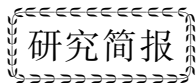


文章编号: 0253-3782(2006)03-0323-06



## 中国及周边地区 2000—2004 年构造应力图<sup>\*</sup>

郑中华 陈永顺<sup>\*</sup>

(中国北京 100871 北京大学地球与空间科学学院理论与应用地球物理研究所)

**关键词** 构造应力图 震源机制解 小时间尺度 深源地震

**中图分类号:** P315.3<sup>+</sup>3 **文献标识码:** A

地震震源机制解是分析岩石圈现代构造应力场的基本资料,直接反映了地壳断层结构的特征。因此,整理统计并不断更新地震震源机制解资料及其反映的现今构造应力场状况,并进行构造分析是非常基础且重要的工作。

从 20 世纪 80 年代开始,国际岩石圈计划启动了“世界应力图编制”计划(Zoback, 1992.),该国际合作计划搜集并分析整理了全球范围内有关现代构造应力场的测量和研究成果,并在此基础上建立了全球构造应力场数据库,编制了“世界应力图”,其中包含了东亚现今构造应力场的内容。在 1992 年版世界应力图的基础上,许忠淮(2001)作了多方面的改进,利用 2993 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,编制了截止到 1999 年底的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及震源机制解分布图。

本文整理和统计了哈佛大学矩心矩张量(CMT)目录中 2000 年 1 月 1 日—2004 年 12 月 31 日,5 年内中国大陆及周边地区地震矩张量解,参照许忠淮(2001)的工作,编制了中国大陆及周边地区地震震源机制解分布图,以及最大主应力方向和最小主应力方向分布图;同时给出了 5 年内中国大陆及周边地区地震震中分布图,讨论了中国地区地震活动性和不同深度地震的分布情况。本文在时间上延续和补充了对已有中国大陆构造应力图的编制,分析了 5 年内构造变形较强地区的分布特征,与截止到 1999 年的构造应力图(许忠淮, 2001)行了比较和讨论。

### 1 数据资料

使用哈佛 CMT(矩心矩张量)目录(<http://www.seismology.harvard.edu>)中 2000 年 1 月 1 日—2004 年 12 月 31 日中国大陆及周边地区地震矩张量解,排除了西太平洋地区俯冲带附近的地震,共 195 次(图 1),包括了全部深度的地震:浅源地震 152 次,震源深度小于 60 km;中源地震 39 次,震源深度范围 60~300 km;深源地震 4 次,震源深度大于 300 km。图 1 给出了 2000—2004 年中国及周边地区 195 次地震的震中分布及震源深度统计直方图。

### 2 应力图及震源机制解分布图

根据地震破裂的方式,地震可以分为正断层型、逆冲断层型和走滑断层型等 3 个主要类型以及正走

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金杰出青年科学基金(40125011)和重大国际合作交流项目基金(00410785)资助。  
2005-06-10 收到初稿,2006-03-13 决定采用修改稿。

