2015年尼泊尔 $M_s8.1$ 与 $M_s7.5$ 级地震活动特征

薛艳^①, 刘杰^{①*}, 刘双庆^②, 王熠熙^②, 杨文^①

① 中国地震台网中心, 北京 100045;

② 天津市地震局, 天津 300201

* 联系人, E-mail: liujie@seis.ac.cn

2015-06-23 收稿, 2015-08-21 接受, 2015-11-19 网络版发表

国家自然科学基金(41404043)和中国地震局科技星火计划(XH14002Y)资助

摘要 2015年尼泊尔8.1级地震发生在喜马拉雅地震带上, 为低角度逆冲型单侧破裂. 余震区呈WNW-ESE展布, 长轴约170 km, 短轴约60 km. 余震空间分布不均匀, 主震和强余震分布在余震区两端, 中部余震稀疏, 这与8.1级地震矩释放主体区一致. 7.5级地震发生在8.1级地震余震区的东部边缘, 8.1级地震对其具有显著的触发作用. 8.1级和7.5级地震发生在尼泊尔1505年和1934年两次大震之间的8级地震破裂空段上, 1870年以来至本次地震前该破裂空段内没有发生过6级以上地震, 存在6级地震背景空区. 这次地震前13年, 形成长约590 km的5级地震空区, 震前19个月空区被打破. 8.1级地震序列发生在5级地震空区的中部, 其东、西两侧仍有较大范围没有发生地震, 库伦应力计算表明8.1级地震对其东西两侧断层具有明显的触发作用. 考虑到历史地震的离逝时间与复发周期, 认为1934年地震破裂区再次发生大震的危险性较小, 而1505年地震破裂区发生大震的危险性增大. 2005年巴基斯坦 $M_w7.6$ 和2015年尼泊尔8.1级地震的发生, 表明喜马拉雅地震带已经进入了一个7级以上地震相对活跃的时段.

关键词

2015年尼泊尔地震
破裂区
地震空区
应力触发
喜马拉雅地震带

据中国地震台网测定(www.ceic.ac.cn), 2015年4月25日14时11分(北京时间)尼泊尔发生 $M_s8.1$ 级地震(28.2°N, 84.7°E, 震源深度20 km), 17 d后, 即5月12日尼泊尔再次发生 $M_s7.5$ 级地震. 两次地震震中相距约140 km, 7.5级地震发生在8.1级地震余震区的东部边缘, 为8.1级地震的最大余震. 至今8.1级地震序列已经发生了3次7级余震, 另外2次分别为4月25日 $M_s7.0$ 与4月26日 $M_s7.1$ 级地震.

这次尼泊尔地震不仅影响了尼泊尔, 还波及了中国西藏、印度北部、巴基斯坦、孟加拉国、不丹. 地震造成了重大的人员伤亡和财产损失. 尼泊尔国家紧急情况中心5月17日发布消息称, 该国4月25日和5月12日发生的破坏性地震已造成8583人死亡(http://news.xinhuanet.com/english/2015-05/24/c_134191023.htm).

尼泊尔处于喜马拉雅地震带中部, 由于其强烈的构造运动、频繁的地震活动和严重的地震灾害, 所以该区一直是地学界研究的热点^[1-6]. Pandey等人^[7]通过区域地震台网的地震记录研究了尼泊尔地震构造特征, 并给出了大地震危险性分析. Bilham^[2]研究了印度与喜马拉雅地区的地震活动, Sapkota等人^[8]研究了尼泊尔1934和1255年大震的地表破裂. 地震学家都非常关注1934年尼泊尔大震西部地震空区发生大震的危险^[5,9,10], Khattri^[10]认为在未来100年该空区发生大地震的可能性为0.52. 本次尼泊尔8.1级地震就发生在该地震空区内. 8.1级地震发生后, 张勇等人^[11]开展了8.1级($M_w7.8$)地震破裂过程的快速反演以及地震波与少量GPS资料的初步联合反演工作, 王

引用格式: 薛艳, 刘杰, 刘双庆, 等. 2015年尼泊尔 $M_s8.1$ 与 $M_s7.5$ 级地震活动特征. 科学通报, 2015, 60: 3617–3626

Xue Y, Liu J, Liu S Q, et al. Seismic activity of the 2015 Nepal $M_s8.1$ and $M_s7.5$ earthquakes (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 3617–3626, doi: 10.1360/N972015-00583

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N972015-00583>

卫民等 (<http://www.lcpu.itpcas.ac.cn/ReadArt.aspxid=493>) 反演了 5 月 12 日 $M_s 7.5$ 级地震的震源机制解与震源破裂过程. 盛书中等人^[12] 计算了 8.1 级地震引起的中国大陆及邻区静态库伦应力的变化, 占伟等人^[13] 研究了 GPS 观测结果反映的尼泊尔地震的孕震特征.

