

姜永正, 王宏伟, 任叶飞, 温瑞智. 2017. 2016年8月24日意大利 $M_w 6.2$ 地震近场地震动方向性效应. 地震学报, 39(1): 132-142. doi:10.11939/jass.2017.01.011.

Jiang Y Z, Wang H W, Ren Y F, Wen R Z. 2017. Rupture directivity effect of near-field ground motions in Italy $M_w 6.2$ earthquake on August 24, 2016. *Acta Seismologica Sinica*, 39(1): 132-142. doi:10.11939/jass.2017.01.011.

2016年8月24日意大利 $M_w 6.2$ 地震 近场地震动方向性效应^{*}

姜永正^{1,2)} 王宏伟^{1,2)} 任叶飞^{1,2)} 温瑞智^{1,2),*}

1) 中国哈尔滨 150080 中国地震局工程力学研究所

2) 中国哈尔滨 150080 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室

摘要 为研究2016年8月24日意大利中部 $M_w 6.2$ 地震的断层破裂方向性效应, 依据断层走向将强震动观测台站划分为SE和NW两组, 比较两组记录的地面峰值加速度PGA、地面峰值速度PGV、拟加速度反应谱PSA和重要持时 D_{SR} 。结果显示: NW组观测到的PGA、PGV和PSA普遍大于SE组, PGA和PGV的观测值与预测值的残差随方位角变化明显; NW组观测到的 D_{SR} 值整体小于SE组, 由此推断此次地震存在明显的方向性效应。在此基础上, 采用反演方法, 确定了该地震的震源为双向非对称破裂, 主破裂方向大约介于345°—360°之间, 主破裂长度约占整个破裂的70%—80%, 破裂速度为2.2—2.5 km/s, 反演结果印证了两组台站数据的地震动参数差异是由断层破裂方向效应所引起的。

关键词 意大利 $M_w 6.2$ 地震 破裂方向 地震动参数 反演

doi:10.11939/jass.2017.01.011 中图分类号: P315.9 文献标志码: A

Rupture directivity effect of near-field ground motions in Italy $M_w 6.2$ earthquake on August 24, 2016

Jiang Yongzheng^{1,2)} Wang Hongwei^{1,2)} Ren Yefei^{1,2)} Wen Ruizhi^{1,2),*}

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

2) Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China

Abstract: For investigating the rupture directivity effect of the central Italy $M_w 6.2$ earthquake on August 24, 2016, more than 150 strong motion stations are separated into two groups, which are SE and NW, according to the fault strike. Comparing the PGA, PGV, pseudo-acceleration response spectrum (PSA) and significant duration D_{SR} of two groups, the results show that: the observed PGAs, PGVs and PSAs of NW group are larger than those of SE group; the residuals between the observed and predicted PGAs and PGVs are

* 基金项目 黑龙江省科学基金(LC2015022)、地震行业科研专项(201508005)、中国地震局创新团队发展计划和国家自然科学基金(51308515)共同资助。

收稿日期 2015-12-14 收到初稿, 2016-12-00 决定采用修改稿。

* 通讯作者 e-mail: ruizhi@iem.ac.cn



significantly correlated with the azimuth; the observed D_{SR} of NW group is smaller than that of SE group. From these observations we deduce that the rupture directivity effect exists in this earthquake. Furthermore, the inversion for source rupture parameters using PGAs and PGVs, respectively, shows that the rupture is bilateral, and the M_w 6.2 earthquake predominantly ruptured in the direction 345° – 360° , accounting for 70%–80% of the total rupture, and the rupture velocity is 2.2–2.5 km/s. These results validate the conclusion that the differences of ground motion parameters between two groups of stations might be caused by the rupture directivity effect.

Key words: Italy M_w 6.2 earthquake; rupture directivity; ground motion parameter; inversion

引言

理论研究表明, 地震动空间分布主要受震源、辐射模式、地震波传播路径以及近地表场地效应等的综合影响(Atkinson, Mereu, 1992; Bertrand *et al*, 2011; 任叶飞等, 2014)。而实际观测发现, 震源的破裂传播方向对地震动空间分布的影响亦不容忽视(Somerville *et al*, 1997)。对这种影响的相关研究可追溯至20世纪中叶, 1952年加利福尼亚科恩县 M_w 7.5 地震的远场中长期地震记录表现出了显著的空间分布不均匀性, Benioff(1995)认为这一现象与地震动辐射能量随方位角的变化有关, 而这一变化就是由震源破裂传播的方向性引起的, 同时将上述现象称之为“地震多普勒效应”。当震源以接近剪切波的速度破裂时, 不同破裂点辐射的能量在相对较短的时间内几乎同时到达破裂前方场点, 地震动的持时较短且幅值较大; 但不同破裂点辐射的能量要到达破裂后方则需要相对较长的时间, 地震动的持时较长且幅值较小。地震动的这种空间分布不均匀性使得破裂前方的震害相对于破裂后方明显加重(Somerville *et al*, 1997)。近年来的多次破坏性地震中均观测到这种现象, 例如2008年汶川地震以及2013年芦山余震, 在震害、地震动幅值、持时和频谱的空间分布特性等方面均体现出显著的方向性效应(胡进军, 谢礼立, 2011; Wen *et al*, 2015), 地震动的方向性效应已成为地震工程领域的研究热点。

2016年8月24日1时36分32秒(UTC)意大利中部城市阿马特里切发生 M_w 6.2 地震, 震源深度约为4.2 km, 这是继2009年拉奎拉 M_w 6.3 地震之后, 意大利中部发生的又一次破坏性浅源地震。该地震震中位于拉奎拉 M_w 6.3 地震西北侧约45 km处, 两次地震处于同一地质构造区域, 且拉奎拉 M_w 6.3 地震具有明显的方向性效应(Akinci *et al*, 2010), 因此对于此次地震是否依然存在这一现象, 值得关注和探讨。