<sup>+</sup> 通讯作者。E-mail: johnyc@pku.edu.cn

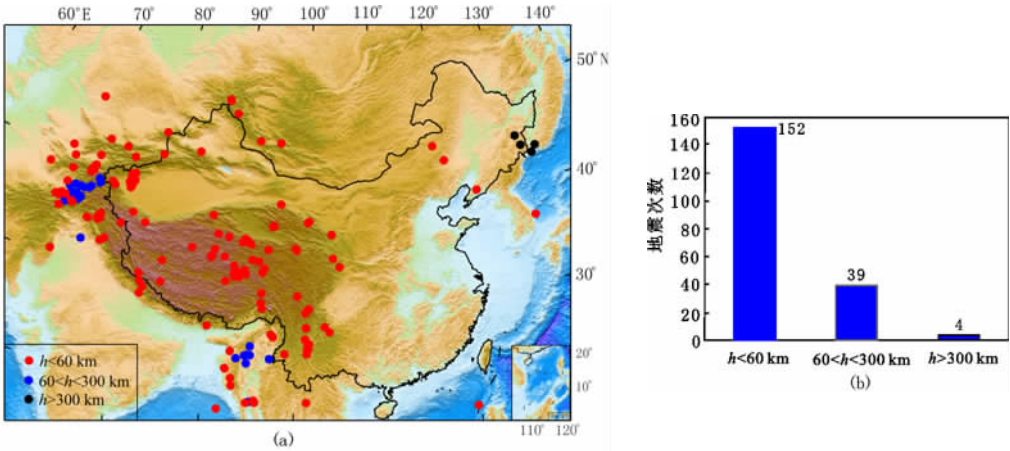


图 1 2000—2004 年中国及周边地区 195 次地震的震中分布(a)及震源深度( $h$ )统计直方(b)图

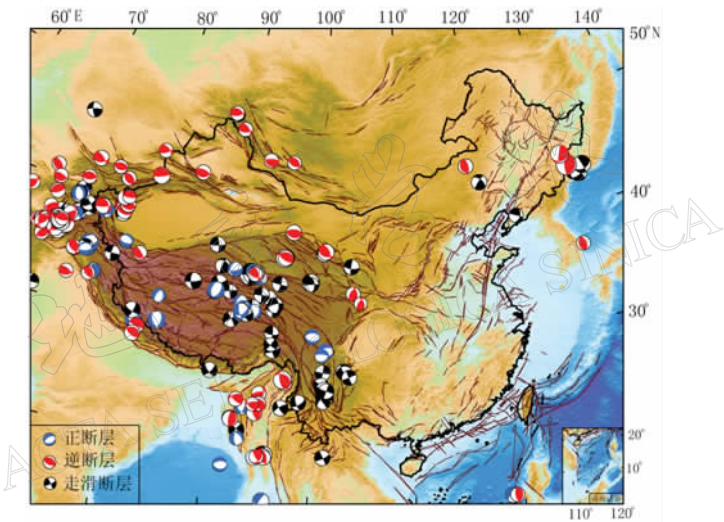


图 2 2000—2004 年中国及周边地区全部深度地震的震源机制解分布图

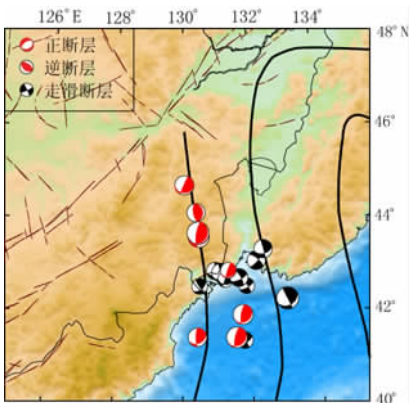


图 3 1976—2004 年, 29 年内东北地区深源地震震源机制解分布图. 黑色曲线表示日本海俯冲带上界面俯冲位置的等深线

滑、逆走滑等复合类型 (Turcotte, Schubert, 2002). 不同的地震破裂显示了不同的应力状态. 由震源机制解确定断层面, 进而求解发震地区的压应力轴  $P$ 、张应力轴  $T$  和零轴  $B$  的走向. 对纯走滑型地震, 中等主应力轴垂直地表,  $P$  轴和  $T$  轴平行地表; 纯正断层型地震,  $P$  轴垂直地表; 而纯逆断层型地震,  $T$  轴垂直地表. 由于存在正走滑、逆走滑等复合类型地震, 为简化讨论, 本文把地震分为 3 种构造类型:  $P$  轴俯角和  $T$  轴俯角均小于  $45^\circ$  定义为走滑型,  $P$  轴俯角大于  $45^\circ$  定义为正断层型, 而  $T$  轴俯角大于  $45^\circ$  定义为逆断层型 (王辉等, 2005). 表 1 给出了 2000—2004 年中国大陆 195 次地震记录的类型及其占总地震数目的百分比. 这 195 次地震是以逆断层型和走滑断层型为主. 图 2

给出了 2000—2004 年中国大陆及周边地区全部深度地震(195 次)的震源机制解分布图。这些地震主要分布在中国西部( $105^{\circ}\text{E}$  以西)地区,包括青藏高原和新疆天山地区。深源地震( $>400\text{ km}$ )主要发生在东北珲春地区,断层类型有逆断型和走滑型(图 3)。