本文将从地震活动研究本次尼泊尔地震. 使用两套地震目录, 在研究地震序列与 1973 年以来的 5 级以上地震活动时使用美国地质调查局 (USGS) 实时更新的全球地震目录 (<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>), 该目录始于 1973 年, 通过 $G-R$ 关系分析, 认为该目录在喜马拉雅地区 5 级以上地震基本完备, 本次地震序列 4.2 级以上地震基本完整. 研究历史地震活动时, 使用宋治平等人^[14] 主编的《全球地震目录》, 该目录在喜马拉雅地震带 1700 年以来 6.5 级以上地震基本完整^[15], 这套目录止于 2010 年, 2011 年至今续接的是 USGS 测定的全球地震目录. 本文约定, 对于 6 级以上地震, 如果是面波震级 (M_s), 则不作标注, 直接写数字, 如 7.5 级; 对矩震级 (M_w) 地震作标注, 如 $M_w 7.6$ 地震.

1 地震序列活动特征

据统计, 2015 年尼泊尔 $M_w 7.8$ 级 (中国地震台网测定震级为 $M_s 8.1$) 地震后至 5 月 20 日, 共发生 160 次 4 级以上余震, 其中 4 级地震 130 次, 5 级地震 25 次, 6 级地震 4 次, 7 级地震 1 次, 最大余震为 5 月 12 日 $M_w 7.3$ (中国地震台网测定震级为 $M_s 7.5$). USGS 给出了 5 次 $M_w 6.0$ 级以上地震的震源机制解 (图 1(a)), 可以看出, 其断层节面解非常接近. 结合区域地震构造特征, 认为发震断层为低角度北倾逆冲型破裂.

USGS 通过波形反演得到的尼泊尔 $M_w 7.8$ 级地震的震源破裂过程显示, 破裂持续时间约为 90 s, 主要释放发生在 45 s 之前. 破裂主要沿断层走向往东南方向扩展, 为单侧破裂, 破裂面长约 150 km, 宽约 70 km, 矩释放最大区域的位错量达 4 m. 在初始破裂点附近位错量比较小, 初始破裂点东南 35~100 km 范围内是矩释放最大的区域, 与此相对应的, 该区域余震活动非常弱 (图 1(a)). USGS 给出 $M_w 7.3$ 级地震的破裂过程结果显示, 破裂持续时间约 30 s, 主要释放发生在 10 s 之前, 破裂面长约 40 km, 宽约 20 km, 位错分布在初始破裂点附近, 为双侧破裂 (http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us20002ejl#scientific_finitefault).

由图 1 可见, 余震区呈 WNW-ESE 展布, 长轴约 170 km, 短轴约 60 km. 余震区长与宽之比为 2.83, 明显低于汶川地震余震区的长宽比 16, 这与尼泊尔地震发震断层的逆冲角度比较平缓有关. 余震的空间分布非常不均匀, 主要集中在两个区域: 一个是余震区的西端, 即初始破裂点附近; 另一个是余震区的东部, 即 85.5°E 以东地区, 而余震区中西部余震稀疏, 但能量释放充分, 是 $M_w 7.8$ 级地震矩释放的主要区域. 此外, 绝大部分 5 级以上地震分布在余震区的北部.

地震序列起伏活动特征明显 (图 1(b)), 可以分为 3 个阶段, 分别为主震后 3 d (4 月 25~27 日, 发震时间为世界时, 下同), 4 月 28 日~5 月 11 日及 5 月 12 日以后.

$M_w 7.8$ 级主震后近 4 min 在余震区的东南部发生 $M_w 6.1$ 级地震, 30 min 后在主震附近发生 $M_w 6.6$ 级强余震 (中国地震台网测定 $M_s 7.0$). 主震发生后余震区迅速向东南方向扩展至 160 km, 显示出单侧破裂的迹象 (图 2), 26 日在余震区的东南端发生 $M_w 6.7$ 级地震 (中国地震台网测定 $M_s 7.1$). $M_w 7.8$ 级地震的余震主要集中在 25~27 日, 共发生 105 次 4 级以上地震, 占整个序列的 65.6%, 其中 4 级地震 87 次, 5 级地震 15 次, 6 级地震 3 次.

