

doi:10.3969/j.issn.0253-4967.2017.04.006

2015 年尼泊尔强震序列导致的喜马拉雅山峰位移场

万永革¹⁾ 靳志同^{1,2)} 崔华伟¹⁾黄骥超¹⁾ 李 瑶²⁾ 李 祥¹⁾

1) 防灾科技学院, 河北三河 065201

2) 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

摘 要 基于 2015 年尼泊尔地震序列的破裂模型及均匀弹性半空间模型, 计算了该地震序列导致的喜马拉雅山脉及邻区的位移场。结果表明: 尼泊尔地震序列所导致的位移场呈南北两侧水平分量向震中会聚的分布形式, 水平位移最大达 871~962mm, 并且距震中越远水平位移量越小, 但震中南侧的水平位移量随震中距衰减更快。震中北侧出现了明显沉降, 最大沉降量达 376~474mm, 大部分震中及以南区域出现了明显隆升, 最大值达 626~677mm。文中还估计了该地震序列导致的周围喜马拉雅山脉部分山峰的位移场, 结果表明希夏邦马峰的位移最大, 水平位移达 393mm, 下沉 36mm; 世界最高峰珠穆朗玛峰近 S 向水平移动 36mm, 下沉 9mm; 其他山峰的位移因与到尼泊尔地震序列的震中距离和方位的不同而不同。

关键词 2015 年尼泊尔地震序列 震源破裂模型 位移场 珠穆朗玛峰

中图分类号: P315.2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4967(2017)04-0699-13

0 引言

2015 年 4 月 25 日尼泊尔发生 M_w 7.9 大地震, 根据中国地震台网中心测定, 该地震震中位于 28.2°N , 84.7°E , 震源深度约 20km。该地震发生在印度板块和欧亚板块碰撞带的逆冲断层上, 距尼泊尔首都加德满都约 80km。震后半个小时和 1d 之后, 相继发生了 M_w 6.7、 M_w 6.8 强余震, 再次加重了该地区的人员伤亡和财产损失。5 月 12 日, 该地区又有 2 次 M_w 7.2 和 M_w 6.2 的强余震发生 (<http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>)。4 月 25 日的 2 次大地震后, 中国西藏日喀则地区定日县发生了 M_w 5.9 地震, 聂拉木县发生了 M_w 5.0 地震 (http://www.csi.ac.cn/manage/eqDown/31_RollingTop/Ball.html, 2015 年 5 月 20 日查询), 对中国西藏地区造成了一定的人员伤亡和财产损失。美国地质调查局 (United States Geological Survey, 简称 USGS) 采用全球数字地震台网记录的远震体波和长周期面波波数据快速给出了 2 次 $M_w > 7$ 的地震的破裂分布 (Hayes, 2015a, b)。张勇等 (2015a, b) 采用长周期体波观测也给出了这 2 个大地震的破裂分布。苏小宁等 (2015) 采用第 1 次大地震周围的 GPS 资料反演了主震的破裂分布, 单新建等 (2015) 联合采用 InSAR 和 GPS 数据反演了主震的断层特征和破裂分布。De-

[收稿日期] 2016-10-08 收稿, 2017-04-24 改回。

[基金项目] 国家自然科学基金 (NSFC41674055) 与河北省地震科技星火计划 (DZ20170109001) 共同资助。

nolle 等(2015)根据地震波形相关和能量分析得到主震中极少高频能量和较大地震矩释放,表明其发生在相对平滑或较为润滑的喜马拉雅主逆冲断裂(MHT)上。Bai 等(2016)采用多尺度双差精定位技术确证了主震发生在倾角较缓的喜马拉雅主逆冲断裂(MHT)上,并且周围大部分余震发生在倾角较陡的次喜马拉雅断裂上。张广伟等(2015)求解了该地震序列的中等强度地震的震源机制,表明主震发生对周围不同地区产生了不同的应力影响。盛书中等(2015)和万永革等(2015)详细计算了该地震产生的库伦破裂应力变化对周围造成的影响。

喜马拉雅山脉的珠穆朗玛峰是世界第一高峰,在公元 1717 年(康熙 56 年)出版的皇舆全览图中已有珠穆朗玛的记载。作为世界最高峰,它的海拔高程数据历来为世界各国关注。1847—2005 年的百余年间,人类测量珠峰高程约 10 余次,对于珠穆朗玛峰高程的求证过程标志着国家科学技术的发展水平。1975 年,中国发布的珠峰高程为 8848.13m(陈俊勇, 1975; 朱亮, 1976)。30a 后,国家测绘局应用 3S 及现代地球物理技术对珠峰高程进行重新测量,获得珠穆朗玛峰峰顶岩石面的海拔高程数据为 8844.43m(陈俊勇等, 2006)。除了珠穆朗玛峰,在中国和尼泊尔交界的喜马拉雅山脉还有很多世界著名的山峰(表 2),这些山峰的高程及水平位移也是地球科学家所关心的问题。

地球时刻处于变动之中,特别是位于印度板块与欧亚板块碰撞带交接处的珠穆朗玛峰及其周围的世界著名山峰。从以翘起为主的新构造运动算起,珠穆朗玛峰的形成也只是迄今 3~4Ma 的地质事件(杨理华等, 1974; 杨志强等, 1993)。很多研究者从地质(杨理华等, 1974; 赵希涛, 1975)、大地测量(王文颖等, 1993; 陈俊勇等, 1994, 1996)等角度研究得到珠峰在不断变动的结论。最近精确的 GPS 资料研究表明,印度板块和欧亚板块的会聚速率在青藏高原中南部约为 30mm/a,而在喜马拉雅南坡至恒河平原的垂直位移表现出 <3mm/a 的强烈相对下沉,在喜马拉雅山北坡至雅鲁藏布江一带, GPS 测站有 0~2mm/a 的升高(Liang *et al.*, 2013),这些均表明珠峰及其附近山峰的高度会发生相应的变化。

2015 年尼泊尔地震序列的发生对这些山峰的高程和水平位置产生的影响是本文要研究的问题。该研究对于理解青藏高原南部的地形长期变动及其动力来源有一定的意义。

1 变形场源及计算方法

本文拟通过计算 2015 年尼泊尔地震序列造成的地面位移场,研究该地震序列对珠穆朗玛峰等一系列山峰的影响。2015 年 4 月 25 日尼泊尔 M_w 7.9 地震后,发生了一系列震级较大的余震。从全球矩心矩张量目录(www.globalCMT.org)网站上找到 6 次强震(表 1, 图 1),另外,4 月 25 日尼泊尔 M_w 7.9 主震发生后,中国西藏日喀则地区的定日县发生 M_w 5.9 地震,聂拉木县发生 M_w 5.0 地震。地震发生后,中国地震台网快速给出了中国西藏这 2 次地震的震源位置和震源机制(<http://www.csi.ac.cn>, 5 月 20 日查询)。这 2 次地震虽然没有在全球矩心矩张量目录(www.globalCMT.org)网站上出现,但它们发生在珠穆朗玛峰附近,本文在计算地表位移场时也把这 2 个地震考虑进来(表 1)。Hayes(2015a, b)、张勇等(2015a, b)给出了 2015 年尼泊尔地震序列中的 4 月 25 日 M_w 7.9 地震和 5 月 12 日 M_w 7.2 地震的断层面及其破裂分布。虽然苏小宁等(2015)和单新建等(2015)也给出了第 1 次地震的破裂分布,但限于采用 GPS 和/或 InSAR 可能不能干净扣除余震和震后形变的影响,本次研究采用 Hayes(2015a, b)和张勇等(2015a, b)的利用远震地震波反演得到的破裂分布结果。Hayes(2015a)给出的 4 月 25 日

