

强生银, 王宏伟, 温瑞智等. 2021. 2021 年 5 月 21 日云南漾濞 $M_s 6.4$ 地震随机有限断层三维地震动模拟. 地球物理学报, 64(12): 4538-4547, doi:10.6038/cjg2021P0404.

Qiang S Y, Wang H W, Wen R Z, et al. 2021. Three-dimensional ground motion simulations by the stochastic finite-fault method for the Yangbi, Yunnan $M_s 6.4$ earthquake on May 21, 2021. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 64(12): 4538-4547, doi:10.6038/cjg2021P0404.

2021 年 5 月 21 日云南漾濞 $M_s 6.4$ 地震 随机有限断层三维地震动模拟

强生银, 王宏伟*, 温瑞智, 李春果, 任叶飞

中国地震局工程力学研究所, 中国地震局地震工程与工程震动重点实验室, 哈尔滨 150080

摘要 2021 年 5 月 21 日云南省大理州漾濞县发生 $M_s 6.4$ 地震, 震中附近遭受了强烈地震破坏。为预测此次地震的地震动影响场, 利用震源运动学破裂随机模型, 基于随机有限断层三维地震动模拟方法, 给出了此次地震中 28 个触发强震动台站的三分量加速度时程模拟记录, 并结合强震动观测记录, 估计了此次地震的地震应力降及震源破裂过程, 进一步模拟给出了此次地震中 2823 个虚拟观测点的三分量加速度时程。结果表明, 模拟记录的峰值地面加速度(PGA)、峰值地面速度(PGV)与观测值接近, 并体现了地震动峰值的衰减规律、近场饱和效应和破裂方向性效应; 模拟与观测记录的 5% 阻尼比拟加速度反应谱(PSA)的幅值接近、谱形相似, 在 0.05~10 s 周期段, 模拟记录可以很好地预测地震动。基于三分量模拟记录给出了漾濞 $M_s 6.4$ 地震的仪器测定地震烈度图, 与云南省地震局发布的烈度图接近, 极震区烈度最高可达Ⅷ度, 震源破裂方向性导致震中 SE 方向的烈度普遍高于 NW 方向, 受局部场地条件影响沿洱海西侧出现高烈度异常区。

关键词 漾濞 $M_s 6.4$ 地震; 随机有限断层法; 地震动模拟; 地震烈度

doi:10.6038/cjg2021P0404

中图分类号 P315

收稿日期 2021-06-11, 2021-08-02 收修定稿

Three-dimensional ground motion simulations by the stochastic finite-fault method for the Yangbi, Yunnan $M_s 6.4$ earthquake on May 21, 2021

QIANG ShengYin, WANG HongWei*, WEN RuiZhi, LI ChunGuo, REN YeFei

Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration; Key Laboratory of Earthquake Engineering and
Engineering Vibration of China Earthquake Administration, Harbin 150080, China

Abstract An $M_s 6.4$ earthquake occurred in Yangbi county, Yunnan Province on May 21, 2021, and the epicentral area suffered from strong earthquake damage. The modified stochastic finite-fault method was used to reproduce the three-component ground motions at 28 strong-motion stations triggered in the Yangbi $M_s 6.4$ earthquake using a series of source kinematic rupture models stochastically generated. Compared with the observed ground motions, the earthquake stress drop and the potential source rupture model were firstly estimated. Moreover, ground-motion acceleration time histories at 2823 virtual observation points produced by the Yangbi $M_s 6.4$ earthquake were provided by the stochastic finite-fault simulation. The peak ground accelerations

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(2020C05), 黑龙江省科学基金项目(LH2020E021), 国家自然科学基金项目(51878632, 51808514)资助。

第一作者简介 强生银, 男, 1996 年生, 博士研究生, 主要从事地震动数值模拟等相关研究。E-mail: qiangsy_96@outlook.com

*** 通讯作者** 王宏伟, 男, 1990 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事地震动模型及模拟等相关研究。E-mail: whw1990413@163.com

(PGAs) and peak ground velocities (PGVs) of the simulated ground motions, in good agreement with the observed values, well describe the distance attenuation, the near-field saturation effects and the rupture directivity effects. Meanwhile, amplitude and shape of 5%-damped pseudo spectral accelerations (PSAs) also show good agreement between the simulated and observed ground motions. The simulations well represent the observations at a wide period range from 0.05 to 10 s. The seismic intensity map was plotted based on the simulated three-component recordings, approximately consistent to that officially released by the Earthquake Administration of Yunnan Province. The epicentral meizoseismal area reached a highest intensity VIII. Intensity to the SE of epicenter is generally higher than that to the NW due to the source rupture directivity. High intensity anomalous areas occur along the west bank of Erhai Lake due to the local site condition.

Keywords Yangbi M_s6.4 earthquake; Stochastic finite-fault method; Ground motion simulation; Seismic intensity

0 引言

据中国地震台网测定,自2021年5月18日以来云南省大理白族自治州漾濞彝族自治县连续发生多次M_s3.0~4.9地震,并在5月21日21:21:25发生M_s5.6地震后,紧接着于21:48:34在其西北约6.7 km处发生M_s6.4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°,距离漾濞县城约9.0 km,震源深度8 km,主震震中处于此次地震序列的最西北端。据Global CMT震源机制解可知(<https://www.globalcmt.org/>),漾濞M_s6.4地震为走滑型地震,矩震级M_w=6.1。截至6月1日已发生M_s≥3.0前震和余震共46次,其中M_s5.0~5.9地震3次、M_s4.0~4.9地震13次,最大震级余震为5月21日22:31:10发生的M_s5.2地震,大约位于此次地震序列最东南端,距离主震震中约13.5 km。此次地震序列的震中呈北西-南东向分布(见图1b),倾向南西,破裂尺度约为20 km,集中分布在6~15 km深度内。漾濞地震序列是典型的前震-主震-余震型地震序列。

通过震后现场震害调查,参照地震构造背景、余震分布、震源机制解、仪器烈度,并结合强震动观测数据,云南省地震局发布了云南漾濞M_s6.4地震宏观烈度图(http://www.yndzj.gov.cn/yndzj/_300559/_300651/629959/index.html),此次地震最高烈度为VIII度,等震线长轴呈北西-南东走向。截至5月22日,地震共造成3人死亡,28人受伤,192间房屋倒塌,13090间房屋一般损坏(<http://www.dali.gov.cn/dlrmzf/c105806/202105/8d6fcefc214dd6b3933a49ef0eb9f0.shtml>)。