意大利强震观测网络(Rete Accelerometrica Nazionale, 简写为 RAN)和地震观测网络(Rete Sismica Nazionale, 简写为 RSN)在此次地震中捕获到了大量的近场强震动记录, 为研究地震动的方向性效应提供了基础数据。本文拟通过对这些记录的地面峰值加速度(peak ground acceleration, 简写为 PGA)、地面峰值速度(peak ground velocity, 简写为 PGV)、拟加速度反应谱(pseudo-acceleration response spectrum, 简写为 PSA)及重要持时 D_{SR} 等进行分析, 定性地判断方向性效应存在的可能性, 并在此基础上, 基于地震动峰值参数反演方法, 估算震源破裂参数, 定量地分析震源破裂方向的影响。

1 区域地质构造

意大利的地震活动主要受亚平宁冲断带的影响,但自中新世晚期以来,地质活动造成了亚平宁冲断带西缘与东缘内部构造的显著差异,这些差异主要体现在岩石圈厚度、伊特鲁里亚区域岩浆活动及主压应力场方向方面(Ghisetti, Vezzani, 1981; Savelli, 1988; Amato, Montone, 1997; Frepoli, Amato, 1997)。根据地壳伸展前缘、地形分界线及外推力前缘,亚平宁冲断带自西向东被分为4个构造带,即围第勒尼安构造带、内冲断带、外冲断带和亚得里亚海渊—阿普里亚前路(Ghisetti, Vezzani, 2002)。其中内冲断带被许多较短的走向为SE-NW、倾角为50°—70°的正断层所分割,而外冲断带发育较多倾角大于60°的正断层。内冲断带与外冲断带之间存在1000 km×(70—100 km)的狭长区域,该区域恰好处于受压破坏的临界平衡区,地震活动最为强烈,此次地震便发生在该区域。新构造活动和历史地震表明,这一区域内的正断层可能孕育 M_S 5.0—7.0地震。历史上该区域曾发生过多次 M_w >6.0地震并造成巨大损失,例如,1915年1月13日阿韦扎诺南部 M_w 6.7地震,1997年9月26日翁布里亚 M_w 6.0地震及2009年4月6日拉奎拉 M_w 6.3地震。

2 强震动数据

RAN和RSN的158个台站捕获了意大利 M_w 6.2地震中质量可靠的三分量强震动记录(Orfeus, 2016),台站分布如图1所示,可以看到这些台站密集地分布在距离震中9—298 km范围内。对获取的记录进行数据处理,包括基线校正和0.1—30 Hz巴特沃斯带通滤波(Boore, 2004; 任叶飞等, 2014)。距震中8.9 km的AMT台站的东西分量是本次地震的最大PGA值,为425 cm/s²;PGA的第二大值为352.6 cm/s²,是距震中13.7 km的NRC台站的南北分量。这两个台站的水平向加速度时程如图2所示。地震发生后,USGS

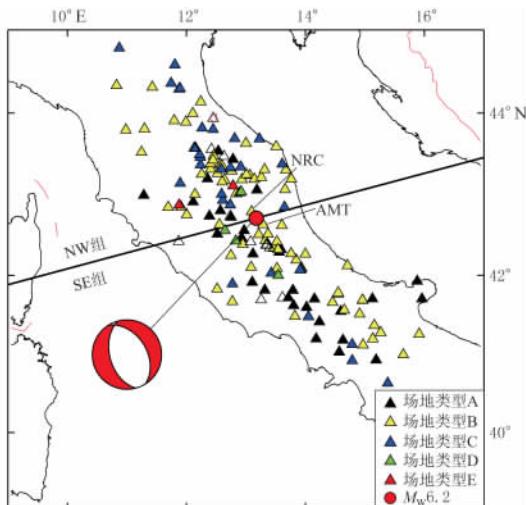


图1 2016年8月24日意大利 M_w 6.2地震的触发台站分布图

Fig. 1 The triggered stations in Italy M_w 6.2 earthquake occurred on August 24, 2016

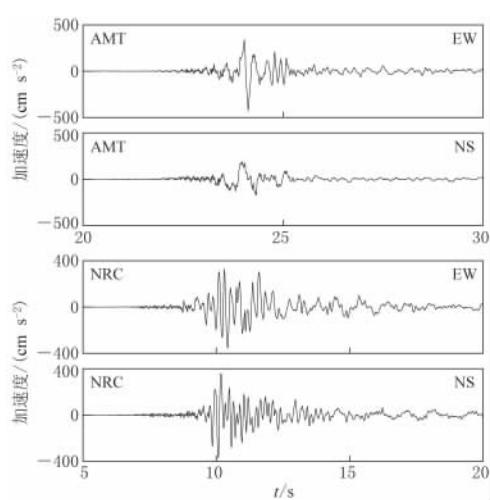


图2 NRC和AMT台站的水平分量加速度时程

Fig. 2 Acceleration time-histories of two horizontal components recorded by stations NRC and AMT

(2016)确定了此次地震的震源机制解, 即节面Ⅰ的走向、倾角和滑动角分别为 165° 、 45° 和 -78° ; 节面Ⅱ的走向、倾角和滑动角分别为 328° 、 43° 和 -103° , 结合意大利国家地球物理及火山研究所 (Instituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, 简写为 INGV) 通过反演大地测量数据给出的此次地震破裂面的滑动分布图(图3)(INGV, 2016), 基本可以判断节面Ⅰ为此次地震的破裂面。因此, 本文采用 165° 作为本次地震震源破裂面的走向, 并在地震震中沿垂直于走向方向设置分界线, 将触发台站分为 NW(0° — 75° 和 255° — 360°) 和 SE

