

赵烽帆、史海霞、周志华, 2014, 2008年汶川  $M_s$ 8.0地震和2013年芦山  $M_s$ 7.0地震震源特征比较分析, 中国地震, 30(4), 604~610。

# 2008年汶川 $M_s$ 8.0地震和2013年芦山 $M_s$ 7.0地震震源特征比较分析

赵烽帆 史海霞 周志华

中国地震台网中心, 北京市西城区三里河南横街5号 100045

**摘要** 2013年4月20日四川芦山发生了  $M_s$ 7.0地震, 芦山地震震中距离2008年5月12日汶川  $M_s$ 8.0地震震中约85km, 距离其余震密集分布区约60km。汶川地震和芦山地震均发生在龙门山断裂带上, 震源机制均以逆冲为主, 针对二者震源特征的比较分析, 对解释龙门山地区强震特征意义显著。本文基于地震波辐射能及视应力与应力降的关系, 对比讨论汶川地震和芦山地震的动态破裂过程, 初步研究结果显示, 汶川地震属于应力上调模式, 而芦山地震则属于应力下调模式, 通常应力上调模式的震后能量释放较为充分, 应力下调模式则对应震后能量释放相对不够充分, 余震空间分布相对集中。

**关键词:** 汶川地震 芦山地震 动态破裂过程 视应力

[文章编号] 1001-4683(2014)04-0604-07 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

2008年5月12日四川汶川发生强烈地震, 震级  $M_s$ 8.0, 震中位置为  $31.0^\circ\text{N}$ 、 $103.4^\circ\text{E}$ , 震源深度14km<sup>①</sup>。发震区域的主要地质背景为龙门山推覆构造带, 西接鲜水河-安宁河断裂带, 南邻西川盆地, 北部为龙门山区, 东部与秦岭南缘相接, 是中国大陆南北地震构造带中段的重要组成部分(徐锡伟等, 2008)。汶川地震主要地震波能量释放在前80s, 即地震开始于汶川县震中位置, 然后以3.1km/s的速度向东北方向传播300km, 向北单侧破裂扩展至青川一带, 汶川地震是以逆冲为主, 兼有少量右旋走滑分量的地震, 主断层走向NE-SW $230^\circ$ , 倾角 $39^\circ$ (陈运泰等, 2009)。

2013年4月20日8时2分四川芦山发生  $M_s$ 7.0地震, 震中位置为  $30.3^\circ\text{N}$ 、 $103.0^\circ\text{E}$ , 距汶川地震震中约85km, 距其余震密集分布区南端约60km。芦山  $M_s$ 7.0地震震中位于龙门山断裂带南段的前山断裂附近, 主震破裂过程呈现北北东向的挤压逆冲变形特征, 与龙门山

[收稿日期] 2014-06-25; [修定日期] 2014-08-30

[项目类别] 国家自然科学基金项目(41404045)、中国地震局地震科技星火计划青年项目(XH14055Y)及国家科技支撑计划项目(2012BAK19B02-01)联合资助

[作者简介] 赵烽帆, 女, 1983年生, 硕士, 工程师, 主要从事震源物理、地震活动性方面的研究。

E-mail: weina22@163.com

① [http://www.csi.ac.cn/manage/sichuan/sichuan080512\\_72.htm](http://www.csi.ac.cn/manage/sichuan/sichuan080512_72.htm)

断裂带总体走向和运动性质一致。初步分析认为,该地震与汶川地震一样,均为巴颜喀拉地块向东运动遇到华南地块阻挡,应力积累和释放的结果(刘杰等,2013)。龙门山断裂带全长约 500km,宽度约为 30~40km,横向上主要由中央断裂带、山后断裂带、山前断裂带及推覆构造带等组成;纵向上也可以分为 3 段:由北川至宁强、勉县为东北段;北川至都江堰为中段;都江堰至泸定、康定附近为西南段。2013 年芦山  $M_s7.0$  地震发生在西南段,2008 年汶川  $M_s8.0$  地震则发生在中北段,汶川地震的发生使得龙门山断裂带整体自震中向东北方向破裂了约 300km(图 1)。

