

宋潇潇、吴忠良、蒋长胜等,2016,矩震级及震源机制相似地震的辐射能量差别——2014 年鲁甸地震与景谷地震宽频带体波震级的比较,中国地震,32(4),653~662。

矩震级及震源机制相似地震的辐射能量差别

——2014 年鲁甸地震与景谷地震宽频带体波震级的比较

宋潇潇^{1,2)} 吴忠良¹⁾ 蒋长胜¹⁾ 李佳威¹⁾

1) 中国地震局地球物理研究所,北京市民族大学南路 5 号 100081

2) 湖北省地震局,武汉市武昌区洪山侧路 40 号 430071

摘要 2014 年 8 月 3 日鲁甸地震和 10 月 7 日景谷地震具有相似的矩震级和震源机制,但所造成的灾害却相差甚远。为考察地震辐射能量在这两次地震致灾过程中的作用,本文利用震中距 $6^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 范围内记录了鲁甸地震的 142 个台站、记录了景谷地震的 138 个台站的宽频带地震记录,计算了累积宽频带体波震级 m_{bc} 。结果表明鲁甸地震的 m_{bc} 高于景谷地震,因此地震辐射能量的差别对解释两次地震灾害的差别有不可忽视的作用。

关键词: 鲁甸地震 景谷地震 地震辐射能量 宽频带体波震级 矩震级

[文章编号] 1001-4683(2016)04-0653-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

2014 年 8 月 3 日云南鲁甸 $M_s 6.5$ ($M_w 6.2$) 地震中有 700 人死亡或失踪、约 3000 人受伤^①。与此对照,2014 年 10 月 7 日云南景谷 $M_s 6.6$ ($M_w 6.1$) 地震中有 1 人死亡、约 300 人受伤^②。这两次地震的震源机制和矩震级、面波震级均相近。对鲁甸地震灾害偏重的成因,已有多方面讨论,Cheng 等(2015)认为鲁甸地震灾害主要是因当地建筑的易损性以及地震诱发的滑坡等所致。但同时有限的强震记录也显示,鲁甸地震的震源谱确比景谷地震具有更多的高频成分。赵仲和(2014)援引 IRIS 震源参数测定结果认为,鲁甸地震辐射能量的高频成分较景谷地震更为丰富。张广伟等(2014)通过地震序列重新定位及震源机制的研究认为,鲁甸地震的矩心相对于破裂起始点较浅,从而导致灾害严重。许力生等(2014)基于鲁甸地震不同方位台站上的视震源时间函数,认为地震能量的集中释放可能是造成灾害的主要原因。

鲁甸地震与景谷地震所造成灾害的差别,决非单一因素所致。从地震学角度而言,两次地震辐射能量的差别及其致灾效果值得研究。历史上,曾有若干矩震级相近但辐射能量不

[收稿日期] 2016-05-30; [修定日期] 2016-09-09

[项目类别] 中国地震局“云南鲁甸‘8·3’6.5 级地震系统性科学考察”项目资助

[作者简介] 宋潇潇,女,生于 1991 年,研究方向为数字地震学。E-mail: sxxcherry@163.com

① <http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/468/553/100821/100826/20140807212938960445806/index.html>

② <http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/468/553/101360/101364/20141009091722022145593/index.html>

同,从而造成不同灾害的震例(Choy et al,2001、2009)。本文试图通过(累积)宽频带体波震级讨论这一问题。

用宽频带体波震级描述地震辐射能量(Bormann et al,2008、2011、2012),既是传统的体波震级概念的推广,又是测定过程较为复杂的辐射能量(Boatwright et al,1986、2002;Choy et al,1997;Pulido et al,2000;Izutani et al,2001)的一种简便的近似。对于大地震和巨大地震,一般以“累积宽频带体波震级”来克服其“饱和”的缺点(Bormann et al,1975、2005、2006)。对于中等地震,累积宽频带体波震级 m_{Bc} 则“退化”为通常的宽频带体波震级 m_{B} 。

1 累积宽频带体波震级 m_{Bc}

按照 Bormann 等(2005、2009)的研究,累积宽频带体波震级 m_{Bc} 由

$$m_{\text{Bc}}(BB) = \lg \frac{V_{c,n}}{2\pi} + Q_{\text{PV}}(\Delta, h) \quad (1)$$

