

孙丽娜、李皓、齐玉妍等,2017,2004 年 12 月 26 日印度尼西亚  $M_w$  9.0 大震前后震源机制一致性变化特征研究,中国地震,33(3),424~431。

# 2004 年 12 月 26 日印度尼西亚 $M_w$ 9.0 大震 前后震源机制一致性变化特征研究

孙丽娜 李皓 齐玉妍 温超 刁桂苓

河北省地震局,石家庄市槐中路 262 号 050021

**摘要** 本文选取 2004 年 12 月 26 日发生在印度尼西亚西北近海、震中位于巽他海沟的东侧的  $M_w$  9.0 地震的余震分布空间范围为研究区域,分析了该区域震源机制,并利用震源机制和构造应力场的一致性参数  $a$  进行了地震检验。研究结果表明, $M_w \geq 7.5$  地震之前,都有参数  $a$  降低的现象, $M_w$  9.0 地震前, $a$  值都有动荡起伏的情况。该研究区长达数千千米,而连续发生的  $M_w \geq 5.0$  地震的震源机制与构造应力场一致,应当不是随机现象,似可视为具某种前兆意义的现象。

**关键词:** 印度尼西亚 震源机制解 一致性参数 预测

[文章编号] 1001-4683(2017)03-0424-08 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

地震既能给人类带来重大的灾害,同时也给人类提供了了解地球构造及其运动状态的丰富信息,这种双重性在特大地震(8 级及以上地震)中更为凸现。当今地学发展的重要趋向之一是全球构造整体协调运动观念的建立。作为现今全球构造运动最直接表象之一的地震,特别是那些接近或超过 8 级的大地震,更能够反映全球尺度构造应力场微动态的重要特征(郭增建等,1988)。据 USGS 给出的 1900 年以来全球大震的最新排名结果显示,2004 年  $M_w$  9.0 地震为排名第 3 的大地震,该震发生在印度-澳大利亚板块和欧亚板块交汇部位的安达曼弧构造带上,是一次典型的板缘地震(陈学忠等,2013)。近年来全球大震频出,其前兆机理已引发了地学界的深切关注。

2004 年 12 月 26 日印尼苏门答腊  $M_w$  9.0 地震的震中位于巽他海沟东侧的印度洋海床处(3.30°N,95.98°E),距印尼首都雅加达西北 1620km,震源深度 30km。Ammon 等(2005)研究了该震的震源破裂过程,结果显示,其震源破裂尺度达 1200~1300km,其中 600km 尺度的同震位错达 15m 以上。这次地震所引发的海啸席卷了印度洋沿岸的 7 个国家,已造成的死亡人数突破 16.2 万(数据统计截止时间为 2005 年 1 月 16 日)。其中,印度尼西亚死亡 114798 人;斯里兰卡死亡 30920 人,80 万人受伤;印度死亡 10714 人,5669 人失踪;泰国死亡 5321

[收稿日期] 2015-03-11; [修定日期] 2016-09-11

[项目类别] 河北省地震局科技创新团队项目资助

[作者简介] 孙丽娜,女,1982 年生,硕士,主要从事地震震中长期活动预测研究。E-mail:sunlina20082008@126.com

人,9813人受伤;马来西亚死亡72人,130人受伤;马尔代夫死亡82人;缅甸死亡59人;孟加拉国死亡2人。另外,还有百名外国游客遇难(梁凯利,2005)。

Dasgupta等(2007)研究了2004年印尼大震前的  $b$  值时空变化,发现大震前  $b$  值下降到一个低值。Tanaka(2010)研究了2004年印尼大震前的  $p$  值时空变化,同样发现大震前  $p$  值也下降到一个低值。陈颢(1978)根据海城地震前震序列的研究,提出用震源机制的一致性作为判别前震的新参数;刁桂苓等(1994)在分析了夏威夷的 Kaoiki 地区的震源机制变化后,提出了通过考量震源区应力场的改变来对地震活动进行预测的思路;王俊国等(2005)利用震源一致性参数分析了千岛岛弧大震前的  $a$  值的变化情况,进而分析大震前的前兆现象。

本文利用震源一致性参数  $a$  值的变化情况,分析研究2004年印尼  $M_w$  9.0 大震前的演变,以期通过提取有意义的预测信息,为地震活动活动预测研究提供帮助。

