

2021 年云南漾濞地震序列中强($M_s \geq 5.0$) 地震强震动特征

强生银^{1,2}, 王宏伟^{1,2}, 温瑞智^{1,2}, 任叶飞^{1,2}, 崔建文³

(1. 中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;
2. 地震灾害防治应急管理部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 3. 云南省地震局, 云南 昆明 650224)

摘要: 2021 年云南漾濞地震序列包括 4 次 $M_s \geq 5.0$ 中强地震($M_s 5.6$ 前震、 $M_s 6.4$ 主震、 $M_s 5.0$ 和 $M_s 5.2$ 余震), 这四次中强地震中强震动台站和地震烈度速报台共获得强震动记录近千组, 尤其近场记录, 这些记录为分析强震动特征提供了良好契机. 本文选取 550 组高质量的强震动记录, 经过严格的记录数据处理后, 采用插值方法给出了 $M_s 6.4$ 主震峰值地面加速度(PGA)和峰值地面速度(PGV)的空间分布, 空间分布受震源破裂方向性和局部场地效应的影响, 利用破裂方向性系数 C_d 表示震源破裂方向性相关的强震动峰值参数的方位角相关性, 反演给出了四次地震的震源破裂方向性特征, 其中 $M_s 6.4$ 主震为沿 NNW-SSE 走向的双向非对称破裂事件, 优势破裂方向为 SSE, 在优势破裂方向上的破裂约占整个破裂长度的 85%. 将四次地震 PGA、5% 阻尼比拟加速度反应谱(PSA)与 ASK14 预测模型的预测中位值进行对比, 事件间残差均为负值, 表明四次漾濞中强地震中地震动的震源效应相对较弱, 短周期地震动的震源效应可能与地震类型相关, 震源效应 $M_s 5.6$ 前震 $> M_s 6.4$ 主震 $> M_s 5.2$ 余震, 事件间残差随距离增大呈上升趋势, 表明漾濞地震发震区及附近区域的非弹性衰减相对较弱.

关键词: 漾濞地震序列, 强震动特征, 破裂方向性, 震源效应、非弹性衰减

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)02-0242-07

Strong-motion characteristics in moderate-to-strong ($M_s \geq 5.0$) earthquakes of the 2021 Yangbi Yunnan earthquake sequence

QIANG Shengyin^{1,2}, WANG Hongwei^{1,2}, WEN Ruizhi^{1,2}, REN Yefei^{1,2}, CUI Jianwen³

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, China; 3. Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, China)

Abstract: The 2021 Ynagbi, Yunnan earthquake sequence consists of four moderate-to-large earthquakes with $M_s \geq 5.0$, i. e., the $M_s 5.6$ foreshock, $M_s 6.4$ mainshock, $M_s 5.0$ and $M_s 5.2$ aftershock. In the four events, the strong-motion and seismic intensity stations totally obtained about 1000 free-field three-component strong-motion recordings, which provided excellent chance for investigating strong-motion characteristics. In this paper, 550 sets of high quality strong motion records are selected. After rigorous processing of the recorded data, the spatial distribution of peak ground acceleration (PGA) and peak ground velocity (PGV) of $M_s 6.4$ main shock are given by interpolation method. The spatial distribution is affected by the rupture directivity and local site effect. The source rupture directivity coefficient C_d is utilized to represent the dependency of strong-motion peak parameters on the azimuth, and the parameters of source rupture directivity are estimated for the four Yangbi events. The $M_s 6.4$ mainshock is a bidirectional asymmetric rupture event along the NNW-SSE direction. The dominant rupture direction is SSE, and the rupture in the dominant rupture direction accounts for about 85% of the total rupture length. Comparing the predicted median values of the four earthquakes PGA, 5% damping psedu-acceleration response spectrum (PSA) and the ASK14 prediction model, the residuals between events are negative, indicating that the source effect of ground motion in the four Yangbi moderate-strong earthquakes is relatively weak. The

收稿日期: 2022-07-11

修改稿日期: 2023-02-21

基金项目: 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(2020C05)

第一作者: 强生银(1995—), 男, 博士生, 主要从事工程地震研究. E-mail: qiangsy_96@outlook.com

通信作者: 王宏伟(1990—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事地震动特征及预测研究. E-mail: whw1990413@163.com

source effects on short-period ground motions approximately show the dependence on earthquake type, i. e., $M_s 5.6$ foreshock $> M_s 6.4$ mainshock $> M_s 5.2$ aftershock. The increasing trend of inter-event residuals with the increasing distance indicates the weaker anelastic attenuations in the study region than those described by the ASK14 model.