4 月 28 日后地震活动明显减弱, 5 月 4 日 12 时~8 日 0 时 4 级地震平静近 4 d, 8 日余震又开始活动, 至 11 日共发生 6 次 4 级地震 (图 1(a) 中的绿色圆), 其中 4 次发生在余震区的东南端, 即 5 月 12 日 $M_w 7.3$ 级地震附近.

5 月 12 日 7 时在余震区的东端发生 $M_w 7.3$ 级最大余震 (中国地震台网测定 $M_s 7.5$), 其后余震主要分布在该地震附近, 比较集中, 其余震区长约 47 km (图 1(a) 和 2(c)). $M_w 7.3$ 级地震后 30 min 发生 $M_w 6.3$ 级强余震 (中国地震台网测定 $M_s 6.2$), 至 24 日 $M_w 7.3$ 级地震周围共发生 34 次 4 级以上地震, 且集中发生在 $M_w 7.3$ 级地震后 2 d (至 13 日), 占其余震的 79.4% (图 2). 14 日以后余震频率明显减弱, 16 日出现起伏活动, 在 $M_w 7.3$ 级地震南偏东约 33 km 处发生 $M_w 5.7$ 级地震. 此外, 5 月 12 日 $M_w 7.3$ 级地震发生后至 5 月 24 日, 余震区的西北端 (即主震附近) 仅发生 3 次 4 级以上地震, 最大为 5 月 12 日 $M_w 5.2$ 级地震, 位于 $M_w 7.8$ 级地震震中南约 43 km, 地震活动较弱. $M_w 7.3$ 级地震的余震区长约 47 km, 它及其余震的发生致使整个余震区向东南扩展了约 10 km (图 1 和 2).

2 尼泊尔 8.1 级地震发震背景分析

尼泊尔 8.1 级地震发生在喜马拉雅地震带, 该带是印度板块与欧亚板块的碰撞造山带. 喜马拉雅地

图1 尼泊尔 M_w 7.8 级地震序列空间分布(a)与 $M-t$ 图(b)。 (a) 蓝色圆表示 2015-04-25~2015-05-07, 绿色圆表示 2015-05-08~2015-05-11 及红色三角形表示 2015-05-12~2015-05-24。 MFT, 主前锋冲断裂; MBT, 主边冲断裂; MCT, 主中冲断裂

Figure 1 Epicenter distribution (a) and $M-t$ chart (b) of the Nepal M_w 7.8 earthquake sequence. (a) Blue circles stand for earthquakes during 2015-04-25 to 2015-05-07, green circles stand for earthquakes during 2015-05-08 to 2015-05-11, red triangles stand for earthquakes during 2015-05-12 to 2015-05-24. MFT, Main Frontier Thrust fault; MCT, the Main Center Thrust fault; MBT, the Main Boundary Thrust fault

震带是印度板块低角度俯冲到欧亚板块之下的强烈变形区, 碰撞运动始于50 Ma前, 随后以5 cm/a的运动速率汇聚, 并由此产生了侧向逃逸、地壳缩短、增厚, 形成了世界上最高的山脉^[16,17]。喜马拉雅地区主要的地壳变形集中在深部喜马拉雅逆冲断裂带上(MHT), 沿着MHT断裂带, 印度板块岩石圈俯冲到欧亚大陆之下^[18~20]。MHT吸收了大约一半的印度板块与欧亚板块的汇聚速率, 其量值约为20 mm/a^[1,21]。Ader等人^[5]的研究结果显示, 在尼泊尔中东部地区, 印度板块与青藏高原南部的汇聚速率为 17.8 ± 0.5 mm/a, 而在尼泊尔西部汇聚速率达 20.5 ± 1 mm/a。

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)、主边冲断裂(MBT)和主中冲断裂(MCT)区域及深部喜马拉雅逆冲断层^[22](图1), 这些断裂带是目前最为活跃的地震带^[23,24]。本次尼泊尔 M_s 8.1级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且为低角度逆冲, 向深部延伸则很有可能发生在MHT上^[25]。

