

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^①

缪 森, 朱守彪

(中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085)

摘 要:2012 年 4 月 11 日在北苏门答腊的西部海域附近发生了 $M_w 8.6$ 特大地震和 2 小时后的 $M_w 8.2$ 强烈地震, 这是到目前为止震级最大的板块内部走滑型地震。本文根据该地区的地质构造、地球物理观测资料及研究结果, 对这次地震的孕育背景进行了分析, 认为本次地震尽管发生于印度洋板块的沃顿海盆内(巽它海沟西南), 但该地区断层发育、中强地震活跃、变形情况复杂, 特别是印度洋板块在向 NW 方向运动时速度由南向北逐渐减小, 这种差异运动导致在板块内部产生剪切应力, 因此在板块内部近 SN 向的断层及附近区域不断积累弹性应变能; 同时 2004 年的 $M_w 9.2$ 地震产生的库仑应力变化对该次地震造成了应力加载, 起到了触发作用, 最终导致了本次特大左旋走滑型地震的发生。此外库仑应力变化计算表明, $M_w 8.6$ 地震在 $M_w 8.2$ 地震的震源区附近的库仑应力增大, 增加值超过 0.05 MPa, 因此对 $M_w 8.2$ 地震起到了触发作用。计算结果进一步显示, 该次地震对其周围陆地影响较小, 苏门答腊岛处于地震影响区中, 库仑应力降低了 0.03 MPa, 发生强余震的风险下降。主震后的余震活动的空间分布与库仑应力增加区一致。本次 $M_w 8.6$ 特大地震后, 全球范围内的 $M \geq 5.5$ 地震活动性出现了大幅度的上升, 而该现象在本世纪以来其他 5 次 $M \geq 8.5$ 的强震之后并未出现; 同样, 该次特大地震对中国大陆的地震活动性也有一定的影响, 震后中国大陆地区 $M > 4.5$ 地震活动水平明显增高。

关键词: 2012 苏门答腊 $M_w 8.6$ 地震; 走滑型地震; 孕震机理; 地震触发; 地震活动性; 中国大陆

中图分类号: P315.53

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2013)02-0278-11

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.02.0278

Seismogenic Mechanism of the 2012 North Sumatra off West Coast Earthquake and Its Influences on Seismicity

MIAO Miao, ZHU Shou-biao

(Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: On April 11, 2012, a large earthquake ($M_w 8.6$) and by far the largest strike-slip event ever recorded, struck the west coast of north Sumatra and was followed 2 h later by an $M_w 8.2$ earthquake. A number of issues remain unclear such as the reason for the unusually large strike-slip earthquakes occurring in the intra-oceanic lithosphere, correlations between these two earthquakes, and the manner in which they influence seismicity. Therefore, this paper analyzes the nucleation background of the $M_w 8.6$ earthquake according to the region's geological environment

^① 收稿日期: 2012-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(40974020); 深部探测技术与实验室研究专项(SinoProbe-07); 地震动力学国家重点实验室开放基金(LED2012B01); 中央级科研院所基本科研业务专项(ZDJ2009-1)

作者简介: 缪 森(1987-), 男, 博士研究生, 主要从事地球动力学研究. E-mail: Joe0810@163.com.

通讯作者: 朱守彪(1964-), 男, 研究员, 博士导师, 主要从事地球动力学、地壳形变及地震预测研究. E-mail: zhushoubiao@gmail.com

and geophysical observation results. Although the earthquake occurred in the Wharton Basin southwest of the Sunda Trench in the Indian Ocean, the strike-slip faults are well developed with complex deformation and frequent seismic activity. In the movement toward northwest of the Indian plate, the motion exhibits a gradual south-north (S-N) differential evolution resulting in internal shear stress in the plate. Elastic strain energy is accumulated in the north-south (N-S)-trending fault in the Wharton Basin, which eventually led to the occurrence of the large strike-slip earthquake. In addition, the static Coulomb stress change calculation of the $M_w8.6$ earthquake shows that Coulomb stress increase of more than 0.05 MPa was induced on the $M_w8.2$ aftershock source, which played a triggering role. However, the great earthquake had a slight influence on the mainland nearby. The Sumatra Island is located in the stress shadow of -0.03 MPa with a decreased risk of strong aftershocks. The spatial distribution of the aftershocks agrees with the Coulomb stress increase area.

After the earthquake, the global seismicity ($M \geq 5.5$) showed a sudden increase that did not appear after five other $M \geq 8.5$ earthquakes in this century. The earthquake also had a certain effect on seismic activity in the Chinese Mainland, where the $M > 4.5$ seismicity apparently increased after the main shock.

Key words: 2012 Sumatra $M_w8.6$ earthquake; Strike-slip earthquake; Seismogenic mechanism; Static earthquake triggering; Seismic activity; Chinese Mainland

0 引言

北京时间 2012 年 4 月 11 日 16 时 38 分,印尼苏门答腊北部的西海域发生了 $M_w8.6$ 特大地震 ($2.311^\circ\text{N}, 93.063^\circ\text{E}$, 震源深度 22.9 km) (<http://www.usgs.gov/>)。就在约 2 小时后,主震的西南方向 180 km 处又发生了 $M_w8.2$ 的强烈地震。苏门答腊、马来西亚、新加坡以及中国部分地区(西藏)均有震感。随后,位于震中附近的锡默卢岛(Simeulue Island)海域接连发生了数次 6 级以上的余震。尽管该次地震没有引发巨大的海啸,但还是给当地居民带来了很大的财产损失和一定的人员伤亡^[1] (10 人死亡,12 人受伤)。

特大地震通常发生在板块交界部位(如:近期发生在俯冲带上的 2004 年苏门答腊地震($M_w9.2$), 2010 年智利地震($M_w8.8$), 2011 年日本地震($M_w9.0$)),而板块内部则较为少见,走滑型的地震更是为数不多。除了本次特大地震外,本世纪以来曾经发生过三次板块内部的特走滑型地震,分别是 2001 年 $M_w8.1$ 昆仑山口西地震,2002 年美国 $M_w7.9$ Denali 地震以及 2004 年澳大利亚 $M_w8.1$ Macquarie Island 地震^[2-5]。另外,20 世纪前半叶也记录到一些走滑型强震,包括 1905 年蒙古的两次 $M > 8.0$ 地震和 1950 年 $M_s8.6$ Assam 地震;受当时的观测条件所限,震源特征未能很好的记录^[6-9]。而

本次的 $M_w8.6$ 地震是有仪器记录以来震级最大的一次走滑型地震。其丰富的资料使得我们可以进行深入的研究。

由于印度洋—澳大利亚板块向 NE 方向巽它次级板块下方的俯冲碰撞,在巽他海沟及附近地区经常发生特大地震^[10],如:2004 年 12 月 26 日印度尼西亚的苏门答腊—安达曼地区发生了 $M_w9.2$ 地震,该地震是过去 40 多年来地球上发生的最大地震,并引发了有历史记载以来破坏力最大的海啸,直接造成近 30 万人死亡。本次 $M_w8.6$ 地震震中距离 2004 年特大地震仅 345 km。但与 2004 年特大地震不同的是:①本次地震震级极大,但并不是发生在俯冲带上,而是发生于距巽他海沟西南方向 130 km 处,位于印度洋板块的岩石圈内;②2004 年特大地震是典型的发生在俯冲带上的逆冲型地震,而本次地震为走滑型,并且是人类有史以来记录到的震级最大的走滑型地震^[11];③本次地震的破裂过程极为复杂,在南北向断面以及其共轭面上产生了多次不连续的破裂^[12]。在海洋板块内部发生了如此巨大的走滑型地震,让地球科学家们产生了极大的兴趣,本次地震被列为 1900 年以来世界十大地震之一^[11]。那么,为什么在海洋板块内部能发生震级如此巨大的地震?它的孕育机制是什么?该次地震的对周围甚至全球地震活动的影响又是如何?诸如此

