

张贝, 程惠红, 石耀霖. 2015. 2015 年 4 月 25 日尼泊尔 $M_s8.1$ 大地震的同震效应. 地球物理学报, 58(5):1794-1803, doi:10.6038/cjg20150529.

Zhang B, Cheng H H, Shi Y L. 2015. Calculation of the co-seismic effect of $M_s8.1$ earthquake, April 25, 2015, Nepal. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(5):1794-1803, doi:10.6038/cjg20150529.

2015 年 4 月 25 日尼泊尔 $M_s8.1$ 大地震的同震效应

张贝, 程惠红*, 石耀霖

中国科学院计算地球动力学重点实验室, 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 应用有限单元方法, 计算了 2015 年尼泊尔 $M_s8.1$ 大地震发生产生的同震变形和应力变化. 计算中考虑地球为球体以确保远场应力场变化得到可靠结果, 采用 PREM 模型的地球分层模型, 考虑了中国地震局 (CEA) 和美国地质调查局 (USGS) 各自提供的断层滑动模型. 结果表明: 尼泊尔 $M_s8.1$ 地震是一个比较典型的低角度逆冲地震, 水平位移和应力降较大; 地震造成南北方向上的水平位移最突出, 且集中在首都加德满都附近区域. USGS 断层滑动模型地表最大位移量达到 3.5 m, CEA 滑动模型最大为 1.2 m; 东西向和垂直方向上的同震位移相对较小; 同震位移量级在 0.1 m 的影响区域可达 300 km; 地震造成尼泊尔地区最大库仑应力变化可达到 MPa 量级, 地震危险性依然较大. 此次 $M_s8.1$ 地震对我国西藏地区有一定影响, 特别是雅鲁藏布江地区和拉萨块体南北走向的正断层, 库仑应力变化为正, 量级可达数千帕乃至十余千帕, 应该注意该区被诱发中强震的可能性.

关键词 尼泊尔地震; 地震位错; 同震效应; 有限元模拟

doi:10.6038/cjg20150529

中图分类号 P315

收稿日期 2015-05-03, 2015-05-15 收修定稿

Calculation of the co-seismic effect of $M_s8.1$ earthquake, April 25, 2015, Nepal

ZHANG Bei, CHENG Hui-Hong*, SHI Yao-Lin

Key Laboratory of Computational Geodynamics of Chinese Academy of Sciences,
University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The co-seismic displacement and stress fields of $M_s8.1$ earthquake in Nepal were calculated using finite element method in this paper. Curvature of the Earth was included in our model to get accurate results in far field. We adopted the PREM earth model and two different slip models in the calculation. Nepal $M_s8.1$ earthquake is a typical low-angle thrust earthquake, co-deformation mainly concentrated in the horizontal plane. The co-seismic displacement is mainly in north-south direction and concentrated near Kathmandu. East-West and vertical components are relatively small. The USGS slip model gave a maximum displacement around 3.5 m, while the CEA slip model is up to 1.2 m. The range of influence is about 300 km within which co-seismic displacement is over 0.1 m. Coulomb failure stress change caused by the earthquake is positive in the vicinity of Nepal and its maximum is about several MPa. The $M_s8.1$ earthquake could affect China's Tibet region, especially in areas of the Brahmaputra and the Lhasa block, where Coulomb failure stress changes are positive and the magnitude is up to 10 kPa for N-S trending normal faults, which implies possibilities of triggering strong earthquakes.

Keywords Nepal earthquake; Earthquake dislocation; Co-seismic effect; Finite element method

基金项目 国家自然科学基金(41404078)和中国博士后科学基金面上资助项目(11910S192)联合资助.

作者简介 张贝, 男, 1985 年生, 博士, 主要从事地球动力学数值模拟计算. E-mail: 502309595@qq.com

* **通讯作者** 程惠红, 女, 1984 年生, 博士后, 从事地球动力学数值模拟计算. E-mail: chenghuihong@163.com

1 引言

2015年4月25日,尼泊尔发生了 $M_s8.1$ 大地震,自1950年 $M_w8.7$ 察隅地震以后成为尼泊尔近70年来受到影响最大的地震(Mittal and Kumar, 2015). 该地震震中位于尼泊尔博克拉城市,地理坐标:(28.147°N, 84.708°E),震源深度15 km (<http://earthquake.usgs.gov/>). 地震造成东南向发展的破裂带长度100多千米,且震中距首都加德满都仅70多千米,造成尼泊尔大量人员伤亡(截止2015年5月15日,已超过8千人死亡(<http://world.people.com.cn/>))、众多建筑物倒塌. 大地震释放巨大能量且震源浅,破坏性大,不仅引起强烈的地面震动,大量水电大坝、高速公路/道路受到了结构性损坏,还触发了珠穆朗玛峰发生雪崩. 同时,我国西藏自治区日喀则等地区也有明显的震感,吉隆县、定日县和聂拉木县相继发生了3.6、5.9和5.3级地震(<http://www.cea.gov.cn/>). 5月12日在尼泊尔主震 $M_s8.1$ 的西南部又发生了 $M_s7.5$ 级余震. 此次尼泊尔地震不但给当地人民带来巨大灾害,而且对我国日喀则一些地区造成了损失.

尼泊尔位于印度板块与欧亚板块的主要碰撞带上,地形起伏非常明显,紧邻世界上最高山峰——珠穆朗玛,且被喜马拉雅弧贯穿. 受印度板块与欧亚板块陆陆俯冲碰撞和推挤,历史上沿该带发生过多次大地震,例如,1897年 $M_w8.1$ Shillong 地震,1950年 $M_w8.7$ 察隅地震(Mittal and Kumar, 2015), 2005年 $M_w7.6$ Kashmir 地震(Shah, 2013)及2011年 $M_w6.9$ Sikkim 地震(Prajapati et al., 2013). 图1给出了自1976年尼泊尔及其邻近区域历史大地震和断层分布情况. 可以看出,长期以来在这种陆-陆俯冲挤压过程中,位于喜马拉雅和青藏高原南部的转换带上大地震不断发生. GPS数据显示印度板块以大约50 mm/yr的速度俯冲于欧亚板块,在喜马拉雅弧汇聚速度则达到20 mm/yr,应力异常集中,形成喜马拉雅地震带(邓起东等, 2014). 此次尼泊尔 $M_s8.1$ 地震位于该地震带上,是由于欧亚板块与印度板块持续的南北向俯冲挤压逆冲造成的.

在地质构造上,尼泊尔位于喜马拉雅山中段南麓,跨越恒河平原和德赖平原,且该区域处于拆离断层带,分布有喜马拉雅主前锋冲断裂(MFT)和主边冲断裂(MBT)和主中冲断裂(MCT)区域及深部主喜马拉雅逆冲断层(MHT)(许志琴等, 2013),而

这些断裂带是目前最为活跃的地震带(Wang et al., 2014; Yin, 2010). 自新生代以来,MFT断层最为活跃,且在其附近逆冲地震不断发生. 然而,此次 $M_s8.1$ 地震在地表上显示发生在MBT断裂带附近,但震源深度在15 km且为低角度,向深部延伸则很有可能发生在MHT上.

