科学通报 2015 年 第 60 卷 第 22 期: 2115 ~ 2123
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

GPS 观测的 2015 年尼泊尔 M_S 8.1 级地震震前应变积累及同震变形特征

苏小宁[①②], 王振[③], 孟国杰[①*], 徐婉桢[①], 任金卫[①]

① 中国地震局地震预测研究所地震预测重点实验室, 北京 100036;
② 同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092;
③ Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Tokyo 113-0032, Japan
* 联系人, E-mail: guojiemeng@126.com

2015-05-15 收稿, 2015-06-08 接受, 2015-06-18 网络版发表
国家自然科学基金(41174004, 41461164004)、国家国际科技合作专项(2015DFR21100, 2010DFB20190)和中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项(2012IES010302)资助

摘要 2015 年 4 月 25 日, 在印度板块与欧亚板块交界区的喜马拉雅地震带上发生了尼泊尔 M_S 8.1 级大地震. 震前 GPS 速度场和应变率场显示, 喜马拉雅地震带整体表现为 15.94±1.82 mm/a 的压缩特征, 同时还具有分段活动特征. 此次地震发生在速度场顺时针旋转和逆时针旋转的分界带, 该处最大主压应变率的量值在喜马拉雅地震带并非最大. GPS 观测的同震位移场揭示了尼泊尔 M_S 8.1 级地震引起的地壳变形特征, 分别有 9 和 6 个测站观测到明显的水平向和垂向同震位移, 其水平分量的运动方向整体表现为南向运动, 位于震中东南侧的 3 个测站垂直分量表现为上升, 其余测站为下降. 中国境内距离震中最近的 5 个测站的垂向同震位移显示, 此次地震造成珠穆朗玛峰的沉降量约为 4 mm. 依据 GPS 观测到的同震位移场, 利用非负最小二乘方法反演震源断层面上的滑动分布. 反演结果表明最大滑动量为 6.84 m, 滑动量较大的区域分布在加德满都附近及其以北区域的下方, 这可能是造成加德满都地区具有较大破坏的原因之一, 该滑动分布模型能够很好地解释 GPS 观测到的同震位移. 利用此滑动分布模型计算的地震矩为 8.21×10^{20} N m, 对应的矩震级为 M_W 7.9.

关键词
尼泊尔 M_S 8.1 级地震
GPS 应变率场
同震位移
滑动分布
珠穆朗玛峰

2015年4月25日尼泊尔发生M_S 8.1级大地震, 根据中国地震台网中心测定, 震中位于28.2°N, 84.7°E, 震源深度约20 km. 根据尼泊尔官方统计, 该地震造成了巨大的人员伤亡和经济损失, 截至2015年5月2日, 已经导致至少7566人丧生, 超过14500人受伤. 美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)利用全球数字地震台网地震波形反演的震源机制和破裂过程表明, 此次地震为低倾角逆冲型地震, 最大同震位移达到3~4 m (http://earthquake.usgs.gov/archive/product/finite-fault/us20002926/us/1429969841288/web/20002926.param).

尼泊尔M_S 8.1级地震发生在印度板块与欧亚板块交界区的喜马拉雅地震带. 地震波反演和成像研究表明, 印度板块岩石圈下插到整个喜马拉雅造山带和西藏高原下[1]. 大地测量资料显示, 印度板块和欧亚板块的汇聚速率在尼泊尔中部和东部区域都为17.8 mm/a, 而在西部区域则为20.5 mm/a[2]. 自1800年以来, 于1803, 1833, 1897, 1905, 1934和1950年在喜马拉雅地震带发生了6次8级左右的大地震[2~5](图1). 依据这些地震的同震平均滑动量, 结合应变积累

引用格式: 苏小宁, 王振, 孟国杰, 等. GPS 观测的 2015 年尼泊尔 M_S 8.1 级地震震前应变积累及同震变形特征. 科学通报, 2015, 60: 2115–2123
Su X N, Wang Z, Meng G J, et al. Pre-seismic strain accumulation and co-seismic deformation of the 2015 Nepal M_S 8.1 earthquake observed by GPS (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 2115–2123, doi: 10.1360/N972015-00534