2.1 背景地震空区

由于构造运动强烈, 喜马拉雅地震带强震频繁。自公元前1250年以来就发生了一系列的大地震^[26]。本文整理了1500年以来主边冲断裂带及主中冲断裂

图2 不同时段地震序列沿 AB 剖面的震中迁移 $D-t$ 图. 将地震投影到 AB 直线(参见图 1)上, 做每个地震投影点距离 A 点的距离随时间的变化. (a) 4 月 25 日至 5 月 24 日, (b) 4 月 25 日至 4 月 27 日与(c) 5 月 12 日至 5 月 13 日期间余震沿 AB 剖面随时间的迁移

Figure 2 Epicenter migration map in AB direction. Projecting the epicenter of the earthquake on the line AB and calculating the change of earthquake projection distance from point A over time. (a) 2015-04-25 to 2015-05-24; (b) 2015-04-25 to 2015-04-27; (c) 2015-05-12 to 2015-05-13

带上发生的 $M_w7.5$ 级以上地震的震源破裂尺度并列于表1, 表1中序号2~8号地震的震源破裂尺度来源于文献[4]的研究结果, 他们假定积累的弹性应变能均用来发生大地震, 通过比较近年来发生的大地震的破裂尺度、同震位错等数据, 采用边界元计算得到了喜马拉雅地震带不同震级档($M_w6.7$ 级以上地震)的震级、震源破裂长度与滑动量的关系. 此外, 1505年 M_w 级8.2大震震级可能被低估, Bilham与Ambraseys^[3]根据西藏南部和坎格拉平原的破坏情况记载, 认为该地震震级可能达到矩震级8.6~8.8之间, 破裂区长约600 km, 宽70~90 km.

图3(a)是根据表1绘制的 $M_w7.5$ 级以上地震震源破裂区分布图. 图3(b)是以图3(a)中A点(34.87°N , 73.10°E)为起点, 以B点(28.83°N , 97.55°E)为终点, 将AB间的喜马拉雅弧形带拉成直线, 给出1500年以来发生的 $M_w7.5$ 级以上历史地震的破裂区随时间的演

化图. 由图3(a)与(b)可以看出, 本次尼泊尔地震发生在1505年 $M_w8.2$ 级地震和1934年 $M_w8.4$ 级地震之间的8级地震破裂空段上, 其余震区基本填满了该空段. 有记录以来该空段仅记录到3次地震, 分别为1833年8月26日加德满都北部 $M_w8.0$ 级地震、1866年5月23日加德满都 $M_w7.6$ 及1869年7月7日加德满都 $M_w7.4$ 级地震, 这3次地震的震源破裂尺度比较小, 且1870年至本次尼泊尔地震前, 该空段上没有发生过6级以上地震(图3(c)). 即本次尼泊尔地震前存在8级地震空段和6级地震背景空区.

2.2 孕震空区

2002年以来, 围绕着本次尼泊尔地震形成了长约590 km的5级地震空区(图4), 2013年下半年以来空区被打破, 发生了2013年8月30日5.0级与2014年12月18日5.0级地震, 这两次5级地震分别位于这次 $M_w7.8$ 级地震

表 1 喜马拉雅地震带 $M_w \geq 7.5$ 地震基本参数

Table 1 Basic parameters of earthquakes with $M_w \geq 7.5$ in Himalayan seismic belt

序号	发震时间	震中位置		破裂区长度(km)	破裂宽度(km)	震级(M_w)	资料来源
		纬度(N)	经度(E)				
1	1505-06-06	29.5°	83.0°	600	70~90	8.2	[3]
2	1555-09-01	33.5°	75.5°	60		7.6	[4]
3	1669-06-04	33.4°	73.3°	100		8.0	[4]
4	1803-09-01	31.0°	79.0°	100		8.1	[4]
5	1833-05-30	29.4°	80.1°	50		7.5	[4]
6	1833-08-26	28.3°	85.5°	100		8.0	[4]
7	1846-12-10	26.0°	93.0°	50		7.5	[4]
8	1866-05-23	27.7°	85.3°	60		7.6	[4]
9	1897-06-12	26.0°	91.0°	200~300	~100	8.0~8.7	[27]
10	1905-04-04	33.0°	76.0°	280(>120)	80	8.2	[27]
11	1934-01-15	26.77°	86.76°	250~300	100	8.4	[27]
12	1950-08-15	28.5°	96.5°	200	120	8.7	[27]
13	2005-10-08	34.54°	73.59°	90		7.6	本文根据余震区尺度获得
14	2015-04-25	28.2°	84.7°	170	58	7.8	本文根据余震区尺度获得

震中东北部约118和164 km, 均在本次地震的余震区内。

值得注意的是, 本次地震及其余震仅占5级地震空区长度的30%, 其东南部还有130 km、西北部还有280 km没有破裂(图4(b)). 根据历史地震活动, 本次尼泊尔地震东部为1934年大震的破裂区, 至今离逝时间仅为82 a; 西部为1505年大震的破裂区, 距今离逝时间已经达到510年(图3(a), (b)).