地震的发生会引发一系列物理场变化,其中力学场的变化包括反映地球弹性的同震(Co-seismic)位移、应力的变化和反映地球黏弹性响应的震后(Post-seismic)位移、应力变化等. 而地震发生时产生的同震位移、应力变化,对于地震危险性评估、了解震源断层的运动方式、破裂过程和地震触发等问题的研究中有重要的意义. 本文采用PREM分层模型,应用全球有效体力等效方法计算了不同断层模型下尼泊尔 $M_s8.1$ 大地震同震位移、应力变化,同时给出了周围区域位移和应力计算结果,以期估计大地震后尼泊尔地区地震危险性和分析该地震对我国西南地区的应力环境的影响.

2 计算方法与断层模型

1958年Steketee(1958)将位错理论引入地震学,推导了走滑断层的位移格林函数,计算震源位错造成的地表同震形变. 随后很多学者对位错理论和同震变形进行了研究,给出了半无限空间弹性均匀介质地壳模型(Chinnery, 1961, 1963; Press, 1965; Okada, 1985)、半无限空间成层介质的地球模型(Okubo, 1992; Wang, 2003)、球型成层弹性地球模型(Ben-Menahem and Singh, 1968; McGinley, 1969; Saito, 1974; Sun, 1992)和球型成层黏弹性地球模型(Rudle, 1982; Sabadini et al., 1995; Wang, 1999)及侧向非均匀性的三维地球模型(Fu and Sun, 2007, 2008; Fu et al., 2010),这些研究促进了人们对地震破裂过程和同震形变的认识. 特别是,1985年Okada(1985)弹性半无限空间均匀介质模型已成为位错理论经典表达式. Wang等(2003, 2006)进一步发展了半无限空间和层状弹性/黏弹性介质的模型,编写了EDGRN/EDCMP计算程序,可以计算同震与震后位移、应变和重力变化等. Okada和汪荣江的工作在计算震后变形研究中得到了广泛应用.

然而,半无限空间地壳模型和分层地壳模型不能考虑地球曲率的影响,特别是对于大地震发震断层大、影响区域空间尺度大,平面假设已不再适用,在同震-震后计算中地球曲率的影响是不可忽略的.

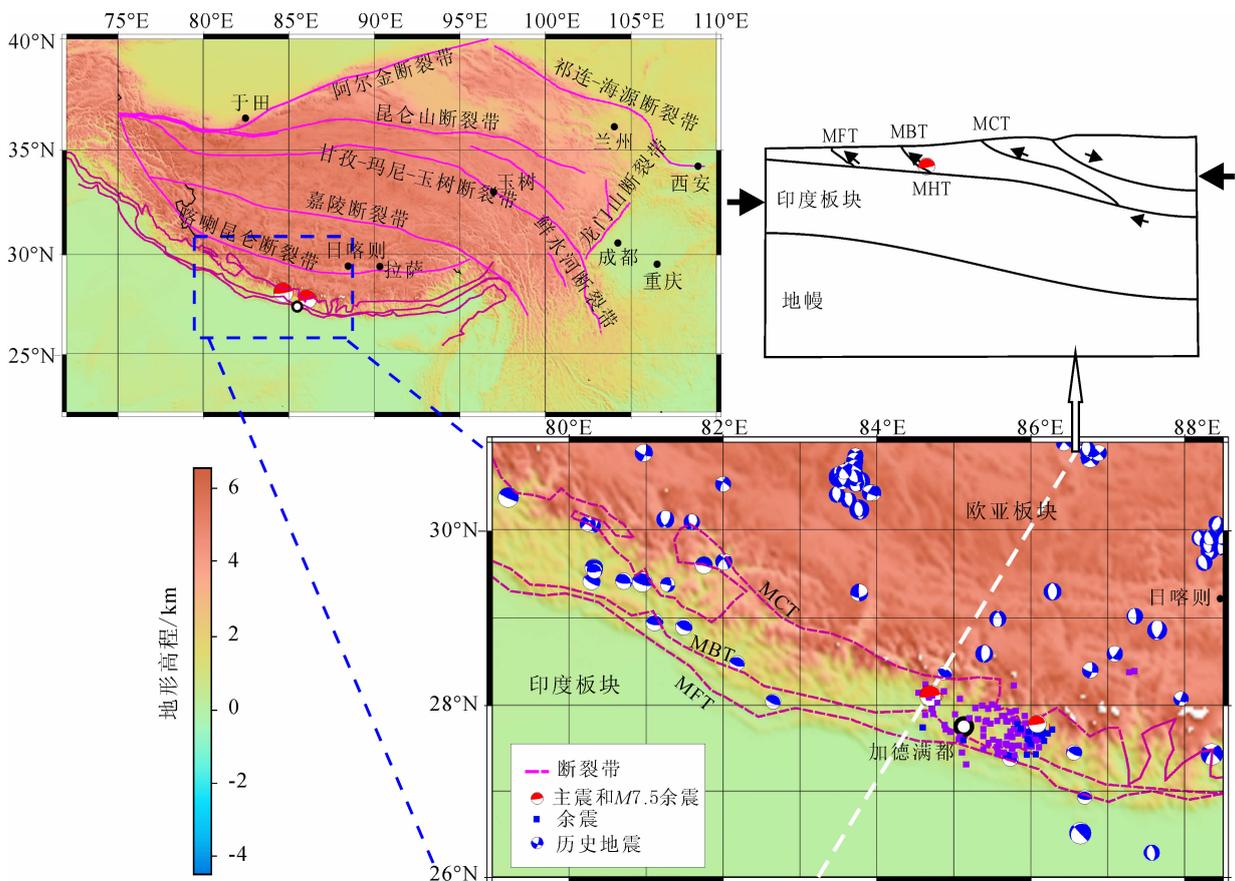


图 1 尼泊尔及其邻近区域地形高程和历史地震分布

图中余震截止 2015 年 5 月 13 日 (<http://earthquake.usgs.gov/>), 紫色方块为 $M_s 8.1$ 地震震后余震分布, 蓝色方块为 $M_s 7.5$ 地震震后余震分布; MCT (Main Central Thrust fault) 为主中冲断裂; MBT (Main Boundary Thrust fault) 为主边冲断裂; MFT (Main Frontier Thrust fault) 为主前锋冲断裂; MHT (Main Himalaya Thrust) 为主喜马拉雅逆冲断裂带. 历史地震为 1976-01-01—2015-05-01 的震级 > 6.5 的地震 (<http://www.globalcmr.org/>).

Fig. 1 The elevation and historical earthquake distribution in Nepal and its adjacent area

Aftershocks in the figure as April 27, 2015, from (<http://earthquake.usgs.gov/>); the purple square represent aftershocks of $M_s 8.1$ and the blue square stand for aftershocks of $M_s 7.5$; MCT; the Main Central Thrust fault; MBT; the Main Boundary Thrust fault; MFT; Main Frontier Thrust fault; MHT; Main Himalaya Thrust fault.

