

文章编号: 0258-2724(2016)06-1138-09 DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2016.06.013

基于强震记录快速确定康定地震 的震源破裂方向研究

王宏伟, 温瑞智, 任叶飞, 宋晋东

(中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 2014年11月22日四川省康定县发生 $M_s6.3$ 级地震,主震3d后发生 $M_s5.8$ 级余震.为研究两次地震震源破裂特性并探讨通过强震记录快速确定震源破裂方向的方法,利用强震记录并基于网格搜索方法,快速确定了使强震动峰值参数预测值与震源方向性系数修正的观测值误差最小的震源破裂参数.研究表明:由于 $M_s6.3$ 级地震震中西北方向强震台站缺失致其记录空间分布严重不均匀,确定的震源破裂方向不理想;对于 $M_s5.8$ 级余震,结合流动台站的强震记录,快速确定了震源为双向破裂,主破裂方向约为北偏东 320° ,与断层走向及余震分布较为一致,主破裂方向上的破裂占整个震源破裂的70%~90%,破裂速度约为2.5~2.8 km/s.

关键词: 康定地震;强震记录;震源破裂方向;破裂速度

中图分类号: P315 **文献标志码:** A

Rapid Rupture Direction Estimation of Kangding Earthquake Using Strong-Motion Recordings

WANG Hongwei, WEN Ruizhi, REN Yefei, SONG Jindong

(Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China)

Abstract: An $M_s6.3$ earthquake hit the Kangding County, Sichuan Province on November 22, 2014. Three days later, an $M_s5.8$ aftershock occurred. The source rupture properties of two earthquakes were analyzed and the method for rapidly estimating the source rupture direction was investigated using strong-motion recordings. The grid-search technique was used to seek the optimal source rupture parameters, including the predominant rupture direction and the rupture velocity, which can satisfy the minimum fitting error between the predicted peak ground-motion parameters and the observed ones corrected by the directivity coefficient. The results indicate owing to lack of the strong-motion stations in the northwest of the $M_s6.3$ earthquake epicenter, the non-uniform spatial distribution of the strong-motion recordings results in the bad estimation of the rupture direction. With strong-motion recordings from temporary strong-motion stations, the rupture parameters for the $M_s5.8$ earthquake were well estimated. The $M_s5.8$ earthquake predominantly ruptured in the $N320^\circ E$ direction, accounting for 70% - 90% of the total rupture, which is consistent with the fault trend and the aftershock distribution. The rupture velocity of the $M_s5.8$ earthquake is approximately 2.5 - 2.8 km/s.

Key words: Kangding earthquake; strong-motion recording; source rupture direction; rupture velocity

收稿日期: 2015-04-05

基金项目: 地震行业科研专项资助项目(201508005); 黑龙江省科技基金资助项目(LC2015022)

作者简介: 王宏伟(1990—),男,博士研究生,研究方向为工程地震与强地震动特性,电话:15104542902, E-mail: whw1990413@163.com

通信作者: 温瑞智(1968—),男,研究员,博士生导师,研究方向为工程地震与强地震动特性研究, E-mail: ruizhi@iem.ac.cn

引文格式: 王宏伟,温瑞智,任叶飞,等. 基于强震记录快速确定康定地震的震源破裂方向研究[J]. 西南交通大学学报,2016,51(6): 1138-1146.

地震的震源破裂方式会影响空间地震动的分布,通常位于震源破裂前方的地震动幅值明显高于破裂后方^[1].大量的震后调查表明大地震的破裂方向性对破裂前方的工程场地破坏更加严重,比如1992年 M_w 7.3级Landers地震^[2]、1999年 M_w 7.7级集集地震^[3].地震发生之后快速判断震源的破裂方向对地震烈度快速产出、灾害损失评估、震后应急救援等均具有相当重要的意义.2008年5月12日 M_s 8.0级汶川地震揭示了震源破裂方向的快速判断对减轻地震灾害的重要作用,汶川地震震源的单侧破裂加剧了破裂前方的北川和青川县城的破坏程度,若当时能快速确定震源破裂方向,则可更合理地分配集中于震中映秀镇的救援力量,减轻地震灾害.

通常情况下,可以依据活动断裂、历史地震等基础信息,并结合现场调查、余震分布、宏观烈度等确定震源破裂方向,但该过程需要较长的时间,无法在震后快速给出结果.目前最常用的是利用地震波形资料或者结合大地测量数据和近场强地面运动,反演地震震源的破裂过程.测震记录的反演通常应用于大地震的震源破裂过程,对于中小地震的应用较少.另一方面计算过程相对复杂,且工程领域并不十分关心震源的运动学过程,简单快速地确定震源的破裂方向并判断其影响程度和范围更具有实际应用价值.

随着强震动观测的大力发展,地震活动性较强地区的强震动观测台网密度逐渐提高,在一些中小地震中也可以捕获较大数量的强震动记录,并用来研究中小地震震源破裂方向性,尤其是2011年5月11日 M_w 5.2级Lorca(西班牙东南部)地震之后,位于震源破裂前方的Lorca破坏较为严重,这引起了地震工程学家对中小地震震源破裂方向性的强烈关注^[4].与测震记录相比,近场强震动记录包含了丰富的震源破裂过程相关的高频信息,Hartzell等的研究表明近场强震动数据有助于震源破裂方向的确定^[5].Boatwright和Boore最早利用强地震动参数开展中小地震震源破裂方向性的研究^[6].基于经验格林函数反卷积方法获得的方位角相关视震源时间函数是采用强震动记录确定震源破裂方向最常用的方法^[7-8].国内用强震记录研究方向性,主要关注方向性效应对地震动空间分布的影响^[1];也有研究同时采用强震记录和测震记录确定发震断层走向^[9].