表 1 2015 年尼泊尔强震序列参数表

Table 1 The source parameters of the 2015 Nepal earthquake sequence

| 序号 | 日期 (月-日) | 时间 (UTC) | 经度/纬度 /(°) | 深度 /km | 震级 M_w | 地震矩 /N.m | 长度/宽度 /km | 逆冲 滑动量 /cm | 左旋 滑动量 /cm | 走向/倾角/滑动角 /(°) | 备注 |
|----|-------------|-------------|---------------|-----------|-------------|-----------------------|--------------|------------------|------------------|-------------------|------|
| 1 | 04-25 | 06:11 | 85.37/27.77 | 12 | 7.9 | 7.76×10^{20} | ① | ① | ① | ① | 主震 |
| 2 | 04-25 | 06:45 | 84.88/27.92 | 15.8 | 6.7 | 1.6×10^{19} | 29.2/13.7 | 19.39 | -20.08 | 314/14/136 | 余震 |
| 3 | 04-25 | 09:17 | 87.3/28.4 | 16 | 5.9 | 9.81×10^{17} | 11.7/ 8.4 | -12.07 | 15.45 | 23/18/-38 | 定日县 |
| 4 | 04-25 | 17:42 | 85.9/28.2 | 12 | 5.0 | 4.28×10^{17} | 4.2/4.1 | -77.88 | 31.47 | 19/51/-68 | 聂拉木县 |
| 5 | 04-26 | 07:09 | 85.96/27.56 | 17.4 | 6.8 | 1.76×10^{19} | 33.4/15.1 | 26.21 | -8.52 | 296/10/108 | 余震 |
| 6 | 05-12 | 07:05 | 86.10/27.56 | 12.0 | 7.2 | 9×10^{19} | ② | ② | ② | ② | 最大余震 |
| 7 | 05-12 | 07:36 | 86.31/27.39 | 18.1 | 6.2 | 2.29×10^{18} | 15.0/8.6 | 24.65 | -16.01 | 303/23/123 | 余震 |
| 8 | 05-16 | 11:34 | 86.21/27.38 | 12 | 5.4 | 1.57×10^{17} | 5.2/4.0 | 20.45 | -14.86 | 318/24/126 | 余震 |

注 ①Hayes, 2015a; 张勇等, 2015b; ②Hayes, 2015b; 张勇等, 2015a。

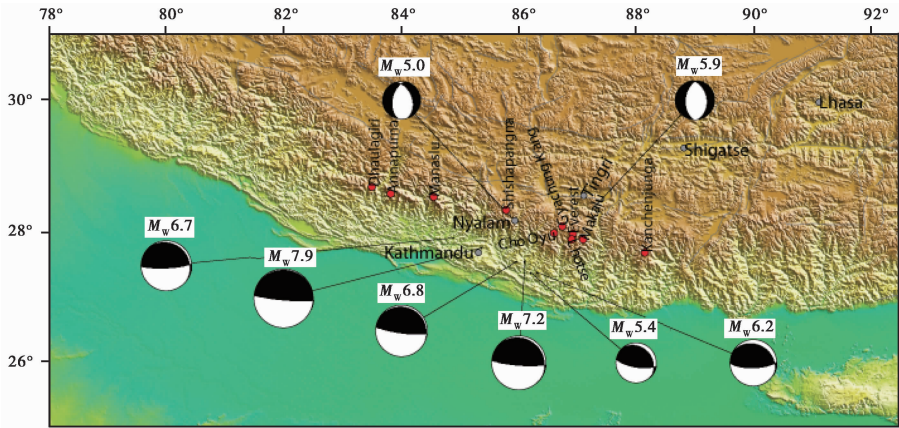


图 1 2015 年地震发生位置和周围山峰位置

Fig. 1 Location of the 2015 Nepal earthquake sequence and its surrounding peaks of the Himalaya.

膨胀区填充为黑色的海滩球表示 2015 年尼泊尔地震序列; 红色实心圆圈为地震序列周围的喜马拉雅山脉主要山峰; 灰色实心圆圈为当地城市

地震的破裂面模型由 11×11 个子断层组成, 每个子断层长 20km, 宽 15km, 走向 295° , 倾角 10° , 最大滑动量为 3.1m, 大部分破裂集中在震源以西的位置。而张勇等(2015b)给出的该地震破裂面模型由 19×11 个子断层组成, 每个子断层长 20km, 宽 20km, 走向 301° , 倾角 11° , 最大滑动量为 2m, 大部分破裂集中在离震源点很近的位置。Hayes(2015b)给出的 5 月 12 日地震的破裂面模型由 25×21 个子断层组成, 每个子断层长 5km, 宽 3.9km, 走向 305° , 倾角 9° , 最大滑动量为 3.3m, 大部分破裂集中在震源中心。而张勇等(2015a)给出的该地震破裂面模型由 20×15 个子断层组成, 每个子断层长 5km, 宽 5km, 走向 297° , 倾角 10° , 最大滑动量为 6.4m, 大部分破裂也集中在震源中心的位置。本研究采用他们给出的结果, 采用弹性半空间模型分别进行计算, 研究不同地震破裂模型对结果的影响。对于序列中没有给出破裂分布的地震, 使用下面的方法选定发震断层, 并估算出其发震断层参数: 为避免系统性偏差, 本研究采用全球矩心矩张量的矩心位置和与喜马拉雅主山前逆冲断裂较为一致的节面作为断层, 研究不同地震破裂模型对结果的影响。

对于中国西藏定日县和聂拉木县的 2 个地震, 选择正断层分量较大的节面作为断层面, 这是由于这里发生的地震均为拉张性地震 (Holt *et al.*, 1995)。断层面长度、宽度采用 Wells 等 (1994) 给出的统计公式进行估计, 滑动量采用该地震的地震矩、断层面长度、宽度和 30GPa 的剪切模量估计得到, 具体参数见表 1。

Okada (1992) 总结了前人 (Mindlin, 1936; Chinnery, 1961; Press, 1965) 的地震位错在弹性半无限空间中产生位移场的研究成果, 并有效地避免了某些特定观测点的奇异性, 使得位移场计算更为容易。本研究采用 Okada (1992) 给出的算法计算地震有限断层面滑动在地表产生的位移场。

其算法简述如下:

