

# 喜马拉雅造山带构造特征与2015年尼泊尔 $M_w$ 7.8级大地震

姚华建<sup>①②\*</sup>, 尹九洵<sup>①②</sup>

① 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 地震与地球内部物理实验室, 合肥 230026;

② 蒙城地球物理国家野外科学观测研究站, 亳州 233527

\* 联系人, E-mail: hjyao@ustc.edu.cn

国家自然科学基金(41374055)和中央高校基本科研业务费专项资金(WK2080000053)资助

2015年4月25日, 位于喜马拉雅碰撞造山带上的尼泊尔境内发生了震级( $M_w$ )7.8级的低角度逆冲推覆型强震, 发震断层为喜马拉雅主逆冲断裂。在其后的半个月后又先后发生了一系列的强余震, 造成了超过8000人的死亡及巨大的财产损失, 引起了国际社会及国内外地震学界的广泛关注。中国地震局地质研究所的刘静研究员、美国加州大学圣塔芭芭拉分校的纪晨教授等研究人员在《科学通报》上发表论文“2015年4月25日尼泊尔  $M_w$ 7.8级地震的孕震构造背景和特征”<sup>[1]</sup>, 该文系统地总结了喜马拉雅碰撞造山带及主震区的构造背景、区域历史强震分布、现代小地震活动情况和强震孕震的基本构造模式, 并通过地震波数据反演获得主震的破裂过程, 而且对该区域及其邻区的地震危险性进行了初步判断。这些结果为我们认识尼泊尔地震及其他同类型地震的震前、同震及震后形变提供了十分重要的信息, 也为中国地震预测及防震减灾工作提供了一些有价值的见解。

## 1 喜马拉雅造山带孕震构造背景

距今约5000万年前, 印度板块与欧亚大陆发生陆-陆俯冲碰撞, 逐渐形成现今举世瞩目的青藏高原<sup>[2]</sup>。自从陆陆碰撞以来, 印度板块与欧亚板块以每年40~50 mm的速率汇聚, 其中约一半的汇聚发生在青藏高原的南缘<sup>[3]</sup>, 形成了当今世界上最为活跃的陆-陆碰撞造山带——喜马拉雅造山带。该造山带长约2500 km, 宽300~500 km, 拥有一系列高峰, 包括世界海拔最高的珠穆朗玛峰。喜马拉雅造山带主要由一系列向南扩展的逆冲推覆构造体系组成, 从南到北依次分别为主前锋逆冲断裂(MFT)、主边界逆冲断裂(MBT)和主中央逆冲断裂(MCT), 这些断裂带在地壳深部汇聚于一个低角度喜马拉雅主逆冲断裂面(MHT)或滑脱面上(图1(a))<sup>[4]</sup>。由于喜马拉雅构造带区域内精细地震学成像研究还非常缺乏, 这几条主要大断裂面在地壳内的三维分布的横向变化还十分不清楚。