Boatwright提出了一种用强震记录快速确定中

小地震震源破裂方向的新方法,Seekins和Boatwright、Convertito等及Convertito和Emolo^[10-13]等推广并改进了该方法,并在几次地震中检验了该方法的可靠性,如2009年 M_w 6.3级意大利拉奎拉地震及其较强余震、加州地区几次中小地震等.方法的基本思路是寻求最佳的震源破裂参数(震源破裂方向、破裂速度),根据其确定的方向性系数 C_d 调整强震动峰值观测值(峰值地面加速度PGA或峰值地面速度PGV),使调整后的观测值与衰减关系预测值之间的残差达到最小.该方法在国际上的研究与应用相对较少,在国内尚无这方面的研究与应用.

2014年11月22日和25日发生于四川省甘孜藏族自治州康定县的 M_s 6.3和 M_s 5.8级地震中,我国数字强震动观测网络获取了一批强震记录,为利用强震记录快速确定震源破裂参数相关研究提供了良好契机.本文以这两次地震为例,基于Boatwright提出的方法^[10],估计了康定地震的震源破裂方向性效应,探讨了利用我国强震动台网观测的强地震动峰值快速确定震源破裂特性的可行性和使用局限性.

1 康定地震与强震记录

2014年11月22日16时55分四川省甘孜藏族自治州康定县发生 M_s 6.3级地震,震源深度18 km,震中位于塔公乡江甲巴村(北纬30.26°,东经101.69°).3 d后,11月25日23时19分,在此次地震震中东南侧大约10 km处(北纬30.18°,东经101.73°)再次发生 M_s 5.8级地震,震源深度约为16 km.这两次地震均发生于左旋走滑的鲜水河断裂带康定至道孚之间的色拉哈断裂上,Global CMT Project(www.globalcmt.org/CMTsearch.html)快速给出的CMT震源机制解表明两次地震均为走滑型,见表1.

根据国家强震动台网中心发布的信息(截止2014年12月1日),康定 M_s 6.3级地震和 M_s 5.8级地震中台网分别获得54组和33组三分量自由场强震记录,两次地震中触发强震台站主要分布于震中以东(台站相对震中方位角30°~180°范围内),震中西—西北方向只有少数台站触发,见图1.

中国地震局在 M_s 5.8级地震发生后,综合两次地震的震害调查结果发布了地震烈度图(见图1),显示最高烈度为Ⅷ度,等震线长轴总体上呈北西—南东走向,可见位于烈度Ⅵ度及以上区内的

台站数量并不多。

表 1 康定两次地震 CMT 震源机制解
Tab. 1 CMT focal mechanisms
for the two Kangding earthquakes

地震	M_w	断层节面 1/(°)			断层节面 2/(°)		
		走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角
$M_s6.3$	6.1	143	82	-8	234	83	-172
$M_s5.8$	5.8	239	84	-175	148	85	-6

我国数字强震动台网台站优先考虑布设于地震多发且人口密集区,而震中西—西北方向属高海拔山区,人口密度较低,因此,强震台站布设相对较少。 $M_s6.3$ 级地震中,震中西南—西北方向(方位角 $240^{\circ} \sim 360^{\circ}$)仅触发了 2 个强震台站,触发台站空

间分布严重不均匀。 $M_s6.3$ 级地震发生后第 2 天,四川省地震局在震中附近布设了流动观测台站,用来观测强余震。在随后的 $M_s5.8$ 级地震中 3 个流动台站均触发并获取到了记录,这些流动台站有效地改善了地震触发台站空间分布的均匀性。

为了分析震源的方向性,本文首先对两次地震中获取的强震记录进行常规处理,包括零线校正和 0.25 ~ 30 Hz 巴特沃斯带通滤波,以减弱记录中高频噪声及零线漂移对积分速度时程的影响^[14]。经过上述处理,可以获得强震记录 3 个分量(东西、北南、垂直)可靠的 PGA 和 PGV,水平向的观测值以两个水平分量(东西、北南)观测值的几何平均值表示。