首先讨论弹性半空间集中力导致的位移场。在 (ξ_1, ξ_2, ξ_3) 点的 j 方向的单力 (大小为 F) 在 (x_1, x_2, x_3) 点的 i 方向上产生的位移 $G_{ij}(x_1, x_2, x_3; \xi_1, \xi_2, \xi_3)$ 可写成式 (1) (Mindlin, 1936; Press, 1965):

$$G_{ij}(x_1, x_2, x_3; \xi_1, \xi_2, \xi_3) = u_{iA}^{(j)}(x_1, x_2, -x_3) - u_{iA}^{(j)}(x_1, x_2, x_3) + u_{iB}^{(j)}(x_1, x_2, x_3) + x_3 u_{iC}^{(j)}(x_1, x_2, x_3) \quad (1)$$

式 (1) 中:

$$u_{iA}^{(j)} = \frac{F}{8\pi\mu} \left\{ (2 - \alpha) \frac{\delta_{ij}}{R} + \alpha \frac{R_i R_j}{R^3} \right\} \quad (2)$$

$$u_{iB}^{(j)} = \frac{F}{4\pi\mu} \left\{ \frac{\delta_{ij}}{R} + \frac{R_i R_j}{R^3} + \frac{1 - \alpha}{\alpha} \left[\frac{\delta_{ij}}{R + R_3} + \frac{R_i \delta_{j3} - R_j \delta_{i3} (1 - \delta_{j3})}{R(R + R_3)} - \frac{R_i R_j}{R(R + R_3)^2} (1 - \delta_{i3})(1 - \delta_{j3}) \right] \right\} \quad (3)$$

$$u_{iC}^{(j)} = \frac{F}{4\pi\mu} (1 - 2\delta_{i3}) \left\{ (2 - \alpha) \frac{R_i \delta_{j3} - R_j \delta_{i3}}{R^3} + \alpha \xi_3 \left[\frac{\delta_{ij}}{R^3} - \frac{3R_i R_j}{R^5} \right] \right\} \quad (4)$$

$$\alpha = (\lambda + \mu) / (\lambda + 2\mu); R_1 = x_1 - \xi_1, R_2 = x_2 - \xi_2$$

$$R_3 = -x_3 - \xi_3, R^2 = R_1^2 + R_2^2 + R_3^2 \quad (5)$$

式 (1) — (5) 中, δ_{ij} 为 Kronecker 符号, λ 为拉梅常数, μ 为剪切模量, 本研究将介质看作 Poisson 体, 2 个拉梅系数均取 3.0×10^{10} Pa。

式 (1) 中 “=” 右侧的第 1 项 $u_{iA}^{(j)}(x_1, x_2, -x_3)$ 是 Somigliana 张量, 表示在无限介质中位于 (ξ_1, ξ_2, ξ_3) 的单力产生的位移场 (Love, 1927)。第 2 项 $u_{iA}^{(j)}(x_1, x_2, x_3)$ 也像 1 个 Somigliana 张量, 这一项对应于位于 $(\xi_1, \xi_2, -\xi_3)$ 的虚点源单力在无限介质中的贡献 (图 2), 它与第 1 项结合后使得地表位移抵消。第 3 项 $u_{iB}^{(j)}(x_1, x_2, x_3)$ 和第 4 项 $u_{iC}^{(j)}(x_1, x_2, x_3)$ 是与深度有关的项。当置 x_3 为零时, 第 1 项和第 2 项互相抵消, 并且第 4 项也为零, 余下的项 $u_{iB}^{(j)}(x_1, x_2, 0)$ 为点源在半空间介质表面所产生的位移场。因此, 式 (1) 描述的点源在半空间无限介质中产生的位移场包括 2 个无限介质项 (A 部分),

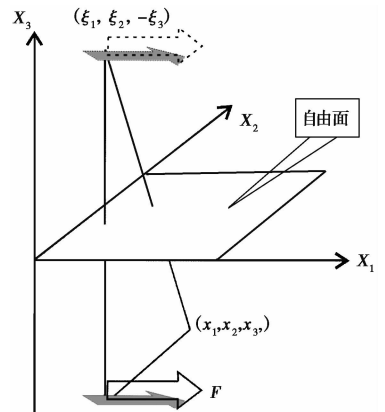


图 2 计算单力点源在介质中产生位移和应变采用的坐标系 (由 Okada, 1992 修改)
Fig. 2 Coordinate system of the displacement and strain generated by single force
(Revised from Okada, 1992).

与表面变形有关的项(B部分)和与深度相乘的项(C部分)。

为了得到由应变核表示的位移场,把式(1)对 ξ_k 求导,表示如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i^{(j)}}{\partial \xi_k}(x_1, x_2, x_3) &= \frac{\partial u_{iA}^{(j)}}{\partial \xi_k}(x_1, x_2, -x_3) - \frac{\partial u_{iA}^{(j)}}{\partial \xi_k}(x_1, x_2, x_3) + \\ &\frac{\partial u_{iB}^{(j)}}{\partial \xi_k}(x_1, x_2, x_3) + x_3 \frac{\partial u_{iC}^{(j)}}{\partial \xi_k}(x_1, x_2, x_3) \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)中,右边各项可由式(2)–(4)对 ξ_k 求导得到,写成式(7)–(9):

$$\frac{\partial u_{iA}^{(j)}}{\partial \xi_k} = \frac{F}{8\pi\mu} \left\{ (2 - \alpha) \frac{R_k}{R^3} \delta_{ij} - \alpha \frac{R_i \delta_{jk} + R_j \delta_{ik}}{R^3} + 3\alpha \frac{R_i R_j R_k}{R^5} \right\} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_{iB}^{(j)}}{\partial \xi_k} &= \frac{F}{4\pi\mu} \left\{ -\frac{R_i \delta_{jk} + R_j \delta_{ik} - R_k \delta_{ij}}{R^3} + \frac{3R_i R_j R_k}{R^5} + \frac{1 - \alpha}{\alpha} \left[\frac{\delta_{3k} R + R_k}{R(R + R_3)} \delta_{ij} - \frac{\delta_{ik} \delta_{j3} - \delta_{jk} \delta_{i3} (1 - \delta_{j3})}{R(R + R_3)} + \right. \right. \\ &\left. \left[R_i \delta_{j3} - R_j \delta_{i3} (1 - \delta_{j3}) \right] \frac{\delta_{3k} R^2 + R_k (2R + R_3)}{R^3 (R + R_3)^2} + \right. \\ &\left. \left[\frac{R_i \delta_{jk} + R_j \delta_{ik}}{R(R + R_3)^2} - R_i R_j \frac{2\delta_{3k} R^2 + R_k (3R + R_3)}{R^3 (R + R_3)^3} \right] (1 - \delta_{i3}) (1 - \delta_{j3}) \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_{iC}^{(j)}}{\partial \xi_k} &= \frac{F}{4\pi\mu} (1 - 2\delta_{i3}) \left\{ (2 - \alpha) \left[\frac{\delta_{jk} \delta_{i3} - \delta_{ik} \delta_{j3}}{R^3} + \frac{3R_k (R_i \delta_{j3} - R_j \delta_{i3})}{R^5} \right] + \right. \\ &\left. \alpha \left[\frac{\delta_{ij}}{R^3} - \frac{3R_i R_j}{R^5} \right] \delta_{3k} + 3\alpha \xi_3 \left[\frac{R_i \delta_{jk} + R_j \delta_{ik} + R_k \delta_{ij}}{R^5} - \frac{5R_i R_j R_k}{R^7} \right] \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

