GPS测定的尼泊尔 $M_w7.9$ 和 $M_w7.3$ 级地震同震形变场

赵斌^{①②*}, 杜瑞林^①, 张锐^③, 谭凯^{①*}, 乔学军^①, 黄勇^①, 张彩红^①

① 中国地震局地震研究所地震大地测量重点实验室, 武汉 430071;

② 武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 武汉 430079;

③ 地壳运动监测工程研究中心, 北京 100036

* 联系人, E-mail: cugzhaobin@163.com; whgpstan@163.com

2015-06-23 收稿, 2015-08-06 接受, 2015-08-27 网络版发表

中国地震局地震研究所所长基金(IS201326118)、中国地震局地震科技行业专项(201208006, 201308009)和国家自然科学基金(41304019)资助

摘要 2015年尼泊尔 $M_w7.9$ 和 $M_w7.3$ 级地震致灾范围包括尼泊尔、印度北部、巴基斯坦、孟加拉和中国藏南地区, 地震应变应力调整将对震区和邻区的地震活动产生不同程度的影响。尼泊尔境内的GPS连续观测数据、“中国大陆构造环境监测网络”GPS基准站和地震应急流动站观测数据计算结果揭示了尼泊尔地震的静态和动态同震形变场。对 $M_w7.9$ 级地震, 尼泊尔境内近场静态同震GPS水平位移最大为1.89 m, 距震中100~400 km的中国藏南地区观测到几毫米到几十厘米的静态水平位移, 毗邻尼泊尔的聂拉木县最大形变54.0 cm。 $M_w7.3$ 级地震静态同震形变最大为2 cm, 局限在震中附近200 km范围内。距震中约2000 km内的GPS基准站均记录到 $M_w7.9$ 大震明显的动态形变信号, 高频GPS动态形变幅度与地震破裂方向有关, 位于破裂方向上的测站动态形变幅度明显大于其他方向的测站。用弹性半空间位错模型正演模拟了震区和青藏高原南部格网点上的同震形变, 并分析了地震应变影响, 认为尼泊尔地震对中国藏南地区产生一定程度的拉张型应力变化, 需要持续关注。

关键词

尼泊尔地震
静态同震形变
动态形变波形
藏南地区

2015年4月25日, 尼泊尔首都加德满都市以西约80 km发生强烈地震。中国地震台网中心测定的面波震级为 $M_s8.1$ (<http://news.ceic.ac.cn/CC20150425141126.html>), 美国哈佛大学CMT震源机制解的矩震级为 $M_w7.9$ (<http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>), 震级与2008年5月12日青藏高原东边界的汶川地震相当。地震发生后, 国内外测震科学小组基于远场地震波资料快速获得震源机制解及滑动分布模型, 显示了该地震纯逆冲、低倾角、没有破裂至地表的基本特征(<http://www.unavco.org/highlights/2015/nepal.html>)。远场地震波资料初步研究结果显示, 地震破裂长度约150 km, 断层倾角约为11°, 震源深度15 km, 破裂最大滑移为3~5 m^[1]。破裂过程反演结果显示地震自起始破裂点向东单侧破裂。这次地震发生

在喜马拉雅断裂带上, 该地区历史上大震很多, 最近一次大震是1934年 $M_w8.1$ 级地震^[2]。2015年5月12日, 尼泊尔再次发生 $M_w7.3$ 级地震。

自20世纪90年代初以来, 各国科学家一直进行跨喜马拉雅山的GPS观测和研究, 横跨喜马拉雅山布设了密集的GPS观测网络, 获得了大量的GPS地壳形变观测数据^[3~5]。中国地壳运动观测网络工程和中国大陆构造环境监测网络(简称“陆态网络”)也建设运行了多年, 积累了丰富的GPS数据。以前的GPS研究成果表明, 印度板块以40 mm/a的速度持续沿北东方向下插入欧亚板块, 印度与藏南间跨喜马拉雅山的地壳汇聚速率约为20 mm/a, 吸收了约一半的汇聚速率^[4,6]。尼泊尔地震发生后, 这些数据为获取同震形变提供了宝贵的资料。目前, 各国科学家基于各自

