

# 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

刘静<sup>①\*</sup>, 纪晨<sup>②</sup>, 张金玉<sup>①</sup>, 张培震<sup>①</sup>, 曾令森<sup>③</sup>, 李占飞<sup>①</sup>, 王伟<sup>①</sup>

① 中国地震局地质研究所, 地震动力学国家重点实验室, 北京 100029;

② Department of Earth Science, University of California, Santa Barbara CA93106, USA;

③ 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

\* 联系人, E-mail: liu-zeng@ies.ac.cn

2015-05-21 收稿, 2015-06-26 接受, 2015-08-03 网络版发表

中国地震局地震行业专项(201308012)、国家杰出青年科学基金(41225010)和地震动力学国家重点实验室自主课题(LED2014A02)资助

**摘要** 2015 年 4 月 25 日尼泊尔发生  $M_w$ 7.8 级大地震, 震源机制解结果一致表明该地震为低角度逆冲型。迄今发生百余次余震, 其中包括  $M_s$ 7.0 级以上强余震, 并触发正断层型小震群。此次地震发生于喜马拉雅碰撞造山带中段, 位于 1934 年比哈-尼泊尔  $M_w$ ~8.1 级和 1505 年木斯塘  $M_w$ ~8.2 级地震之间的地震空区内, 是自 1950 年察隅  $M_w$ ~8.4 级地震以来喜马拉雅主逆冲断裂上发生的最大震级地震。为更好地理解这次地震, 本文综述喜马拉雅造山带的构造背景、断裂组合构成和几何形态、历史强震分布和破裂范围、现代小地震活动性特征、强震孕育的基本模式、震间加载和同震位移的空间互补性。在简单介绍同震破裂的断面初始解基本特征基础上, 初步讨论了这次尼泊尔地震与喜马拉雅带特征型地震的关系, 与 2008 年汶川地震的比较, 以及低角度逆冲地震破裂的地表出露和对区域地震危险趋势的指示意义等问题。

## 关键词

喜马拉雅碰撞造山带  
喜马拉雅主逆冲断裂  
尼泊尔  $M_w$ 7.8 级地震  
低角度逆冲型地震  
构造背景  
强震孕育模式

北京时间 2015 年 4 月 25 日 14 时 11 分在尼泊尔 (84.708°E, 28.147°N) 发生  $M_w$ 7.8 级地震, 震源深度 12~15 km ([http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us20002926#general\\_summary](http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us20002926#general_summary); <http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/468/553/101803/index.html>)。震中距离尼泊尔首都加德满都西北约 80 km, 尼泊尔第二大城市波克拉往东 60 km, 造成超过 8000 人死亡, 百万人的生活受到影响。此次地震发生于喜马拉雅碰撞造山带中段, 位于 1934 年比哈-尼泊尔  $M_w$ ~8.1 级和 1505 年木斯塘  $M_w$ ~8.2 级地震之间的地震空区。多家机构的快速震源机制解结果一致表明该地震为低角度逆冲型。主震后的 10 天内发生百余次余震, 其中包括主震 30 min 后的  $M_s$ 7.0 级强余震, 及其定结-定日之

间触发的正断层型小震群。17 天后, 于 5 月 12 日再次发生  $M_s$ 7.5 级地震, 位于主震东北方向, 靠近中国的樟木口岸。4 月 25 日的尼泊尔地震是自 1950 年以来喜马拉雅带上发生的最大震级地震, 将为我们提供大量的数据, 更深入理解喜马拉雅造山带及类似构造环境低角度逆冲断裂的孕震、同震和震后过程。

## 1 构造背景

喜马拉雅碰撞造山带是地球上最具代表性的、仍在活动的陆-陆碰撞型造山带, 属于青藏高原的南边界, 是新生代印度板块和欧亚板块陆陆碰撞作用的结果和板块汇聚的主要变形带<sup>[1~5]</sup>。自 ~55 Ma 陆陆碰撞以来, 印度和欧亚板块以 ~50 mm/a 的速率汇聚<sup>[6]</sup>。

**引用格式:** 刘静, 纪晨, 张金玉, 等. 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. 科学通报, 2015, 60: 2640–2655

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, doi: 10.1360/N972015-00559

长期的碰撞和高速率汇聚过程形成了目前地球上海拔最高、面积最大的青藏高原和广泛分布的活动断裂<sup>[7-12]</sup>。地壳缩短速率大,强震频发,形成了拥有一系列世界海拔最高峰的山链,季风降雨和侵蚀作用强烈,地形起伏大,是研究不同时间尺度造山作用的经典实验场。

喜马拉雅造山带呈E-W向弧形展布(图1),长2500 km,宽300~500 km,北侧以雅鲁藏布江缝合带与拉萨地体南部的冈底斯活动陆缘增生带为邻,南侧以喜马拉雅主前锋逆冲断层(MFT)与印度克拉通为界,东、西两端分别为著名的东构造结和西构造结<sup>[14,15]</sup>。

作为印度和欧亚碰撞结合部位和前锋地带,喜马拉雅碰撞造山带经历了广泛的地壳水平缩短和垂向加厚作用,形成了数条延伸上千千米以上的构造带,如大型逆冲断层——主中央逆冲断层(MCT),主边界逆冲断层(MBT)和主前锋逆冲断层(MFT)等一系

列向北倾斜但倾角不同的逆冲断裂<sup>[16-19]</sup>。往北越过喜马拉雅最高峰山链是大型伸展构造——藏南拆离系STDS<sup>[20]</sup>或北喜马拉雅正断层<sup>[2]</sup>和雅鲁藏布江缝合带。喜马拉雅造山带由印度陆块边缘的前寒武纪变质基底,特提斯沉积岩以及侵入其中的古生代花岗岩及其他性质的岩浆岩、新生代花岗岩组成。自北向南依次划分为4个构造单元:特提斯喜马拉雅带、高喜马拉雅结晶岩系、低喜马拉雅岩系和次喜马拉雅岩系。它们之间的界限分别为藏南拆离系、主中央逆冲断层和主边界逆冲断层(图1)。

喜马拉雅逆冲构造体系形成的同时,藏南地区经历了广泛的伸展作用,形成多种形式的伸展构造,包括:(1)沿喜马拉雅山脉北坡东西向展布的藏南拆离系,(2)南北向裂谷系,(3)北喜马拉雅片麻岩穹隆,(4)新生代断陷盆地。其中藏南拆离系记录了垂直于造山带方向的拉张。近等间隔分布的南北向裂谷是近平行于喜马拉雅造山带的东西向伸展的表现,

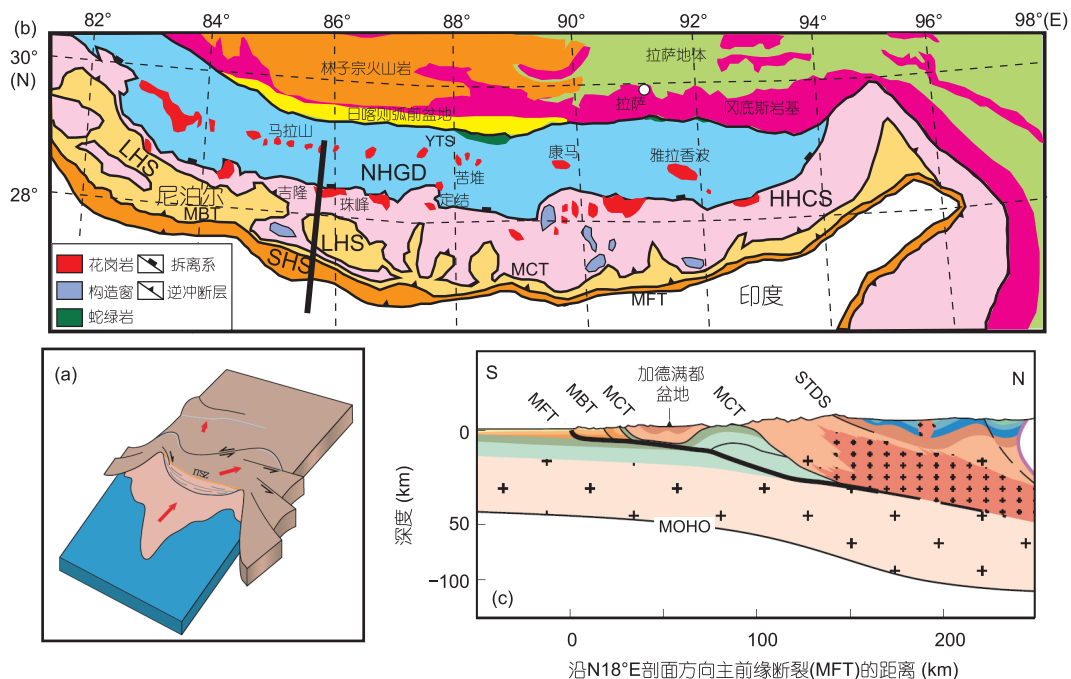


**图1** 喜马拉雅-藏南构造和地质简图。(a) 印度和欧亚碰撞及其变形分解样式的卡通示意图。(b) 藏南喜马拉雅造山带地质简图。YTS, 雅鲁藏布江缝合带; STDS, 藏南拆离系; MCT, 主中央逆冲断层; MBT, 主边界逆冲断层; MFT, 主前锋逆冲断层; NHGD, 北喜马拉雅片麻岩穹隆; HHCS, 高喜马拉雅结晶岩系; LHS, 低喜马拉雅岩系; SHS, 次喜马拉雅岩系。(c) 沿N18°E方向剖面, 穿过加德满都盆地的深部断裂和构造几何样式(改自Lavé和Avouac<sup>[13]</sup>)

**Figure 1** Simplified geological and tectonic maps of the Himalaya-Tibet collision zone. (a) Cartoon showing the India-Eurasia collision and associated strain partitioning. (b) Simplified geological map of the Himalaya-southern Tibet orogenic belt. YTS, Yalung-Tsangbo Suture; STDS, South Tibet Detachment System; MCT, Main Central Thrust; MBT, Main Boundary Thrust; MFT, Main Frontal Thrust; NHGD, North Himalayan Gneiss Domes; HHCS, High Himalayan Crystalline series; LHS, Lower Himalayan metasedimentary series; SHS, Sub-Himalayan molasse series. (c) Cross-sectional view of subsurface fault geometry of the Himalayan thrust fault system, along N18°E-trending profile through the Kathmandu basin (modified after Lavé and Avouac<sup>[13]</sup>)