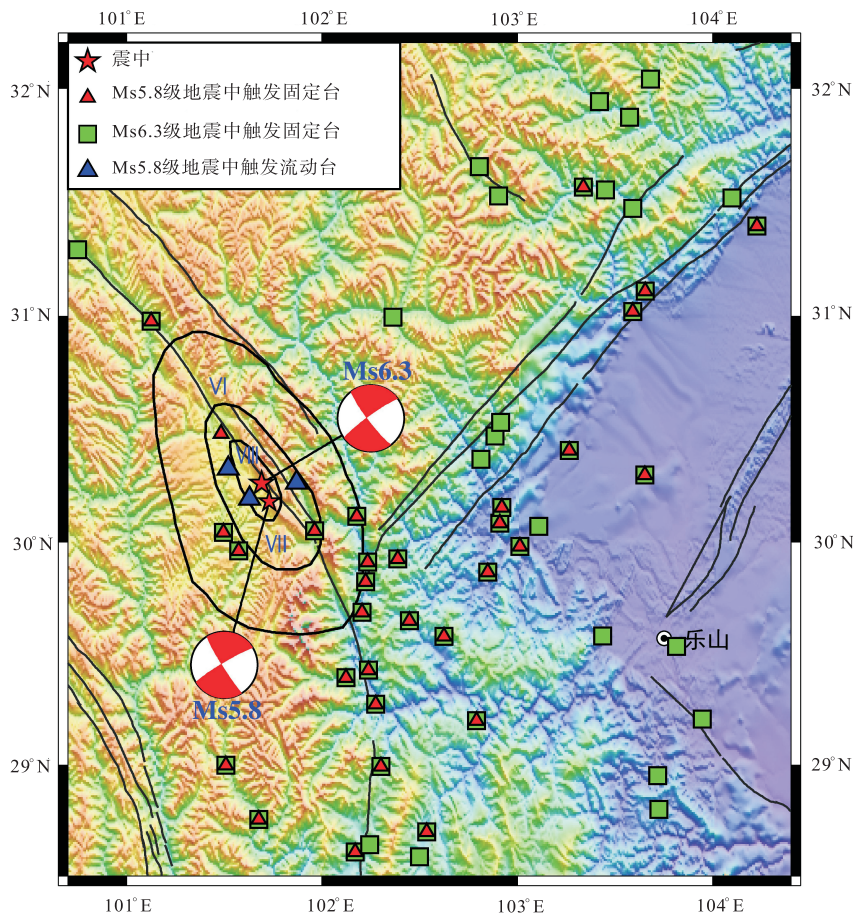


图 1 $M_s6.3$ 和 $M_s5.8$ 级康定地震中触发强震台站分布以及宏观烈度图
Fig. 1 Strong-motion stations triggered in $M_s6.3$ and $M_s5.8$ Kangding earthquakes, and the macroseismic intensity map

2 震源破裂方向的确定

Ben-Menahem 将复杂的震源破裂简化为具有一致滑动分布和恒定破裂速度的简单线源模型,采用方向性系数 C_d 来表示单向破裂的震源对地震动的影响^[15],

$$C_d = \frac{1}{1 - \left(\frac{v_r}{c}\right) \cos \psi}, \tag{1}$$

式中: ψ 为离源的地震波与破裂方向之间的夹角^[16],对于直达地震波,近似有 $\psi = \varphi - \theta$;
 φ 和 θ 分别为破裂方向角和台站方位角;

v_r 和 c 分别为震源破裂速度及地壳剪切波速,一般情况下 $v_r < c$.

震源破裂过程通常是在一个断层面上进行的,初始破裂位置可能位于断层内某一点,破裂不一定

是由断层面一端开始向另一端发展. 将整个断层分为以破裂初始位置为端点的 2 个破裂方向相反的子断层,2 个子断层破裂方向性系数的矢量叠加近似认为是整体破裂方向性系数^[10,13],

$$C_d = \sqrt{\frac{k^2}{\left[1 - \left(\frac{v_r}{c}\right) \cos(\varphi - \theta)\right]^2} + \frac{(1 - k)^2}{\left[1 + \left(\frac{v_r}{c}\right) \cos(\varphi - \theta)\right]^2}}, \tag{2}$$

式中:

$k = l'/l$, 为初始破裂点的相对位置, l' 和 l 分别为主破裂方向的断层长度及地震破裂的断层总长度.

地震动预测方程(常称为地震动衰减关系)反映了地震动参数随震级、距离及场地等因素的变化规律,但通常并未考虑震源破裂方向的影响. 理论上,采用方向性系数 C_d 修正的地震动峰值观测值与预测值之间的残差将达到最小(μ),可以实现震源破裂方向的确定,即

$$\mu = \min \sum_{i=1}^n [\ln(Y_{Oi}/C_d) - \ln Y_{Pi}]^2, \tag{3}$$

式中:

Y_{Oi} 和 Y_{Pi} 分别为第 i 个台站的水平地震动峰值(PGA、PGV)的观测值与预测值;

n 为台站数量.

通过网格搜索方法确定式(3)中 C_d 的各震源破裂参数,包括破裂方向角 φ 、相对破裂速度 v_r/c 及破裂初始位置 k ,各参数的变化区间分别为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 、 $0 \sim 1$ 和 $0 \sim 1$,变化步长可分别取为 0.1° 、 0.01 和 0.01 .

选取一个适用的地震动预测方程是确定震源破裂方向的首要环节. 康定地震发生于鲜水河断裂带的色拉哈断裂上,该断裂带为全新世断裂带,这一断裂的地震活动性较高,曾发生过很多次地震. 从康定向西北至甘孜,沿断裂带的重、磁异常分布不具有分段性,与地震破裂的分段性也无明显的对应关系,可以认为康定地震并非特殊段断层、段落发震位置的“特征地震”^[17],可以采用该地区的衰减关系. 司宏俊等的研究结果表明汶川地震和芦山地震中触发的强震动观测台站的整体平均剪切波速 V_{s30} 相当于 500 m/s ,可近似认为强震台的场地为基岩或坚硬土地^[18].