### 1 研究区域及资料

特大地震通常发生在板块交界部位,2004年印尼  $M_w$  9.0 地震就发生在俯冲带上,是印度洋-澳大利亚板块向 NE 方向巽他次级板块下方的俯冲碰撞时,由于摩擦力作用较大,使得上覆板块与俯冲板块一起向下运动,当板块间的剪切应力超过摩擦极限后,上覆板块反弹从而产生巨大的逆冲型地震(缪森等,2013)。

该震地处印度板块和欧亚板块的交界带,位于印尼弧形海沟的西端终止处附近(图1),深海沟是板块俯冲幅度较大的地方,俯冲对相邻的非深海沟地段有牵拉作用,另外,非深海沟地段两侧还有板块的挤压作用,造成了深海沟与非深海沟交接地段的高度应力集中,且是一个构造力作用方向及方式转换的地方,因此在这个地段发生特大地震是可以理解的(郭安

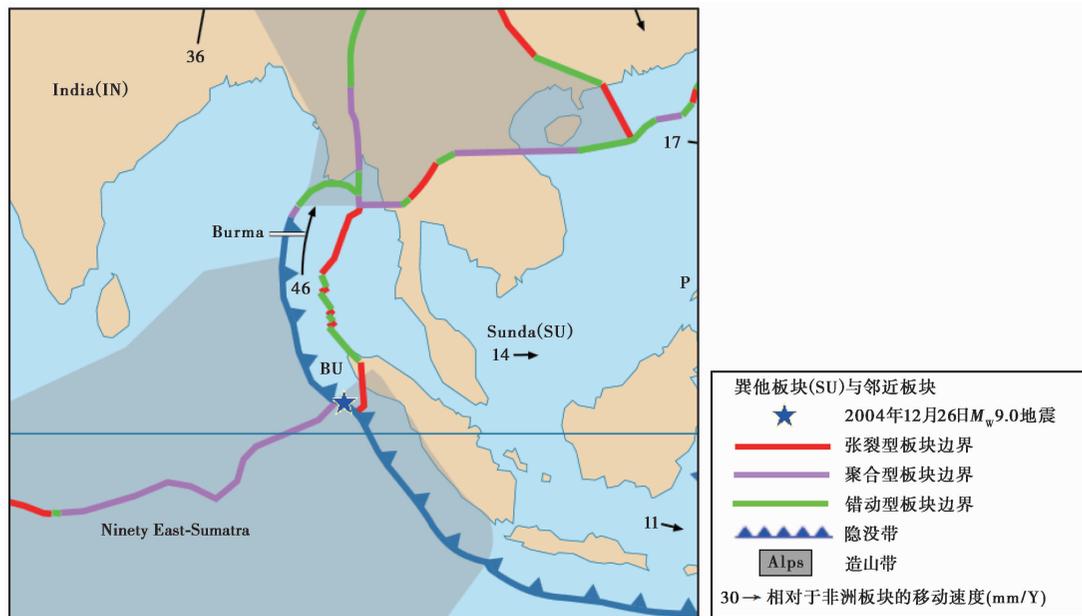


图1 研究区的背景构造图

(据 <http://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%B7%BD%E4%BB%96%E6%9D%BF%E5%A1%8A>)

宁等,2006)。历史上巽他海沟地震活动十分频繁,薛燕等(2005)通过研究该区历史上 8 级以上地震破裂尺度的空间分布,发现巽他海沟东侧 1°N~12°N 存在着长约 1000km 的 8 级地震空段。2004 年  $M_w$  9.0 地震就发生在该空段内,该震是单侧破裂,沿安达曼断层向 NW 方向形成长 1200~1300km 和宽约 150km 的破裂区(薛燕等,2008)。

据 USGS 的结果,该震为 1900 年以来世界第 3 大地震(表 1),地震引起了巨大海啸,造成 30 万人死亡。因此,针对如此特大地震,进行前兆的分析研究,以期对其活动性预测提供帮助,有着非常现实的意义。