引用格式: 赵斌, 杜瑞林, 张锐, 等. GPS测定的尼泊尔 $M_w7.9$ 和 $M_w7.3$ 级地震同震形变场. 科学通报, 2015, 60: 2758–2764

Zhao B, Du R L, Zhang R, et al. Co-seismic displacements associated with the 2015 Nepal $M_w7.9$ earthquake and $M_w7.3$ aftershock constrained by Global Positioning System Measurements (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 2758–2764, doi: 10.1360/N972015-00519

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N972015-00519>

拥有的资料进行研究, 获得了初步研究成果, 但我们还不是很清楚尼泊尔 $M_w7.9$ 和 $M_w7.3$ 级两次地震对震区及藏南地区的影响程度. 因此, 本文收集国内外GPS数据统一进行处理, 获取震区及中国大陆静态和动态同震形变场, 为研究地震机理和评估地震影响提供参考.

1 GPS数据及处理方法

地震发生后, 美国JPL的AIRA团队及时公布了尼泊尔境内的14个GPS连续站同震形变. 我们还收集了中国境内“陆态网络”GPS基准站和区域站资料, 其中藏南地区的GPS区域站在2015年4月前进行了常规观测, 震后立即进行地震应急复测. 陆态网络GPS基准站同时保存有采样率30和1 s的数据, 其他数据采样率为30 s.

用30 s采样率数据可以计算得到静态同震形变. 首先采用GAMIT/GLOBK软件处理了地震前后3~5天的GPS单日松弛解, 得到测站坐标估计值及其协方差. 然后用GLOBK软件综合单日松弛解, 并以全球约50个均匀分布的参考站为约束得到ITRF08参考框架下的测站坐标及误差. 最后, 以每个测站震前的速率为约束, 对坐标时间序列进行最小二乘估计, 得到同震形变及其误差. 对于1 s采样率数据, 用TRACK软件进行单历元坐标计算, 以获得地震瞬间的动态形变波.

2 静态同震形变

计算获得的尼泊尔地震引起的静态同震形变如图1所示, 数值结果见表S1, 同震水平位移分布符合逆冲断裂破裂的形变特征. 位于上盘的GPS测站观测到显著的同震形变, 位移矢量指向地震破裂区域, 随着震中距的增加, 同震位移幅值快速衰减. 对 $M_w7.9$ 级地震, GPS观测到的最大同震位移发生在尼泊尔境内距CMT震中仅9.5 km的KKN4站, 达1.89 m. 尼泊尔境内有2个测站观测到1.3~1.5 m的同震位移, 这两个站距离震中约50 km; 距离震中约200 km范围的其他站点观测到1 cm左右的同震形变. 更远的GPS测站同震形变微弱, 小于2.0 mm. 需要注意的是, 位于震中东南150 km处的RMTE站向东移动了1.1 cm, 显示出上下盘逆冲碰撞引起的边界部位侧向挤出.

$M_w7.9$ 级地震还在中国藏南地区产生了几毫米到几十厘米的永久位移, 最大同震位移位于毗邻尼泊

尔的聂拉木县J041区域站, 为54.0 cm. 吉隆县境内距离震中约140 km的J040和J339两个区域站分别向南、南偏西移动了13.3和14.3 cm. 再往北, 珠峰地区的同震位移在3.0 cm左右. 离开震中约243 km的西藏仲巴(XZZB)和西藏昂仁(XZAR)站分别向东南和西南方向移动了1.8 cm. 距离震中400 km以外的其他测站同震形变快速衰减, 一般小于5 mm. 日喀则(XZRK)和拉萨(LHAZ)仅记录到2.4和1.1 mm的位移, 落在95%置信区间的误差椭圆内, 形变微弱. 连续观测的GPS同震形变中误差一般在2 mm以内, 流动观测形变中误差在4 mm以内.