利用哈佛 CMT 目录的数据资料,本文绘制了 2000—2004 年 5 年期间反映最大主压应力方向  $P$  轴分布图(图 4)和最小主压应力方向  $T$  轴分布图(图 5)。另外,当  $P$  或  $T$  轴近似垂直地表时,在图中绘出相应的  $B$  轴即中等主应力轴,用虚线表示  $B$  轴的方向,中间的黑点表示直立的  $P$  轴或  $T$  轴。所以,在图 4 中  $B$  轴方向的地点表明该处  $P$  轴直立,发生的是正断层地震;同样图 4 绘出  $B$  轴方向的地点表明该处  $T$  轴直立,发生了逆断层的地震。目前对地壳应力场的分析主要来自浅源地震,本文采用的 195 次地震记录中浅源地震有 152 次,占总数目的 78%(图 1b)。同时深源地震和中源地震发生位置相对集中(图 1a),所以绘制的应力场分布图能够反映中国大陆的地震活动情况和地壳现代构造应力场状态。

表 1 2000—2004 年中国大陆及周边地区 195 次地震记录的震源机制解类型统计

断层类型	地震次数(占总地震数百分比)
走滑型( $P_{pl}\leq 45^{\circ}$ 且 $T_{pl}\leq 45^{\circ}$ )	67(34%)
正断层型( $P_{pl}>45^{\circ}$ )	42(22%)
逆断层型( $T_{pl}>45^{\circ}$ )	86(44%)
合计地震事件数	195

注： $P_{pl}$ 和  $T_{pl}$ 分别为  $P$ 、 $T$  轴的俯角。

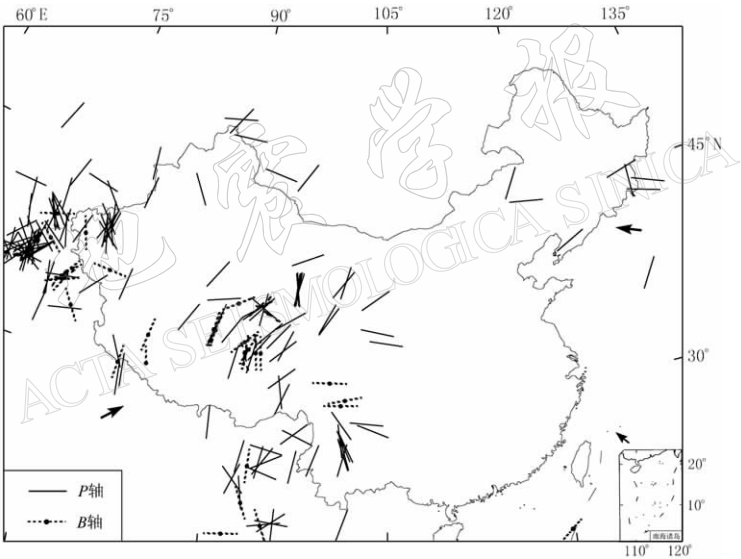


图 4 中国及周边地区观测的最大水平主压应力方向分布以及  $P$ 、 $T$ 、 $B$  震源机制解力轴  
 $P$  轴为最大水平主压应力轴,  $B$  轴为中等主应力轴用虚线表示, 黑点表示直立的  $P$  轴; 黑色箭头表示板块运动的大致方向

3 应力场分析

作为欧亚板块东南部分,中国大陆受到印度板块、太平洋板块和菲律宾海板块的联合作用。图 1a 表明,中国大陆以浅源地震为主,分布十分广泛。以  $105^{\circ}\text{E}$  为界,中国西部地区是地震异常活跃区(谢富仁等, 2004);中源地震主要分布在兴都库什和缅甸地区;深源地震只分布在中国东北地区。

从图 2 震源机制解分布图以及地震类型统计可以看出,地震活动以逆断层型最多,走滑型与之接近。两种断层类型的地震占 5 年内地震数目的近 80%,反映了中国大陆大部分地区的应力场和构造活动与印度—欧亚陆-陆碰撞引起的青藏高原地壳缩短和隆升,以及高原地壳向中国东部和南海地区逃逸有关。同时,也存在一定数量的正断层型地震。

