

文章编号: 0253-3782(2005)03-0269-07

2004 年 12 月 26 日印尼北苏门答腊以西近海 $M_w 9.0$ 地震与地震的类临界点模型^{*}

蒋长胜¹⁾ 吴忠良^{1, 2)}

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国北京 100049 中国科学院研究生院地球科学学院

摘要 使用哈佛 CMT 资料, 研究了 2004 年 12 月 26 日印尼北苏门答腊以西近海 $M_w 9.0$ 地震前的长期地震活动. 这次地震前, 在 1/4 世纪的时间尺度、1 500 km 的空间尺度上, 存在加速矩释放(AMR)现象. 在这一空间尺度范围内, $M_w 9.0$ 地震仍落在分段的幂律分布上. 因此, 从地震的类临界点模型的角度考虑, 对这次特大地震的发生和地震的大小既无预测、亦无预报的情况, 并非由物理上的“不可预测性”所致.

关键词 印尼北苏门答腊以西近海 $M_w 9.0$ 地震 加速矩释放(AMR)现象 幂律分布
地震的类临界点模型

中图分类号: P315.75

文献标识码: A

引言

2004 年 12 月 26 日印尼北苏门答腊以西近海 $M_w 9.0$ 地震的发生, 使地震学家再次看到地震预测预报研究的困难. 对地震学家来说, 这次地震的确是“出人意料”的, 因为对这次地震的发生和地震的大小, 既没有概率性的预测(forecasting), 也没有确定性的预报(prediction). 这就使得有必要回头看一看地震之前的资料, 以确定这次地震是否确实属于物理上“不可预测”的事件.

1 地震前的加速矩释放(AMR)现象

在地震的物理学中, 一个近年来讨论较多的模型, 是把地震孕育(earthquake preparation)的过程看成是一种临界现象(Main, 1995; Sornette, Sammis, 1995; Ben-Zion *et al*, 2003), 称为地震的类临界点(critical-point-like)模型. 作为这一临界性的一个表现, 大地震之前往往存在地震矩释放加速(AMR)现象(Sornette, Sammis, 1995; Jaumé, Sykes, 1999), 其表现与凝聚态物理中一些参量在临界点附近的变化相似. 这一模型引起地震学家的较为广泛的关注(Varnes, 1989; Sornette, Sammis, 1995; Jaumé, Sykes, 1999; Bowman, King, 2001). 因此, 考察这一地震之前是否存在 AMR 现象可能是有意义的.

过去, AMR 一般有 3 种等效的表示方法: 加速矩释放或能量释放、加速应变释放、地震数目的增加, 其中矩释放或能量释放、应变释放的量是由地震震级经验地换算得到的

^{*} 国家科技部项目(2004CB418406)资助. 中国地震局地球物理研究所论著 05AC1012.
2005-02-07 收到初稿, 2005-02-21 收到修改稿, 2005-03-28 决定采用.

(Bufe, Varnes, 1993). 由于这次地震极大, 所以有条件直接使用更好的地震矩目录. 我们

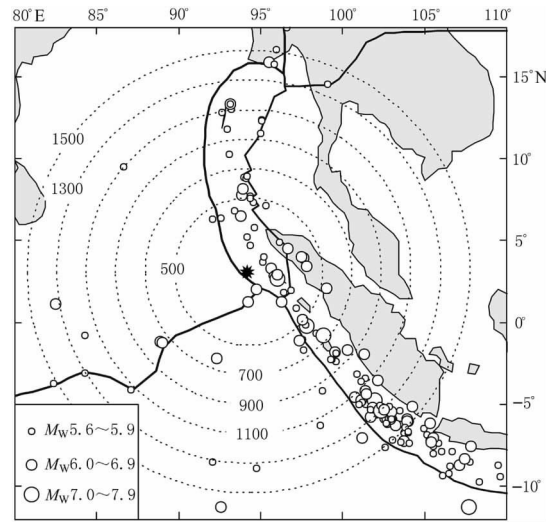


图 1 所用地震的分布. 图中星号表示印尼特大地震的矩心位置, 粗实线表示板块边界, 虚线表示选择数据的空间范围(单位为: km)