初步研究表明漾濞M_s6.4地震发生于红河断裂北段的维西—乔后断裂西侧的一条北西-南东向右旋走滑次生断裂(<https://www.eq-igl.ac.cn/zhxw/info/2021/33882.html>,见图1a),红河断裂是青藏高原东南部的川滇菱形块体的西南侧边界。该区域是印度板块与欧亚板块碰撞挤压的边界地带,川滇菱形块体是青藏高原东南缘挤出最强烈的活动块体,错综复杂的地质构造和强烈的断裂带活动使之成为我国地震活动最频繁的地区之一(阚荣举等,1977;汪一鹏等,2003;皇甫岗等,2007)。1925年大理7.0级地震和1996年丽江7.0级地震是漾濞M_s6.4地震震中附近发生的有记录的最大震级历史地震(见图1a),近年来震中附近中强地震活动十分强烈(例如:2013年洱源M_s5.0地震、2016年云龙M_s5.0地震、2017年漾濞M_s5.1地震)。

根据中国地震局工程力学研究所提供的强震动观测数据,漾濞M_s6.4地震共触发28个自由场强震动观测台站,除053YPX台站只获取了两个水平分量的记录外,其余台站均获得了完整的三分量强震动加速度记录。此次地震触发台站分布如图1a所示,距震中100 km内仅触发了5个台站(053YBX、053DLY、053YPX、053BTH、053BCJ),距离震中最近的053YBX台站(震中距7.9 km)获得了此次地震的最大峰值地面加速度(PGA)记录,其东西(EW)、南北(NS)、竖向(UD)的PGA分别为379.9 cm·s⁻²、720.3 cm·s⁻²和448.4 cm·s⁻²(未处理原始记录)。本文依次采用基线校正、记录波形首尾增加余弦窗并补零、巴特沃斯非因果带通滤波处理强震动记录,滤波带宽为0.08~30 Hz,处理后记录有效频带为0.1~24 Hz。

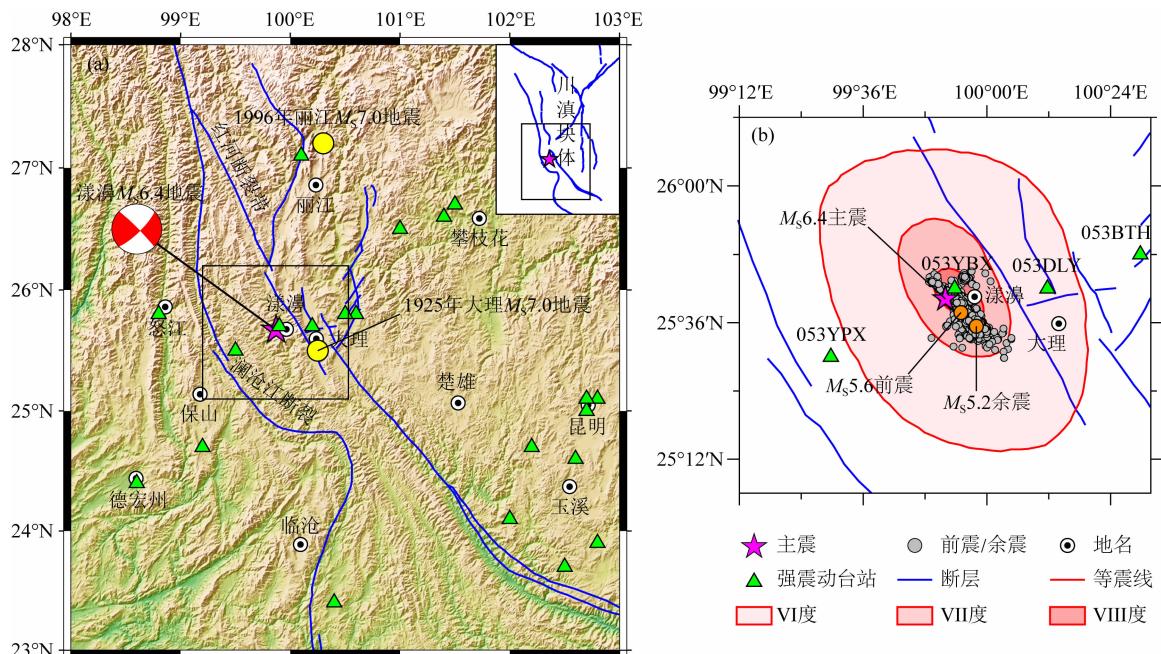


图 1 楊鴻地震序列震中位置、楊鴻 $M_s 6.4$ 主震触发强震动台站分布(a)及其宏观地震烈度(b)

Fig. 1 Epicenters of the Yangbi earthquake sequence, the triggered strong-motion observation stations during the $M_s 6.4$ mainshock (a), and the macroseismic intensity map (b)

楊鴻 $M_s 6.4$ 地震获取了较多的强震动观测记录,但多数为远场记录,为预测此次地震的地震动及其可能破坏情况,本文采用随机有限断层三维模拟方法,并结合强震动观测记录,模拟了震中附近区域 2823 个虚拟观测点的三分量地震动加速度时程,基于模拟记录预测了此次地震的烈度分布。

1 随机有限断层三维地震动模拟方法

随机有限断层模拟方法中,地震震源破裂面可划分为 N 个子断层,各子断层均可看作点源,为模拟三维地震动,同时考虑子断层产生的 P 波径向(Pr)、P 波垂直向(Pz)、SV 波径向(SVr)、SV 波垂直向(SVz)和 SH 波切向(SHt)的地震动,叠加子断层产生的地震动即可得到整个破裂面产生的三维地震动(a_j^{EW} 、 a_j^{NS} 、 a_j^{UD})。

$$a_j^{\text{EW}}(t) = \sum_{i=1}^N \left[a_{ij}^{\text{Pr}} \sin \varphi_{ij} (t + \Delta t_{ij}^{\text{P}}) + a_{ij}^{\text{SVr}} \sin \varphi_{ij} \right. \\ \times (t + \Delta t_{ij}^{\text{SV}}) - a_{ij}^{\text{SHt}} \cos \varphi_{ij} (t + \Delta t_{ij}^{\text{SH}}) \left. \right], \quad (1\text{a})$$

$$a_j^{\text{NS}}(t) = \sum_{i=1}^N \left[a_{ij}^{\text{Pr}} \cos \varphi_{ij} (t + \Delta t_{ij}^{\text{P}}) + a_{ij}^{\text{SVr}} \cos \varphi_{ij} \right. \\ \times (t + \Delta t_{ij}^{\text{SV}}) + a_{ij}^{\text{SHt}} \sin \varphi_{ij} (t + \Delta t_{ij}^{\text{SH}}) \left. \right], \quad (1\text{b})$$

$$a_j^{\text{UD}}(t) = \sum_{i=1}^N \left[a_{ij}^{\text{Pz}} (t + \Delta t_{ij}^{\text{P}}) + a_{ij}^{\text{SVz}} (t + \Delta t_{ij}^{\text{SV}}) \right], \quad (1\text{c})$$