从东到西有桑日-错那、亚东-古露、尼玛-定日、申扎-定结、马拉山-吉隆等裂谷,是现今浅源正断层型地震发育区。

主喜马拉雅逆断裂(MHT)是一发育在中上地壳的滑脱面,由断坡-断坪组成。地表出露的主前锋逆断裂(MFT)、主边界逆断裂(MBT)和主中央逆断裂(MCT)在地壳深部统一汇集于一个低角度逆冲断层或滑脱面(MHT)上。地震测深、重力和MT研究均表明,藏南35~40 km深处有一个强反射界面,对应于MHT往北的深部延长线<sup>[21~25]</sup>。其中,MCT记录了两期活动历史<sup>[26]</sup>,分别在23~17 Ma<sup>[27,28]</sup>和10~3 Ma<sup>[29]</sup>。MBT的活动开始于11 Ma<sup>[30]</sup>。MFT是活动断裂,伴随着一系列现今主要的大地震。STDS是一个大型北倾低角度正断层系,与MCT一起将高喜马拉雅结晶岩系限定为向南逆冲的楔形,早期观点认为:STDS为地壳减薄时发生的北向拆离断层,活动时限为26~12 Ma<sup>[2~4,20,31,32]</sup>;最近越来越多的学者认为,STDS经历了两期不同应力状态下的变形,早期为反向逆冲断层,在地壳缩短条件下向南逆冲(~35 Ma)<sup>[33~36]</sup>。总体上来说,喜马拉雅造山带形成一个向南扩展的前展式逆冲推覆带,即从主中央逆冲断裂,到主边界逆冲断裂,再到主前锋逆冲断裂,活动是依次向南发展,起始时间逐渐变新<sup>[16~19,37]</sup>。这样的几何结构和发育特征启发了部分学者把喜马拉雅看作一个地壳尺度增生楔的观点<sup>[38]</sup>。

目前喜马拉雅的变形前锋或最新活动集中在主前锋逆冲断裂,这一认识主要是基于第四纪活动断裂和断裂相关褶皱变形特征的研究<sup>[39]</sup>。其研究思路是,假设河流纵剖面保持稳定,不随时间变化,那么阶地拔河高度可以示踪变形量/抬升量。通过测量阶地拔河高度和阶地形成年龄,即可得到第四纪抬升速率,并推算水平缩短率。Lavé和Avouac<sup>[40]</sup>利用穿过喜马拉雅山的河流,主要是加德满都附近的Bagmati河和Bakeya河两岸残留的四级全新世河流基座阶地,得到如图2所示的沿N18°E剖面抬升速率及变化。结果表明,出露于次喜马拉雅的各条逆冲断裂中,主前锋逆冲断裂(MFT)是最主要的全新世活动断裂,绝大部分变形由此断裂所承载,断裂上盘抬升速率达10 mm/a,且集中在1~14 km宽的范围内(图2)。他们利用断裂相关褶皱理论得到水平缩短速率为 $21 \pm 1.5$  mm/a,与GPS得到的跨整个喜马拉雅造山带的弹性应变累积速率<sup>[41~43]</sup>,以及地质时间尺度得到的16~25 mm/a

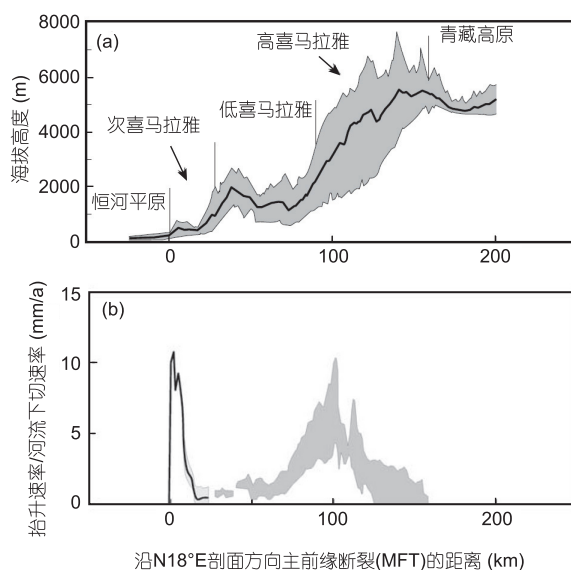


图2 沿N18°E剖面方向主前缘断裂(MFT)的距离(km)利用河流阶地得到的全新世抬升速率(实线)和推测的河流下切速率(灰色条带)(改自Lavé和Avouac<sup>[13]</sup>)

Figure 2 (a) General topography and (b) pattern of Holocene uplift rate (solid line) from deformed river terraces, and calibrated river incision rate (gray band) inferred from stream power calculation across the Himalayan orogenic belt, along the N18°E-trending profile (modified after Lavé and Avouac<sup>[13]</sup>)

的缩短速率<sup>[44]</sup>均十分吻合。此外,Lavé和Avouac<sup>[40]</sup>还通过河流下切水动力理论计算(stream power)外推基岩区即河流阶地不发育的高、低喜马拉雅带的河流下切速率。分析表明,低喜马拉雅地区河流下切速率低,1~3 mm/a,但在高喜马拉雅带尤其是地形陡坡带上,河流下切速率快速增加,在50 km宽的范围內达7~8 mm/a,之后快速下降,在MFT之北150 km附近,下切速率降至约等于零(图2)。其中高喜马拉雅带內下切速率高值区对应于中下地壳的断坡位置。

## 2 历史强震

印度板块和欧亚大陆的激烈碰撞作用表现在近南北向相对缩短速率可达50 mm/a,现今的汇聚速率略有降低,但仍以30~40 mm/a的速率向北运动<sup>[6,45~47]</sup>。其中近一半的板块汇聚缩短发生在喜马拉雅构造带內。横跨喜马拉雅造山带中部、位于尼泊尔境内的GPS测线上,过去一二十年的大地测量数据表明印度和藏南之间的相对缩短速率大致为17~21 mm/a<sup>[48]</sup>。活动构造和古地震等地质方法得到类似的结果<sup>[11,49~53]</sup>。

喜马拉雅带上承载的汇聚作用最终主要以喜马

拉雅主逆冲断层上重复发生大地震永久变形的形式来体现. 沿着喜马拉雅构造弧形带, 已知历史上发生过至少8次 $M_w$ 7.5级以上大地震, 从西到东分别为2005年克什米尔(Kashmir) $M_w$ 7.6级地震、1905年坎格拉(Kangra) $M_w$ ~7.8级地震、1803年库马恩(Kumaon) $M_w$ ~7.5级地震、1505年中喜马拉雅(middle Himalaya)或木斯塘(Lo Mustang) $M_w$ ~8.2级地震、1833年加德满都(Kathmandu) $M_w$ ~7.6级地震、1934年Bihar-Nepal(比哈-尼泊尔) $M_w$ ~8.1级地震、1950年察隅(Assam-Tibet) $M_w$ ~8.4级地震和1897年西陇高原(Shilong) $M_w$ ~8.1级地震<sup>[54-65]</sup>(图3).

其中, 1934年1月15日发生的Bihar-Nepal大地震<sup>[54,67]</sup>是尼泊尔境内距今最近的上一次大地震, 死亡人数高达16000人. 关于该地震的具体位置和大小等依然有较大的争议. 震中有可能位于加德满都以东的低喜马拉雅山区<sup>[67]</sup>. Molnar和Deng<sup>[68]</sup>利用长周期地震波记录, 假定断面为倾角5°的北倾逆冲断层, 计算得到地震距大约为 $4.1 \times 10^{21}$  Nm, 即 $M_w$ =8.4. 之后, Bilham等人<sup>[69]</sup>根据水准资料估算前陆沉降量和地震宏观烈度分布推算该地震可能产生了沿着走向长约250~300 km的破裂带(图3). 破裂延伸地表处对应的断裂可能是主前锋断裂(MFT)<sup>[55]</sup>. 关于该次地震是否对应地表破裂也颇有争议. Lavé等人<sup>[52]</sup>认为该地震没有地表破裂, 而公元~1100年发生了一次巨大的地震, 形成高达8 m的陡坎. 但是, 最新的古地震和断裂填图研究认为1934年比哈-尼泊尔地震的破裂到达地表,

地层被错断了5~7 m, 并沿着山前形成至少150 km长的破裂带, 断裂上盘普遍抬升了4~5 m<sup>[70]</sup>.

1505年木斯塘地震( $M_w$ ~8.2)发生相对久远, 古地震研究表明该地震破裂长度可能达到600 km, 同震位移的抬升量高达12~20 m<sup>[51,71]</sup>, 与大洋俯冲边界上的特大地震, 如1964年阿拉斯加( $M_w$ 9.2)、1960年南美智利( $M_w$ 9.5)和2004年印尼苏门答腊( $M_w$ 9.0)等大地震的破裂规模相当, 是1934年比哈-尼泊尔地震破裂长度的2倍. 1934年地震和1505年地震的破裂区之间存在一个长约200 km的地震空区. 1833年地震发生在这个区段的东部一小段, 其破裂面可能是1934年地震破裂区的一部分<sup>[59]</sup>. 1505年地震破裂以西, 可能发生1803年地震, 震级估算为~7.5级<sup>[72]</sup>.

1905年坎格拉地震( $M_w$ ~7.8)造成大约20000人死亡, 占震中区总人口的55%, 100000房屋倒塌<sup>[55,73]</sup>, 被认为是印度死亡人数最大的地震之一. 由于该地震发生时属于地震仪记录的早期阶段, 通过地震波形估算的面波震级误差较大,  $M_s$ =7.5~8.6<sup>[74,75]</sup>, 目前认为其震级更接近低值 $M_w$ 7.5~7.8<sup>[56]</sup>. 1905年坎格拉地震也没有产生地表破裂<sup>[56,71]</sup>, 但在破裂区对应的喜马拉雅主前锋断裂上(78°E), Wesnousky等人<sup>[49]</sup>发现更早的古地震事件, 地震复发周期为290~980 a, 平均位移为5~10 m, 这与18~21 mm/a的缩短速率也是相匹配的.