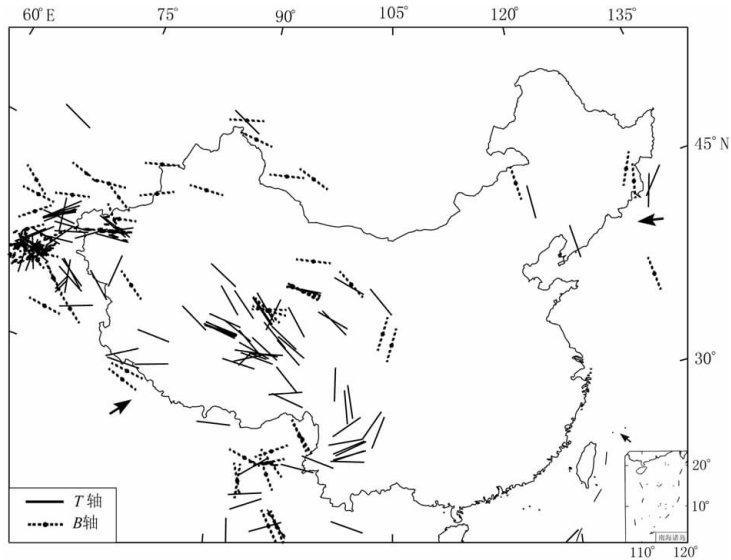


图 5 中国及周边地区观测的最小水平主压应力方向分布图  
 $P$ ,  $T$ ,  $B$  为地震震源机制解力轴.  $T$  轴为最小水平主压应力轴;  $B$  轴为中等主应力轴  
用虚线表示, 黑点表示直立的  $T$  轴; 黑色箭头表示板块运动的大致方向

下面分别讨论中国大陆各个区域的构造应力场.

3.1 中国西部

中国西部包括塔里木盆地与青藏高原及周边地区. 其力源主要来自印度板块向北碰撞欧亚大陆, 现代构造应力场的主体特征为近南北—北北东方向的挤压(图 4、图 5). 若把西部地区按其构造特征和地震活动分成若干个体, 则各个块体内部应力结构明显不同.

西北的天山地区是逆断层地震区, 最大主压应力方向以南北向为主, 其力源主要来自青藏块体向北的推挤. 青藏高原最大主压应力方向在主体部分为北北东方向, 地震机制以走滑型为主. 同时在藏中地区大致以拉竹龙—金沙江断裂带为界, 向南至雅鲁藏布江一带, 构造应力表现为近东西方向拉张特征; 雅鲁藏布江以南的青藏高原地区, 最大主压应力方向为近南北, 应力结构以逆断层类型为主(图 2、图 4). 在青藏高原东边, 北以阿尔金断裂带为界, 东到南北地震构造带, 南至拉竹龙—金沙江—红河断裂带. 其现代构造应力场以走滑断层型为主要特征. 其最大主应力方向变化较大, 逐步由北东变化为近东西, 直至南东方向(图 4). 这种局部区域应力场的旋转和会聚的特征, 即为东构造结, 可能是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的. 例如图 4 和图 5 给出的现今应力方向图象, 似乎表明地壳绕喜马拉雅山弧东端点转动, 与由 GPS 获得的地表应变场相一致(Shen *et al*, 2000).

印度板块向欧亚大陆碰撞是造成中国西部应力区现代构造应力场格局的主要原因. 印度板块以 50 mm/a 的速度向北碰撞欧亚大陆(丁国瑜, 1988), 青藏高原南部地区遭受巨大的挤压作用, 北部受到塔里木、天山、阿拉善块体的阻挡, 形成了北部的挤压带; 在青藏高原北、东边缘地带, 高原内的地壳物质绕喜马拉雅山弧东端点转动, 形成了以剪切应力作用为主的构造环境, 造就了一批走滑断裂带, 如阿尔金断裂带、东昆仑断裂带等, 成为提出大陆逃逸模式的重要依据(Tapponnier *et al*, 1982).

总体而言, 尽管 5 年时间的尺度很小, 但青藏高原仍旧表现为地震异常活跃的地区. 其整体受印度板块的碰撞, 最大主应力方向具有一致性特征, 表现为近南北—北北东方向.

