

2015年尼泊尔8.1级地震与喜马拉雅弧的历史地震研究*

杜方¹, 旦增², 朱德富², 土登次仁², 益西拉姆², 曹华文², 米玛次仁², 梁明剑¹

(1. 四川省地震局, 四川 成都 610041; 2. 西藏自治区地震局, 西藏 拉萨 850000)

摘要: 2015年4月25日在喜马拉雅弧的尼泊尔博克拉发生8.1级大地震, 2015年4月25日至5月12日相继发生尼泊尔7.0、7.1和7.5级大震。根据西藏地震台网资料和收集到的国内外相关资料, 分析了尼泊尔8.1级地震的基本参数、余震分布、序列衰减以及喜马拉雅弧的历史破裂等特征。结果表明: 尼泊尔8.1、7.0、7.1和7.5级地震的震源力学机制均显示为低倾角的纯逆冲性事件, 破裂面走向平行于NWW—SEE的喜马拉雅边界, 以 $5^{\circ} \sim 11^{\circ}$ 倾向北; 从定性的角度分析, 尼泊尔8.1级地震可判定为独特的主—余型地震, 其余震分布长轴走向显示与喜马拉雅主边界走向一致, 密集区NWW—SEE向长轴和S—N向短轴大约分别为200 km和150 km; 估计2015年尼泊尔8.1级地震破裂尺度与1833年尼泊尔加德满都北部大震相当, 比1934年的尼泊尔—印度(比哈尔邦)间大震略小。据历史地震破裂空段推测, 2015年尼泊尔8.1级地震破裂填充在1505年大震与1833年大震两次历史破裂之间的空段。

关键词: 尼泊尔8.1级地震; 震源力学机制; 主喜马拉雅逆冲断裂; 历史地震

中图分类号: P315.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2016)02-0177-10

0 引言

2015年4月25日尼泊尔8.1级地震是发生在喜马拉雅构造带上的一次强破坏性地震。中国地震局发布的尼泊尔8.1级地震烈度图(震灾应急救援司, 2015)显示, 尼泊尔8.1级地震的最大烈度为IX度及以上, 等震线长轴呈NWW—SEE走向, 与发震段的喜马拉雅构造带走向基本一致。据中国地震局网站公布: 中国境内地震烈度图是根据中国地震局现场工作队实地调查的数据进行评定和绘制的; 中国境外地震烈度图是根据震源机制解、震源破裂过程、地质构造、建筑破坏特征等地球物理、地质、工程结构等分析资料, 结合卫星遥感震害解译和中国国际救援队调查数据进行估计和绘制的。尼泊尔8.1级地震断裂迹线位于中国境外, 没有考察到本次地震地表破裂带; 中国地震局地质研究所(2015a)给出了此次地震初步的发震构造; 国内外地球物理学家利用远场体波地震资料快速反演获取了尼泊尔8.1级地震震源力学机制、震源破裂过程(中国地震台网中心,

2015; 中国地震局地质研究所, 2015b; 中国地震局地球物理研究所, 2015; 中国地质科学院, 2015; 中国科学院测量与地球物理研究所, 2015b; 美国地质调查局, 2015; 德国勘测中心的地球科学研究中心, 2015; 法国GeoScope项目, 2015), 结果显示地震破裂分量主要以逆冲方式破裂, 矩震级 $M_w 7.8$, 地震中规模最大、最主要的一次破裂事件向震中东南方向传播。

尼泊尔8.1级地震发生在喜马拉雅构造中段的历史破裂空段, 在地震破裂区的两侧显示历史破裂: 西北侧是1505年尼泊尔西的罗木斯塘(Lo Mustang)的 $M8.6$ ($M_w \geq 8.2$)地震, 该地震的离逝时间已经长达510 a; 东南侧是1833年8月26日尼泊尔 $M_w 7.7$ 地震。据国际地学专家研究资料显示, 1505年和1833年两次历史地震间的剩余破裂空段有近200 km (Ambraseys, Douglas, 2004; Bilham, Ambraseys, 2005)。2015年尼泊尔8.1级地震的发生是否正好在剩余破裂空段? 其主震和余震的震源力学机制、破裂过程以及余震空间展布和衰减等特征怎样? 值得探讨。

* 收稿日期: 2015-08-12.

基金项目: 中国地震局地震行业科研专项(20140823)资助.

1 地震基本参数与震源破裂特征

1.1 地震基本参数

2015 年 4 月 25 日 14 时 11 分, 在中国—尼泊尔交界发生 8.1 级大地震, 震源深度 20 km。震中距离尼泊尔首都加德满都约 80 km, 距离中国边境仅 45 km, 中国境内的西藏自治区吉隆县距震中约 95 km, 聂拉木县距震中约 125 km。

世界各地机构测定和公布的“4·25”尼泊尔地震震级测定面波震级在 7.4 ~ 8.1 级之间 (表 1)。例如: 美国国家地震信息中心 (National Earthquake Information Center, NEIC) (2015) 给出 $M_s7.9$ ($M_w7.8$); 法国欧洲—地中海地震中心

(Centre Sismologique Euro-Mediterraneen, CSEM) 公布为 $M_w7.8$; 俄罗斯科学院地球物理勘测局 (GS RAS Geophysical Survey, Russia Academy of Science, Obninsk, Russia, GSR) 根据俄罗斯地震台网测定为 $M_s7.9$ ($M_b6.8$); 德国勘测中心的地球科学研究中心 (Deutsches GeoForschungsZentrum, GFZ) 给出 $M_s7.4$; 英国地质调查局 (British Geological Survey, BGS) 测定为 $M_s7.8$; 德国格拉芬堡地震台阵地震中心观测站 (Seismological Central Observatory, SZGRF) 测定为 $M_s7.5$ 等。