在东构造结附近发生的1950年察隅大地震( $M_w$ 8.4)是20世纪发生的第十大地震, 是陆地上发生

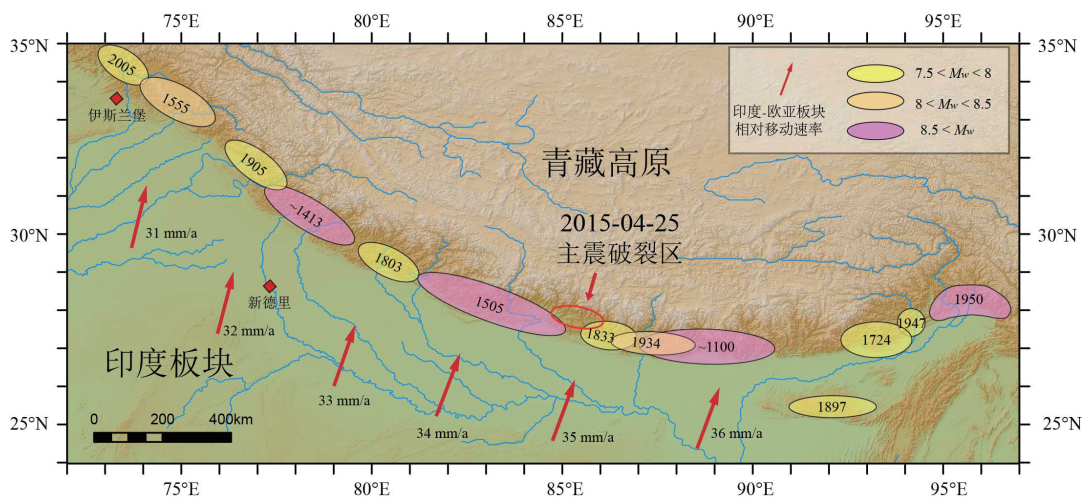


图3 喜马拉雅主逆冲断裂带的历史地震和古地震事件的时空分布汇总图. 已知或推测的喜马拉雅带最新7次 $M_w \geq 7.5$ 级大地震的强烈震感区或破裂范围平面展布(改自 Avouac<sup>[66]</sup>)

Figure 3 Synopsis of historical and paleoseismic history along the Himalayan Frontal Thrust. The upper panel show map view of areas of strong ground shaking associated with seven  $M_w \geq 7.5$  historical earthquakes (surrogates roughly rupture length). Modified from Avouac<sup>[66]</sup>

的最大震级地震,造成大量的滑坡和地形变化,余震活动强、数量多,8 h以后发生的最大余震,震级达 $M\sim 8$ <sup>[76]</sup>.该地震的最大特点之一是造成地形的极大改变.极震区地震烈度高达XII度,区内多处大规模雪崩、冰崩和山脊崩塌,堵塞雅鲁藏布江;并产生大量的次生灾害,如泥石流和碎石流等.曾经认为该地震的震源机制为走滑<sup>[77]</sup>.但后来纠正为逆冲断裂,发震断裂为喜马拉雅主逆冲断裂<sup>[67]</sup>.由于地处偏远,研究程度偏低,到目前为止还没有发现1950年大地震的地表破裂.

加德满都地区在1934年地震之前还经历过多次历史大地震<sup>[78,79]</sup>.迄今为止已知的主要破坏性事件分别发生在公元1223, 1255, 1344, 1408, 1681和1833年.其中公元1255年地震破坏比较严重,造成包括Abhaya Malla国王在内的加德满都近1/3人口死亡<sup>[79]</sup>.记录表明,在加德满都一些建于15世纪中叶的宫殿和庙宇一直完整保存到1934年地震之前,因此15世纪到1934年之间的发生地震,如1681, 1408和1833年地震的破坏程度可能小于1934年地震.而公元1255年的地震与1934年地震的地震烈度和影响范围可能最相似,推测其震级可能相当<sup>[66]</sup>.如果这两次地震可以大致看作为重复性特征大地震,那么1934年比哈-尼泊尔地震的原地重复间隔大概是700 a.虽然这样的估算相当粗略,但量级应该差别不大,这与古地震探槽研究结果类似<sup>[49-53,70,71]</sup>.

总之,喜马拉雅构造带强震复发间隔的研究程

度有待提高,单个探槽揭露的古地震事件次数较少,研究和认识在不断更新中.作为数量级参照,可以用如下简单推算:如果假定喜马拉雅主前锋断裂上类似于1934年比哈-尼泊尔地震为特征型地震( $M_w\sim 8$ ),平均垂向同震位移为4~6 m<sup>[70]</sup>,近地表断裂倾角为 $\sim 20^\circ$ ,平均缩短速率为18~20 mm/a,那么大地震的重复间隔约300~500 a<sup>[70]</sup>.而如果以同震垂向位移达8~13 m ( $M_w$ 约8.8~9级)的特大地震为特征地震的话<sup>[52,71]</sup>,其重复间隔为600~1300 a.

### 3 现代小震活动性

尼泊尔地震台网(DMG)记录表明,现代小地震活动频繁且集中分布在高喜马拉雅地形陡坡带之下为10~20 km的深度,在平面上呈较窄的带状展布<sup>[80,81]</sup>(图4).小震分布条带也是水准测量得到的抬升速率较高部位<sup>[82,83]</sup>.其北界与3500 m地形等高线有较好的对应性,可能代表随着海拔增加、地形加载,应力的垂向分量增加,使得应力张量(stress tensor)变化达到阈值后,差应力不再受影响,甚至减弱<sup>[66,80,84,85]</sup>.沿喜马拉雅带走向上,小震分布较连续,没有明显空段,不仅在1934年比哈-尼泊尔地震破裂对应的区段小震密集,历史上没有大地震的断裂段小震分布也有同样的特征.

Cattin和Avouac<sup>[86]</sup>的三维数值模拟结果显示图5所示的断裂几何模型虽然简单但可以较好地解释大地测量和微震观测数据的主要特征.该模型的主要

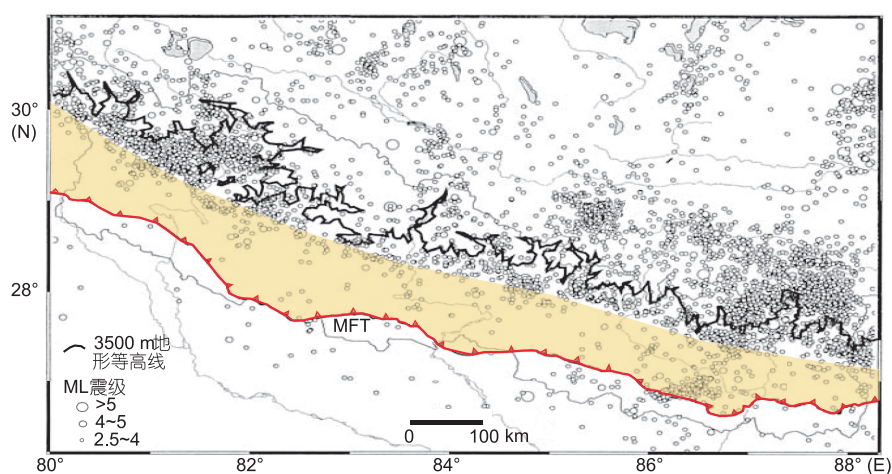


图4 尼泊尔区段的喜马拉雅构造带现代小震分布图.小地震分布呈相对窄的带.黄色区域代表闭锁部分断面在地表的投影,小震活动相对弱(改自 Bettinelli 等人<sup>[82]</sup>)

Figure 4 Distribution of modern microseismicity in Nepal Himalayan orogenic belt. Small earthquakes are located within a relatively narrow band. Yellow region denotes surface projection of the locked fault at depth, where small earthquakes are few, in accord with the locking condition (modified from Bettinelli et al.<sup>[82]</sup>)

构成包括: 断裂从MFT-MHT往北100 km到深部(对应于高喜马拉雅地形开始变陡的地方)完全闭锁, 以大地震重复的黏滑方式活动, 而往北高喜马拉雅到藏南发生震间形变的集中区并逐渐过渡到稳滑(蠕滑)的性质。这使得闭锁段沿断面向下延伸部分应力集中, 诱发小震活动。应力分析表明小地震密集区对应于库伦应力的高值区<sup>[84~86]</sup>。小地震分布虽然对应力加载的部位具有指示意义, 但所释放的地震矩微乎其微, 而应力累积绝大部分由大地震或特大地震来释放。

#### 4 喜马拉雅构造带强震孕育的基本构造模式

喜马拉雅构造带大地震的孕育模式与该造山带断裂体系的几何形态有密切关系。喜马拉雅带被看作一个地壳尺度增生楔<sup>[39]</sup>。该理论认为造山带类似于推土机前方的截面为三角形的楔形体, 具有临界稳态几何形状, 楔形体的地形坡度和底面滑脱层间的夹角维持一个定值, 使得其形状保持一个临界状态, 反映了楔体底部断面上的摩擦应力与楔体上部地形加载对应的断面剪应力之间的平衡<sup>[38,87,88]</sup>。通过变形前缘向南扩展生长和增生楔体内部的变形实现地壳增厚和地形生长, 同时维持地形坡度保持恒定不变。根据该理论模型, 与低喜马拉雅地形相对应, 喜马拉雅主逆冲断裂向北低倾 $\sim 7^\circ$ , 而高喜马拉雅地形陡坡带之下, 断裂倾角变大 $\sim 10^\circ$ 。因此喜马拉雅主逆冲断裂的深部几何形态为如图5(c)所示的断坪-断坡的基本特征。

这一理论框架也有助于我们理解喜马拉雅带震间形变和不同震级大地震的同震变形及其互补性<sup>[66,80]</sup>。20多年的GPS大地测量研究表明喜马拉雅主逆冲断裂及前锋断裂处于闭锁状态, 体现在相对于恒河平原, 低喜马拉雅地区几乎不动, 垂直和水平形变都不明显<sup>[41~43]</sup>。但在加德满都以北的高喜马拉雅, 位移场梯度快速增加, 从3 mm/a增到15 mm/a(对应于MFT以北75~125 km的区间; 图5(a)), 之后缓慢增加至20 mm/a。与此对应, 水准测量也显示该区间垂向位移速率增加的梯度最大<sup>[83]</sup>(图5(b))。因此, 高喜马拉雅之下的区域对应于脆韧性转换带, 发生强烈的垂直和水平形变, 大多数震间期小地震也发生在这一部位。研究发现, 与大洋俯冲带类似, 闭锁区下缘所到达的深度与地温有密切的关系。温度为350~500℃的深度范围小地震数量快速衰减, 而小地

震最多的部位对应于350℃等温线与MHT的交汇处附近<sup>[48,80]</sup>。这与实验结果推测的结果吻合, 即富含石英和长石的岩石在350℃附近会发生从脆性黏滑到黏性稳滑的转变, 这样浅部的速度弱化区过渡到深部的速度强化区<sup>[89,90]</sup>, 其他机制也可能起到一定的作用如该深度范围可能存在的脱水效应也进一步弱化断层面的强度<sup>[91,92]</sup>。沿断裂的走向上弹性应变和应力加载速率有明显差异, 代表断裂耦合度或闭锁度(seismic coupling)的横向变化<sup>[48]</sup>, 这可能与断裂带几何形态, 如断裂倾角的细微变化有关, 也可能代表震间加载过程的非稳态性。这种特征与大洋俯冲带类似, 即在凹凸体附近应力相对集中, 断裂耦合度增高<sup>[93]</sup>。

因此, 现代小震和地壳运动观测均刻画了断面的闭锁状态和应力加载的空间分布特征, 即从前锋断裂到中地壳的断坡处于闭锁状态、小地震少, 而高喜马拉雅到青藏高原南部地区之下, 断裂的深部延伸部分处于稳滑状态; 二者之间的区段, 闭锁段下缘到稳滑段的过渡带则承受震间应力加载, 小震频繁发生。