给出。其中

$$V_{c,n} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n V_i \quad (2)$$

V_i 表示宽频带速度记录垂直分量上前 n 个“子事件”(subevent)的速度峰值, $Q_{\text{PV}}(\Delta, h)$ 为量规函数。

此处“子事件”的概念,与震源过程中的“子事件”有一定联系,但并不完全等同。从地震波形分析的角度,Bormann 等(2009)将“子事件”定义为:从 P 波到时开始,找到波形与零轴每 2 个交点间绝对值最大的振幅,对每个绝对值最大的振幅,若其大于此前 P 波波列中出现的绝对值最大振幅的 q 倍,则将其定义为一次“子事件”,即

$$V_i \geq q V_{\text{max},t} \quad (3)$$

q 值经验地取为 0.6。通常计算累积宽频带体波震级的时间窗长度与地震的震源时间函数的长度相当,同时对于任何事件,求和时间窗都在 S 波到达前终止(Bormann et al,2009),因此,对于震源时间函数较短的中等地震,累积宽频带体波震级自然地“退化”为通常的宽频带体波震级。

本文所用量规函数取自 Saul 等(2007)的结果,Saul 等(2007)根据 1200 个地震事件、约 120000 个宽频带体波震级 m_{B} 的测定结果,修改了 Gutenberg 等(1956)的量规函数。该量规函数适用于震中距为 $6^\circ \sim 103^\circ$ 的范围。图 1 给出了 Saul 等(2007)的量规函数,同时作为对照,也给出了中国地震震级测定标准规定的量规函数(中华人民共和国国家标准,2016)。

2 所用数据和 m_{Bc} 的测定

本文所用地震波形数据包括鲁甸地震、景谷地震震中距 $6^\circ \sim 80^\circ$ 范围内的地震台站的垂直分量波形记录,均来自国家测震台网数据备份中心^③和 IRIS 数据中心。除去台站记录不正常的数据、P 波初至不清晰的波形、记录信噪比小于 2 的波形,同时尽可能考虑不同震中

③ 郑秀芳、姚志祥、杨辉等,2007,国家测震台网地震波形数据,中国地震局地球物理研究所国家地震信息服务数据中心,doi:10.11998/SEIS_DMC.Seismic_China_Network.2007.01.v1。

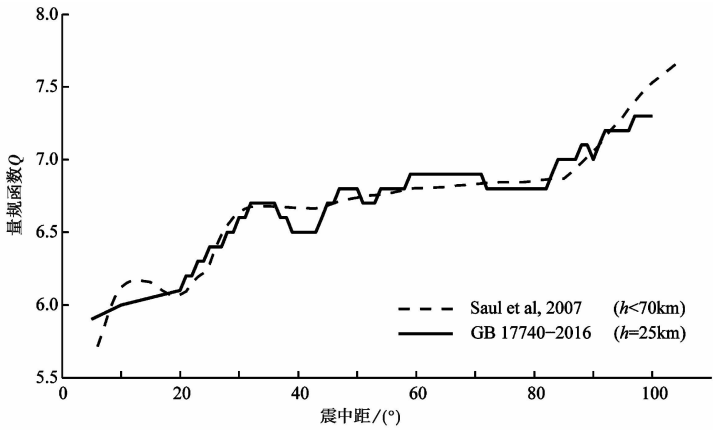


图 1 Saul 等(2007)的宽频带体波震级量规函数(虚线) 与中国地震震级测定标准规定的垂直向 P 波体波震级量规函数(实线)