在分析中使用哈佛大学的 CMT 目录(<http://www.seismology.harvard.edu/CMTsearch.html>). 该目录起自 1977 年, 震级-频度统计给出其完整性震级下限为 $M_w5.5$. 因此在分析中, 使用 $M_w5.6$ 以上的浅源地震. 与以往的工作类似, 分析中仅使用主震目录, 其中余震的删除采用了 Keilis-Borok 等(1980)给出的判据. 图 1 给出了所用地震的分布. 为保证分析结果的稳定性, 考虑了不同的空间范围. 分析所用的空间范围选作以大地震的矩心为中心、不同半径的圆形区域. 圆形区域的半径从 500 km 增加到 1 500 km, 步长为 200 km. 图 2 给出了大地震之前的累积 Benioff 应变, 其中 $M_w9.0$ 地震的时间由图中垂直虚线给出. Benioff 应变由标量地震矩计算得到. 图中自下而上是不同半径的区域内的结果. 累积 Benioff 应变曲线的弯曲情况, 直观地给出了地震之前的 AMR 现象. 实际上, 该曲线的形状可以一般地表示为(Bufe, Varnes, 1993)

$$\sum \Omega = A + B(t_f - t)^m \tag{1}$$

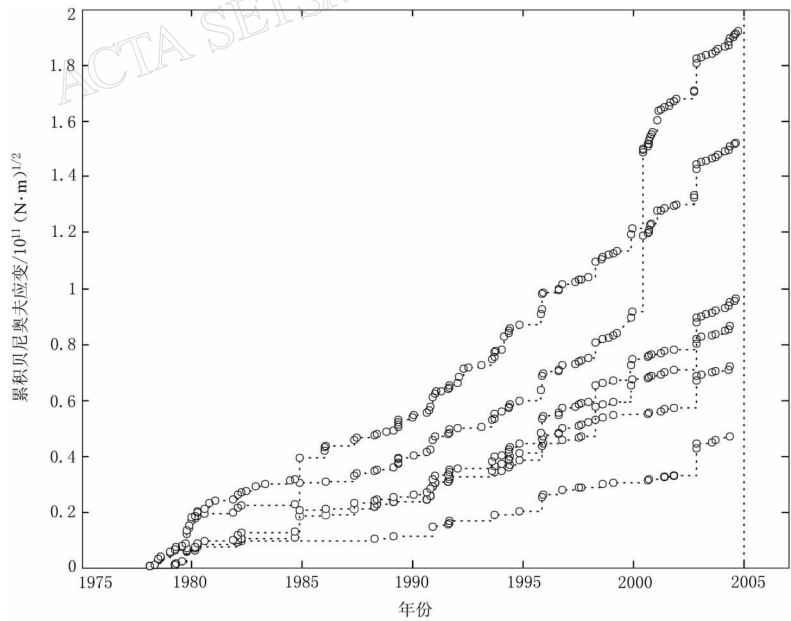


图 2 累积 Benioff 应变曲线. 图中自下而上分别为半径 500, 700, 900, 1 100, 1 300 和 1 500 km 范围内的地震的累积 Benioff 应变曲线; 垂直虚线表示 2004 年 12 月 26 日特大地震的时间

其中, Ω 是地震活动性的量度, 例如这里的累积 Benioff 应变; A, B 为常数; m 称为标度常数, t_f 是大地震发生的时间. 使用非线性最小二乘拟合, 计算得到对图 2 中的 6 条曲线, 给定 t_f 为大地震发生的时间, 则自下而上 m 值分别为 0.54, 0.79, 0.54, 0.57, 0.36 和 0.51, 均在 0 和 1 之间, 系典型的加速矩释放的情况 (Bufe, Varnes, 1993). 因此, 在这次地震之前, 的确存在 AMR 现象.