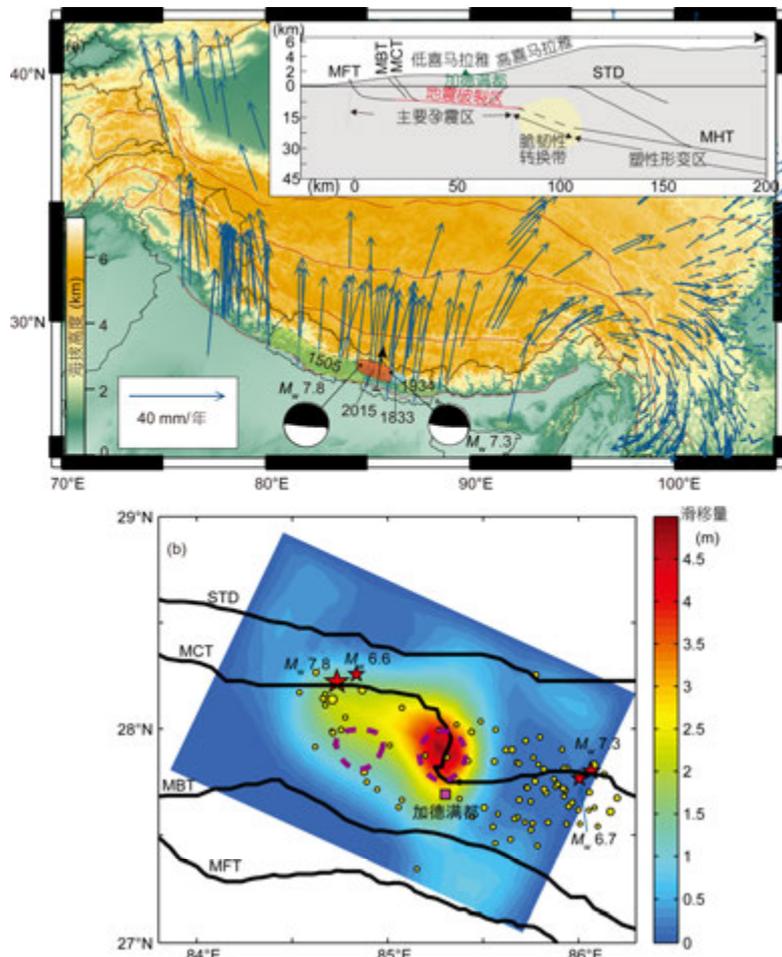
由于板块的快速汇聚作用, 喜马拉雅造山带一直是一个强震活动带, 有历史记录以来多次发生震级超过7.5级

的大地震, 包括4次8级以上的强震, 其中发生在尼泊尔及其附近区域的大地震有3次, 分别为1505中喜马拉雅地区木斯塘(Lo Mustang) $M_w$ ~8.2级地震、1833年尼泊尔 $M_w$ ~7.7级地震和1934年比哈-尼泊尔(Bihar-Nepal) $M_w$ ~8.1级地震(图1(a))<sup>[1,5]</sup>。这几次历史大地震在尼泊尔地区形成了一个大地震空区, 所以尼泊尔地区发生强震的风险性早已被地震学家所关注<sup>[6]</sup>。因为喜马拉雅造山带每年的汇聚速率将近18~20 mm, 刘静等人<sup>[1]</sup>推算喜马拉雅造山带发生8级强震(对应于4~6 m的平均同震位移)的复发周期大约在300~500年。2015年4月25日发生的 $M_w$ 7.8级尼泊尔大地震的起始位置很可能位于1505年木斯塘 $M_w$ ~8.2级大地震破裂区域的东缘, 该区域断层所累积的震间形变可能超过了10 m, 完全具备了触发强震的条件, 所以此次尼泊尔大地震的发生并不是一个意外。

喜马拉雅构造带中坡度平缓的低喜马拉雅地区(Lesser Himalaya)垂直和水平运动都不明显, 但在地形存在陡坡带的高喜马拉雅地区(Higher Himalaya), 其垂向位移场梯度快速增加<sup>[7]</sup>, 且下方的喜马拉雅主逆冲断裂倾角也变大, 小地震活动也主要集中分布在高喜马拉雅地形陡坡带之下的10~20 km深度范围内(图1(a))。这些结果显示出低喜马拉雅下的主逆冲断裂带主要处于脆性黏滑模式的闭锁状态<sup>[1,7]</sup>, 凹凸体(asperity)面积大, 是大地震孕育发生的主要区域, 小地震少; 但位于高喜马拉雅下的主逆冲断裂带很可能对应于脆韧性转换带<sup>[1]</sup>(图1(a)), 与长英质矿物在较高温度(>350℃)时发生塑性形变有关, 该区域凹凸体面积小, 易于发生小地震。而此次尼泊尔大地震的初始破裂区域的深度在12~15 km的深度, 很可能位于脆性闭锁区和脆韧性转换带之间的区域(图1(a))。

## 2 尼泊尔 $M_w$ 7.8级大地震破裂特征及余震分布特征

此次 $M_w$ 7.8级尼泊尔地震的震源机制解(例如美国地质调查局USGS的结果: [http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us20002926#general\\_summary](http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us20002926#general_summary))显示