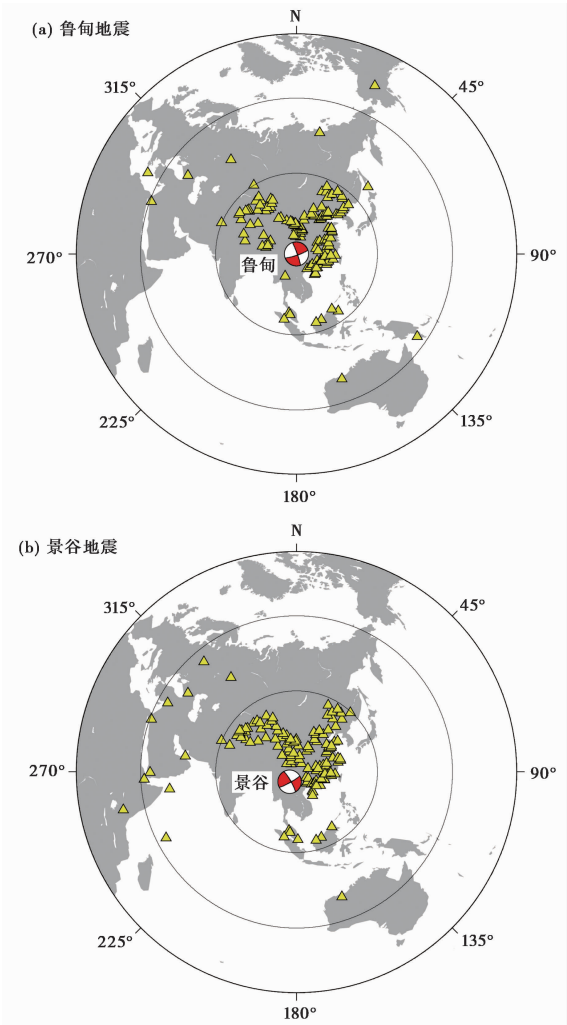


图 2 提供波形资料的台站分布
(震源机制解来自全球矩心矩张量(GCMT)结果)

距和方位角上的均匀分布,得到 142 个台站记录的鲁甸地震和 138 个台站记录的景谷地震的地震波形,台站分布如图 2 所示。

波形的预处理包括去平均、去倾斜、利用仪器响应文件中的灵敏度将记录的数字数(counts)转换成以 $\mu\text{m/s}$ 为单位的地动速度(刘瑞丰等,2015b)等。按式(3)所定义的“子事件”概念,找出波形在规定时间窗口内所有满足条件的速度峰值 V_i ,再依据公式(1)和(2),按台站震中距所对应的量规函数 Q 值进行校正,得到每个台所测得的 m_{Bc} 。

图 3 给出了 NM.ARS 和 XJ.YUT 两个台站的鲁甸地震和景谷地震的 m_{Bc} 的计算过程。黑色实线为预处理后的地震波形,蓝色竖线为所识别出的“子事件”的位置,红色阶梯状实线表示 m_{Bc} 随时间的变化。由图 3 可见,XJ.YUT 台记录的景谷地震的“子事件”主要集中在 P 波后约 10s 以内,而 NM.ARS 台记录的鲁甸地震的“子事件”持续时间则较长。图中蓝色和红色三角分别标出了 P~S 波段最大振幅处的 m_{Bc} 值和高频 P 波能量包络(灰色阴影部分)下降至峰值的 40% 时的 m_{Bc} 值。高频 P 波的包络线通过对宽频带速度记录的高频 P 波的平方作滑动平均处理得到,滤波频段取为 1~3Hz,平滑窗长为 5s(Hara, 2007; Bormann et al, 2008)。

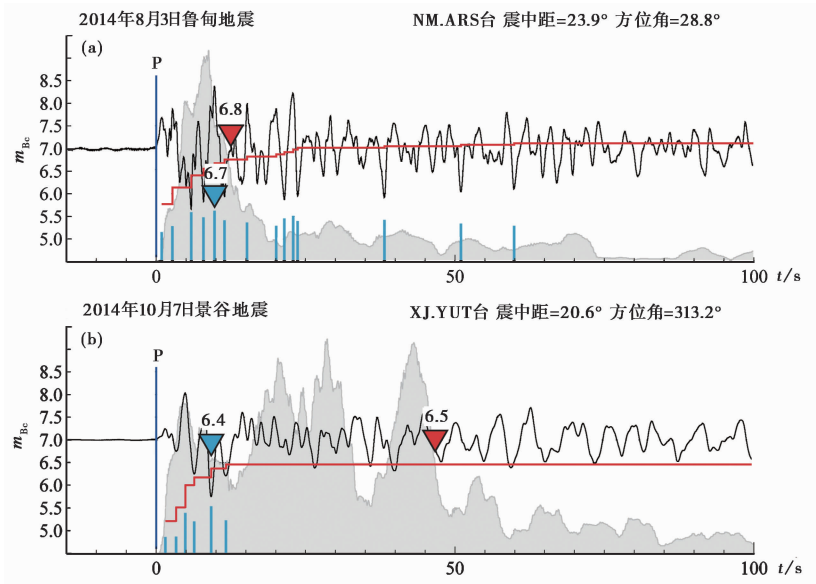


图 3 震级 m_{Bc} 的测定过程。(a)鲁甸地震(NM.ARS 台),(b)景谷地震(XJ.YUT 台)

蓝色粗实线表示满足公式(3)的“子事件”所在处,红色阶梯曲线为 m_{Bc} 随时间的变化;灰色阴影部分为高频 P 波包络;蓝色和红色三角所标出的数值分别为最大振幅以及高频 P 波包络下降至峰值的 40% 处所对应的 m_{Bc}