类很多科学问题需要予以回答。本文根据区域地质构造、地球物理观测及研究结果,详细分析本次强震的孕育机制,并通过计算静态库仑破裂应力变化来分析该震对后续余震的触发作用,最后对震后世界范围内及中国大陆地区的地震活动性进行考察,研究该次地震所造成的影响。

1 地震的孕育环境

苏门答腊俯冲带位于印度洋—澳大利亚板块与巽他次级板块的交汇部位,印度洋—澳大利亚板块在这里向巽他次级板块下面俯冲。居于印度洋板块上的沃顿海盆(Wharton Basin)是印度洋板块与巽他次级板块挤压碰撞的最前沿,其岩石圈的年龄在 45~85 m. y.^[13]。图 1 显示沃顿海盆的 NE 方向为巽他海沟,西接 90°东海岭(90°E Ridge),南部为探测器断裂带(Investigator Fracture Zone)。传统板块构造理论认为,变形主要发生于板块边缘,板块内部很少出现变形;但尽管沃顿海盆位于海洋板块内部,由于其特殊的地理位置,这里仍然被认为是板内变形带或弥散边界带(印度与澳大利亚板块的边界)^[14-18]。同时,该地区的变形得到地震活动性^[19-22]、应力场模拟^[23]以及卫星重力资料解译结果^[24-26]的支持。此外,1995 年 Deplus 等^[27]对沃顿海盆开展了多手段的海洋地球物理调查,直接观测到了活断层及活动变形构造,发现了现今活动的左旋走滑断层体系,认为沃顿海盆存在至少长 1 000 km、近 SN 走向的断裂带;通过海洋地震反射剖面得到的结果也证实了这些断裂带的再活化^[28]。毫无疑问,沃顿海盆内部存在着持久、连续的构造变形。

图 1 同时给出了苏门答腊俯冲带附近 1976 年以来的强震活动情况。图中显示,俯冲带附近大震非常活跃,而且多数是小倾角的逆冲型地震;沃顿海盆近期中强地震也很活跃,但发生在沃顿海盆内的中强地震基本上都是走滑型地震。可见,发生在沃顿海盆里的地震与苏门答腊俯冲带上的地震有不同的力学背景。俯冲带上的地震是由于印度洋—澳大利亚板块向下俯冲时,由于很大的摩擦力作用,使得上覆板块与俯冲板片一起向下运动,当板块之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。但沃顿海盆隶属于印度洋板块内部,其走滑型地震主要是由于板块空间运动的差异性造成的。

从图 2 可以进一步看到,印度洋板块与巽他次

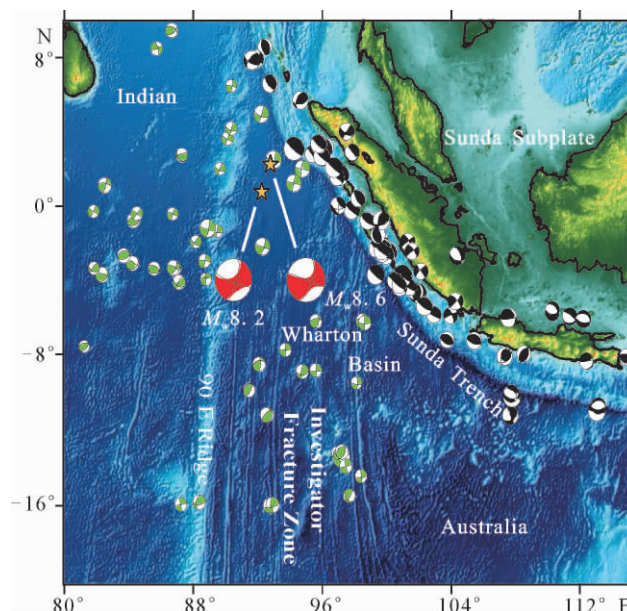


图 1 研究区构造及地震活动空间分布图(黄色五角星表示 2012 年 4 月的两次地震震源位置,黑色震源机制为该区 $M_w \geq 6.5$ 地震事件,绿色震源机制为印度洋中 $M_w \geq 5.0$ 的地震事件(资料来源于 Global CMT, 1976.1~2012.4))

Fig. 1 Geological structure and historical earthquake distribution of the study area (The yellow stars denote the epicenters of the two April 2012 events. The black focal mechanisms are the $M_w \geq 6.5$ events and the green ones are the $M_w \geq 5.0$ events in the Indian plate(Data comes from Global CMT, 1976.1~2012.4)).

级板块之间的碰撞为倾斜碰撞,其倾斜的角度由南向北越来越大,即越往北部,碰撞越变得倾斜。另外,由于印度洋板块与欧亚板块碰撞,在其往北的漂移过程中速度逐渐减慢;而澳大利亚板块在此处沿巽他海沟快速地俯冲至印度尼西亚下方,因此两个板块的运动速率存在一定的差异。通过 GPS 测量结果可以计算得到现今印度—澳大利亚板块的运动特征;Delescluse 等^[29]运用前人的方法,将澳大利亚和印度的远场 GPS 速度作为边界条件,变形带内部的震源机制和热流数据作为近场约束,计算得到了一个非刚性的速度场(图 2)。从图 2 可以看出,两个板块之间运动速率在空间上是变化的,由南边沃顿海盆里的速度 57 mm/y 逐渐变为 50 mm/y;但越过 90°东海岭后,突降为 39 mm/y,最后变为 37 mm/y^[14,30]。这种空间速度的变化,其作用效果相当于在断层两侧施加了一对大小相等、方向相反的

力的作用,即断层两侧受到剪切应力的作用(如图 2 中的插图)。随着应力应变的不断积累,弹性应变能会慢慢变大,当应力超过其破裂极限后,断层发生错动,即产生走滑型大地震。发生特大地震的周期与断层两侧的加载速率有关,速度越大,地震复发周期越短。反之,地震复发间隔越长。

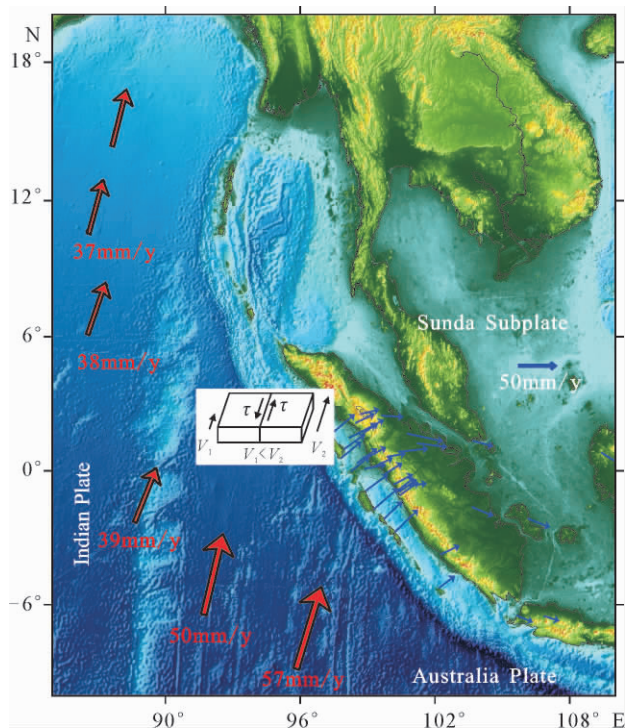


图 2 印度—澳大利亚板块运动速率的变化与苏门答腊地区 GPS 速度(粗红箭头表示印度—澳大利亚板块的运动速度(大小标注在箭头尾部),蓝色箭头表示苏门答腊俯冲带及附近 GPS 观测的速度^[30-31])

Fig. 2 Movement rate variation of the Indian—Australia plate and GPS velocity of the Sumatra region. (The red bold arrows represent the movement rate of the Indian—Australia plate (values are shown at the end of the arrows) and the blue arrows are the GPS velocities of the Sumatra subduction zone and surrounding areas.)