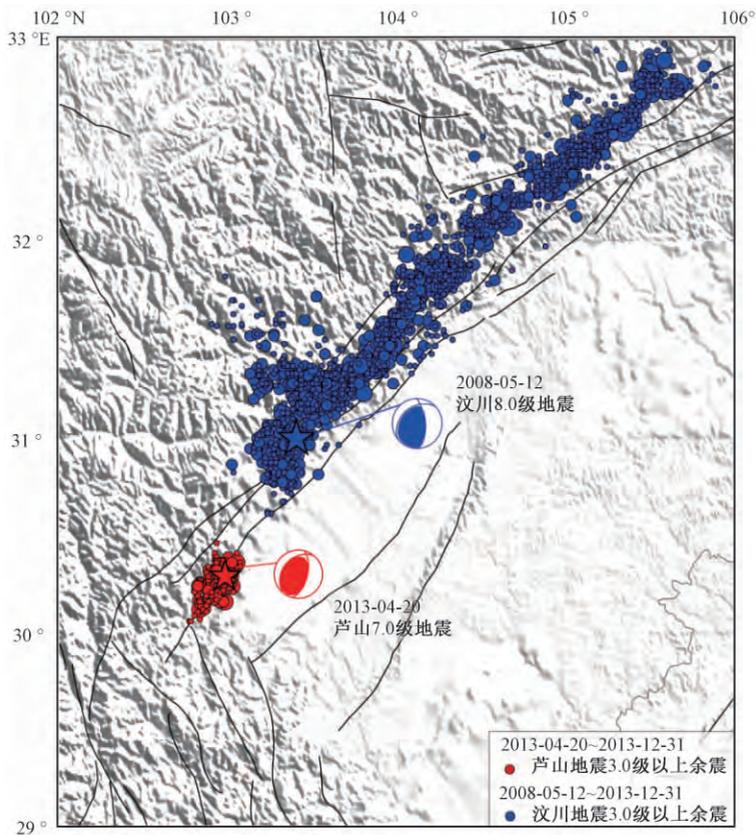


图 1 研究区域内芦山地震和汶川地震余震分布<sup>①</sup>

由图 1 可以看出,尽管汶川地震和芦山地震震级相差 1 级,但二者余震的空间展布差异较为明显,前者空间展布与其主发震断层一致性高,沿破裂方向余震丰富、展布较为充分,而后者芦山地震的余震则较为集中。本文主要针对 2008 年汶川地震和 2013 年芦山地震的震源特征展开分析和对比,比较的具体内容涉及二者的地震波辐射能、视应力参数、静态应力降等,并进一步依据视应力和静态应力降的相互关系对比二者的动态破裂过程。通过比较汶川地震和芦山地震的震源动态破裂过程,尝试基于地震波辐射能的释放情况及断层破裂过程中应力的调整情况,阐述 2 个地震震源特征的异同。

## 1 方法原理

地震时以地震波形式传播的能量叫做地震波辐射能量( $E_s$ )。地震波辐射能量只是地震时释放的总能量的一部分, $E_s$ 与地震破裂过程中产生新的断层面所消耗的破裂能( $E_R$ )和断层从滑动到停止过程中系统克服摩擦所做的功( $W_f$ )共同构成了地震时产生的总能量( $E$ )。地震波辐射能量与震级间有关系式(Choy et al, 1995)

$$\lg E_s = 1.5M_s + 4.4 \quad (1)$$

式中 $E_s$ 的单位为J。Wyss等(1968)提出视应力 $\sigma_a$ 的概念,视应力是与地震辐射能量直接相关的物理量,表征了发震断层单位面积辐射的地震波能量的大小,即

$$\sigma_a = \mu E_s / M_0 \quad (2)$$

式中 $M_0$ 为地震矩,单位 $N \cdot m$ ; $\mu$ 为介质的剪切模量,通常取值为 $\mu = 3 \times 10^{11} \text{ dyne} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