现在将式(1)、(6)用于实际问题中,考虑如图2所示的2个不同的位错点源,位错点源置于 (x, y, z) 坐标系中的 $(0, 0, -c)$ 处,这里 x 轴与断层的走向平行,走滑断层左旋为正,倾滑断层逆断层为正。

在各向同性介质中的位错面 Σ 上,位错 $\Delta u_j(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ 产生的位移场为(Steketee, 1958)

$$u_i = \frac{1}{F} \iint_{\Sigma} \Delta u_j \left[\lambda \delta_{jk} \frac{\partial u_i^{(n)}}{\partial \xi_n} + \mu \left(\frac{\partial u_i^{(j)}}{\partial \xi_k} + \frac{\partial u_i^{(k)}}{\partial \xi_j} \right) \right] v_k d\Sigma \quad (10)$$

这里用了爱因斯坦求和约定, v_k 为断层面 $d\Sigma$ 法向的方向余弦。若断层的倾角为 δ_d , 假定断层的走向为 x 方向,向上为 z 方向,在右手坐标系中断层的法向为 $(0, -\sin \delta_d, \cos \delta_d)$ 。基于式(10)及体力等价关系(Okada, 1992),对应于每一点源的内部位移场 u^0 可以由应变核的组合表示为式(11)、(12)。

地震矩为 M_0 的走滑断层在介质中产生的位移为

$$u^0 = \frac{M_0}{F} \left[-\left(\frac{\partial u^{(1)}}{\partial \xi_2} + \frac{\partial u^{(2)}}{\partial \xi_1} \right) \sin \delta_d + \left(\frac{\partial u^{(1)}}{\partial \xi_3} + \frac{\partial u^{(3)}}{\partial \xi_1} \right) \cos \delta_d \right] \quad (11)$$

地震矩为 M_0 的倾滑断层在介质中产生的位移为

$$u^0 = \frac{M_0}{F} \left[\left(\frac{\partial u^{(2)}}{\partial \xi_3} + \frac{\partial u^{(3)}}{\partial \xi_2} \right) \cos 2\delta_d + \left(\frac{\partial u^{(3)}}{\partial \xi_3} - \frac{\partial u^{(2)}}{\partial \xi_2} \right) \sin 2\delta_d \right] \quad (12)$$

这样可得到地震点源断层错动在弹性介质中产生的位移场。

其次,假设地震不是点源而是断层走向长度为 L , 宽度为 W 有限断层面,则介质内部的位

移场可以将 $x - \xi'$, $y - \eta' \cos \delta_d$ 和 $c - \eta' \sin \delta_d$ 代替前面公式中的 x , y 和 c , 通过计算下列积分得到

$$\int_0^L d\xi' \int_0^W d\eta' \quad (13)$$

按照 Sato 等(1974)的方法, 如果将积分变量 ξ' , η' 替换为 ξ , η , 积分将是很方便的。替换公式为

$$\begin{cases} x - \xi' = \xi \\ p - \eta' = \eta \end{cases} \quad (14)$$

式(14)中, p 与点源相同, 也是 $p = y \cos \delta_d + d \sin \delta_d$, 我们需要替换点源公式中的 x , y , d , p 为 ξ , $\eta \cos \delta_d + q \sin \delta_d$, $\eta \sin \delta_d - q \cos \delta_d$ 和 η , 使 z 和 q 保持不变。在这种情况下, 式(13)可表示为

$$\int_x^{x-L} d\xi \int_p^{p-W} d\eta \quad (15)$$

将点源产生的位移场代入式(15), 可得出矩形源所产生的位移场。具体公式参看 Okada (1992)的文章。

这里我们考虑多个地震的影响, 并且 $M_w 7.9$ 地震和 $M_w 7.2$ 地震按照滑动分布模型 (Hayes, 2015a, b; 张勇, 2015a, b) 有多个子矩形源, 我们将所有子矩形源的贡献叠加得到地表产生的总位移场。

2 2015 年尼泊尔地震序列产生的位移场

按照上节所列的震源参数和计算方法, 我们计算上述 8 次地震在周围区域产生的位移场。其中, 对于 4 月 25 日 $M_w 7.9$ 地震和 5 月 12 日 $M_w 7.2$ 地震, 由于 Hayes (2015a, b) 和张勇等 (2015a, b) 分别采用地震波资料给出了这 2 个地震的破裂分布, 故本文分别采用他们的结果给出该地震序列产生的位移场(图 3)。需要注意的是, 这里的位移场是该地震序列前后同一点的坐标位置之差, 也就是地震序列前后的位置变动。为了使得图 3 能看清远处的位移方向和大小, 这里将振幅按对数表示(不显示振幅 $< 1\text{mm}$ 的位移量), 分解到 EW 和 SN 方向分量, 再绘制其水平运动矢量。从图 3 可以看出, 采用 Hayes (2015a, b) 和张勇等 (2015a, b) 给出的模型计算得到的位移场具有类似的特征: 地震序列南部和北部物质分别朝震中位置向 N、向 S 会聚, 在震中处的最大水平位移量达 962mm (Hayes, 2015a, b) 和 871mm (张勇等, 2015a, b), 并且距震中越远水平位移量越小, 但震中南侧的水平位移随震中距衰减更快, 这是由于断层为倾向 NNE 的低倾角逆冲断层, 上盘更容易产生较大水平位移所致。震中东西两侧的水平位移在震中附近略微出现向外扩展的位移分量, 东侧向外扩展的位移更加明显。

从垂直位移场来看, 震中北侧均出现了明显的沉降, 最大沉降量达 376mm (Hayes, 2015a, b) 和 474mm (张勇等, 2015a, b), 并且沉降向 EW 方向扩展。和上述表示方式一样, 这里的垂直位移的大小也采用垂直位移振幅的对数来表示隆起和沉降。大部分震源所在位置及其南部区域出现了明显的隆升, 最大值达 677mm (Hayes, 2015a, b) 和 626mm (张勇等, 2015a, b)。并且距震中 250km 的北部也出现了 mm 量级的隆升。本研究采用 Hayes (2015a, b) 与张勇等 (2015a, b) 给出的模型计算的位移场的不同之处在于: 张勇等 (2015a, b) 的模型给出的震中南侧的隆升与沉降的界限不太规则, 并且震源北侧 250km 处的隆升位移值偏小, 这是该模型震源位置普遍较浅所致。