由图 2 可知,印度洋板块向北东向运动的空间差异非常小,每年仅有约 15 mm,此外还有一部分被 90°东海岭变形带所吸收。因此,在沃顿海盆里的断层面上产生的剪切应力很低,弹性应变能积累的速度就比较慢,发生强烈走滑型地震的周期就会很长。所以,在此区域很少见到如此巨大的走滑型地震。至于像本次大地震的复发间隔究竟有多长,要通过详细的古地震研究、数值模拟等工作。

2004 年的苏门答腊大地震后,该区板块内部的地震活动性受其影响大大增强。通过研究该次地震在周围地区的应力释放情况(静态库仑破裂应力变化),可以看出两次俯冲带特大地震(2004 年 $M_w 9.2$, 2005 年 $M_w 8.7$)的同震滑移都能够促进近南北向的、与沃顿海盆破裂带相平行的、左旋走滑型地震的发生^[29],这一机制与 2012 年地震事件的震源特征相吻合。但是,仅适用弹性介质进行计算显然是不够充分的,因为强震发生后,受到应力加载的地区会逐渐变化。Delescluse 等^[29]考虑了软流圈的粘弹性作用,计算 2004 年 $M_w 9.2$ 地震与 2005 年 $M_w 8.7$ 地震后的静态库仑应力变化随时间的演化特征,得到了在其后的 7~10 年间造成沃顿海盆附近出现最大的应力加载。这也在一定程度上解释了本次板内地震距 2004 年俯冲带上特大地震有 7 年的延迟,说明 2004 年的特大地震对本次地震具有触发作用。

2 地震造成的影响

2.1 对周边地区的影响

强震的发生通常会改变周围地区的应力状况,近年来研究者常常通过计算静态库仑应力变化,判断强震对周边地区的影响,预测强余震发生的危险性^[32-34]。静态库仑应力变化的计算原理如下:将地球介质简化为半无限空间内均匀各向同性完全弹性体,已知地震位错面的几何参数和错动量,则可求出在弹性体内部产生的位移场和应变场。利用 Okada^[35]给出的静态位移和应变的解析表达式计算地震产生的静态应力、应变场。

根据库仑破裂假设,岩石趋近于破裂程度的库仑破裂应力 σ_f 为

$$\sigma_f = \tau - \mu(\sigma_n + P) \quad (1)$$

其中, τ 为地震破裂面上剪应力的值; σ_n 为正应力; P 为孔隙流体压力; μ 为断层面介质的摩擦系数。然而,精确确定地下应力张量是极为困难的,通常定义库仑破裂应力变化^[32]。当 μ 不随时间变化时,由式(1)库仑应力变化为

$$\Delta\sigma_f = \Delta\tau - \mu(\Delta\sigma_n + \Delta P) \quad (2)$$

孔隙流体压力变化 ΔP 控制着断面上的有效正应力,当岩石应力的改变远远快于岩石中的流体压力扩散时,流体压力变化 ΔP 可以通过 Skempton 系数 B 在式(2)中得到反映。取视摩擦系数 $\mu' = \mu(1 - B)$,它包括了孔隙流体和断面上的介质特性,范围为 0~1。那么式(2)变为

$$\Delta\sigma_f = \Delta\tau - \mu'\Delta\sigma_n \quad (3)$$

定义压应力为正。一般认为地震产生的静态库仑破裂应力变化定义于具体的断层面,当 $\Delta\sigma_f > 0$ 时促进后续余震的发生;反之, $\Delta\sigma_f < 0$ 时抑制余震活动。地震引起的静态弹性库仑应力变化相对于产生地震所需积累的应力很小,但越来越多的震例表明大于 0.01 MPa 的库仑应力增加起到了明显的触发作用^[32]。当研究主震对后续的某一次地震是否具有

触发效果时,通常将假定的滑动方向取自后续破裂事件的实际断层面,进行库仑应力变化的投影。而在进行地震触发余震的计算中,如果余震的震源机制未知,通常假定将库仑应力变化投影于主震震源机制,进行应力变化空间分布的计算。这样的假定在大多数情况下可以解释余震的分布情况,预测未来后续余震的空间分布^[33]。

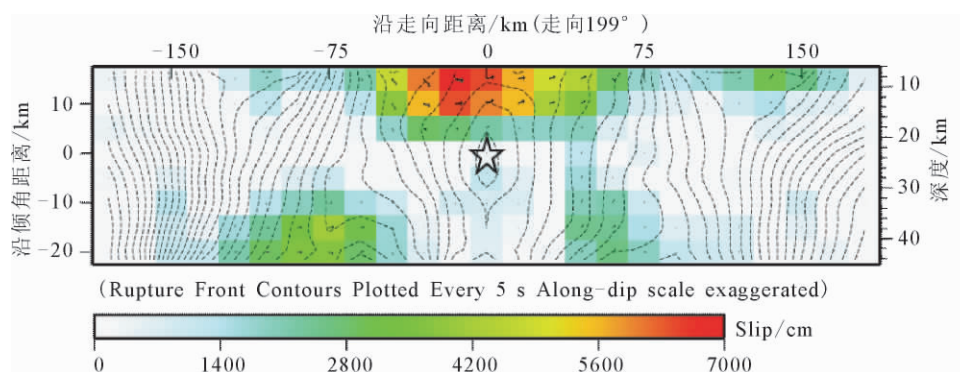


图3 Hayes反演得到的震源模型滑移量等值线分布图^[37]

Fig. 3 The slippage contour map of the source model inverted^[37].

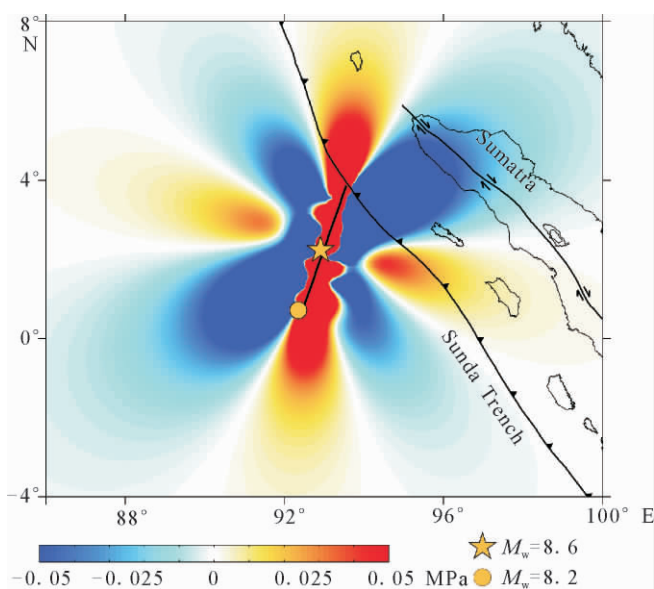


图4 苏门答腊 $M_w8.6$ 地震产生的静态库仑应力变化触发了 $M_w8.2$ 地震

Fig. 4 The Coulomb stress change of the Sumatra $M_w8.6$ earthquake triggered the $M_w8.2$ earthquake.