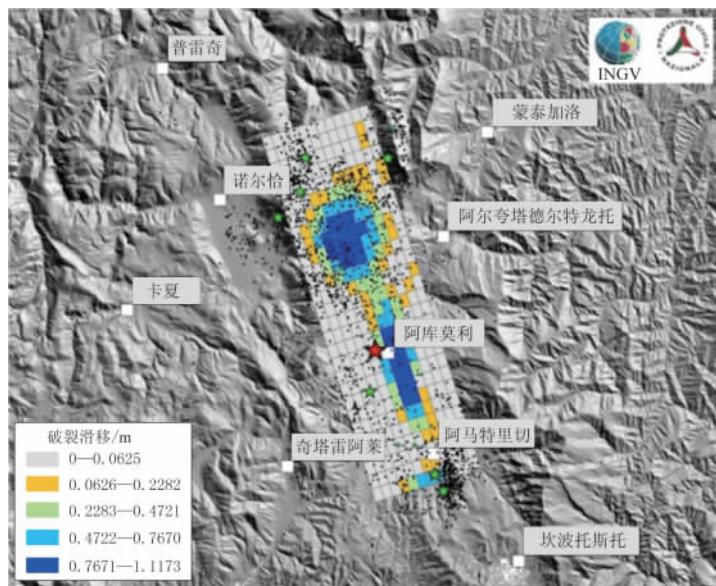


图3 基于卫星数据反演的破裂面滑移分布(引自 INGV, 2016)

Fig. 3 Slip distribution inversion based on satellite data (after INGV, 2016)

(75° — 255°)两组(图1), 对地震动特征进行分析。

依据欧洲场地分类标准 (Comité Européen de Normalisation, 2003), 将台站场地划分为5种类型(图1)。图4给出了 NW 与 SE 两组合台站在不同场地类型下的震中距分布情况。可以看出, 台站场地类型以 A 类和 B 类居多, 且在近场区域(震中距 $\Delta < 100$ km)各类场地在 NW 和 SE 两组的数量较为相当。

3 地震动参数的方向性特征

3.1 峰值

本文将有两个水平分量记录的所有 PGA 和 PGV 进行几何平均, 并将其与 Bindi 等 (2011) 及 Akkar 和 Bommer(2007a, b) 提出的地震动预测方程的预测值进行比较, 结果如图5所示。计算各记录的 Joyner-Boore 距离 R_{JB} (台站至破裂面水平面投影的距离)时, 统

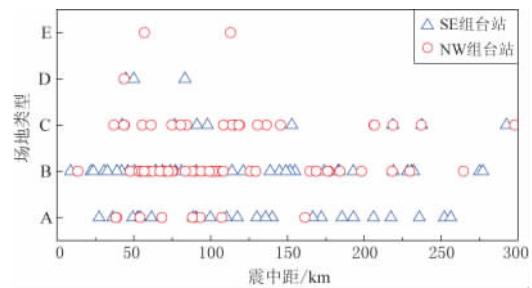


图4 NW 与 SE 两组合台站在不同场地类型下的震中距分布

Fig. 4 Distribution of epicentral distances for two groups of stations classified by site type