尼泊尔 8.1 级地震震源深度测定显示震源浅 (表 1), 在全球收集到的 9 个机构测定参数中, 除法国 GeoScope 项目给出是 29 km 比较深外, 其余 8 个机构测定深度在 10 ~ 20 km 间 (平均值为 13.13 km)。

表 1 全球各机构测定 2015 年 4 月 25 日尼泊尔 8.1 级地震基本参数
Tab. 1 Basic parameters of Nepal M8.1 earthquake on Apr. 25, 2015 by each institution in the world

发震时刻 时: 分: 秒	震中位置		震级				深度 h/km	震中地名	结果来源
	$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$	$M(M_s)$	M_L	M_b	M_w			
14:11:26.3	28.20	84.70	8.1	—	—	—	20.0	尼泊尔	CENC
06:11:26	28.15	84.71	7.9	—	—	7.8	15.0	尼泊尔	NEIC
06:11:23	28.12	84.82	7.9	—	6.8	—	10.0	尼泊尔	GSR
06:11:26	28.28	84.79	—	—	—	7.8	10.0	尼泊尔	SED
06:11:26	28.23	84.74	7.4	—	—	—	10.0	尼泊尔	GFZ
06:11:23	27.1	83.7	7.5	—	—	—	10.0	尼泊尔	SZGRF
06:11:25	28.165	84.725	7.8	—	—	—	29.0	尼泊尔	GeoScope
06:11:26.9	28.24	84.74	—	—	—	7.8	15.0	尼泊尔	CSEM
06:11:26.0	28.147	84.670	7.8	—	—	—	15.0	尼泊尔	BGS

1.2 震源力学机制

根据世界各地科研机构测定震源机制解数据显示 (表 2), 尼泊尔 8.1 级主震的发震断层为一条走向 $290^{\circ} \sim 323^{\circ}$ 、向北倾斜 $5^{\circ} \sim 11^{\circ}$ 的低倾角断裂, 滑移矢量近乎垂直于发震断层面的走向, 这表明该段的断层为低角度逆冲性质断层, 与尼泊尔 8.1 级主震所在区段的喜马拉雅主边界断裂 (Main Boundary Thrust, MBT) 性质相符, 由此推断尼泊尔 8.1 级地震为逆冲型地震。据 USGS 公布矩心矩张量 (Centroid Moment Tensor-Mwc, 数据源 GCMT¹) 解算结果显示: 断层面参数 $293^{\circ}/7^{\circ}/108^{\circ}$, 显示为 NWW—SEE 走向, 与喜马拉雅主边界断裂走向相符合, 倾角为 7° , 滑动角 108° , 显示与喜马拉雅主边界断裂在该区段的断层面向北

倾相符合, 节面 I 为发震断层面, 最佳拟合深度 12 km, 矩震级 $M_w7.86$ 。

尼泊尔 8.1 级地震的矩震级平均为 $M_w7.81$ (表 2)。收集国内外 4 个机构给出的矩震级, 结果均在 $M_w7.76 \sim 7.86$ 之间, 释放的地震矩为 $(5.449 \sim 10) \times 10^{20} \text{ N} \cdot \text{m}$ (表 3)。美国地质调查局公布的不同震相和不同数据源获得的 3 个地震矩结果为 $(5.449 \sim 7.759) \times 10^{20} \text{ N} \cdot \text{m}$, 德国勘测中心的地球科学研究中心矩张量解获得的地震矩为 $10 \times 10^{20} \text{ N} \cdot \text{m}$ 。由此可见, 尼泊尔 8.1 级地震矩震级为 $M_w7.8$ 。

收集尼泊尔 8.1 级地震较强余震反演结果 (表 3), 2015 年 4 月 25 日 7.0 级、4 月 26 日 7.1 级和 5 月 12 日 7.5 级余震均显示为逆冲性质。断层

表 2 2015 年 4 月 25 日尼泊尔 8.1 级地震的矩张量解
Tab. 2 Moment tensor solution of the Nepal $M8.1$ earthquake on Apr. 25, 2015

节面 I / (°)			节面 II / (°)			P 轴 / (°)		T 轴 / (°)		N(B)轴 / (°)		地震矩 M_0	矩震级	深度	结果来源
走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角	方位	仰角	方位	仰角	方位	仰角	$/10^{20} \text{ N} \cdot \text{m}$	M_w	/km	
293	7	108	95	83	88	187	38	2	52	95	2	7.759	7.86	12.0	USGS, 数据源 GCMT ¹
295	11	108	96	79	87	189	34	2	56	97	3	5.449	7.76	10.0	USGS, 数据源 US ²
290	7	101	99	83	89	190	38	7	52	99	1	6.623	7.81	23.5	USGS, 数据源 US ²
304	5	112	102	86	88	194	41	10	49	102	2	10	7.8	18.0	GFZ
323	7	133	99	85	85	—	—	—	—	—	—	6.25	7.80	29.0	GeoScope

表 3 尼泊尔 7.0 级、7.1 级和 7.5 级强余震矩张量解
Tab. 3 Moment tensor solutions of the Nepal $M7.0$, $M7.1$ and $M7.5$ aftershocks

余震震级	节面 I / (°)			节面 II / (°)			P 轴 / (°)		T 轴 / (°)		N(B)轴 / (°)		地震矩 M_0	矩震级	深度	结果来源
	走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角	方位	仰角	方位	仰角	方位	仰角	$/10^{19} \text{ N} \cdot \text{m}$	M_w	/km	
7.0	314	14	136	86	80	80	185	34	344	54	88	10	1.606	6.74	15.8	USGS, 数据源 GCMT ¹
	271	21	64	119	71	100	201	25	44	63	295	9	0.993	6.60	19.5	USGS, 数据源 US ² 、US ³
7.1	296	10	108	98	81	87	191	35	4	54	98	3	1.769	6.77	17.4	USGS, 数据源 GCMT ¹
	285	12	94	100	78	89	191	33	9	57	101	1	1.455	6.71	25.5	USGS, 数据源 US ² 、US ³
7.5	312	11	127	94	81	83	190	36	356	53	95	7	8.998	7.24	12.0	USGS, 数据源 GCMT ¹
	308	7	116	102	83	87	195	38	8	52	102	3	11.47	7.31	15.5	USGS, 数据源 US ² 、US ³

