

千岛岛弧大震前哈佛大学矩心矩张量 (CMT)解一致性的预测意义^{*}

王俊国¹⁾ 刁桂苓²⁾

1) 中国天津 300201 天津市地震局

2) 中国石家庄 050021 河北省地震局

摘要 千岛岛弧地区属于全球地震活动最为活跃的地区之一。本文利用哈佛大学测定的千岛岛弧地区地震的矩心矩张量(CMT)解,分析该地区震源机制的一致性特征,提出利用震源机制和构造应力场的一致性参数 a 进行地震预测的思路。研究表明, $M_w \geq 7.5$ 地震之前,都有一致性参数 a 降低的现象, a 的低值起始的时间在发生大震之前的 10 多天至 110 多天, a 的低值截止的日期距大震在 30 多天至 2 天。相互之间虽然并不完全一致,但是差别不大。这种现象的稳定性,尚需时间的检验,但是设想在长达数百公里的地区,连续发生 $M_w \geq 5.3$ 的地震的震源机制都与构造应力场一致,应当不是随机的现象,而是一种具有预测意义的现象。当积累的震例足够多时,则有可能确定统一的评判标准和预测准则。

关键词 千岛岛弧地区 矩心矩张量解 一致性参数 预测意义

中图分类号: P315.75

文献标识码: A

引言

在地震科学的发展史中,观测仪器的改进,往往能够产出新的参数,进而推动地震学的飞跃发展。全球数字地震台网设立之后,一些以往不能做或者不好做的工作相继展开,基于数字资料的分析研究陆续兴起,以至形成数字地震学。如今,哈佛大学已经可以提供近 2 万条地震矩张量数据,因为地震矩张量是对地震震源较全面客观的描述,因此围绕这种参数的研究成果开始见诸文献。Kagan 和 Jackson(1994, 1995, 1997, 1999)以及 Kagan (2000)发表了一系列文章,讨论地震矩-频度关系,分析地震丛集性,检验地震空区,强震的成对现象,以及震源机制的时间相关性;Kawakatsu(1991)分析了转换断层的非双力偶分布;Tanimoto 和 Okamoto(2000), Tanimoto 等(2002)讨论了地壳势能变化;许忠淮(2001)利用最佳双力偶解的应力轴和节面参数,编制了东亚的应力图;吴忠良等(2003)仅利用矩张量中 M_{rr} 的符号这种简化的方法,分析了中国不同块体的性质。但是上述文献直接涉及地震预测研究的甚少。

目前较普遍的认识是“单次地震确定性的短期预测不是一个现实的科学目标”(见 <http://helix.nature.com/debates>),但是仍然有 Crampin 等(1978, 1984)在冰岛坚持利用 S 波分裂进行长期的地震预报研究。陈颢(1978)根据海城地震前震序列的研究,提出用震源

^{*} 国家科技攻关项目《强地震短期预测技术和物理基础研究》子专题《数字化地震资料在华北地区强震短期预测中的应用》(2001BA601B01-01-05)的部分研究成果。

2003-10-08 收到初稿, 2004-09-18 收到修改稿, 2004-10-25 决定采用。

机制的一致性作为判别前震的新参数；刁桂苓和于新昌(1980)给出了 1976 年河北唐山 M7.8 地震前，震区附近小震 P 波初动资料得到的综合断层面解矛盾符号占全部符号的比例降低的图象；刁桂苓和于新昌(1982)又给出北京延庆 1965 年 M5.4 地震前类似的现象；刁桂苓等(1994)分析夏威夷的 Kaoiki 地区的震源机制变化，提出了考虑震源区应力场的改变进行地震预报的思路；刁桂苓等(2001)研究了 1982 年日本茨城地震序列表现出的局部板块俯冲动态过程，根据得到的成因，提出了预测 $M\approx 7$ 地震的意见. 多年来，笔者一直坚持研究震源机制用于地震预测的方法和途径. 本文利用哈佛大学提供的矩心矩张量(CMT)最佳双力偶解，分析千岛岛弧地区的 CMT 解的一致性，探索大震前的变化，提取有预测意义的信息.