其中, Δt_{ij} 表示第 i 个子断层在第 j 个观测点产生的地震动相对于起始破裂点在该观测点产生地震动的时间延迟, φ_{ij} 表示第 j 个观测点相对第 i 子断层的方位角。 a_{ij}^{Pr} 、 a_{ij}^{Pz} 、 a_{ij}^{SVr} 、 a_{ij}^{SVz} 、 a_{ij}^{SHt} 分别表示第 i 个子断层在第 j 个观测点产生的 Pr、Pz、SVr、SVz、SHt 向的地震动加速度时程, 可分别由相应的地震动傅氏谱转换至时域得到(王宏伟等, 2021a). 本文中, P、S 波波形采用 Saragoni 和 Hart(1973)窗函数包络高斯白噪声表示, 地震动持时由震源持时和路径持时两部分组成, Boore(2009)将震源持时表示为子断层动拐角频率的倒数, 路径持时通常采用距离相关的经验统计模型表示. 已有研究给出了与区域相关的 S 波路径持时经验模型, 但尚未涉及 P 波路径持时的研究, 本文假定 P 波持时为 S 波与 P 波到时差, 基于该假设, P 波与 S 波无重叠, 加速度时程中的 P 波和 S 波部分是分离的, 这一假设可能会导致近场 P 波持时偏小而远场 P 波持时偏大, 相应的可能会高估近场 P 波而低估远场 P 波. 虽然采用 P、S 波到时差表示 P 波持时可能会影响 P 波模拟的可靠性, 但在一定程度上弥补了现有方法未能有效模拟 P 波的不足.

2 楊鴻 $M_s 6.4$ 地震的地震动模拟

2.1 随机有限断层模拟输入参数

根据 Global CMT 提供的震源机制解, 楊鴻

M_s6.4 地震矩震级 $M_w = 6.1$, 走向角、倾角和滑动角分别为 315° 、 86° 和 168° , 根据地震破裂面几何(沿走向的长度 L 和沿倾向的宽度 W)与 M_w 、破裂类型的经验关系(Wells and Coppersmith, 1994)及地壳孕震层对破裂面宽度的限制(Pacheco et al., 1992; Shaw and Wesnousky, 2008), 估计漾濞 M_s6.4 地震震源破裂面的长度 $L = 16.5$ km、宽度 $W = 7.7$ km, 根据 Somerville 等(1999)建立的平均滑动位错(D)与矩震级经验关系, 设定 $D = 38.74$ cm, 将破裂面沿走向和沿倾向划分为 $1.1\text{ km} \times 1.1\text{ km}$ 共 105 个子断层。根据主余震空间分布(见图 1b), 漾濞 M_s6.4 地震近似为自西北向东南方向的单侧破裂事件, 起始破裂点位置沿走向坐标为 $1.0L$, Mai 等(2005)对不同破裂类型地震的起始破裂点位置的统计研究表明, 走滑地震和地壳内倾滑地震的破裂面上起始破裂点沿倾向的位置近似服从 Weibull 分布, 沿倾向为 $0.6W$ 时发生破裂的概率最大, 因此设定漾濞 M_s6.4 地震起始破裂点在破裂面上沿走向和沿倾向的位置分别为 16.5 km 和 4.62 km(见图 3), 破裂速度为 0.8β (β 为震源处介质剪切波速), 破裂面埋深 3.39 km, 地震未破裂至地表面。

破裂面上滑动分布和破裂过程对近断层地震动具有显著影响, 目前尚没有此次地震的震源破裂模型反演结果, 本文采用了滑动位错、滑动速度、破裂速度以及破裂时间函数等在破裂面上随机分布的震源运动学破裂模型(Graves and Pitarka 2010, 2015, 2016). 王宏伟等(2021b)、Wang 和 Wen(2019)已采用该方法建立了 2020 年伽师 M_s6.4 地震和 2014 年鲁甸 M_s6.6 地震的震源运动学破裂随机模型, 并应用于地震动场的随机有限断层模拟。本文生成了 100 个漾濞 M_s6.4 地震的震源破裂随机模型。

根据 Crust1.0 全球地壳模型给出了研究区域地壳介质水平成层模型, 其中震源处介质 P 波和 S 波波速分别为 $6.10\text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $3.55\text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 介质密度 $2.74\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (<https://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust1.html>). 本文采用 Xu 等(2010)基于我国川滇地区中小震强震记录建立的四段线性几何扩散模型(见表 1)及 S 波品质因子($Q_s = 180f^{0.5}$)表示区域地壳介质对地震波的衰减, 其中 P 波品质因子(Q_p)根据王勤彩等(2005)给出的云南地区 $Q_s/Q_p = 1.5$ 确定, 即 $Q_p = 120f^{0.5}$. 采用王宏伟等(2021a)基于四川地区地震动记录建立的地震动路径持时经验模型表示漾濞 M_s6.4 地震的地震动路径持时。

场地放大效应可表示为地壳介质放大和浅层场

地放大两部分。地壳介质放大采用美国国家地震减灾计划(NEHRP)中 B-C 类场地分界对应场地条件的放大效应经验模型(Atkinson and Boore, 2006); 浅层场地放大效应采用 Seyhan 和 Stewart(2014)建立的 V_{S30} (地表以下 30 m 深度范围内土层的等效剪切波速)、 $\text{PGAr}(V_{S30} = 760\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的参考基岩面的水平向峰值加速度中位值)相关的线性和非线性浅层场地效应经验模型表示, 本文中虚拟观测点的 V_{S30} 根据基于地形数据的全球 V_{S30} 估计值确定(Heath et al., 2020, <https://earthquake.usgs.gov/data/vs30/>). 与场地相关的地震动高频衰减参数 $\kappa = 0.025\text{ s}$ (Xu et al., 2010).