面参数 NWW—SEE 走向显示均与喜马拉雅主边界断裂走向相符合；倾角和滑动角显示与喜马拉雅主边界断裂构造断层面向北倾相符合；4 月 25 日 7.0 级余震最佳拟合深度在 15.8 ~ 19.5 km，4 月 26 日 7.1 级余震最佳拟合深度在 17.4 ~ 25.5 km，5 月 12 日 7.5 级余震最佳拟合深度在 12.0 ~ 15.5 km，3 次强余震震源深度与 8.1 级主震深度相当。

2 尼泊尔 8.1 级地震序列特征

2.1 余震衰减特征

据西藏地震台网测定，2015 年 4 月 25 日尼泊尔 8.1 级地震（主震 $M_w7.8$ ）发生后，截至 8 月 10 日，尼泊尔地震震区共记录 $M \geq 3.0$ 余震 368

次，其中：7.0 级以上地震 4 次（含 8.1 级主震），6.0 ~ 6.9 级地震 2 次，5.0 ~ 5.9 级地震 24 次，4.0 ~ 4.9 级地震 216 次，3.0 ~ 3.9 级地震 122 次，最大余震为 5 月 12 日 15 时 5 分发生在尼泊尔的 7.5 级（ $M_w7.3$ ）地震，根据 4 月 25 日 ~ 8 月 10 日西藏地震台网的记录，并对比 NECI 记录，将此次地震序列目录列于表 4，主震与最大余震差 0.6 级。余震优势分布大致为 NWW—SEE，与地震等烈度线长轴方向基本吻合，详见中国地震局发布的尼泊尔 8.1 级地震烈度图（震灾应急救援司，2015）。
此次地震余震数量不多，根据震后 3 个多月的记录统计， $M_L \geq 2.0$ 余震为 410 余次。由于西藏地震台网偏于余震区域一侧，考虑余震记录范围，

表 4 2015 年 4 月 25 日尼泊尔 8.1 级地震序列目录 ($M \geq 5.0$)
Tab. 4 Catalogue of Nepal $M8.1$ earthquake sequence on Apr. 25, 2015 ($M \geq 5.0$)

序号	发震日期 月-日 时:分:秒	$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$	深度/km	震级		参考地名
					M	M_b	
1	04-25 14:11:26.4	28.23	84.73	11	8.1	$M_w7.8$	尼泊尔
2	04-25 14:15:22.9	27.63	85.54	10	—	6.1	尼泊尔
3	04-25 14:18:10.9	27.69	86.02	10	—	5.6	尼泊尔
4	04-25 14:20:40.3	28.20	84.49	10	—	5.4	尼泊尔
5	04-25 14:22:02.8	27.80	85.11	10	—	5.1	尼泊尔
6	04-25 14:25:55.3	27.69	85.59	10	—	5.0	尼泊尔
7	04-25 14:37:58.7	27.74	85.83	10	—	5.1	尼泊尔
8	04-25 14:45:24.9	28.22	84.82	9	7.0	$M_w6.6$	尼泊尔
9	04-25 14:53:42.8	27.67	85.20	10	—	5.0	尼泊尔
10	04-25 14:56:33.9	27.88	85.75	10	5.6	5.5	尼泊尔
11	04-25 14:58:27.6	27.72	86.01	10	4.9	5.1	尼泊尔
12	04-25 15:47:01.0	27.82	85.60	10	5.0	5.0	尼泊尔
13	04-25 16:55:56.0	27.59	85.51	10	5.3	5.3	尼泊尔
14	04-25 17:30:32.1	27.78	85.53	7	5.2	4.9	尼泊尔
15	04-25 20:44:05.2	28.10	84.56	10	4.9	5.2	尼泊尔
16	04-26 01:42:50.9	28.24	85.83	10	5.2	$M_w5.1$	尼泊尔
17	04-26 07:16:15.5	27.80	84.87	13	5.4	$M_w5.1$	尼泊尔
18	04-26 15:09:10.7	27.77	86.02	7	7.1	$M_w6.7$	尼泊尔
19	04-27 00:26:06.7	27.83	85.87	14	5.1	4.9	尼泊尔—中国聂拉姆间
20	05-12 15:05:19.7	27.81	86.07	15	7.5	$M_w7.3$	尼泊尔
21	05-12 15:17:20.6	27.71	86.22	13	—	5.5	尼泊尔
22	05-12 15:23:32.7	27.56	86.26	10	—	5.0	尼泊尔
23	05-12 15:34:22.6	27.75	86.24	10	—	5.4	尼泊尔
24	05-12 15:36:54.5	27.63	86.16	15	6.2	$M_w6.3$	尼泊尔
25	05-12 16:06:05.5	27.72	86.02	15	4.9	5.0	尼泊尔
26	05-12 16:13:54.6	27.76	85.76	15	5.0	5.1	尼泊尔
27	05-12 16:21:10.8	27.73	86.13	15	4.7	5.2	尼泊尔
28	05-13 05:25:11.9	27.78	84.64	10	4.9	5.2	尼泊尔
29	05-14 05:38:06.4	27.72	86.05	8	4.3	5.0	尼泊尔
30	05-16 19:34:10.0	27.56	86.07	7	5.7	$M_w5.5$	尼泊尔