在不考虑破裂能的情况下,可以将震源动态模型分为3种:完全应力降模型(Brune, 1970; Orowan, 1960)、应力上调模型(Savage et al, 1971)和应力下调模型(Brune, 1970、1976; Smith et al, 1991; Zúñiga, 1993)。其中应力上调(overshoot)模型和应力下调(undershoot)模型分别对应于摩擦应力大于和小于断层面上的终止剪切应力的情况,完全应力降模型则对应于摩擦应力等于断层面上的终止剪切应力,即

$$2\sigma_a < \Delta\sigma_s \text{ (应力上调模型)} \quad (3)$$

$$2\sigma_a > \Delta\sigma_s \text{ (应力下调模型)} \quad (4)$$

$$2\sigma_a = \Delta\sigma_s \text{ (完全应力模型)} \quad (5)$$

式中 $\sigma_a$ 和 $\Delta\sigma_s$ 分别为视应力和静态应力降。

基于Starr(1928)的泊松体模型,静态应力降( $\Delta\sigma_s$ )的计算公式为

$$\Delta\sigma_s = 8\mu D / 3\pi W \quad (6)$$

式中, $D$ 为断层面上的平均滑动位移; $W$ 为断层宽度。

图2、3分别给出了应力上调和应力下调两种动态破裂模式的示意图。其中 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 分别为初始应力和最终应力, $\sigma_a$ 为动态应力, $u$ 为位移, $\Delta\bar{u}$ 为断层面上平静滑动位移, $E_s$ 为地震波辐射能, $E_h$ 为摩擦热能。实际上对应于完全应力降模型,即式(5)中所示, $E_h$ 即为图2、3中所示灰色矩形块面积,而 $E_s$ 则由三角形ABC的面积表示。实际地震发生的过程中并不是按照完全应力降模式破裂,而有可能对应应力上调和下调过程,从而导致 $E_s$ 的不同。如图2中示意的应力上调模式,实际的 $E_s$ 则由三角形AB'D的面积表示。同样,图3中示意的应力下调模式也是如此。由图2、3中三角形AB'D的面积可见,应力上调模式所释放的地震波辐射能量相较于应力下调模式更为彻底。

## 2 基于动态破裂过程对比汶川地震和芦山地震的震源特征

表1为了汶川地震和芦山地震的相关震源参数。参照表1并结合式(2),可以计算得到汶川地震的视应力 $\sigma_a^{WC} = (0.33 \sim 0.38) \text{ MPa}$ ,芦山地震的视应力 $\sigma_a^{LS} = (0.49 \sim 0.84) \text{ MPa}$ ;参照表1,取 $D^{WC} \approx 2.4 \text{ m}$ (陈运泰等,2013), $W^{WC} \approx 40 \text{ km}$ ,依据式(6)则有汶川地震的静态应力降 $\Delta\sigma_s^{WC} = 2.1 \text{ MPa}$ ;进一步参照表1和式(6),取 $D^{LS} \approx 1.0 \text{ m}$ , $W^{LS} \approx 30 \text{ km}$ ,则有芦山地震的静态应力降 $\Delta\sigma_s^{LS} = 0.85 \text{ MPa}$ 。结合式(1)依据经验关系计算地震波辐射能及视应