此外, 基于尼泊尔及藏南地区的连续GPS站, 还计算了 $M_w7.3$ 级地震的同震水平位移, 结果显示该地震在中国珠峰、热曲地区产生的影响约2 cm, 影响范围在200 km左右.

逆冲型强震会引起地表显著的垂直运动. 靠近 $M_w7.9$ 地震震中的4个GPS测站观测到了显著的垂直位移, 其中尼泊尔境内的KKN4和NAST位于隆升区, 分别抬升了1.27和0.61 m; 而CHLM和位于聂拉木的J041测站位于下沉区, 分别下降了0.57和6.5 cm. 其他测站垂直形变量级小, 且观测误差大, 如XZZF和SNDL两个测站(图2(a)). 垂直形变中误差一般在1 cm以内.

地震发生后, 美国加州大学圣迭戈分校迅速公布了 $M_w7.9$ 级地震引起的InSAR同震形变计算结果^[8]. InSAR视向线距离变化和GPS形变场均显示本次地震同震位移明显的非对称性, 同震形变主要位于断层上盘, 而下盘形变很小, 正演结果亦证实了该特点. 上盘的GPS形变在水平方向上向南往震中运动, InSAR形变显示了垂直形变波浪型升降特征. 我们将GPS测定的三维形变投影到InSAR视向线方向, 并与InSAR视向线方向距离变化^[8]进行对比(图2(b)), 发现除XZZF站偏差较大外, 其他GPS站两者之间的互差小于2.5 cm, 说明我们计算的GPS测站三维形变与InSAR观测结果基本一致. InSAR观测形变误差较大, 一般在5 cm左右甚至更大^[9]. 因此, 本文GPS高精度的三维形变可为InSAR检验和校正提供基础.

3 高频GPS动态形变

用TRACK软件对震中2000 km范围内110个测站的1 Hz高频GPS数据进行处理, 卫星轨道采用IGS精密星历. 该软件采用消除一阶电离层影响的相位观

图 1 尼泊尔 $M_w 7.9$ 级地震 GPS 水平同震形变, 内嵌小图为 $M_w 7.3$ 级地震的水平形变. 误差椭圆代表 95% 的置信区间, 断层数据引自 Taylor 等^[7]. 地震源机制解为 GCMT 结果(<http://www.globalcmt.org>)

Figure 1 Co-seismic horizontal displacements due to the 25 April 2015 M_w 7.9 Gorkha, Nepal earthquake inferred from GPS observations. The inner small map represents the co-seismic offsets associated with the M_w 7.3 earthquake. The error ellipses represent the 95% confidence level, and the red solid lines denote the active faults according to Taylor^[7]. The focal mechanisms are based on the published results by the global centroid moment tensor project (GCMT, <http://www.globalcmt.org>)

图2 尼泊尔地震垂直变形(a)InSAR 视向线方向距离变化(从测站向 InSAR 卫星方向^[8])及 GPS 垂直变形(b)GPS 和 InSAR 视向线方向距离变化的比较

Figure 2 Co-seismic vertical displacements due to the 25 April 2015 M_w 7.9 Gorkha, Nepal earthquake. (a) The InSAR Line of Sight (LOS) deformation from ALOS-2 interferometry [8]. Vectors represent the co-seismic vertical displacements derived from GPS observations. (b) Comparison of GPS-derived LOS deformation and InSAR LOS values

测值以及伪距组合观测值进行差分定位, 计算每个历元的测站坐标. 为了避开地震波对参考站自身的影响, 选取距离震中约2400 km的湖北恩施(HBES)站为参考站. 由于篇幅有限, 本文仅给出 M_w 7.9大震的动态形变结果.