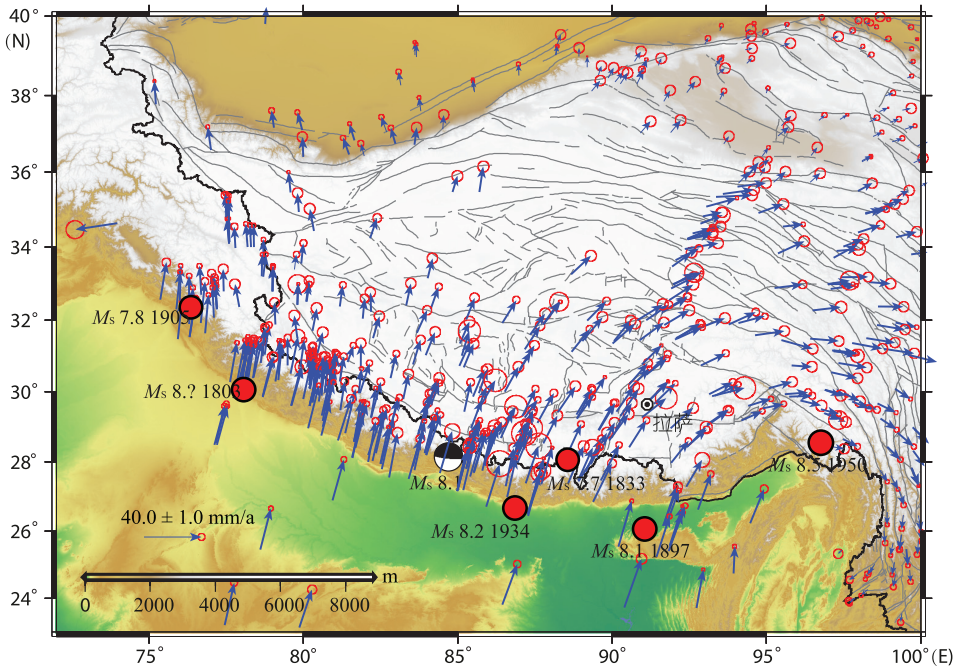


图 1 青藏高原相对于欧亚参考框架的 GPS 速度场

Figure 1 GPS velocity field around the Tibetan Plateau relative to the stable Eurasia

分布，有学者认为此次地震的区域存在发生8级左右地震的可能性[6].

本文收集整理了尼泊尔M_S 8.1级地震前喜马拉雅地震带及其周边区域的GPS观测结果，分析了该地区的应变积累特征；利用中国大陆构造环境监测网络(陆态网)和尼泊尔M_S 8.1地震周边IGS测站的GPS观测资料，解算了此次地震的地表同震位移；依据GPS同震位移结果，反演了地震震源破裂滑动分布，本研究为理解该次强烈地震的发震机制和震害特征提供了基础性研究资料.

1 震前区域应变积累特征

图1给出了喜马拉雅及其周边区域在欧亚参考框架下的GPS速度场. GPS测站速度来自两部分: (1) 对于中国大陆的测站，本文收集了陆态网1999~2013年的GPS原始观测资料，利用GAMIT/GLOBK[7,8]和CATS软件[9]，依据Meng等人[10]的数据处理策略，采用最新的参数模型进行解算，获取了欧亚参考框架下的测站速度；(2) 对于境外测站，收集了已发表主要文献的测站速度[2,11~15]，这些测站速度或相对于全球参考框架，或相对于欧亚或印度等区域参考框架，本文利用这些速度场的公共测站，基于最小约束准则将其转换到统一的欧亚参考框架[12,15].

从图1可以看出，印度次大陆在欧亚框架下的整体运动南北向为35.59±1.24 mm/a，东西向为9.56±1.24 mm/a. 穿过喜马拉雅变形带到达青藏高原内部之后，GPS速度发生一定的偏转，在中部南北向为19.90±1.83 mm/a，东西向为8.50±1.83 mm/a；在东部南北向为20.75±1.08 mm/a，东西向为16.51±1.23 mm/a；在西部南北向为18.28±1.26 mm/a，东西向为0.84±1.24 mm/a. 受印度板块的推挤作用，喜马拉雅地震带的挤压速率平均为15.94±1.82 mm/a，在95%的置信区间内，该挤压速率与Ader等人[2]的结果基本一致. 同时，喜马拉雅地震带也具有明显的分段活动特征，东段在挤压的同时伴随顺时针旋转，中段以挤压为主，西段在挤压的同时伴随逆时针旋转，这可能与西边帕米尔构造结和东端阿萨姆构造结各自的左型及右型的旋扭运动有关[16]. 此次尼泊尔M_S 8.1级地震发生在速度场逆时针旋转和顺时针旋转的分界处.

利用图1所示速度场，基于多尺度球面小波方法[17]解算GPS应变率. 图2给出了面应变率/主应变率场，由此图可以看出，喜马拉雅地震带整体表现为压缩特征，压缩区的宽度为200~300 km. 尼泊尔M_S 8.1级地震发生在主压应变率为主的区域，该区域最大主压应变率为13.8×10^{-8}/a，而在整个喜马拉雅地震带，最大主压应变率最大的区域位于震中的西北区