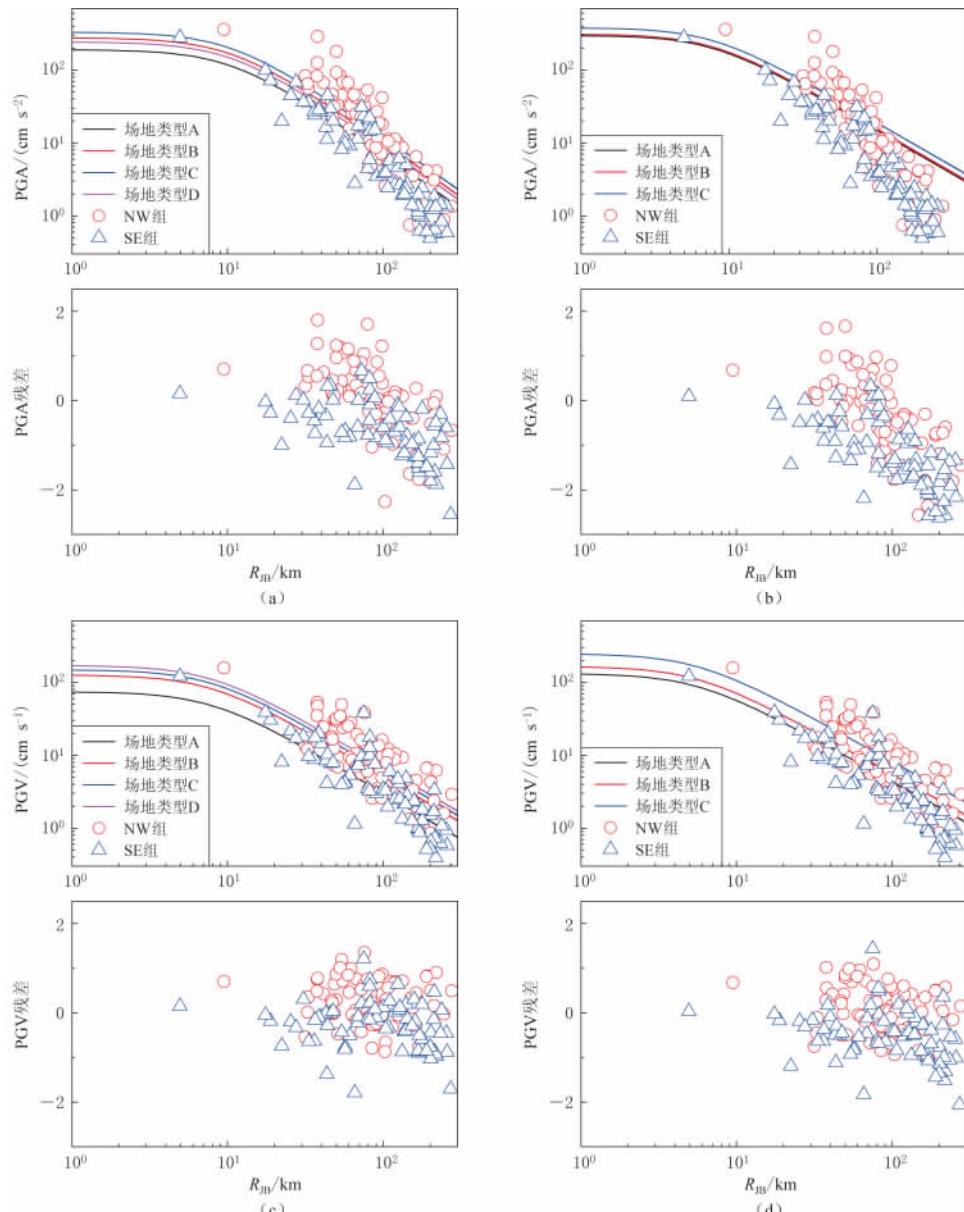


图 5 PGA (a, b)与 PGV (c, d) 观测值与预测值的比较及残差随 R_{JB} 的变化

图(a)和(c)的衰减曲线引自 Bindi 等(2011), 图(b)和(d)的衰减曲线分别引自

Akkar 和 Bommer(2007a)以及 Akkar 和 Bommer(2007b)

Fig. 5 Comparison of the observed PGAs (a, b) and PGVs (c, d) with predicted ones and their residuals varied with R_{JB}

Attenuation curves in Figs. (a) and (c) refer to Bindi *et al* (2011), those in Figs. (b) and (d) refer to Akkar and Bommer (2007a) and Akkar and Bommer (2007b), respectively

—采用 Convertito 等(2012)基于美国西部的下一代衰减(next generation attenuation, 简写为 NGA)关系数据统计得到的震中距与 R_{JB} 的转换关系. 需要说明的是, 本文采用 R_{JB} 的原因, 除上述地震动预测方程采用 R_{JB} 外, 还要尽可能减少破裂滑动的不均匀性对地震动的

影响(图3), 从而减小方向性效应分析中的干扰因素。

从图5可以看出, 当 $R_{JB} < 100$ km 时, NW组PGA的观测值总体上大于两个预测方程给出的预测值, 而当 $R_{JB} > 100$ km 时, NW组PGA的观测值小于预测值; SE组PGA的观测值在所有距离范围内均普遍小于预测值。对于PGV, NW组的观测值基本上与两个预测方程给出的预测值一致, 而SE组的观测值几乎均小于预测值。由此可见, NW与SE两组观测到的PGA和PGV值存在显著的差异。

为了更清晰地反映这种差异性, 图6给出了当 $R_{JB} < 80$ km 时, 根据Bindi等(2011)及Akkar和Bommer(2007a, b)给出的预测值计算得到残差随方位角的变化情况。可见, PGA和PGV的残差均表现出与方位角的强烈相关性: 当方位角处于 75° — 255° 范围内时, SE组的PGA和PGV的残差普遍小于零, 而当方位角在 0° — 75° 和 255° — 360° 范围内时, NW组的残差则普遍大于零。图6还给出了不同场地类型下的残差分布情况, 可以看出, 不同场地的残差平均值相近且基本接近于零。前文已说明近场区域的各类场地的台站在NW和SE两组的数量分布较为相当(图4), 因此图6的结果说明残差随方位角的显著变化并不是由于台站场地类型不同而引起的, 更可能是由破裂方向所造成的。