选取 4.0 级以上余震分析衰减特征（图 1）。从时间进程上看，序列的发震时刻相对集中在主震和 7.0 级以上强余震发生的 3 日内，序列在主震和强余震后快速衰减，8.1 级主震震后 3 天发生的 4.0 级以上余震达 106 次，7.5 级地震后 3 天发生的 4.0 级以上余震 71 次。主震和强余震后 3 日发生的 4.0 级以上地震序列占统计 108 天序列总量的 72.54%。序列总体显示余震频次不高、能量释放

有起伏、余震衰减迅速、余震活动时间不长等特点。图 1 所示序列 $M-T$ 图、 $N-T$ 图和蠕变释放曲线也体现了这些特点。

从定量的角度分析，地震序列类型判定准则主要有震级差、能量比以及余震频次等。尼泊尔 8.1 级地震序列中最大地震 $M_{主}=8.1$ ($M_w7.8$) 与次大地震 $M_{次}=7.5$ ($M_w7.3$) 的震级差 $\Delta M=M_{主}-M_{次}=8.1-7.5=0.6$ ($M_w7.8-7.3=0.5$)，若

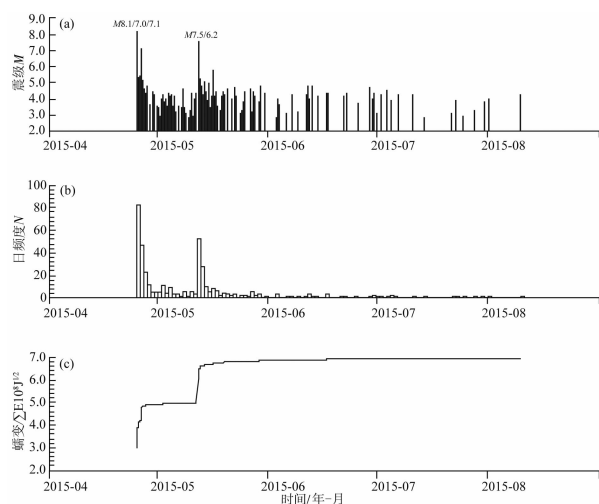


图1 尼泊尔8.1级地震序列的 $M-t$ 图 (a)、 $N-t$ 图 (b)、蠕变图 (c)

Fig. 1 $M-t$ diagram (a), $N-t$ diagram (b) and curve of strain release (c) of the Nepal M8.1 earthquake sequence

根据地震序列类型判定震级差准则 $\Delta M \leq 0.7$, 可判定为震群型; 序列中最大震级 $M_{\text{主}} = 8.1$ 释放的地震波能量 $E_{\text{主}}$ 与全序列 (108 天的记录) 总能量 $E_{\text{总}}$ 之比 $E_{\text{主}}/E_{\text{总}} = 58.63\%$, 若根据地震序列类型判定能量比准则 $E_{\text{主}}/E_{\text{总}} < 90\%$, 也可判定为震群型; 尼泊尔8.1级地震的余震频次不丰富, 若根据地震序列类型判定余震频次准则, 序列不属于主—余型, 定量显示为多震型 (震群型)。由此, 可根据地震序列类型定量准则判定尼泊尔8.1级地震类型为震群型。

从定量的角度分析判定尼泊尔8.1级地震类型仍存在问题, 原因是上述地震序列类型判定震级差、能量比以及余震频次等准则的统计数据来源于点源破裂的中强地震统计结果, 而对于板块边界的上百千米面破裂的巨大地震是否能简单套用还值得思考。

从定性的角度分析, 2015年4月25日尼泊尔8.1级地震可判定为主—余型地震。定性的角度分析尼泊尔8.1级地震应该更符合破裂实际, 此次尼泊尔8.1级地震的余震数量虽不多, 但震后3个多月的记录统计表明, $M_{\text{L}} \geq 2.0$ 余震为410余次, 余震平面分布可勾绘出破裂范围; 强余震的分布也显示8.1级地震的破裂区域和方向, 尼泊尔8.1级地震发生后紧跟的7.0级强余震就在起始破裂附近, 而7.1级和7.5级强余震均位于破裂终止的东

南端部区域; 余震序列的发震时刻相对集中在主震和7.0级以上强余震后的3日内, 主震和强余震后余震序列均显示衰减迅速, 主震和强余震后3日内4.0级以上序列余震占108天序列总量的72.54%。由此可见, 2015年4月25日尼泊尔8.1级地震可定性分析确定为主—余型地震。

2.2 余震空间分布特征

结合2015年4月25日~8月10日的西藏地震台网记录, 并对比 NEIC 记录, 将尼泊尔8.1级地震 $M_{\text{L}} \geq 3.0$ 余震序列特征列于图2: 空间上, 余震区集中分布呈 NWW—SEE 走向, 与喜马拉雅主边界断裂构造走向一致, 余震分布密集区位于喜马拉雅主边界断裂带构造迹线西北一侧。余震分布区长轴呈 NWW—SEE 走向, 展布约200 km, 北西起自尼泊尔的婆罗多布尔北区域, 南东达尼泊尔的卡马拉迈北区域; 短轴约150 km, 西南起于尼泊尔加德满都西南区域, 东北延伸至我国西藏的聂拉木县。强余震的空间分布显示破裂空间基本平衡: 尼泊尔8.1级地震破裂过程呈现沿喜马拉雅主边界断裂带构造迹线向东南方向单侧破裂, 除14时45分发生的7.0级强余震位于主震起始破裂附近外, 4月26日7.1级和5月12日和7.5级地震均位于主震破裂的东南端, 使得200 km的破裂趋于平衡。序列时间进程上, 主震发生后3日内和5月12日最大强余震后3日内, 余震活动比较活跃; 4月28日~5月11日期间, 3.0级以上余震的发震时间间隔逐步拉长, 5月12日15时5分发生7.5级最大余震, 最大余震发生后余震频次继续衰减; 5月16日19时34分余震区发生5.6级地震, 在衰减的同时显示余震强度有所起伏。

