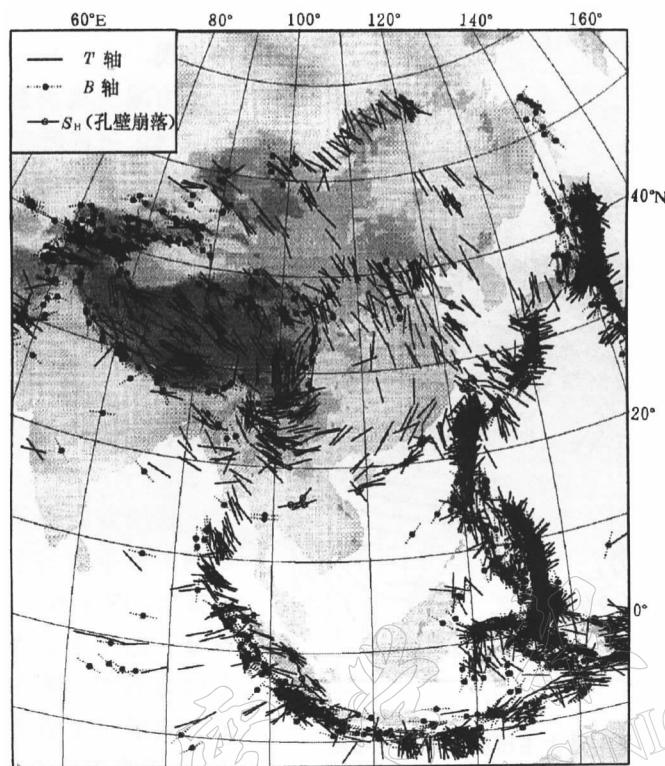


图2 东亚地区观测的最小水平主压应力方向分布图  
 $P$ ,  $T$ ,  $B$ 轴是地震震源机制解的力轴,  $S_h$ 是井孔崩落指示的最小水平主压应力方向