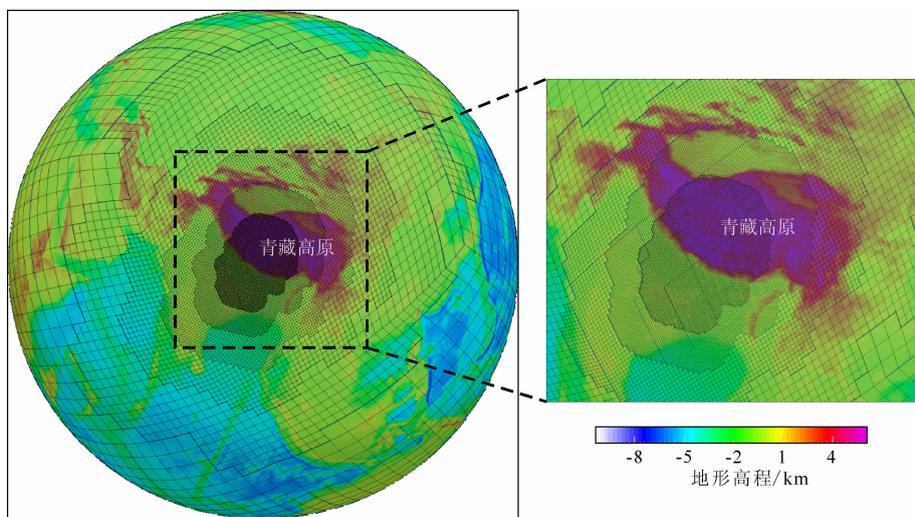


图 2 全球模拟计算模型及网格

Fig. 2 The computational model and grids

同时,在计算得到位移计算应变(应力)时,球体模型和平面模型又不尽相同. Ben-Menahem 等(1969)、Ben-Menahem 和 Israel(1970)通过均质无自重球形模型计算,得出地球的曲率影响在震源矩 20° 以内可忽略不计,而对于一个震级 8.5 的浅源地震在一定的纬度上最大有 30% 的误差. Amelung 和 Wolf (1994)通过对比考虑重力增量球形模型和无重力平面模型,得出地球曲率产生的误差可以和重力增量影响相弥补. Pollitz(1996)应用自由震荡方法对层状地球模型(忽略自重)计算了不同震源深度壳内不同形状震源的近场同震位移和应变,认为在震中距 100 km 以内地球曲率的影响一般小于 2%. Antonioli 等(1998)通过比较层状黏弹结构球形和平面模型的震后位移场变化,得出地球曲率影响在近场可忽略不计,而在远场却有显著的差别,对于走滑地震可达到 20%. Nostro 等(1999, 2001)比较了平面模型(Bonafede84 黏弹模型和 Okada85 弹性模型)和球形模型(Piersanti95 带自重黏弹模型)同震和震后剪切变形,对于走滑断层地球曲率引起的同震位移显著差异出现在 3 倍断层长度内,而震后位移差别将更大一些;这些差别与断层形状、震后时间和震源距离有关,且可以超过 10 倍. Sun 和 Okubo(2002)认为地球曲率和分层对同震垂直位移的影响不可忽略,在假设地球自重的影响小于地球曲率影响的情

况下,随着震源深度的增加地球曲率的影响也增大,且引张震源的曲率效应比剪切震源的大. 石耀霖和朱守彪(2006)指出在从位移计算应变和应力时,必须使用球坐标,使用平面直角坐标会带来系统误差,在大位移和高纬度时,这种误差不能忽视.

据上述分析,本文应用有限元方法,建立全球分层模型来分析. 网格划分上采用自适应技术,自动将断层处网格加密,周围逐渐增大;并且据计算地球动力学实验室开发的等效体力代替位错源,避免常规有限元方法处理不连续面时遇到的困难(张贝等, 2015). 图 2 给出了计算时全球计算网格,共 858566 个节点和 734508 单元,并在断层处做网格加密处理,大小约为 15 km.

断层滑动模型选取目前已公布的模型:(1) USGS 的 121 个子断层模型(<http://earthquake.usgs.gov>),发震断层参数:走向 295° ,倾角 10° ,滑动 110° ;(2)中国地震局地球物理所利用全球地震台网(GSN)记录的长周期数字地震资料,采用单一机制的有限断层模型反演得出的 M_s 8.1 发震断层:(走向 301° ,倾角 11° ,滑动 130°),(<http://www.cea-jgp.ac.cn>),见图 3. 可以看出,除了断层滑动面走向略不同外,两者断层滑动面的最大滑移量也有所不同,中国地震局(CEA)给出最大相对滑移量为 2.1 m, USGS 给出为 4 m. 同时,两者的滑动面大小也不同,

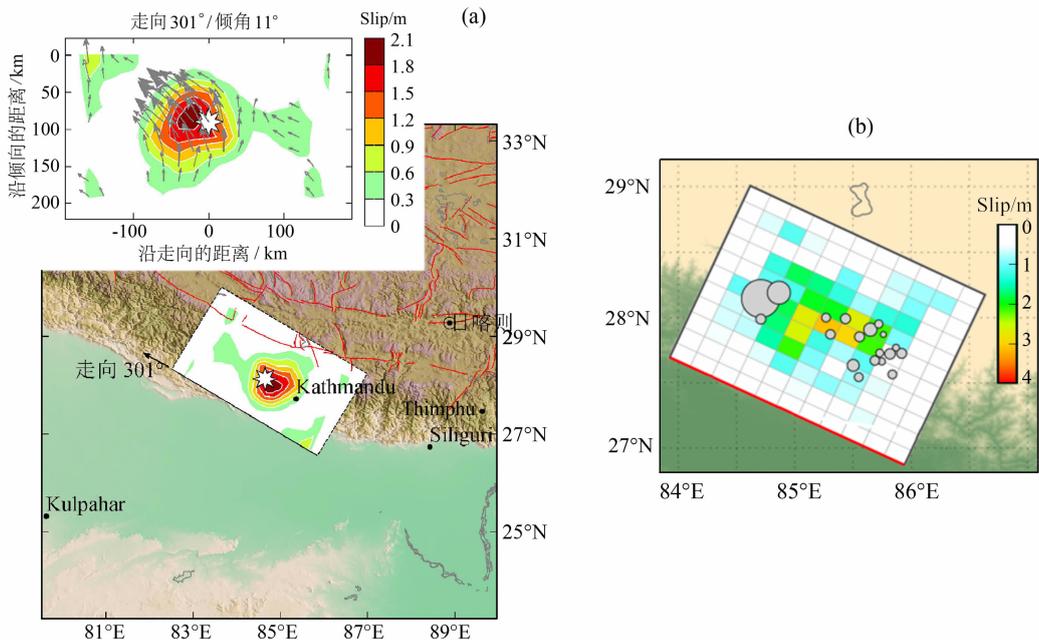


图 3 尼泊尔 M_s 8.1 断层滑动模型

(a) 中国地震局地球物理所给出的滑动模型(<http://www.cea-jgp.ac.cn>);(b) 美国 USGS 给出的断层滑动模型(<http://earthquake.usgs.gov>).

Fig. 3 The slip model of M_s 8.1 earthquake

(a) The slip model from Institute of Geophysics, China seismological (<http://www.cea-jgp.ac.cn>);

(b) The slip model from USGS (<http://earthquake.usgs.gov>).