Key words: Yangbi earthquake sequence; strong-motion characteristic; source rupture directivity; source effects; anelastic attenuation

据中国地震台网测定,2021年5月18日以来,云南省大理州漾濞彝族自治县发生一系列3.0~5.0级中小地震.5月21日21时左右连续密集发生了多次地震(包括 $M_s 5.6$ 前震),并在21:48:34发生 $M_s 6.4$ 地震,此次地震是漾濞地震序列的主震,震中位于北纬25.67°、东经99.87°,震源深度8 km,主震后陆续发生大量中小余震(包括 $M_s 5.0$ 和 $M_s 5.2$ 两次最大的余震).截至2021年5月28日累计发生 $M_s \geq 3.0$ 地震45次,震源深度主要集中在8~12 km, $M_s 6.4$ 主震震中接近整个地震序列最西北端,此次地震序列是一次典型的前震-主震-余震型地震序列.漾濞地震发震区位于川滇菱形块体的西南边界,该块体是受印度板块和欧亚板块的碰撞挤压导致青藏高原隆起过程中物质向东涌出的重要通道^[1],大型右旋走滑剪切断裂红河断裂带贯穿整个块体^[2].地震精确定位和震源机制解的研究结果表明:此次地震发震断层可能是维西-乔后断裂西侧的北西-南东走向的右旋走滑次生断裂,余震区长轴呈NW-SE向展布,破裂长度约为20 km^{[3][4]}.根据Global CMT提供的震源机制解, $M_s 6.4$ 主震为典型走滑地震,矩震级 $M_w 6.1$.据震后现场调查,震中区域地震烈度达Ⅷ度.

据中国地震局工程力学研究所强震动观测组提供的数据,数字强震动台网共收集到强震动记

录148组.此外,得益于国家地震烈度速报与预警工程的建设,云南省地震预警台网在漾濞序列 $M_s \geq 3.0$ 事件中共获得强震动记录2300余组.丰富的强震动记录,尤其是大量的近场强震动记录,为地震动特征分析提供了良好契机,对揭示地震的震源效应、地震动衰减等至关重要,对工程结构抗震设防具有重要意义.

1 强震动观测数据

漾濞地震序列 $M_s \geq 3.0$ 地震中共获得自由场三分量强震动记录2400余组,其中绝大多数记录($>95\%$)获取自地震烈度速报台.本文主要针对四次中强地震的强震动特性, $M_s 6.4$ 主震中获得震中距(R_{epi})小于200 km的记录346组(见图1), $M_s 5.6$ 前震、 $M_s 5.0$ 余震和 $M_s 5.2$ 余震中分别获得 $R_{epi} \leq 130$ km的记录166、122和158组.强震台站53YBX在主震中获得了峰值地面加速度(PGA)最大的记录,其东西(EW)、南北(NS)、垂直(UD)分量的分别为379.9 cm/s²、720.3 cm/s²和448.4 cm/s²(未处理原始记录),该台站距离 $M_s 5.6$ 前震、 $M_s 6.4$ 主震、 $M_s 5.0$ 和 $M_s 5.2$ 余震的震中分别为8.0、4.5、3.5和14.1 km,除了两次余震记录UD分量,四次地震中该台站记录PGA均大于100 cm/s².