地震应力降表示地震前后破裂面上应力变化, 该参数对高频(高于拐角频率)地震动具有控制性影响, 但依靠目前技术条件尚无法直接测量, 因此本文采用 Yenier 和 Atkinson(2015)提出的方法对漾濞 M_s6.4 地震的应力降进行估计。中国大陆地区中小地震的地震应力降主要分布在 $0.1\sim20.0\text{ MPa}$ (赵翠萍等, 2011), 据此我们首先设定地震应力降为 $1\sim20\text{ MPa}$ 范围内固定间隔 1 MPa 的 20 个可能值, 针对每次震源破裂随机过程, 利用随机有限断层方法模拟 28 个触发观测台站的三分量地震动加速度时程, 并计算模拟记录 $0.05\sim10\text{ s}$ 的 5% 阻尼比的拟加速度反应谱(PSA), 以 100 次随机破裂过程的模拟记录 PSA 的对数平均值表示模拟记录的 PSA, 计算各台站模拟记录 PSA 残差, 即 $\log_{10}(\text{PSA}_{\text{obs}}) - \log_{10}(\text{PSA}_{\text{sim}})$, 其中 PSA_{obs} 和 PSA_{sim} 分别表示观测与模拟记录的 PSA, 最后给出 28 个触发台站在 $0.05\sim10.0\text{ s}$ 周期段模拟记录 PSA 残差均值及标准差。根据所有台站模拟记录 PSA 残差的均值在 $0.05\sim10\text{ s}$ 周期段的均值及标准差随应力降的变化(见图 2a,b,c)估计地震应力降($\Delta\sigma$), 本文以 NS 和 UD 分量模拟记录 PSA 残差标准差达到最小值时所对应的应力降和残差均值分别作为地震应力降和谱形一致调整系数, 即 $\Delta\sigma = 16\text{ MPa}$, EW、NS、UD 分量的谱形一致调整系数分别为 $10^{0.00003}$ 、 $10^{0.0075}$ 、 $10^{0.27277}$.

采用估计的地震应力降和谱形一致调整系数, 针对每次震源破裂随机过程, 采用随机有限断层方法给出了近断层 053YBX 台站的三分量地震动加速度时程模拟结果, 并给出模拟记录 PSA 的残差绝对值及其在 $0.05\sim10\text{ s}$ 周期段的平均值(见图 2d), 其中第 34 次震源破裂随机过程的残差绝对值均值最小, 因此近似以此震源破裂随机过程作为漾濞 M_s6.4 地震震源破裂过程(见图 3).

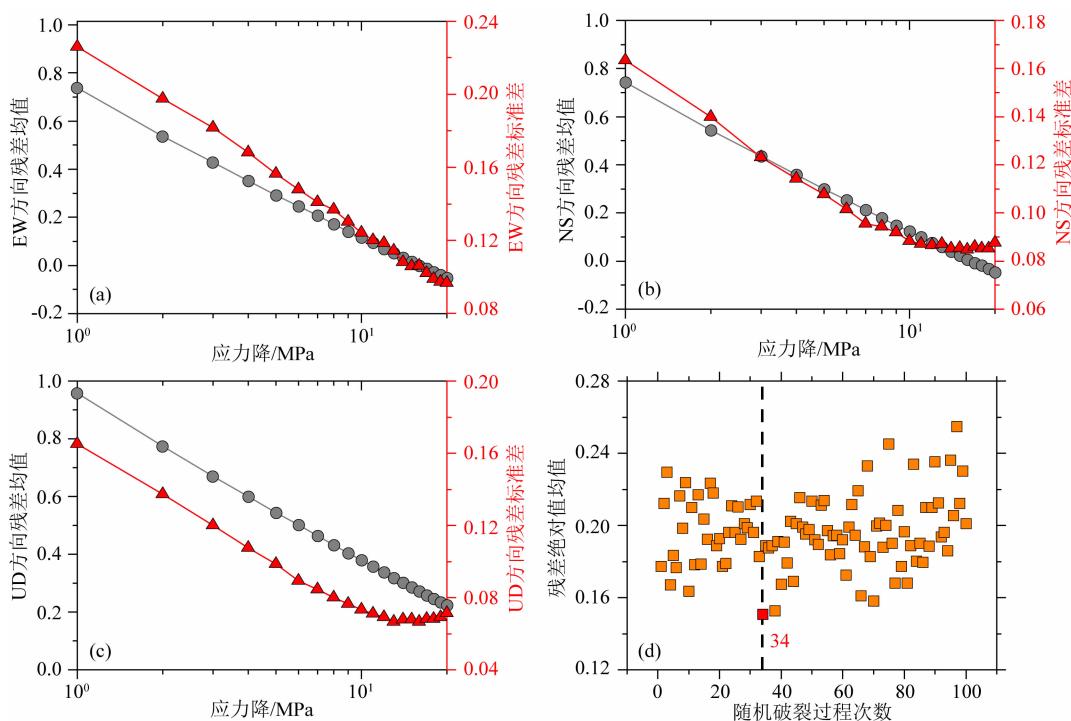


图 2 所有台站模拟记录 PSA 残差的均值在 0.05~10 s 周期段的均值及标准差随应力降的变化

(a)、(b)、(c) 分别为 EW、NS 和 UD 分量; (d) 模拟记录 PSA 的残差绝对值在 0.05~10 s 周期段的均值随随机破裂过程数的变化.

Fig. 2 Effect of stress drop on average and standard deviation over a period range from 0.05 to 10 s for PSA residual means for the simulated recordings at all stations (a), (b), and (c) for EW, NS, and UD components respectively. (d) Effect of stochastic rupture model on the mean of absolute residuals of PSAs of simulated recordings over a period range from 0.05 to 10 s.

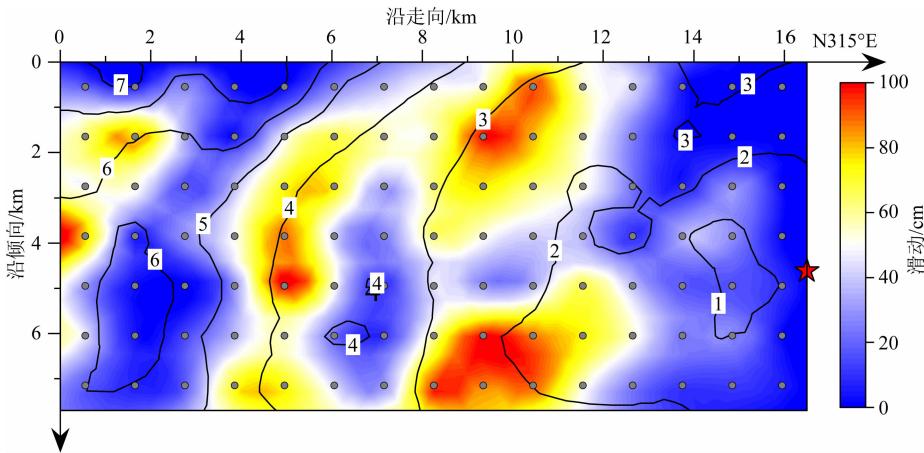


图 3 漾濞 $M_s 6.4$ 地震的震源破裂过程

其中红色五角星表示破裂起始点位置, 黑色实线表示破裂传播时间.