分析余震深度可知: 依据西藏地震台网数据, 并对比 NEIC 测定深度结果 (表4), 余震深度基本分布在10 km左右, 符合喜马拉雅主边界断裂带构造的低角度俯冲。震源机制解显示 (表2、3): 尼泊尔8.1级主震发震构造的节面 I 面倾角约为 7° , 7.1和7.5级两次强余震的发震构造面也为 $7^\circ \sim 12^\circ$ 的低倾角, 可见与倾向北的喜马拉雅前缘、主边界和主中央逆冲断裂等汇聚于低角度主喜马拉雅逆冲断裂的俯冲错动作用的结果相吻合。

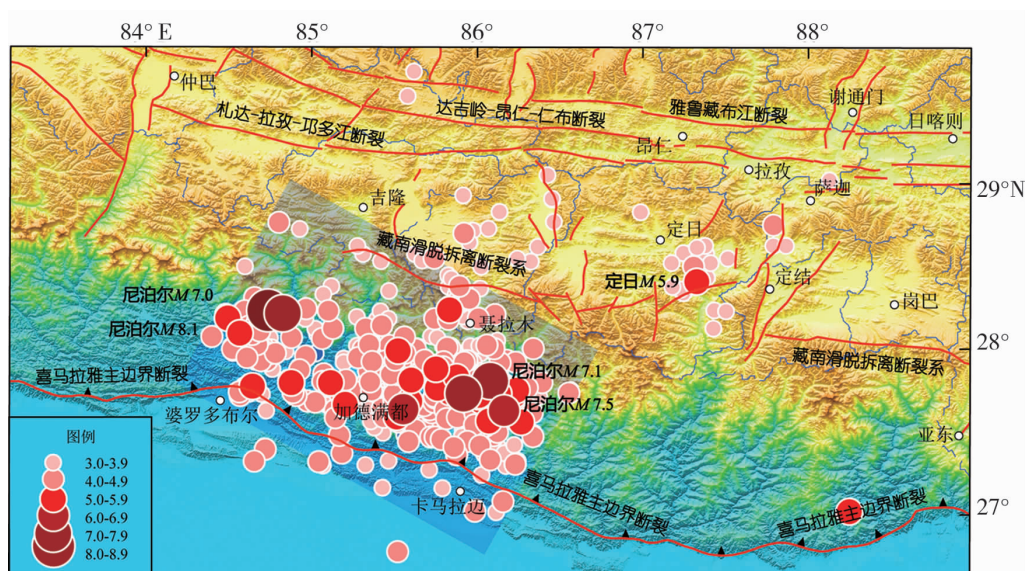


图2 尼泊尔8.1级地震 $M_L \geq 3.0$ 余震分布

Fig. 2 The distribution of the $M_L \geq 3.0$ aftershocks of Nepal M8.1 earthquake

3 尼泊尔8.1级地震与喜马拉雅历史破裂

在印度板块与欧亚板块的碰撞挤压下,形成了绵延2 800 km的板块边界弧形汇聚带——喜马拉雅碰撞带。喜马拉雅碰撞构造带西起巴基斯坦北部,经印度西北部、尼泊尔、不丹,东至中—印—缅交界。2015年尼泊尔8.1级地震发生于喜马拉雅碰撞带中段,在喜马拉雅碰撞带中段由系列近平行的逆冲型断裂带、滑脱带和缝合线自南向北展布:喜马拉雅前缘逆冲断裂(Himalayan Frontal Thrust, HFT)、主边界逆冲断裂(Main Boundary Thrust, MBT)、主中央逆冲断裂(Main Central Thrust, MCT)、藏南滑脱带(South Tibet Detachment, STD)和雅鲁藏布江缝合线,汇聚于主喜马拉雅逆冲断裂(Main Himalayan Thrust, MHT)。逆冲断裂系(HFT、MBT和MCT)与藏南滑脱带(STD)构造活动为低倾角的逆冲断裂与正断层活动,逆冲断裂系与藏南滑脱带之间的挤压汇聚区域岩体被斜向挤出,形成世界的最高峰——珠穆朗玛峰。据许多学者所研究的自北向南的喜马拉雅主中央、主边界、主前缘逆冲断裂的活动是一次自古至今的活动演变。

2015年尼泊尔8.1级地震发震为低倾角的主喜马拉雅逆冲断裂(MHT),余震区集中分布在8.1级主震东南面,呈现的NWW—SEE走向与喜

马拉雅主边界断裂构造走向一致,余震分布密集区位于喜马拉雅主边界断裂带(MBT)构造迹线北一侧,深度与主喜马拉雅逆冲断裂(MHT)相符合;余震分布区长轴呈NWW—SEE走向,展布约200 km,估计破裂尺度与1833年大地震相当,比1934年的大震略小,1934年的大地震沿喜马拉雅主边界断裂带破裂尺度为200~300 km,南北延伸150 km(Chander, 1989)。

喜马拉雅碰撞构造带主要的大地震的发震构造位于主边界逆冲断裂(MBT)与主中央逆冲断裂(MCT)之间。2015尼泊尔8.1级地震破裂发生在历史大震的破裂空段(图3),即在1505年与1833年两次历史破裂之间的空段。

在2015年尼泊尔8.1级地震破裂的西北端相连的主要大震破裂是1505年6月6日尼泊尔西的罗木斯塘(Lo Mustang)M8.6地震破裂段(矩震级 $M_w \geq 8.2$),沿喜马拉雅碰撞构造带破裂达500~600 km(Jackson, 2002; Ambraseys, Jackson, 2003; Bilham, 2004),截至2015年,1505年尼泊尔西的罗木斯塘(Lo Mustang)的M8.6($M_w \geq 8.2$)地震的离逝时间已经长达510 a;向西相邻的大震破裂是1803年9月1日印度北方邦(Uttar Pradesh)的 $M_w 8.1$ 地震;大约1400年至1500年间(1413年) $M \geq 8$ 地震破裂尺度至少为400 km(Wesnousky *et al*, 1999; Kumar *et al*, 2001);继续往西是1905年4月4日印度喜马偕尔邦冈格拉