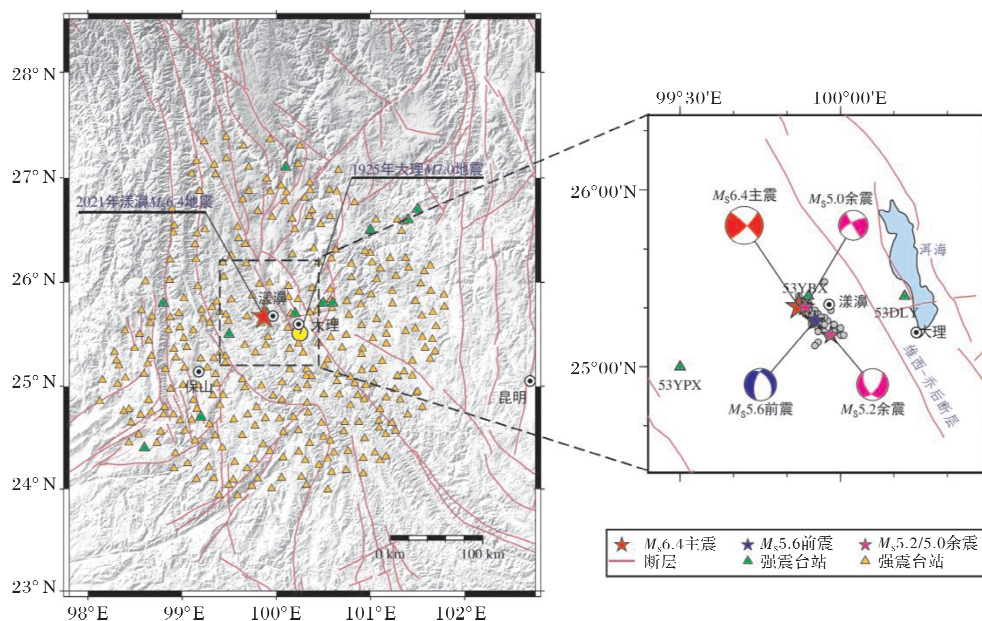


图1 2021年漾濞地震序列 $M_s \geq 3.0$ 地震震中和 $M_s 6.4$ 主震中震中距200 km以内获取记录的强震动台、地震烈度速报台
Fig. 1 Strong motion stations and seismic intensity quick report stations recorded within 200 km from the epicenter of the 2021 Yangbi earthquake sequence $M_s \geq 3.0$ earthquakes and $M_s 6.4$ main shock

为了保证数据质量,通过对加速度记录波形的目视检查并剔除了缺少一个或两个分量、幅值异常、两个事件波形重叠及噪声记录,最终, $M_s 6.4$ 主震、 $M_s 5.6$ 前震、 $M_s 5.0$ 和 $M_s 5.2$ 余震分别保留 325、63、32 和 130 组高质量的记录. 参考 Wang 和 Wen^[5] 的强震动记录处理流程,首先对地震动记录进行基线校正、然后在记录的首尾添加 2.0 s 的余弦窗以避免截断效应,并在记录首尾补零以消除低频噪声干扰,最后应用四阶巴特沃斯非因果带通滤波处理观测记录,根据记录信噪比和低频傅里叶幅值谱形状确定高通滤波拐角频率(f_{hp})和低通滤波拐角频率(f_{lp}). 经上述处理后计算了与观测仪器方向无关的 PGA、峰值地面速度(PGV)和 5% 阻尼比的拟加速度反应谱(PSA)的旋转两正交水平向几何平均

RotD50 值, PSA 的最小可用频率和最大可用频率分别定义为 $f_{lp}/1.25$ 和 $1.25f_{lp}$ ^[6].

采用最小张量连续曲率样条插值方法^[7]获得的 $M_s 6.4$ 主震震中附近区域的强震动峰值(PGA 和 PGV)空间分布如图 2 所示. PGA 和 PGV 空间分布近似存在两个长轴方向,即:西北-东南(与断层走向一致)和东北-西南(垂直断层走向),且以西北-东南长轴方向为主. 水平方向峰值空间分布具有比垂直分量更为明显的东北-西南长轴,这可能是由于局部场地放大效应造成了水平向峰值的东北-西南长轴方向(例如洱海周边). 此外,我们还注意到峰值(尤其是 PGV)的不对称衰减,即东南方向的距离衰减比西北方向慢得多,初步推断这可能是由于震源破裂的方向性效应导致的.