3.2 中国东部和深源地震

从图 2 可以看到, 2000—2004 年内, 中国东部(105°E 以东)地区很稳定, 华北—华南地区在这 5 年内没有强地震发生, 东北地区的浅源地震主要为走滑类型. 深源地震发生在东北珲春地区, 深度达 500~600 km, 断层类型有逆断型和走滑型.

华北地块属于中-朝克拉通的一部分(Liu *et al.*, 1992). 其北界为近东西向的阴山—燕山构造带; 南界为秦岭—大别构造带; 西界为贺兰—六盘山构造带; 东界在郯庐断裂带以东. 尽管华北地区构造复杂, 过去数十年内曾发生过多大地震, 但是在这 5 年内并无较大地震发生, 显示了 5 年小尺度的局限性.

东北地区受太平洋板块向西俯冲作用, 其应力结构变化比较单一, 最大主应力方向以北东、北东东为主. 同时东北地区是中国大陆唯一的深源地震发生地区, 主要原因在于西太平洋板块向日本海俯冲的倾角偏小, 仅为  $29^{\circ}$ (臧绍先, 宁杰远, 1996), 使得俯冲板块一直俯冲到中国东北 600 km 左右的深度, 造成了该地区深源地震的发生. 从震源机制解分布(图 2)中可以看出, 东北地区的深源地震为逆断型和走滑型. 针对在 500~600 km 深度的范围内发生走滑型地震的疑问, 本文进一步整理统计了 1976 年 1 月 1 日—2004 年 12 月 31 日 29 年内东北地区的地震资料. 在 29 年的时间里, 东北及其周边地区共发生地震 34 次, 其中深源地震 20 次, 浅源地震 14 次, 深度为 60~300 km 范围内没有中源地震发生. 这 20 次深源地震的震源机制解分布图(图 3)中走滑型深源地震 12 次, 逆断型深源地震 8 次. 可见在 500~600 km 的深度, 该地区曾发育了大量的走滑型深源地震.

目前深源地震的发生机制是一个很受关注但并不清楚的问题. 在俯冲带深部的温压条件下不太可能发生大规模的脆性破裂而形成断层面. 很多研究工作试图探讨深源地震的发震机制. Meade 和 Jeanloz (1991) 指出蛇纹岩在高压下脱水和非晶化过程中有声发射现象, 从而引发中深源地震. 但蛇纹岩是否会在俯冲带深部的温压条件下脱水和非晶化则受到质疑. 利用相变解释深源地震发震机制的观点曾经得到了广泛的认可(Kirby *et al.*, 1996), 但亚稳态橄榄岩是否存在目前并没有可靠的证据. 东北地区深源地震表现出大量的走滑型破裂机制, 探求其原因是研究深源地震发震机制需要解决的重要问题之一.

总之, 中国东部应力区, 虽然受太平洋板块向西俯冲和菲律宾板块向北西俯冲的联合作用, 但在 5 年小尺度时间内, 其现代构造应力场表现出十分稳定的特征.

#### 4 与 1999 版应力图比较

本文所编制的 2000—2004 年中国大陆及周边地区最大主应力场方向分布图(图 4), 与许忠淮编制的截止到 1999 年底的东亚地区平均最大主应力场方向分布图(图 6)(许忠淮, 2001)进行了比较, 得出以下结论:

1) 小尺度时间的应力场状况和平均应力方向保持了一致性, 从总体上能够反映中国大陆的应力状态. 这种一致性说明了中国大陆及其周边地区在短时间尺度内的稳定性.

2) 5 年内的各个区域的地震活动性与许忠淮(2001)29 年时间尺度的结果相比较, 体现了很好的一致性: 西部地区地震活动非常活跃, 而东部地区则相对比较稳定.

3) 由此可见, 在小尺度时间范围内, 当达到一定数量的资料积累, 进行构造应力场的分析能够表现现今构造应力场的基本特征. 因此, 不断统计整理地震资料, 在时间和数据量上延续发展构造应力图的编制是非常基础而重要的工作.