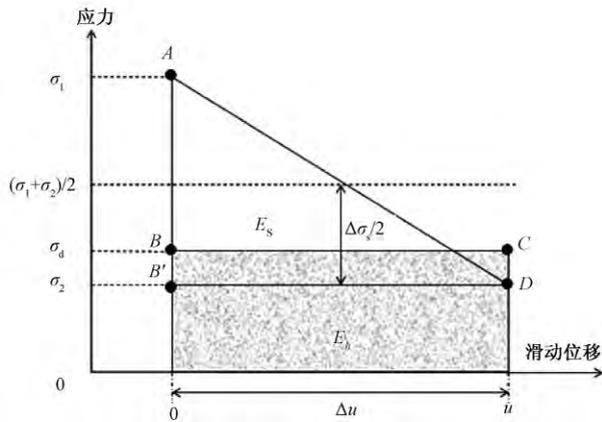


图 2 断层动态破裂过程中应力上调模式示意(据 Savage 等(1971))

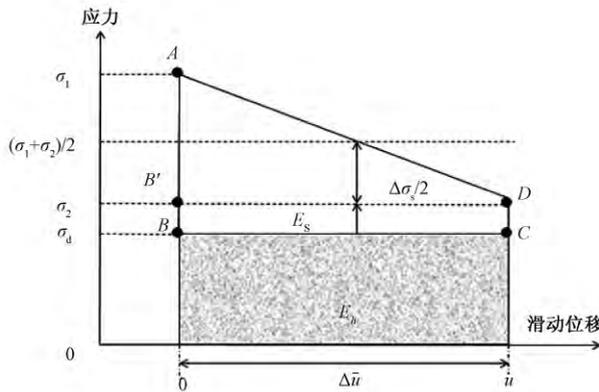


图 3 断层动态破裂过程中应力下调模式示意(据 Brune (1970、1976))

力参数,则有汶川地震的视应力  $\sigma_a^{WC(1)} = 0.59\text{MPa}$ ,芦山地震的视应力  $\sigma_a^{LS(1)} = 1.7\text{MPa}$ 。

表 1 汶川地震和芦山地震震源参数

地震	震中位置	地震矩 ( $\text{N}\cdot\text{m}$ )	地震波辐射能 ( $\text{J}$ )	地震波辐射能 ( $\text{J}$ ) (式 (1))	最大滑动 位移 ( $\text{m}$ )
汶川地震	$31.0^\circ\text{N}^{\#1}$ $103.4^\circ\text{E}^{\#1}$	$1.26 \times 10^{21} \text{ }^{\#2}$	$(1.4 \sim 1.6) \times 10^{16} \text{ }^{\#2}$	$2.5 \times 10^{16}$	$7.0 \text{ }^{\#3}$
芦山地震	$30.3^\circ\text{N}^{\#1}$ $103.0^\circ\text{E}^{\#1}$	$1.4 \times 10^{19} \text{ }^{\#1}$	$(2.3 \sim 2.8) \times 10^{14} \text{ }^{\#2}$	$8.0 \times 10^{14}$	$1.6 \text{ }^{\#4}$

注: #1 为中国地震台网中心 (CENC) 结果; #2 为美国地质调查局 (USGS) 结果; #3 为陈运泰等 (2009) 的结果; #4 为张勇等 (2013) 的结果

综合式 (3) ~ (5) 可以得出汶川地震的震源动态破裂过程为应力上调模式,而芦山地震的动态破裂过程对应应力下调模式(表 2)。Brune (1970) 认为,应力下调模式对应着地震时断层错动会突然受阻而可能发生的被突然锁住的情况,而应力上调模式则对应着地震时断层错动过头的情况。陈学忠等 (2003) 指出,视应力  $\sigma_a$  与余震强度存在着一定的统计关系,即通常一次主震后高视应力的地震一般对应后续较大的余震。我们知道,视应力  $\sigma_a$  的物理

意义在于,发震断层单位面积辐射的地震波能量的大小,依据前文中给出的计算结果  $\sigma_a^{LS} > \sigma_a^{WC}$  ( $\sigma_a^{LS(1)} > \sigma_a^{WC(1)}$ ),一定程度上表明芦山地震发震断层单位面积辐射的能量小于汶川地震,但考虑到汶川地震的破裂尺度、发震断层面积显著高于芦山地震,因此仅基于单一  $\sigma_a$  取值大小对余震危险性进行评估仍存在一定的不确定性。