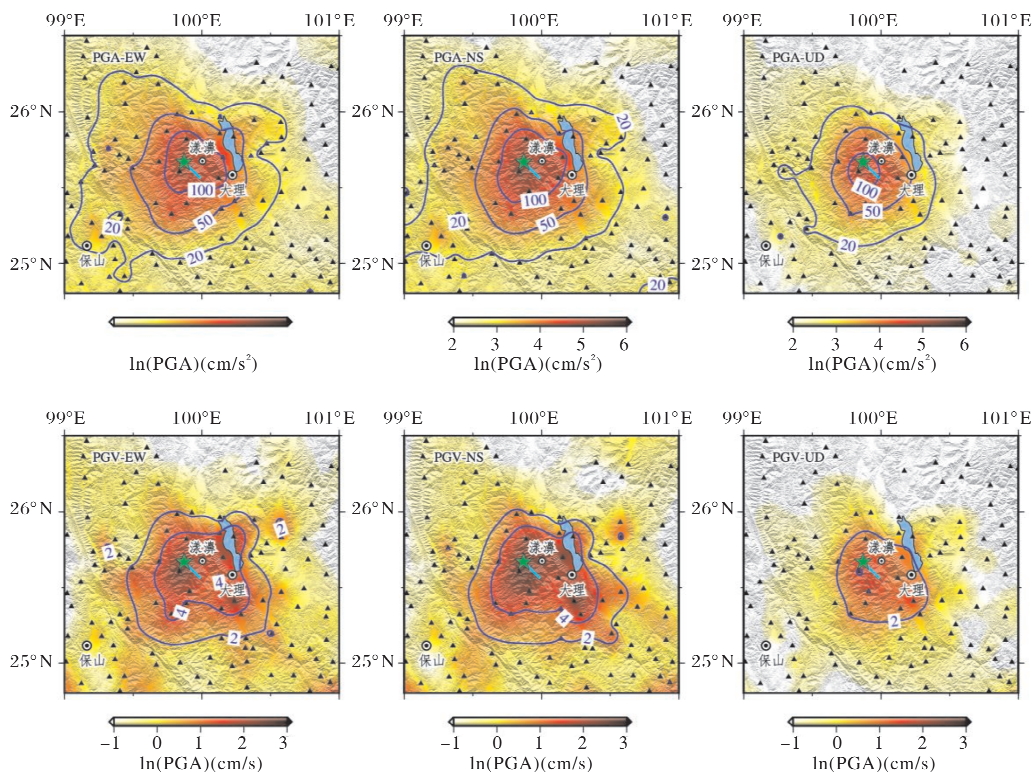


图 2 漾濞 $M_s 6.4$ 主震震中附近区域的 PGA、PGV 空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of the horizontal and vertical peak amplitudes (PGAs and PGVs) in the $M_s 6.4$ mainshock

2 破裂方向性识别

$M_s 6.4$ 主震中 PGA、PGV 不对称的距离衰减可能是破裂方向性导致的,进一步根据强震动峰值估计地震破裂方向性. 采用破裂方向性系数 C_d 表示震源破裂方向性对地震动峰值的影响,将地震震源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, Wen 等^[8] 将 C_d 表示为

$$C_d = \sqrt{\frac{k^2}{[1 - (\frac{v_r}{\beta}) \cos(\varphi - \theta)]^2} + \frac{(1-k)^2}{[1 + (\frac{v_r}{\beta}) \cos(\varphi - \theta)]^2}}$$

(1)

式中: φ 和 θ 分别表示破裂方向和台站方位角; k 表示沿破裂方向 φ 的破裂长度占整个破裂面长度的比例, $k \geq 0.5$ 表示破裂方向 φ 为主破裂方向,否则相反方向为主破裂方向; v_r/β 为马赫数 (Mach number), v_r 和 β 分别表示震源破裂速度和震源区介质剪切波速,一般情况下 $v_r < \beta$; 指数 γ 表示震源相关的参数,本文中取 $\gamma = 1.0$ ^[8]. 目前,采用大量强震动记录回归分析建立了描述地震动强度指标(如 PGA、PGV 和 PSA)随震级、距离、场地条

件以及其他因素的变化规律的地震动预测方程, 预测方程通常不考虑震源破裂方向性的影响. 理论上, C_d 修正的地震动峰值观测值与预测值之间的残差达到最小, 即

$$\sum_{i=0}^N [\log_{10}(Y_i^O/C_d^i) - \log_{10}(Y_i^P)]^2 = \min \quad (2)$$

式中: Y_i^O 和 Y_i^P 分别表示第 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. 根据式(2), 可以确定最佳的 C_d 及其对应的破裂方向性参数(φ 、 k 、 v_r).