表 1 1900 年以来全球  $M_w$  8.5 以上地震目录

| 序号 | 发震时间<br>(年-月-日) | 震中位置    |         | 震级  | 震中所在位置                                 |
|----|-----------------|---------|---------|-----|--|
|    |                 | 纬度/(°)  | 经度/(°)  |     |  |
| 1  | 1906-01-31      | 1       | -81.5   | 8.8 | Off the Coast of Ecuador               |
| 2  | 1922-11-11      | -28.55  | -70.5   | 8.5 | Chile-Argentina Border                 |
| 3  | 1923-02-03      | 54      | 161     | 8.5 | Kamchatka                              |
| 4  | 1938-02-01      | -5.05   | 131.62  | 8.5 | Banda Sea, Indonesia                   |
| 5  | 1950-08-15      | 28.5    | 96.5    | 8.6 | Assam-Tibet                            |
| 6  | 1952-11-04      | 52.76   | 160.06  | 9   | Kamchatka                              |
| 7  | 1957-03-09      | 51.56   | -175.39 | 8.6 | Andreanof Islands, Alaska              |
| 8  | 1960-05-22      | -38.29  | -73.05  | 9.5 | Chile                                  |
| 9  | 1963-10-13      | 44.9    | 149.6   | 8.5 | Kuril Islands                          |
| 10 | 1964-03-28      | 61.02   | -147.65 | 9.2 | Prince William Sound, Alaska           |
| 11 | 1965-02-04      | 51.21   | 178.5   | 8.7 | Rat Islands, Alaska                    |
| 12 | 2004-12-26      | 3.30    | 95.98   | 9.0 | Off the West Coast of Northern Sumatra |
| 13 | 2005-03-28      | 2.08    | 97.01   | 8.6 | Northern Sumatra, Indonesia            |
| 14 | 2007-09-12      | -4.438  | 101.367 | 8.5 | Southern Sumatra, Indonesia            |
| 15 | 2010-02-17      | -35.846 | -72.719 | 8.8 | Offshore Maule, Chile                  |
| 16 | 2011-03-11      | 38.322  | 142.369 | 9.0 | Near the East Coast of Honshu, Japan   |
| 17 | 2012-04-11      | 2.311   | 93.063  | 8.6 | Off the west coast of northern Sumatra |

本文用矩形框选取印尼-苏门答腊地区作为2004年印尼大震前兆研究区域,初始破裂点震中位于3联点,即3个板块交界处,但由于南部是俯冲带,北部东侧是转换断层(徐杰等,2005),二者性质不同,所以分两部分进行分析(图2)。选用的地震目录源自中国地震信息网中全球震源机制的数据,此地震目录的时段为1976~2014年。目录显现,地震呈条带状分布,大部分地震属于浅源地震,南部地震震源深度<70km的有948次,北部震源深度<70km的有186次。震级-频度分析(图3)显示, $M_w \geq 5.0$ 地震线性比较好,舍弃不完整 $M_w < 5.0$ 的地震后,可以保证数据的完整性。本文所研究的地震是造成灾害的浅源地震,因此选取的地震目录删除了震源深度大于70km的地震。在2004年12月26日印尼 $M_w$ 9.0地震之前,研究区发生的最大震级的地震为 $M_w$ 7.8,而此次大震的震级远超历史地震震级上限。又如2011年的日本9.0级地震,尽管每年都有对震区的地震活动预测图件的研究发布,但事实是地壳活动将几个预测区域连为一体,形成巨震。下面我们就利用震源机制的一致性参数的方