前者滑动面积约 $7.0 \times 10^{10} \text{ m}^2$, 后者滑动面积约 $3.6 \times 10^{10} \text{ m}^2$.

3 计算结果

3.1 同震位移场

图 4 给出了尼泊尔 $M_s 8.1$ 大地震的地表同震

位移计算结果, 由于尼泊尔 $M_s 8.1$ 地震断裂向东南方向扩展, 断层面上相对较大的水平位移主要发生在地震断层的东南部, 特别是尼泊尔首都加德满都及其东南附近, 是破坏严重的地方. 地震造成南北方向上的水平位移较大、且比较集中在首都加德满都, CEA 模型计算得出断层上盘向南最大位移有 1.2 m, USGS 模型为 3.5 m; 而断层下盘向北位移约 0.2 m.

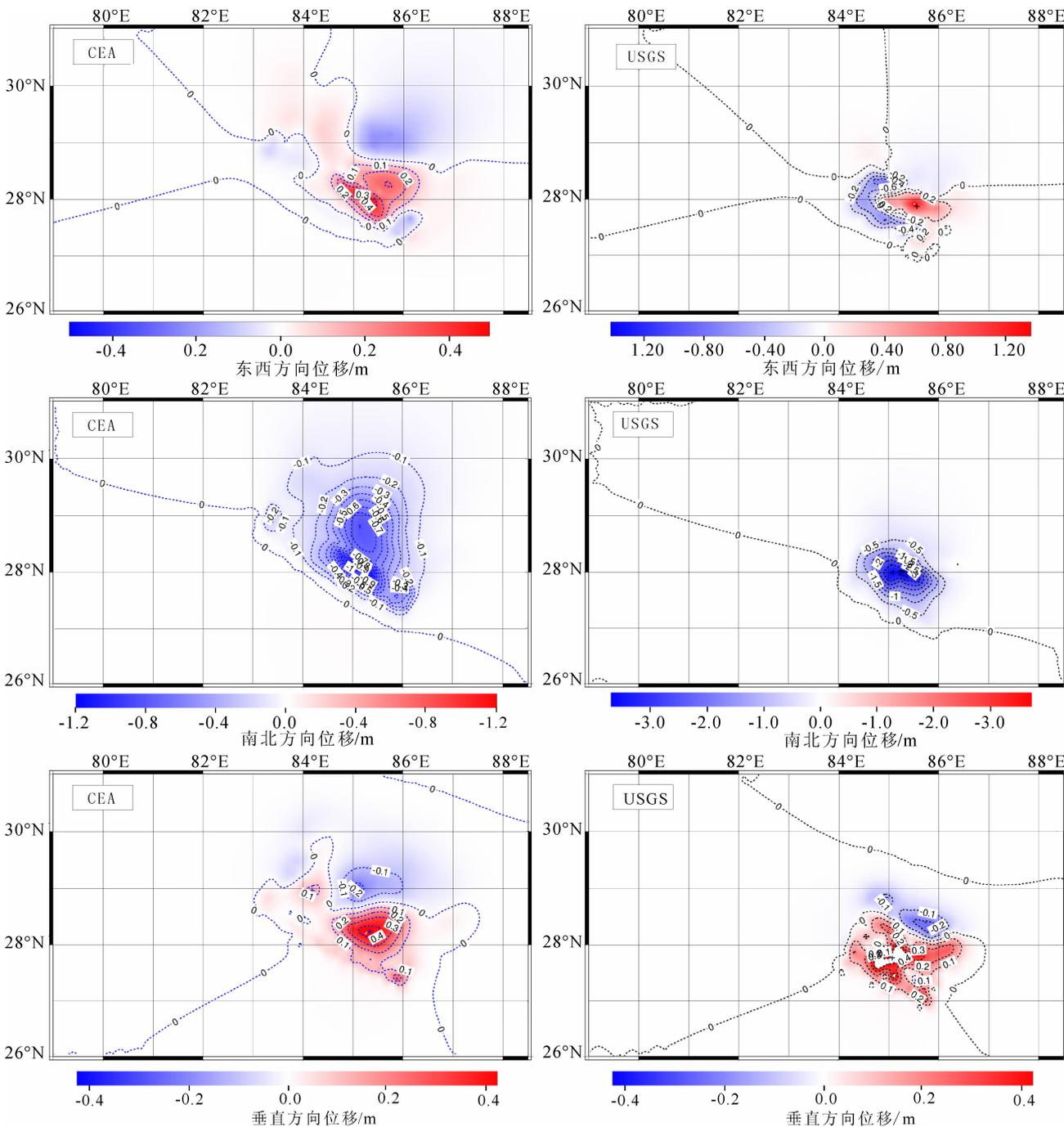


图 4 尼泊尔 $M_s 8.1$ 地震发生产生的地表同震位移

东西向以东为正, 南北向以北为正, 垂向上以上为正.

Fig. 4 The surface co-seismic displacement caused by the $M_s 8.1$ earthquake with positive in East, North and Upward

同震东西方向水平位移相对较小,上盘相对下盘滑动大一些,CEA 模型计算得出上盘由北往南先向西 0.2 m,然后向东最大有 0.5 m 位移;USGS 模型为上盘则先向西 0.2 m,然后向东 1.4 m;下盘分别向西约 0.2 m,这与断层滑动模型有紧密的关联.在垂直方向上同震位移也相对较小,两模型均表现出上盘向上移动 0.4 m,而下盘向下移动 0.1 m,体现了在倾角较小的情况同震水平位移大,而垂直位移较小.再次表明,尼泊尔 $M_s8.1$ 地震是一个低角度的逆冲地震.

图 5 给出了两种断层滑动模型下,尼泊尔 $M_s8.1$ 地震的地表同震水平位移矢量图,可以看出两个模型均显示了 $M_s8.1$ 地震是一个比较典型的逆冲地震(上盘向上滑移,下盘向下俯冲).此次地震倾角较小,上盘水平位移量大,特别是 USGS 模型计算结果显示在首都加德满都附近水平位移量接近 4 m.

CEA 模型同震位移量级在 0.1 m 以上的区域主要集中在(27.7°N—30.0°N,83.5°E—87°E)及附近,且比较集中.USGS 模型同震位移量级在 0.1 m 以上的区域主要集中在(27.5°N—29.3°N,84.1°E—86.6°E)及附近.