远震范围内的大地震,其震源时间函数持续时间较长,远大于 P 波组(P+pP+sP)中各震相的到时差,因此高频 P 波的包络可近似看作大地震的震源时间函数。然而对于中等地震,这一包络已不再对应具有确定物理意义的震源时间函数,相应地,根据式(3)所识别出的“子事件”也不能简单地与震源过程中的“子事件”进行直接类比。鲁甸地震与景谷地震的“子事件”持续时间的差别,可能有两个原因,一是鲁甸地震具有更为复杂的震源过程,二是鲁甸地震震源区的复杂结构,使鲁甸地震的能量释放,通过反射和折射等形成了后续的能量。

3 两次地震的 m_{Bc} 测定结果及其比较

图 4 给出了所测得的累积宽频带体波震级 m_{Bc} 与震中距的关系。由图 4 可见, 总体而言, 鲁甸地震的 m_{Bc} (红色圆点) 高于景谷地震 (蓝色方块)。为了更清楚地考察这种差别随震中距的变化, 图 5 将震中距以 5° 或 10° 步长分成 10 个区间, 并分别计算了每一区间的 m_{Bc} 的平均值和标准差。值得指出的是, 由于震级可以看成是能量的指数, 因此简单地对震级求算术平均并不恰当。这里的平均值和标准差, 仅是为了更直观地表示两次地震的震级差别及其随震中距的变化。

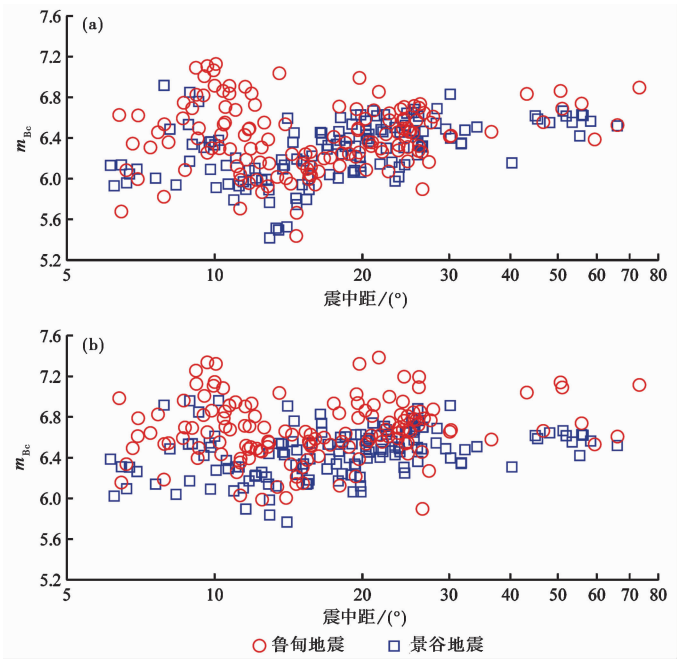


图 4 m_{Bc} 随震中距的变化 (横坐标采用对数坐标)

(a) 用 P 波初至至前后 10s 的波形测定结果; (b) 用 P 波初至至前后 20s 的波形测定结果

从图 4、图 5 可见, 当用较短的波形 (10s) 计算 m_{Bc} 时, 两次地震在震中距 $6^\circ \sim 15^\circ$ 范围内存在明显差异; 对于震中距更大的台站, 这种差别不复显现。一种可能的解释是, 鲁甸地震的高频辐射, 对两次地震的辐射能量的差别具有决定性的贡献, 高频辐射成分随着震中距的增加而衰减, 因此在震中距更大时, 宽频带体波震级的差别不再明显。另一方面, 若将时间窗取至 20s, 则所有震中距范围内的宽频带体波震级差都十分明显, 说明对两次地震的辐射能量的差别的贡献, 不仅来自震源时间函数的高频成分, 而且来自于震源区复杂结构而形成的后续能量。

由于 Saul 等 (2007) 的量规函数与中国地震震级测定标准规定的量规函数 (中华人民共和国国家标准, 2016) 存在差别, 并且这种差别在震中距 $6^\circ \sim 15^\circ$ 范围内更为明显, 作为对照, 图 6 给出了使用中国地震震级测定标准规定的量规函数 (中华人民共和国国家标准, 2016) 的结果, 由图 6 可见两个量规函数的差别并不影响两次地震的宽频带体波震级差。