这两次康定地震中触发的强震台站(见图 1)与汶川地震和芦山地震有很大的重叠,因此本文选取适用于基岩场地的地震动衰减关系. 考虑到地震

动的区域性差异^[19],适用于震中周边区域的衰减关系,针对 PGA 的包括:俞言祥和汪素云的中国西部地区(YW06)^[20]、霍俊荣的中国西南地区(Huo89)^[21]、雷建成等的中国西南地区(Lei07)^[22]、第 5 代区划图中的青藏地震区(Yu13)^[23]以及康兰池和金星汶川地震序列中小震级地震动预测方程(KJ08)^[24]. 针对 PGV 的包括:霍俊荣的中国西南地区(Huo89)^[21]、第 5 代区划图中的青藏地震区(Yu13)^[23]和康兰池和金星汶川地震序列中小震级地震动预测方程(KJ08)^[24].

比较 $M_s 5.8$ 级地震中震中距不超过 200 km 的记录 PGA 和 PGV 观测值与上述几个衰减关系的预测值,并给出了相应的残差分布,如图 2 所示. PGA 和 PGV 预测值的残差分别为 $\ln(Y_{OA}/Y_{PA})$ 和 $\ln(Y_{OV}/Y_{PV})$, Y_{OA} 和 Y_{PA} 分别为 PGA 的观测值和预测值; Y_{OV} 和 Y_{PV} 分别为 PGV 的观测值和预测值. 对于 PGA,观测值总体上与 Lei07、Yu13 和 KJ08 的预测值一致,略高于 Huo89 的预测值,略低于 YW06 的预测值.

对于 PGV,观测值总体上与 Yu13 和 KJ08 的预测值一致,高于 Huo89 的预测值. KJ08 是基于汶川地震序列中小余震的强震记录统计得到,从区域性和震级适用范围以及图 2 所示残差的分布来看,应该更适用于康定的二次地震,本文最终采用 KJ08 预测方程的预测值根据式(3)确定这两次康定地震的震源破裂方向.

需要说明的是,我国的地震动预测方程中的距离参数采用的是震中距,而对于大地震,断层破裂长度可达上百甚至几百公里,比如汶川地震,以震中距表示的地震动预测方程显然已不适用,此时可采用破裂距(台站至断层破裂面的最短距离)或 Joyner-Boore 距(台站至断层破裂面地表投影的最短距离)表示的地震动预测方程.

这些距离能够体现断层破裂面的具体位置,可

以根据震源破裂尺寸的相似关系给出破裂面长度 L 和宽度 W 的范围,利用式(3)在确定前文所述

几个震源破裂相关参数的同时也可确定 L 和 W 的最优值.

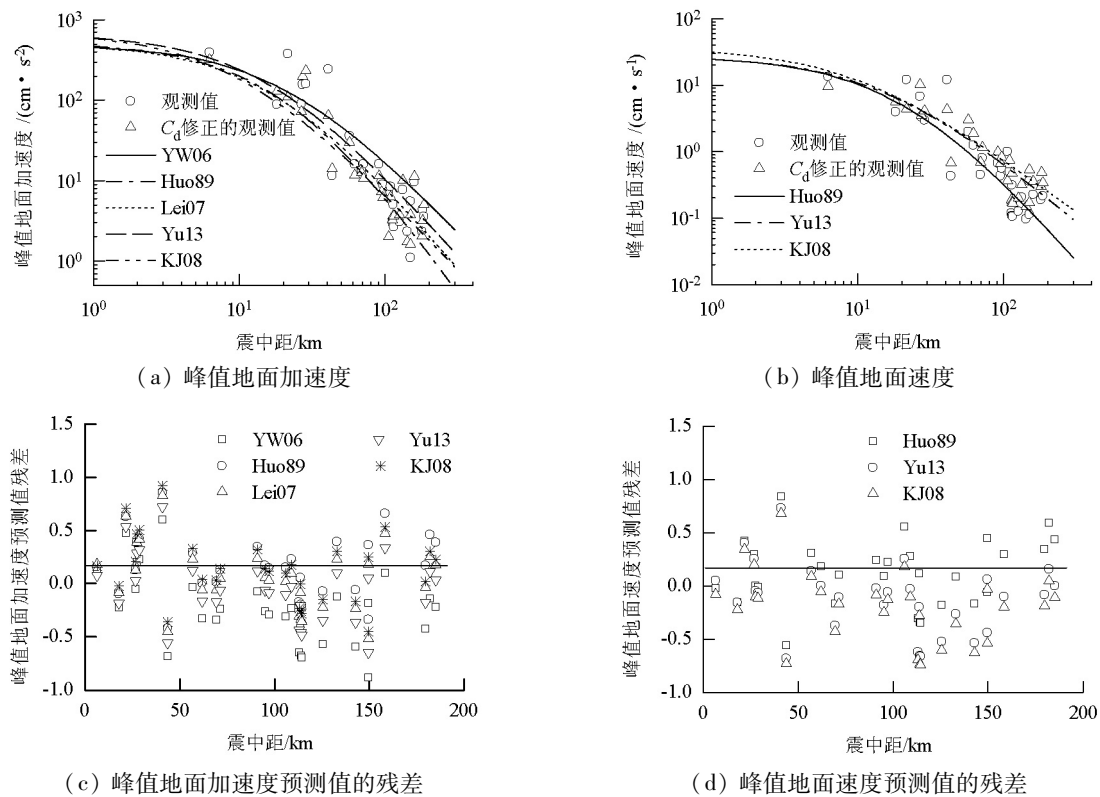


图 2 PGA、PGV 观测值与地震动预测方程给出的预测值的比较
Fig. 2 Comparison of the observed PGA and PGV with the predicted values derived from the ground motion prediction equation

3 结果及讨论

3.1 $M_s5.8$ 级地震的破裂方向

本文采用上述方法确定了 $M_s5.8$ 级康定地震震源破裂的各项参数,见表 2.