Fig. 3 Source rupture model of the Yangbi $M_s 6.4$ earthquake

Black solid lines represent the rupture propagation time from the initial rupture point (highlighted by red star).

2.2 模拟结果

本文利用随机有限断层方法模拟了漾濞 $M_s 6.4$ 地震中 28 个触发强震动台站及震中附近区域内(北纬 23.67° — 27.67° 、东经 97.87° — 101.87°) 2823 个虚拟观测点的三维地震动加速度时程, 其中距离震

中 50、100 和 500 km 范围内网格精度分别为 0.025° 、 0.05° 和 0.1° , 模拟输入参数详见表 1.

所有虚拟观测点模拟记录三分量的 PGA 和 PGV 如图 4 所示, 模拟与观测记录的地震动峰值 (PGA、PGV) 整体上均具有较好的一致性, 模拟记

表1 漾濞M_s6.4地震随机有限断层模拟输入参数
Table 1 Input parameters for the stochastic finite-fault simulation of the Yangbi M_s6.4 earthquake

参数名称	参数值
矩震级 M _w	6.1
破裂面走向角 /倾角/滑动角	315°/86°/168°
破裂面长度和 宽度/km	16.5×7.7
子断层大小 /km	1.1×1.1
断层上边缘 埋深/km	3.39
起始破裂点 位置	沿走向和沿倾向分别为 16.5 km 和 4.62 km
震源破裂模型	震源破裂随机模型(见图3)
应力降 Δσ/MPa	16
P波和S波波速 /(km·s ⁻¹)	6.10/3.55
介质密度 ρ /(g·cm ⁻³)	2.74
动破裂面比例	50%
几何扩散模型	$G(R) = \begin{cases} R^{-1.0} & R < 50 \text{ km} \\ R^{-0.3} & 50 \leq R < 90 \text{ km} \\ R^{-1.1} & 90 \leq R < 120 \text{ km} \\ R^{-0.5} & R \geq 120 \text{ km} \end{cases}$
路径持时 d_p	$\begin{cases} 0.2R & R < 50 \text{ km} \\ 3(R-50)/40+10 & 50 \leq R < 90 \text{ km} \\ -0.5(R-90)/160+13 & 90 \leq R < 250 \text{ km} \\ 4.5(R-250)/70+12.5 & 250 \leq R < 320 \text{ km} \\ 0.145(R-320)+17 & R \geq 320 \text{ km} \end{cases}$
S波品质因子 Q _S	$Q(f) = 180.0f^{0.5}$
高频衰减参数 κ/s	0.025
地壳放大模型	NEHRP B/C类场地分界 对应场地条件($V_{S30} = 760 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 的放大效应经验模型
局部场地效应	线性和非线性局部场地效应经验模型

录可以很好的反映地震动峰值随距离的衰减规律及其近场饱和效应。同时对比了俞言祥等(2013)为我国第五代区划图编制建立的青藏地震区基岩场地($V_{S30} \geq 500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)水平向地震动峰值预测方程给出的2823个虚拟观测点的预测中位值。设定预测方程中长轴方向与破裂面走向一致,虚拟观测点 V_{S30} 主要在 500~900 m·s⁻¹范围内,只有不超过 5% 的虚拟观测点 V_{S30} 小于 500 m·s⁻¹,因此虚拟观测点可近似看作位于基岩场地。对比发现,模拟记录峰值与预测中位值的大小、距离衰减特性均具有较好的一致性,尽管预测中位值在近场区域(震源距<10 km)整体上高于模拟值。

为反映模拟记录对不同周期地震动的预测水

平,图 5 给出了漾濞 M_s6.4 地震中 28 个触发强震动台站的模拟记录 PSA 的残差,所有台站模拟记录 PSA 残差主要在 ±0.5 范围内,所有台站模拟记录 PSA 残差的均值在零附近波动,主要在 ±0.2 的较小范围内,且并未发现明显的周期相关性,这表明模拟记录在整个周期段(0.05~10 s)均能较好的预测地震动,模拟与观测记录 PSA 的幅值接近日谱形相似。

距离震中最近的三个观测台站(053YBX、053DLY、053YPX)的模拟记录三分量加速度时程、速度时程和 PSA 如图 6 所示。三个台站模拟与观测记录的加速度和速度时程的波形、幅值以及 PSA 的幅值、谱形均具有较好的一致性。图 6 同时给出了最接近大理市区的虚拟观测点(#2106,震源距约为 35.5 km)的模拟记录时程及 PSA,其 EW、NS 和 UD 分量的 PGA 分别为 122.9、146.7 和 73.6 cm·s⁻², PGV 分别为 7.8、10.5 和 3.8 cm·s⁻¹。

图 7 对比了漾濞 M_s6.4 地震破裂前方(SE)和破裂后方(NW)震源距相同的虚拟观测点的模拟记录, #2504 和 #2740 震源距均为 20 km, #1726 和 #2101 震源距均为 50 km, #2740 和 #2101 位于破裂前方,而 #2504 和 #1726 则位于破裂后方,破裂前方台站记录的加速度和速度时程的幅值更大、持时更短,同时其 PSA 幅值更高,表现出明显的破裂方向性效应,说明模拟记录体现了震源破裂方向性对地震动的影响。

根据《中国地震烈度表 GB/T 17742-2020》,利用虚拟观测点的三分量模拟记录得到了合成加速度和速度时程,给出了三分量合成 PGA 和 PGV,最终计算了仪器测定地震烈度。基于虚拟观测点模拟记录的仪器测定地震烈度空间分布如图 8 所示,基于模拟记录的地震烈度空间分布的大致走向、范围与云南省地震局正式发布结果(见图 8a)基本一致,断层附近区域极震区的最大烈度可达到Ⅷ度,与宏观烈度图的最大烈度Ⅷ度相一致,其中漾濞县城及邻近乡镇位于Ⅷ度区,大理市区位于Ⅵ度区,均与正式发布结果相同。极震区近似为椭球状,受震源破裂方向性影响,相同距离上震中 SE 方向的烈度普遍高于 NW 方向。此外,沿洱海西侧的烈度普遍偏高(Ⅶ度),出现高烈度异常区,该地区的 V_{S30} 普遍较小,局部场地放大效应可能是高烈度异常的主要原因。