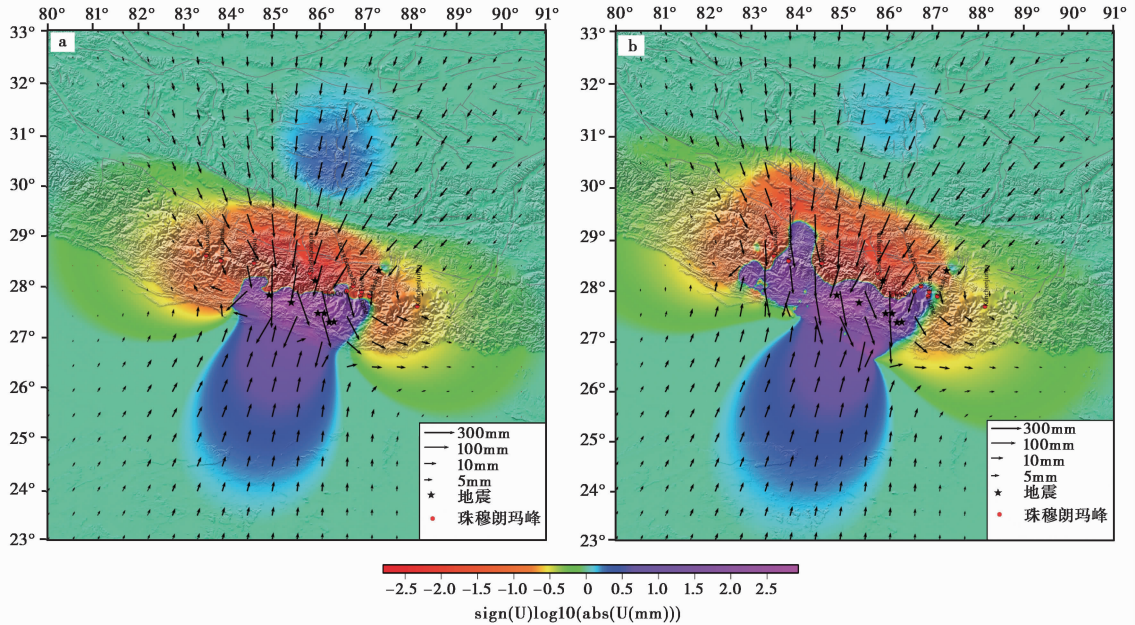


图3 表1中所列的2015年尼泊尔地震序列的8个地震产生的位移场

Fig. 3 The displacement generated by the 8 earthquakes of the 2015 Nepal earthquake sequence tabulated in Table 1.

箭头表示水平位移场, 颜色表示垂直位移场; a M_w 7.9 和 M_w 7.2 地震破裂分布采用 Hayes (2015a, b) 模型,

b M_w 7.9 和 M_w 7.2 地震破裂分布采用张勇等 (2015a, b) 模型

3 尼泊尔地震序列导致的附近喜马拉雅山峰的位移

上节采用不同的模型计算了2015年尼泊尔地震序列在周围产生的位移场。本节我们侧重讨论该地震序列对周围喜马拉雅山脉主要山峰的影响。同样按照上节的方式, 根据全球矩心矩张量目录给出的震源机制, 分别采用 Hayes (2015a, b) 和张勇等 (2015a, b) 给出的大地震破裂模型计算出该地震序列导致的周围喜马拉雅山脉主要山峰的位移 (表2)。分别计算2种模型下, 把2次大地震加入地震序列后得到的位移, 再把得到的2种位移结果平均, 即可得到考虑2种模型的综合结果 (表2, 图4)。

可以看到, 2015年尼泊尔地震序列造成周围喜马拉雅山脉主要山峰的水平位移以向S运动为主, 希夏邦马峰水平位移最大, 达393mm, 并且根据山峰相对于地震序列的不同方位, 运动方向和位移量值有较大变化, 世界最高峰珠穆朗玛峰近S向移动36mm。该地震序列造成的垂直位移除了卓奥友峰和安纳普尔那峰外, 其余山峰均表现为下降, 下降最大的也是希夏邦马峰, 下降值达162mm。其次为马纳斯鲁峰, 下降值达78mm, 珠穆朗玛峰仅下降9mm。

国家测绘地理信息局 (2015) 报道, “受4月25日尼泊尔强烈地震影响, 珠峰地区向SW方向移动了3cm, 高程方向基本没变化”。本研究的估计与该报道相差不大, 验证了本文的估计。本文结果略大于国家测绘地理信息局的结果, 可能原因是, 本研究所做的估计中考虑了2015年尼泊尔地震的整个地震序列, 而国家测绘地理信息局公布结果为4月25日最大地震的结果; 另外, 国家测绘地理信息局公布结果为5月10—13日对2005年珠穆朗玛峰高程测量时埋

表 2 2015 年尼泊尔地震序列导致的喜马拉雅山峰的位移

Table 2 The displacements of peaks of the Himalaya generated by the 2015 Nepal earthquake sequence

| 山峰名 | 经度/纬度 /(°) | 海拔高度 /m | N 向/E 向/上向位移 ^① /mm | N 向/E 向/上向位移 ^② /mm | 平均 N 向/E 向/上向位移 /mm |
|-------------------------|-------------------|------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------|
| 珠穆朗玛峰 (Everest) | 86.925 3/27.988 1 | 8 844.43 | -22.6/6.5/3.5 | -48.9/-4.7/-21.7 | -35.7/0.9/-9.1 |
| 希夏邦马峰 (Shishapangma) | 85.781 9/28.351 9 | 8 027 | -193.3/-62.0/-57.8 | -570.0/-122.2/-266.5 | -381.6/-92.1/-162.2 |
| 干城章嘉峰 (Kanchenjunga) | 88.150 3/27.702 5 | 8 586 | -2.5/2.2/-3.4 | -2.3/3.4/-3.9 | -2.4/2.8/-3.7 |
| 格重康峰 (Gyachung Kang) | 86.742 2/28.098 1 | 7 952 | -40.2/-14.4/5.2 | -98.1/-5.0/-24.2 | -69.1/-9.7/-9.5 |
| 洛子峰 (Lhotse) | 86.9/27.9 | 8 516 | -25.4/13.6/5.3 | -47.1/12.4/-15.1 | -36.3/13.0/-4.9 |
| 马卡鲁峰 (Makalu) | 87.1/27.9 | 8 463 | -13.9/8.2/-1.9 | -17.6/10.5/-7.1 | -15.8/9.4/-4.5 |
| 卓奥友峰 (Cho Oyu) | 86.6/28 | 8 201 | -66.7/-20.3/16.6 | -166.0/44.2/15.9 | -116.4/12.0/16.2 |
| 道拉吉里峰 (Dhaulagiri) | 83.495 3/28.696 1 | 8 172 | -178.4/34.1/-18.7 | -3.9/2.6/-7.4 | -91.2/18.4/-13.1 |
| 马纳斯鲁峰 (Manaslu) | 84.55/28.55 | 8 156 | -483.1/-17.2/-128.3 | -139.7/21.3/-27.3 | -311.4/2.0/-77.8 |
| 安纳普尔那峰 (Annapurna) | 83.822 2/28.595 3 | 8 091 | -192.5/-44.5/73.3 | -7.8/4.6/-10.4 | -100.2/24.6/31.4 |