表2 基于动态破裂过程对比汶川地震和芦山地震的震源特征

地震	断层宽度 (km)	平均滑动位移 (m)	静态应力降 (MPa)	视应力 (MPa)	
汶川地震	$W^{WC} \approx 40^{#3}$	$D^{WC} \approx 2.4^{#3}$	$\Delta\sigma_s^{WC} = 2.1^{#3}$	$\sigma_a^{WC} = 0.33 \sim 0.38^{#3}$	$\sigma_a^{WC(1)} = 0.59$
芦山地震	$W^{LS} \approx 30^{#4}$	$D^{LS} \approx 1.0^{#4}$	$\Delta\sigma_s^{LS} = 0.85^{#4}$	$\sigma_a^{LS} = 0.49 \sim 0.84^{#4}$	$\sigma_a^{LS(1)} = 1.7$

注: #3、#4 同表1

### 3 结论和讨论

本文主要针对汶川地震和芦山地震的震源过程进行分析和讨论,基于地震波辐射能和地震矩,利用经验公式计算视应力、应力降等参数,明确汶川地震震源动态破裂过程为应力上调模式,而芦山地震为应力下调模式。初步研究结果显示:芦山地震的震源动态破裂过程与汶川地震有所不同,二者震后地震波辐射能量的释放和余震的空间分布也具有一定的差异性,具体表现在汶川地震为应力上调模式,地震发生过程中破裂较为彻底,能量释放也较为充分,对应后续的余震也比较丰富;而芦山地震则为应力下调模式,地震发生过程中断层错动会突然受阻而可能发生被突然锁住的情况,其主发震断层破裂程度及能量释放也会对应不够充分的情况,且其余震展布也会相对集中在震源区附近范围(孟令媛等,2013、2014)。

实际上,2013年芦山地震发生后,陈运泰等(2013)针对芦山地震与汶川地震的破裂过程进行对比后明确指出,芦山地震的震源及其破裂过程具有与汶川地震不同的特征:①芦山地震滑动量较大的区域破裂没有达到地表;②芦山地震具有长度方向与宽度方向等尺度的中、小震的震源特征;③芦山地震的破裂过程没有呈现明显的方向性。由于芦山地震发震断层面上较大的滑动集中区没有扩展至地表(图3),因此在极震区并未发现明显的破裂至地表的断层出露(徐锡伟等,2013),加之矩震级  $M_w$  的差异(汶川地震矩震级  $M_w$  为7.9,芦山地震  $M_w$  为6.8),即使芦山地震极震区地表发现与强烈变形相关联的变形区域,也会相较于汶川地震的大规模的地表出露破裂有所差异。实际上,这也与两个地震动态破裂模式分别对应应力上调和应力下调有关联。

截至2013年4月19日,汶川地震余震区共发生  $M_s \geq 5.0$  地震50次,最大余震震级为  $M_s 6.4$ ;截至2013年12月31日,芦山余震区发生  $M_s \geq 5.0$  地震仅4次,最大余震为4月21日发生在芦山县和邛崃市交界的  $M_s 5.4$  余震。由此可初步得出如下认识:尽管2013年芦山  $M_s 7.0$  地震和2008年汶川  $M_s 8.0$  地震都发生在龙门山断裂带上,但二者  $\sigma_a$  大小存在较大差异,且断层破裂过程中对应两种完全不同的错动模式,且二者震后余震的空间分布也存在一定的差异(图1)。实际上,受到断层破裂尺度及地震矩大小的影响,汶川地震的余震空间展布要明显大于芦山地震,且较高震级余震的个数也明显高于芦山地震,尽管受到地震震级