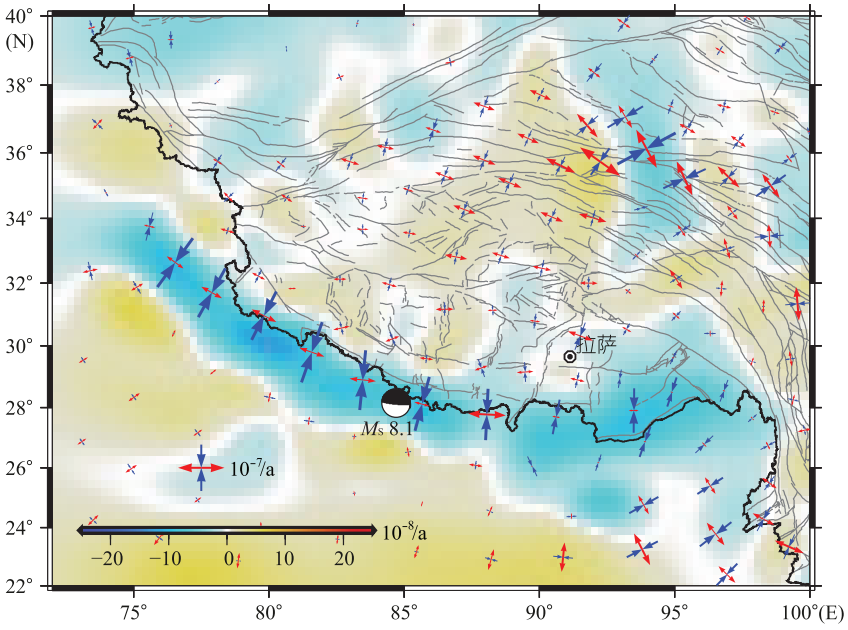


图 2 青藏高原 GPS 面应变率/主应变率场

Figure 2 GPS dilatation strain rate and principal strain rate around the Tibetan Plateau

域，距离震中500 km左右，其最大主压应变率为20.2×10^{-8}/a，因此可知，震中区的最大主压应变率在喜马拉雅地震带并非最大.

2 同震位移分布特征

2.1 GPS观测与数据处理

本文收集陆态网260个GPS基准站数据[18]以及震中1000 km范围内14个IGS连续观测站数据http://pbo.unavco.org. 同时也收集全球范围内距震中1000 km以外的80个IGS核心站的数据，用于确定统一自洽并且不受地震影响的参考框架，以保证同震位移的可靠性. 在尼泊尔M_S 8.1级地震主震之后，于2015年4月25日和4月26日分别发生了M_S 7.0级和M_S 7.1级2次强余震，因此在解算同震位移时，利用主震前7 d和M_S 7.1级强余震之后3 d的数据，具体为北京时间2015年4月18日08时至25日14时和4月26日15时至30日08时，时间跨度为2015年4月18日08时~30日08时.

数据处理采用双差定位模式，由GAMIT/GLOBK软件完成，处理中涉及的地球重力场、固体潮、极潮以及海潮模型均遵循最新发布结果，天线相位中心改正模型采用IGS08绝对天线相位中心模型. 以GPS精密星历作为先验值，同时解算卫星位置和测站坐标. 利用L1和L2的线性组合LC观测量消除电离层一阶项的影响. 采用GPT模型和GMF模型改正对流层延迟，并在此基础上每个测站每2 h估算一个对流层延迟参数，同时顾及大气的不均匀性，在其东西向和南北向各附加一个大气水平梯度参数[19,20].

利用上述方法和模型，我们获得了震前174 h和震后89 h的单日松弛解. 对震前的单日松弛解进行联合平差，获得测站在震前的坐标. 同样，对震后的单日松弛解进行联合平差，获得测站在震后的坐标. 利用震后相对震前的坐标变化计算地震所引起的同震位移. 在95%置信水平，震前坐标水平分量的中误差为2.1 mm，垂向分量的中误差为5.6 mm；震后坐标水平分量的中误差为2.7 mm，垂向分量的中误差为6.9 mm. 根据误差传播定律，同震位移水平分量的中误差为3.4 mm，垂向分量的中误差为8.9 mm.

2.2 同震位移场

GPS观测到的不同测站的水平和垂向同震位移揭示了尼泊尔M_S 8.1级地震引起的地壳变形特征. 图3给出了该次地震引起的水平向和垂向同震位移场(具体数值见表1)，需要指出的是，解算的同震位移为主震和2次强余震所产生的综合结果. 首先分析同震位移的水平分量. 在95%的置信水平下，9个测站观测到明显的同震位移，这些测站均位于发震断层的上盘. 其中同震位移最大的测站为位于震中东南

表 1 GPS 观测的同震位移

Table 1 GPS co-seismic displacements caused by Nepal M_S 8.1 earthquake

台站代码	纬度(N)	经度(E)	南北向(mm)		东西向(mm)		垂向(mm)	
			同震位移	误差	同震位移	误差	同震位移	误差
CHLM	28.207°	85.314°	−1401.8	1.1	−221.5	1.0	−584.3	2.9
DNGD	28.754°	80.582°	0.4	1.6	1.2	1.2	−0.4	3.9
DNSG	28.345°	83.764°	−1.8	1.2	0.8	1.2	−17.1	4.6
JMSM	28.805°	83.743°	−7.0	1.1	5.8	1.1	−5.3	3.5
KKN4	27.801°	85.279°	−1840.4	1.2	−444.4	1.1	1260.6	4.0
LCK3	26.912°	80.956°	0.2	1.0	1.9	0.9	−1.0	2.6
LCK4	26.912°	80.956°	0.3	1.0	1.6	1.0	0.4	2.7
LHAZ	29.657°	91.104°	−0.9	1.0	1.5	1.0	−3.9	3.1
NAST	27.657°	85.328°	−1303.3	1.6	−312.2	1.7	604.0	7.0
NPGJ	28.117°	81.595°	−0.7	1.2	0.4	1.2	−0.5	4.1
PYUT	28.101°	82.987°	0.5	1.2	−0.1	1.2	−1.1	4.0
RMTE	26.991°	86.597°	0.8	1.2	8.9	1.1	0.2	3.5
SMKT	29.969°	81.807°	−0.6	1.0	1.1	1.0	0.2	2.9
SNDL	27.385°	85.799°	−224.0	1.2	49.4	1.2	26.1	3.9
TPLJ	27.352°	87.710°	0.4	1.2	2.6	1.1	−2.8	3.6
XZAR	29.269°	87.184°	−16.9	1.7	−15.1	1.9	−4.2	6.9
XZRK	29.249°	88.865°	−2.5	1.2	−0.8	1.3	−4.3	3.1
XZZB	29.680°	84.156°	−15.7	1.4	8.4	1.5	−4.7	4.5
XZZF	28.357°	86.941°	−21.2	1.4	−24.7	1.6	−4.3	5.4