注 ①张勇,2015a, b; ②Hayes,2015a, b。

设的定日、大本营、东绒等 6 个点进行观测的平均结果,而本文为珠穆朗玛峰所在经纬度的计算结果。另外,将本文的计算结果与苏小宁等(2015)发表的专门对 4 月 25 日尼泊尔地震产生的同震 GPS 观测结果进行比较(图 5)。可以看到,从水平位移的方向上,我们的预测结果与 4 月 25 日地震的同震形变结果还是相当一致的,不同的是,本研究的地震序列包含了除 4 月 25 日地震之外的 7 个地震,这 7 个地震的总地震矩为 $1.27 \times 10^{24} \text{ N}\cdot\text{m}$,与 4 月 25 日地震释放的地震矩在同一量级,并且地震矩释放位置不同,致使我们的预测结果比 4 月 25 日地震观测的同震 GPS 结果大。综合考虑这些比较,我们的计算结果还是可信的。

4 结论和讨论

本研究采用 2015 年尼泊尔强震序列的破裂模型计算该地震序列造成的震中周围地区,特别是喜马拉雅山峰的位移场,得到如下结论:

(1)2015 年尼泊尔地震序列造成震中南北两侧物质向震中水平会聚,最大水平位移量达 871~962mm,北侧位移量随震中距的衰减比南侧小,这与该地震序列的断层大多为低倾角向 S 逆冲有关。

(2)2015 年尼泊尔地震序列使得震中及其北侧产生较大的沉降,最大沉降达 376~474mm,且距震中位置越远,沉降量越逐渐衰减。

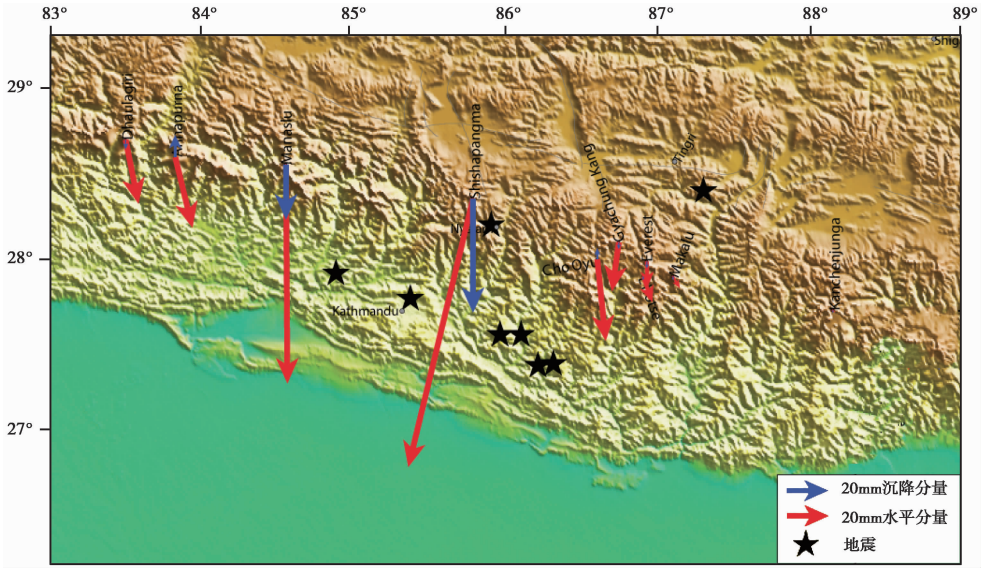


图4 表 1 所列的 2015 年尼泊尔地震序列的 8 个地震导致的周围喜马拉雅山峰的位移
 Fig. 4 The displacements of the peaks of the Himalaya generated by the 8 earthquakes of the 2015 Nepal earthquake sequence tabulated in Table 1.

黑色五角星表示尼泊尔地震序列中 8 次地震的震中; 蓝色箭头表示表 1 所列的 8 次地震产生的地表沉降量; 红色箭头表示 8 次地震产生的总的水平位移

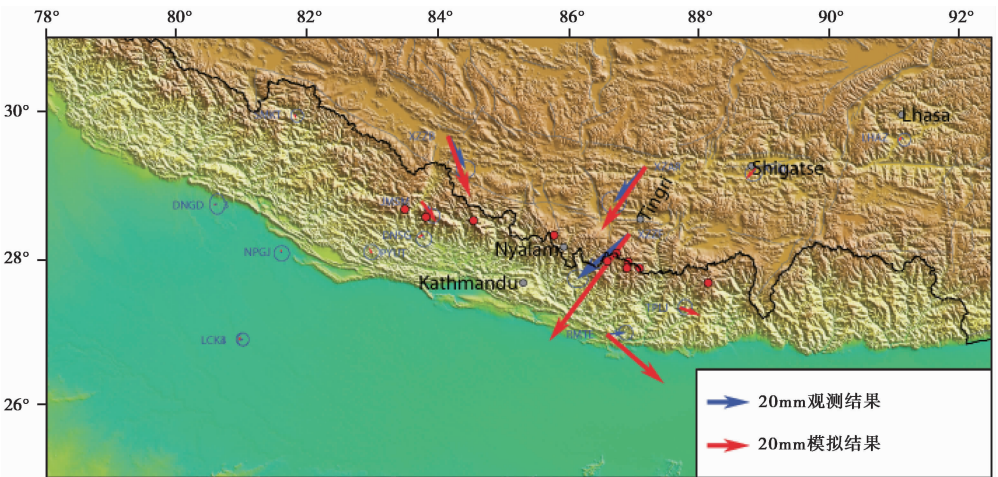


图5 根据 2015 年地震序列模型(表 1)预测的水平位移与发表的 2015 年 4 月 25 日地震的同震观测结果的比较
 Fig. 5 Comparison between the predicted horizontal displacements by using the tabulated earthquake models(Table 1) and the GPS observed co-seismic displacement generated by the earthquake of April, 25, 2015.

(3)2015 年尼泊尔地震序列导致了周围喜马拉雅山峰向 S 移动, 且大部分山峰沉降。其中希夏邦马峰的位移最大, 水平位移达 393mm, 下沉 36mm, 世界最高峰珠穆朗玛峰近 S 向水平移动 36mm, 下沉 9mm。

本研究采用 2015 年地震序列的破裂模型求解其在周围产生的位移场。其中 M_w 7.9 主震

和 $M_w 7.2$ 大余震破裂模型采用 Hayes (2015a, b) 第 2 版和张勇等 (2015a, b) 的破裂模型。虽然这些模型是大地震发生之后快速求解得到的结果, 但两者模型均为低倾角的逆冲类型, 并且地震矩也相当。另外, 未找到破裂模型的 6 次地震的破裂参数均采用 Wells 等 (1994) 的统计公式给出。这些地震破裂模型反映了该地震序列的总体特征, 因此求解得到的位移场是具有较大可信度的。但随着资料的进一步积累, 考虑 InSAR、GPS 观测等其他观测资料 (单新建等, 2015) 反演的精细模型可能更有利于震源周围位移场的精确计算。