如果说GPS和水准测量勾画了震间弹性形变的图像, 那么永久性变形最终是由1934年比哈地震这样的大地震或特大地震的同震位移和上盘变形来实现。图6(a)图示了喜马拉雅低角度逆冲推覆断裂主断面上震间闭锁区和韧性剪切区的几何特征以及地表垂向速率分布状况。震间累积的上地壳弹性应变最终以MFT上不可恢复的破裂和断裂位移。喜马拉雅主断裂体系可能存在2~3种大地震破裂形式。一种是震级略小(图6(c)), 破裂和位移主要发生在低和高喜马拉雅地形陡坡带的底部, 断面相对较陡, 但是破裂没有沿断面往南扩展至地表, 造成这种破裂行为的可能原因是低倾角断裂面周围介质的弹性应力水平偏低。这种破裂形式的地震, 其作用反而会造成位于低喜马拉雅区段的低倾角滑脱层断面上应力加载。第二种大地震, 破裂发生于喜马拉雅主逆冲断裂较浅部位, 并沿主前锋断裂一直达到地表, 从而伴有地表破裂(图6(d))。2005年克什米尔 $M_w 7.6$ 地震属于该种类型, 其破裂和位移集中在10 km以上的浅部断面<sup>[94]</sup>, 并伴有 $\sim 70$  km长的地表破裂带<sup>[95]</sup>; 而另一种, 如震级约 $M 8\sim 8.5$ 级甚至更大的地震, 整个断裂面从深度到浅部均发生破裂, 并直达地表, 造成明显的山体抬升和断裂出露地表处大位移抬升量(图6(b)), 1505年木斯塘 $M_w 8.2$ 级地震, 1934年比哈-尼泊尔 $M_w 8.1$ 级地震,

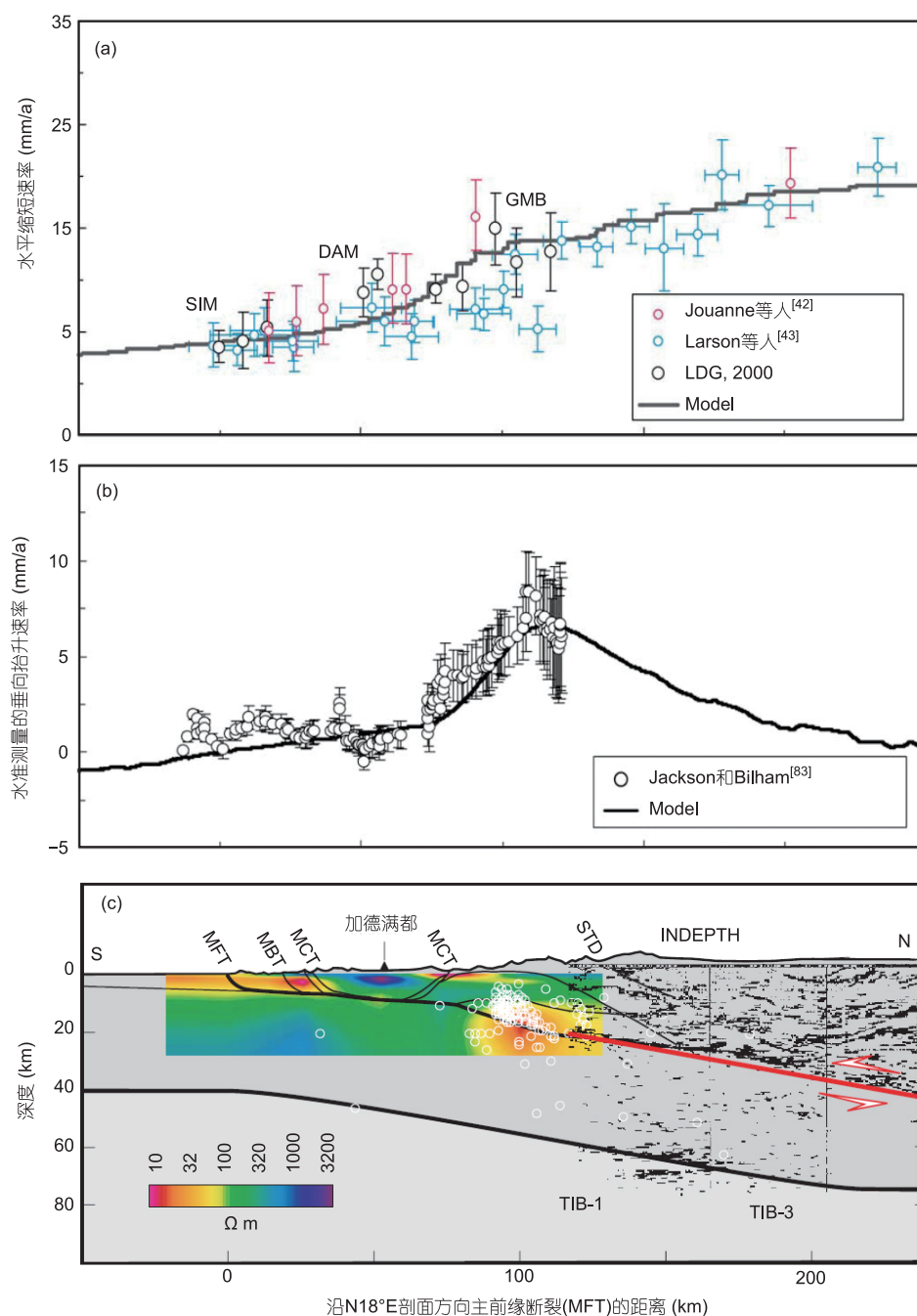


图 5 沿 N18°E 剖面线(a) GPS 观测得到的水平缩短速率和(b)水准测量得到的垂向抬升速率, 以及 Cattin 和 Avouac<sup>[86]</sup>的模型拟合线. (c) INDEPTH 地震和 MT 的地壳结构解释<sup>[22-24]</sup>, 现代小地震分布<sup>[81]</sup>以及断裂几何的构造剖面图

**Figure 5** Patterns of (a) horizontal shortening rate from GPS geodesy and (b) vertical uplift rate from leveling, in comparison with model fits of Cattin and Avouac<sup>[86]</sup>, using stable Indian continent as the reference (zero). (c) Interpretation for crustal structure based on INDEPTH seismic and MT data<sup>[22-24]</sup>, modern microseismicity distribution<sup>[81]</sup>, and structural cross-section for fault geometry

1950年察隅 $M_w$ 8.4级地震可能属于这种类型的全断面破裂. 本次尼泊尔地震的破裂更像如图6(b)所示类型, 也显示喜马拉雅构造带强震破裂和应力释放形式具多样性.

## 5 尼泊尔大地震的震源机制和破裂断面初始解

4月25日尼泊尔 $M_w$ 7.8地震, 震中位于加德满都

北西80 km, 并距1934年比哈-尼泊尔地震的推测震中西约20 km处。该次地震震源机制解数据显示, 主震的发震断层为一条走向293°, 向北倾斜7°~10°的喜马拉雅主逆冲断裂, 滑移矢量近乎垂直断层走向, 故该断层为一低角度逆冲断层, 属于典型的喜马拉雅型—低角度逆断层型强震([http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us20002926#general\\_summary](http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us20002926#general_summary); [www.globalcmt.org](http://www.globalcmt.org))。余震分布在震中往东的150 km长、60 km宽的方形范围内, 在震中以西则很少, 与主震的往东单侧破裂扩展和发生位移的断面位置相匹配。主震3 h后, 在中国境内的定日-定结之间还发生了一簇震级为2~5.7级的小地震, 其中震级较大地震的震源机制为正断层(<http://www.cea-igp.ac.cn/jjxcjsxj/272370.shtml>)。远场地震波反演结果表明, 主震位移主要发生在10~20 km的深部, 水平上距离MFT 50~120 km(图7), 最大位移达5 m。同震滑动分布相对集中, 大位移值区间在平面上位于震中和加

德满都之间, 东西向长约100 km和南北向50 km的范围。反演结果与一些同样利用远场震波数据反演得到的断面位移解类似(如[http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us20002926#general\\_summary](http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us20002926#general_summary); <http://www.earthobservatory.sg/news/april-25-2015-nepal-earthquake#.VYZppLX87wO>; [http://www.itpcas.cas.cn/xwzx/zhxw/201504/t20150426\\_4344080.html](http://www.itpcas.cas.cn/xwzx/zhxw/201504/t20150426_4344080.html)), 但细节上有一些差别, 比如大位移区值不是一个连续的整体均匀的分布, 而是由2~3个相连的大位移区组成, 体现小尺度的空间不均匀性。破裂断面的静态位移场反演结果与断面划分网格大小, 波形数据和反演方法均有关系。图7所示反演结果使用了较小的断面网格(5 km×6 km), 波形拟合时使用了速度而非位移拟合(强调高频成分), 试图提高反演结果的高频成分和空间不均匀度。图7(a)和(b)分别为穿过震中和加德满都的剖面上, 断面位移分布与地形的对应关系, 显示出位移主要发生在高和低喜马拉雅的地形转换带

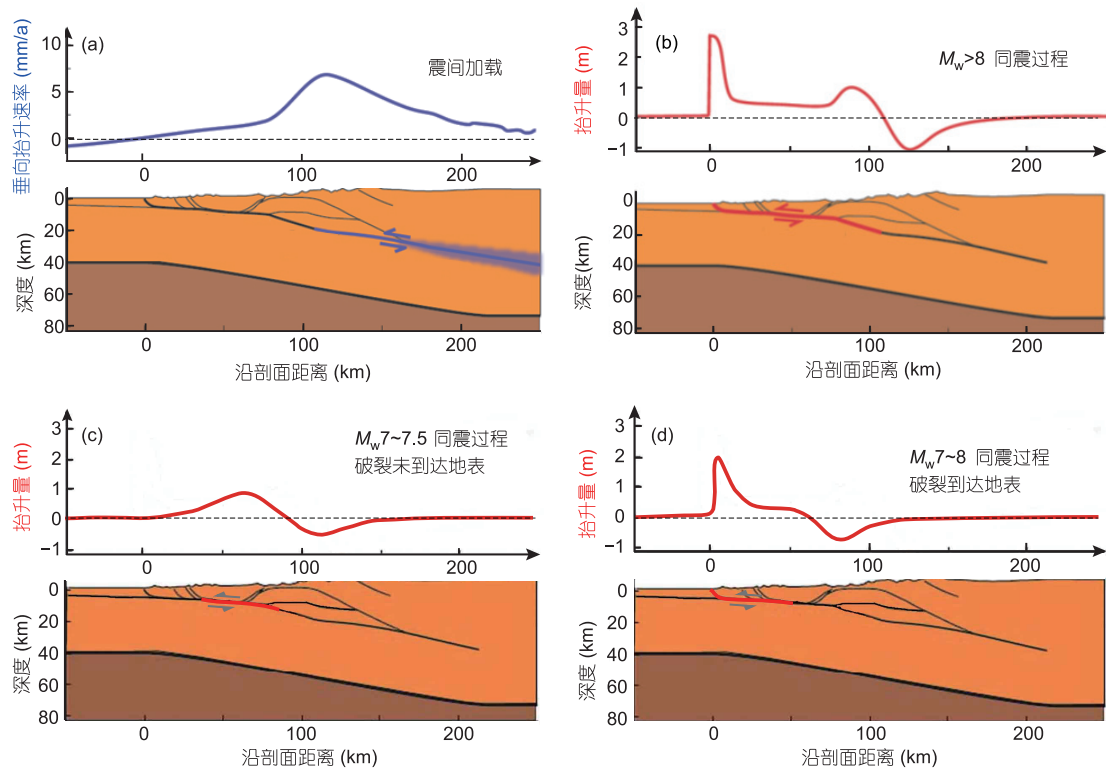


图6 喜马拉雅低角度逆冲推覆断裂的强震孕育模式的震间加载, 不同震级大小的地震破裂及其伴随的垂向抬升-沉降分布图像。(a) 震间期垂向抬升分布和对应的深部断层稳滑段; (b)  $M_w \geq 8$  级特大地震发生时, 地表的同震垂向位移分布以及深部断裂发生位移的区段; (c), (d)  $M_w = 7 \sim 8$  级大地震发生时, 地表的同震垂向位移分布以及深部断裂发生位移的区段(改自 Avouac<sup>[80]</sup>)