2 地震孕育区的尺度问题

如果认为存在 AMR 的地区的尺度标志着地震孕育区的尺度, 那么这里的结果表明, 这次地震的孕育过程所涉及的地区, 其半径应为 1 500 km 的数量级. 为确认这一结果的合理性, 需要与其它地震的情况进行比较, 以作为参照. 为此, 图 3 给出了以往一些作者 (Bufe *et al*, 1994; Varnes, Bufe, 1996; Bowman *et al*, 1998; Papazachos, Papazachos, 2000; Robinson, 2000; Karakaisis *et al*, 2002; Papazachos *et al*, 2002) 在研究板间地震前的 AMR 过程时所采用的 (或通过搜索得到的) 地震孕育区的尺度与所考虑的“目标地震”的矩震级之间的关系. 图 3 所用的数据和相关文献见表 1. 由于不同研究者在计算累积地震矩/能量/Benioff 应变释放时使用的震级并不统一, 这里首先将不同的震级单位统一换算成矩震级 M_w . 其做法是, 利用表 1 中所列各文献中原始的用震级估算的地震矩 M_0 , 采用矩震级的定义 (Kanamori, 1977; Hanks, Kanamori, 1979) 得到统一的矩震级 M_w . 个别资料来源中的部分震例, 并未明确指出用震级估算地震矩的关系式 (Bowman *et al*, 1998). 对这部分资料, 采用了 Varnes 和 Bufe (1996) 以及 Robinson (2000) 的换算公式.

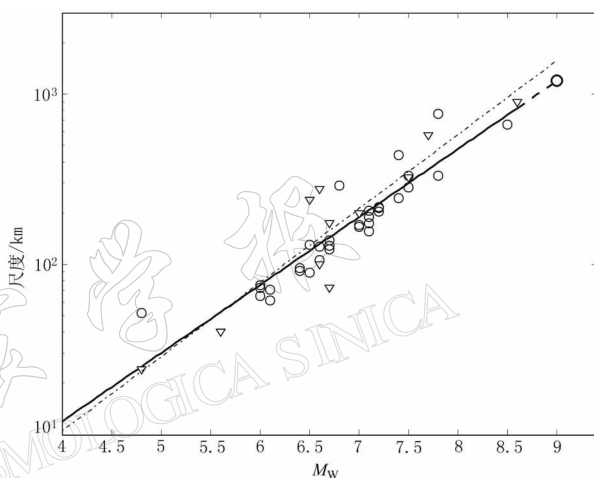


图 3 地震孕育区的尺度与矩震级 (M_w) 之间的对数线性关系. 所用数据见表 1. 图中实线为拟合线; 虚线是对拟合线的外推; 粗线圆圈表示外推到 $M_w 9.0$ 处的结果, 为 1 200 km. 点划线是 Bowman 等 (1998) 使用 12 例地震事件 (如图中倒三角所示, 见表 1 相应部分) 拟合得到的结果, 据此外推至 $M_w 9.0$ 处的结果为 1 600 km

从图 3 可以看出, 地震孕育区的尺度与矩震级之间存在比较好的对数线性关系. 对这一关系的外推给出在 $M_w 9.0$ 处的结果为 1 200 km. Bowman 等 (1998) 使用 12 例地震事件 (如图 3 中倒三角所示, 见表 1 相应部分) 拟合, 也得到对数线性的结果, 如图 3 中的点划线所示, 由这一拟合关系外推至 $M_w 9.0$ 处的结果为 1 600 km. 因此对这次 $M_w 9.0$ 地震, 地震孕育区的尺度取 1 500 km 应是一个合理的结果. 而作为一个更保守一些的考虑, 在下节的分析中, 我们不是用图 2 中最大的半径 1 500 km, 而是用次大的半径 1 300 km 的结果.