本次地震是由印度板块的沃顿海盆中的断层平移走滑而产生,该次地震破裂过程极为复杂,持续时间长达 160 s,沿走向方向最终形成了总长度约 360 km 的断层。在地震发生后约 6 s 内,破裂扩展很缓慢,向 SEE—NWW 方向双向破裂;6 s 后破裂以更快的速度沿 NE 向和 SW 向两侧同时扩展,最后在其共轭面上进行了再一次的破裂^[36]。Hayes^[37]使

用全球共 107 个台站地震波数据进行了震源的有限断层模型反演。整个模型由 25×8 个滑移单元组成,如图 3 所示。整个断面上的滑动分布并不均匀,在震源上方浅部区域形成了震中以东约 20 km 的高滑动量集中带,最大滑动量高达 70 m。本文选择该模型来计算静态库仑应力变化,计算中的物性参数参照 King 和 Stein 等^[33-34]的方法,岩石的泊松比和有效摩擦系数分别取 0.25 和 0.4,剪切模量选为 3.2×10^4 MPa。

首先考察 $M_w8.6$ 主震对两小时后 $M_w8.2$ 强震的触发效果。由前人的分析结果^[12]与余震活动可以看出, $M_w8.2$ 事件的断层面应为 NEE 走向,取该断层面为库仑应力变化的投影面,走向 107° ,倾角 83° ,滑移角 -177° 。取余震的震源深度为 54.7 km (资料来源于 Global CMT)来计算静态库仑应力变化,计算结果如图 4 所示。从图 4 中可以看到后续的 $M_w8.2$ 余震震源位置处于主震断层的最南端,受到 0.05 MPa 以上的应力加载作用,超过 0.01 MPa 的触发阈值,因此说明主震的发生对于该次余震起到了明显的触发作用。

其次考察库仑应力变化与余震的空间分布之间的关系。计算时选择最优破裂面进行投影,将主震的震源机制解作为区域构造应力场的方向,这样的做法是较为合理的^[33]。受时间所限,考察期限为主震后 8 个月,即截止到 2012 年 12 月 3 日,所用余震

目录来源于美国国家地震信息中心 (NEIC: <http://neic.usgs.gov/>)。图 5 给出了主震震源深度上的库仑应力变化与余震活动的空间分布。通过详细分析空间范围内余震活动与库仑应力变化的关系,可以知道该区 $M_w 4.0$ 以上的余震活动约有 85% 处于红色区域,受到 0.05 MPa 以上的应力加载作用,可见余震明显地是由主震触发而发生的。图 5 同时也可以给出该次强震的同震库仑应力变化

对周围地区的影响情况。整体上图 5 的应力变化呈现正负相间的特征,最大的应力增加区分布于震源断层的两个端部及狭长的断层面上,断层面的两侧出现大片的 NE—SW 向的应力减小区。由于震源位于距北苏门答腊岛西部海域,由图 5 可见该次地震对周围陆地的影响较小,苏门答腊岛主要为地震影区,应力降低了 0.03 MPa 左右,同时这些区域很少发生余震。

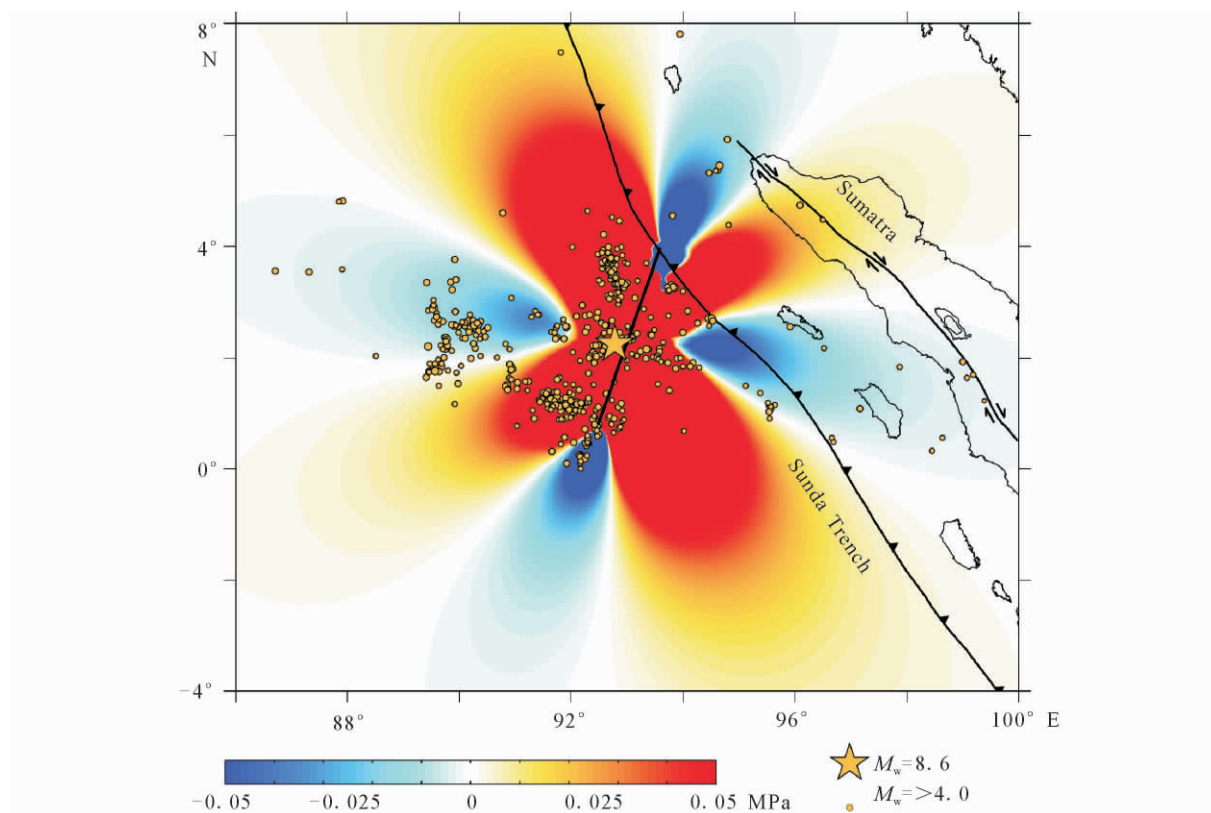


图 5 苏门答腊 $M_w 8.6$ 地震产生的静态库仑应力变化与后续余震活动的空间分布

Fig. 5 The Coulomb stress change of the Sumatra $M_w 8.6$ earthquake and the aftershocks' spatial distribution.