采用 PGA 和 PGV 分别确定的震源破裂参数基本接近,地震震源为双向破裂,主破裂方向为北西方向(破裂方向角约 320°),破裂起始点(震中)位于整个破裂长度的 70% ~ 90% (也可说 10% ~ 30%)位置. 相对破裂速度 $v_r/c \approx 0.7 \sim 0.8$, 根据郑勇等一维地壳结构速度模型^[25],震源处剪切波速 $c = 3.55 \text{ km/s}$ (震源深度 2 ~ 22 km),此次地震震源破裂速度 $v_r = 2.5 \sim 2.8 \text{ km/s}$,高于芦山地震 2.0 km/s 的破裂速度^[26]. 由这些参数通过式(2)可以确定不同方位角的 C_d 值,如图 3 所示,在主破裂方向上(θ 约为 320°) C_d 值最大约为 3.0 ~ 4.0,破裂方向性效应较为明显,震源破裂方向对地震动的影响不可忽略. 由 C_d 修正的 PGA 和 PGV 的观测值总体上更接近于预测值(见图 2),说明式(3)的求解过程较为可靠.

表 2 $M_s5.8$ 级地震的震源破裂参数			
Tab. 2 Rupture parameters of the $M_s5.8$ earthquake			
地震动峰值	$\varphi/(^\circ)$	v_r/c	k
PGA	321.9	0.81	0.72
PGV	318.2	0.70	0.86

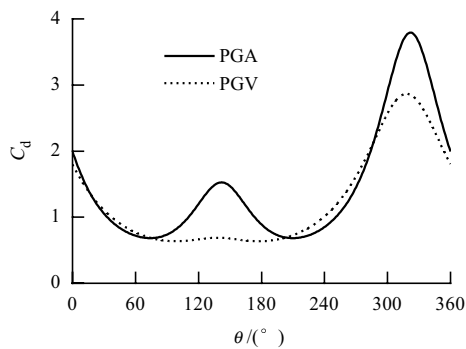


图 3 康定 $M_s5.8$ 级地震的破裂方向性系数
Fig. 3 Rupture directivity coefficient of the $M_s5.8$ Kangding earthquake

根据 PGA 确定的主破裂后方断层长度占整个破裂长度的比例为 28%,为双向破裂,图 3 中可以

发现主破裂后方的地震动(方位角 140° 附近)也存在一定的放大作用(>1.0),出现一个较小的“鼓包”.与采用 PGA 确定的震源破裂相比,尽管采用 PGV 确定的震源的破裂更接近于单向破裂,但破裂速度较小,由 PGV 确定的方向性效应与 PGA 相比较弱,破裂速度也是影响破裂方向性效应的重要因素.

根据 PGA 和 PGV 分别确定的震源破裂方向,以及余震分布、震中附近主要断层分布及地震烈度等震线(Ⅷ度区)如图 4 所示,箭线长度并非地震的实际破裂长度,箭头所指示方向的长度表示该方向的破裂占整个破裂的比例.12 月 25 日之后发生的大多数余震位于震中的西北方向,与本文确定的

震源主破裂方向较为一致.另外,震源破裂方向与震中附近断裂带走向、地震烈度图的长轴走向也十分一致.可见本文利用强震动记录确定 $M_s5.8$ 级地震的破裂方向与实际情况基本相符.

值得注意的是,尽管破裂方向与地震烈度图的长轴方向近乎一致,但是地震烈度图(除Ⅷ之外)并未表现出主破裂方向上(北西方向)烈度区的面积大于其反方向(东南方向),见图 1 和 4.这是由于地震烈度图是综合人体感觉、器物反应,建筑物破坏程度、地表变化状况等各项因素之后确定的地震影响程度,相对于东南方向人口密集区域,震中西北侧为高原山区,人口及城镇分布较为稀疏,地震现场调查点较少.