**Figure 6** Model of the seismic cycle, using vertical component to illustrate the interseismic loading and coseismic unloading of earthquakes different magnitudes on the low-angle Himalayan main thrust. (a) Pattern of uplifting during the interseismic period, and associated stable-sliding portion of the fault at depth; (b) Pattern of surface uplift and subsidence at surface in association with coseismic rupture of  $M_w \geq 8$  and (c), (d)  $M_w = 7 \sim 8$  earthquakes. Portion of coseismic rupture on the fault is highlighted accordingly (modified after Avouac<sup>[80]</sup>)

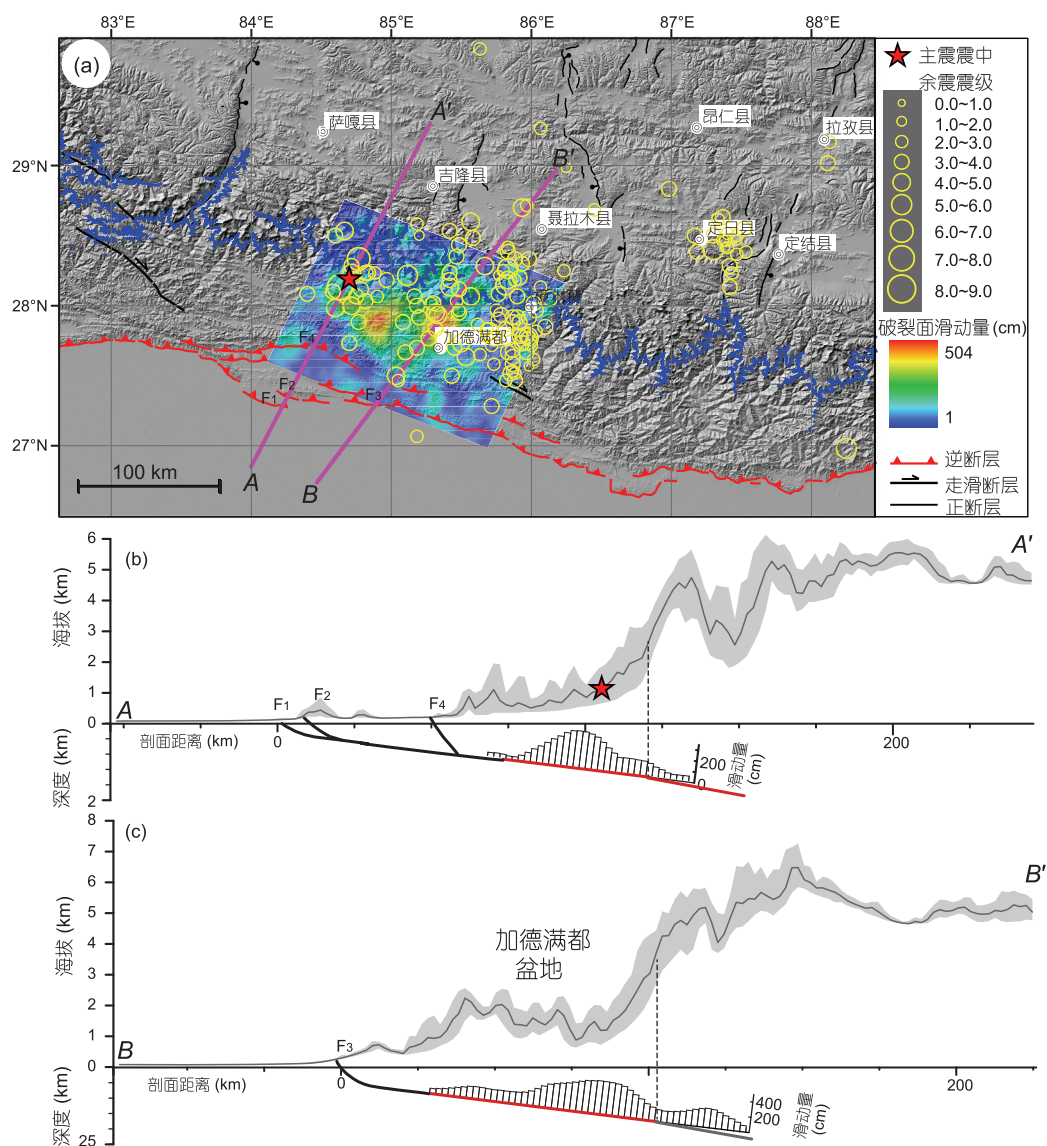


图7 2015年4月25日尼泊尔 $M_w$ 7.8级地震的震源破裂过程反演初步结果与地形比较。(a)地震断层同震位移量分布的平面投影,以及震后15天内的余震分布。3500 m地形等高线显示。(b)和(c)分别为穿过震中和加德满都的两条廊带地形与深部断面同震位移的空间分布比较。F1~F4为主前缘断裂在地表出露的不同分支。主要位移量发生在低喜马拉雅和高喜马拉雅的过渡带上,对应的断面用红色显示。虚竖线表示3500 m等高线对应的位置,断面往北变陡并脆性与脆韧性过渡带转换点

**Figure 7** Comparison of topography and coseismic slip of the 25 April 2015  $M_w$  7.8 Nepal earthquake from teleseismic finite fault solutions. (a) Map view projection of coseismic slip on ruptured fault and aftershocks within 15 days after the mainshock. 3500 m topographic contour line is highlighted. (b) and (c) show the spatial correlation in cross-sectional view of topography and coseismic slip at depth along two profiles, through the epicenter and the Kathmandu basin, respectively. Coseismic slip occurred mainly underneath the topographic transition from low to high Himalaya, with ruptured fault plane highlighted in red. Dashed vertical line denotes the position of 3500 m contour line, below which fault dip increases toward the north, and transition to semi-ductile

以南的地方。地震破裂区段与1833年地震可能有一小部分重叠<sup>[59]</sup>(图2),但对于像1833年加德满都地震这样没有地表破裂的历史地震,其破裂区段主要基于震害范围的外推,有较大的不确定性。有研究表明同一断层在公元1344年也发生过破裂<sup>[96]</sup>。同震破裂总体上持续时间约90 s,但是90%以上的地震矩。在前60 s释

放。从震波反演的时间快照来看(图8),破裂持续的时间较长,单点位移滑动的速率偏低,大位移区破裂单点位移滑动时间(rise time)平均为7 s。

## 6 讨论

4月25日的尼泊尔地震是自1950年以来喜马拉雅

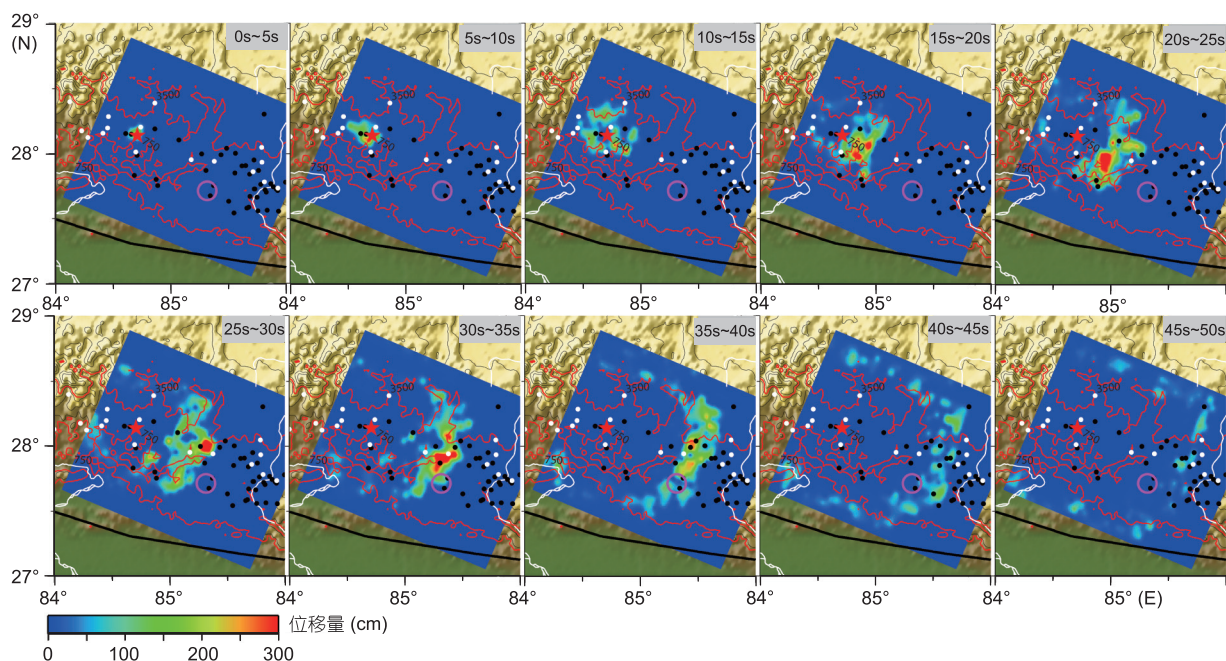


图8 2015年4月25日尼泊尔 $M_w$ 7.8地震破裂过程快照,分图5s间隔.红线勾勒出750和3500m的地形等高线.红星是USGS给出的主震震中,粉红色圈指示加德满都城.白圈是2000~2015年发生的地震,而黑色代表主震后2天的USGS余震分布

**Figure 8** Map-view snapshots of 25 April 2015,  $M_w$  7.8 Nepal earthquake in a time interval of 5 s. The red lines denote the 750 m and 3500 m contour lines. The red star shows the USGS epicenter and pink circle the city of Kathmandu. White circles show epicenters of earthquakes 2000–2015, black circles are aftershocks in first two days from USGS website

带上发生的最大震级地震,将为我们提供大量的数据,深化理解喜马拉雅造山带的地震,以及低角度逆冲断裂的孕震,同震和震后过程.在还没有更多数据发布和深度挖掘之前,我们提出一些初步认识,仅供大家参考.