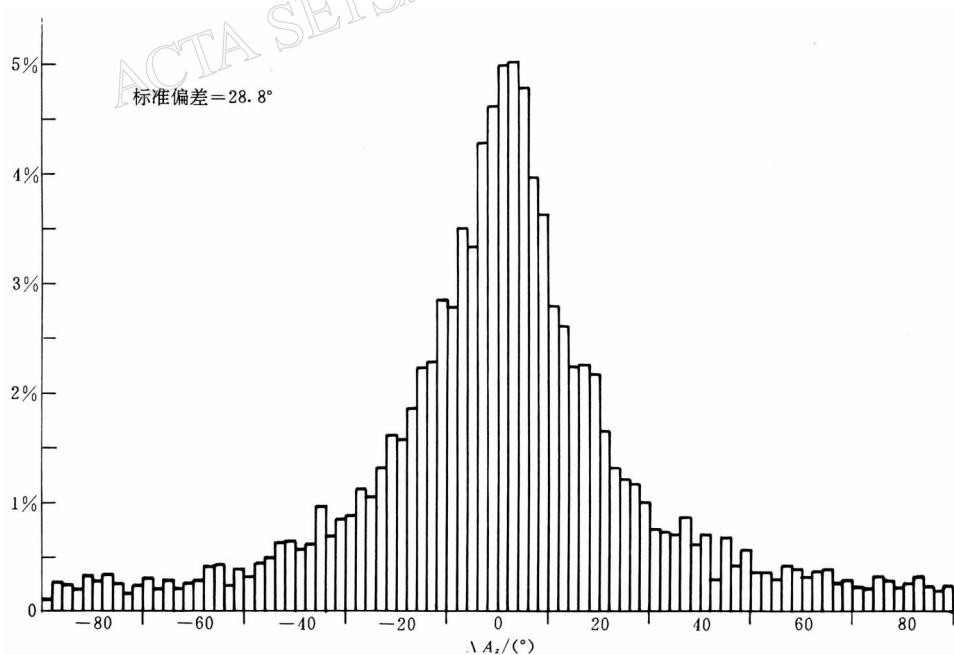


图3 各小区最大水平主应力方向观测值与平均方向偏差的统计直方图

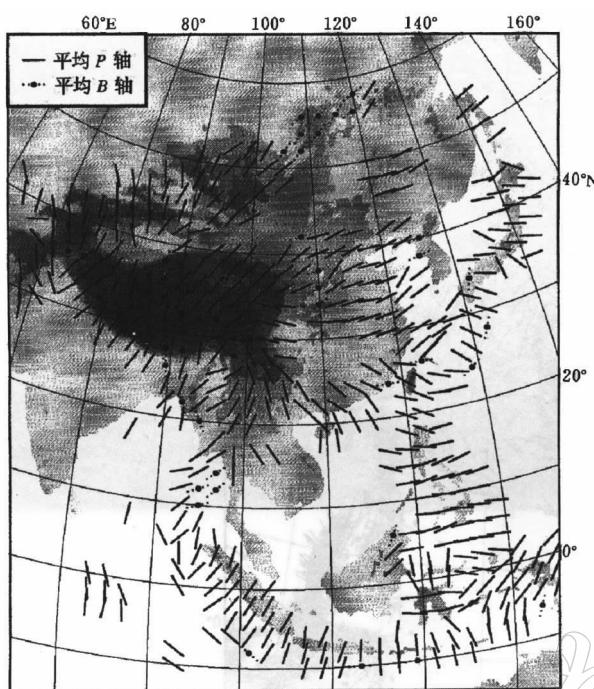


图 4 东亚地区平均最大主压应力方向分布图

时,则在图上用虚线表示该小区的中等主应力轴方向,图 5 中标直立轴的地区表示处于正断层应力状态,图 5 中标直立轴的地区则处于逆断层应力状态.图 4 和 5 中标实线段的地区皆是中等主应力轴为直立的地区,即处于走滑断层型应力状态.

此外,根据国际地震中心 (ISC) 1964~1996 年的  $m_b \geq 4.5$  的地震目录,绘制了东亚地区地震震中分布图(图 6). 利用绘制震级-频度对数曲线的方法判断,  $m_b \geq 4.5$  的地震在全区记录是完整的. ISC 目录中有少数大陆内部的浅震被定为地壳下的深震,我们根据中国地震年报对其作了订正. 本文还根据哈佛大学发布的 1976~1999 年的地震矩张量解和 1920~1999 年中国地震震源机制解绘制了东亚地区地震震源机制解分布图(图 7). 由这些图可看出现代较强构造变形的地区分布特征.

免了观测矢量所夹钝角内平均方向的出现.

为减少观测数据误差和少数不能反映区域构造应力作用(可能受局部构造控制)的震源机制解数据对平均结果的影响,统计了各个小区观测的应力方向相对于各区平均应力方向的偏差. 图 3 绘出了最大水平主应力方向偏差值的统计分布直方图,由此图数据算出的标准偏差为 28.8°. 最小水平主应力方向的标准偏差为 22.5°.

只用方向差异在一倍标准偏差以内的数据求每个小区的平均主应力方向. 图 4 和 5 分别给出东亚地区各分区的平均最大和最小主压应力方向分布图. 某些小区所含观测的最大或最小主应力轴有些垂直于地表,当垂直于地表的力轴数超过一半