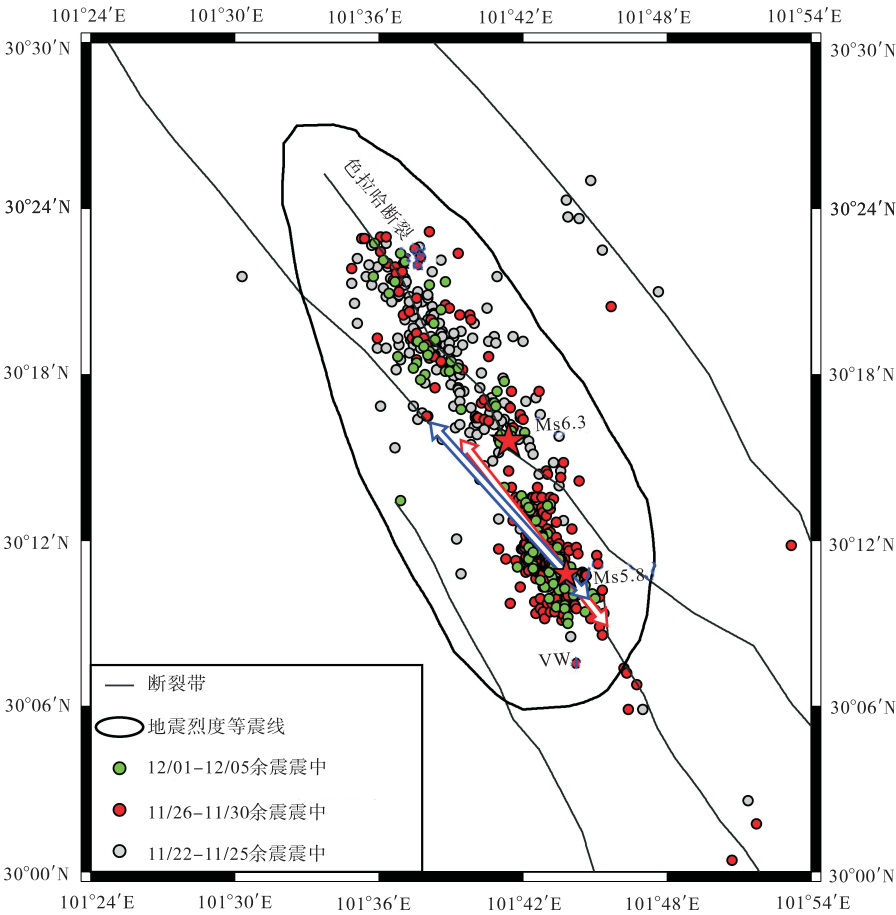


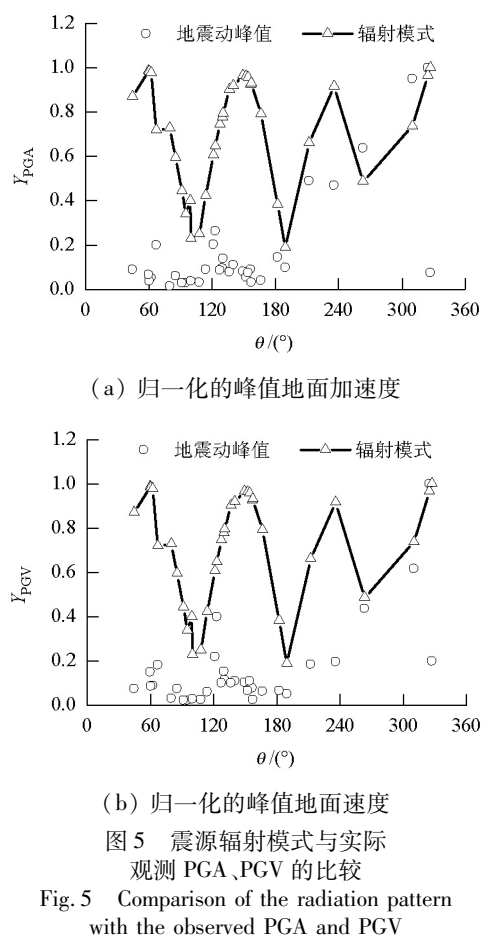
图 4 基于 PGA(红色箭线)和 PGV(蓝色箭线)确定的康定 $M_s5.8$ 级地震破裂方向

Fig.4 Rupture direction of the $M_s5.8$ Kangding Earthquake based on the PGA (red arrow line), and PGV (blue arrow line)

震源对地震动的影响不仅包括破裂方向,还应考虑上/下盘效应、震源辐射模式等因素.根据 CMT 震源机制解(见表 1),断层倾角接近 90° ,此次地震为走滑型,因此可不考虑上/下盘效应的影响.本文采用郑勇等提出的川西地区和四川盆地边缘的一维地壳结构速度模型^[25]以及 CMT 的震源

机制解确定了 $M_s5.8$ 级康定地震的 S 波震源辐射模式(以 SH 和 SV 分量的矢量和表示),并与实际观测的 PGA、PGV 进行比较,如图 5 所示.为消除几何扩散的影响并实现与辐射模式的比较,将各台站 PGA、PGV 分别乘以对应的震源距(R_{hyp})并进行归一化(除以其中的最大值),分别以 Y_{PGA} 和 Y_{PGV}

表示. 由图 5 中可见, 实际观测的 PGA、PGV 随方位角的变化与理论的辐射模式差异明显; 方位角 $210^{\circ} \sim 330^{\circ}$ 范围内, PGA 和 PGV 明显大于其它方位角范围内的值, 尽管 $210^{\circ} \sim 330^{\circ}$ 范围内数据点较少, 还是能看出其与辐射模式相近. 如果说这是由震源辐射模式本身引起, 那么在其它方位角范围内实际观测的 PGA 和 PGV 也应与理论辐射模式相近. 因此, 可以推断方位角 $210^{\circ} \sim 330^{\circ}$ 范围内的 PGA 和 PGV 偏大应为震源破裂方向性所致. 图 5 中 PGA、PGV 随方位角的变化趋势与图 3 所示的方向性系数 C_d 随方位角的变化趋势一致, 亦能解释这一推断.