距震中72.1 km的KKN4测站, 其东西向位移为−444.4±1.1 mm, 南北向位移为−1840.4±1.2 mm. 记录到同震位移的最远测站为位于震中东北距震中278.1 km的西藏昂仁站(XZAR). 在中国境内有3个测站观测到同震位移, 分别是西藏珠峰站(XZZF, 东西向位移为−24.7±1.6 mm, 南北向位移为−21.2±1.4 mm), 西藏仲巴站(XZZB, 东西向位移为8.4±1.5 mm, 南北向位移为−15.7±1.4 mm)和西藏昂仁站(XZAR, 东西向位移为−15.1±1.9 mm, 南北向位移为−16.9±1.7 mm). 同震位移的运动方向整体表现为南向运动, 但在震中东东南侧的RMTE测站只观测到了量值为8.9 mm的东向同震位移. 中国境内的3个测站, 除南向的位移之外, 位于震中西北侧的西藏仲巴站具有东向的运动分量, 位于震中东北侧的西藏昂仁和西藏珠峰站有西向的运动分量, 方向基本指向震中.

由于尼泊尔M_S 8.1级地震是一次低角度俯冲型地震, 因此获取地震引起的垂向变形场对于认识地震的发震机理具有重要的作用. 在95%的置信水平下, 在9个观测到水平向同震位移的测站当中, 有6个测站观测到明显的垂向同震位移, 可以看出, 相对同震位移水平分量的分布范围, 其垂直分量的分布范围较小. 垂向同震位移量值最大的测站也是水平向量值最大的KKN4测站, 其量值为1260.6±4.0 mm. 垂向同震位移上升的测站有3个, 分别是KKN4, NAST和SNDL, 这3个测站均位于震中的东南侧, 其同震位移的量值随着震中距增加迅速衰减, 在距离震中141.0 km的SNDL测站, 其量值仅为26.9±3.9 mm. 此外, 在中国境内距离震中最近的5个测站, 均观测到约4 mm的同震下降, 珠穆朗玛峰位于该空间范围内(图3). 虽然该量值在GPS垂直分量的误差范围之内, 但考虑到其在空间的一致性, 我们认为该结果是可信的. 这对于判定尼泊尔M_S 8.1级地震对珠穆朗玛峰的影响具有参考意义, 可以认为此次地震引起珠穆朗玛峰的沉降约为4 mm.

3 震源破裂滑动分布特征

利用本文计算的同震位移, 进一步反演震源破裂滑动分布. 参考USGS给出的初步震源机制解和震后24 h的余震分布(图4), 选取走向和倾角分别为295°和11°的平面断层, 断层面积为220 km×150 km, 以覆盖整个滑动区域. 采用有限断层反演方法, 将断层平面划分为11×10个子断层, 每个子块的面积为20 km