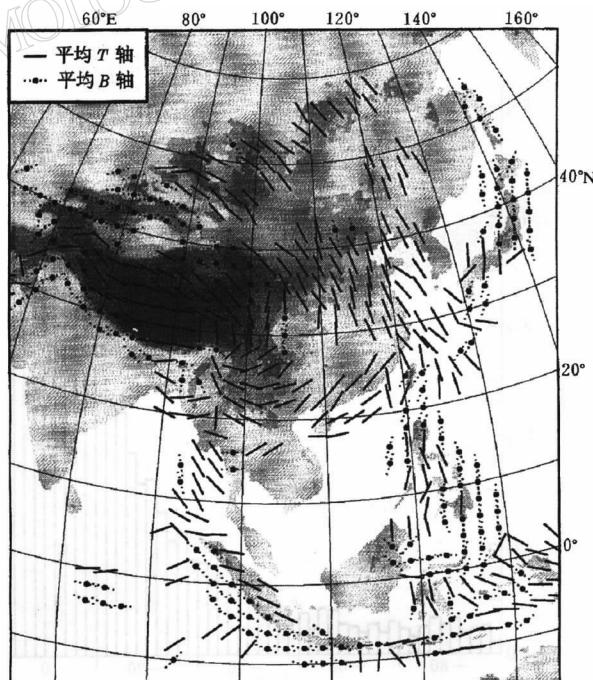


图 5 东亚地区平均最小主压应力方向分布图

### 3 特征分析及动力学意义

1) 主应力方向分布存在显著的总体特征(图 4, 5), 北东向的  $S_H$  方向一直从喜马拉雅山弧向东北延伸至贝加尔, 在这一线的西侧,  $S_H$  方向向西偏, 而在其东侧则向东和东南偏转, 在青藏高原东南部偏转更强烈。青藏高原周边处于逆断层型应力状态, 高原内部以正断层应力状态为主, 其余地区主要是走滑断层型应力状态。

Zoback (1992) 将与全球板块运动有关的大尺度变化的应力场称为一级应力场。上述的应力场总体特征代表了东亚地区的一级应力场。形成该应力场的最重要的因素看来是印度板块与欧亚板块的碰撞, 以及由此导致的青藏高原的隆起。但东亚地区东南部和南部区域性应力方向显著转向特征在世界上是独特的。Zoback (1992) 曾发现其它板块内部的最大主压应力方向多数与由全球板块运动模型推断的板块绝对运动速度方向一致。虽然东亚地区西部的最大主压应力方向大致与该地区板块绝对运动速度方向是一致的, 但东南部则明显地不一致。这可能是由于喜马拉雅山弧处的板块强烈碰撞与缅甸—苏门答腊—爪哇俯冲带处的板块俯冲对板块内部的影响截然不同引起的, 即中国南部和东南亚地区的应力场与欧亚板块的整体运动关系不大, 而是主要受到了周边特定板块边界的作用。

2) 若将塔里木盆地与青藏高原看成一个整体, 并仍暂称为青藏高原, 则除了中国云南地区的高原东南部外, 高原的四周皆是逆断层地震区(图 7)。注意喜马拉雅山弧区地震与高原北部(包括天山地区)和东北部地震的逆断层机制有明显的不同, 前者向北倾的节平面倾角明显小于向南倾的节平面, 这与板块低倾角俯冲一致; 而后者多为两个节面倾角相当, 显示高原北部和东北部是大陆内部的挤压变形带。

3) 青藏高原(含塔里木盆地)以昆仑山为界, 北侧以挤压为主, 尤其是西北的天山地区; 南侧则以张性正断层活动为主(图 1, 2, 7), 张力近东西向。南北天山与昆仑山—祁连山挤压带连在一起构成了青藏高原北缘的宽阔挤压边界。高原南部的水平张应力方向有顺着喜马拉雅山弧发生弯曲的趋势(图 5), 在山弧西端点明显地向北凸出, 这可能与兴都库什地区板块的俯冲和帕米尔的隆升有关; 在山弧东端点处有明显旋转和会聚的特征, 该特征可能由喜马拉雅山弧处的碰撞挤压和缅甸山弧的弧后扩张的联合作用引起。值得注意的是, 云南附近的现今应力方向图象似不支持物质或块体简单的向南或向东南流动, 而支持物质绕喜马拉雅山弧东端点的转动。

4) 沟-弧-盆结构的俯冲带看来一般不会在水平方向上向板块内部传递强烈的应力, 这从苏门答腊—爪哇岛弧弧后的大片地区无强烈地震活动可以看出(图 6, 7)。琉球岛弧的弧后存在冲绳海槽的明显扩张作用, 东海地区没有强烈地震, 说明琉球岛弧并未向大陆内部产生较强应力作用(许忠淮等, 1999)。菲律宾海板块对欧亚板块的碰撞挤压作用主要发生在台湾和菲律宾地区, 不同的是, 在台湾地区的碰撞影响到了大陆内部; 而在菲律宾地区, 因马尼拉海沟处向东的俯冲, 并未使菲律宾板块对欧亚板块的碰撞挤压影响到东南亚地区的内部。

5) 贝加尔地区的应力场特征说明, 东亚地区板块内部的应力场很难只由板块侧向的作用引起, 而可能还存在板块底部的作用。尽管最大水平主压应力  $S_H$  方向从青藏高原一