3.2 同震应力场变化

在背景应力场绝对值不清楚的情况下,研究者广泛采用库仑应力变化(ΔCFS)来判断地震触发和地震危险性(石耀霖和曹建玲,2010),其表达式为

$$\Delta CFS = \Delta\tau + \mu(\Delta\sigma_n + \Delta p), \quad (1)$$

式中 $\Delta\sigma_n$ 是法向正应力变化, $\Delta\tau$ 是沿断层面剪应力沿滑动方向的变化, μ 为断层面内摩擦系数, Δp 为孔隙压力变化.本文中应力正负遵循弹性力学定义.公式(1)表明了当断层面的剪应力和孔隙压力增加、法向压应力减小时,库仑破裂应力为正,说明应力调整增加了断层面滑动的危险性,相反,则阻碍了

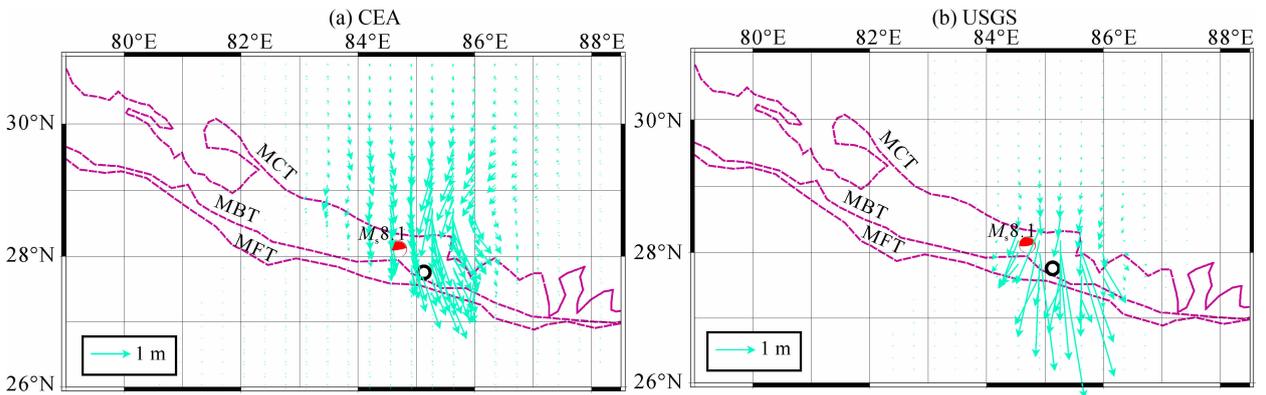


图 5 $M_s8.1$ 地震引起的地表水平位移矢量图

Fig. 5 The vector map of surface co-seismic horizontal displacement caused by the $M_s8.1$ earthquake

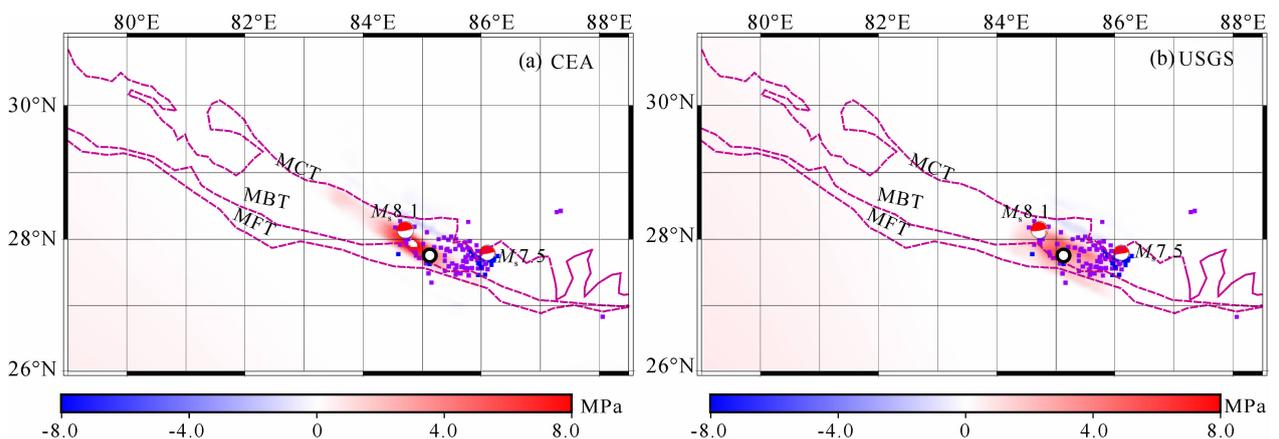


图 6 尼泊尔 $M_s8.1$ 地震引起近场库仑应力变化图

- (a) 接收断层与 CEA 给出的主震错动相同时(走向 301°,倾角 11°,滑动角 130°)计算得出的库仑应力变化;
- (b) 接收断层与 USGS 给出的主震错动相同时(走向 295°,倾角 10°,滑动角 110°)计算得出的库仑应力变化.

Fig. 6 The Coulomb failure stress of near field caused by the $M_s8.1$ earthquake

- (a) The ΔCFS of far field caused by the $M_s8.1$ earthquake using the CEA slip model;
- (b) The ΔCFS of far field caused by the $M_s8.1$ earthquake using the USGS slip model.

断层破裂滑动。

据 CEA、USGS 给出的震源机制及公式(1), 可计算得出尼泊尔及其邻近地区 15 km 深度处库仑应力变化, 见图 6, 其中(a)表示接收断层与 CEA 给出的主震错动相同时(走向 301° , 倾角 11° , 滑动角 130°)计算得出的库仑应力变化; (b)表示接收断层与 USGS 给出的主震错动相同时(走向 295° , 倾角

10° , 滑动 110°) 计算得出的库仑应力变化. 可以看出: (1) 两种不同断层滑动模型下, $M_s 8.1$ 地震在震区应力场变化均达到 MPa 量级, 大部分地区库仑应力变化为正, 特别是断层滑动面处, 地震危险性依然较大; (2) 余震及 5 月 12 号 $M_s 7.5$ 地震均落在库仑应力变化为正的区。