**图 1** (a) 青藏高原地形地貌、地表 GPS 速度场<sup>[3]</sup>(蓝色箭头所示, 相对于欧亚大陆)、主要断裂带(红色线条)、2015 年尼泊尔  $M_w$ 7.8 级大地震破裂区(红色阴影区域)及其邻区的 3 个历史大地震破裂区<sup>[5]</sup>(绿色或蓝色阴影区域)。图中黑白色的震源球显示此次尼泊尔大地震的主震和最大余震( $M_w$ 7.3)的位置及震源机制。右上小图给出穿过红色主震破裂区中黑色线条和箭头所示剖面的构造简图(改自文献[4])及尼泊尔  $M_w$ 7.8 级大地震的发震断层及破裂区域(红色线条)示意图, 图中黄色区域显示现代小地震的主要发生深度区域(据文献[1])。 (b)  $M_w$ 7.8 尼泊尔大地震断层滑移分布(据张勇等人<sup>[8]</sup>)及主要余震分布图(黄色圆点), 其中主震及 3 个较大余震( $M_w$  6.6, 6.7, 7.3)的震中位置如图中红色五角星所示, 紫色虚线区域为刘静等<sup>[1]</sup>获得的两个滑移量较大的区域; MFT, 主锋逆冲断裂; MBT, 主边界逆冲断裂; MCT, 主中央逆冲断裂; STD, 藏南拆离系; MHT, 喜马拉雅主逆冲断裂

**Figure 1** (a) Tibetan Plateau topographic map, surface GPS velocity fields<sup>[3]</sup> (blue arrows, with respect to the Eurasian plate), major faults (red lines), 2015 Nepal  $M_w$ 7.8 earthquake rupture area (red shaded area) and rupture regions of 3 nearby large historical earthquakes (green or blue shaded regions). The beach balls in black and white denote the locations and focal mechanisms of the Nepal main shock and the largest aftershock ( $M_w$ 7.3). The upper right inset figure gives the tectonic sketch map (modified from Ref. [4]) as well as the Nepal  $M_w$ 7.8 earthquake seismogenic fault and rupture area (red line) along the profile shown as the black line and arrow across the red main shock rupture area. The yellow region in the inset figure shows the major depth range of current small earthquakes (from Ref. [1]). (b) Slip distribution on the fault of the  $M_w$ 7.8 Nepal earthquake (from Zhang et al. <sup>[8]</sup>) and distribution of major aftershocks (yellow dots); the mainshock and three large aftershocks ( $M_w$  6.6, 6.7, 7.3) are shown as the red stars; the purple dashed regions are the two major slip patches from Liu et al. <sup>[1]</sup>; MFT, main frontal thrust; MBT, main boundary thrust; MCT, main central thrust; STD, southern Tibetan detachment; MHT, main Himalayan thrust

该地震为一典型的喜马拉雅型低角度逆断层型强震, 主震发生在走向为 $\sim 293^\circ$ 、北向倾角为 $7^\circ\sim 10^\circ$ 的喜马拉雅主逆冲断裂上, 初始震中深度约在 $12\sim 15$  km, 位于尼泊尔首都加德满都西北约 $80$  km处<sup>[1]</sup>。刘静等人<sup>[1]</sup>采用远震体波数据的有限断层反演结果显示主震基本为向东的单侧破裂, 破裂持续时间约 $90$  s, 但 $90\%$ 以上的地震矩在前 $60$  s释放; 位移主要发生在 $10\sim 20$  km深度范围内, 最大同震断层滑移量达

$5$  m, 这与张勇等人<sup>[8]</sup>有限断层反演得到的最大滑移量接近(图1(b))。但由于数据选取和反演方法的差异, 刘静等人<sup>[1]</sup>的反演结果在断层面的两个区域上滑移量较大, 但张勇等人<sup>[8]</sup>仅在其中的一个区域(靠近加德满都)显示较大的滑移量(图1(b))。由于主震并没有造成明显的地表破裂, 此次尼泊尔大地震破裂区域的最大烈度在IX级左右, (<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us20002->

926#impact\_shakemap). 而2008年青藏高原东缘发生的 $M_w$ 7.9级汶川地震局部地区地表滑移量超过7 m, 沿龙门山断裂带狭长地区烈度普遍达到X级, 局部区域烈度达到XI级<sup>[9]</sup>, 所以造成了更大的建筑物破坏和人员伤亡.