由于历史大震资料的缺失, 喜马拉雅地区大震复发周期并不明确. Sapkota等人^[8]野外地质考察认为, 1255年在1934年大震破裂区附近曾发生过一次大地震, 该地震摧毁了加德满都, 并使尼泊尔国王Abhaya Malla在地震中丧生. 这两次大震的复发间隔为679年. Feldl与Bilham^[4]研究认为, 喜马拉雅地震带大震复发周期约为500 a. 由此认为, 5级地震空区东部发生大震的危险性较小, 而其西部发生大震的危险性大。

3 静态库伦应力计算

本文利用Coulomb3.2软件^[28,29], 计算了尼泊尔 M_w 7.8级地震对周围断层的触发作用。

运用库伦准则, 断层面上库仑破裂应力可以用公式(1)表示,

$$\sigma_f = \tau' + \mu' \sigma_n, \quad (1)$$

其中, τ' 为滑动方向的剪应力, σ_n 为滑动面上所受的正应力, 其中剪应力右旋为正, 正应力拉张为正。在

计算中, 参照Stein等人^[30]和King等人^[31]的研究, 选取视摩擦系数 $\mu'=0.4$ 。

首先计算 M_w 7.8级地震对 M_w 7.3级最大余震的触发作用. M_w 7.8地震震源模型主要来源于USGS利用地震波反演给出的结果(http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us20002926#scientific_finitefault). 本文将该结果直接加入到断层分段模型中, 计算其对 M_w 7.3级最大余震在USGS给出的震源深度12 km处的库仑应力变化情况. 接收断层参数来源于USGS给出的 M_w 7.3级地震的震源机制解参数, 即断层走向为312°, 倾角11°, 滑动角127°. 计算结果显示, M_w 7.8级主震在 M_w 7.3级地震的质心矩震源处(86.07°E, 27.83°N)库仑应力增加了0.283 MPa, 是触发阈值的28.3倍. 图3(a)显示, M_w 7.3级地震及其余震均发生在库仑应力明显增加的区域, 即7.8级主震对 M_w 7.3级最大余震具有明显的触发作用. 此外, 由图5(a)还可以看出, 在余震区的中西部库仑应力为负值, 即主震对该区具有抑制作用, 与此相一致的是, 该区余震数量非常少, 而且强度低。

M_w 7.8级地震西北侧约450 km范围内1976年以来没有发生过6级以上地震, 本文仅收集到距离本次 M_w 7.8级地震最近的2次5级地震的震源机制解, 其发震断层走向分别为307°和294°, 倾角为21°和26°, 滑动角为102°与95°. 本文取这2次地震震源机制解的平均值作为接收断层参数, 分别为走向300°, 倾角23°, 滑动角99°, 计算 M_w 7.8级地震对其西北1505年大震

图3 喜马拉雅地震带 $M_w \geq 7.5$ 地震破裂区分布((a), (b))与地震震中分布图(c). (a)中五角星为尼泊尔 $M_w 7.8$ 级地震的初始破裂点; (c)中深色圆表示 1870 年~2015 年 3 月 6 级以上地震, 五角星表示 2015 年尼泊尔地震序列

Figure 3 Distribution of source ruptures of $M_w \geq 7.5$ earthquakes in Himalayan seismic belt since 1500 ((a), (b)) and the epicenter distribution (c). The star for the Nepal $M_w 7.8$ earthquake; (c) circles for earthquakes with $M > 6.0$ from January 1870 to March 2015, stars for the Nepal $M_w 7.8$ earthquake sequence

破裂区的触发作用. 计算结果显示(图5(b)), 在 $M_w 7.8$ 级地震余震区至 82°E 库伦应力增加量为 $0 \sim 0.2 \text{ MPa}$, 特别是在余震区西北约 80 km 范围内库伦应力增加量均超过触发阈值. 例如, 在 84.1°E , 28.1°N , 深度 10 km 处库伦应力增加量为 0.66 MPa , 是触发阈值的 66