为了进一步探讨尼泊尔 $M_s 8.1$ 地震对我国西

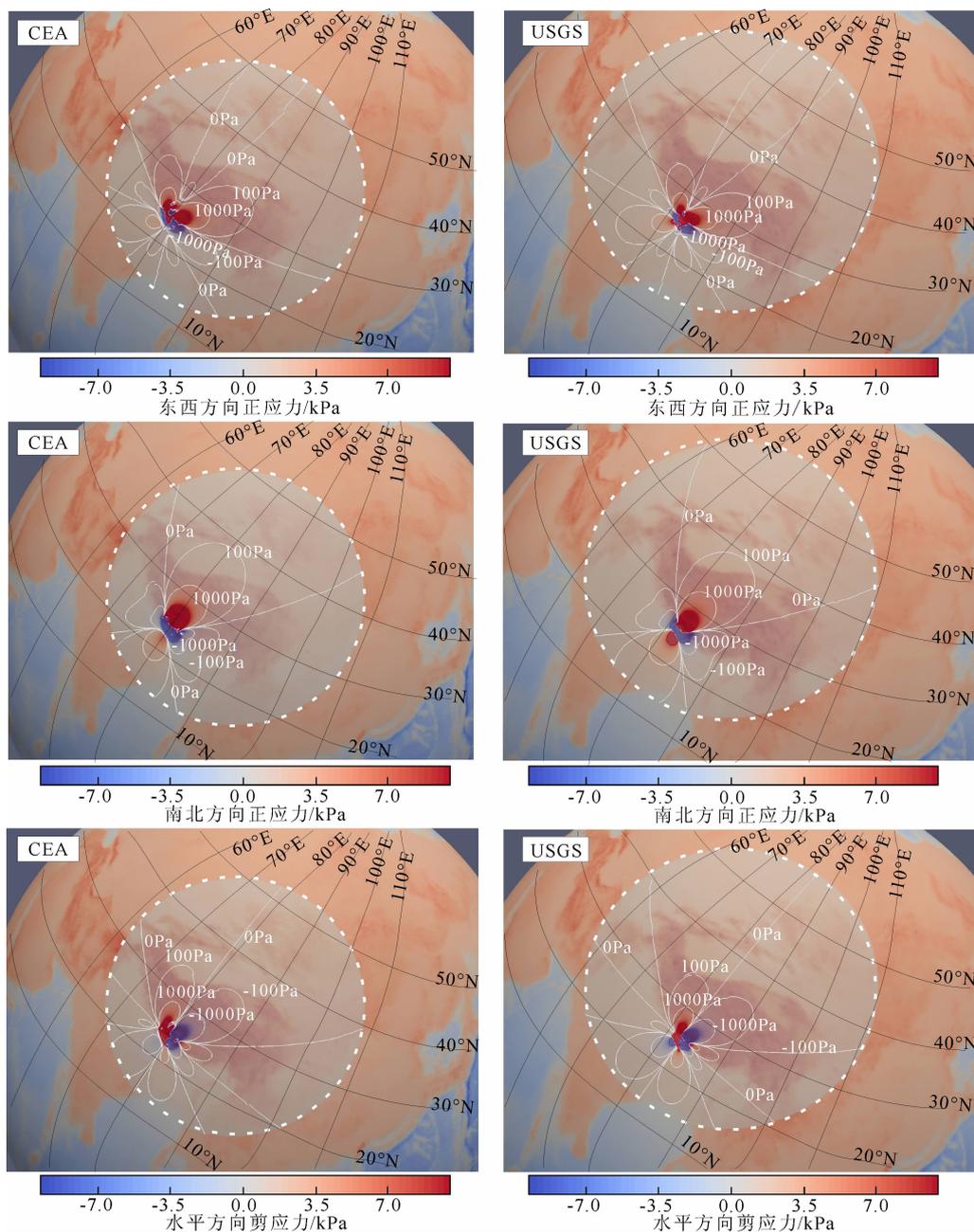


图 7 尼泊尔 $M_s 8.1$ 地震引起的我国西部地区水平地应力变化

从上向下分别为东西向水平正应力 $\sigma_{\varphi\varphi}$, 南北向水平正应力 $\sigma_{\theta\theta}$ 和水平 $\sigma_{\theta\varphi}$ 变化;

左边一列为 CEA 错断模型计算结果, 右边一列为 USGS 错断模型计算结果. 图中圆形区域半径 2000 km.

Fig. 7 Horizontal stress changes in western China caused by the $M_s 8.1$ earthquake

From top to bottom: E-W normal stress $\sigma_{\varphi\varphi}$, N-S normal stress $\sigma_{\theta\theta}$, and horizontal shear stress $\sigma_{\theta\varphi}$.

The white circle shows the far field boundary of radius 2000 km.

部地区应力场的影响,图 7 给出了 $M_s8.1$ 地震造成的同震应力场变化.因垂直方向应力变化很小,在此仅绘出水平应力变化图.可以看出,采用 CEA 和 USGS 两个断层滑动模型计算得出的远场应力场相差不大,两个模型均显示: $M_s8.1$ 地震对我国青藏高原有较大的影响,特别是西藏南部地区.随着发震逆掩断层活动造成垂直于断层的正应力释放,垂直于断层的压应力显著降低.图中震中以北我国西藏地区的南北向正应力 $\sigma_{\theta\theta}$ 增加显著(弹性力学定义张应力为正,正应力增加即表示压应力减小).南北向正应力增加 1kPa 的区域可涉及到雅鲁藏布江地区、拉萨块体和羌塘地块;甘孜、玉树、海源、阿拉善地区的应力变化量级在 0.1 kPa 量级.地震在西藏地区造成的东西向正应力 $\sigma_{\varphi\varphi}$ 变化较为复杂,在震中东北(包括日喀则、拉萨)和西北的广大区域也造成正应力增加(压应力减小),但震中正北有一些地方正应力减小(压应力增加).水平剪应力 $\sigma_{\theta\varphi}$ 变化在震中东北为负、西北为正.

这种应力变化意味着,对于震中东北高原内部近东西走向的右旋走滑断层,原有法向压应力减小,剪应力增大,因此发震危险增大.对藏南南北走向的正断层,法向张应力增大,因而地震危险性也增大.

据公式(1)可知,更精细的分析需要对不同性质的断层根据其不同走向、倾角计算特定断层上不同部位的库仑应力变化.图 8(a—b)表示接收断层分别与 CEA 确定的主震错动相同(走向 301° ,倾角 11° ,滑动 130°)的断层和与 USGS 确定的主震错动相同(走向 295° ,倾角 10° ,滑动 110°)的断层计算的库仑应力变化.可以看出大部分区域(除去雅鲁藏布江等区域)的库仑应力变化为负,是相对安全.然而,大量的地质学家对青藏高原西南部研究取得许多重要进展并形成了共识:在雅鲁藏布江缝合带之南、喜马拉雅北坡的藏南地区存在着一系列接近南北向构造,而最常见的是正断层及其组合的地堑和裂谷(尹安, 2006;Hodges, 2000).当接受断层为近南北走向高倾角正断层时,库仑应力变化为正.图 8(c—d)显示了 CEA 模型采用两种不同正断层(走向 $NE20^\circ$ 和走向 $NW20^\circ$,倾角均为 70° ,滑动角均为 270°)上的库仑应力变化图, $M_s8.1$ 地震的发生将会增加这些正断层破裂的危险性.

尼泊尔 $M_s8.1$ 地震后,我国西藏日喀则地区相继发生 5.9 级、5.3 级地震(<http://www.cea.gov.cn/>).日喀则 5.9 级地震断层节面 I:走向 351° 和走

向 41° ,倾角 -101° ,节面 II:走向 185° 和走向 44° ,倾角 -63° ,是由近南北向的正断层系活动引发的(<http://www.cea-igp.ac.cn/>).徐锡伟等(<http://news.sciencenet.cn>)认为日喀则地区的地震是藏南拆离系与控制近南北向拉张断陷盆地的正断层型地震,是由 $M_s8.1$ 地震触发而发生的.由图 8(c—d)可以看出,当接受断层为近南北向断层时,日喀则和拉萨地区均落在库仑应力增加的区域,库仑应力变化应力值量级在几个 kPa.

4 结论与讨论

自 55 Ma 前印度板块与欧亚板块碰撞挤压从未终止,印度板块岩石圈地幔往北俯冲于喜马拉雅山之下,导致了青藏高原不断抬升,造成了一系列的大地震在喜马拉雅造山带发生(Molnar and Tapponnier, 1975).2015 年尼泊尔 $M_s8.1$ 地震处于喜马拉雅南部,是两个板块之间的挤压逆冲造成的.