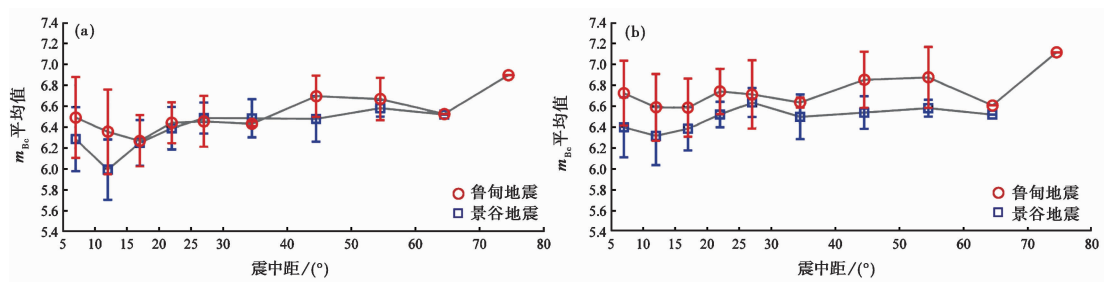


图 5 用误差棒给出按震中距分段求得的 m_{Bc} 平均值和标准差
(a)使用 P 波初至后前 10s 波形;(b)使用 P 波初至后前 20s 波形

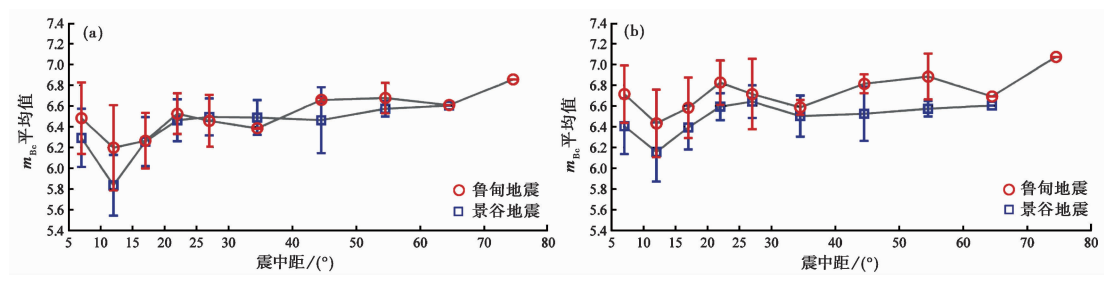


图 6 用误差棒给出采用中国地震震级测定标准规定的体波震级量规函数求得的 m_{Bc} 的平均值和标准差
(a)使用 P 波初至后前 10s 波形;(b)使用 P 波初至后前 20s 波形

图 7 给出了各台站 m_{Bc} 值的方位分布。由图可见,对 10s 时间窗的结果,鲁甸地震的震级偏大的台站(在图 7 中, $m_{Bc} \geq 6.8$ 的台站),集中分布在 NW-SE 方向上,这与此次地震的震源破裂传播方向(张勇等,2014;许力生等,2014)是一致的。对 20s 时间窗的结果,震级偏大的台站也集中分布在 NW-SE 方向上,一种可能的解释是 NW-SE 向展布的地震断层带中形成的导波对形成后续的能量具有重要作用。

4 结论和讨论

宽频带体波震级 m_{Bc} 是对地震辐射能量的一种描述。本文的结果表明,鲁甸地震的 m_{Bc} 高于景谷地震,就是说,在导致两次地震灾害差别较大的诸多因素中,地震辐射能量的差别具有不可忽视的作用。作为对照,表 1 给出了 IRIS 网站公布的鲁甸地震^④和景谷地震^⑤的能量震级测定结果(<http://ds.iris.eduspuenergy>),相应的结果是对震中距 $25^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 的远震范围内的宽频带(0.5~70.0s)和高频(0.5~2.0s)地震记录的垂直分量 P 波组测得的,以宽频带辐射能量震级 M_e (BB)和高频辐射能量震级 M_e (HF)来表示(Choy et al, 1995; Convers et al, 2011)。可见两次地震的宽频带辐射能量震级和高频辐射能量震级的差,与本文得到的(累积)宽频带体波震级的差在数量上相当。从表 1 还可以看出,矩震级接近的鲁甸地震与景谷地震具有不同的能量震级, M_e 鲁甸地震的能量震级高于景谷地震,其中高频能量震级

④ IRIS DMC, 2013a, Data Services Products: EQ Energy Earthquake energy & rupture duration, doi:10.17611/DP/9633579.
⑤ IRIS DMC, 2013b, Data Services Products: EQ Energy Earthquake energy & rupture duration, doi:10.17611/DP/9712498.