本文采用俞言祥等^[9](以下简称为 Yu13)为我国第五代区划图编制建立的青藏地震区基岩场地水平向地震动峰值预测方程. Y13 模型是根据地震烈度衰减关系通过中线映射得到的地震动参数衰减关系, 其地震烈度衰减关系模型采用椭圆模型(椭圆模型一定程度上反映了破裂面走向), 因此, 为了消除长短轴的影响, 设置长轴方向从 0° 到 180° 、等间隔为 0.1° 计算 PGA 预测值, 然后使用其平均值作为预测值. 为考虑场地效应对地震动参数的影响, 进一步使用李小军^[10]给出的基于 I_1 类场地的场地影响系数对 PGA 预测值进行调整. 根据 V_{S30} (即场地地表以下 30 m 土层的等效剪切波速)值与场地分类之间的经验关系^[11], 将场地等级分为不同的类别, 即 $V_{S30} > 510$ m/s 为 I 类场地, 260~510 m/s 为 II 类场地, 150~260 m/s 为 III 类场地, <150 m/s 为 IV 类场地, 台站场地 V_{S30} 根据基于地形数据的全球 V_{S30} 估计值确定^[12]. 取两个水平分量的几何平均值观测值作为观测值.

根据式(2), 通过网格搜索确定四次漾濞地震的破裂方向性系数 C_d 及相应的破裂参数. 四次地震 PGA 观测值与预测值的路径项修正的残差和最佳拟合的 C_d 曲线如图 3 所示, 反演结果表明: $M_s 6.4$ 主震为沿 NNW-SSE 走向的非对称双向破裂事件, 优势破裂方向为 SSE($\varphi=165.9^\circ$), 在优势破裂方向上的破裂约占整个破裂长度的 85%, 地震序列精确定位也表明发震断层沿 NNW-SSE 走向^[3-4], $v_r/\beta=0.63$, 根据 Crust1.0 速度结构模型($\beta=3.55$ km/s), v_r 约为 2.24 km/s. $M_s 5.6$ 前震震源破裂方向有较大可能近似 NW-SE 走向, 主要的破裂传播方向近似 NW 向($\varphi=311.6^\circ$), 可能是沿主破裂方向的非对称双向破裂事件, 相对破裂速度 $v_r/\beta=0.70$. 对于两次余震事件, 残差随方位角没有明显变化趋势, 表明两次余震可能是均匀对称破裂. 随着我国地震预警与地震烈度速报台

网的大规模建设和运行, 实时传输的地震动数据可应用于震源破裂参数的快速估计, 能够服务于地震烈度速报、地震应急等工作.

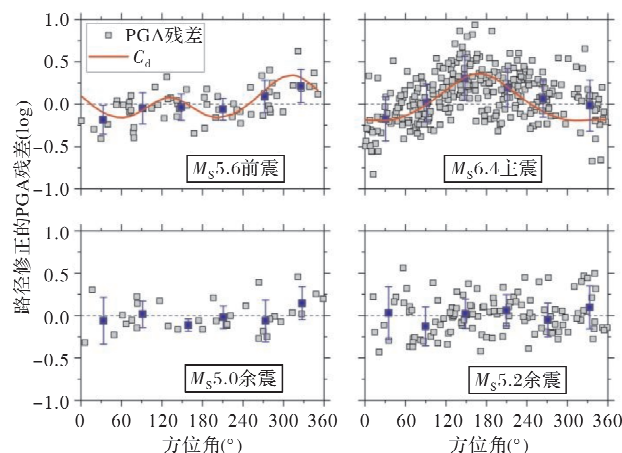


图3 四次漾濞地震的 PGA 残差随方位角变化及最佳拟合的破裂方向性系数

Fig. 3 Path-corrected residuals for PGAs against azimuths for the four Yangbi earthquakes and the best-fitted rupture directivity coefficient

3 与 NGA 衰减模型对比

为研究漾濞地震的震源效应和路径衰减, 本文将水平向 PGA、PSA(0.2 s 和 2.0 s)观测值与 Abrahamson 等^[13](以下简称 ASK14)建立的全球地壳内浅源地震的地震动预测方程的预测中位值进行比较. $M_s 6.4$ 主震记录的 Joyner-Boore 距离(R_{JB})和断层距(R_{rup})根据杨九元等^[14]反演的断层破裂面计算, 而前震和余震记录的 R_{JB} 和 R_{rup} 分别近似为 R_{epi} 和震源距. $M_s 6.4$ 主震断层破裂面上界面埋深 Z_{TOR} 可根据反演获得的断层破裂面确定, 主震 $Z_{TOR}=1.753$ km, 前震及余震的 Z_{TOR} 近似为地震矩心深度表示, 根据段梦乔等^[4]提供的震源机制解, $M_s 5.6$ 前震、 $M_s 5.0$ 余震和 $M_s 5.2$ 余震 Z_{TOR} 分别取 6.8 km、5.0 km 和 9.2 km. 图 4 给出了观测值与预测中位值的总残差, 多数记录的 PGA 和不同周期的 PSA 总残差在 ± 2.0 以内, 总残差普遍为负值, 表明 ASK14 模型显著高估了漾濞中强地震的地震动.