表 1 图 3 所用的震例及其参数

| 年-月-日 | 震 中 位 置 | M | M ¹ | R/km | 资 料 来 源 |
|------------|--------------------|----------------------|--------------------|---------|--------------------------------|
| * 1993-08 | Alaska Peninsula | * M _W 7.4 | | 440 | Bufe 等(1994) |
| * 1993-08 | Shumagin Islands | * M _W 7.5 | | 330 | Bufe 等(1994) |
| * 1994 | Delarof Islands | * M _W 7.8 | | 330 | Bufe 等(1994) |
| * 1994.0 | Shumagin Islands | * M _W 7.8 | | 770 | Bufe 等(1994) |
| * 1997-08 | Kommandorski | * M _W 8.5 | | 660 | Bufe 等(1994) |
| 1980-02-14 | 18°43'N, 64°39'W | m _b 4.8 | M _W 4.8 | 52 | Varnes 和 Bufo (1996) |
| 1952-07-21 | Kern Country | M _W 7.5 | | 325±75 | Bowman 等(1998) |
| 1992-06-28 | Landers | M _W 7.3 | | 150±15 | Bowman 等(1998) |
| 1989-10-18 | Loma Prieta | M _W 7.0 | | 200±30 | Bowman 等(1998) |
| 1994-01-17 | Northridge | M _W 6.7 | | 73±17 | Bowman 等(1998) |
| 1983-05-02 | Coalinga | M _W 6.7 | | 175±10 | Bowman 等(1998) |
| 1971-02-09 | San Fernando | M _W 6.6 | | 100±20 | Bowman 等(1998) |
| 1987-11-24 | Superstition Hills | M _W 6.6 | | 275±95 | Bowman 等(1998) |
| 1968-04-08 | Borrego Mountain | M _W 6.5 | | 240±60 | Bowman 等(1998) |
| 1950-08-15 | Assam | M _W 8.6 | | 900±175 | Bowman 等(1998) |
| 1906-04-18 | San Francisco | M _W 7.7 | | 575±240 | Bowman 等(1998) |
| 1986-07-08 | Palm Spring | M _L 5.6 | M _W 5.6 | 40±5 | Bowman 等(1998) |
| 1980-02-14 | Virgin Islands | m _b 4.8 | M _W 4.8 | 24±2 | Bowman 等(1998) |
| 1948-02-09 | 35.50°N, 27.20°E | M _W 7.1 | | 190 | Papazachos 和 Papazachos (2000) |
| 1952-12-17 | 34.40°N, 24.50°E | M _W 7.0 | | 171 | Papazachos 和 Papazachos (2000) |
| 1953-03-18 | 40.02°N, 27.53°E | M _W 7.4 | | 246 | Papazachos 和 Papazachos (2000) |
| 1953-08-12 | 38.30°N, 20.80°E | M _W 7.2 | | 216 | Papazachos 和 Papazachos (2000) |
| 1954-04-30 | 39.28°N, 22.29°E | M _W 7.0 | | 171 | Papazachos 和 Papazachos (2000) |
| 1956-07-09 | 36.64°N, 25.96°E | M _W 7.5 | | 284 | Papazachos 和 Papazachos (2000) |
| 1957-04-25 | 36.55°N, 28.80°E | M _W 7.2 | | 213 | Papazachos 和 Papazachos (2000) |
| 1967-03-04 | 39.20°N, 24.60°E | M _W 6.6 | | 106 | Papazachos 和 Papazachos (2000) |
| 1968-02-19 | 39.50°N, 25.00°E | M _W 7.1 | | 157 | Papazachos 和 Papazachos (2000) |
| 1970-03-28 | 39.20°N, 29.50°E | M _W 7.1 | | 175 | Papazachos 和 Papazachos (2000) |
| 1972-05-04 | 35.10°N, 23.60°E | M _W 6.5 | | 89 | Papazachos 和 Papazachos (2000) |
| 1976-05-11 | 37.40°N, 20.40°E | M _W 6.5 | | 131 | Papazachos 和 Papazachos (2000) |
| 1979-04-15 | 42.00°N, 19.00°E | M _W 7.1 | | 207 | Papazachos 和 Papazachos (2000) |
| 1981-02-24 | 38.07°N, 23.00°E | M _W 6.7 | | 128 | Papazachos 和 Papazachos (2000) |
| 1981-12-19 | 39.00°N, 25.26°E | M _W 7.2 | | 203 | Papazachos 和 Papazachos (2000) |
| 1983-01-17 | 38.10°N, 20.20°E | M _W 7.0 | | 171 | Papazachos 和 Papazachos (2000) |
| 1986-09-13 | 37.17°N, 22.09°E | M _W 6.0 | | 73 | Papazachos 和 Papazachos (2000) |
| 1992-04-30 | 34.99°N, 26.72°E | M _W 6.1 | | 71 | Papazachos 和 Papazachos (2000) |
| 1994-09-01 | 41.12°N, 21.25°E | M _W 6.1 | | 61 | Papazachos 和 Papazachos (2000) |
| 1995-05-13 | 40.15°N, 21.68°E | M _W 6.6 | | 127 | Papazachos 和 Papazachos (2000) |
| 1995-06-15 | 38.36°N, 22.28°E | M _W 6.4 | | 95 | Papazachos 和 Papazachos (2000) |
| 1997-10-13 | 36.33°N, 22.17°E | M _W 6.4 | | 92 | Papazachos 和 Papazachos (2000) |
| 1997-11-14 | 38.73°N, 25.91°E | M _W 6.0 | | 65 | Papazachos 和 Papazachos (2000) |
| 1997-11-18 | 37.58°N, 20.57°E | M _W 6.6 | | 106 | Papazachos 和 Papazachos (2000) |
| 1995-02-05 | 37.65°S, 179.49°E | M _L 7.0 | M _W 7.0 | 167 | Robinson (2000) |
| 1994-06-18 | 43.01°S, 166.71°E | M _L 6.7 | M _W 6.7 | 139 | Robinson (2000) |
| 1993-08-10 | 45.21°S, 177.46°E | M _L 6.7 | M _W 6.7 | 122 | Robinson (2000) |
| * 2001-01 | 39.7°N, 23.7°E | * M _W 6.0 | | 75 | Karakaisis 等(2002) |
| * 2002-08 | 36.4°N, 22.8°E | * M _W 6.8 | | 289 | Papazachos 等(2002) |
| * 2003-05 | 36.5°N, 27.0°E | * M _W 6.8 | | 289 | Papazachos 等(2002) |