法, 对此类巨震活动的可能前兆进行分析探讨。

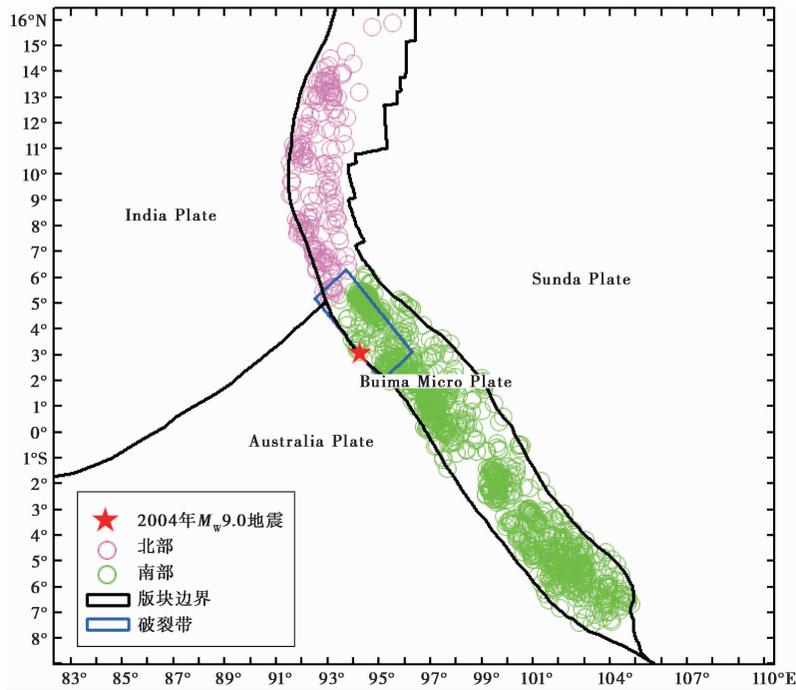


图2 研究区内本文所用地震分布

图中给出了板块边界内的 1976-2014 的  $M_w \geq 5.0$ 、深度  $\leq 70\text{km}$  的地震

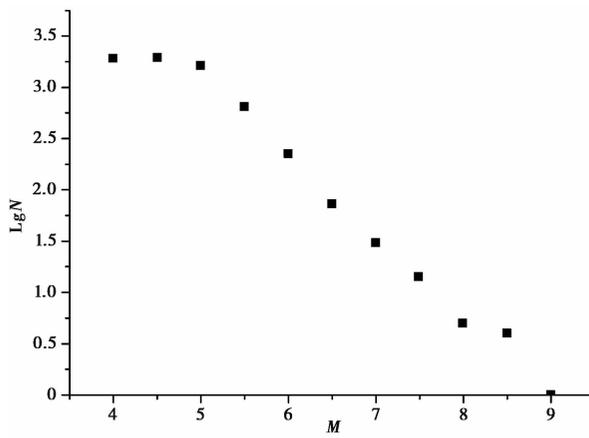


图3 震级-频度分布图(横坐标为:震级  $M$ )

## 2 研究方法

震源机制解是研究构造应力场的基础数据, 它反映了震源断层的力学特征, 可以揭示地震破裂的力学机制, 反映出地震等效释放应力场。陈颢(1978)研究的强震震例表明, 强震前震源机制解趋于一致的现象时有发生, 并提出了用震源机制一致性描述地震活动性, 且震源机制一致性参数是个相对的概念, 即其所说的前震震源机制解一致性, 并不是指所有前震震

源机制解都一样,而是相对余震来说比较一致。

一般将一个区域的应力场分为背景应力场和变化应力场。背景应力场主要反映区域内的平均应力状态,通常要看其是否存在一个较为稳定的空间取向,且认为这个稳定的空间取向对强震起着控制作用;变化应力场反映的是区域内小范围短时间的变化、扰动,通过研究变化应力场取向的变化,来发现构造运动的状况及强震的前兆信息(泽仁志玛等,2010)。

背景应力场的空间方向由3个相互正交的应力主轴表示: $P_0$ 、 $B_0$ 、 $T_0$ ,震源机制解的取向由3个相互正交的应力轴  $P$  轴、 $B$  轴、 $T$  轴表示。定义震源机制和背景应力场的一致性参数  $a$  为: $a = \alpha + \beta + \gamma$ ,如图4所示,其中  $\alpha$  为  $P_0$  轴与  $P$  轴的夹角, $\beta$  为  $B_0$  轴与  $B$  轴的夹角, $\gamma$  为  $T_0$  轴与  $T$  轴的夹角。一致性参数  $a$  的最大值为  $270^\circ$ ,最小值为  $0^\circ$ (王俊国等,2005)。

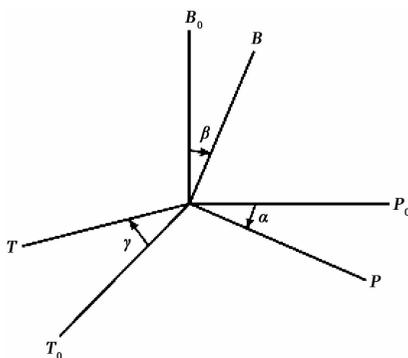


图4 背景应力场3个主轴和震源机制3个应力轴夹角示意

本文主要研究2004年印尼  $M_w$ 9.0地震前中小地震的震源机制解与背景应力场一致性变化特征。利用中小地震的震源机制与背景应力场的偏离程度来描述大震发生前应力场的变化情况,分析研究大震发生前震源区的前兆现象。