基于弹性位错理论和分层地壳模型的等效体力代替位错源全球有限元同震计算模型,利用 USGS 和 CEA 断层滑动模型,计算了尼泊尔 $M_s8.1$ 地震引起的同震位移场、应力场以及库仑应力变化,以及对周边区域的应力调整.计算结果获得以下认识:

(1) 尼泊尔 $M_s8.1$ 地震是一个比较典型的低角度逆冲地震,地震造成的同震位移主要集中在水平面上,且集中在首都加德满都周围区域. USGS 滑动模型的同震水平滑移量最大约为 4 m,CEA 滑动模型的同震水平滑移量最大约为 2 m;相比地震造成东西向和垂直方向的位移,南北方向上的水平位移较大,表现为断层上盘向南移动;CEA 模型计算得出断层上盘向南移动最大有 1.2 m,USGS 模型为 3.47 m;

(2) 尼泊尔地区处于欧亚板块与印度板块碰撞挤压断裂带上,构造断层较为发育. $M_s8.1$ 地震发震断层很可能属于 MHT 断裂带.地震造成尼泊尔地区库仑应力变化为正,地震危险性依然较大;余震及 5 月 12 号 $M_s7.5$ 地震均落在库仑应力变化为正的区城.

(3) 尼泊尔 $M_s8.1$ 地震对我国西藏地区有一定的影响,据 $M_s8.1$ 地震发震断层计算得出雅鲁藏布江地区和拉萨块体的应力变化为数 kPa,甚至可达 10 kPa,日喀则和拉萨地区均落在库仑应力变化增加的区域.应该密切关注拉萨、日喀则区域被诱发地震的可能性.

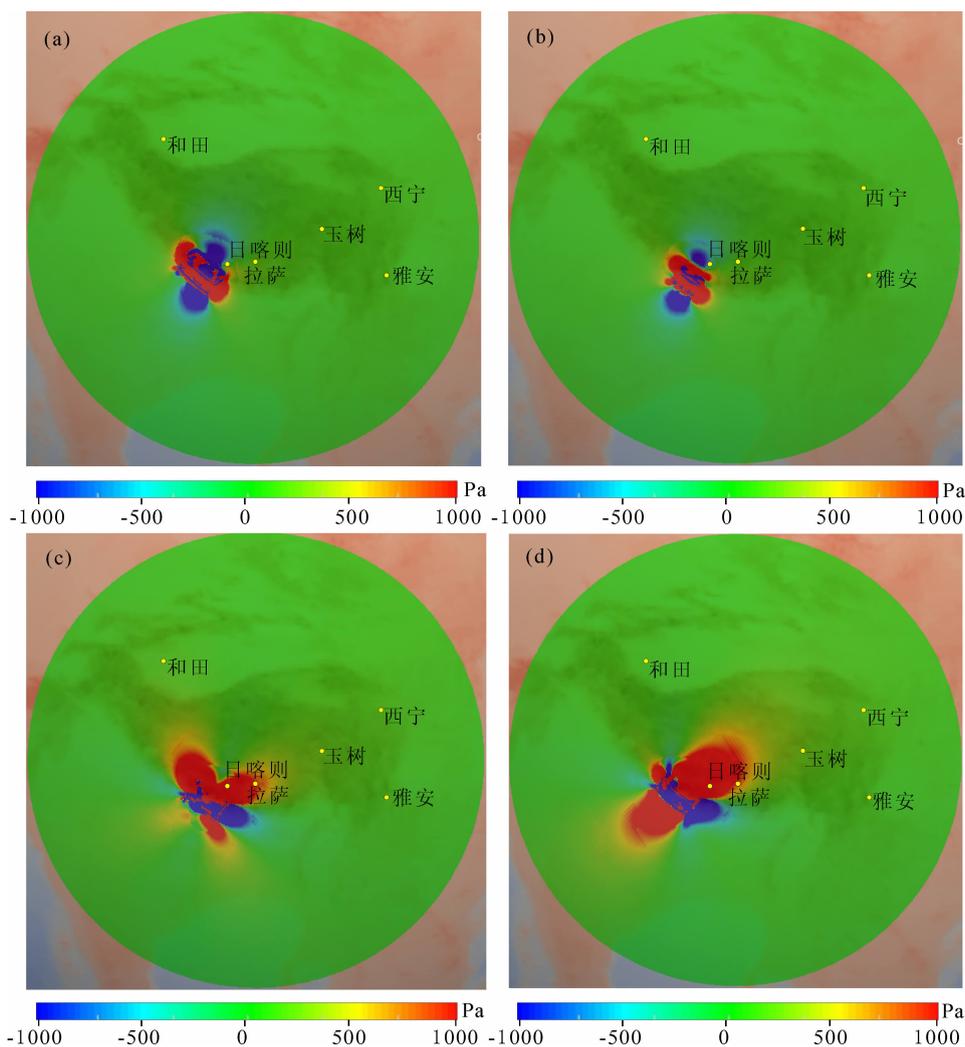


图8 尼泊尔 $M_{8.1}$ 地震引起的我国西部地区库仑应力变化

(a) 接收断层为 CEA(走向 301° , 倾角 11° , 滑动角 130°) 计算得出的库仑应力变化; (b) 接收断层为 USGS(走向 295° , 倾角 10° , 滑动角 110°) 计算得出的库仑应力变化; (c) 接收断层为(走向 20° , 倾角均为 70° , 滑动角 270°) 计算得出的库仑应力变化; (d) 接收断层为(走向 160° , 倾角均为 70° , 滑动角 270°) 计算得出的库仑应力变化; 背景地图显示为地形高程。

Fig. 8 The Coulomb failure stress of western parts of China caused by the $M_{8.1}$ earthquake

(a) The ΔCFS of far field caused by the $M_{8.1}$ earthquake using the CEA slip model; (b) The ΔCFS of far field caused by the $M_{8.1}$ earthquake using the USGS slip model; (c) The ΔCFS of far field caused by the $M_{8.1}$ earthquake based on the fault (strike angle 20° , dip angle 70° , slip angle 270°); (d) The ΔCFS of far field caused by the $M_{8.1}$ earthquake based on the fault (strike angle 160° , dip angle 70° , slip angle 270°); the background denote the elevation.

(4) 文章采用全球分层介质模型, 消除了地球曲率和均质的影响, 但采用的线弹性本构, 探讨震后较短时间内对地震活动性的影响, 未考虑黏弹效应。此外, 模型主要采用地震位错分布, 断层形态、摩擦系数等参数, 有着较大的不确定性, 在计算的震前构造应力场时较为简单, 且没有考虑动态应力触发, 流体作用等影响, 今后将继续深入研究。

References

Amelung F, Wolf D. 1994. Viscoelastic perturbations of the Earth; significance of the incremental gravitational force in models of

- glacial isostasy. *Geophys. J. Int.*, 117(3): 864-879.
- Antonioli A, Piersanti A, Spada G. 1998. Stress diffusion following large strike-slip earthquakes: a comparison between spherical and flat-earth models. *Geophys. J. Int.*, 133(1): 85-90.
- Ben-Menahem A, Singh S J. 1968. Eigenvector expansions of Green's dyads with applications to geophysical theory. *Geophys. J. Int.*, 16(4): 417-452.
- Ben-Menahem A, Singh S J, Solomon F. 1969. Static deformation of a spherical earth model by internal dislocations. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 59(2): 813-853.
- Ben-Menahem A, Israel M. 1970. Effects of major seismic events on the rotation of the Earth. *Geophys. J. Int.*, 19(4): 367-393.
- Chinnery M A. 1961. The deformation of the ground around surface faults. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 51(3): 355-372.
- Chinnery M A. 1963. The stress changes that accompany strike-slip