差异性的影响,但视应力  $\sigma_a$  的大小和动态破裂模式的不同也是来自于震源方面的原因之一。

此外,芦山地震发生后,关于芦山地震和汶川地震的关联性立即引起了学术界的广泛讨论,实际上汶川地震即发生在 1988 年以来南北地震带中段 7 级地震空段内(薛艳等,2009)。从构造背景的角度出发,芦山地震和汶川地震的发震位置均为巴颜喀拉块体的边界上,芦山地震和汶川地震的震中相距约 85km,且芦山地震和汶川地震均发生在龙门山断裂带上,受到整个龙门山断裂带总体走向和运动特征的影响,2 个地震的震源机制解也较为一致,均为逆冲型地震。但芦山地震的震中位置距离汶川地震余震密集分布区南端还有 60km 的距离,由于 2 个地震并不是发生在同一条断裂上,2 个地震的破裂面也不相同,从目前芦山地震余震的分布情况看,2 个地震的余震区并不相连,之间相距 20 ~ 30km。

陈运泰等(2013)通过综合 2003 年以来在龙门山断裂带中小地震精确定位、地震活动性以及汶川地震和芦山地震破裂过程快速反演等方面的研究后指出,龙门山断裂带是一条非常活跃的地震带,芦山地震并没有显著缓解龙门山断裂带西南段的地震危险性,该地段整体上仍存在发生  $M_w 7.2 \sim 7.3$  地震的潜在危险性,一次  $M_w 7.3$  地震将释放约  $5.6 \times 10^{15} \text{J}$  的能量,相当于此次芦山地震释放的地震波辐射能的约 20 倍。

综上所述,芦山地震为应力下调模式,对应着地震时断层错动会突然受阻而可能发生的被突然锁住的情况;汶川地震则属于应力上调模式,对应着地震时断层的错动过头的情况。如果仅从视应力  $\sigma_a$  的大小出发进行对比,再结合 2001 年昆仑山口西  $M_s 8.1$  地震,基于 USGS 给出的反演结果,可以计算得到昆仑山口西地震的  $\sigma_a$  约为 5.83MPa,该地震震后 2 年内  $M_s \geq 5.0$  余震仅为 6 个,最大余震震级为  $M_s 5.7$ ,且余震主要分布在主震断层的两侧(USGS)。同样地,芦山地震的余震截至 2013 年 12 月 31 日共发生  $M_s \geq 5.0$  余震 4 次,最大余震震级  $M_s 5.4$ ,且芦山  $M_s \geq 3.0$  余震的发震位置均集中在震中周围及主发震断层两侧。尽管芦山地震和汶川地震都发生在龙门山断裂带上,但由于二者  $\sigma_a$  大小存在较大差异,且断层破裂过程中对应两种完全不同的错动模式。因此,芦山地震余震时空分布特征与汶川地震存在较大的不同。

致谢:本文在成稿过程中,周龙泉研究员和孟令媛博士给予了有益的指导与帮助,作者谨表谢意。

## 参考文献

- 陈学忠、王小平、王琳瑛等,2003,地震视应力用于震后趋势快速判定的可能性,国际地震动态,(7),1~3。
- 陈运泰、许力生、张勇等,2009,2008 年 5 月 12 日汶川特大地震震源特性分析报告,见:宋胜武,汶川大地震工程震害调查分析与研究,北京:科学出版社。
- 陈运泰、杨智娴、张勇等,2013,从汶川地震到芦山地震,中国科学:地球科学,43,1064~1072。
- 刘杰、易桂喜、张致伟等,2013,2013 年 4 月 20 日四川芦山  $M 7.0$  级地震介绍,地球物理学报,56,1404~1407。
- 孟令媛、周龙泉、刘杰,2013,2013 年芦山  $M_s 7.0$  地震震源参数特征及近断层强地面运动初步估计,地震学报,35(4),632~641。
- 孟令媛、周龙泉、刘杰,2014,2013 年四川芦山  $M_s 7.0$  地震近断层强地面运动模拟及烈度分布估计,地球物理学报,57(2),441~448。
- 徐锡伟、闻学泽、韩竹君等,2013,四川芦山 7.0 级强震:一次典型的盲断层型地震,科学通报,58,1887~1893。