1 资料

哈佛大学已经把测定 CMT 解纳入准实时的日常工作，目前从因特网(Internet)网上可以下载 CMT 目录. 千岛岛弧地区属于全球地震活动最为活跃的地区之一，太平洋板块由东南方向朝西北方向运动，在千岛岛弧处向北美板块下方俯冲，平均每年板块移动的速度接近 10 cm. 并且，其俯冲速度快，造成俯冲角很小，导致地震多发生在浅层. 我们用矩形框选取千岛岛弧地区的地震得到 406 次地震的数据(图 1). 其震中分布呈弧形向南东方向凸出. 地震呈条带状绵延伸展 700 km, 宽约 150 km. 大多数地震属于浅源地震，震源深度小于 70 km 者为 323 次, 最深的仅仅延伸到 133 km. 作震级-频度分析(图 2), 显示 $M_w\leq 5.2$

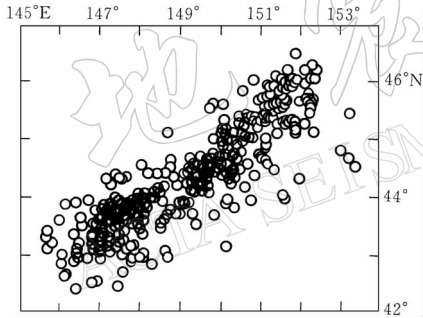


图 1 千岛岛弧地区有 CMT 解地震的震中分布

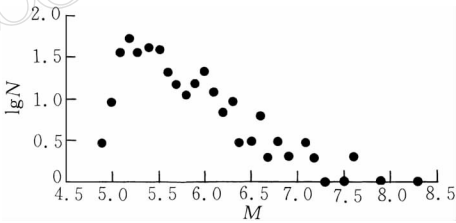


图 2 震级-频度分布

表 1 千岛岛弧地区 $M_w\geq 7$ 地震目录

年-月-日	时:分:秒	$\lambda_E/(^{\circ})$	$\varphi_N/(^{\circ})$	h/km	M_w
1978-03-24	00:31:15.0	149.23	43.81	41.5	7.1
1978-03-24	03:15:44.9	149.27	44.12	28.3	7.6
1978-03-24	19:48:11.4	148.98	44.20	30.7	7.5
1980-02-24	05:51:11.7	146.91	43.21	33.6	7.1
1982-06-30	01:57:44.3	151.18	44.59	26.5	7.1
1984-03-24	09:44:15.9	148.62	44.17	30.6	7.2
1991-12-22	08:43:30.7	151.55	45.58	31.2	7.6
1994-10-04	13:23:28.5	147.63	43.60	68.2	8.3
1994-10-08	07:55:49.4	147.96	43.87	33.2	7.3
1995-12-04	18:01:36.1	150.17	44.82	25.9	7.9
1996-02-08	21:36:56.6	150.45	45.29	48.7	7.2

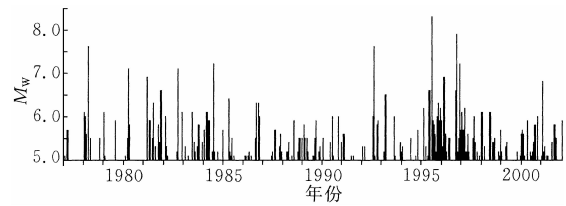


图 3 千岛岛弧地区地震 CMT 目录 M_w - t 分布

见地震活动强度之高. 而大地震则是成组活动, 例如, 1978 年 3 月 24 日当天连续发生 3 次 M_w 7.1、 M_w 7.6 和 M_w 7.5 大地震; 1994 年 10 月 4~8 日发生 M_w 8.3 和 M_w 7.3 地震; 1995 年 12 月 4 日发生 M_w 7.9 地震后 2 个月, 1996 年 2 月 8 日发生 M_w 7.2 地震.