- faulting. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 53(5): 921-932.
- Deng Q D, Cheng S P, Ma J, et al. 2014. Seismic activities and earthquake potential in the Tibetan Plateau. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(7): 2025-2042, doi:10.6038/cjg20140701.
- Fu G Y, Sun W K. 2007. Effects of lateral inhomogeneity in a spherical Earth on gravity Earth tides. *J. Geophys. Res.*, 112(B6): B06409.
- Fu G Y, Sun W K. 2008. Surface coseismic gravity changes caused by dislocations in a 3-D heterogeneous earth. *Geophys. J. Int.*, 172(2): 479-503.
- Fu G Y, Sun W K, Fukuda Y, et al. 2010. Coseismic displacements caused by point dislocations in a three-dimensional heterogeneous, spherical earth model. *Geophys. J. Int.*, 183(2): 706-726.
- Hodges K V. 2000. Tectonics of the Himalaya and southern Tibet from two perspectives. *Geological Society of America Bulletin*, 112(3): 324-350.
- Mittal H, Kumar A. 2015. Stochastic finite-fault modeling of M_w 5.4 earthquake along Uttarakhand-Nepal border. *Nat. Hazards*, 75(2): 1145-1166.
- McGinley J R. 1969. A comparison of observed permanent tilts and strains due to earthquakes with those calculated from displacement dislocations in elastic earth models[Ph.D. thesis]. Pasadena, California; California Institute of Technology.
- Molnar P, Tapponnier P. 1975. Cenozoic tectonics of Asia; effects of a continental collision. *Science*, 189(4201): 419-462.
- Nostro C, Piersanti A, Andrea A, et al. 1999. Spherical versus flat models of coseismic and postseismic deformations. *J. Geophys. Res.*, 106(B6): 13115-13134.
- Nostro C, Piersanti A, Cocco M. 2001. Normal fault interaction caused by coseismic and postseismic stress changes. *J. Geophys. Res.*, 106(B9): 19391-19410.
- Okada Y. 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 75(4): 1135-1154.
- Okubo S. 1992. Gravity and potential changes due to shear and tensile faults in a half-space. *J. Geophys. Res.*, 97(B5): 7137-7144.
- Pollitz F F. 1996. Coseismic deformation from earthquake faulting on a layered spherical Earth. *Geophys. J. Int.*, 125(1): 1-14.
- Prajapati S K, Kumar A, Chopra S, et al. 2013. Intensity map of M_w 6.9 2011 Sikkim-Nepal border earthquake and its relationships with PGA; distance and magnitude. *Nat. Hazards*, 69(3): 1781-1801.
- Press, F. 1965. Displacements, strains and tilts at teleseismic distances. *J. Geophys. Res.*, 70(10): 2395-2412.
- Rudle J B. 1982. Viscoelastic-gravitational deformation by a rectangular thrust fault in a layered Earth. *J. Geophys. Res.*, 87(B9): 7787-7796.
- Sabadini R, Piersanti A, Spada G. 1995. Toroidal/poloidal partitioning of global post-seismic deformation. *Geophys. Res. Lett.*, 22(8): 985-988.
- Saito M. 1974. Some problems of static deformation of the earth. *J. Phys. Earth*, 22(1): 123-140.
- Shah A A. 2013. Two great historical earthquake ruptures revealed in Nepal. *Current Science*, 104(8): 994.
- Shi Y L, Cao J L. 2010. Some aspects in static stress change calculation—Case study on Wenchuan earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 53(1): 102-110, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.01.011.
- Shi Y L, Zhu S B. 2006. Discussion on method of calculating strain with GPS displacement data. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 26(1): 1-8.
- Steketee J A. 1958. On Volterra's dislocations in a semi-infinite elastic medium. *Can. J. Phys.*, 36(2): 192-205.
- Sun W. 1992. Potential and gravity changes caused by dislocations in spherically symmetric Earth models. *Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo*, 67(2): 89-238.
- Sun W K, Okubo S. 2002. Effects of earth's spherical curvature and radial heterogeneity in dislocation studies—for a point dislocation. *Geophys. Res. Lett.*, 29(12): 1605.
- Wang C S, Dai J G, Zhao X X, et al. 2014. Outward-growth of the Tibetan Plateau during the Cenozoic: A review. *Tectonophysics*, 621: 1-43.
- Wang H. 1999. Surface vertical displacements, potential perturbations and gravity change of viscoelastic earth model induced by internal point dislocations. *Geophys. J. Int.*, 137(2): 429-440.
- Wang R J, Martin F L, Martin L, et al. 2003. Computation of deformation induced by earthquakes in a multi-layered elastic crust-FORTRAN programs EDGRN/EDCMP. *Comput. Geosci.*, 29(2): 195-207.
- Wang R J, Lorenzo-Martín F, Rotha F. 2006. PSGRN/PSCMP—a new code for calculating co- and post-seismic deformation, geoid and gravity changes based on the viscoelastic-gravitational dislocation theory. *Comput. Geosci.*, 32(4): 527-541.
- Xu Z Q, Wang Q, Zeng L S, et al. 2013. Three-dimensional extrusion model of the Great Himalaya slice. *Geology in China* (in Chinese), 40(3): 671-680.
- Yin A. 2006. Cenozoic tectonic evolution of the Himalayan orogen as constrained by along-strike variation of structural geometry, exhumation history, and foreland sedimentation. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 13(5): 416-515.
- Yin A. 2010. Cenozoic tectonic evolution of Asia: A preliminary synthesis. *Tectonophysics*, 488(1-4): 293-325.
- Zhang B, Zhang H, Shi Y L. 2015. Equivalent-bodyforce approach on modeling elastic dislocation problem using finite element method. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(5): 1666-1674, doi:10.6038/cjg20150518.

附中文参考文献

- 邓起东, 程绍平, 马冀等. 2014. 青藏高原地震活动特征及当前地震活动形势. *地球物理学报*, 57(7): 2025-2042, doi:10.6038/cjg20140701.
- 石耀霖, 朱守彪. 2006. 用 GPS 位移资料计算应变方法的讨论. *大地测量和地球动力学*, 26(1): 1-8.
- 石耀霖, 曹建玲. 2010. 库仑应力计算及应用过程中若干问题的讨论——以汶川地震为例. *地球物理学报*, 53(1): 102-110, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.01.011.
- 孙文科. 2012. *地震位错理论*. 北京: 科学出版社, 28-38.
- 许志琴, 王勤, 曾令森等. 2013. 高喜马拉雅的三维挤出模式. *中国地质*, 40(3): 671-680.
- 尹安. 2006. 喜马拉雅造山带新生代构造演化: 沿走向变化的构造几何形态、剥露历史和前陆沉积的约束. *地学前缘*, 13(5): 416-515.
- 张贝, 张怀, 石耀霖. 2015. 有限元模拟弹性位错的等效体力方法. *地球物理学报*, 58(5): 1666-1674, doi:10.6038/cjg20150518.