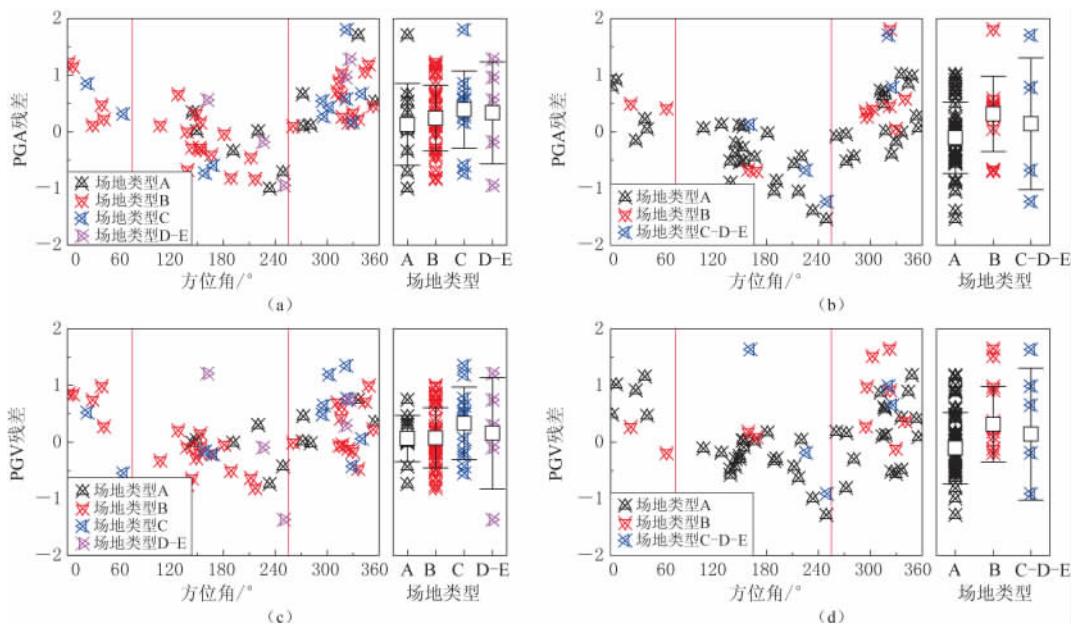


图6 PGA (a, b)和 PGV (c, d)观测值与预测值的残差随方位角变化的特征

图(a)和(c)中计算残差所用的预测值引自Bindi等(2011), 图(b)和(d)中分别引自

Akkar和Bommer(2007a)及Akkar和Bommer(2007b)

Fig. 6 Variation of the residuals between the observed and predicted PGAs (a, b) and PGVs (c, d) with azimuth

The predicted values used for residual calculation in Figs. (a) and (c) refer to Bindi *et al* (2011), while those in Figs. (b) and (d) refer to Akkar and Bommer (2007a) and Akkar and Bommer (2007b), respectively

3.2 反应谱

将记录两个水平分量 5% 阻尼比的所有 PSA 几何平均, 并将所得结果乘以 R_{JB} 以消除几何扩散的影响, 得到拟加速度反应谱, 结果如图7所示。可以看出, NW组记录的 PSA

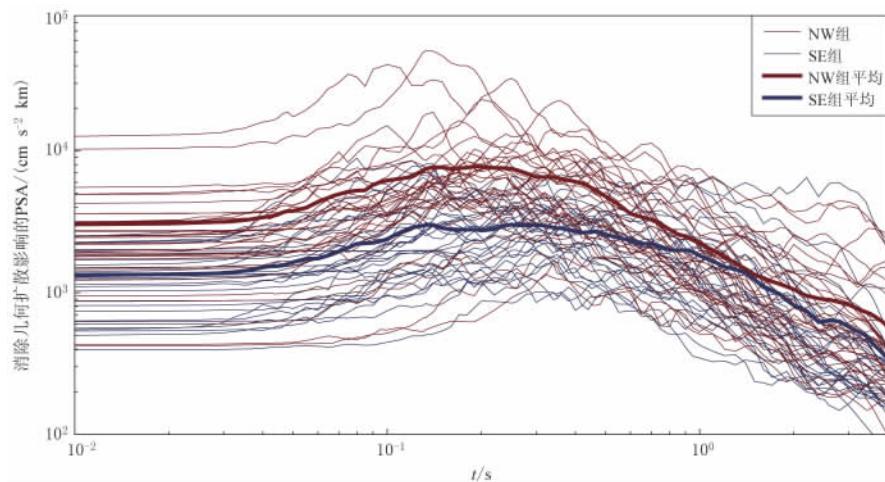


图 7 NW 组和 SE 组台站记录的拟加速度反应谱比较图

Fig. 7 Comparison of the pseudo-acceleration response spectra recorded by the stations of northwest group with those of southeast group

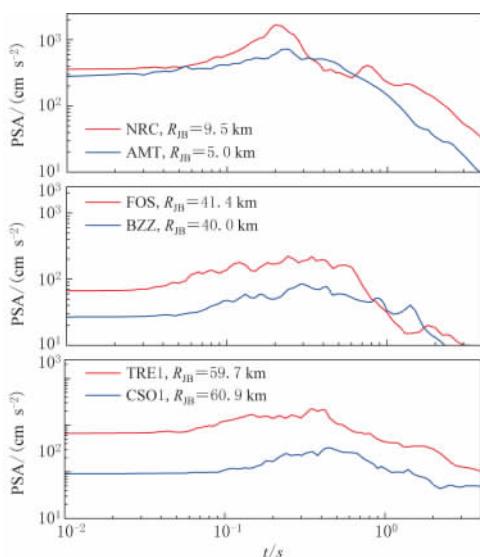
图 8 NW 组和 SE 组相近 R_{JB} 的 3 组台站记录的反应谱比较

Fig. 8 Comparison of the response spectra recorded at stations of northwest and southeast groups with approximate R_{JB}

计算得到的预测值进行比较,结果如图 9 所示。因此假设预测方程中地表到地下 30 m 的平均剪切波速(v_{S30})为 580 m/s,断层到地表的距离用震源深度替代,断层距用 R_{JB} 替代。尽管这些假设会带来误差,但不影响本文对持时特征的定性分析。从图 9 中可以看出,当 $R_{JB} < 50$ km 时, NW 组的持时观测值普遍小于预测

的平均值在整个周期内(0.01—4.0 s)明显高于 SE 组,且短周期(< 1 s)内差异更为显著,说明此次地震破裂方向对高频地震动的影响更为显著。选取 R_{JB} 较为接近的分别位于西北侧和东南侧的 3 组 B 类场地台站(NRC 与 AMT; FOS 与 BZZ; TRE1 与 CSO1)所记录的 PSA 进行比较。每组台站的方位角(台站相对于震中的方位)近似相差 180° ,3 组台站的 R_{JB} 范围分别近似为 < 10 km, < 40 km 和 < 60 km。3 组台站记录的 PSA 如图 8 所示,可以看出 NW 组记录的 PSA 均普遍高于 SE 组。显然,与 PGA 和 PGV 一样,3 组台站在 NW 和 SE 两侧观测到的反应谱值存在显著差异性。