3.2 $M_s6.3$ 级地震的破裂方向

对于 11 月 22 日发生的 $M_s6.3$ 级地震, 本文亦试图采用上述方法估计其震源破裂方向, 但结果却并不理想, 反演得到的主破裂方向接近正西 ($N270^{\circ}E$ 左右), 破裂速度仅是剪切波速的 $0.3 \sim 0.5$ 倍, 大约 $1.07 \sim 1.78 \text{ km/s}$, 破裂速度较慢, 与发震断层走向及余震时空分布并不一致. 如果以近场地震动的持时来近似判断震源破裂的持续时间, 可以发现 3 个近场台站 051KDX、051KDG 和

051KDT 的记录两水平方向 70% 显著持时的几何平均分别为 5.27 、 5.78 和 1.73 s , 说明震源破裂的持续时间较短, 破裂速度并不缓慢, 上述反演的震源破裂速度并不可靠.

通过图 4 中发震断层走向及余震时空分布可以判断, 北西方向可能是震源主破裂方向, 但在 $M_s6.3$ 级震中西北方向仅有两个强震台站的强震记录. Boatwright 认为强震台站密度较低、触发的强震台站空间方位分布不均匀, 或者震级较小, 尤其是中小震级地震的情况下, 仅采用强震动峰值可能难以正确判断震源的破裂方向^[10], 可能是由于台站空间方位分布的严重不均匀, 导致 $M_s6.3$ 级地震反演的各项震源破裂参数与实际情况有较大差异; 在布设了流动观测台站之后, 台站空间分布得到一定改善, $M_s5.8$ 级地震反演的结果较为真实可靠. 两次地震的对比体现了仅采用强震动峰值判断震源破裂方向的局限性. 可能由于 $M_s6.3$ 级地震震级较大, 简单的将震源假设为点源, 采用震源距表示的地震动衰减关系确定其地震动预测值可能存在较大的不确定性, 这也可能会影响震源破裂参数的确定.

4 结 论

传统强震动观测的目的是为地震工程研究和结构反应分析等提供重要的基础数据, 随着强震台网密度的提高和强震记录的积累, 包含了丰富的震源破裂过程相关信息的强震动记录也可以用来快速确定震源破裂方向, 为地震烈度快速产出、灾害损失评估、震后应急救援等工作提供基础性的信息. 本文介绍了一种利用强震动峰值参数 (PGA 和 PGV) 简单快速地判断震源破裂方向的方法, 在地震后 24 h 内快速确定了 2014 年 11 月 22 日发生的 $M_s6.3$ 级和 11 月 25 日发生的 $M_s5.8$ 级康定地震震源破裂方向及有关参数, 并得到了以下结论:

(1) 采用强震动峰值参数的反演方法可以快速确定震源的主破裂方向及破裂速度, 并估计出破裂的方向性对地震动的影响程度. 目前我国强震动台网已经提高了强震动记录的数据回收速度, 这对利用强震动记录进行地震破裂方向的快速判定提供了保障, 进一步为地震损失的快速评估提供了地震动空间分布的特征.

(2) $M_s6.3$ 级康定地震震源主破裂方向接近正西, 即北偏东 270° 左右, 与实际情况不符, 可能的原因是地震中触发的强震台站空间方位分布严

重不均匀,震中西—西北方向仅有2个台站触发,采用强震动峰值判断震源破裂方向的方法受到极大的限制。

(3) 主震后布设的流动观测台站改善了触发台站的空间分布,对于随后发生 $M_s 5.8$ 级康定地震,采用强震动峰值确定了与实际情况较为接近的震源破裂方向。震源破裂可以认为是双向破裂,主破裂方向约为北偏东 320° ,主破裂方向的破裂长度约占整个破裂长度的 $70\% \sim 90\%$,破裂速度 $v_r = 2.5 \sim 2.8 \text{ km/s}$,震源破裂方向性效应显著。

2个震例说明震后利用强震记录可以快速有效地估计震源破裂方向,但该方法受限于强震动台站在空间方位上的分布。同时,本文并未考虑采用该方法估计的震源破裂参数的不确定性,针对特大地震,简单的将震源假设为点源的假设一定存在着不合理性,这些问题仍需结合实际震例完善解决。

我国目前正在规划建成覆盖全国的地震预警与地震烈度速报观测网络,台站分布较均匀密集,同时地震动数据将采用实时数据传输,本文介绍利用强震记录快速确定震源破裂方向的方法可初步集成到地震中心分析系统内,在地震事件发生后迅速给出判定结果,供地震应急参考。

致谢: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2014B07)。

参考文献:

- [1] 胡进军,谢礼立. 汶川地震近场加速度基本参数的方向性特征[J]. 地球物理学报, 2011, 54(10): 2581-2589.
HU Jinjun, XIE Lili. Directivity in the basic parameters of the near-field acceleration ground motions during the Wenchuan earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(10): 2581-2589.
- [2] VELASCO A A, AMMON C J, LAY T. Empirical Green function deconvolution of broadband surface waves: rupture directivity of the 1992 Landers, California ($M_w 7.3$), earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1994, 84(3): 735-750.
- [3] SHABESTARI K T, YAMAZAKI F. Near-fault spatial variation in strong ground motion due to rupture directivity and hanging wall effects from the Chi-Chi, Taiwan earthquake [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2003, 32(14), 2197-2219.
- [4] COMINO L J, MANCILLA F D L, MORALES J, et al.

Rupture directivity of the 2011, $M_w 5.2$ Lorca earthquake (Spain)[J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(3): 268-274.