图3给出了高频GPS测站分布及其与震中的位置关系. 对每个站的形变曲线进行甄别, 发现位于图3红色剖面右侧的红色三角形测站(占64%以上)记录到容易识别的地面动态形变信号. 相反, 位于剖面左侧的黑色三角形测站记录到的地面动态形变信号微弱或难以辨识. 图3中红色三角形均记录到了动态形变波形, 更多典型GPS动态形变波形图见图S1. 统计分析认为, 计算的GPS动态形变的中误差优于2 cm. 鉴于篇幅有限, 图4仅展示了震中1000余千米范围10个高频GPS测站南北向曲线. 位于震中东北的5个测站

记录的地震信号十分清晰, 其中珠峰(XZZF)、昂仁(XZAR)和日喀则(XZRK)南北向运动幅度至少21 cm, 拉萨站(LHAZ)在该方向的摆动幅度也达到11 cm, 这些地区均有强烈震感. 然而, 位于震中西北的5个测站记录到的地面震动信号难以辨识, 只有距离震中最近的西藏仲巴(XZZB)站略有变化. 需要说明的是珠峰站(XZZF)靠近UTC 06:18的脉冲式信号为某颗卫星质量不好造成. 图4显示尽管震中距相当, 但不同方位的地面震动强度差异十分明显. 初步分析认为, 这是由本次地震自西向东单向破裂引起的方向性效应, 具体原因有待深入研究.

通常高频GPS观测到地面强震动信号的范围要比静态同震位移影响范围大很多. 例如, 2011年日本3.11大地震的静态同震位移可以被3000 km以外的远场GPS站观测到^[10,11], 而其高频震动波可以被9000 km

图3 高频GPS测站分布图, 红色和黑色三角形分别为地面运动信号较强与较弱的测站. 震源机制解为CMT公布的结果(<http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>), 蓝色虚线圈是以震中为圆心500 km间隔的等距线, 暗红色虚线为穿过震中的走向为N32°E的剖面

Figure 3 High-rate GPS stations in this study. Red triangles present the GPS stations that recorded obvious displacement waveforms; blue triangles represent stations recording subtle displacements. Blue dotted lines denote equidistance lines from the epicenter for every 500 km interval. The red dotted line indicates a profile trending N32°E and passing through the epicenter

图4 距离震中1000余千米高频GPS站记录的NS方向的动态形变波形。(a) 测站位于图3剖线的左侧, (b) 测站位于剖线的右侧。每条曲线的左侧为测站代码, 右侧数字为震中距, 单位: km

Figure 4 High-rate displacement waveforms in the NS component recorded at GPS stations approximately 1000 km away from the earthquake epicenter. Stations in the left figure recorded subtle displacements during the earthquake, whereas stations in the right figure observed significant amplitudes of the displacement waveforms when the seismic waves arrived. The station code and the distance from the station to the epicenter (unit: km) are labeled at the head and tail of each waveform

以外位于欧洲的GPS高频接收机捕获。高频GPS解算结果显示, 震中2000 km以外的四川南充(SCNC)仍能观测到地面震动信号。因此, 高频GPS动态形变记录了更丰富的地震破裂信息, 有助于深入研究震源机理和破裂过程。

4 尼泊尔地震对藏南地区形变和应变的影响

本文计算的GPS同震形变分布在距离震中800 km范围的离散点上。为了解尼泊尔地震对震区, 特别是对中国藏南地区形变和应变的影响, 我们以 $M_w 7.9$ 地震引起的GPS同震形变为约束反演模拟了发震断层的破裂滑动分布, 并用弹性半空间位错模型^[12], 正演模拟了震区和青藏高原格网点上的同震形变值。格网点形变场从南北两侧向震中汇聚, 在走向两侧的形变很小, 清晰显示了地震逆冲破裂特征。断裂北盘的形变很大, 离开震中400 km尚有近1 cm变形, 中国边境上变形有0.5 m, 需要继续关注。

根据水平形变场可以计算水平应变场, 为了分

析地震对西藏南部的影响, 仅绘制了小于 10^{-6} 的应变值。从图5(b)给出的水平主应变可以看出地震主要造成藏南地区不同程度的拉张应变, 最大主应变轴指向地震震中, 与同震水平位移矢量近似平行。地震造成的拉张应变在一定程度上缓解了青藏高原物质北东向运动的作用, 但可能会对藏南拉张型正断层产生一定影响^[13], 如亚东-谷露断裂带。尼泊尔地震后3 h, 在日喀则地区定日县发生了 $M_s 5.9$ 级地震。震源机制解显示为正断层地震, 地震断层走向与该区域最大主应变方向垂直, 分析认为与尼泊尔 $M_w 7.9$ 地震引起的该地区拉张型应力调整有关。