3.3 持时

本文计算了地震动持时(D_{SR} (5%—95%的能量持续时间)(Trifunac, Brady, 1975),并将两个水平方向的持时取几何平均值,之后与利用 Bommer 等(2009)给出的持时预测方程

值, 而当 $R_{JB} > 50$ km 时, 观测值大都大于预测值; SE 组持时的观测值总体上都大于预测值。持时在 NW 和 SE 方向的分布差异与前述 PGA 和 PGV 的分布差异相反, 这与断层破裂前方的峰值较大而持时较小、破裂后方的峰值较小而持时较大的认识相符。需要指出的是, 图 3 中显示 NW 方向上破裂滑动区域面积要大于 SE 方向, 若这种地震动的差异性受震源破裂非对称性影响显著, NW 组的地震动持时理应大于 SE 组, 而实际观测则恰恰相反, 因此本文认为方向性效应的影响较为显著, 而场地条件和震源破裂非对称性的影响则相对较小。

4 震源破裂参数反演

理论研究表明, 震源破裂方向对地震动的影响可采用方向性系数 C_d 来描述(Boatwright, 2007; Seekins, Boatwright, 2010; Convertito, Emolo, 2012):

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

式中: v_r/c 为马赫数, v_r 为破裂速度, c 为剪切波速, φ 为破裂方向, θ 为台站方位角; $k = l'/l$, 表示初始破裂点的相对位置, l' 和 l 分别表示主破裂方向的断层长度及地震破裂断层的总长度。若将地震动观测值除以系数 C_d , 则可认为这一过程去除了震源破裂方向性效应的影响。

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、距离及场地等因素变化的规律, 但通常并未考虑震源破裂方向的影响。理论上, 使地震动参数(PGA 或 PGV)的预测值与经过系数 C_d 修正过的观测值的残差达到最小, 即可确定式(1)中的各项参数(v_r/c , φ 和 k)。本文采用网格搜索法确定这些参数, 该方法在确定芦山地震几次典型余震的震源破裂参数时得到了有效运用(Wen et al., 2015)。同时, 该方法考虑了预测方程的不确定性, 引入了不确定性系数, 该系数是反映预测方程中震源位置、辐射模式和场地效应等不确定性影响的随机变量, 并且假设该随机变量服从预测方程标准差的正态分布。

采用 Bindi 等(2011)及 Akkar 和 Bommer(2007a, b)给出的 PGA 和 PGV 预测方程, 分别对地震动参数反演得到震源破裂参数, 列于表 1。可以看出, 当采用同一作者的预测方程对 PGA 和 PGV 进行反演时, 两者的反演结果较为接近; 当采用不同作者的预测方程对 PGA 和 PGV 进行反演时, 分别对比不同方程下的 PGA 与 PGV, 所得结果也是一致的。这些参数表明, 此次地震的震源为双向非对称破裂, 主破裂方向大约在 345°—360°之间, 该结果与 USGS(2016)反演的断层走向一致。主破裂长度约占整个破裂的 70%—80%, v_r/c 约为 0.6—0.7, 若剪切波速 c 假设为 3.6 km/s, 则震源破裂速度 v_r 为 2.2—2.5 km/s。

根据反演得到的震源破裂参数(表 1)计算系数 C_d , 结果如图 10 所示。可以看出, 采

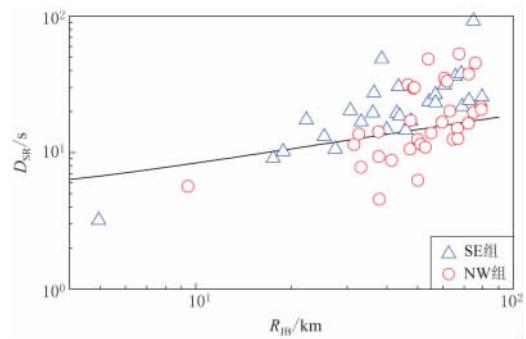


图 9 5%—95%持时观测值与预测值比较图

Fig. 9 Comparison of the observed and predicted ground motion with 5%—95% damped duration

表 1 采用 PGA 和 PGV 反演得到的震源破裂参数

Table 1 Seismic source rupture parameters from inversion of PGAs and PGVs

预测方程	峰值参数	$\varphi/^\circ$	v_r/c	k
Bindi 等(2011)	PGA	344.8±20.3	0.71±0.09	0.8±0.13
	PGV	352.4±10.9	0.59±0.1	0.75±0.13
Akkar 和 Bommer (2007a, b)	PGA	356.6±21.0	0.6±0.09	0.82±0.11
	PGV	352.5±4.7	0.66±0.03	0.69±0.04

注: φ 为破裂方向, v_r/c 为马赫数, k 为初始破裂点的相对位置.

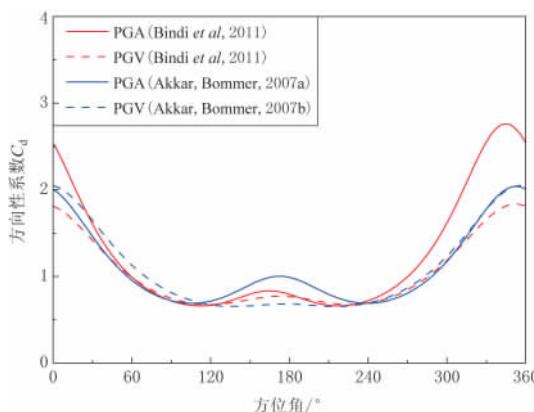


图 10 反演得到的方向性系数 C_d 随方位角的变化分布

Fig. 10 The inverted coefficient C_d versus azimuth

都小于 1. 这一现象与前文描述的 NW 组 PGA, PGV 和 PSA 总体上大于 SE 组相对应, 由此推断, 断层破裂传播的方向是导致此次地震的地震动在破裂前后方产生差异的主要原因.