倍; 在 83.9°E , 27.98°N , 深度 10 km 处库伦应力增加量为 0.034 MPa . 即本次地震对 1505 年大震的破裂区具有触发作用. 同样, $M_w 7.8$ 级地震对东南侧也有触发作用. 考虑到历史地震的离逝时间, 认为 1934 年大震破裂区地震活动会增强, 但发生大震的可能性较

图4 尼泊尔及附近地区5级以上地震分布(a)、5级地震空区、尼泊尔地震序列与历史大震破裂区(b)及5级地震空区内1973年以来地震活动 $M-t$ 图(c)。(a) 浅色圆表示1973-01-01~2001-12-31期间发生的地震, 深色圆表示2002-01-01~2013-07-31期间发生的地震, 深色三角形表示2013-08-01~2015-04-24期间发生的地震

Figure 4 Distribution of $M > 5.0$ earthquakes in Nepal and its vicinity (a), the seismogenic gap, the Nepal earthquake sequence and the historical large earthquake rupture zones (b), and $M-t$ chart of earthquakes in the seismogenic gap since 1973 (c). (a) Light circles, gray circles and triangles denote the shocks during 1973-01-01 to 2001-12-31, 2002-01-01 to 2013-07-31 and 2013-08-01 to 2015-04-24, respectively

小; 而1505年大震破裂区再次发生大震的危险性较大。

4 喜马拉雅地震带 $M_w 7.0$ 级以上地震活动特征

有记录以来喜马拉雅地震带及附近地区(图S1(a))

共发生 $M_w > 8.0$ 以上地震7次, 最大为1897年阿萨姆8.7级和1950年阿萨姆(也称西藏察隅)8.7级地震。尼泊尔位于喜马拉雅地震带中部, 是地震活动最强烈的地区, 共记录到 $M_w 7.8$ 级以上地震4次, 分别为1505

图5 尼泊尔地震产生的静态库仑应力变化量分布。(a) 7.8级地震对7.3级地震的触发；(b) 7.8级地震对其西北侧1505年大震破裂区的触发
Figure 5 Spatial distribution of static Coulomb stress changes caused by the Nepal M_w 7.8 earthquake. (a) On the fault plane of seismogenic fault of the M_w 7.3 strongest aftershock; (b) on the average fault plane of seismogenic faults of the $M > 5.0$ earthquakes in the west of the seismogenic gap

年6月6日8.2级、1833年8月26日8级、1934年1月15日8级和本次7.8级地震。

图S1(b)是喜马拉雅地震带及附近地区7级以上地震活动 $M-t$ 图,可以看出,1803~1966年该区7级以上地震非常活跃,平均6.5 a发生1次7级以上地震,而1967~2004年,7级地震平静38 a。2005年巴基斯坦 M_w 7.6级地震(中国地震台网测定 M_s 7.8)的发生打破了喜马拉雅地震带长期的7级地震平静,在此背景下发生了本次尼泊尔 M_w 7.8级地震。这两次地震的发生预示着喜马拉雅地震带已经进入了一个7级以上地震相

对活跃的时段。

5 结论

(1) 2015年尼泊尔8.1级主震及其主要余震均为低角度北倾逆冲型破裂,表明该地震是在印度板块与欧亚板块的强烈挤压作用下发生的。余震区呈WNW-ESE展布,长轴约170 km,短轴约60 km。8.1级主震为单侧破裂,余震空间分布不均匀,主要集中在余震区的西北端与东南部地区。7.5级最大余震为双侧破裂,余震区长约47 km,余震集中分布在其附近,

它及其余震的发生致使整个余震区向东南扩展了约10 km.

(2) 静态库伦应力计算结果表明, 强余震发生在库伦应增加的区域, 主震对最大余震具有显著的触发作用. 本次地震对其震源两侧的断层发震具有促进作用, 在本次地震破裂区西北约80 km范围内库伦应力增加量超过触发阈值.

(3) 8.1级地震发生在1505年和1934年2次大震之间的8级地震破裂空段上, 其余震基本填满该空段. 1870年以来至本次地震前该破裂空段内没有发生过6级以上地震, 即存在6级地震背景空区.

(4) 8.1级地震前13年形成了长约590 km的5级地震空区, 震前19个月该空区被打破. 但本次地震仅填满了5级地震空区长度的30%, 其东部还有130 km、西部还有280 km没有地震. 结合历史地震、大震复发周期及库伦应力计算, 认为5级地震空区东部, 即1934年尼泊尔地震的破裂区, 由于本次地震的触发作用, 可能会发生地震, 但发生大震的危险性小; 而其西部, 即1505年大震的破裂区发生大震的危险性大.