此次尼泊尔大地震的余震主要分布在震中以东长150~170 km、宽约60 km的长方形区域内<sup>[1]</sup>, 且余震空间分布很不均匀, 大部分余震、包括3个逆冲型的强余震( $M_w$ 6.6, 6.7和7.3)均分布在余震区两端, 中部同震滑移较大区域余震稀疏(图1(b)). 此外, 此次逆冲型的尼泊尔大地震还触发了中国西藏日喀则地区的一系列正断层型的余震, 包括在定日县发生的 $M_s$ 5.9级地震. 主震破裂区的滑移量分布及余震的分布显示主震中部区域很可能释放了大部分震间累积的应变, 受主震破裂影响, 破裂区域边缘的库仑应力很可能增加, 从而更易于被触发产生余震.

### 3 讨论

虽然目前越来越多的研究小组已经通过不同的方法获得了此次尼泊尔大地震及其强余震的破裂过程, 但由于区域地震资料及三维精细速度模型和断层三维几何资料的欠缺, 我们对主震详细的破裂过程以及余震的空间分布

(尤其是深度分布)仍需要更为细致的研究, 这样才能更好地获得断层破裂滑移的准确区域及大小, 为评估该区域及其邻区的地震危险性提供更为可靠的地震破裂模型.

此次尼泊尔大地震打破了喜马拉雅构造带中部地区~80年没有强震的纪录, 是否会开启该区域大地震活跃性一个新的时代值得我们密切关注和进一步的研究. 此次尼泊尔大地震破裂的东缘已经与1934年比哈-尼泊尔 $M_w$ ~8.1级地震相邻, 考虑到喜马拉雅构造带8级强震的复发周期大约在300~500年, 所以此次主震东侧的1934年大地震破裂区再次发生强震的危险性可能不高. 但此次大地震的西侧很可能已经进入到了1505年木斯塘 $M_w$ ~8.2级大地震破裂区域的东部地区, 由于库仑应力的调整, 这很可能使得主震西侧发生强震的风险性显著增大. 此外, 这次尼泊尔地震发震断层(喜马拉雅主逆冲断裂)的主要破裂深度位于10~20 km, 20 km深度之下的断层很可能处于韧性变形, 但10 km之上的喜马拉雅主逆冲断裂仍然处于脆性变形的闭锁状态, 所以尼泊尔境内再次发生深度更浅的强震的可能性仍不容忽视. 如何做好尼泊尔境内及其西侧的地震和形变监测研究对于该区域的防震减灾工作具有重要的意义, 这些工作的有效开展需要国际地震学界的紧密合作.

**致谢** 感谢两位审稿人和编辑对本文提出的修改建议, 感谢加州大学洛杉矶分校(UCLA)的尹安教授及中国地震局地质研究所郭志博士提供青藏高原地区断裂带位置数据.

### 推荐阅读文献

- Liu J, Ji C, Zhang J Y, et al. Tectonic setting and general features of coseismic rupture of the 25 April, 2015  $M_w$  7.8 Gorkha, Nepal earthquake (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2015, 60: 2640–2655 [刘静, 纪晨, 张金玉, 等. 2015年4月25日尼泊尔 $M_w$ 7.8地震的孕震构造背景 and 特征. *科学通报*, 2015, 60: 2640–2655]
- Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2000, 28: 211–280
- Zhang P Z, Shen Z, Wang M, et al. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data. *Geology*, 2004, 32: 809–812
- 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
- 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
- Bilham R, Gaur V K, Molnar P. Himalayan seismic hazard. *Science*, 2001, 293: 1442–1444
- Bilham R, Larson K, Freymueller J, et al. GPS measurements of present-day convergence across the Nepal Himalaya. *Nature*, 1997, 386: 61–64
- Zhang Y, Xu L S, Chen Y T. Rupture process of the 2015 Nepal  $M_w$  7.9 earthquake: Fast inversion and preliminary joint inversion (in Chinese). *Chin J Geophys*, 58: 1804–1911 [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*, 58: 1804–1911]
- Zhang P Z, Wen X Z, Shen Z K, et al. Oblique, high-angle, listric-reverse faulting and associated development of strain: The Wenchuan earthquake of May 12, 2008, Sichuan, China. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2010, 38: 353–382