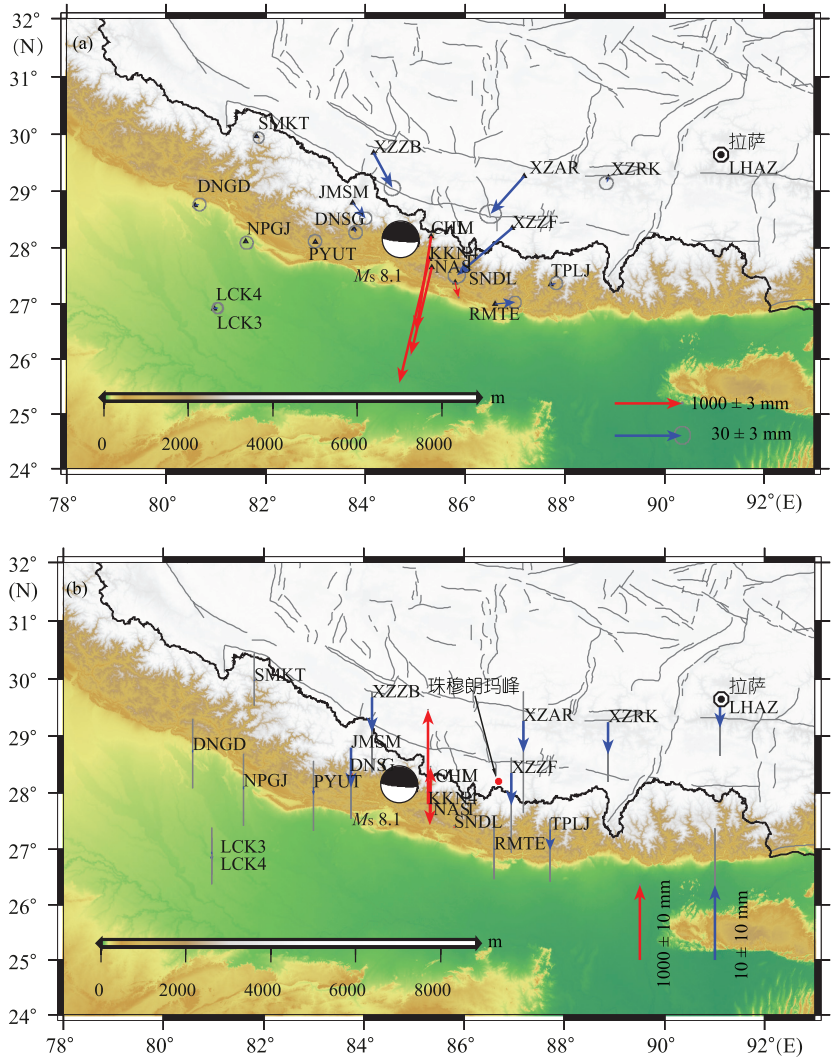


图 3 GPS 观测的尼泊尔 M_S 8.1 级地震同震位移. (a) 同震位移水平分量, (b) 同震位移垂直分量

Figure 3 GPS co-seismic displacements caused by the Nepal M_S 8.1 earthquake. (a) The horizontal component of co-seismic displacement; (b) the vertical component of co-seismic displacement

×15 km. 因反演中采用可变滑动方向, 所以实际计算的未知参数个数为11×10×2共220个. 为了防止断层面上的反向滑动, 以USGS给出的震源机制解108°的滑移角作为先验信息, 将可变的滑动方向约束在108°±45°范围内. 以狄里克雷边界条件和离散拉普拉斯算子构建平滑约束矩阵[21], 实现空间的平滑约束, 并利用Akaike[22]提出的基于熵最大原理的贝叶斯信息量(ABIC)确定最优平滑因子[23,24], 当ABIC最小时对应平滑因子最优, 此时确定的平滑因子为0.3293, 数据约束与先验信息的相对权重之比为1:0.3293^2. 根据选取的断层几何, 使用均匀半无限空间位错模型计算格林函数[25], 对断层面上的滑动量进行非负约束, 利用非负最小二乘方法[26]反演震源破裂面的滑动分布. 由GPS同震位移的中误差, 根据参数模型和误差传播定律, 计算出断层面滑动量的中误差, 发现滑动量较小的区域中误差较大, 滑动量较大的区域中误差较小, 中误差的量值均在0.3 m以下, 说明反演的滑动分布具有较好的精度.

图4给出了震源破裂面上的滑动分布在地表的投影, 黑色箭头指示断层面上的滑动方向和幅度, 颜色代表滑动量值, 考虑到GPS同震位移场的时间跨度, 该滑动分布为主震和2次7级以上强余震的综合结果. 从该图可以看出, 滑动的优势分布表现为NW-SE向的展布特征, 与喜马拉雅地震带的走向基本一致. 滑动分布主要集中在加德满都附近及其以北区域, 滑动量在加德满都市以北约25 km处达到最大, 幅值为

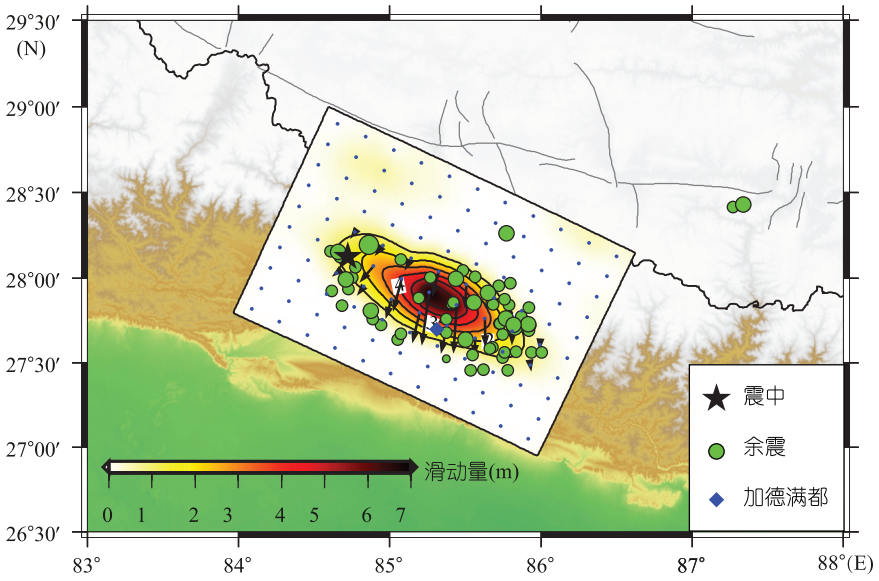


图 4 在地表投影的震源破裂滑动分布

Figure 4 The preferred source rupture slip distribution projected onto ground surface