图 6 给出了本次 $M_w 8.6$ 地震产生的静态库仑应力变化对周围断层的影响。图 6(a) 为巽它海沟 (即图 5 中 Sunda Trench) 受到的库仑应力, 为方便显示, 将弯曲的海沟计算得到的结果平直展示。由于巽它海沟的几何特征差异较大 (震源断层为走滑型, 巽它海沟为逆冲型), 巽它海沟受到的影响较小, 在中部受到一定的加载作用, 其余大部分地区为影区, 应力波动范围为 $-0.0023 \sim 0.02$ MPa。而苏门答腊断层 (图 5 中贯穿苏门答腊岛的走滑断层) 大部分区域受到应力卸载作用 (图 6(b)), 仅最北端受到部分应力加载作用, 波动范围为 $-0.038 \sim 0.011$ MPa, 地震危险性降低。因此, 本次大地震对巽它海沟及苏门答腊断层的影响不大。

2.2 对全球地震活动的影响

特大地震产生的地震波通常会触发全球范围内的小震活动, 持续时间为主震后数小时至数天^[38-41]。但是, 对于 $M \geq 5.5$ 的余震活动是否同样具有被大震动态触发的可能, 我们目前还不十分清楚^[42]。那么, 本次地震震级如此巨大, 是否对全球的地震活动造成影响呢? 下面我们进行扼要分析。

根据美国地震信息中心 (NEIC: <http://neic.usgs.gov/>) 公开的地震目录, 我们对主震前后全球 15 天内发生的 $M \geq 5.5$ 地震进行了统计分析。为研究远距离动态触发的效果, 选择的地震事件距主震的距离超过 1 000 km。图 7 给出了 2012 北苏门答腊地震前后 15 天的全球地震活动空间分布, 可见震后 $M \geq 5.5$ 的地震明显增多。说明本次大地震对全球地震有一定的影响。另外, 根据 Pollitz 等^[43] 的

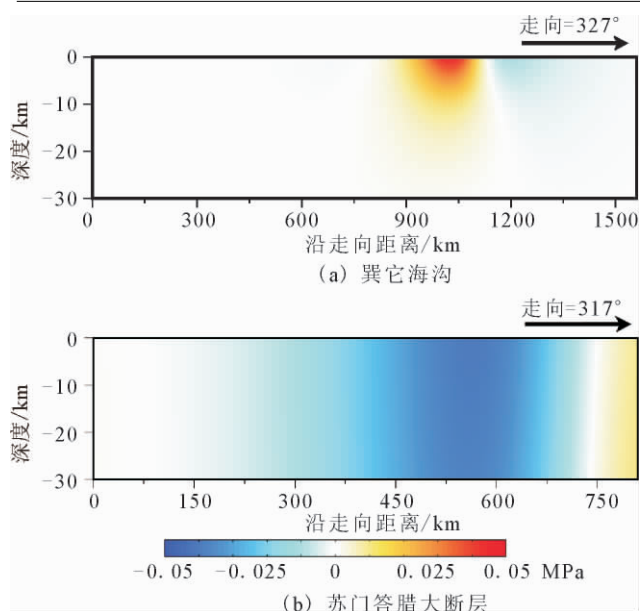


图6 苏门答腊 $M_w 8.6$ 地震产生的
静态库仑应力变化对周围断层的影响

Fig. 6 The Coulomb stress change on the surrounding
faults after the Sumatra earthquake.

研究,主震产生的勒夫波的传播主要集中在破裂面的两个端部及其共轭方向,形成了四个持续时间较长的优势方向,造成动态剪切应变大于 10^{-7} ,持续时间超过 100 s。而这些余震活动全部都位于主震产生的勒夫波传播的四个优势方向中,为本次 $M_w 8.6$ 地震所触发。

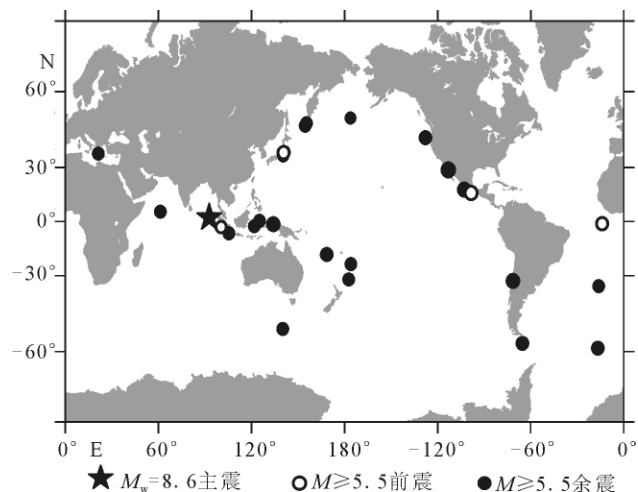


图7 2012 北苏门答腊地震前后 15 天的
全球地震空间活动分布

Fig. 7 The global seismicity distribution before and
after the mainshock.

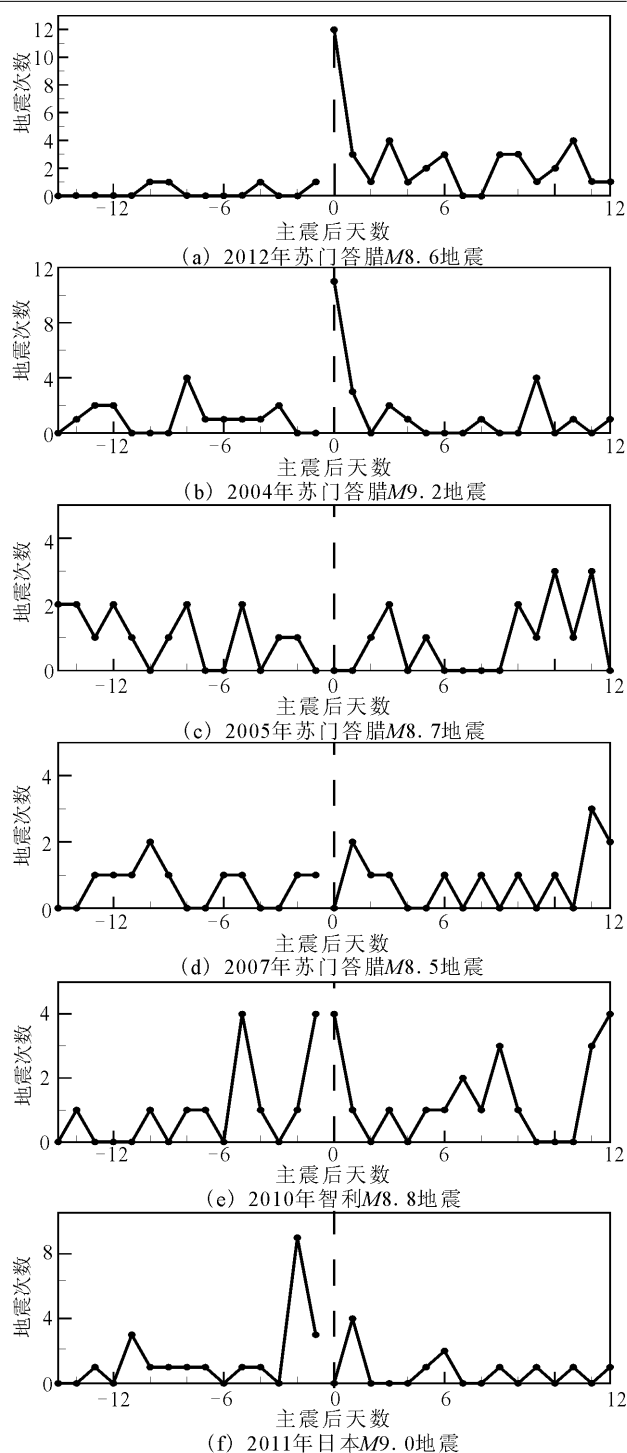


图8 2012 北苏门答腊地震及另外 5 次 $M \geq 8.5$
强震前后的全球地震活动(地震目录来源于
美国地震信息中心(NEIC:<http://neic.usgs.gov>),使用 $M \geq 5.5$ 的地震,距离主震
震源超过 1 000 km,震源深度小于 100 km)
Fig. 8 Global earthquake activities during the 15 d preced-
ing and following the 2012 Sumatra event and five
other $M \geq 8.5$ earthquakes(The preand aftershocks
catalogs come from NEIC and only shallow (depth
 ≤ 100 km) ones of $M \geq 5.5$ are collected. Events
within 1 000 km of the mainshock are excluded.)