- 徐锡伟、闻学泽、叶建青等,2008,汶川  $M_s8.0$  地震地表破裂带及其发震构造,地震地质, **30**, 597 ~ 629。
- 薛艳、刘杰、梅世荣等,2009, 2008年汶川  $M_s8.0$  地震前地震活动异常特征,地震学报, **31**, 606 ~ 619。
- 张勇、许力生、陈运泰,2013, 芦山 4.20 地震破裂过程及其至灾特征初步分析,地球物理学报, **56**, 1408 ~ 1411。
- Brune J N, 1970, Tectonic stress and spectra of seismic shear waves from earthquakes, J Geophys Res, **75**, 4997 ~ 5009.
- Brune J N, 1976, The physics of earthquake strong motion. In: Lomnitz C, Rosenblueth E eds, Seismic risk and engineering decisions, New York: Elsevier Sci Publ Co, 141 ~ 177.
- Choy Y T, Boatwright J L, 1995, Global patterns of radiated seismic energy and apparent stress, J Geophys Res, **100**, 18205 ~ 18228.
- Orowan E, 1960, Mechanism of seismic faulting in rock deformation: a symposium, Geol Soc Am Mem, **79**, 323 ~ 345.
- Savage J C, Wood M D, 1971, The Relation between Apparent Stress and Stress Drop, Bull Seism Soc Am, **61**, 1381 ~ 1388.
- Smith K D, Brune J N, Priestly K F, 1991, The seismic spectrum, radiated energy, and the Savage and Wood inequality for complex earthquake, Tectonophysics, **188**, 303 ~ 320.
- Starr A T, 1928, Slip in a crystal and rupture in a solid due to shear, Proc Cambridge Philos Soc, **24**, 489 ~ 500.
- Wyss M, Brune J N, 1968, Seismic moment, stress, and source dimensions for earthquakes in the California-Nevada region, J Geophys Res, **73**, 4681 ~ 4694.
- Zúñiga F R, 1993, Fractional overshoot and partial stress drop, Which one? Bull Seism Soc Am, **83**, 939 ~ 944.

## Characteristics of the source parameters and the rupture processes for the 2 earthquakes in the Longmenshan fault zone: the 2008 $M_s8.0$ Wenchuan earthquake and the 2013 $M_s7.0$ Lushan earthquake

Zhao Fengfan Shi Haixia Zhou Zhihua

China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

**Abstract** The April 20, 2013  $M_s7.0$  earthquake occurred in Lushan City, Sichuan Province, China, which was a result of east-west oriented reverse-type motion on a north-south striking fault. The source location suggests the event occurred on southern part of Longmenshan fault at a depth of 13km. And the great Wenchuan  $M_s8.0$  earthquake of the May 12, 2008 also occurred in Sichuan Province of the western interior China with an epicenter located at the longitude  $103.4^\circ\text{E}$  and latitude of  $31.0^\circ\text{N}$ . Both the 2 important earthquakes located on the Longmenshan fault zone, and the distance between 2 epicenters is 85km while the distance between aftershocks distribution of the 2 mainshocks is 60km. In this study, the dynamic source process with the focal mechanism and empirical relationships was calculated and the related energy and apparent stress were analyzed, respectively. The results indicated that there was frictional undershoot behavior in the dynamic source process of Lushan earthquake, which is actually different from the overshoot activity of the Wenchuan earthquake. Moreover, the characteristics of the source parameters, radiated energy from the fault and the aftershocks distribution from 2 mainshocks were discussed. It indicated that the rupture process was under the influence of apparent stress and frictional behavior on the fault plane.

**Key words:** Wenchuan earthquake Lushan earthquake Dynamical rupture process  
Apparent stress