2 分析

图 4 是 310 个震源机制解各个参数每 10° 归一频数分布. 在统计节面参数时, 没有把断层面和辅助面区分开, 而是合在一起一并计算. 断层面的走向是 NE 向, 与太平洋板块在千岛岛弧向北美板块俯冲条带的延展方向一致; 滑动角在 90° 附近占据绝大多数, 表现为逆冲方式; 倾角分作 2 组: 65° 左右一组, 25° 左右一组, 而 25° 左右恰恰是该地区太平洋板块的俯冲角, 65° 左右则是辅助面的倾角. P 轴的方位基本集中在 SE 方向, 与太平洋板块在此处的运动方向相同. 其倾角很低在 $10^\circ \sim 30^\circ$ 最多, 与低倾角的俯冲对应; T 轴的方位稍显离散, 但是仍然位于 $270^\circ \sim 360^\circ$ 的 90° 度角域, T 轴的倾角较高, 在 $50^\circ \sim 80^\circ$ 最多. N 轴

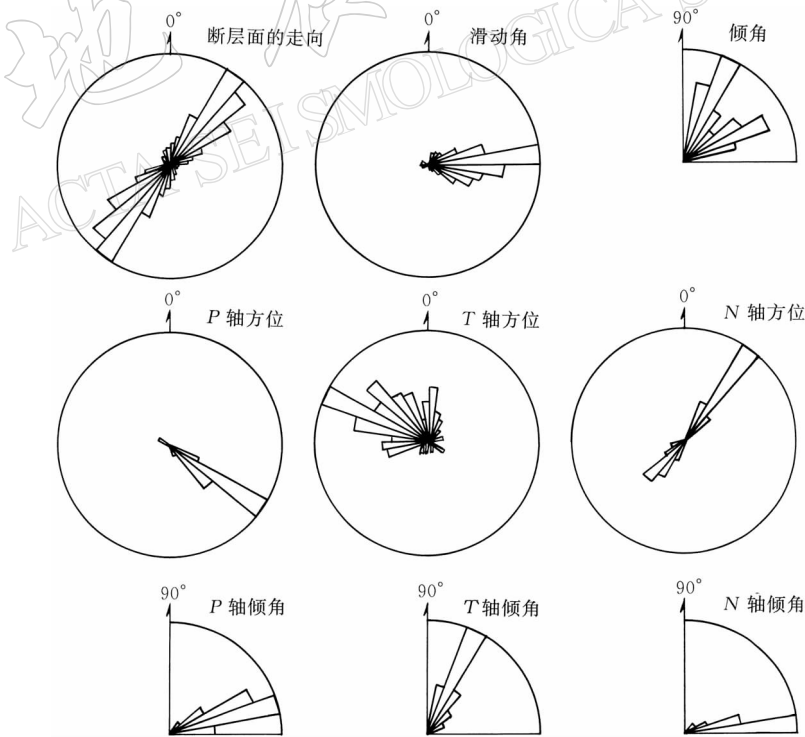


图 4 CMT 最佳双力偶解各个参数每 10° 归一频数分布

的方位同样非常集中, 并且与断层面的走向相同, 倾角以水平附近最多. 虽然千岛岛弧西段地震活动强烈, 但是它们的震源机制存在非常好的一致性. 长达 25 年的资料得到的震源机制优势取向, 与当地板块运动方向和构造应力场的作用方式相符, 使得我们有理由提出用震源机制和构造应力场的一致性进行地震预测的思路.

构造应力场的空间方向由 3 个相互正交的应力主轴表示: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$; 震源机制的取向由 3 个相互正交的应力轴 P, N, T 表示(图 5). 因此, 定义震源机制和构造应力场一致性参数

$$\alpha = \alpha + \beta + \gamma \quad (1)$$

其中, $\alpha = \angle \sigma_1 OP$, $\beta = \angle \sigma_2 ON$, $\gamma = \angle \sigma_3 OT$. 一致性参数 α 的最大值为 270° , 最小值为 0° .