尼泊尔地震对震区和青藏高原的影响, 除了来自于同震破裂变形, 还包含震后变形的影响。震后变形一般有震后余滑、震后黏弹性松弛以及震后孔隙回弹等, 通常持续几年甚至几十年, 影响的空间范围更广。某些区域震后变形与同震变形具有类似的时空分布特征。因此, 作者根据同震形变(图1), 推测震后形变可能对中国藏南靠近尼泊尔边境地区产生较大

图5 (a) 尼泊尔 $M_w7.9$ 级地震引起的水平形变模拟值, (b) 尼泊尔 $M_w7.9$ 级地震造成的水平主应变分布, 2015 年 4 月 25 日定日 $M_s5.9$ 地震震源机制为中国地震局地球物理研究所发布结果, 其他为 GCMT 结果. 红色实线为断层线

Figure 5 (a) Modeled horizontal displacements caused by the Nepal $M_w7.9$ earthquake, (b) the principle strain around the epicenter caused by the Nepal earthquake. All the earthquake focal mechanisms (except for those of the Dingri $M_s5.9$ earthquake) are based on the published results of GCMT. The focal mechanism of the Dingri earthquake is obtained from the Institute of Geophysics, China Earthquake Administration. The red solid lines represent active faults

的影响, 需要继续密切关注. 本文计算获得的参考框架一致的GPS同震形变场, 既可为当前防震减灾提

供参考, 也为进一步的地球动力学研究和地震危险性评估奠定基础.

致谢 “中国大陆构造环境监测网络”提供了GPS观测资料, UNAVCO提供了尼泊尔地区珍贵的观测资料, JPL AIRA提供了部分同震形变结果, IGS数据中心提供的全球IGS跟踪站资料, 在此一并致谢. 感谢审稿专家的宝贵意见和建议.

参考文献

- 1 Zhang Y, Xu L S, Chen Y T. Rupture process of the 2015 Nepal $M_w7.9$ earthquake: Fast inversion and preliminary joint inversion. *Chin J Geophys*, 2015, 58: 1804–1811 [张勇, 许力生, 陈运泰. 2015年尼泊尔 $M_w7.9$ 地震破裂过程:快速反演与初步联合反演. 地球物理学报, 2015, 58: 1804–1811]
- 2 Bilham R, Gaur V K, Molnar P. Himalayan seismic hazard. *Science*, 2001, 293: 1442–1444
- 3 Freymueller J T, Bilham R, Bürgmann R, et al. Global Positioning System measurements of Indian plate motion and convergence across the Lesser Himalaya. *Geophys Res Lett*, 1996, 23: 3107–3110
- 4 Bilham R, Larson K, Freymueller J T. GPS measurements of present-day convergence across the Nepal Himalaya. *Nature*, 1997, 386: 61–64
- 5 Bettinelli P, Avouac J P, Flouzat M, et al. Plate motion of India and interseismic strain in the Nepal Himalaya from GPS and DORIS measurements. *J Geodesy*, 2006, 80: 567–589
- 6 Tapponnier P, Xu Z, Roger F, et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau. *Science*, 2001, 294: 1671–1677
- 7 Taylor M, Yin A. Active structures of the Himalayan-Tibetan orogen and their relationships to earthquake distribution, contemporary strain field, and Cenozoic volcanism. *Geosphere*, 2009, 5: 199–214
- 8 Lindsey E O, Natsuaki R, Xu X, et al. Line of sight deformation from ALOS-2 interferometry: $M_w7.8$ Gorkha earthquake and $M_w7.3$ aftershock. *Geophys Res Lett*, 2015, 42, doi: 10.1002/2015GL065385
- 9 Shen Z K, Sun J B, Zhang P Z, et al. Slip maxima at fault junctions and rupturing of barriers during the 12 May 2008 Wenchuan earthquake. *Nat Geosci*, 2009, 2: 718–724