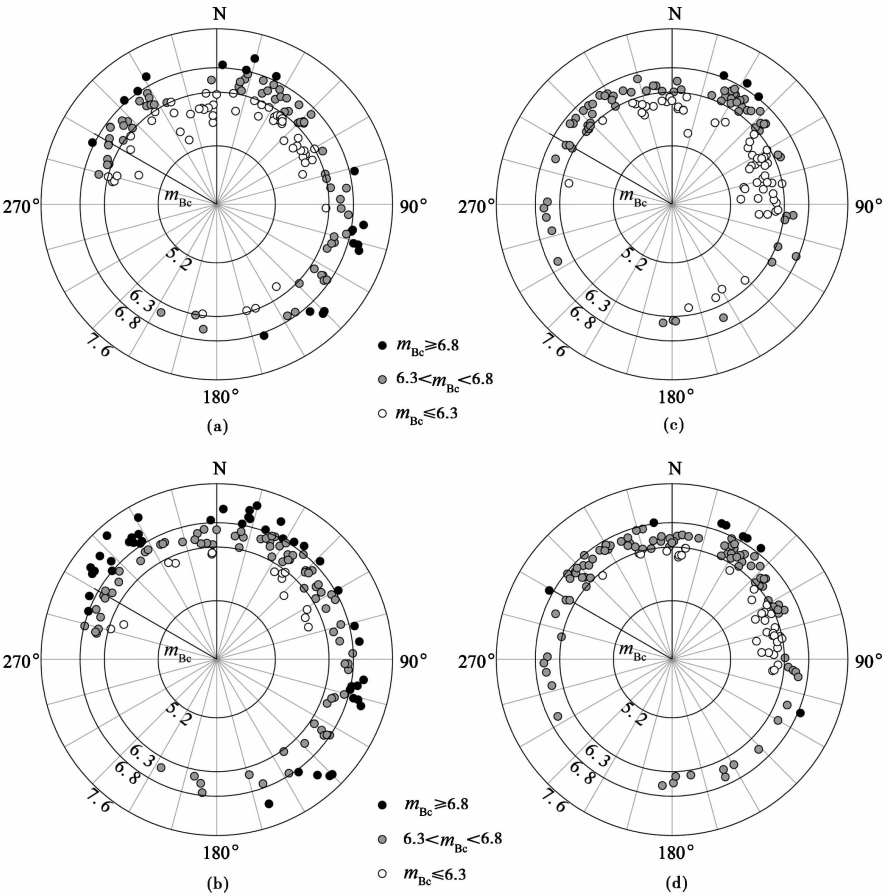


图 7 测得的 m_{Bc} 的方位分布

(a)、(b)分别为用鲁甸地震 P 波初至前后 10s、前 20s 波形的测定结果；
(c)、(d)分别为用景谷地震 P 波初至前后 10s、前 20s 波形的测定结果

的差又略高于宽频带能量震级的差,说明鲁甸地震的高频成分较景谷地震更为丰富,这个结论,也与本文的结果吻合。

本文进一步推测,鲁甸地震的偏高的辐射能量,首先来自震源函数中显著的高频成分。由图 7 推测,这些高频成分既来自震源凹凸体造成的高频辐射,同时也(更主要地)来自地震破裂传播的多普勒效应。

对鲁甸地震破裂过程的研究(张勇等,2014;戴嘉伟等,2015;许冲,2015)表明,此次地震的明显特征是自下而上、自 NW 向 SE 方向传播,并在 SE 端穿透地表。另一方面,从图 3、4、5 可以看出,不仅鲁甸地震本身所具有的高频成分,而且由鲁甸地震震源区的复杂结构(最可能是地震断层带)所形成的后续能量,都对两次地震辐射能量的差别有重要贡献。

表 1 IRIS 公布的能量震级 M_c 、GCMT 给出的矩震级 M_w 及由前 10s 和 20s 波形给出的 m_{Bc}

	M_c (BB)	M_c (HF)	M_w	m_{Bc} (10s)	m_{Bc} (20s)
鲁甸地震	6.39	6.72	6.2	6.41	6.67
景谷地震	6.09	6.37	6.1	6.11	6.44
震级差	0.30	0.35	0.1	0.30	0.23