将总残差分解为事件间残差(δB_e)与事件内残差(δW_{es})^[15]. 事件间残差如图 5(a)所示, δB_e 值均为负值, 表明与 ASK14 模型代表的全球地壳内浅源地震的平均震源效应相比, 漾濞地震的震源效应较弱. $M_s 5.6$ 前震、 $M_s 6.4$ 主震和 $M_s 5.2$ 余震的 δB_e 值大致处于相近的水平, 没有明显的随周期变化的趋势, 但这三次地震中短周期(<0.3 s)的

δB_e 值 $M_{\text{S}}5.6$ 前震 $> M_{\text{S}}6.4$ 主震 $> M_{\text{S}}5.2$ 余震, 这表明短周期地震动的震源效应与地震类型相关, 这可能与应力降对地震类型的依赖性有关. 已有很多研究普遍发现主震-余震序列中余震的应力降与主震相比要小得多^[16-18]. $M_{\text{S}}5.0$ 余震 δB_e 值最小, 远低于 $M_{\text{S}}5.2$ 余震, $M_{\text{S}}5.0$ 余震紧随 $M_{\text{S}}6.4$ 主震之后, 且与主震震中非常接近(见图 1), 而 $M_{\text{S}}5.2$ 余震远离主震震中且在主震一定时间后发生, 两次余震中地震动的震源效应的显著差异可能与主震的时空距离有关, 主震后余震应力降随时间增

加呈现逐渐增大并恢复至前震(主震)应力降水平的趋势^[18], 并且越靠近主震断层的余震的应力降越小^[16], 因此推断 $M_{\text{S}}5.0$ 余震可能发生于主震高强度破坏或断裂区域, 地震应力降更小, 地震动的震源效应很弱. PGA 和部分周期 PSA 的事件内残差随距离变化如图 5(b)所示, 远场(>100 km) PGA 和 PSA 事件内残差随距离增加呈上升趋势, 说明与 ASK14 模型所表示的全球地壳内浅源地震的平均非弹性衰减相比, 本文研究区域的非弹性衰减更弱.

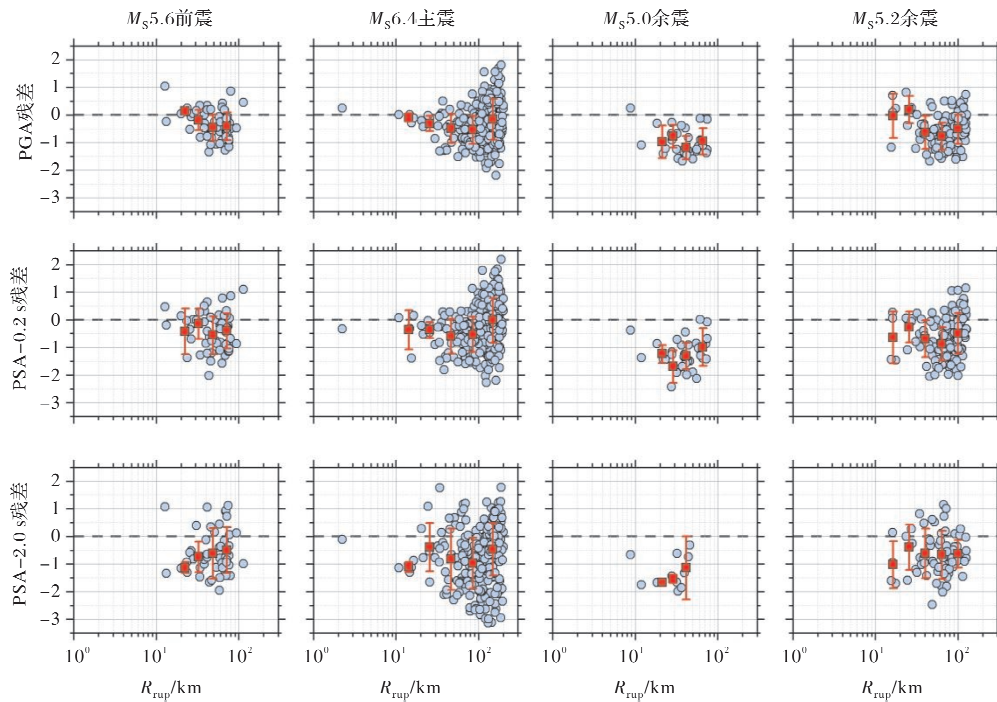


图 4 PGA 和部分周期 PSA 观测值与 ASK14 模型预测中位值的残差

Fig. 4 Residuals between the observed values and the predicted medians by the ASK14 model for the four Yangbi earthquakes