- 10 Wang M, Li Q, Wang F, et al. Far-field coseismic displacements associated with the 2011 Tohoku-Oki earthquake in Japan observed by Global Positioning System. *Chin Sci Bull*, 2011, 56: 2419–2424 [王敏, 李强, 王凡, 等. 全球定位系统测定的2011年日本宫城 M_w 9.0级地震中海远场同震位移. *科学通报*, 2011, 56: 1593–1596]
- 11 Zhao B, Wang W, Yang S M, et al. Far field deformation analysis after the M_w 9.0 Tohoku earthquake constrained by cGPS data. *J Seismol*, 2012, 16: 305–313
- 12 Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull Seismol Soc Am*, 1985, 75: 1135–1154
- 13 Zhang B, Cheng H H, Shi Y L. Calculation of the co-seismic effect of M_s 8.1 earthquake, April 25, 2015, Nepal. *Chin J Geophys*, 2015, 58: 1794–1803 [张贝, 程惠红, 石耀霖. 2015年4月25日尼泊尔 M_s 8.1级大地震的同震效应. *地球物理学报*, 2015, 58: 1794–1803]

Co-seismic displacements associated with the 2015 Nepal M_w 7.9 earthquake and M_w 7.3 aftershock constrained by Global Positioning System Measurements

ZHAO Bin^{1,2}, DU RuiLin¹, ZHANG Rui³, TAN Kai¹, QIAO XueJun¹, HUANG Yong¹ & ZHANG CaiHong¹

¹ Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071, China;

² GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

³ National Earthquake Infrastructure Service, Beijing 100036, China

A magnitude of M_w 7.9 earthquake occurred in Nepal on 25 April 2015 along the Himalayan seismic zone. Twelve days later, a magnitude of M_w 7.3 aftershock ruptured the southeast side of initial rupture region of the M_w 7.9 earthquake. In this study, we report in detail the co-seismic displacements, which were caused by the two events, based on continuous observations in Nepal obtained from the permanent Global Positioning System (GPS) stations of the Crustal Movement Observation Network of China (CMONOC) and from campaign GPS measurements in southern Tibet before and after the M_w 7.9 earthquake. The largest co-seismic horizontal offset caused by the M_w 7.9 earthquake was 1.89, and it was reported from the KKN4 station in Nepal. In southern Tibet, the co-seismic horizontal displacements varied from several millimeters to approximately half a meter within a 100–400 km range of the epicenter. The horizontal offset in the Everest Mountains was about 3 cm. Referring to the M_w 7.3 earthquake, co-seismic offsets of up to 2 cm could be detected as far as approximately 200 km away from the epicenter. Near-field GPS stations also recorded significant vertical deformations caused by the great thrust earthquake. The GPS displacements in the InSAR Line of Sight (LOS) direction agreed well with the InSAR LOS values. In addition, high-rate GPS deformation waveforms were recorded by the high-rate GPS stations in Mainland China within a distance of approximately 2000 km from the epicenter, indicating that the amplitude of the seismic waves in the direction of the fault rupture increased. The GPS stations located along the direction of seismic rupture recorded much larger deformation waveform amplitudes than those located in the opposite direction. Finally, forward calculations were performed using a simple elastic half-space dislocation model, in order to investigate the co-seismic displacements and the principle strain changes around the epicenter, especially in the southern Tibet. The principle strain results indicated that the Nepal M_w 7.9 earthquake resulted in the tensile stress changes in southern Tibet and probably triggered the Dingri M_s 5.9 earthquake.

Nepal M_w 7.9 earthquake, static co-seismic displacements, high-rate GPS displacement waveforms, southern Tibet

doi: 10.1360/N972015-00519

补充材料

表 S1 GPS 观测到的尼泊尔 M_w 7.9 级地震的同震形变(中国大陆)

图 S1 典型 GPS 动态形变波形图

本文以上补充材料见网络版 csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.