注: m_{Bc} (10s)取自 15°以内的台站的平均值

矩震级相近但辐射能量不同,从而造成灾害不同的震例(Choy et al, 2001, 2009)在地震研究中具有不可忽视的重要意义。一般说来,不同震源机制类型的地震,其能量与地震矩之比(有时称为折合能量)本来就是不同的(Wyss et al, 1968; Wu, 2001)。鲁甸地震和景谷地震的特殊之处在于,它们不但矩震级相近,而且震源机制也相近,都是近直立的走滑型断层,从这个意义上讲,这两次地震提供了进行这种比较的更为典型的震例。

我国的震级测定中(中国地震局, 2001; 刘瑞丰等, 2015a; 中华人民共和国国家标准, 2016), 目前(累积)宽频带体波震级 m_{Bc} 尚未用于地震观测与解释的常规工作中。通常, 对于地震速报和地震应急而言, 测出单一的震级, 足以给出有用的信息。然而从鲁甸地震和景谷地震的比较可知, 不同的震级, 因其所代表的物理意义不同, 在地震应急救援和地震研究中, 具有不能彼此取代的作用。而从地震灾害的角度看, 代表辐射能量的(累积)宽频带体波震级, 甚至比面波震级和矩震级具有更为直接的减灾意义。因此可以期待这一震级成为中国地震监测中的常规测定震级。

致谢: 感谢国家测震台网数据备份中心提供相关地震数据及编辑在审稿过程中提出有益建议。特别感谢 Peter Bormann 教授生前在宽频带体波震级方面的指导。

参考文献

- 戴嘉伟、冀昆、温瑞智等, 2015, 云南景谷 $M_s 6.6$ 地震地震动特征分析, **37**(4), 969~975。
- 刘瑞丰、陈运泰、任泉等, 2015a, 震级的测定, 7~10, 北京: 地震出版社。
- 刘瑞丰、郑秀芬、杨辉等, 2015b, 地震观测数据的管理与服务, 44~62, 北京: 地震出版社。
- 许冲, 2015, 利用同震滑坡分析 2014 年鲁甸地震震源性质与破裂过程, 工程地质学报, **23**(4), 755~759。
- 许力生、张旭、严川等, 2014, 基于勒夫波的鲁甸 $M_s 6.5$ 地震震源复杂性分析, 地球物理学报, **57**(9), 3006~3017。
- 张广伟、雷建设、梁姗姗等, 2014, 2014 年 8 月 3 日云南鲁甸 $M_s 6.5$ 地震序列重定位与震源机制研究, 地球物理学报, **57**(9), 3018~3027。
- 张勇、陈运泰、许力生等, 2014, 2014 年云南鲁甸 $M_w 6.1$ 地震: 一次共轭破裂地震, 地球物理学报, **58**(1), 163~162。
- 赵仲和, 2014, 2014 年 8 月 3 日云南鲁甸 $M 6.5$ 地震的地震波能量, 国际地震动态, (9), 24~28。
- 中国地震局, 2001, 地震及前兆数字观测技术规范(地震观测), 11~16, 北京: 地震出版社。
- 中华人民共和国国家标准, 2016, 地震震级的规定(GB 17740-2016), 北京: 中国标准出版社。
- Boatwright J, Choy G L, 1986, Teleseismic estimates of the energy radiated by shallow earthquakes, *J Geophys Res*, **91**(B2), 2095~2112。
- Boatwright J, Choy G L, Seekins L C, 2002, Regional estimates of radiated seismic energy, *Bull Seism Soc Am*, **92**(4), 1241~1255。
- Bormann P, Giacomo D D, 2011, The moment magnitude M_w and the energy magnitude M_e : common roots and differences, *J Seism*, **15**(2), 411~427。
- Bormann P, Khalturin V I, 1975, Relations between different kinds of magnitude determinations and their regional variations, In *Proceeding of the XIVth General Assembly of the European Seismological Commission*, Trieste, 16~22。
- Bormann P, Saul J, 2008, The new IASPEI standard broadband magnitude m_B , *Seism Res Lett*, **79**(5), 698~705。
- Bormann P, Saul J, 2009, A fast, non-saturating magnitude estimator for great earthquakes, *Seism Res Lett*, **80**(5), 808~816。
- Bormann P, Wendt S, Giacomo D D, 2012, Seismic sources and source parameters.-in: Bormann, P (Ed.), *New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP2)*, Potsdam: Deutsches Geo Forschungs Zentrum GFZ, 1~259。
- Bormann P, Wylegalla K, 2005, Quick estimator of the size of great earthquakes, *Eos Transactions American Geophysical Union*, **86**(46), 464~465。
- Bormann P, Wylegalla K, Saul J, 2006, Near real-time broadband body-wave magnitude m_B and m_{Bc} : Automatic procedure for