### 3 分析

本文利用震源机制一致性参数的计算方法,分析2004年印尼  $M_w$ 9.0地震前的前兆情况。因为本研究区内1976年以来9级以上大震只有2004年12月26日印尼  $M_w$ 9.0地震,本次地震的震源体积较大,相当于孕育地震的区域尺度,能够反映背景应力场对地震的控制作用,本文就用该巨震的应力轴作为背景应力场应力主轴取向的近似值(泽仁志玛等,2010),应力场的3个力轴取值为: $P_{0az} = 222^\circ$ 、 $P_{0pl} = 38^\circ$ 、 $B_{0az} = 130^\circ$ 、 $B_{0pl} = 3^\circ$ 、 $T_{0az} = 36^\circ$ 、 $T_{0pl} = 52^\circ$ ,然后在3维空间计算一致性参数  $a$ 。图5和图6为通过研究区域资料计算所得印尼大震前、后的一致性参数  $a$  随时间变化的情况。

图5中绿色区域为印尼  $M_w$ 9.0地震前低于  $a$  的均值的异常时间段。从研究区域的北、南两区的图中可以看出,震前  $a$  值都有下降的异常时段,主震发生前  $a$  值处于动荡起伏不定的最低点处。南区在异常时段内发生了1次  $M_w \geq 7.5$  地震,北区先后出现4次显著的下落过程,然后发生主震。实际上,无论南、北区,进入显著低值的时间都是1992年,可见巨大地震的前兆异常应出现在12年以前,这就有可能为鉴别出前兆后采取防御措施提供了时间。