6.84 m. 地震发生后, 一些机构在网络上公布了其反演的滑动分布, 美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)(http://aria.jpl.nasa.gov/node/43)利用远震波形数据、GPS和InSAR形变数据联合反演得到的最大滑移量超过6.0 m; 东京大学地震研究所(http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/?page_id=183&id=7487)利用远场体波反演得到的最大滑移量为4.3 m; USGS利用远场P波、远场SH波和长周期面波反演得到的最大滑移量为3.0~4.0 m. 就滑动分布的方向和范围而言, 本文与这些结果基本一致, 但本文滑动量远大于USGS和东京大学地震研究所的结果, 主要原因在于本文使用了近场的同震位移进行反演, 该同震位移是主震与两次强余震的综合结果. 此外, 本文结果比JPL给出的滑动分布也略大, 可能的原因是本文在反演破裂滑动分布时, 相比JPL增加了震中附近的SNDL测站的同震位移. 图4也给出了主震后24 h内, 震级大于2.5的余震分布. 可以看出, 余震主要分布在滑动量较大区域的外围, 符合板间地震的余震活动分布特征[27]. 利用本文滑动分布计算的地震矩为8.21×10^{20} N m, 对应的矩震级为M_W 7.9.

利用反演得到的滑动分布计算GPS测站的模型位移, 并与GPS观测结果对比(图5). 从图中可以看出, 断层滑动模型计算的地表同震位移与GPS观测值在水平和垂向分量都符合得很好, 尤其是在同震位移较大的近场测站二者基本一致. 在同震位移较小的远场测站二者存在差异, 其中最大差异出现在DNGD测站的垂向, 量值为10.7 mm. 考虑到差异的量值较小和测站局部可能的非弹性变形, 本文认为该破裂滑动模型很好地解释了GPS观测到的地表同震位移.

4 结论

震前GPS速度场和应变率场表明, 喜马拉雅地震带的平均挤压速率为15.94±1.82 mm/a, 但在其不同段存在差异性运动特征: 西段在挤压的同时伴随逆时针旋转, 中段以挤压为主, 东段在挤压的同时伴随顺时针旋转. 此次尼泊尔M_S 8.1级地震发生在速度场逆时针旋转和顺时针旋转的分界处. 喜马拉雅地震带呈现主压应变率为主的特征, 压缩区的宽度为200~300 km, 此次地震震中位置最大主压应变率的量值在整个喜马拉雅地震带并非最大.

GPS观测的水平向和垂向同震位移揭示了尼泊尔M_S 8.1级地震引起的地壳形变特征. 在发震断层上盘, 有9个测站观测到明显的水平向同震位移, 其中位于震中东南侧72.1 km处的KKN4测站观测到最大幅度的同震位移, 位于震中东北侧278.1 km处的西藏昂仁站(XZAR)是记录到同震位移的最远测站. 同震位移的运动方向整体表现为南向运动. 6个测站观测到明显的垂向同震位移, 其空间分布范围相对水平向的分布范围较小. 位于震中东南侧的3个测站垂