5 讨论与结论

根据断层走向将意大利 $M_w 6.2$ 地震中被触发的强震动台站划分为 NW 和 SE 两组. 首先, 比较这两组台站记录的地震动参数, 分析残差随方位角的变化情况, 定性地判断方向性效应存在的可能; 其次, 基于 PGA 和 PGV 的观测数据, 采用反演方法估算震源破裂参数, 定量地描述震源破裂的方向性影响. 本文得到的结论如下:

1) NW 组与 SE 组台站观测到的地震动参数存在显著的差异性. NW 组 PGA 和 PGV 的观测值普遍高于预测值, 而 SE 组 PGA 和 PGV 的观测值却普遍低于预测值. 不同场地类型情况下的残差平均值基本接近于零, 排除了差异性由局部场地效应引起的可能. 消除几何扩散的影响后, NW 组 PSA 的观测值显著大于 SE 组, 且短周期段(<1 s)较为显著. 近场区域 NW 组的 D_{SR} 整体上小于 SE 组. 这些现象与破裂方向性效应的理论相符.

2) 反演震源破裂参数表明, 此次地震震源为 NW 方向占主导的双侧非对称破裂, 反演结果验证了前述推论, 即 NW 和 SE 两组地震动参数的差异性可能是由断层破裂的传播方向不同所致.

用 Bindi 等(2011)及 Akkar 和 Bommer(2007a, b)给出的预测方程, 基于 PGA 和 PGV 得到的 C_d 值均基本一致. 在破裂前方(350° 附近) C_d 达到最大值, 为 2.0 左右, 而破裂后方很大范围内(60° — 270°)的 C_d 值为 0.4—1.0. 采用 Bindi 等(2011)给出的预测方程, 基于 PGA 反演得到的 C_d 值只有最大值与上述 3 种结果不同, 达到了 2.7, 这主要是由于预测方程在 275° — 360° 之间所得的预测值偏小所造成的, 但 C_d 值随方位角变化的趋势是一致的.

从反演得到的 C_d 值可以看出, NW 组(0° — 75° 和 255° — 360°)的 C_d 值几乎都大于 1, 而 SE 组(75° — 255°)的 C_d 值基本

参 考 文 献

- 胡进军, 谢礼立. 2011. 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, 54(10): 2581—2589.
- Hu J J, Xie L L. 2011. Directivity in the basic parameters of the near-field acceleration ground motions during the Wen-chuan earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(10): 2581—2589 (in Chinese).
- 任叶飞, 温瑞智, 周宝峰, 黄旭涛. 2014. 2013年4月20日四川芦山地震强地面运动三要素特征分析[J]. 地球物理学报, 57(6): 1836—1846.
- Ren Y F, Wen R Z, Zhou B F, Huang X T. 2014. The characteristics of strong ground motion of Lushan earthquake on April 20, 2013[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(6): 1836—1846 (in Chinese).
- Akinci A, Malagnini L, Sabetta F. 2010. Characteristics of the strong ground motions from the 6 April 2009 L'Aquila earthquake, Italy[J]. *Soil Dyn Earthquake Eng*, 30(5): 320—335.
- Akkar S, Bommer J J. 2007a. Prediction of elastic displacement response spectra in Europe and the Middle East[J]. *Earthquake Engng Struct Dyn*, 36(10): 1275—1301.
- Akkar S, Bommer J J. 2007b. Empirical prediction equations for peak ground velocity derived from strong-motion records from Europe and the Middle East[J]. *Bull Seismol Soc Am*, 97(2): 511—530.
- Amato A, Montone P. 1997. Present-day stress field and active tectonics in southern peninsular Italy[J]. *Geophys J Int*, 130(2): 519—534.
- Atkinson G M, Mereu R F. 1992. The shape of ground motion attenuation curves in southeastern Canada[J]. *Bull Seismol Soc Am*, 82(5): 2014—2031.
- Benioff H. 1955. Mechanism and strain characteristics of the White Wolf fault as indicated by the aftershock sequence[G]// *Earthquakes in Kern County, California During 1995*. Calif Div Mines Bull, California: California State Mining Bureau: 171: 199—202.
- Bertrand E, Duval A M, Régnier J, Azzara R M. 2011. Site effects of the Rio basin, L'Aquila[J]. *Bull Earthquake Eng*, 9(3): 809—823.
- Bindi D, Pacor F, Luzzi L, Puglia R, Massa M, Ameri G, Paolucci R. 2011. Ground motion prediction equations derived from the Italian strong motion database[J]. *Bull Earthquake Eng*, 9(6): 1899—1920.
- Boatwright J. 2007. The persistence of directivity in small earthquakes[J]. *Bull Seismol Soc Am*, 97(6): 1850—1861.
- Bommer J J, Stafford P J, Alarcon J E. 2009. Empirical equations for the prediction of the significant, bracketed, and uniform duration of earthquake ground motion[J]. *Bull Seismol Soc Am*, 99(6): 3217—3233.
- Boore D M. 2004. Effect of baseline corrections on displacements and response spectra for several recordings of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake[J]. *Bull Seismol Soc Am*, 91(5): 1199—1211.
- Comité Européen de Normalisation. 2003. *Eurocode 8: Design of Structures for Earth*[S]. Brussels: Brussels Comité Européen de Normalisation: 19—21.
- Convertito V, Emolo A. 2012. Investigating rupture direction for three 2012 moderate earthquakes in northern Italy from inversion of peak ground-motion parameters[J]. *Bull Seismol Soc Am*, 102(6): 2764—2770.
- Convertito V, Caccavale M, De Matteis R, Emolo A, Wald D, Zollo A. 2012. Fault extent estimation for near-real-time ground-shaking map computation purposes[J]. *Bull Seismol Soc Am*, 102(2): 661—679.
- Frepoli A, Amato A. 1997. Contemporaneous extension and compression in the Northern Apennines from earthquake fault-plane solutions[J]. *Geophys J Int*, 129(2): 368—388.
- Ghisetti F, Vezzani L. 1981. Contribution of structural analysis to understanding the geodynamic evolution of the Calabrian arc (Southern Italy)[J]. *J Struct Geol*, 3(4): 371—381.
- Ghisetti F, Vezzani L. 2002. Normal faulting, transcrustal permeability and seismogenesis in the Apennines (Italy)[J]. *Tectonophysics*, 348(1/2/3): 155—168.
- INGV. 2016. Modello preliminare di distribuzione dello spostamento sulla faglia dai dati ALOS2, Sentinel 1 e GPS in continuo[EB/OL]. [2016-08-30]. <https://ingvterremoti.wordpress.com/2016/08/30/>.