4) 东北地区深源地震表现为明显的走滑类型是一个很值得关注的问题, 今后有必要进一步研究该地区深源地震的发震机制.

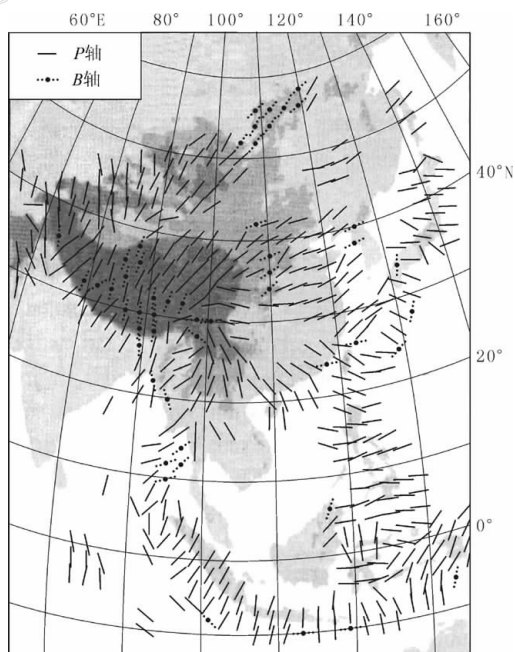


图 6 东亚地区平均最大主应力方向分布图(引自许忠淮, 2001)

在本文构造应力图的编制过程中,许忠淮研究员给予了多方面的支持,并提出了有益的意见和建议;本文的图示采用了 GMT 软件绘图(Wessel, Smith, 1998),在绘图中得到了裴顺平和张竹琪的帮助;金戈帮助完成了本文修改。在此一并表示感谢。

### 参 考 文 献

- 丁国瑜. 1988. 有关青藏高原活动构造的一些问题[J]. 西北地震学报, **10**(增刊): 1~11
- 王辉, 张国民, 马宏生, 等. 2005. 利用哈佛 CMT 目录研究全球 I 级构造系统的地震活动[J]. 地震地质, **27**(1): 44~54
- 谢富仁, 崔效锋, 赵建涛, 等. 2004. 中国大陆及邻区现代构造应力场分区[J]. 地球物理学报, **47**(4): 654~662
- 许忠淮. 2001. 东亚地区现今构造应力图的编制[J]. 地震学报, **23**(5): 492~501
- 臧绍先, 宁杰远. 1996. 西太平洋俯冲带的研究及其动力学意义[J]. 地球物理学报, **39**(2): 188~202
- Kirby S H, Stein S, Okal E A, *et al.* 1996. Metastable mantle phase transformations and deep earthquakes in subducting oceanic lithosphere[J]. *Rev Geophys*, **31**(2): 261~306
- Meade C, Jeanloz R. 1991. Deep focus earthquakes and recycling of water into the Earth's mantle[J]. *Science*, **252**: 68~72
- Liu D Y, Nutman A P, Compston W, *et al.* 1992. Remnants of greater-than-or-equal-to 3 800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean Craton[J]. *Geology*, **20**(4): 339~342
- Shen Z K, Zhao C K, Yin A, *et al.* 2000. Contempory crustal deformation in east Asia constrained by global position system measurements[J]. *J Geophys Res*, **105**(3): 5 721~5 734
- Turcotte D L, Schubert G. 2002. *Geodynamics*[M]. Second edition. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 339~368
- Tapponnier P, Pelzer G, Le Dain A Y, *et al.* 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple plasticine experiments[J]. *Geology*, **10**: 611~616
- Wessel P, Smith W H F. 1998. New, improved version of the generic mapping tools released[J]. *EOS Trans AGU*, **79**: 579
- Zoback M L. 1992. First-and second-order pattern of stress in the lithosphere: the world stress project[J]. *J Geophys Res*, **97**(B8): 11 867~11 877

## A TECTONIC STRESS MAP OF CHINA AND ADJACENT REGIONS FROM EARTHQUAKES OCCURRED DURING 2000—2004

Zheng Zhonghua Chen Yongshun

(Institute of Theoretical and Applied Geophysics, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

**Key words:** tectonic stress; stress map; earthquake focal mechanism solutions; short time period