这种全球地震活动的突然增加带来了一个问题,是否所有的大型地震都会在较远的距离上触发 $M \geq 5.5$ 以上的地震呢?以往的研究表明,仅有少量的地震被之前发生的 $M \geq 7$ 主震所触发,而这些被触发的余震活动通常为 $M \geq 5$ 的事件,位于主震范围内 1 000 km,多为静态触发^[42,44]。为了确认本次地震带来了全球地震活动性上升这一特殊现象,我们对其他的 $M \geq 8.5$ 强震进行了同样的研究。表 1 给出了 2000 年以来 $M \geq 8.5$ 的地震活动及其对全球地震活动的影响。由表可以看出其余 5 次地震都是俯冲带上的大地震,它们对全球的地震活动性几乎没有什么影响。而本次地震是板块内部的走滑型地震,对全球的地震带来了较大的影响。图 8(a) 给出了本次特大地震前后,全球地震活动的频率分布,而图 8(b),(c),(d),(e),(f) 分别给出了其他 5 次强震前后的情况。对于表 1 中所列的另外 5 次地震,全球的地震活动性并未发生大幅度的上升,与震前基本保持一致;而本次地震前,全球地震活动都较为平静,震后产生了较大的跳跃,地震活动明显增加,这与另外 5 次地震截然不同。

表 1 2000 年以来 $M \geq 8.5$ 的地震活动及其前后的全球 $M \geq 5.5$ 地震活动情况

Table 1 $M \geq 8.5$ earthquakes since 2000 and the $M \geq 5.5$ global seismicity before and after the mainshocks

时间	震级/ M	地震名称	构造环境	地震类型	全球地震活动/次	
					震前 15 天内	震后 15 天内
2004-12-26	9.2	苏门答腊地震	巽它海沟	逆冲	15	24
2005-03-28	8.7	苏门答腊-尼亚斯岛地震	巽它海沟	逆冲	15	14
2007-09-12	8.5	苏门答腊地震	巽它海沟	逆冲	10	14
2010-02-27	8.8	智利地震	安第斯海沟	逆冲	14	22
2011-03-11	9.0	日本东北地震	日本海沟	逆冲	22	11
2012-04-11	8.6	北苏门答腊地震	沃顿海盆	走滑	4	41

2.3 对中国大陆地震活动性的影响

本次巨大震级的走滑型地震对距离较近的中国大陆地震活动性是否具有一定的影响?根据地震目录,由图 7 可以看出,无论主震前或震后 15 天内,中国大陆都没有出现 $M > 5.5$ 的地震。因此需要对中国大陆进行进一步的考察,运用中国地震台网中心给出的地震目录,统计本次地震前后 15 天内 $M \geq 4.5$ 的地震活动情况,考察本次大地震对中国大陆地区地震活动性所造成的影响。

由图 9 可以看出,震前 15 天内中国大陆仅发生 1 次西藏阿里 $M 5.0$ 地震,而震后 15 天内共有 6 次 $M 4.5$ 的地震。因此,受到本次大地震的触发作用,中国大陆的 $M \geq 4.5$ 地震活动水平增强。另外使用相同时间的地震目录对其他震级的地震活动进行考察。震前 15 天内共有 59 次 $M < 4.5$ 的地震活动发

本次 $M 8.6$ 北苏门答腊地震引起的全球地震活动是极为罕见的。那么为什么仅有本次地震后出现该现象呢?对此可以从以下两个方面进行解释:(1)地震波的特征。走滑型地震会产生水平向的剪切波(SH 波和 Love 波),其能量沿断层走向及其垂向的四个主要方向扩散,而 Love 波主要的会在走滑型断层上造成应力加载^[45]。本次地震后共 6 次地震发生在近乎垂直的走滑型断层上,其中 4 次发生在震后两天。而逆冲型地震所产生的压缩波能量则无法产生同样的应力加载现象^[45]。因此对于表 1 所列的其余 5 次俯冲带地震,震后的全球地震活动性并不明显增强。(2)大震级带来的特殊性。本次地震是有记录以来震级最大的走滑型地震,对震级比其小的走滑型地震进行的研究表明^[43],对于过去 15 年间发生的大型走滑型地震(2004 年 $M 8.1$ Tasman 海地震、1998 年 $M 8.1$ 南极洲地震以及 1905 年 $M 8.4$ 蒙古地震),未发现同样的地震活动性增强的现象。震级的特殊性也许是造成大量 $M \geq 5.5$ 地震发生的原因之一,具体原因还有待深入研究。

生,震后 15 天内发生了 50 次,并没有看到明显的地震活动性增强,主震前与主震后的小震活动在空间上的分布也较为一致。另外,对表 1 中的其他 5 次 $M \geq 8.5$ 的特大地震进行相同的统计,在地震前后 15 天内主震也并没有造成中国大陆地震活动的显著增强。

本次 $M 8.6$ 的特大地震对中国大陆的地震活动有一定的影响,由于中国大陆整体都处于主震产生的勒夫波传播的四个优势方向上^[43],地震波造成的动态剪切应变持续时间超过 200 s,对中国大陆具有一定的加载作用。虽然该次地震发生在印度洋海洋板块内,受到巽它海沟的阻挡作用,能量衰减较大,无法触发 $M \geq 5.5$ 的地震。但是由于破裂面的端面指向中国大陆,距离较近,因此对 $M \geq 4.5$ 的地震仍然具有一定的触发作用。而动态触发会造成一定的