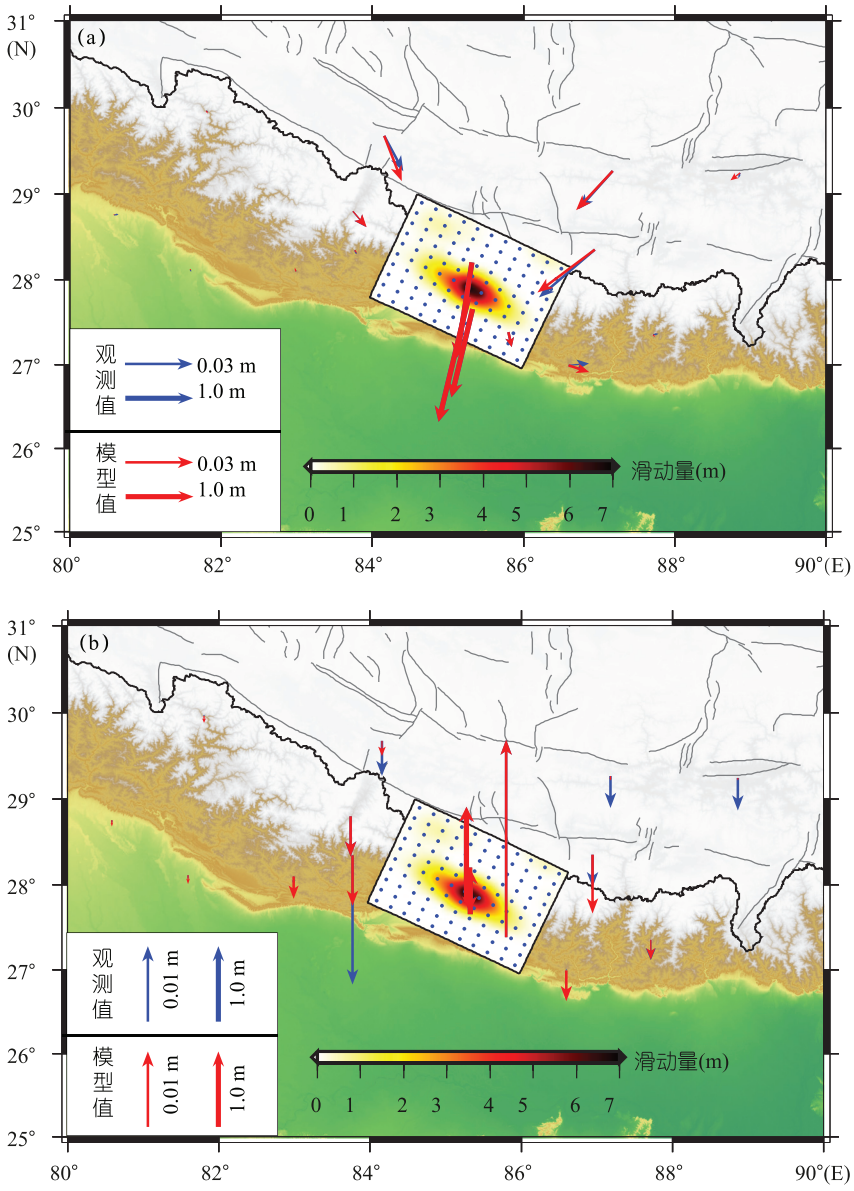


图 5 GPS 测站同震位移模型值与观测值对比. (a) 同震位移水平分量, (b) 同震位移垂直分量

Figure 5 The comparison between the modeled and observed co-seismic displacements. (a) The horizontal component of co-seismic displacement; (b) the vertical component of co-seismic displacement

向同震位移方向为上升, 其量值随着距震中距离增加而迅速衰减, 其余测站垂向同震位移均为下降. 在中国境内距离震中最近的5个测站均观测到约4 mm的下降, 表明此次地震造成珠穆朗玛峰的沉降量约为4 mm.

利用GPS同震位移反演的震源破裂面滑动分布主要集中在加德满都附近及其以北区域的下方, 在位于加德满都市以北约25 km处滑动量达到最大, 其量值为6.84 m, 该滑动模型能够很好地解释地表GPS观测到的同震位移. 依据GPS同震位移反演的震源破裂滑动分布计算的地震矩为8.21×10^{20} N m, 对应的矩震级为M_W 7.9.

致谢 中国大陆构造环境监测网络国家数据中心和UNAVCO提供了原始GPS观测数据, 图形采用GMT软件绘制, 顾国华研究员和两位审稿人提出了宝贵的意见和建议, 在此一并表示感谢.

参考文献

1 Li C, van der Hilst R D, Meltzer A S, et al. Subduction of Indian lithosphere beneath the Tibetau Plateau and Burma. Earth Planet Sci Lett, 2008, 274: 157–168

2 Ader T, Avouac J P, Liu-Zeng J, et al. Convergence rate across the Nepal Himalaya and interseismic coupling on the Main Himalayan Thrust: Implications for seismic hazard. J Geophys Res, 2012, 117: B04403

3 Ambraseys N, Bilham R. A note on the Kangra M_S =7.8 earthquake of 4 April 1905. Curr Sci, 2000, 79: 45–50

4 Feldl N, Bilham R. Great Himalayan earthquakes and the Tibetan Plateau. Nature, 2006, 444: 165–170

5 Vera S P, Gaspar M, Anne S, et al. Imaging the Indian subcontinent beneath the Himalaya. Nature, 2005, 435: 1222–1225

6 Bilham R, Ambraseys N. Apparent Himalayan slip deficit from the summation of seismic moments for Himalayan earthquakes, 1500–2000. Curr Sci, 2005, 88: 1658–1663

7 Herring T A, King R W, McClusky S C. GAMIT Reference Manual. GPS Analysis at MIT. Release 10.4. Massachussetts Institute Technology, 2010, http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/index.htm

8 Herring T A, King R W, McClusky S C. GLOBK Reference Manual. Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program. Release 10.4. Massachussetts Institute Technology, 2010, http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/index.htm

9 Williams S. Offsets in global positioning system time series. J Geophys Res, 2003, 108: 211–227

10 Meng G J, Su X N, Wu W W, et al. Heterogeneous strain regime in the eastern margin of Tibetan Plateau and its tectonic implications. Earthq Sci, 2015, 28: 1–10

11 Banerjee P, Burgmann R, Nagarajan B, et al. Intraplate deformation of the Indian subcontinent. Geophys Res Lett, 2008, 35: L18301, doi:10.1029/2008GL035468

12 Gan W J, Zhang P Z, Shen Z K, et al. Present-day crustal deformation within the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements. J Geophys Res, 2007, 112: B08416

13 Jade S, Mukul M, Gaur V K, et al. Contemporary deformation in the Kashmir-Himachal, Garhwal and Kumaon Himalaya: Significant insights from 1995–2008 GPS time series. J Geod, 2014, 88: 539–557

14 Jouanne F, Mugnier J L, Gamond J F, et al. Current shortening across the Himalayas of Nepal. Geophys J Int, 2004, 157: 1–14

15 Liang S, Gan W J, Shen C Z, et al. Three-dimensional velocity field of present-day crustal motion of the Tibetan Plateau derived from GPS measurements. J Geophys Res, 2013, 118: 5722–5732