自 2018 年以来,国家地震烈度速报与预警工程建设初见成效,此次漾濞 M_s6.4 地震中震中距 100 km 以内共获得地震烈度台记录 86 组,基于烈度台

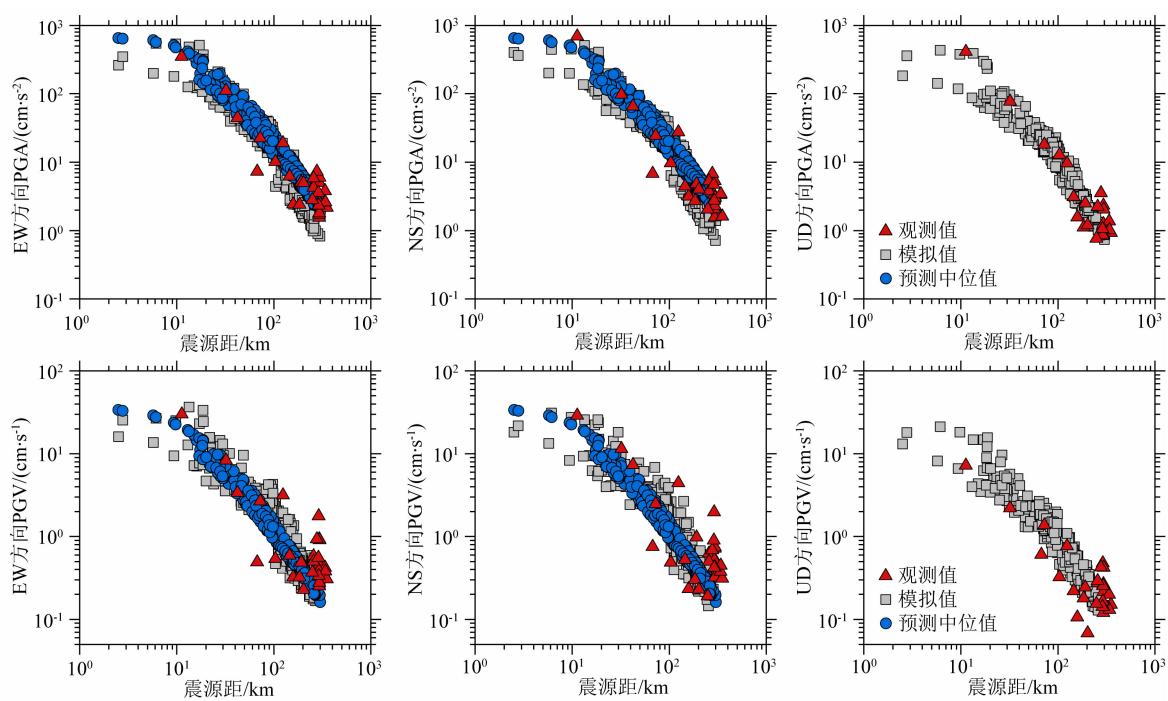


图 4 模拟与观测记录的 PGA、PGV 对比

Fig. 4 Comparisons between PGAs, and PGVs from the simulated and observed ground motions

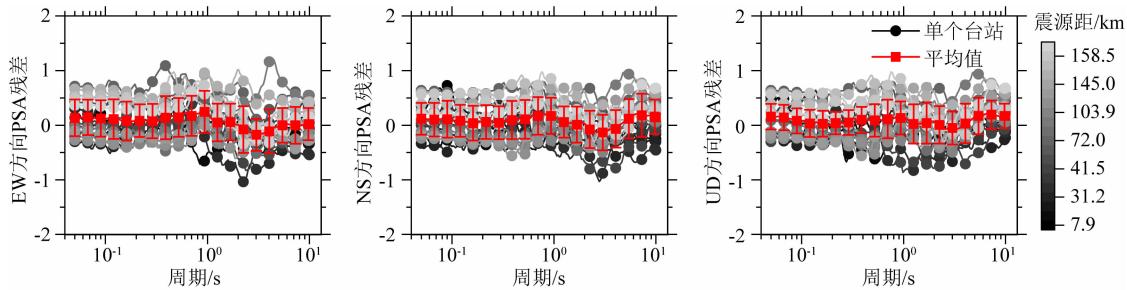


图 5 模拟和观测记录的 PSA 在 0.05~10 s 周期段的残差

Fig. 5 Residuals of the PSAs at periods of 0.05~10 s between the simulated and observed ground motions

观测记录的仪器测定地震烈度的等震线如图 8b 所示, 其等震线长轴近东西向, VI、VII 和 VIII 度区范围均偏小, 与基于模拟记录的仪器测定地震烈度和云南省地震局发布的地震烈度的结果有明显差异, 这可能与地震烈度台站密度较小有关。

3 结论

本文利用漾濞 $M_s 6.4$ 地震的震源破裂随机过程在 28 个触发强震动观测台站的随机有限断层三维地震动模拟记录, 结合强震动观测记录, 估计了此次地震的地震应力降及震源破裂过程, 给出了漾濞 $M_s 6.4$ 地震在震中附近范围 2823 个虚拟观测点的模拟记录三分量加速度时程, 结果表明:

(1) 模拟记录 PGA、PGV 与观测记录、地震动

预测方程预测中位值均具有较好的一致性, 反映了地震动峰值随距离的衰减规律、近场饱和效应及破裂方向性效应;

(2) 模拟记录与观测记录 PSA 的幅值接近、谱形相似, 模拟记录在 0.05~10 s 周期段均很好地预测了地震动;

(3) 基于三分量模拟记录给出了此次地震的仪器测定地震烈度, 与云南省地震局发布烈度图的结果基本一致, 极震区最大烈度可达到 VIII 度, 震源破裂方向性导致震中 SE 方向的烈度普遍高于 NW 方向, 受局部场地条件影响沿洱海西侧出现高烈度异常区。