时间延迟^[46],中国大陆的地震危险性将会上升。

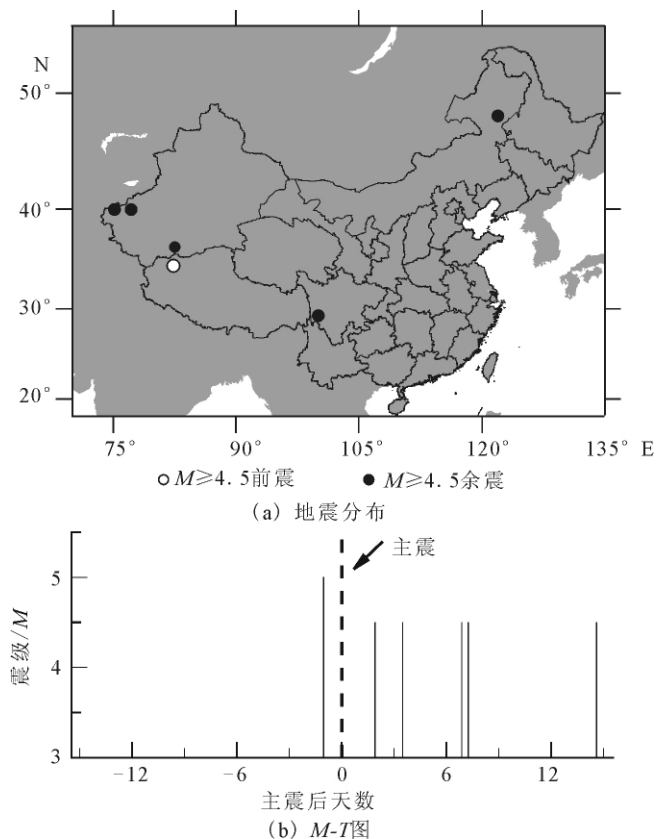


图9 2012北苏门答腊地震前后15天的中国大陆地震活动时空分布

Fig. 9 The spatial and temporal distribution of seismicity in Chinese mainland before and after the mainshock.

3 讨论与结论

本文利用地质、地球物理等资料及研究成果分析了该次强震的孕震机理,给出了产生走滑型地震的孕育背景。这些研究对于认识该地区强震的孕育、发生有重要的启示,对于分析该地区的构造活动、变形分配、应力环境等提供重要的参考。但由于研究区多为海域,实际地质调查非常困难,地球物理探测也很不便,所以文中主要还是定性分析。实际上,震级如此之大的走滑型地震的发生,其成因机制及破裂过程是非常复杂的,还需要从地球物理、地质构造等多方面进行深入研究,也可以通过数值模拟方法定量描述该次地震的孕震、发生过程,以便对特大走滑型地震有更加深刻的认识。对全球其他构造类似地区的地震危险性分析也有重要的参考。

另外,使用同震变形和弹性介质对静态库仑应力变化进行计算,其优点是能快速给出主震对其周围应力状态的影响,分析不同部位发生强余震的风

险,在实际应用中发挥过重要作用^[47-49]。所以文中给出的 $M_w 8.2$ 地震为主震触发的强余震有足够的理论根据。但若更加精细且长期的考察该次地震的作用效果,应采用有限单元数值方法,考虑介质的不均匀性、非弹性、热效应等,考虑实际的断面几何等因素进行库仑应力的计算,可望得到更好的结果。

对于该次地震之后发生的全球 $M \geq 5.5$ 地震活动,本文仅分析了造成该现象的部分可能原因。而地震产生的地震波对全球地震是否具有动态触发效果,其触发效果是瞬态作用还是具有一定的时间延迟,还需运用地震波形数据进行详细的计算研究,从而定量的揭示特大地震后全球地震活跃的原因。而中国大陆虽然处于该次地震产生的地震波瓣面上,但大震前后仅有 $M > 4.0$ 的地震活动出现较小的扰动,受其影响较弱,其原因有待进一步的研究。

根据以上分析,文中的主要结论如下:本次北苏门答腊西部海域附近发生的 $M_w 8.6$ 特大走滑型地震,其主要力源为印度洋—澳大利亚板块向北东运动时空间存在着差异性。这种运动差异,在断层面上形成剪切应力,缓慢地积累弹性应变能,在加上2004年 $M_w 9.2$ 地震的粘弹性触发作用,最终导致了本次大地震于2012年发生。

$M_w 8.6$ 特大地震对 $M_w 8.2$ 地震具有触发作用;地震后超过85%的后续余震是由主震触发而产生的。另外, $M_w 8.6$ 特大地震对苏门答腊岛屿及附近陆地地区的地震危险性没有较大影响。

本次地震后,全球范围内的 $M \geq 5.5$ 地震活动性出现了大幅度增加,而该现象在本世纪以来其他5次 $M \geq 8.5$ 的强震之后并未出现;本次强震对中国大陆的地震活动性有一定的影响,震后中国大陆 $M \geq 4.5$ 地震活动明显增强。

[参考文献]

- [1] USGS. Magnitude 8.6 — off the west coast of northern Sumatra [BL/OL]. <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2012/usc000905e/>.
- [2] Duputel Z, Rivera L, Kanamori H, et al. Phase Source Inversion for Moderate to Large Earthquakes (1990–2010) [J]. *Geophysical Journal International*, 2012, 189(2): 1125–1147.
- [3] Hayes G P, Furlong K P, Ammon C J. Intraplate Deformation Adjacent to the Macquarie Ridge South of New Zealand — The tectonic Evolution of A Complex Plate Boundary [J]. *Tectonophysics*, 2009, 463(1–4): 1–14.
- [4] Tocheport A, Rivera L, Van der Woerd J. A Study of the 14 November 2001 Kokoxili Earthquake: History and Geometry of the Rupture from Teleseismic Data and Field Observations