(Kangra) M_w 7.8 地震 (Chander, 1988); 最西端是 1555 年 9 月印度斯利那加 (Srinagar) M_w 7.6 和 2005 年 10 月 8 日巴基斯坦 7.8 级地震。

与 2015 年尼泊尔 8.1 级地震破裂的东南端相连的主要大震破裂是 1833 年 8 月 26 日尼泊尔 (Nepal) M_w 7.7 地震 (Ambraseys, Douglas, 2004; Bilham, Ambraseys, 2005) 和 1934 年 1 月 15 日尼泊尔—印度 (比哈尔邦) 间 (Nepal – India Bihar) M_w 8.1 地震; 向东的区域, 多种研究记录显示大约为 1100 年至 1300 年间 (1255 年) 的地震破裂, $M \geq 8$ 地震破裂尺度可能至少 200 km, 在尼泊尔东部的正面推挤破裂可能是对应 1255 年摧毁加德满都的地震 (Bilham, Ambraseys, 2005; Bilham, 2004; Jouanne *et al.*, 2004; Feldl, Bilham, 2006); 继续向东是 1897 年 6 月 12 日印度阿萨姆 M_s 8.7 地震破裂达 550 km (Seeber *et al.*, 1981); 再向东是 1947 年 7 月 29 日印度阿萨姆 (India Assam)

M_w 7.3 地震; 最终到达喜马拉雅弧东端的 1950 年 8 月 15 日中国西藏与印度阿萨姆间 (Tibet-Assam) 的西藏察隅 M_w 8.5 地震。

在喜马拉雅碰撞构造带上, 除上述主要大震破裂外, 还发生有系列 7 级以上地震 (表 5), 图 3 中五角星标识的是历史强震, 这些强震的破裂尺度不及上述主要的历史破裂。

4 讨论与结论

尼泊尔 8.1 级地震震源力学机制、破裂过程以及余震空间展布序列特征显示:

尼泊尔 8.1、7.0、7.1 和 7.5 级地震的震源力学机制均显示为低倾角的纯逆冲破裂性质。尼泊尔 8.1 级地震和余震震源深度分布在 5 ~ 15 km 范围, 震源浅, 与主喜马拉雅逆冲断裂 (MHT) 深度

表 5 喜马拉雅弧历史大震目录

Tab. 5 Catalog of historical earthquakes along the Himalayan Arc

序号	发震日期	$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$	震级		参考地名
	年-月-日			M_s	M_w	
1	1505-06-06	29.5	83.0	8.6	8.2	尼泊尔西的罗木斯塘
2	1555-09-01	33.5	75.5	7.6	7.6	印度斯利那加
3	1713-03-01	27.5	93.0	7.0	—	印度阿鲁纳恰尔邦
4	1803-09-01	31.0	79.0	8.1	8.1	印度北方邦
5	1833-05-30	29.4	80.1	7.5	—	印度:赫尔德瓦
6	1833-08-26	28.3	85.5	8.0	7.7	尼泊尔加德满都北部
7	1846-12-10	26.0	93.0	7.5	—	印度阿萨姆邦, 察查地区
8	1866-05-23	27.7	85.3	7.6	—	尼泊尔加德满都
9	1869-07-07	27.7	85.3	7.4	—	尼泊尔加德满都
10	1885-05-30	33.5	75.0	7.0	—	印度斯利那加
11	1897-06-12	26.0	91.0	8.7	—	印度阿萨姆
12	1905-04-04	33.0	76.0	8.0	7.8	印度喜马偕尔邦冈格拉
13	1906-02-27	31.5	77.5	7.0	—	印度喜马偕尔邦
14	1934-01-05	26.5	86.5	8.1	8.1	尼泊尔—印度 (比哈尔邦) 间
15	1936-05-07	28.5	83.5	7.0	—	尼泊尔博克拉
16	1936-05-27	28.3	83.3	7.0	—	尼泊尔道拉吉里区
17	1947-07-29	28.6	93.6	7.9	7.3	印度阿萨姆
18	1950-08-15	28.5	96.5	8.6	8.5	中国西藏察隅
19	2005-10-08	34.5	73.8	7.8	7.7	巴基斯坦穆扎法拉巴德
20	2015-04-25	28.23	84.73	8.1	7.8	尼泊尔博克拉

注: 资料来源: 国家地震局震害防御司, 1996; 时振梁等, 1986; 宋治平等, 2011a, b.