注：所列地震按文献发表顺序排列。表中各项的意义如下：M 表示主震震级，M¹ 表示经过换算得到的矩震级，R 表示地震孕育区的尺度，带星号的年份和震级表示预测的主震震震时间及震级。

3 地震的幂律分布与地震的大小

尽管苏门答腊地区是一个地震活跃的地区，在此地发生一次 9.0 级地震，仍使地震学家“吃惊”。因此结果是，在印度洋地区对于特大地震及其造成的海啸，几乎没有任何准备。然而，考虑如上所述的地震孕育区的尺度，可以看到这次地震的大小，仍在幂律分布模型所允许的范围之内。

为说明这一点，我们使用物理学上用于识别幂律分布和预测最大事件的级序分析(rank-ordering analysis)方法(Sornette *et al*, 1996)。这一方法，或称 Zipf-分布，可以描述自然界和人类社会中的很多现象，从 DNA 的结构(Mantegna *et al*, 1995)到市场经济条件下公司规模分布(Axtell, 2001)。此外，Zipf-分布可以从很少的数据，例如几十个数据中提取幂律分布的信息。Zipf-分布简单地将所有数据按其大小排序，再在双对数坐标中画出其大小与级序(rank)之间的关系。数值实验表明(Sornette *et al*, 1996)，幂律关系表现为级序图上的直线，分段的幂律表现为级序图上的折线。Sornette 等(1996)用级序图上的直线的延伸(即在级序图上，外推出