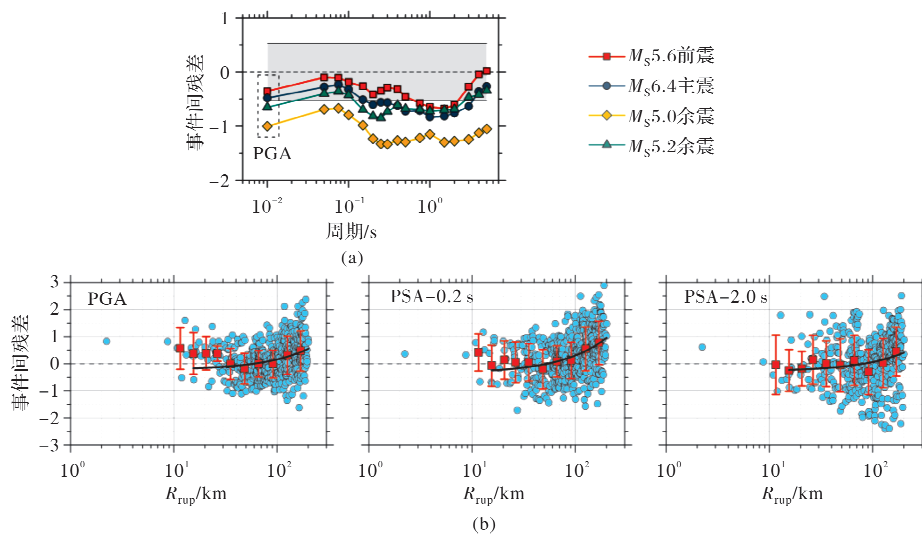


图 5 基于 ASK14 模型的四次漾濞中强地震事件间残差和事件内残差

Fig. 5 Inter-events and intra-event residuals for the four Yangbi earthquakes according to the ASK14 model

4 结论

本文分析了2021年四次漾濞中强地震($M_s 5.6$ 前震、 $M_s 6.4$ 主震、 $M_s 5.0$ 和 $M_s 5.2$ 余震)的强震动特征,揭示了震源破裂方向性对地震动空间分布的影响、地震动的震源效应与地震类型的相关性及地震动区域非弹性衰减,主要结论如下:

(1) $M_s 6.4$ 主震中PGA和PGV的空间分布受震源破裂方向性和局部场地效应的影响;

(2) $M_s 6.4$ 主震为沿NNW-SSE走向的双向非对称破裂事件,优势破裂方向为SSE($\varphi = 165.9^\circ$),在优势破裂方向上的破裂约占整个破裂长度的85%,破裂速度约为2.24 km/s。 $M_s 5.6$ 前震可能是沿NW-SE方向的非对称双向破裂事件,另外两次余震可能近似为均匀破裂事件;

(3)与ASK14预测模型所代表的全球地壳内浅源地震的平均震源效应相比,四次漾濞中强地震中地震动的震源效应相对较弱,短周期地震动的震源效应可能与地震类型相关,震源效应 $M_s 5.6$ 前震 $> M_s 6.4$ 主震 $> M_s 5.2$ 余震;与ASK14预测模型所代表的全球地壳内浅源地震的平均非弹性衰减相比,漾濞地震发震区及附近区域的非弹性衰减相对较弱。

致谢:中国地震局工程力学研究所“国家强震动台网中心”为本研究提供数据支持,云南省地震局为本文研究提供了地震烈度速报台的观测数据。

参考文献 References

[1] 徐锡伟,闻学泽,郑荣章,等.川滇地区活动块体最新构造变动样式及其动力来源[J].中国科学(D辑),2003,33(S1):151-162.
XU Xiwei, WEN Xueze, ZHENG Rongzhang, et al. Pattern of latest tectonic motion and its dynamics for active blocks in Sichuan-Yunnan region, China[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2003, 33 (S1): 151-162.