图6是印尼  $M_w$ 9.0地震后震源机制一致性参数  $a$  的变化情况,从图中可以看出,震后  $a$

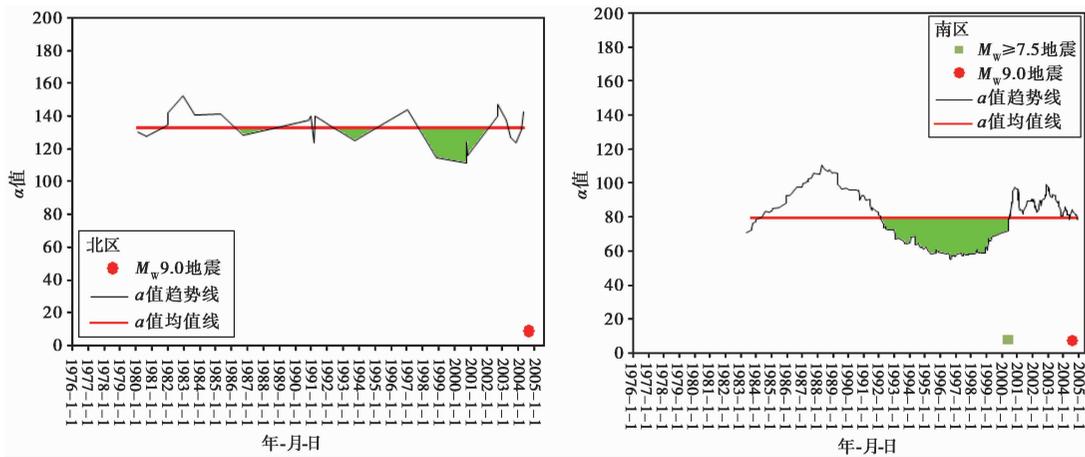


图5 2004年12月26日印尼  $M_w$  9.0 地震前的震源机制一致性参数  $a$  随时间的变化

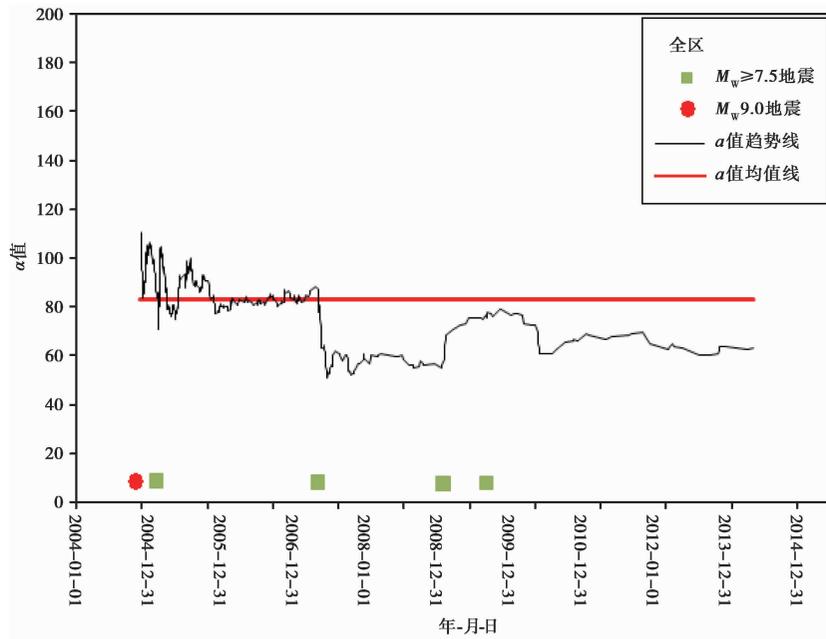


图6 2004年12月26日印尼  $M_w$  9.0 地震震后的震源机制一致性参数  $a$  的变化

值的变化动荡起伏没有规律,无法找到强余震震前的异常。可见一致性参数  $a$  值不适用于震后强余震的前兆分析。

图7为印尼  $M_w$  9.0 地震研究区域内震前  $M_w \geq 5.0$  地震的震源机制一致性参数的平面插图,一致性参数  $a$  的大小用等值线形式表示。图7显示存在地震危险性的低值区域相当集中,且  $M_w 7.5$  以上地震基本上都发生在  $a$  值的低值区。结合图5和图7,笔者认为在  $M_w 9.0$  地震之前震源区附近一致性参数  $a$  比较低,这种现象说明震源区附近的背景应力场控制作用增强,意味着将有发生强震的可能性。不仅时间上存在低值时间段,可能预示未来有大震发生,在空间上也存在低值区域,或许指明未来大震的破裂位置亦即成灾区域。2004

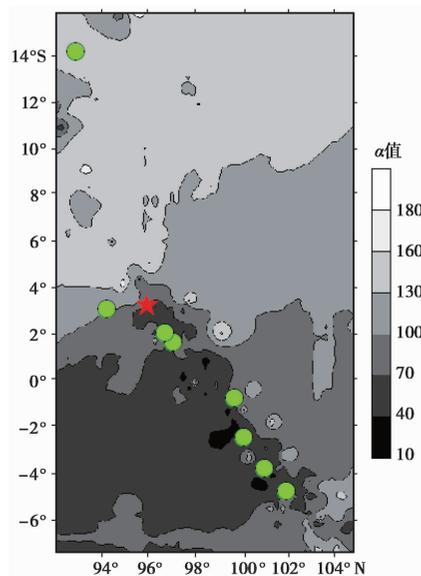


图7 2004年12月26日印尼 $M_w$ 9.0地震前的震源一致性参数 $\alpha$ 的平面插值图

红五角星为 $M_w$ 9.0地震震中,绿圈为 $M_w \geq 7.5$ 地震

年12月26日 $M_w$ 9.0强震发生后,图7显示一致性参数 $\alpha$ 开始动荡起伏不定,后续地震的震源机制散乱,背景应力场的控制作用开始减弱。

一致性参数 $\alpha$ 反映了单个震源机制解的力轴与平均应力张量的差异程度, $\alpha$ 值越小,表明与背景应力场力轴的重合性越好,反之则远离背景构造应力场。

#### 4 讨论和结论

国内外学者研究认为,强震发生前的前震活动是预测大震活动规律的前兆方法之一。王俊国等(2005)分析了千岛岛弧地区的358次地震震源机制一致性参数,结果表明,大震前一致性参数 $\alpha$ 重复出现低值。刁桂苓等(2004)分析了山西大同700余次震源机制与应力场的一致性参数,结果表明在1991年和1999年强余震前出现低值异常,且其震源机制具有方向性的一致性。由此可见,震源机制一致性参数的研究,不仅可能描述巨震之前的较长时段的前兆变化,甚或能表征更短时间尺度的震前活动形态。故以此方法探究2004年 $M_w$ 9.0地震前的前兆地震活动或是可行的。

印尼 $M_w$ 9.0地震发生前,孕震区一系列中小地震震源机制解一致性参数比较低,说明这些前震可能是受到了震源区应力场的统一作用。当然,主震发生前一系列的前震的震源机制解与背景应力场的一致性关系还需要更多震例的研究,并经更长久的时间检验。