致谢 感谢中国地震局工程力学研究所为本研究提供的强震动观测数据及地震烈度台站的仪器烈度数据。感谢中国地震局地球物理研究所房立华研

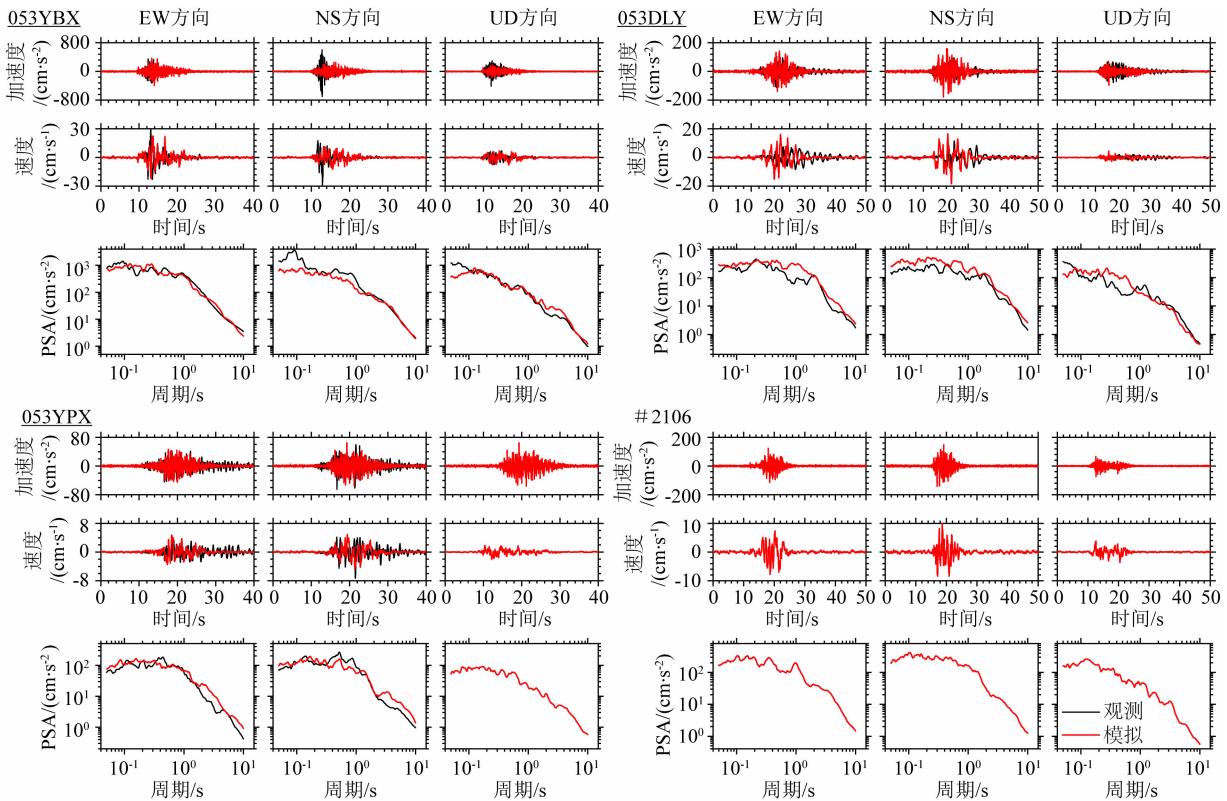


图6 模拟记录加速度时程、速度时程及 PSA

Fig. 6 Acceleration and velocity time histories and PSAs for the simulated ground motions

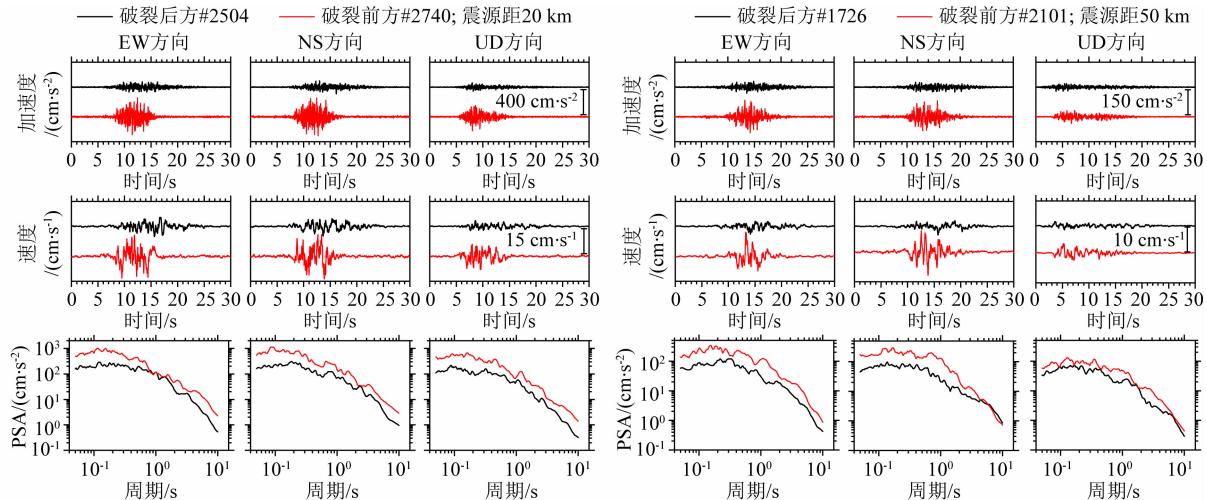


图7 震源距相同的地震破裂前后方虚拟观测点模拟记录加速度时程、速度时程和 PSA

Fig. 7 Acceleration and velocity time histories, as well as PSAs simulated for both stations in each pair, which share the same hypocentral distances and are located in and opposite the direction of source rupture, respectively

究员提供的漾濞地震序列震源精定位结果。感谢两位匿名评审专家对本文修改和完善提出的宝贵意见。

References

Atkinson G M, Boore D M. 2006. Earthquake ground-motion prediction

equations for eastern North America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(6): 2181-2205.

Boore D M. 2009. Comparing stochastic point-source and finite-source ground-motion simulations: SMSIM and EXSIM. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(6): 3202-3216.

Graves R, Pitarka A. 2015. Refinements to the Graves and Pitarka (2010) broadband ground-motion simulation method. *Seismological Research Letters*, 86(1): 75-80.