(1) 尼泊尔地震与喜马拉雅特征型地震.这次尼泊尔地震发生在1505年和1934年地震破裂区之间的“地震空区”.根据GPS速度场数据推算出过去500 a累积的地震矩量远大于同时期已经发生的地震对应的地震矩,因此喜马拉雅带上还缺多次8级左右大地震,甚至 $M_w$ 8.5级左右的大地震来释放已累积的能量<sup>[48]</sup>.

但是从万年到百万年造山作用的视角,4月25日尼泊尔地震更接近如图6(c)所示的大地震,非最大震级特征型地震或造山型地震.如远场震波反演所示,这次地震的位移量主要分布在高、低喜马拉雅的过渡带,深部构造剖面上位于震间闭锁段的后缘(图7).与理论推测的图像相似,抬升区以北的高地形山链,同震过程中却属于沉降区(图6和9).InSAR图像分析证实,包括希夏邦马峰在内的高喜马拉雅带山链沉降50~100 cm,与长期的地形生长相反(<http://topex.ucsd.edu/nepal/>;

<http://www.gsi.go.jp/cais/topic150429-index-e.html>).因此,单从同震过程来看似乎难以解释这些山脉的抬升,震间期的抬升量必然大于同震的沉降量(图9).

(2) 尼泊尔地震与2008年汶川地震的比较.两次地震震级相当,均发生在青藏高原边界和地形陡坡带上,以逆冲破裂为主.但两个大地震有显著差异,汶川地震破裂在浅部倾角高达 $60^\circ\sim 80^\circ$ ,深部倾

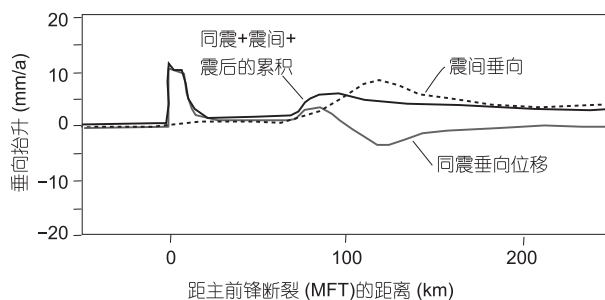


图9 震间期与震时破裂对应的地表垂向位移的空间分布与互补性.长期累积之和的分布用粗黑线表示,其形态与活动断裂的地质方法得到的分布(图2)一致(改自 Vergne 等人<sup>[97]</sup>)

**Figure 9** Comparison of vertical motion at surface during the interseismic period and coseismic rupture. Summation of co-, post- and inter-seismic motions, shown in dark line, is similar to geologically determined long-term pattern shown in Figure 2 (modified from Vergne et al.<sup>[97]</sup>)

角也达30°的多断裂参与的复合型破裂,几何复杂,垂向及走向几何变化大,大位移区域(asperity)较浅甚至直通地表,在北川以北破裂的走滑分量大于逆分量<sup>[98~100]</sup>.与汶川地震不同,本次尼泊尔地震是典型的低角度逆断型强震,断面倾角小至7°~10°,破裂的机制全程以逆冲为主.低角度断层型强震意味着该地震在发震断层倾向方向(即南北方向)上的破裂滑动面积会很宽,因而会造成地表的大面积破坏.同时破裂沿断层面东扩展100~120 km,由于破裂方向(directionality)效应,地震激发波的能量在震源区东面会聚,这也可能是中国境内珠峰、聂拉木等地,距震中较远却仍有较大破坏的原因.其次从同震破裂过程来看,两个地震同为单侧破裂,汶川地震破裂长度300 km,持续时间110 s<sup>[101]</sup>,而尼泊尔地震的破裂长度100~120 km,持续时间90 s,破裂扩展的速度偏慢.汶川地震中单点滑移速度快,尤其是在北川和映秀等局部地区破裂快,造成地震动强度大,破坏严重<sup>[102]</sup>;而尼泊尔地震中单点滑移速度慢.比如,在加德满都盆地之下,虽然断面上位移值大,但滑移速度慢,使得加德满都的地震动偏小,破坏比预计的小.同样地,王卫民等人([http://www.itpcas.cas.cn/xwzx/zhxw/201504/t20150426\\_4344080.html](http://www.itpcas.cas.cn/xwzx/zhxw/201504/t20150426_4344080.html))根据破裂过程模型计算的最大理论烈度约为IX度,低于汶川地震局部地区高达XII度的情况.

这样的低角度破裂与大洋俯冲型板块边界上发生的地震可类比.从震波反演的时间快照来看,破裂持续的时间较长,单点上位移滑动的速率偏低,这与位于低喜马拉雅区段断面上应力偏低相匹配,比如Avouac<sup>[66]</sup>通过平均地形(低喜马拉雅平均为1000~2000 m)和断面倾角估算滑脱断面上的剪应力~35 MPa,摩擦系数~0.1,均较低.

(3) 低角度逆冲地震破裂的地表出露.远场震波反演和InSAR地表变形场均表明本次地震的大位移区间位于深部,该地震很可能没有伴随地表破裂,或者很小的位移,远小于深部的位移量.如果这样,断面位移在到达地表附近存在较大的亏损.这一现象对低角度逆冲断裂的地震地质研究有一定的启发.因为地震地质和古地震研究往往集中在断裂地表出露位置即断层线上,通过量化断裂在地表单次地震的位移和累积位移,提供断裂滑动速率和地震复发时间间隔等基本数据.如果单次地震地表位移不代表破裂的平均位移(即偏小),那么其累积效应有可能

使得我们低估地表观测的位移、滑动速率值.

关于喜马拉雅构造带上的历史强震,甚至古地震是否伴有地表破裂有较大的争议.Lavé等人<sup>[52]</sup>和Kumar等人<sup>[51,71]</sup>认为,沿喜马拉雅带20世纪发生的3次最大震级地震( $M_w$ 约7.8~8.4)均没有伴生地表破裂.而约1000 a前(公元1100年左右)发生的、可能伴随12~17 m同震位移(或垂向8 m)的 $M_w$ ~8.8巨大地震才到达地表<sup>[52]</sup>.但是最近Sapkota等人<sup>[70]</sup>的古地震探槽揭示了1934年比哈-尼泊尔地震造成地层错断,沿着山前形成至少150 km长的破裂带,断裂上盘普遍抬升了4~5 m.加之有一些证据推论1255年地震可能与1934年地震类似,并伴随地表破裂,因此他们判断 $M_w$ ~8地震的700 a复发周期.4月25日的尼泊尔地震提供新的观测数据,将有助于我们深入认识,像喜马拉雅这样的低角度逆冲断裂上,多大震级地震会伴随地表破裂,地表位移是否存在亏损以及单次大地震位移与多次地震累积之间的关系等问题.

(4) 尼泊尔地震对地震危险趋势判断的意义.4月25日尼泊尔地震不但在MFT地表出露处的位移偏小,地震总体释放的地震矩也小于Ader等人<sup>[48]</sup>估算的累积量.他们认为,如果喜马拉雅构造带最大震级不小于 $M_w$ 8.5级的话,每400年应该发生3个 $M_w$ 8.5级以上地震;而如果最大震级为不小于 $M_w$ 8.0级的话,则每70年发生3个 $M_w$ 8.0级以上地震.显然,历史地震记录中同震级地震的个数低于上述推算.比如,历史地震记录过去500年仅发生过1次 $M_w$ 8.5级以上地震(1950年察隅地震),所以可能还缺1~2次震级相当的地震.当然Ader等<sup>[48]</sup>的理论估算是否偏高有待进一步检验,加之1505年及更早的地震如1413年和~1100年地震的震级是否高于 $M_w$ 8.5(图3),也有待进一步的古地震研究.但保守地说,我们应该不排除或警惕未来喜马拉雅带发生 $M_w$ 8.5级甚至更大地震的可能性.Bollinger等人<sup>[96]</sup>也表达了类似的担忧.

喜马拉雅主逆冲断裂上的这次大地震对青藏高原内部尤其是西藏南部活动断裂上地震的发生可能有促进作用.库伦应力计算表明,4月25日的尼泊尔大地震对藏南正断层可以产生>0.01 MPa的应力加载阈值<sup>[103]</sup>,可能诱发或加速藏南正断层系的地震活动.主震同震位移的应力触发是主震3 h后定日-定结之间震群小地震( $M_s$ 2~5.7)发生的重要因素.从震中位置和震源机制来看,发震断层可能是卡达正断层,申扎-定结正断裂带的一支.该正断层第四纪活动的地

貌印记明显,错断河流阶地,并控制了阿润河的发育,形成显著的河流裂点<sup>[104,105]</sup>。未来数年内藏南触发更大震级地震的可能性也不应排除,这在历史上有先例,比如,1950年8月15日喜马拉雅主逆冲断裂上发生察隅 $M_w$ 8.4级特大地震之后,在拉萨以西的南北向亚东-古露正断层上发生了1952年8月18日当雄北 $M_s$ 7.5级带走滑分量的正断型地震、和其北邻的北西向崩错右旋走滑断裂上发生1951年11月18日崩错8级大地震。1934年1月15日比哈-尼泊尔 $M_w$ 8.1级地震之后,位于破裂区正北的申扎-谢通门南北向正断层与北西走向的格仁错右旋走滑断裂交汇部位发生1934年12月15日申扎北 $M_s$ 7级地震。除了同震位移的应力加载等直接影响之外,不排除这次尼泊尔地震对青藏高原其他断裂的间接效应,因为青藏高原及周边众多的活动断裂组成一个立体的应力承载体系,

断裂之间有强关联度,牵一发而动全身,与本次地震破裂对应的断面上的解锁会加快其他断裂或部位上的应力加载的进程和大地震发生。

## 7 结语

印度板块向北对欧亚板块的推挤和俯冲是中国大陆地壳运动和变形极为重要的边界力源,此次 $M_w$ 7.8级地震为认识大陆型板块碰撞俯冲的边界动力作用、发震断层力学特性和大震孕育机理提供了十分重要的机遇。由于这是一次典型的低角度逆冲推覆型强震,认识这类地震的震前、震时和震后变形过程具有十分重要的意义。中国的天山两侧、祁连山山前都具备发生低角度逆冲推覆型地震的条件,深入研究这类地震对于中国的防震减灾和地震预测也很重要,应该从多方面开展对该地震进行全面研究和解读。