本研究采用地震破裂模型求解周围的位移场时采用了较为简单的弹性半空间模型。实际上, 地球介质的不均匀结构, 如一维垂向不均匀结构 (Wang *et al.*, 2003), 对计算结果会有一些影响。另外, 大地震后地球的黏弹性松弛效应会产生应变的扩散 (沈正康等, 2003; 万永革等, 2007, 2008), 这些效应也会对位移场的计算结果产生一定的影响。然而, 需要说明的是, 黏弹性效应仅在应力作用时间与应力释放的特征时间近似或大于应力释放的特征时间时才变得比较重要, 对于发生时间较短的时段内的位移计算, 这种效应是可以忽略不计的。采用这些精细地壳模型估计今后较长时段尼泊尔地震序列对周围区域和喜马拉雅山峰的影响是我们今后研究的 1 个方向。

致谢 本研究所用的地震震源机制取自 GCMT 网站 (www.globalCMT.org); 图件利用 Generic Mapping Tools (GMT) (Wessel *et al.*, 1995) 绘制; 审稿专家为本文提出了建设性的修改意见, 使得本文可读性更强: 特此致谢。

参 考 文 献

- 陈俊勇. 1975. 珠穆朗玛峰高程计算 [J]. 测绘通报, (4): 19—27.
- CHEN Jun-yong. 1975. Height determination of Qomolangma Peak [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, (4): 19—27 (in Chinese).
- 陈俊勇, 刘允诺, 张骥, 等. 1994. 珠穆朗玛峰地区的地壳运动、地壳厚度、张性冰川的探讨 [J]. 测绘学报, 23(3): 178—183.
- CHEN Jun-yong, LIU Yun-nuo, ZHANG Ji, *et al.* 1994. The determination for the height of Qomolangma Feng and the crustal movement in its adjacent area [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 23(3): 178—183 (in Chinese).
- 陈俊勇, 张骥, 薛璋, 等. 1996. 珠穆朗玛峰地区的地壳运动及有关问题的探讨 [J]. 地球物理学报, 39(1): 58—67.
- CHEN Jun-yong, ZHANG Ji, XUE Zhang, *et al.* 1996. On the crustal movement in Qumolongma Feng and its adjacent area [J]. Chinese Journal of Geophysics, 39(1): 58—67 (in Chinese).
- 陈俊勇, 张燕平, 岳建利, 等. 2006. 2005 珠峰高程测定 [J]. 测绘学报, 35(1): 1—3.
- CHEN Jun-yong, ZHANG Yan-ping, YUE Jian-li, *et al.* 2006. 2005 Height determination of Qomolangma Feng [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 35(1): 1—3 (in Chinese).
- 国家测绘地理信息局. 2015. 尼泊尔地震致珠峰地区位移 3cm “身高”无明显变化 [EB/OL]. (2015-06-15) [2015-06-18]. http://www.gov.cn/xinwen/2015-06/15/content_2879769.htm.
- National Geographic Information Bureau of Surveying and Mapping. 2015. The Nepal earthquake leads to 3cm displacement and no obvious height change in Mt. Everest region [EB/OL]. (2015-06-15) [2015-06-18]. http://www.gov.cn/xinwen/2015-06/15/content_2879769.htm (in Chinese).

- 单新建, 张国宏, 汪驰升, 等. 2015. 基于 InSAR 和 GPS 观测数据的尼泊尔地震发震断层特征参数联合反演研究 [J]. 地球物理学报, 58(11): 4266—4276. doi: 10.6038/cjg20151131.
- SHAN Xin-jian, ZHANG Guo-hong, WANG Chi-sheng, *et al.* 2015. Joint inversion for the spatial fault slip distribution of the 2015 Nepal M_w 7.9 earthquake based on InSAR and GPS observations [J]. Chinese Journal of Geophysics, 58(11): 4266—4276(in Chinese).
- 沈正康, 万永革, 甘卫军, 等. 2003. 东昆仑活动断裂带大地震之间的黏弹性应力触发研究 [J]. 地球物理学报, 46(6): 786—795.
- SHEN Zheng-kang, WAN Yong-ge, GAN Wei-jun, *et al.* 2003. Viscoelastic triggering among large earthquakes along the east Kunlun fault system [J]. Chinese Journal of Geophysics, 46(6): 786—795(in Chinese).
- 盛书中, 万永革, 蒋长胜, 等. 2015. 2015 年尼泊尔 M_s 8.1 强震对中国大陆静态应力触发影响的初探 [J]. 地球物理学报, 58(5): 1834—1842.
- SHENG Shu-zhong, WAN Yong-ge, JIANG Chang-sheng, *et al.* 2015. Preliminary study on the static stress triggering effects on China mainland with the 2015 Nepal M_s 8.1 earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics, 58(5): 1834—1842(in Chinese).
- 苏小宁, 王振, 孟国杰, 等. 2015. GPS 观测的 2015 年尼泊尔 M_s 8.1 地震震前应变积累及同震变形特征 [J]. 科学通报, 60(22): 2115—2123. doi: 10.1360/N972015—00534.
- SU Xiao-ning, WANG Zhen, MENG Guo-jie, *et al.* 2015. Pre-seismic strain accumulation and co-seismic deformation of the 2015 Nepal M_s 8.1 earthquake observed by GPS [J]. Chinese Science Bulletin, 60(22): 2115—2123(in Chinese).
- 万永革, 沈正康, 曾跃华, 等. 2007. 青藏高原东北部的库仑应力积累演化对大地震发生的影响 [J]. 地震学报, 29(2): 115—129.
- WAN Yong-ge, SHEN Zheng-kang, ZENG Yue-hua, *et al.* 2007. Evolution of cumulative Coulomb failure stress in northeastern Qinghai-Xizang (Tibetan) plateau and its effect on large earthquake occurrence [J]. Acta Seismologica Sinica, 29(2): 115—129(in Chinese).
- 万永革, 沈正康, 曾跃华, 等. 2008. 唐山地震序列应力触发的黏弹性力学模型研究 [J]. 地震学报, 30(6): 581—593.
- WAN Yong-ge, SHEN Zheng-kang, ZENG Yue-hua, *et al.* 2008. Study on visco-elastic stress triggering model of the 1976 Tangshan earthquake sequence [J]. Acta Seismologica Sinica, 30(6): 581—593(in Chinese).
- 万永革, 盛书中, 李祥, 等. 2015. 2015 年尼泊尔强震序列对中国大陆的应力影响 [J]. 地球物理学报, 58(11): 4277—4286.
- WAN Yong-ge, SHENG Shu-zhong, LI Xiang, *et al.* 2015. Stress influence of the 2015 Nepal earthquake sequence on Chinese mainland [J]. Chinese Journal of Geophysics, 58(11): 4277—4286(in Chinese).
- 王文颖, 杨志强, 付宗堂. 1993. GPS 技术在测量喜马拉雅山地区板块运动和地壳垂直位移中的应用 [J]. 西安地质学院学报, 15(1): 1—9.
- WANG Wen-ying, YANG Zhi-qiang, FU Zong-tang. 1993. Application of the GPS technology in the survey of plate motion and crust vertical displacement in the Himalayan area [J]. Journal of Xi'an College of Geology, 15(1): 1—9(in Chinese).
- 杨理华, 刘东生. 1974. 珠穆朗玛峰地区新构造运动 [J]. 地质科学, 9(3): 209—220.
- YANG Li-hua, LIU Dong-sheng. 1974. On the neotectonic movements in the Mt. Jolmo Lungma region [J]. Scientia Geologica Sinica, 9(3): 209—220(in Chinese).
- 杨志强, 王文颖. 1993. 珠穆朗玛峰高程与板块构造运动问题 [J]. 西安地质学院学报, 15(4): 194—197.
- YANG Zhi-qiang, WANG Wen-ying. 1993. The elevation of the Qomolangma Peak and plate tectonics [J]. Journal of Xi'an College of Geology, 15(4): 194—197(in Chinese).