- Orfeus. 2016. ESM: Engineering strong-motion database[EB/OL]. [2016-08-30]. http://esm.mi.ingv.it/DYNA-stage/CadmoDriver?_action_do=1&_page=ACC_redirect_home_page&_rock=INVALID&_state=initial&_taber=0&_token=NULLNULLNULLNULL.
- Savelli C. 1988. Late Oligocene to Recent episodes of magmatism in and around the Tyrrhenian Sea: Implications for the processes of opening in a young inter-arc basin of intra-orogenic (Mediterranean) type[J]. *Tectonophysics*, **146**(1/2/3/4): 163–181.
- Seekins L C, Boatwright J. 2010. Rupture directivity of moderate earthquakes in northern California[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **100**(3): 1107–1119.
- Somerville P G, Smith N F, Graves R W, Abrahamson N A. 1997. Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity[J]. *Seismol Res Lett*, **68**(1): 199–222.
- Trifunac M D, Brady A G. 1975. A study on the duration of strong earthquake ground motion[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **65**(3): 581–626.
- USGS. 2016. Moment tensor[EB/OL]. [2016-08-30]. <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us10006g7d#moment-tensor>.
- Wen R Z, Wang H W, Ren Y F. 2015. Rupture directivity from strong-motion recordings of the 2013 Lushan aftershocks [J]. *Bull Seismol Soc Am*, **105**(6): 3068–3082.

作者简介



臧 阳 中国地震台网中
心研究实习员. 2014 年云
南大学固体地球物理学专
业毕业, 获理学硕士学位.
曾从事第四纪活动构造方
面的研究, 现主要从事地
震活动性和强地面运动方
面的研究. 中国地球物理
学会和中国地震学会会员.



丁风和 内蒙古自治区地
震局高级工程师. 2005 年
中国地震局兰州地震研究
所固体地球物理学毕业,
获理学硕士学位. 主要从
事地震地下流体方面的研
究. 中国地震学会会员, 中
国地震学会地震流体专业
委员会委员.



刘特培 广东省地震局高
级工程师. 1985 年云南大
学地球物理学专业毕业,
获理学学士学位. 曾从事
地震台网建设、地震监测
工作. 现主要从事数字地
震学及地震预测研究工作.
中国地震学会和中国地球
物理学会会员.



王喜龙 辽宁省地震局工
程师. 2011 年中国地质大
学(北京)资源勘查工程专
业毕业, 获工学学士学位;
2014 年中国地质大学(北
京)岩石学、矿物学、矿床
学专业毕业, 获理学硕士
学位. 曾从事矿床地球化
学方面的研究, 现主要从
事流体地球化学方面的
研究.



孙 楠 云南省地震局研
究实习员, 中国科学技术
大学地球物理学专业在职
博士研究生. 2013 年云南
大学固体地球物理学专业
毕业, 获理学硕士学位. 从
事地震预报和相关数字地
震学方面的研究.



刘中宪 天津城建大学土
木工程学院教授. 2009 年
天津大学土木系土木工程
专业毕业, 获工学博士学位.
长期从事地震波动及
动力边界元方法研究, 现
主要从事快速多极子动力
边界元法及三维复杂场地
地震动模拟研究. 国际岩石力学与工程学会会员.



王立凤 中国地震局地质
研究所助理研究员. 1995
年长春地质学院勘探地球
物理专业毕业, 获理学学
士学位; 2001 年中国地震
局地质研究所固体地球物
理学专业毕业, 获理学硕
士学位. 曾从事可控源电
磁法活断层探测方面的研
究, 现主要从事地震电
磁方面的研究.



姜永正 中国地震局工程
力学研究所防灾减灾与防
护工程专业硕士研究生.
2013 年中国地质大学(武
汉)工程地质专业毕业, 获
工学学士学位. 现主要从
事强震动记录数据处理、
地震动衰减关系、方向性
效应等方面的研究.

注: 曾宪伟、龚绍京、张红才、朱永莉的简介分别见本刊 Vol. 30, No. 1; Vol. 23, No. 3; Vol. 36, No. 4; Vol. 37, No. 2.