## 参考文献

- Powell C M, Conaghan P J. Plate tectonics and the Himalayas. *Earth Planet Sci Lett*, 1973, 20: 1–12
- Burg J P, Chen G M. Tectonics and structural zonation of southern Tibet, China. *Nature*, 1984, 311: 219–223
- Hodges K V. Tectonics of the Himalaya and southern Tibet from two perspectives. *Geol Soc Amer Bull*, 2000, 112: 324–350
- Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. *Ann Rev Earth Planet Sci*, 2000, 28: 211–280
- Xu Z Q, Yang J S, Li H B, et al. The Qinghai-Tibet Plateau and continental dynamics: A review on terrain tectonics, collisional orogenesis, and processes and mechanisms for the rise of the plateau (in Chinese). *Geol China*, 2006, 33: 221–238 [许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 青藏高原与大陆动力学——地体拼合、碰撞造山以及高原隆升的深部驱动力. *中国地质*, 2006, 33: 221–238]
- Patriat P, Achache J. India-Eurasia collision chronology has implications for crustal shortening and driving mechanism of plates. *Nature*, 1984, 311: 615–621
- Avouac J P, Tapponnier P. Kinematic model of active deformation in central Asia. *Geophys Res Lett*, 1993, 20: 895–898
- Harrison T M, Copeland P, Kidd W S F, et al. Raising Tibet. *Science*, 1992, 255: 1663–1670
- Molnar P, Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision. *Science*, 1975, 189: 419–426
- Tapponnier P, Xu Z Q, Roger F, et al. Geology-oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau. *Science*, 2001, 294: 1671–1677
- Deng Q D, Zhang P Z, Ran Y K, et al. Basic characteristics of active tectonics of China. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2003, 46: 356–372 [邓起东, 张培震, 冉永康, 等. 中国活动构造基本特征. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2002, 32: 1020–1030]
- Zhang P Z, Deng Q D, Zhang G M, et al. Active tectonic blocks and strong earthquakes in the continent of China. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2003, 46(Suppl): 13–24 [张培震, 邓起东, 张国民, 等. 中国大陆的强震活动与活动地块. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2003, 33: 12–20]
- 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
- Zeitler P K, Koons P O, Bishop M P, et al. Crustal reworking at Nanga Parbat, Pakistan: Metamorphic consequences of thermal-mechanical coupling facilitated by erosion. *Tectonics*, 2001, 20: 712–728
- Xu Z Q, Yang J S, Qi X X, et al. India-Asia collision: A further discussion of N-S- and E-W-trending detachments and the orogenic mechanism of the modern Himalayas (in Chinese). *Geol Bull China*, 2006, 2: 1–14 [许志琴, 杨经绥, 戚学祥, 等. 印度/亚洲碰撞——南北向和东西向拆离构造与现代喜马拉雅造山机制再讨论. *地质通报*, 2006, 2: 1–14]
- Gansser A. *The Geology of the Himalayas*. New York: Wiley Interscience, 1964
- LeFort P. Himalayas-collided range-present knowledge of continental arc. *Am J Sci*, 1975, A275: 1–44
- Nakata T. Active faults of the Himalaya of India and Nepal. In: Malinconico Jr L L, Lillie R, eds. *Tectonics of the Western Himalayas*. *Geol Soc Amer*, 1989, 243–264

- 19 Yeats R S, Nakata T, Farah A, et al. The Himalayan frontal fault system. *Ann Tecton, Spec Iss*, 1992, 6: 85–98
- 20 Burchfiel B C, Chen Z, Hodges K V, et al. The South Tibet Detachment System, Himalayan orogen: Extension contemporaneous with and parallel to shortening in a collisional mountain belt. *Geol Soc Am Spec Pap*, 1992, 269: 1–41
- 21 Seeber L, Armbruster J G. Great detachment earthquakes along the Himalayan Arc and long-term forecasting. *Earthq Predict*, 1981, 259–277
- 22 Schelling D, Arita K. Thrust tectonics, crustal shortening, and the structure of the far-eastern Nepal, Himalaya. *Tectonics*, 1991, 10: 851–862
- 23 Zhao W, Nelson K D, the Project INDEPTH Team. Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath southern Tibet. *Nature*, 1993, 366: 557–559
- 24 Nelson K D, Zhao W, Brown L D, et al. Partially molten middle crust beneath Southern Tibet: Synthesis of project INDEPTH results. *Science*, 1996, 274: 1684–1696
- 25 Hauck M L, Nelson K D, Brown L D, et al. Crustal structure of the Himalayan orogen at ~90 east longitude from Project INDEPTH deep reflection profiles. *Tectonics*, 1998, 17: 481–500
- 26 Harrison T M, Ryerson F J, Le Fort P, et al. A Late Miocene-Pliocene origin for the Central Himalayan inverted metamorphism. *Earth Planet Sci Lett*, 1997, 146: E1–E8
- 27 Hubbard M S, Harrison T M.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age constraints on deformation and metamorphism in the Main Central Thrust zone and Tibetan Slab, eastern Nepal Himalaya. *Tectonics*, 1989, 8: 865–880
- 28 Copeland P, Le Fort P, Ray S M, et al. Cooling history of the Kathmandu crystalline nappe: Ar/Ar results. In: Paper presented at the 11th Himalayan-Karakoram-Tibet Workshop, Flagstaff, Arizona, 1999
- 29 Yin A. Cenozoic tectonic evolution of the Himalayan orogeny as constrained by along-strike variation of structural geometry, exhumation history, and foreland sedimentation (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2006, 13: 416–515 [尹安. 喜马拉雅造山带新生代构造演化: 沿走向变化的构造几何形态, 剥露历史和前陆沉积的约束. *地学前缘*, 2006, 13: 416–515]
- 30 Burbank D W, Beck R A, Mulder T. The Himalayan foreland basin. In: Yin A, Harrison T M, eds. *The Tectonics of Asia*. New York: Cambridge University Press, 1996
- 31 Carosi R, Lombardo B, Molli G, et al. The South Tibetan detachment system in the Rongbuk valley, Everest region. Deformation features and geological implications. *J Asian Earth Sci*, 1998, 16: 299–311
- 32 Searle M P, Godin L. The South Tibetan Detachment system and the Manaslu leucogranite: A structural re-interpretation and restoration of the Annapurna-Manaslu Himalaya, Nepal. *J Geol*, 2003, 111: 505–523
- 33 Yin A, Dubey C S, Kelty T K, et al. Structural evolution of the Arunachal Himalaya and implications for asymmetric development of the Himalayan orogeny. *Curr Sci*, 2006, 90: 195–206
- 34 Lee J, Whitehouse M J. Onset of mid-crustal extensional flow in southern Tibet: Evidence from U/Pb zircon ages. *Geology*, 2007, 35: 45–48
- 35 Zeng L, Liu J, Gao L, et al. Early Oligocene anatexis in the Yardoi gneiss dome, southern Tibet and geological implications. *Chin Sci Bull*, 2009, 54: 104–112 [曾令森, 刘静, 高利娥, 等. 藏南也拉香波穹隆早渐新世地壳深熔作用及其地质意义. *科学通报*, 2009, 54: 373–381]
- 36 Webb A A G, Yin A, Harrison T M, et al. Cenozoic tectonic history of the Himachal Himalaya (northwestern India) and its constraints on the formation mechanism of the Himalayan orogen. *Geosphere*, 2011, 7: 1013–1061
- 37 Valdiya K S. The main boundary thrust zone of the Himalaya, India. *Ann Tecton*, 1992, 6: 54–84
- 38 Davis D, Suppe J, Dahlen F A. Mechanics of fold and thrust belts and accretionary wedges. *J Geophys Res*, 1983, 88: 1154–1172
- 39 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
- 40 Lavé J, Avouac J P. Fluvial incision and tectonic uplift across the Himalayas of Central Nepal. *J Geophys Res*, 2001, 106: 26561–26592
- 41 Bilham R, Larson K, Freymueller J, et al. GPS measurements of present-day convergence across the Nepal Himalaya. *Nature*, 1997, 386: 61–64
- 42 Jouanne F, Mugnier J L, Pandey M, et al. Oblique convergence in Himalaya of western Nepal deduced from preliminary results of GPS measurements. *Geophys Res Lett*, 1999, 26: 1933–1936
- 43 Larson K, Burgmann R, Bilham R, et al. Kinematics of the India Eurasia collision zone from GPS measurements. *J Geophys Res*, 1999, 104: 1077–1093
- 44 DeCelles P G, Robinson D M, Quade J, et al. Stratigraphy, structure, and tectonic evolution of the Himalayan fold-thrust belt in western Nepal. *Tectonics*, 2001, 20: 487–509
- 45 DeMets C, Gordon R G, Argus D F, et al. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time-scale on estimates of current plate motions. *Geophys Res Lett*, 1994, 21: 2191–2194