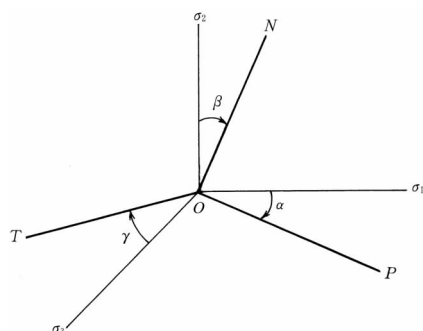


图 5 构造应力场 3 个应力主轴和震源机制 3 个应力轴夹角示意

详细分析 $M_w \geq 7$ 地震的 T, N, P 这 3 个应力

主轴, $M_w 7.1$ 的地震有 1 次是正断层, 2 次是逆断层, 且不稳定. Scholz (1990) 在只考虑破裂的物理学问题时提出简单划分大、小地震的标准: 小地震是所有破裂尺度小于碎裂圈厚度的事件, 其扩展和结束全都在碎裂圈的边界内, 其行为可以用无边界弹性固体中的破裂来描述; 相反地, 大地震是指破裂尺度等于或者大于碎裂圈厚度的事件, 一旦地震变大时, 它们被迫只能水平地扩展, 其纵横比逐渐增加, 其上端位于自由表面, 下端位于碎裂圈底部. 当然各个地方的碎裂圈厚度不同, 分界震级不一. 例如圣安德列斯断层, 其碎裂圈厚度大约只有 15 km, 分界震级约为 6~6.5; 而俯冲带处碎裂圈厚度则要大多, 其分界震级约为 7.3. 从图 2 中可以看出, 震级小于 7.3 时, 存在较好的线性关系; 震级超过 7.3 时, 地震次数不再增加, 也就是出现所谓的转折现象. 如此看来大地震和小地震遵从不同的标度关系, 这可能反应它们具有不同的几何和边界条件; 当定量地考虑地震在构造中的作用时, 一般只考虑大地震. 而 7.3 级以上大地震的应力轴的数值非常接近, 并且与全部 CMT 解的优势取向相同. 因此, 我们采用这些地震的平均 P, N, T 轴作为构造应力场的参照系. 取 σ_1 轴的方位 $\sigma_{1az} = 128.7^\circ$ 、倾角 $\sigma_{1pl} = 29.8^\circ$, σ_3 轴的方位 $\sigma_{3az} = 170^\circ$ 、倾角 $\sigma_{3pl} = 90^\circ$, σ_2 轴的方位 $\sigma_{2az} = 0^\circ$ 、倾角 $\sigma_{2pl} = 0^\circ$, 然后在三维空间计算各个震源机制和构造应力场的一致性参数 α .

计算出各个震源机制的一致性参数 α (5 点滑动平均) 如图 6 所示, 纵坐标的一致性参数 α , 以度表示; 横坐标是地震发生的顺序 (标注时间), 图中按顺序标出全部 $M_w \geq 7.5$ 地震.

图 6 显示, $M_w \geq 7.5$ 地震发生之前, 都有一致性参数 α 降低的现象, 这种现象重复出现 4 次, 绝非偶然的因素所致. 当然也有 2 次低值没有对应大震 (图 6 中以 ? 示出), 这种现象仅仅出现在数据的前 10 年, 当时的地震台网控制能力稍差, 可能存在遗漏中等地震而发生虚假变化的情况. 对这 4 组大震前一致性参数 α 进行统计, 一致性参数降低起始的时间在发生大震之前的 10 多天至 110 多天不等, 一致性参数低值结束的日期距大震在 30 多天至 2 天不等. 相互之间虽然不完全一致, 但差别不大.