直沿北东方向延伸到贝加尔,但在贝加尔地区  $S_H$  变成了中等主应力方向(图 4),最大主压应力是垂直的。考虑到该地区并无高耸的地形使最大压应力成为垂直向的,形成该地区现今应力状态的一个可能机制是受到北西-南东向额外的张力作用(图 5),而北东-南西向又未受到额外的挤压。北西-南东向额外的张力作用难以是板块边界的影响,更可能是板块底部作用所致。考虑到天山—贝加尔变形带的西侧是大片现今构造非常稳定的地区,由此推断底部张力作用更可能发生在贝加尔至日本海之间的东部地区。

6) 南海中部仅有的两个震源机制解答皆表现为逆断层活动,挤压方向为 NW-SE。说明在南海海盆的中部可能存在逆冲或俯冲作用,而不是类似于洋脊的扩张运动。

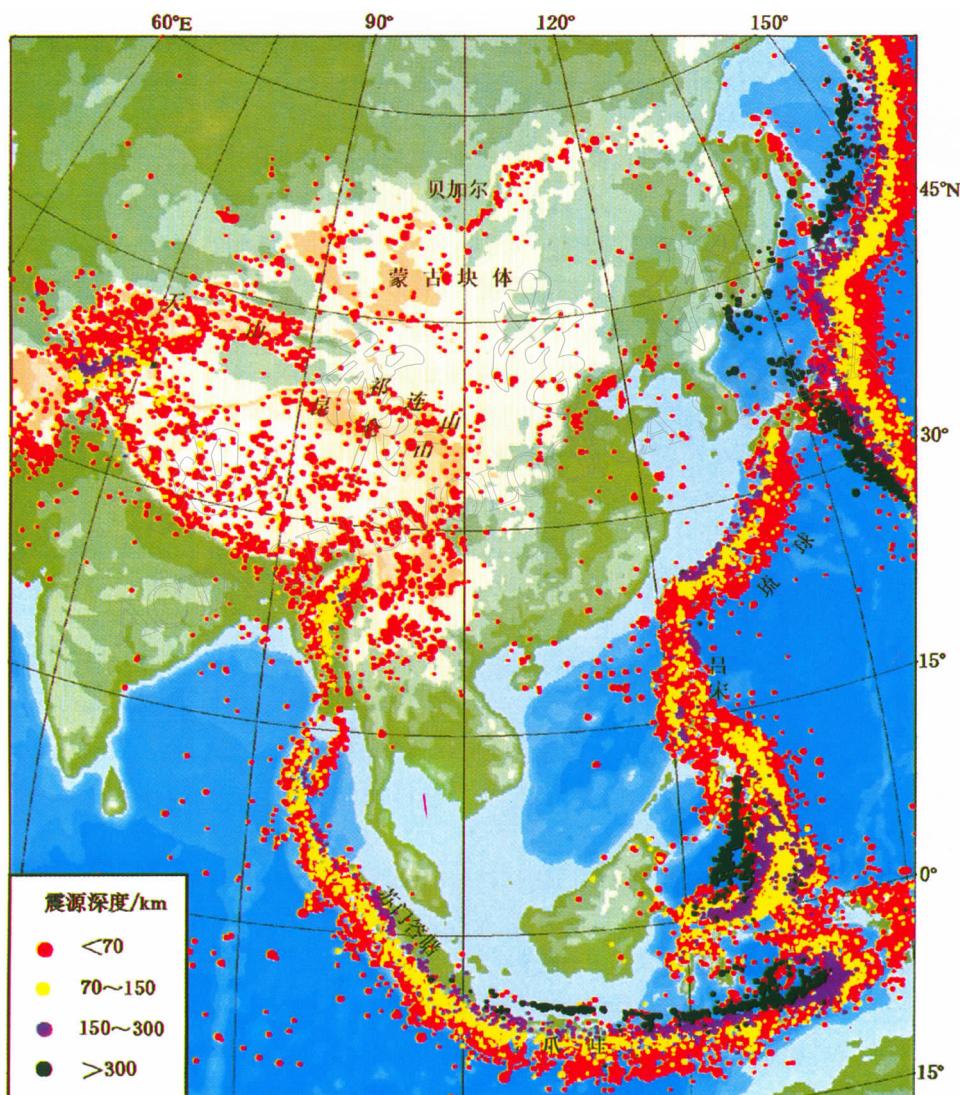


图 6 东亚地区地震震中分布图[根据国际地震中心(ISC)1964~1996 年  $m_b \geq 4.5$  的地震目录绘制]