- 46 Paul J, Burgmann R, Gaur V K, et al. The motion and active deformation of India. *Geophys Res Lett*, 2001, 28: 647–650
- 47 Molnar P, Stock J M. Slowing of India's convergence with Eurasia since 20 Ma and its implications for Tibetan mantle dynamics. *Tectonics*, 2009, 28: TC3001
- 48 Ader T, Avouac J, 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
- 49 Wesnousky S G, Kumar S, Mohindra R, et al. Uplift and convergence along the Himalayan Frontal Thrust of India. *Tectonics*, 1999, 18: 967–976
- 50 Kumar S, Wesnousky S G, Rockwell T K, et al. Earthquake recurrence and rupture dynamics of Himalayan Frontal Thrust, India. *Science*, 2001, 294: 2328–2331
- 51 Kumar S, Wesnousky S G, Rockwell T K, et al. Paleoseismic evidence of great surface rupture earthquakes along the Indian Himalaya. *J Geophys Res*, 2006, 111: B03304
- 52 Lavé J, Yule D, Sapkota S, et al. Evidence for a great medieval earthquake (approximate to 1100 AD) in the Central Himalayas, Nepal. *Science*, 2005, 307: 1302–1305
- 53 Kondo H, Nakata T, Akhtar S S, et al. Long recurrence interval of faulting beyond the 2005 Kashmir earthquake around the northwestern margin of the Indo-Asian collision zone. *Geology*, 2008, 36: 731–734
- 54 Pandey M R, Molnar P. The distribution of intensity of the Bihar-Nepal earthquake of 15 January 1934 and bounds on the extent of the rupture zone. *J Nepal Geol Soc*, 1988, 5: 23–45
- 55 Chander R. Southern limits of major earthquake ruptures along the Himalaya between longitudes 75° and 90°E. *Tectonophysics*, 1989, 170: 115–123
- 56 Ambraseys N, Bilham R. A note on the Kangra earthquake of 4 April 1905. *Curr Sci*, 2000, 79: 46–50
- 57 Ambraseys N, Jackson D. A note on early earthquakes in northern India and southern Tibet. *Curr Sci*, 2003, 84: 571–582
- 58 Ambraseys N, Douglas J. Magnitude calibration of north Indian earthquakes. *Geophys J Int*, 2004, 159: 165–206
- 59 Bilham R. Location and magnitude of the 1833 Nepal earthquake and its relation to the rupture zones of contiguous great Himalayan earthquakes. *Curr Sci*, 1995, 69: 101–128
- 60 Bilham R. Earthquakes in India and the Himalaya: Tectonics, geodesy and history. *Ann Geophys*, 2004, 47: 839–858
- 61 Bilham R, Gaur V K, Molnar P. Himalayan seismic hazard. *Science*, 2001, 293: 1442–1444
- 62 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
- 63 Wallace K, Bilham R. Surface deformation in the region of the 1905 Kangra  $M_w=7.8$  earthquake in the period 1846–2001. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: L15307
- 64 Martin S, Szeliga W. A catalog of felt intensity data for 570 earthquakes in India from 1636 to 2009. *Bull Seismol Soc Amer*, 2010, 100: 562–569
- 65 Szeliga W, Hough S, Martin S, et al. Intensity, magnitude, location, and attenuation in India for felt earthquakes since 1762. *Bull Seismol Soc Amer*, 2010, 100: 570–584
- 66 Avouac J P. Mountain building, erosion, and the seismic cycle in the Nepal Himalaya. *Adv Geophys*, 2003, 46: 1–80
- 67 Chen W P, Molnar P. Seismic moments of major earthquakes and the average rate of slip in Central Asia. *J Geophys Res*, 1977, 82: 2945–2969
- 68 Molnar P, Deng Q. Faulting associated with large earthquakes and the average rate of deformation in Central and Eastern Asia. *J Geophys Res*, 1984, 89: 6203–6227
- 69 Bilham R, Blume F, Bendick R, et al. Geodetic constraints on the translation and deformation of India: Implications for future great Himalayan earthquakes. *Curr Sci*, 1998, 77: 213–229
- 70 Sapkota S, Bollinger L, Klinger L, et al. Primary surface ruptures of the great Himalayan earthquakes in 1934 and 1255. *Nat Geosci*, 2012, 6: 71–76
- 71 Kumar S, Wesnousky S G, Jayangondaperumal R, et al. Paleoseismological evidence of surface faulting along the northeastern Himalayan front, India: Timing, size, and spatial extent of great earthquakes. *J Geophys Res*, 2010, 115: B12422
- 72 Oldham T. Catalog of Indian Earthquakes. *Memoir Geol Surv India*, 1883, 19: 163–215
- 73 Molnar P. Inversion profiles of uplift rates for the geometry of dip-slip fault at depth, with examples from the Alps and the Himalaya. *Ann Geophys*, 1987, 5: 663–670
- 74 Duda S J. Secular seismic energy release in the circum-Pacific belt. *Tectonophysics*, 1965, 2: 409–452
- 75 Abe K, Noguchi S. Revision of magnitudes of large shallow earthquakes, 1897–1912. *Phys Earth Planet Inter*, 1983, 33: 1–11
- 76 Molnar P. A review of the seismicity and the rates of active underthrusting and deformation at the Himalaya. *J Himalayan Geol*, 1990, 1: 131–154

- 77 Ben-Menahem A, Aboudi E, Schild R. The source of the great Assam earthquake: An intraplate wedge motion. *Phys Earth Planet Inter*, 1974, 6: 109–131
- 78 Rana B J B. Nepalako mahabhukampa (1990 sala) Nepal's Great Earthquake. Katmandu: Nepal Ko Maha Bhukampa Jorganesh Press, 1935
- 79 Pant M R. A step toward a historical seismicity of Nepal. *Adarsa*, 2002, 2: 29–60
- 80 Avouac J P. Mountain building: From earthquakes to geological deformation. *Dynamic processes in extensional and compressional settings*. *Treatise Geophys*, 2007, 6: 377–439
- 81 Pandey M, Tandukar R, Avouac J, et al. Interseismic strain accumulation on the Himalayan crustal ramp (Nepal). *Geophys Res Lett*, 1995, 22: 751–754
- 82 Bettinelli P, Avouac J, 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
- 83 Jackson M, Bilham R. Constraints on Himalayan deformation inferred from vertical velocity fields in Nepal and Tibet. *J Geophys Res*, 1994, 99: 13897–13912
- 84 Bollinger L, Avouac J, Cattin R, et al. Stress buildup in the Himalaya. *J Geophys Res*, 2004, 109: B11405
- 85 Bollinger L, Perrier F, Avouac J P, et al. Seasonal modulation of seismicity in the Himalaya of Nepal. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L08304
- 86 Cattin R, Avouac J P. Modeling of mountain building and the seismic cycle in the Himalaya of Nepal. *J Geophys Res*, 2000, 105: 13389–13407
- 87 Dahlen F, Suppe J. Mechanics, growth, and erosion of mountain belts. *Geol Soc Am Spec Pap*, 1988, 218: 161–178
- 88 Dahlen F. Critical taper model of fold-and-thrust belts and accretionary wedges. *Ann Rev Earth Planet Sci*, 1990, 18: 55–99
- 89 Blanpied M L, Lockner D A, Byerlee J D. Frictional slip of granite at hydrothermal conditions. *J Geophys Res*, 1995, 100: 13045–13064
- 90 Marone C. Laboratory-derived friction laws and their application to seismic faulting. *Ann Rev Earth Planet Sci*, 1998, 26: 643–696
- 91 Nabelek J, Hetenyi G, Vergne J, et al. Underplating in the Himalaya-Tibet collision zone revealed by the Hi-CLIMB experiment. *Science*, 2009, 325: 1371–1374
- 92 Lemonnier C, Marquis G, Perrier F, et al. Electrical structure of the Himalaya of central Nepal: High conductivity around the mid-crustal ramp along the MHT. *Geophys Res Lett*, 1999, 26: 3261–3264
- 93 Dmowska R, Zheng G, Rice J R. Seismicity and deformation at convergent margins due to heterogeneous coupling. *J Geophys Res*, 1996, 101: 3015–3029
- 94 Avouac J P, Ayoub F, Leprince S, et al. The 2005  $M_w$  7.6 Kashmir earthquake: Sub-pixel correlation of ASTER images and seismic waveforms analysis. *Earth Planet Sci Lett*, 2006, 249: 514–528
- 95 Kaneda H, Nakata T, Tsutsumi H, et al. Surface rupture of the 2005 Kashmir, Pakistan, earthquake and its active tectonic implications. *Bull Seismol Soc Amer*, 2008, 98: 521–557
- 96 Bollinger L, Tapponnier P, Sapkota S. Balance and deficit of seismic slip in central Nepal: Implication for a repeat of the 1344 earthquake in Nepal. *J Nepal Geol Soc*, 2015, 48: 25
- 97 Vergne J, Cattin R, Avouac J. On the use of dislocations to model interseismic strain and stress build-up at intracontinental thrust faults. *Geophys J Int*, 2001, 147: 155–162
- 98 Liu-Zeng J, Zhang Z, Wen L, et al. Co-seismic ruptures of the 12 May 2008,  $M_s$  8.0 Wenchuan earthquake, Sichuan: East-west crustal shortening on oblique, parallel thrusts along the eastern edge of Tibet. *Earth Planet Sci Lett*, 2009, 286: 355–370
- 99 Shen Z K, Sun J, Zhang P, et al. Slip maxima at fault junctions and rupturing of barriers during the 2008 Wenchuan earthquake. *Nature Geosci*, 2009, doi: 10.1038/ngeo636
- 100 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. *Ann Rev Earth Planet Sci*, 2010, 38: 353–382
- 101 Wang W M, Zhao I F, Li J, et al. Rupture process of the 8.0 Wenchuan earthquake of Sichuan, China (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2008, 51: 1403–1410 [王卫民, 赵连锋, 李娟, 等. 四川汶川 8.0 级地震震源过程. *地球物理学报*, 2008, 51: 1403–1410]
- 102 Li X, Zhou Z, Huang M, et al. Preliminary Analysis of Strong-Motion Recordings from the Magnitude 8.0 Wenchuan, China, Earthquake of 12 May 2008. *Seismol Res Lett*, 2008, 79: 855–854
- 103 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  $M_s$  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  $M_s$  8.1 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]

- 104 Armijo R, Tapponnier P, Mercier J. Quaternary extension in southern Tibet: Field observations and tectonic implications. *J Geophys Res*, 1986, 91: 13803–13872
- 105 Kali E. De la déformation long-terme à court-terme sur les failles normales du Sud—Tibet: Approche géochronologique multi-méthode ( $^{10}\text{Be}$ ,  $^{26}\text{Al}$ , (U-Th)/He,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , U/Pb) (in French). Doctor Dissertation. Strasbourg: Université de Strasbourg, 2010

## Tectonic setting and general features of coseismic rupture of the 25 April, 2015 $M_w$ 7.8 Gorkha, Nepal earthquake

LIU Jing<sup>1</sup>, JI Chen<sup>2</sup>, ZHANG JinYu<sup>1</sup>, ZHANG PeiZhen<sup>1</sup>, ZENG LingSen<sup>3</sup>, LI ZhanFei<sup>1</sup> & WANG Wei<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Geology, State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China;*

<sup>2</sup> *Department of Earth Science, University of California, Santa Barbara CA 93106, USA;*

<sup>3</sup> *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*

An earthquake of  $M_w$  7.8 occurred on 25 April, 2015 in Nepal Himalaya, with a focal mechanism of low-angle thrust, determined unanimously by multiple research agencies. More than 100 aftershocks occurred thus far, including strong ones with magnitude larger than  $M_s$  7.0, triggered normal-mechanism swarms hundreds of kilometers northeast of the epicenter in Tibet. The mainshock, located in central Himalayan orogenic belt and within the ‘seismic gap’ between the ruptured zones of the 1934 Bihar  $M_w$ ~8.1 and 1505 Lo Mustang  $M_w$ ~8.2 earthquakes, is the largest one on the Main Himalaya Thrust since 1950 Assam  $M_w$ ~8.4 earthquake. To help a better understanding of the earthquake, we provide in this paper a review on the tectonic setting and geometry of the Himalayan fault system, large historical earthquakes and their rupture areas, pattern of modern microseismicity, general models of seismic cycle in the Nepal Himalaya, and spatial pattern of surface deformation resulted from interseismic loading and coseismic slip. Combining the overall features of coseismic rupture of the mainshock from teleseismic finite fault solutions, we comment on this earthquake regarding to its relationship with the characteristic (typical topography-building) Himalayan events, the comparison with the 2008 Wenchuan  $M_w$  7.9 earthquake of similar magnitude, the general condition for low-angle thrust-type rupture reaching surface, and its implication to regional seismic hazard.

**Himalayan collision belt, main Himalayan thrust,  $M_w$ 7.8 Gorkha Nepal earthquake, low-angle thrust faulting earthquake, tectonic setting, model of earthquake cycle**

doi: 10.1360/N972015-00559