- [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2006, 96 (5): 1729-1741.
- [5] Tsuboi S, Komatitsch D, Ji C, et al. Broadband Modeling of the 2002 Denali Fault Earthquake on the Earth Simulator[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2003, 139 (3): 305-313.
- [6] Ben-Menahem A, Aboodi E, Schild R. The Source of the Great Assam Earthquake—An Interplate Wedge Motion[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1974, 9(4): 265-289.
- [7] Chen W P, Molnar P. Seismic Moments of Major Earthquakes and the Average Rate of Slip in Central Asia[J]. J. Geophys. Res., 1977, 82(20): 2945-2969.
- [8] Okal E A. The July 9 and 23, 1905, Mongolian Earthquakes: A Surface Wave Investigation[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1977, 34(2): 326-331.
- [9] Schlupp A, Cisternas A. Source History of the 1905 Great Mongolian Earthquakes (Tsetserleg, Bolnay)[J]. Geophysical Journal International, 2007, 169(3): 1115-1131.
- [10] 朱守彪, 邢会林, 谢富仁, 等. 地震发生过程的有限单元法模拟——以苏门答腊俯冲带上的大地震为例[J]. 地球物理学报, 2008, 51(2): 460-468.
ZHU Shou-biao, XING Hui-lin, XIE Fu-ren, et al. Simulation of Earthquake Processes by Finite Element Method: The Case of Megathrust Earthquakes on the Sumatra Subduction Zone[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(2): 460-468.
- [11] Royer J Y. Earth science: When An Oceanic Tectonic Plate Cracks[J]. Nature, 2012, 490(7419): 183-185.
- [12] Yue H, Lay T, Koper K D. En Echelon and Orthogonal Fault Ruptures of the 11 April 2012 Great Intraplate Earthquakes[J]. Nature, 2012, 490(7419): 245-249.
- [13] Honza E, Fujioka K. Formation of Arcs and Backarc Basins Inferred from the Tectonic Evolution of Southeast Asia since the Late Cretaceous[J]. Tectonophysics, 2004, 384 (1): 23-53.
- [14] Delescluse M, Chamot-Rooke N. Instantaneous Deformation and Kinematics of the India—Australia Plate[J]. Geophysical Journal International, 2007, 168(2): 818-842.
- [15] DeMets C, Gordon R G, Argus D F. Geologically Current Plate Motions[J]. Geophysical Journal International, 2010, 181(1): 1-80.
- [16] Demets C, Gordon R G, Vogt P. Location of the Africa—Australia—India Triple Junction and Motion Between the Australian and Indian Plates: Results from An Aeromagnetic Investigation of the Central Indian and Carlsberg Ridges[J]. Geophysical Journal International, 1994, 119(3): 893-930.
- [17] Gordon R G, DeMets C, Argus D F. Kinematic Constraints on Distributed Lithospheric Deformation in the Equatorial Indian Ocean from Present Motion between the Australian and Indian Plates[J]. Tectonics, 1990, 9(3): 409-422.
- [18] Wiens D A, et al. A Diffuse Plate Boundary Model for Indian Ocean Tectonics[J]. Geophys. Res. Lett., 1985, 12(7): 429-432.
- [19] Bergman E A, Solomon S C. Earthquake Source Mechanisms from Body—waveform Inversion and Intraplate Tectonics in the Northern Indian Ocean[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1985, 40(1): 1-23.
- [20] Petroy D E, Wiens D A. Historical Seismicity and Implications for Diffuse Plate Convergence in the Northeast Indian Ocean[J]. J. Geophys. Res., 1989, 94(B9): 12301-12319.
- [21] Stein S, Okal E A. Seismicity and Tectonics of the Ninety-east Tidge Area: Evidence for Internal Deformation of the Indian Plate[J]. J. Geophys. Res., 1978, 83(B5): 2233-2245.
- [22] Tinnon M J, Holt W E, Haines A J. Velocity Gradients in the Northern Indian Ocean Inferred from Earthquake Moment Tensors and Relative Plate Velocities[J]. J. Geophys. Res., 1995, 100(B12): 24315-24329.
- [23] Cloetingh S, Wortel R. Stress in the Indo—Australian Plate[J]. Tectonophysics, 1986, 132(1-3): 49-67.
- [24] McAdoo D C, Sandwell D T. Folding of Oceanic Lithosphere[J]. J. Geophys. Res., 1985, 90(B10): 8563-8569.
- [25] Minster J B, Jordan T H. Present-day Plate Motions[J]. J. Geophys. Res., 1978, 83(B11): 5331-5354.
- [26] Stein C A, Cloetingh S, Wortel R. Seasat-derived Gravity Constraints on Stress and Deformation in the Northeastern Indian Ocean[J]. Geophys. Res. Lett., 1989, 16(8): 823-826.
- [27] Deplus C, et al. Direct Evidence of Active Deformation in the Eastern Indian Oceanic Plate[J]. Geology, 1998, 26(2): 131-134.
- [28] Graindorge D, et al. Impact of Lower Plate Structure on Upper Plate Deformation at the NW Sumatran Convergent Margin from Seafloor Morphology[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2008, 275(3-4): 201-210.
- [29] Delescluse M, et al. April 2012 Intra-oceanic Seismicity off Sumatra Boosted by the Banda—Aceh Megathrust[J]. Nature, 2012, 490(7419): 240-244.
- [30] Subarya C, et al. Plate-boundary Deformation Associated with the Great Sumatra—Andaman Earthquake[J]. Nature, 2006, 440(7080): 46-51.
- [31] Bock Y, et al. Crustal Motion in Indonesia from Global Positioning System Measurements[J]. J. Geophys. Res., 2003, 108(B8): 2367.
- [32] Harris R A. Introduction to Special Section: Stress Triggers, Stress Shadows, and Implications for Seismic Hazard[J]. J. Geophys. Res., 1998, 103(B10): 24347-24358.
- [33] King G C P, Stein R S, Lin J. Static Stress Changes and the Triggering of Earthquakes[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1994, 84(3): 935-953.
- [34] Stein R S, Barka A A, Dieterich J H. Progressive Failure on the North Anatolian Fault since 1939 by Earthquake Stress Triggering[J]. Geophysical Journal International, 1997, 128 (3): 594-604.
- [35] Okada Y. Internal Deformation due to Shear and Tensile

- Faults in A Half-space[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1992, 82(2): 1018-1040.
- [36] Meng L, Ampuero J P, Luo Y. Back-projection Results: 4/11/2012 (M_w 8.6), offshore Sumatra, Indonesia [BL/OL]. http://www.tectonics.caltech.edu/slip_history/2012_Sumatra/back_projection/.
- [37] Hayes G. Preliminary Result of the Apr 11, 2012 M_w 8.6 Earthquake Off the West Coast of Northern Sumatra [BL/OL]. http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthe-news/2012/usc000905e/finite_fault.php.
- [38] Gonzalez-Huizar H, Velasco A A, Peng Z, et al. Remote Triggered Seismicity Caused by the 2011, $M_9.0$ Tohoku—Oki, Japan Earthquake[J]. Geophys. Res. Lett., 2012, 39(10): L10302.
- [39] Hill D P, et al. Seismicity Remotely Triggered by the Magnitude 7.3 Landers, California, Earthquake[J]. Science, 1993, 260(5114): 1617-1623.
- [40] Kilb D, Gomberg J, Bodin P. Triggering of Earthquake Aftershocks by Dynamic Stresses [J]. Nature, 2000, 408(6812): 570-574.
- [41] Pankow K L, Arabasz W J, Pechmann J C, et al. Triggered Seismicity in Utah from the 3 November 2002 Denali Fault Earthquake [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2004, 94(6B): S332-S347.
- [42] Parsons T, Velasco A A. Absence of Remotely Triggered Large Earthquakes Beyond the Mainshock Region [J]. Nature Geosci., 2011, 4(5): 312-316.
- [43] Pollitz F F, Stein R S, Sevilgen V, et al. The 11 April 2012 East Indian Ocean Earthquake Triggered Large Aftershocks Worldwide [J]. Nature, 2012, 490(7419): 250-253.
- [44] Velasco A A, Hernandez S, Parsons T, et al. Global Ubiquity of Dynamic Earthquake Triggering [J]. Nature Geosci., 2008, 1(6): 375-379.
- [45] Dahlen F A, Tromp J. Theoretical Global Seismology Ch. 11 [M]. [S. l.]: Princeton University Press, 1998.
- [46] Parsons T. A Hypothesis for Delayed Dynamic Earthquake Triggering [J]. Geophys. Res. Lett., 2005, 32(4): L04302.
- [47] Lin J, Stein R S. Stress Triggering in Thrust and Subduction Earthquakes and Stress Interaction Between the Southern San Andreas and Nearby Thrust and Strike-slip Faults [J]. J. Geophys. Res., 2004, 109(B2): B02303.
- [48] McCloskey J, Nalbant S S, Steacy S. Indonesian Earthquake; Earthquake Risk from Co-seismic Stress [J]. Nature, 2005, 434(7031): 291-291.
- [49] Pollitz F F, Banerjee P, Bürgmann R, et al. Stress Changes Along the Sunda Trench Following the 26 December 2004 Sumatra—Andaman and 28 March 2005 Nias Earthquakes [J]. Geophys. Res. Lett., 2006, 33(6): L06309.
- [50] 罗国富, 屠泓为, 马禾青, 等. 甘东南至陕甘宁交界中强震危险区地震活动能量场时空特征 [J]. 西北地震学报, 2012, 34(2): 132-137.
- LUO Guo-fu, TU Hong-wei, MA He-qin, et al. Space-time Distribution Characteristics of Energy Field of Seismic Activity for the Southeastern Part of Gansu Province to Shanxi—Gansu—Ningxia Boundary Region Moderate—strong Earthquake Hazard Area [J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(2): 132-137.