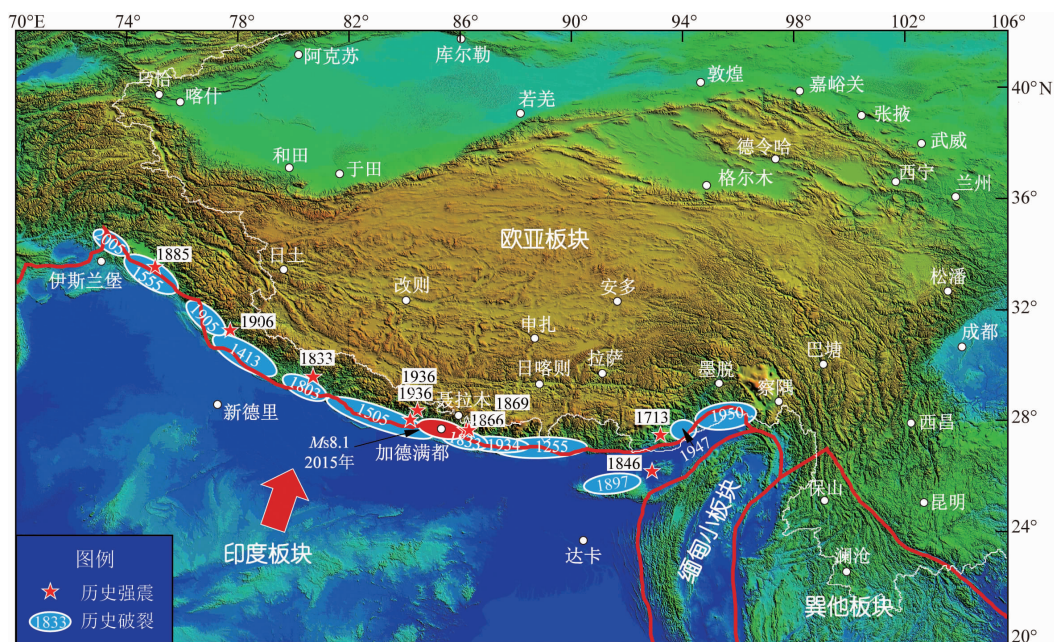


图3 尼泊尔8.1级地震与喜马拉雅主要历史破裂和强震分布 (据 Bilham, Ambraseys (2005); Chander (1989); Jackson (2002); Ambraseys, Jackson (2003); Bilham (2004))

Fig. 3 Distribution of Nepal M8.1 earthquake and the main history ruptures and strong earthquakes along Himalaya (drawn from Bilham, Ambraseys (2005); Chander (1989); Jackson (2002); Ambraseys, Jackson (2003); Bilham (2004))

相吻合;主震和余震的机制解的节面 I 的 NWW—SEE 走向显示与喜马拉雅主边界断裂走向相符合,倾角在 $7^{\circ} \sim 10^{\circ}$;说明主震 8.1 级和 7.0、7.1 和 7.5 级余震均发生在低缓的主喜马拉雅逆冲断裂 (MHT),滑动角为 110° 左右,由此可推断主震和强余震均为纯逆冲断层作用的结果。

2015 年 4 月 25 日尼泊尔 8.1 级地震可定性判定为独特的主—余型地震。尼泊尔 8.1 级地震序列的震级差、能量差和明显起伏的能量释放具有震群型地震特点,而余震频度不高、衰减迅速和活动的持续时间短又使得这次地震不具有震群型地震特点。虽然尼泊尔 8.1 级地震序列似乎可定量判定为震群型地震,但也存在不符合震群型地震特点的一些矛盾。而从定性的角度分析,2015 年 4 月 25 日尼泊尔 8.1 级地震的余震平面分布可勾绘出破裂范围; $M \geq 7.0$ 的强余震的分布也显示 8.1 级主震的破裂区域和方向;尼泊尔 8.1 级主震和 3 次 $M \geq 7.0$ 强余震后 3 日发生的 4.0 级以上序列余震占 108 天序列总量的 72.54%。因此,笔者倾向从尼泊尔 8.1 级地震的破裂方向、破裂范围和强余震的分布等定性判定其为独特的主—余型地震。

2015 年 4 月 25 日尼泊尔 8.1 级地震破裂发生在历史大震的破裂空段。尼泊尔 8.1 级地震的余震频次虽不高,但据西藏地震台网记录,并对比 NE-IC 记录,震后 3 个多月震区记录 410 多次 2 级以上余震,余震分布密集区长轴 NWW—SEE 约 200 km,长轴走向显示与喜马拉雅主边界走向一致,短轴南北向约 150 km;估计 2015 年尼泊尔 8.1 级地震破裂尺度与 1833 年尼泊尔加德满都北部大震相当,比 1934 年的尼泊尔—印度 (比哈尔邦) 间大震略小。据历史地震破裂空段推测,2015 年尼泊尔 8.1 级地震破裂填充在 1505 年大震与 1833 年大震两次历史破裂之间的空段,与 1505 年和 1833 年大震破裂区段有部分重合。

笔者在尼泊尔 8.1 级地震现场工作中得到各方给予的有力支持;在本文撰写过程中得到西藏自治区地震局给予极大的帮助;文中使用了相关网站公布的地震目录、矩张量解等数据;本文修改采纳了两位审稿专家提出的建设性修改意见;本文编辑进行文字方面的悉心编辑加工,在此深表谢意。

参考文献:

- 德国勘测中心的地球科学研究中心. 2015. 矩张量解[EB/OL]. (2015-04-26)[2015-08-12]. <http://www.gfz-potsdam.de/>.
- 法国 GeoScope 项目. 2015. 矩张量解[EB/OL]. (2015-04-26)[2015-08-12]. <http://geoscope.ipgp.fr/>.
- 国家地震局震害防御司. 1996. 全球重大灾害性地震目录(2150B. C. ~1991A. D.)[M]. 北京:地震出版社.
- 美国地质调查局. 2015. 矩张量解[EB/OL]. (2015-04-26)[2015-08-12]. <http://www.usgs.gov/>.
- 美国国家地震信息中心(NEIC). 2015. 地震目录[EB/OL]. (2015-08-12)[2015-08-12]. <http://earthquake.usgs.gov/regional/neic/>.
- 时振梁, 赵荣国, 王淑贞等. 1986. 世界地震目录(1900~1980 $M \geq 6$)[M]. 北京:地图出版社.
- 宋治平, 张国民, 刘杰等. 2011a. 全球地震目录(9999B. C. ~2010A. D.)[M]. 北京:地震出版社.
- 宋治平, 张国民, 刘杰等. 2011b. 全球地震灾害信息目录(9999B. C. ~2010A. D.)[M]. 北京:地震出版社.
- 震灾应急救援团. 2015. 中国地震局发布尼泊尔8.1级地震震度图[EB/OL]. (2015-05-01)[2015-08-12]. <http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/464/478/20150501221233264365835/index.html>.
- 中国地震台网中心. 2015. 2015年4月25日尼泊尔8.1级地震情况通报[EB/OL]. (2015-04-25)[2015-08-12]. <http://www.cenc.ac.cn/publish/cenc/887/20150425200758215232226/index.html>.
- 中国地震局地质研究所. 2015a. 尼泊尔发生8.1级地震区域地震构造图[EB/OL]. (2015-04-25)[2015-08-12]. <http://www.eq-igl.ac.cn/upload/images/2015/4/2611821744.jpg>.
- 中国地震局地质研究所. 2015b. 2015年4月25日尼泊尔 $M_8.1$ 级地震震源破裂过程[EB/OL]. (2015-04-26)[2015-08-12]. <http://www.eq-igl.ac.cn/contents/43/3262.html>.
- 中国地震局地球物理研究所. 2015. 2015年4月25日尼泊尔8.1级地震[EB/OL]. (2015-04-25)[2015-08-12]. <http://www.cea-igp.ac.cn/tpwx/272110.shtml>.
- 中国地质科学院. 2015. 2015年4月25日尼泊尔 $M_8.1$ 级大地震构造分析. (2015-05-04)[2015-08-12]. <http://www.cags.ac.cn/YWJX/2015/0504-1.html>.
- 中国科学院测量与地球物理研究所. 2015. 尼泊尔8.1级地震同震静态库仑应力变[EB/OL]. (2015-05-05)[2015-08-12]. http://www.whigg.ac.cn/xwzx/tpwx/201505/t20150505_4350023.html.
- Ambraseys N N, Douglas J. 2004. Magnitude calibration of north Indian earthquakes[J]. *Geophys. J Int*, 158:1-42.
- Ambraseys N, Jackson D. 2003. A note on early earthquakes in northern India and southern Tibet[J]. *Curr. Sci*, 84:571-582.
- Bilham R. 2004. Earthquakes in India and the Himalaya: tectonics, geodesy and history[J]. *Ann. Geophys*, 17:839-858.
- Bilham R, Ambraseys N. 2005. Apparent Himalayan slip deficit from the summation of seismic moments for Himalayan earthquakes, 1500-2000[J]. *Current science*, 88(10):1658-1663.
- Chander R. 1988. Interpretation of observed ground level changes due to the 1905 Kangra earthquake, Northwest Himalaya[J]. *Tectonophysics*, 149:289-298.
- Chander R. 1989. Southern limits of major earthquake ruptures along the Himalaya between longitudes 75° and 90° E[J]. *Tectonophysics*, 170:115-123.
- Feldl N, Bilham R. 2006. Great Himalayan earthquakes and the Tibetan plateau. *Nature Publishing Group*, 444(9):165-170.
- Jackson D. 2002. The great western-Himalayan earthquake of 1505: a rupture of the central Himalayan gap, in Tibet[J]. *Past and Present*, 147-159.
- Jouanne F, Mugnier J L, Gamond J F, *et al.* 2004. Current Shortening across the Himalayas of Nepal[J]. *Geophysics J Int*, 157:1-14.
- Kumar S, Steven G W, Thomas K, *et al.* 2001. Earthquake Recurrence and Rupture Dynamics of Himalayan Frontal Thrust, India[J]. *Science*, 294:2328-2331.
- Seeber L, Armbruster J G, Quittmeyer R C. 1981. Seismicity and continental subduction in the Himalayan arc[J]. *Amer Geophys Union Geodynamics Series*, 3:215-242.
- Wesnousky S G, Kumar S, Mohindra R, *et al.* 1999. Holocene slip rate of the Himalayan Frontal Thrust of India, Observations near Dehra Dun[J]. *Tectonophysics*, 18:967-976.

Research on Nepal $M8.1$ Earthquake in 2015 and Historical Earthquakes along the Himalayan Arc

DU Fang¹, Tenzin², ZHU Defu², Thubten Tstring², Yeshe Lhamo², CAO Wenhua²,
Jemima Tstring², LIANG Mingjian¹

(1. *Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, Sichuan, China*)

(2. *Earthquake Administration of Tibet Autonomous Region, Lhasa 850000, Sichuan, China*)

Abstract

On Apr. 25, 2015, an Nepal $M8.1$ strong earthquake in the Pokhara of Nepal occurred on the Himalayan arc. The three strong events of $M7.0$, $M7.1$ and $M7.5$ had occurred in Nepal from Apr. 25 to May. 12, 2015. According to the data of Tibet Seismic Network and the current correlative information from internal and overseas, we analyzed the basic seismic parameters, aftershock distribution and sequence attenuation of Nepal $M8.1$ earthquake, and other characteristics of historical rupture along Himalayan arc. The results show that the focal mechanisms of the Nepal $M8.1$, $M7.0$, $M7.1$ and $M7.5$ earthquakes are almost the pure thrust events with a low-angle and shown as the rupture plane strikes parallel to the Himalayan belt in NWW-SEE, and the dips with $5^\circ \sim 11^\circ$ to the NNE. From a qualitative point of view, the Nepal $M8.1$ earthquake can be determined a typical main shock-aftershock sequence. The trend of the long axis of aftershocks distribution ellipsoid was consistent with the trend of main boundary of Himalayan belt structural. The lengths of the long axis in NWW-SEE and short axis in S—N of the aftershocks distribution ellipsoid are about 200 km and 150 km respectively. It is estimated that the rupture zone of the 2015 $M8.1$ Nepal earthquake is similar to that of the 1833 $M_w7.7$ Nepal earthquake in the North of Kathmandu, and is smaller than that of the 1934 $M_w8.1$ Nepal-India (Bihar) earthquake. From the historical seismic gap, the rupture zone of the 2015 $M8.1$ Nepal earthquake filled the seismic gap between the two historical rupture of the 1505 earthquake and the 1833 earthquake.

Key words: the $M8.1$ Nepal Earthquake; focal mechanism; main Himalayan thrust fault; historical earthquakes