- 张广伟, 雷建设. 2015. 2015 尼泊尔 $M_s 8.1$ 地震中等余震震源机制研究 [J]. 地球物理学报, 58(11): 4298—4304.
- ZHANG Guang-wei, LEI Jian-she. 2015. Focal mechanism solutions of moderate-sized aftershocks of the 2015 $M_s 8.1$ Nepal earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics, 58(11): 4298—4304 (in Chinese).
- 张勇, 陈运泰. 2015a. 2015 年 5 月 12 日 $M_s 7.5$ 地震 [EB/OL]. [2015-06-04]. <http://www.cea-igp.ac.cn/tpwx/272218.shtml>.
- ZHANG Yong, CHEN Yun-tai. 2015a. $M_s 7.5$ earthquake on May 12, 2015 [EB/OL]. [2015-06-04]. <http://www.cea-igp.ac.cn/tpwx/272218.shtml> (in Chinese).
- 张勇, 许力生, 陈运泰. 2015b. 2015 年尼泊尔 $M_w 7.9$ 地震破裂过程: 快速反演与初步联合反演 [J]. 地球物理学报, 58(5): 1804—1811.
- ZHANG Yong, XU Li-sheng, CHEN Yun-tai. 2015b. Rupture process of the 2015 Nepal $M_w 7.9$ earthquake: Fast inversion and preliminary joint inversion [J]. Chinese Journal of Geophysics, 58(5): 1804—1811 (in Chinese).
- 赵希涛. 1975. 喜马拉雅山脉近期上升的探讨 [J]. 地质科学, 10(3): 243—252.
- ZHAO Xi-tao. 1975. On the recent uplift of the Himalayas [J]. Scientia Geologica Sinica, 10(3): 243—252 (in Chinese).
- 朱亮. 1976. 珠穆朗玛峰高程测定 [J]. 中国科学, (1): 74—84.
- ZHU Liang. 1976. Height determination of Qomolangma peak [J]. Science in China, (1): 74—84 (in Chinese).
- Bai L, Liu H B, Ritsema J, *et al.* 2016. Faulting structure above the Main Himalayan Thrust as shown by relocated aftershocks of the 2015 $M_w 7.8$ Gorkha, Nepal, earthquake [J]. Geophysical Research Letters, 43(2): 637—642.
- Chinnery M A. 1961. The deformation of the ground around surface faults [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 51(3): 355—372.
- Denolle M A, Fan W Y, Shearer P M. 2015. Dynamics of the 2015 $M 7.8$ Nepal earthquake [J]. Geophysical Research Letters, 42(18): 7467—7475.
- Hayes G. 2015a. Updated finite fault results for the Apr 25, 2015 $M_w 7.9$ 35km E of Lamjung, Nepal earthquake (Version 2) [EB/OL]. [2015-05-16]. http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us20002926#scientific_findefault.
- Hayes G. 2015b. Updated finite fault results for the May 12, 2015 $M_w 7.3$ 22km SE of Zham, China earthquake (Version 2) [EB/OL]. [2015-05-16]. http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us20002ejl#scientific_findefault.
- Holt W E, Li M, Haines A J. 1995. Earthquake strain rates and instantaneous relative motions within central and eastern Asia [J]. Geophysical Journal International, 122(2): 569—593.
- Liang S M, Gan W J, Shen C Z, *et al.* 2013. Three-dimensional velocity field of present-day crustal motion of the Tibetan plateau derived from GPS measurements [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 118(10): 5722—5732.
- Love A E H. 1927. Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity [M]. 4th ed. Dover, New York: 643.
- Mindlin R D. 1936. Force at a point in the interior of a semi-infinite solid [J]. Physics, 7(5): 195—202.
- Okada Y. 1992. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 82(2): 1018—1040.
- Press F. 1965. Displacements, strains, and tilts at teleseismic distances [J]. Journal of Geophysical Research, 70(10): 2395—2412.
- Sato R, Matsu'ura M. 1974. Strains and tilts on the surface of a semi-infinite medium [J]. Journal of Physics of the Earth, 22(2): 213—221.

- Steketee J A. 1958. On Volterra's dislocations in a semi-infinite elastic medium [J]. Canadian Journal of Physics, 36 (2): 192—205.
- Wang R J, Marti'n F L, Roth F. 2003. Computation of deformation induced by earthquakes in a multi-layered elastic crust-FORTRAN programs EDGRN/EDCMP [J]. Computers & Geosciences, 29(2): 195—207.
- Wells D L, Coppersmith K J. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 84(4): 974—1002.
- Wessel P, Smith W H F. 1995. New version of the generic mapping tools [J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 76(33): 329.

STUDY ON DISPLACEMENT OF THE PEAKS OF THE HIMALAYA GENERATED BY THE 2015 NEPAL EARTHQUAKE SEQUENCE

WAN Yong-ge¹⁾ JIN Zhi-tong^{1,2)} CUI Hua-wei¹⁾
HUANG Ji-chao¹⁾ LI Yao²⁾ LI Xiang¹⁾

1) *Institute of Disaster-Prevention Science and Technology, Yanjiao, Sanhe City, Hebei 065201, China*

2) *Institute of Geophysics, China Earthquake Administration 100081, Beijing*

Abstract

Based on the rupture models of the 2015 Nepal earthquake sequence and half space homogeneous elastic model, the displacement field near the epicenters is estimated. The horizontal components converge to the epicenters from north and south with maximum value of 871~962mm. The farther the epicenter distance is, the smaller of the horizontal displacement occurred. The displacement on the south side of the epicenters decreases more rapidly than that on the north side as the distance from the epicenter increased. Significant settlement occurred on the north side of the epicenters with maximum of 376~474mm, while large uplift occurred on the epicenters and its south side with maximum value of 626~677mm. Then, the displacement of the peaks of the Himalaya near the epicenters is estimated. The largest displacement occurred at the peak of Shishapangma with 393mm horizontal component and 36mm settlement. Mt. Everest, the world's highest peak, moves 36mm in nearly southward direction with 9mm settlement. The displacements of other peaks of the Himalaya are different with the epicentral distance and azimuth of the 2015 Nepal earthquake sequence.

Key words 2015 Nepal earthquake sequence, earthquake rupture model, displacement field, Mt. Everest

[作者简介] 万永革,男,1967年生,2010年于中国地震局地球物理研究所获理学博士学位,研究员,主要从事地震学与地球动力学方面的研究,电话:13731625082, E-mail: wanyg217217@vip.sina.com。