“第零位”事件作为未来的最大事件)来预测最大事件的尺度。图 4 给出了包括印尼特大地震在内的所有事件的级序分析图，所用数据的取法与图 2 相同，空间区域的半径为次大半径 1 300 km。由于矩震级是地震矩的对数，所以纵坐标直接使用了矩震级。从图上可见，所考虑的区域内的地震活动可以分成 3 组，分界分别为 M_w 6.5 和 M_w 7.3。3 组地震分别遵守不同的幂律关系，但数值实验的结果表明，由图上简单得到的这些分界，通常是不精确的(Sornette *et al*, 1996)。如果印尼特大地震严重地偏离图中的幂律关系，那么可以说这次地震是一次“出人意料”的大地震。但图 4 所示的情况并非如此。从图 4 中可以看出，印尼特大地震仍处在第一段幂律关系的直线上，这说明其大小仍在幂律关系所给出的范围之内。

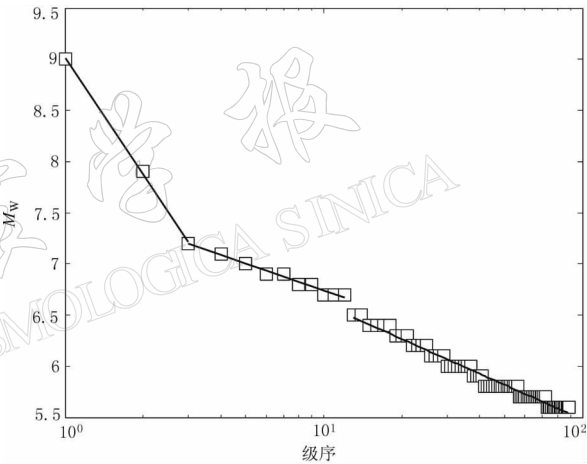


图 4 以印尼特大地震的矩心为中心、半径 1 300 km 范围内的地震活动的级序分析图。其中特大地震是 1 号地震，2 号地震是 2000 年 6 月 4 日 M_w 7.9 地震

4 讨论和结论

本文将 2004 年 12 月 26 日印尼北苏门答腊以西近海 M_w 9.0 地震作为一个个例，回溯性地考察这次地震之前是否存在 AMR 现象，以及这次地震的大小是否仍服从幂律分布。所得结果表明，从地震孕育的类临界点模型的角度看，这次地震无论是在时间上还是在尺度上都并未超出物理模型所允许的范围，因而对这次地震既无预测、亦无预报的情况，决非由于这次地震的物理上的“不可预测性”。这次特大地震和地震海啸造成的巨大损失已无