#### 参考文献

陈学忠、李艳娥、王恒信等,2013,2004年印尼苏门答腊 $M_w$ 9.0地震前地震活动增强现象及其与地球自转的关系,地球物理学报,56(1),79~90。

陈颢,1978,用震源机制一致性作为描述地震活动性的新参数,地球物理学报,21,140~159。

刁桂苓、于利民、李钦祖,1994,强震前后震源区应力场变化一例,地震学报,16(2),64~69。

- 刁桂苓、赵英萍, 2004, 大同晚期强余震前震源机制解的一致性特征, 内陆地震, **18**(3), 202~206。
- 郭安宁、陈家超、郭增建, 2006, 2004年印尼9级大震的构造成因及回顾性预测研究, 西北地震学报, **28**(1), 56~58。
- 郭增建、马宗晋, 1988, 中国特大地震研究, 北京: 地震出版社。
- 梁凯利, 2005, 2004年12月26日印尼8.7级地震综述, 国际地震动态, **1**, 1~5。
- 缪森、朱守彪, 2013, 2012年北苏门答腊西海域  $M_w$  8.6地震的孕震机理及其对地震活动性的影响, 地震工程学报, **35**(2), 279~288。
- 王俊国、刁桂苓, 2005, 千岛岛弧大震前哈佛大学矩心矩张量(CMT), 地震学报, **27**(2), 178~183。
- 徐杰、高祥林、陈国光等, 2005, 2004年12月26日印度尼西亚8.7级大地震构造背景的初步分析, 地震地质, **27**(2), 324~331。
- 薛艳、宋治平、梅世蓉, 2005, 印尼苏门答腊9.0级地震前地震活动图像异常特征研究, 中国地震, **21**(3), 311~319。
- 薛燕、宋治平、梅世蓉等, 2008, 印尼苏门答腊几次大震前的地震活动异常特征, 地震学报, **30**(3), 321~325。
- 泽仁志玛、刁桂苓、李志雄等, 2010, 大震前显示的地震震源机制趋于一致的变化, 地震, **30**(1), 108~114。
- Ammon C J, Ji C, Thio H K, et al, 2005, Rupture process of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake, Science, **308**(5725), 1133~1139。
- Dasgupta S, Mukhopadhyay B, Bhattacharya, A, 2007, Seismicity pattern in north Sumatra Great Nicobar region; In search of precursor for the 26 December 2004 earthquake, J Earth Syst, Sci, **116**, 215~223。
- Tanaka S, 2010, Tidal triggering of earthquakes precursory to the recent Sumatra megathrust earthquakes of 26 December 2004 ( $M_w$  9.0), 28 March 2005 ( $M_w$  8.6), and 12 September 2007 ( $M_w$  8.5), G R Letters, **37**, 1~4。

## A study on forecast method of focal mechanism consistency before the $M_w$ 9.0 Indonesia earthquake on December 26, 2004

Sun Lina Li Hao Qin Yuyan Wen Chao Diao Guiling

Earthquake Administration of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China

**Abstract** The Indonesia region is one of the most seismically active zones of the earth. On December 26, 2004 an  $M_w$  9.0 earthquake occurred off the west coast of northern Sumatra Indonesia, and is also the largest earthquake in recent forty years. The epicenter is located in the east Sunda trough. The trough is the boundary of the Australian plate and the India plate. This paper selects the earthquake aftershock distribution range space as the study area, which is divided into two parts of north and south. The south latitude is  $11^\circ\text{S} \sim 5^\circ\text{N}$ , and the north is  $5^\circ\text{N} \sim 15^\circ\text{N}$ . Based on the global focal mechanism directory of the China Earthquake Information Network, we analyze the focal mechanism of the area, and use the consistency parameter  $a$  of focal mechanism and tectonic stress field to conduct the earthquake test. The research results show that before the  $M_w \geq 7.5$  earthquake, there was a lower consistency parameter  $a$ . Before the  $M_w$  9.0 earthquake, the  $a$  value is in a turbulent state. The study region is thousands of kilometers, and focal mechanism and tectonic stress field of the continuous occurrence earthquake of  $M_w \geq 5.0$  is consistent which are not random phenomena, but with the precursory phenomena to be of some prediction significance.

**Key words:** Indonesia area; Focal mechanism solution; Consistent parameter; Forecast