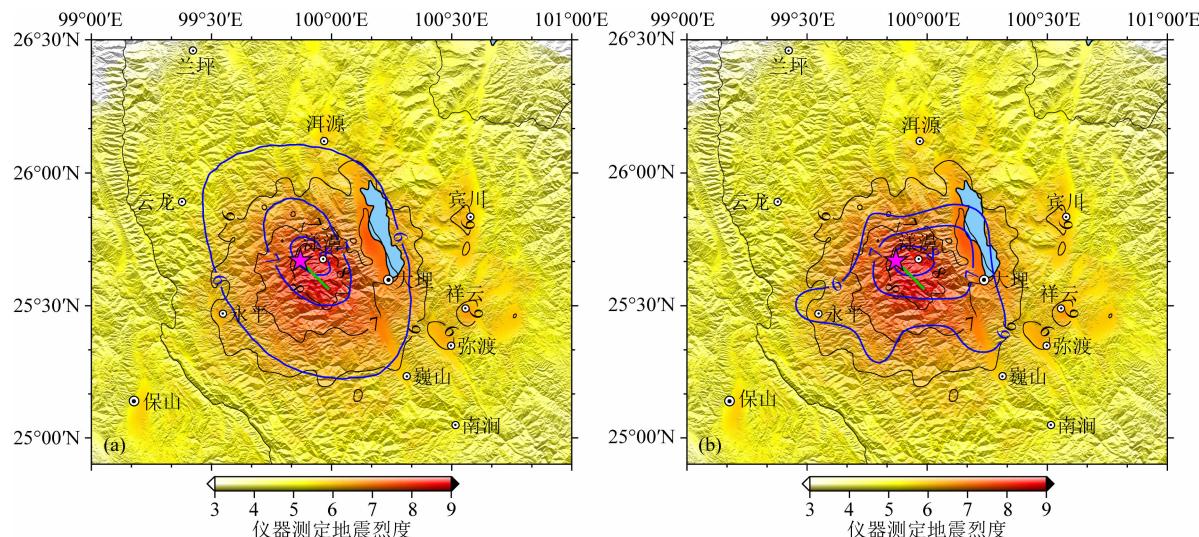


图 8 基于模拟记录的漾濞 $M_s 6.4$ 地震的地震烈度与(a)云南省地震局正式发布的地震烈度图(蓝实线)、
(b)基于地震烈度台站观测记录的地震烈度(蓝实线)对比

Fig. 8 Seismic intensity of the Yangbi $M_s 6.4$ earthquake derived from the simulated ground motions comparison with (a) seismic intensity officially released by the Earthquake Administration of Yunnan Province (blue lines) and (b) seismic intensity based on recordings obtained by seismic intensity stations (blue lines)

Graves R, Pitarka A. 2010. Broadband ground-motion simulation using a hybrid approach. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(5A): 2095-2123.

Graves R, Pitarka A. 2016. Kinematic ground-motion simulations on rough faults including effects of 3D stochastic velocity perturbations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106(5): 2136-2153.

Heath D C, Wald D J, Worden C B, et al. 2020. A global hybrid VS30 map with a topographic-slope-based default and regional map insets. *Earthquake Spectra*, 36(3): 1570-1584.

Huangfu G, Li Z H, Qin J Z, et al. 2007. Correlation of seismicity in Sichuan-Yunnan rhombic block. *Journal of Seismological Research* (in Chinese), 30(3): 205-209.

Kan R J, Zhang S C, Yan F T, et al. 1977. Present tectonic stress field and its relation to the characteristics of recent tectonic activity in Southwestern China. *Chinese Journal of Geophysics (Acta Geophysica Sinica)* (in Chinese), 20(2): 96-109.

Mai M, Spudich P, Boatwright J. 2005. Hypocenter locations in finite-source rupture models. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(3): 965-980.

Pacheco J F, Scholz C H, Sykes L R. 1992. Changes in frequency-size relationship from small to large earthquakes. *Nature*, 355(2): 71-73.

Saragoni G R, Hart G C. 1973. Simulation of artificial earthquakes. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2(3): 249-267.

Seyhan E, Stewart J P. 2014. Semi-empirical nonlinear site amplification from NGA-West2 data and simulations. *Earthquake Spectra*, 30(3): 1241-1256.

Shaw B E, Wesnousky S G. 2008. Slip-length scaling in large earthquakes: the role of deep-penetrating slip below the seismogenic layer. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(4): 1633-1641, doi: 10.

1785/0120070191.

Somerville P, Irikura K, Graves R, et al. 1999. Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion. *Seismological Research Letters*, 70(1): 59-80.

Wang H W, Wen R Z. 2019. Ground-motion simulation for the $M_w 6.1$ Ludian earthquake on 3 August 2014 using the stochastic finite-fault method. *Earthquake Science*, 32(3-4): 101-114.

Wang H W, Ren Y F, Wen R Z. 2021a. A modified stochastic finite-fault method for simulating ground motions in three dimensions: A case study of Ludian earthquake. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics* (in Chinese), 41(2): 181-191.

Wang H W, Wen R Z, Ren Y F. 2021b. Seismic ground motion simulation considering regional characteristics: A case study of the Jiashi $M_s 6.4$ Earthquake in 2020. *Seismology and Geology* (in Chinese), 43(2): 430-446.

Wang Q C, Liu J, Zheng S H, et al. 2005. Frequency-dependent attenuation of P and S waves in Yunnan region. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 27(6): 588-597.

Wang Y P, Shen J, Wang Q, et al. 2003. On the lateral extrusion of Sichuan-Yunnan Block (Chuandian Block). *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 10(S1): 187-192.

Wells D L, Coppersmith K J. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4): 974-1002.

Xu Y, Herrmann R B, Wang C Y, et al. 2010. Preliminary high-frequency ground-motion scaling in Yunnan and southern Sichuan, China. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(5B): 2508-2517.

Yenier E, Atkinson G M. 2015. An equivalent point-source model

- for stochastic simulation of earthquake ground motions in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(3): 1435-1455.
- Yu Y X, Li S Y, Xiao L. 2013. Development of ground motion attenuation relations for the new seismic hazard map of China. *Technology for Earthquake Disaster Prevention* (in Chinese), 8(1): 24-33.
- Zhao C P, Chen Z L Hua W, et al. 2011. Study on source parameters of small to moderate earthquakes in the main seismic active regions, China mainland. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 54(6): 1478-1489.
- 阚荣举, 张四昌, 晏凤桐等. 1977. 我国西南地区现代构造应力场与现代构造活动特征的探讨. *地球物理学报*, 20(2): 96-109.
- 王宏伟, 任叶飞, 温瑞智. 2021a. 一种随机有限断层的三维地震动模拟方法——鲁甸地震为例. *地震工程与工程振动*, 41(2): 181-191.
- 王宏伟, 温瑞智, 任叶飞. 2021b. 考虑区域特征的地震动模拟——以2020年伽师M_S6.4地震为例. *地震地质*, 43(2): 430-446.
- 王勤彩, 刘杰, 郑斯华等. 2005. 云南地区与频率有关的P波、S波衰减研究. *地震学报*, 27(6): 588-597.
- 汪一鹏, 沈军, 王琪等. 2003. 川滇块体的侧向挤出问题. *地学前缘*, 10(S1): 187-192.
- 俞言祥, 李山有, 肖亮. 2013. 为新区划图编制所建立的地震动衰减关系. *震灾防御技术*, 8(1): 24-33.
- 赵翠萍, 陈章立, 华卫等. 2011. 中国大陆主要地震活动区中小地震震源参数研究. *地球物理学报*, 54(6): 1478-1489.

(本文编辑 何燕)

附中文参考文献

皇甫岗, 李忠华, 秦嘉政等. 2007. 川滇菱形块体强震活动关联分析. *地震研究*, 30(3): 205-209.