16 Ma Z J, Chen X L, Ye S H, et al. Contemporary crustal movement of continental China obtained by global positioning system (GPS) measurements. Chin Sci Bull, 2001, 46: 1552–1554 [马宗晋, 陈鑫连, 叶叔华, 等. 中国大陆区现今地壳运动的 GPS 研究. 科学通报, 2001, 46: 1118–1121]

17 Tape C, Pablo M, Mark S, et al. Multiscale estimation of GPS velocity fields. Geophys J Int, 2009, 179: 945–971

18 Wang W, Wang D J, Zhao B, et al. Horizontal crustal deformation in Chinese Mainland analyzed by CMONOC GPS data from 2009–2013. Geodesy Geodyn, 2014, 5: 41–45

19 Wang M, Zhang P Z, Shen Z K, et al. Far-field coseismic displacements associated with the great Sumatra earthquakes of December 26, 2004 and March 29, 2005 constrained by Global Positioning System. Chin Sci Bull, 2006, 51: 3460–3466 [王敏, 张培震, 沈正康, 等. 全球定位系统(GPS)测定的印尼苏门达腊巨震的远场同震地表位移. 科学通报, 2006, 51: 365–368]

20 Wu Y Q, Jiang Z S, Wang M, et al. Preliminary results pertaining to coseismic displacement and preseismic strain accumulation of the Lushan M_S7.0 earthquake, as reflected by GPS surveying. Chin Sci Bull, 2013, 58: 1771–1775 [武艳强, 江在森, 王敏, 等. GPS 监测的芦山 7.0 级地震前应变积累及同震位移场初步结果. 科学通报, 2013, 58: 1910–1916]

21 Zhou X, Cambiotti G, Sun W, et al. The coseismic slip distribution of a shallow subduction fault constrained by prior information: The example of 2011 Tohoku (M_W 9.0) megathrust earthquake. Geophys J Int, 2014, 199: 981–995

22 Akaike H. Likelihood and the Bayes procedure. Trabajos De Estadistica Y De Investigacion Operativa, 1980, 31: 143–166

23 Yabuki T, Matsu'Ura M. Geodetic data inversion using a Bayesian information criterion for spatial distribution of fault slip. Geophys J Int, 1992, 109: 363–375

24 Wang Y B, Jin H L, Fu G Y, et al. Estimation of co-seismic slip distribution of the 2011 Tohoku-Oki M_W9.0 earthquake using Yabuki & Matsu'ura's inverse method (in Chinese). Chin J Geophys, 2012, 55: 2551–2560 [王阅兵, 金红林, 付广裕, 等. 利用 Yabuki & Matsu'ura 反演方法计算 2011 年日本东北地区太平洋海域 M_W9.0 级地震同震滑动分布. 地球物理学报, 2012, 55: 2551–2560]

25 Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. Bull Seismol Soc Am, 1985, 75: 1135–1154

26 Lawson C L, Hanson R J. Solving least squares problems, volume 15. Inter J Comput Math, 1995, 77: 105–116

27 Ozawa S, Nishimura T, Munekane H, et al. Preceding, coseismic, and postseismic slips of the 2011 Tohoku earthquake, Japan. J Geophys Res, 2012, 117: B07404

Pre-seismic strain accumulation and co-seismic deformation of the 2015 Nepal M_S 8.1 earthquake observed by GPS

SU XiaoNing[1,2], WANG Zhen[3], MENG GuoJie[1], XU WanZhen[1] & REN JinWei[1]

[1] *Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China;*
[2] *College of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China;*
[3] *Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Tokyo 113-0032, Japan*

On April 25th, 2015, an M_S 8.1 earthquake hit Nepal on the Himalayan seismic zone at the junction of Indian Plate and Eurasian Plate. The pre-earthquake GPS velocity and strain rate fields show that the Himalayan seismic zone was characterized by compression of 15.94±1.82 mm/a and contrast activities in its diverse segmentations. This earthquake happened at the dividing region of the clockwise and counterclockwise rotation rate, where the largest principal compressive strain rate is not highest in the whole Himalayan seismic zone. The coseismic displacements registered by GPS depicted the major feature of crust deformation caused by the M_S 8.1 earthquake. We observed noticeable horizontal and vertical displacements in nine and six GPS stations, respectively. The horizontal coseismic displacements were generally directed southward, whereas vertical deformation showed a site-specific pattern. The 3 stations south-east to the epicenter captured the vertical coseismic displacement moving upward, while the stations in other quadrants recorded downward movement. Within Chinese borderland, the 5 stations closest to the epicenter recorded vertical coseismic displacements of about ~4 mm. The faulting slip distribution was inverted by the approach of non-negative least squares with the coseismic displacements. The result showed that the largest faulting slip was 6.84 m, and the relatively large slips were distributed in subsurface near Kathmandu and its neighbouring area north to it. This might be one of the major reasons for the severe destruction in the Kathmandu region. This slip distribution model well explained the coseismic displacements observed by GPS. The slip model gave a seismic moment of 8.21×10^{20} N m, with a moment magnitude of M_w 7.9.

Nepal M_S 8.1 earthquake, GPS strain rate, co-seismic displacement, slip distribution, Everest

doi: 10.1360/N972015-00534