- reliable magnitude estimates of strong earthquakes, USGS Tsunami Sources Workshop, Menlo Park, <http://walrus.wr.usgs.gov/tsunami/workshop>.
- Cheng J, Wu Z L, Liu J, et al, 2015, Preliminary report on the 3 August 2014, $M_w 6.2/M_s 6.5$ Ludian, Yunnan-Sichuan border, southwest China, earthquake, *Seism Res Lett*, **86**(3), 750~763.
- Choy G L, Boatwright J, 1995, Global patterns of radiated seismic energy and apparent stress, *J Geophys Res*, **100**(B9), 18205~18228.
- Choy G L, Boatwright J, 1997, Radiated seismic energy and energy magnitude, *Fusion Eng Des*, (3), 335~336.
- Choy G L, Boatwright J, 2009, Differential energy radiation from two earthquakes in Japan with identical M_w : the Kyushu 1996 and Tottori 2000 earthquakes, *Bull Seism Soc Am*, **99**(3), 1815~1826.
- Choy G L, Boatwright J, Kirby S, 2001, The radiated seismic energy and apparent stress of interpolate and intraplate earthquakes at subduction zone environments: Implications for seismic hazard estimation, USGS Open-file Report 01-0005, 1~17.
- Convers J A, Newman A V, 2011, Global evaluation of large earthquake energy from 1997 through mid -2010, *J Geophys Res*, **116**(B08), 114~123.
- Gutenberg B, Richter C F, 1956, Magnitude and energy of earthquakes, *Ann Geophys*, **53**(1), 7~11.
- Hara T, 2007, Measurement of the duration of high-frequency energy radiation and its application to determination of the magnitudes of large shallow earthquakes, *Earth Planets Space*, **59**(4), 227~231.
- Izutani Y, Kanamori H, 2001, Scale-dependence of seismic energy-to-moment ratio for strike-slip earthquakes in Japan, *Geophys Res Lett*, **28**(20), 4007~4010.
- Pulido N, Irikura K, 2000, Estimation of dynamic rupture parameters from the radiated seismic energy and apparent stress, *Geophys Res Lett*, **27**(23), 3945~3948.
- Saul J, Bormann P, 2007, Rapid estimation of earthquake size using the broadband P-wave magnitude m_B , Abstract S53A-1035, 2007 Fall Meeting, AGU, San Francisco.
- Wu Z L, 2001, Scaling of apparent stress from broadband radiated energy catalogue and seismic moment catalogue and its focal mechanism dependence, *Earth Planet Space*, **53**(10), 943~948.
- Wyss M, Brune J N, 1968, Seismic moment, stress, and source dimensions for earthquakes in the California-Nevada region, *J Geophys Res*, **73**(14), 4681~4694.

Difference in energy radiation from earthquakes with similar moment magnitude and focal mechanism—A comparison of the broadband body-wave magnitudes of the 2014 Ludian and Jinggu earthquake

Song Xiaoxiao^{1,2)} *Wu Zhongliang*¹⁾ *Jiang Changsheng*¹⁾ *Li Jiawei*¹⁾

1) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2) Earthquake Administration of Hubei Province, Wuhan 430071, China

Abstract In spite of the similar moment/surface wave magnitude and similar near-vertical strike-slip faulting, the August 3, 2014, Ludian, Yunnan, $M_s 6.5/M_w 6.2$ earthquake and the October 7, 2014, Jinggu, Yunnan, $M_s 6.6/M_w 6.1$ earthquake caused sharply different disasters, the former having a fatality/missing up to about 700 and injury about 3,000, and the latter fatality 1 and injury about 300. To investigate the role of seismic radiated energy in such a difference, we analyzed 142 broadband (BB) vertical recordings of the Ludian earthquake and 138 BB vertical recordings of the Jinggu earthquake, with epicentral distance $6^\circ \sim 80^\circ$, and calculated the broadband cumulative body-wave magnitude m_{bc} . It is shown that the m_{bc} of the Ludian earthquake is about 0.3 higher than the Jinggu earthquake, indicating that radiated energy contributes significantly to the difference of the earthquake disasters.

Key words: Ludian earthquake; Jinggu earthquake; Seismic radiated energy; Broadband body-wave magnitude; Moment magnitude