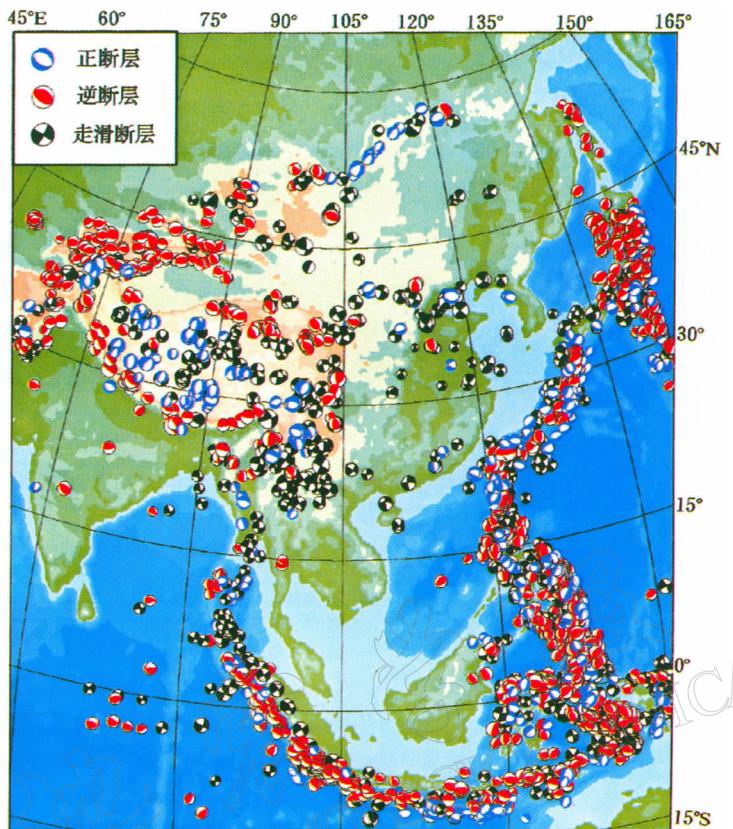


图 7 东亚地区地震震源机制解分布图

7) 从近代记录相对完整的地震分布图(图 6)看,除了板块边界的地震外,东亚地区板块内部地震最集中的地区就是青藏高原(包括塔里木盆地)及其周边地带,这里显然是强震发生概率最高的地区,其地震成因看来与印-欧板块的碰撞和青藏高原的隆起有关。在东亚东部的大片地区,较强地震有 3 个相对集中的区带,即蒙古西部至贝加尔的地震带、中国华北地震区和华南沿海地震区。蒙古西部地震机制多为挤压型的(图 7),可能是青藏高原外围挤压区的向北延伸。前已述及产生贝加尔地区应力场特征的可能原因,同样,这里产生地震的原因也难以用板块边界的水平作用来解释。华南沿海及南海北部的地震看来与在台湾和吕宋地区的板块碰撞有关。吴佳翼等(1979)根据华北地震与日本地震的相关性认为,华北地区地震的成因与太平洋板块在日本海沟的俯冲作用有关。但这种作用难以是简单的水平压应力传递,因为这与日本海的扩张有矛盾。在菲律宾海板块在台湾的强烈碰撞和琉球岛弧的显著弧后扩张的联合作用下,华南地台可能有顺时针的转动,并因而导致华北扩张和下沉,这可能是产生华北地震的一个原因。