3 讨论和结论

对于千岛岛弧地区, 由于哈佛大学 CMT 解的一致性参数 α 在大地震之前重复出现低

值,我们认为这是一种具有预测意义的现象.

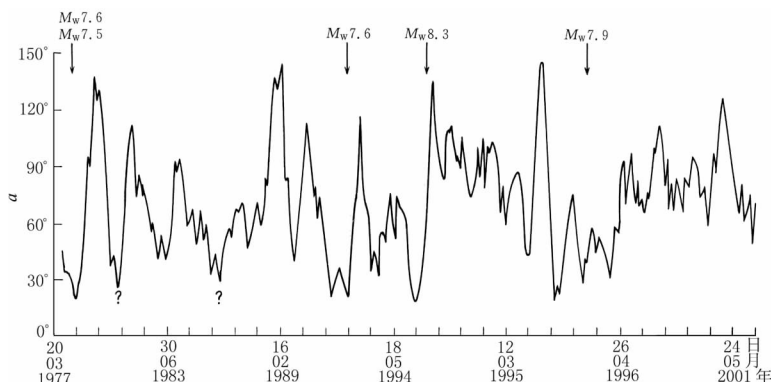


图 6 一致性参数(5 点滑动平均)随地震序号(时间)的变化

图中,箭头表示 $M_w \geq 7.5$ 大震,? 处为虚报

至于这种现象的稳定性,当然需要时间的检验,考察千岛岛弧地区今后再发生大震之前能否重复.但是设想在长达数百公里的地区,连续发生 $M_w \geq 5.3$ 地震的震源机制都与应力场一致,应当不是随机的现象.对于 $M_w \leq 7.2$ 地震之前没有出现一致性参数降低,可能是因为这种地震的孕育影响不了 $700 \text{ km} \times 150 \text{ km}$ 尺度的千岛岛弧全区,而属于局部的事件,可以在今后的研究中进行更加精细的分析,寻找这些地震之前的变化图象.我们现在并不急于确定预测的准则,但是这种现象可以供预测参考.我们认为它是有发展前途的方法,希望把这种分析方法继续拓展到其它地区,当积累的震例足够多时,则有可能确定统一的判别标准和预测准则.

目前地震科学的一个重要发展趋势是从板块理论向板块边界带研究的过渡(陈颙,李丽,2003).如果认为板块边界的地震集中在接触面上,随着板块相对稳定的运动,地震震源机制应当是一致的.然而事实上它们之间存在相当大的差别,只在某些特定情况下才比较一致(比如大地震前后).因为地震发生在相当宽阔的地域,水平和垂直向在千岛岛弧西段都超过 500 km ,不能把它看作是集中在一个单纯的断层面上,而是分布在一定的体积之内.因此对于俯冲带的地震也不是过去认为的那么简单.

另外, Mazzotti 等(2000)研究了日本南海一千岛西部的 GPS 资料,证实消减板块的平均运动速度接近每年 10 cm ,但是在 1995~1997 年期间地震带全部被一级锁定,耦合的比例接近于 1.因此该处板块的相对运动,主要是大地震解耦完成的.正是在这种特定的情况下,离散发生的中等地震的震源机制才表现出显著的变化.

参 考 文 献

- 陈颙. 1978. 用震源机制一致性作为描述地震活动性的新参数[J]. 地球物理学报, **19**(2): 142~159
- 陈颙, 李丽. 2003. 地震科学的几个发展趋势[J]. 国际地震动态, (1): 2~5
- 刁桂苓, 于新昌. 1980. 唐山地震前后京、津、唐、张地区的综合断层面解[J]. 西北地震学报, **2**(3): 39~47
- 刁桂苓, 于新昌. 1982. 海坨山地震前综合断层面解矛盾比的变化[J]. 地震, (5): 16~17
- 刁桂苓, 于利民, 李钦祖. 1994. 强震前后震源区应力场变化一例[J]. 地震学报, **16**(2): 64~69
- 刁桂苓, 王勤彩, 傅容珊, 等. 2001. 1982 年日本茨城地震序列表现出的局部板块俯冲动态工程[J]. 地震学报, **23**(2): 136~142
- 吴忠良, 黄静, 张东宁, 等. 2003. 地震矩张量元素 M_{rr} 的空间分布与中国大陆岩石层地块[J]. 地震地质, **25**(1): 33~38