[2] 常祖峰,常昊,臧阳,等.维西—乔后断裂新活动特征及其与红河断裂的关系[J].地质力学学报,2016,22(3):517-530.
CHANG Zufeng, CHANG Hao, ZANG Yang, et al.

Recent active features of weixi-qiaohou fault and its relationship with the honghe fault[J]. Journal of Geomechanics, 2016, 22(3): 517-530.

[3] 龙锋,祁玉萍,易桂喜,等.2021年5月21日云南漾濞 $M_s 6.4$ 地震序列重新定位与发震构造分析[J].地球物理学报,2021,64(8):2631-2646.
LONG Feng, QI Yuping, YI Guixi, et al. 2021. Relocation of the $M_s 6.4$ Yangbi earthquake sequence on May 21, 2021 in Yunnan Province and its seismogenic structure analysis[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64 (8): 2631-2646.

[4] 段梦乔,赵翠萍,周连庆,等.2021年5月21日云南漾濞 $M_s 6.4$ 地震序列发震构造[J].地球物理学报,2021,64(9):3111-3125.
DUAN Mengqiao, ZHAO Cuiping, ZHOU Lianqing, et al. 2021. Seismogenic structure of the 21 May 2021 $M_s 6.4$ Yunnan Yangbi earthquake sequence[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(9): 3111-3125.

[5] WANG Hongwei, WEN Ruizhi. Attenuation and basin amplification revealed by the dense ground motions of the 12 July 2020 $M_s 5.1$ Tangshan, China, Earthquake [J]. Seismological Research Letters, 2021, 92 (4), 2109-2121.

[6] ABRAHAMSON N A, SILVA W J. Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes[J]. Seismological Research Letters, 1997, 68(1):94-127.

[7] SMITH WH F, WESSEL P. Gridding with continuous curvature splines in tension [J]. Geophysics, 1990, 55 (3): 293-305.

[8] WEN Ruizhi, WANG Hongwei, REN Yefei. Rupture directivity from strong-motion recordings of the 2013 Lushan aftershocks [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2015, 105(6): 3068-3082.

[9] 俞言祥,李山有,肖亮.为新区划图编制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.

[10] 李小军.地震动参数区划图场地条件影响调整[J].岩

- 土工程学报, 2013, 35(S2): 21-29.
- LI Xiaojun. Adjustment of seismic ground motion parameters considering site effects in seismic zonation map[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 21-29.
- [11] 吕红山, 赵凤新. 适用于中国场地分类的地震动反应谱放大系数[J]. 地震学报, 2007, 29(1): 67-76.
- LYU Hongshan, ZHAO Fengxin. Site coefficients suitable to China site category[J]. Acta Seismologica Sinica, 2007, 29(1): 67-76.
- [12] HEATH D, WALD D J, WORDEN C B, et al. A global hybrid V_{S0} map with a topographic slope-based default and regional map insets[J]. Earthquake Spectra, 2020, 36(3): 1570-1584.
- [13] ABRAHAMSON N A, SILVA W J, KAMAI R. Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal region[J]. Earthquake Spectra, 2014, 30(3): 1025-1055.
- [14] 杨九元, 温扬茂, 许才军. 2021年5月21日云南漾濞 $M_s 6.4$ 地震: 一次破裂在隐伏断层上的浅源走滑事件[J]. 地球物理学报, 2021, 64(9): 3101-3110.
- YANG Jiuyuan, WEN Yangmao, XU Caijun. The 21 May 2021 $M_s 6.4$ Yangbi (Yunnan) earthquake: A shallow strike-slip event rupturing in a blind fault[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(9): 3101-3110.
- [15] AL Atik L, ABRAHAMSON N, BOMMER J J, et al. The variability of ground-motion prediction models and its components[J]. Seismological Research Letters, 2010, 81(5): 794-801.
- [16] BALTAY A S, HANKS T C, ABRAHAMSON N A. Earthquake stress drop and Arias intensity[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2019, 124(4): 3838-3852.
- [17] MOYER P A, BOETTCHER M S, MCGUIRE J J, et al. Spatial and temporal variations in earthquake stress drop on gofar transform fault, east pacific rise: implications for fault strength[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2018, 123(9): 7722-7740.
- [18] WANG Hongwei, WEN Ruizhi. Earthquake source characteristics and S-wave propagation attenuation in the junction of the northwest tarim basin and kepingtage fold-and-thrust zone[J]. Frontiers in Earth Science, 2020, 8: 567939.

(编辑 桂智刚)