(5) 2005年巴基斯坦 M_w 7.6级与本次尼泊尔8.1级地震的发生表明喜马拉雅地震带已经进入了一个7级以上地震相对活跃的时段.

参考文献

- 1 Bilham R, Larson K, Freymuller J. GPS measurements of present-day convergence across the Nepal Himalaya. *Nature*, 1997, 386: 61–64
- 2 Bilham R. Earthquakes in India and the Himalaya: Tectonics, geodesy and history. *Ann Geophys*, 2004, 17: 839–858
- 3 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
- 4 Feldl N, Bilham R. Great Himalayan earthquakes and the Tibetan Plateau. *Nature*, 2006, 444: 165–170, doi: 10.1038/nature05199
- 5 Ader T, Avouac J P, Jing L Z, 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, doi: 10.1029/2011JB009071
- 6 Ambraseys N, Bilham R. A note on the Kangra $M_s=7.8$ earthquake of 4 April 1905. *Curr Sci*, 2000, 79: 45–50
- 7 Pandey M R, Tandukar R P, Avouac J P, et al. Seismotectonics of the Nepal Himalaya from a local seismic network. *J Asian Earth Sci*, 1999, 17: 703–712
- 8 Sapkota S N, Bollinger L, Klinger Y, et al. Primary surface ruptures of the great Himalayan earthquakes in 1934 and 1255. *Nat Geosci*, 6: 71–76
- 9 Yeats R S, Thakur V C. Reassessment of earthquake hazard based on a fault-bend fold model of the Himalayan plate-boundary fault. *Curr Sci*, 1998, 74: 230–233
- 10 Khattri K N. Probabilities of occurrence of great earthquakes in the Himalaya. *Proc Indian Acad Sci (Earth Planet Sci)*, 1999, 108: 87–92
- 11 Zhang Y, Xu L S, Chen Y T. Rupture process of the 2015 M_w 7.9 earthquake: Fast inversion and preliminary joint inversion (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2015, 58: 1804–1811 [张勇, 许力生, 陈运泰. 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. *地球物理学报*, 2015, 58: 1804–1811]
- 12 Sheng S Z, Wan Y G, Jiang C S, et al. Preliminary study on the static stress triggering effects on China mainland with the 2015 Nepal M_w 8.1 earthquake (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2015, 58: 1834–1842 [盛书中, 万永革, 蒋长胜, 等. 2015年尼泊尔8.1级强震对中国大陆静态应力触发影响的初探. *地球物理学报*, 2015, 58: 1834–1842]
- 13 Zhan W, Wu Y Q, Liang H, et al. Characteristics of the seismogenic model for the 2015 Nepal M_w 7.8 earthquake derived from GPS data (in Chinese). *Chin J Geophys*, 58: 1818–1826 [占伟, 武艳强, 梁洪, 等. GPS观测结果反映的尼泊尔 M_w 7.9地震孕震特征. *地球物理学报*, 2015, 58: 1818–1826]
- 14 Song Z P, Zhang G M, Liu J, et al. Global earthquake catalogue (in Chinese). Beijing: Earthquake Press, 2011 [宋治平, 张国民, 刘杰, 等. 全球地震目录. 北京: 地震出版社, 2011]
- 15 Yin J Y, Zhu Y Q, Song Z P, et al. Hundred-year-scale cycle of seismic activities in western China and its negative correlativity with sunspot activity (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2011, 54: 2263–2271 [尹继尧, 朱元清, 宋治平, 等. 中国西部及邻区百年尺度周期的地震活动及其和太阳活动之间的负相关性. *地球物理学报*, 2011, 54: 2263–2271]
- 16 Molnar P. Structure and tectonics of the Himalaya: Constraints and implications of geophysical data. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 1984, 12: 489–518
- 17 Tapponnier P, Xu Z Q, Roger F, et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau. *Science*, 2001, 294: 1671–1677
- 18 Cattin R, Avouac J. Modeling mountain building and the seismic cycle in the Himalaya of Nepal. *J Geophys Res*, 2000, 105: 13389–13407
- 19 Lavé J, Avouac J P. Active folding of fluvial terraces across the Siwaliks Hills, Himalayas of central Nepal. *J Geophys Res*, 2000, 105: 5735–5770
- 20 Zhao W, Nelson K D, Project INDEPTH Team. Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath southern Tibet. *Nature*, 1993, 366: 555–559