法弥补。然而,这次地震的发生,并没有摧毁地震预测预报研究的希望。

与陈运泰院士的讨论启发了这一工作。陈运泰院士对修改稿的建议对提高有关表述的准确性有很大的帮助。作者谨表示感谢。

参 考 文 献

- Axtell R L. 2001. Zipf distribution of U S firm sizes[J]. *Science*, **293**: 1 818~1 820
- Ben-Zion Y, Eneva M, Liu Y F. 2003. Large earthquake cycles and intermittent criticality on heterogeneous faults due to evolving stress and seismicity[J]. *J Geophys Res*, **108**(B6): doi: 10.1029/2002JB002121
- Bowman D D, King G C P. 2001. Accelerating seismicity and stress accumulation before large earthquakes[J]. *Geophys Res Lett*, **28**: 4 039~4 042
- Bowman D D, Ouillon G, Sammis C G, *et al.* 1998. An observational test of the critical earthquake concept[J]. *J Geophys Res*, **103**: 24 359~24 372
- Bufe C G, Varnes D J. 1993. Predictive modeling of the seismic cycle of the Greater San Francisco Bay Region[J]. *J Geophys Res*, **98**: 9 871~9 883
- Bufe C G, Nishenko S P, Varnes D J. 1994. Seismicity trends and potential for large earthquake in the Alaska-Aleatian region[J]. *Pure Appl Geophys*, **142**: 83~99
- Hanks T C, Kanamori H. 1979. A moment-magnitude scale[J]. *J Geophys Res*, **84**: 2 348~2 350
- Jaumé S C, Sykes L R. 1999. Evolving towards a critical point: A review of accelerating seismic moment/energy release prior to large and great earthquake[J]. *Pure Appl Geophys*, **155**: 279~306
- Kanamori H. 1977. The energy release in great earthquakes[J]. *J Geophys Res*, **82**: 2 981~2 987
- Karakaisis G F, Papazochos C B, Savvaaidis A S, *et al.* 2002. Accelerating seismic crustal deformation in the north Aegean trough, Greece[J]. *Geophys J Int*, **148**: 193~200
- Keilis-Borok V I, Knopoff L, Rotvain I M, *et al.* 1980. Bursts of seismicity as long-term precursors of strong earthquakes[J]. *J Geophys Res*, **85**: 803~811
- Main I G. 1995. Earthquakes as critical phenomena: implications for probabilistic seismic hazard analysis[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **85**: 1 299~1 308
- Mantegna R N, Buldyrev S V, Goldberger A L, *et al.* 1995. Systematic analysis of coding and noncoding DNA sequences using methods of statistical linguistics[J]. *Phys Rev E*, **52**: 2 939~2 950
- Papazachos B, Papazachos C. 2000. Accelerated preshock deformation of Broad regions in the Aegean area[J]. *Pure Appl Geophys*, **157**: 1 663~1 681
- Papazachos C B, Karakaisis G F, Savvaaidis A S, *et al.* 2002. Accelerating seismic crustal deformation in the south Aegean area[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **92**: 570~580
- Robinson R. 2000. A test of the precursory accelerating moment release model on some recent New Zealand earthquakes[J]. *Geophys J Int*, **140**: 568~576
- Sornette D, Sammis C G. 1995. Critical exponents from renormalization group theory of earthquakes: implications for earthquake prediction[J]. *J Phys I*, **5**: 607~619
- Sornette D, Knopoff L, Kagan Y Y, *et al.* 1996. Rank-ordering statistics of extreme events: application to the distribution of large earthquakes[J]. *J Geophys Res*, **101**: 13 883~13 893
- Varnes D J. 1989. Predicting earthquakes by analyzing accelerating precursory seismic activity[J]. *Pure Appl Geophys*, **130**: 661~686
- Varnes D J, Bufe C G. 1996. The cyclic and fractal seismic series preceding an m_b 4.8 earthquake on 1980 February 14 near the Virgin Islands[J]. *Geophys J Int*, **124**: 149~158

THE DECEMBER 26, 2004, OFF THE WEST COAST OF NORTHERN SUMATRA, INDONESIA, $M_w=9.0$, EARTHQUAKE AND THE CRITICAL-POINT-LIKE MODEL OF EARTHQUAKE PREPARATION

Jiang Changsheng¹⁾ Wu Zhongliang^{1, 2)}

1) *Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*

2) *College of Earth Science, Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract: Long-term seismic activity prior to the December 26, 2004, off the west coast of northern Sumatra, Indonesia, $M_w=9.0$ earthquake was investigated using the Harvard CMT catalogue. It is observed that before this great earthquake, there exists an accelerating moment release (AMR) process with the temporal scale of a quarter century and the spatial scale of 1 500 km. Within this spatial range, the $M_w=9.0$ event falls into the piece-wise power-law-like frequency-magnitude distribution. Therefore, in the perspective of the critical-point-like model of earthquake preparation, the failure to forecast/predict the approaching and/or the size of this earthquake is not due to the physically intrinsic unpredictability of earthquakes.

Key words: the 2004 off the west coast of northern Sumatra $M_w=9.0$ earthquake; accelerating moment release (AMR) before earthquakes; power-law-like frequency-magnitude distribution; critical-point-like model of earthquake preparation