- [5] HARTZELL S, MENDOZA C, RAMIREZ-GUZMAN L, et al. Rupture history of the 2008 $M_w 7.9$ Wenchuan, China, earthquake: evaluation of separate and joint inversions of geodic, teleseismic, and strong-motion data[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2013, 103(1): 353-370.
- [6] BOATWRIGHT J, BOORE D M. Analysis of the ground accelerations radiated by the 1980 Livermore Valley earthquakes for directivity and dynamic source characteristics[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1982, 72(6A): 1843-1865.
- [7] LANZA V, SPALLAROSSA D, CATTANEO M, et al. Source parameters of small events using constrained deconvolution with empirical Green's functions[J]. Geophysical Journal International, 1999, 137: 651-662.
- [8] MCGUIRE J J. Estimating finite source properties of small earthquake ruptures[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2004, 94(2): 377-393.
- [9] 冯蔚,刘杰,罗佳宏,等. 基于强震和测震数据对鲁甸 6.5 级地震发震断层方向的研究[J]. 地震地质, 2015, 37(1): 331-341.
FENG Wei, LIU Jie, LUO Jiahong, et al. A study on direction of the seismogenic fault of Ludian M 6.5 earthquake based on strong motion and seismographic data[J]. Seismology and Geology, 2015, 37(1): 331-341.
- [10] BOATWRIGHT J. The persistence of directivity in small earthquakes[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2007, 97(6): 1850-1861.
- [11] SEEKINS L C, BOATWRIGHT J. Rupture directivity of moderate earthquakes in northern California[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2010, 100(3): 1107-1119.
- [12] CONVERTITO V, CACCAVALE M, MATTEIS R D, et al. Fault extent estimation for near-real-time ground-shaking map computation purposes[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2012, 102(2): 661-679.
- [13] CONVERTITO V, EMOLO A. Investigating rupture direction for three 2012 moderate earthquakes in northern Italy from inversion of peak ground-motion parameters[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2012, 102(6): 2761-2770.

- [14] BOORE D M. Effect of baseline corrections on displacements and response spectra for several recordings of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2001, 91(5): 1199-1211.
- [15] BEN-MENACHEM A. Radiation of seismic surface-waves from finite moving sources[J]. *Bulletin of Seismological Society of America*, 1961, 51(3): 401-435.
- [16] JOYNER W B. Directivity for non-uniform ruptures[J]. *Bulletin of Seismological Society of America*, 1991, 81(4): 1391-1395.
- [17] 闻学泽. 四川西部鲜水河-安宁河-则木河断裂带的地震破裂分段特征[J]. *地震地质*, 2000, 22(3): 239-249.
WEN Xueze. Character of rupture segmentation of the Xianshuihe-Anninghe-Zemuhe fault zone, western Sichuan[J]. *Seismology and Geology*, 2000, 22(3): 239-249.
- [18] 司宏俊, 纘纘一起, 三宅弘惠, 等. 基于基岩衰减公式的汶川. 芦山地震强震动评价[J]. *地震工程与工程振动*, 2014, 34(4): 93-100.
SI Hongjun, KOKETSU K, MIYAKE H, et al. Empirical evaluation of ground motions for Wenchuan and Lushan earthquake[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2014, 34(4): 93-100.
- [19] 任叶飞, 温瑞智, 王宏伟, 等. 芦山地震中强地面运动的区域性特征探讨[J]. *地震工程与工程振动*, 2014, 34(增刊): 188-192.
REN Yefei, WEN Ruizhi, WANG Hongwei, et al. Regional dependence of ground motion in 2013 Lushan earthquake sequence[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2014, 34(Sup.): 188-192.
- [20] 俞言祥, 汪素云. 中国东部和西部地区水平向基岩加速度反应谱衰减关系[J]. *震灾防御技术*, 2006, 1(3): 206-217.
YU Yanxiang, WANG Suyun. Attenuation relations for horizontal peak ground acceleration and response spectrum in eastern and western China[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2006, 1(3): 206-217.
- [21] 霍俊荣. 近场强地面运动衰减规律的研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 1989.
- [22] 雷建成, 高孟潭, 俞言祥. 四川及邻区地震动衰减关系[J]. *地震学报*, 2007, 29(5): 500-511.
LEI Jiancheng, GAO Mengtan, YU Yanxiang. Seismic motion attenuation relations in Sichuan and adjacent areas[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2007, 29(5): 500-511.
- [23] 俞言祥, 李山有, 肖亮. 为新区划图所建立的地震动衰减关系[J]. *震灾防御技术*, 2013, 8(1): 24-33.
YU Yanxiang, LI Shanyou, XIAO Liang. Development of ground motion attenuation relations for the new seismic hazard map of China[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2013, 8(1): 24-33.
- [24] 康兰池, 金星. 四川地区地震动峰值衰减规律研究[J]. *地震学报*, 2009, 31(4): 403-410.
KANG Lanchi, JIN Xing. Ground motion attenuation relation for small to moderate earthquakes in Sichuan region[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2009, 31(4): 403-410.
- [25] ZHENG Yong, MA Hongsheng, LÜ Jian, et al. Source mechanism of strong aftershocks ($M_s \geq 5.6$) of the 2008/05/12 Wenchuan earthquake and the implication for seismotectonics[J]. *Science in China Series D: Earth Science*, 2009, 52(6): 739-753.
- [26] HAO Jinlai, CHEN Ji, WANG Weimin, et al. Rupture history of the 2013 $M_w 6.6$ Lushan earthquake constrained with local strong motion and teleseismic body and surface waves[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40: 5371-5376.

(中文编辑:徐 萍 英文编辑:周 尧)