- 21 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 Geod*, 2006, 80: 567–589
- 22 Xu Z Q, Wang Q, Zeng L S, et al. Three-dimensional model of the Great Himalaya slice (in Chinese). *Chin Geol*, 2013, 40: 671–680 [许志琴, 王勤, 曾令森, 等. 高喜马拉雅的三维挤出模式. *中国地质*, 2013, 40: 671–680]
- 23 Wang C S, Dai J G, Zhao X X, et al. Outward-growth of the Tibetan Plateau during the Cenozoic: A review. *Tectonophysics*, 2014, 621: 1–13
- 24 Yin A. Cenozoic tectonic evolution of Asia: A preliminary synthesis. *Tectonophysics*, 2010, 488: 293–325
- 25 Zhang B, Cheng H H, Shi Y L. Calculation of the co-seismic effect of $M_s8.1$ earthquake, April 25, 2015, Nepal (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2015, 58: 1794–1803 [张贝, 程惠红, 石耀霖. 2015年4月25日尼泊尔 $M_s8.1$ 大地震的同震效应. *地球物理学报*, 2015, 58: 1794–1803]
- 26 Iyengar R N, Sharma D, Siddiqui J M. Earthquake history of India in medieval times. *Indian J History Sci*, 1999, 34: 181–237
- 27 Avouac J P. Mountain building, erosion, and the seismic cycle in the Nepal Himalaya. *Adv Geophys*, 2003, 46: 1–80
- 28 Toda S, Stein R S, Richards D K, et al. Forecasting the evolution of seismicity in southern California: Animations built on earthquake stress transfer. *J Geophys Res*, 2005, 110: B05S16, doi: 10.1029/2004JB003415
- 29 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 Geophys Res*, 2004, 109: B02303, doi: 10.1029/2003JB002607
- 30 Stein R S, King G C P, Lin J. Change in failure stress on the southern San Andreas fault system caused by the 1992 magnitude=7.4 Landers earthquake. *Science*, 1992, 258: 1328–1332
- 31 King G C P, Stein R S, Lin J. Static stress changes and the triggering of earthquakes. *Bull Seism Soc Amer*, 1994, 84: 935–953

Seismic activity of the 2015 Nepal $M_s8.1$ and $M_s7.5$ earthquakes

XUE Yan¹, LIU Jie¹, LIU ShuangQing², WANG YiXi² & YANG Wen¹

¹ China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China;

² Earthquake Administration of Tianjin Municipality, Tianjin 300201, China

The 2015 $M_s8.1$ Nepal earthquake occurred as the result of thrust faulting with low dip angle unilateral rupture along the Himalayan seismic belt. The aftershocks spread over a region with dimension of 170 km×60 km, striking along the direction of WNW-ESE. The mainshock and the strong aftershocks are all located at the two ends of this seismic region, while only few earthquakes occur in the middle, where the main rupture of the $M_s8.1$ earthquake occurs. The strongest aftershock of $M_s7.5$ is located at the east end and is significantly triggered by the main shock. The $M_s8.1$ and $M_s7.5$ event occurred in the seismic gap between the 1505 $M_w8.2$ Lo Mustang earthquake and the 1934 $M_w8.1$ Nepal-Bihar earthquake. Moreover no earthquakes with $M \geq 6.0$ occurs in the seismic gap since 1870. In the last 13 years, there exists a seismogenic gap of 590 km long without $M \geq 5.0$ earthquakes. Nineteen months before the 2015 $M_s8.1$ Nepal event, the seismogenic gap was broken. Noticed that the $M_s8.1$ earthquake sequence is located in the middle of the existing seismogenic gap, whose east and west parts are still quiescent. The calculated static Coulomb stress changes show that the $M_s8.1$ earthquake has apparent stress triggering effect to both sides of the faults. Taking into account the historical earthquake activity and the recurrence period, the seismic potential in the rupture zone of the 1505 $M_w8.2$ is higher, comparing to the rupture zone of the 1934 $M_w8.4$. The occurrences of the 2005 $M_w7.6$ Pakistan event and the 2015 $M_s8.1$ Nepal earthquake indicate that the Himalayan seismic belt has started a relatively active phase for $M_w \geq 7.0$ earthquakes.

2015 Nepal earthquake, rupture zone, seismic gap, stress triggering, Himalayan seismic belt

doi: 10.1360/N972015-00583

补充材料

图 S1 喜马拉雅地震带及附近地区 7 级以上地震震中分布与 $M-t$ 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.