#### 参 考 文 献

高阿甲, 许忠淮, 张东宁. 1993. 克拉玛依油田地区的现代构造应力场[J]. 地震学报, 15(增刊): 598~606

- 高建理, 丁健民, 梁国平, 等. 1992. 中国海区及其邻域的原地应力状态[J]. 地震学报, 14(1): 17~28
- 郭启良, 丁健民, 梁国平, 等. 1991. 松辽盆地深部原地应力方向测量[A]. 见: 国家地震局地壳应力研究所编. 地壳构造与地壳应力文集(5)[C]. 北京: 地震出版社, 142~151
- 李方全. 1992. 套心法、水压致裂法原地应力测量、钻孔崩落及震源机制解分析所得结果的对比[J]. 地震学报, 14(2): 149~155
- 李方全, 金川忠, 张伯崇, 等. 1992. 中国三峡地区地下 800 米深部地应力测量[M]. 北京: 地震出版社, 30
- 吴佳翼, 郁曙君, 何淑韵. 1979. 华北地震同日本地震的相关性[J]. 地球物理学报, 22(4): 415~438
- 谢富仁, 梁海庆, 祝景忠, 等. 1991. 利用断层滑动矢量反演潮汕-东山地区平均构造应力场[A]. 见: 国家地震局地壳应力研究所编. 地壳构造与地壳应力文集(5)[C], 北京: 地震出版社, 152~158
- 谢富仁, 祝景忠, 梁海庆, 等. 1993. 中国西南地区现代构造应力场基本特征[J]. 地震学报, 15(4): 407~417
- 谢富仁, 张世民, 窦素芹, 等. 1999. 青藏高原北、东边缘第四纪构造应力场演化特征[J]. 地震学报, 21(5): 502~512
- 许忠淮, 徐国庆, 吴少武. 1999. 东海地区现代构造应力场及其成因探讨[J]. 地震学报, 21(5): 495~501
- 汪素云, 高阿甲, 许忠淮. 1993. 中国及邻区地震震源机制特征[A]. 见: 国家地震局震害防御司编. 中国地震区划文集(3)[C]. 北京: 地震出版社, 10~26
- 翟青山, 李方全, 刘鹏, 等. 1989. 云南剑川狮子桥 800 米深孔水压致裂应力测量[A]. 见: 国家地震局地壳应力研究所编. 地壳构造与地壳应力文集(3)[C]. 北京: 地震出版社, 3, 100~107
- Hansen K M, Mount V S. 1990. Smoothing and extrapolation of crustal stress orientation measurements[J]. *J Geophys Res*, 95(B2): 1 155~1 165
- Petit C, Deverchere J, Houdry F, et al. 1996. Present-day stress field changes along the Baikal rift and tectonic implications[J]. *Tectonics*, 15(6): 1 171~1 191
- Xu Z H, Wang S Y, Huang Y R, et al. 1992. Tectonic stress field of China from a large number of small earthquakes [J]. *J Geophys Res*, 97(B8): 11 867~11 877
- Zoback M L. 1992. First- and second-order pattern of stress in the lithosphere; the world stress project[J]. *J Geophys Res*, 97(B8): 11 703~11 728

## A PRESENT-DAY TECTONIC STRESS MAP FOR EASTERN ASIA REGION

Xu Zhonghuai

(Institute of Geophysics, China Seismological Bureau, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Based on the data of earthquake Centroid Moment Tensor solution, P-wave first motion focal mechanism solution and deep hole breakouts, a present-day tectonic stress map for eastern Asia region is compiled. The original stress data are smoothed for every 200 km×200 km area by taking the average of all stress indicators within each sub-region. The stress map shows the spatial distribution of the orientation of principal stress axes and the stress regimes. An earthquake focal mechanism map for the eastern Asia is also given. The maps of orientation of principal stress axes show that, apart from the strong influence of the collision between the Indian Ocean plate and Eurasian plate, the present-day tectonic stress in eastern Asia is significantly affected by the back-arc extension of the subduction zones. The joint effect of the continental collision at the Himalaya arc and back-arc extension in the Burma arc region may be responsible for the remarkable rotation of the principal

stress orientations in southeastern part of the Tibetan plateau. The joint action of the collision between the Philippine Sea plate and Eurasian plate at Taiwan Island and the back-arc extension of the Ryukyu arc affects the stress field in eastern China. There are no strong earthquakes in the present day in the vast back-arc region of the Java trench subduction zone. The back-arc extension there may create a condition which is favorable to the southward flow of the lithosphere material in southeastern Asia. In the inner part of the Tibetan plateau region, roughly demarcated by the Kunlun Mountain, the northern and northeastern part is a broad intracontinental compressive zone, while the southern and southwestern part is generally in a normal-faulting stress state.

**Key words:** tectonic stress; eastern Asia; stress map