- 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
- Crampin S, Evans R, Atkinson B K. 1984. Earthquake prediction Anew physical basis[J]. *Geophys J R astr Soc*, **76**: 147~156
- Crampin S. 1978. Seismic-wave propagation through a cracked solid: polarization as a possible dilatancy diagno, stic[J]. *Geophys J R astr Soc*, **53**: 467~496
- Kagan Y Y. 2000. Temporal correlations of earthquake focal mechanisms[J]. *Geophys J Int*, **143**(3): 881~897
- Kagan Y Y. 1997. Seismic moment-frequency relation for shallow earthquakes: Regional comparison[J]. *J Geophys Res*, **102**(2): 2 835~2 852
- Kagan Y Y, Jackson D D. 1994. Long-term probabilistic forecasting of earthquakes[J]. *J Geophys Res*, **99**(13): 13 685~13 700
- Kagan Y Y, Jackson D D. 1995. New seismic gap hypothesis: Five years after[J]. *J Geophys Res*, **100**(3): 3 943~3 959
- Kagan Y Y, Jackson D D. 1999. Worldwide doublets of large shallow earthquakes[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **89**: 1 147~1 155
- Kawakatsu H. 1991. Enigma of earthquake at ridge-transform-fault plate boundaries-distribution of non-double couple parameter of Harvard CMT solutions[J]. *Geophys Res Lett*, **18**: 1 103~1 106
- Mazzotti S, Pichon X L, Henry P. 2000. Full interseismic locking of the Nankai and Japan-west Kurile subduction zones: An analysis of uniform elastic strain accumulation in Japan constrained by permanent GPS[J]. *J Geophys Res*, **105**(b6): 13 159~13 177
- Scholz C H. 1990. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*[M]. New York: Cambridge University Press, 187~189
- Tanimoto T, Okamoto T. 2000. Change of crustal potential energy by earthquakes: An indicator for extensional and compressional tectonics[J]. *Geophys Res Lett*, **27**: 2 313~2 316
- Tanimoto T, Okamoto T, Terra F. 2002. Tectonic signatures in coseismic gravitational energy change[J]. *Geophys J Int*, **149**(2): 490~498

CONSISTENT CMT SOLUTIONS FROM HARVARD UNIVERSITY BEFORE THE GREAT EARTHQUAKES IN KURILE ISLANDS AND ITS SIGNIFICANCE FOR EARTHQUAKE PREDICTION

Wang Junguo¹⁾ Diao Guiling²⁾

1) Earthquakes Administration of Tianjin Municipality, Tianjin 300201, China

2) Earthquakes Administration of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China

Abstract: The Central Moment Tensor (CMT) solution obtained by Harvard University for the earthquakes in Kurile Islands area is used in the paper to analyze the consistent focal mechanism in the area, and the idea to make earthquake prediction based on the consistent parameter a of focal mechanism and stress field is proposed. The results obtained from the study indicate that before the $M_w \geq 7.5$ earthquakes, the consistent parameter a decreases, which starts from 10~110 days or so and ends from about 30~2 days before the great earthquakes. Although the phenomenon is not totally the same for individual earthquakes, the difference between them is not large. Certainly, the phenomenon should be tested by time, but it is not random, because the phenomenon of consistent focal mechanism and stress field for the $M_w \geq 5.3$ earthquake appears successively in an area of several hundreds kilometers in length. It should be a phenomenon of predictive significance. When the accumulated earthquake examples are sufficient, uniform judgment criteria and prediction principles can be stipulated then.

Key words: Kurile Islands area; CMT solution; consistent parameter; predictive significance