

罗超, 曹晓雨, 高阳等. 2024. GP 断层破裂模型在青海门源  $M_s6.9$  地震强地面运动模拟的适用性研究. 地球物理学报, 67(2):534-547, doi:10.6038/cjg2023Q0695.

Luo C, Cao X Y, Gao Y, et al. 2024. Applicability study of the GP fault rupture model in strong ground motion simulation for the Qinghai Menyuan  $M_s6.9$  earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 67(2):534-547, doi:10.6038/cjg2023Q0695.

# GP 断层破裂模型在青海门源 $M_s6.9$ 地震强地面运动模拟的适用性研究

罗超<sup>1,2</sup>, 曹晓雨<sup>2</sup>, 高阳<sup>3</sup>, 徐飞<sup>3</sup>, 冯怀平<sup>1</sup>, 王昊<sup>1,2\*</sup>

1 石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 石家庄 050043

2 石家庄铁道大学 土木工程学院, 石家庄 050043

3 石家庄铁道大学 安全工程与应急管理学院, 石家庄 050043

**摘要** 2022 年 1 月 8 日青海省门源县发生  $M_s6.9$  地震, 震中附近遭受了强烈地震破坏. 为验证 Graves 和 Pitarka 开发的 GP 断层破裂模型在震前对中国地区地震动场的预测与评估能力, 本文基于 GP 法, 考虑不同上升时间系数 ( $rc$ ) 的影响, 对门源地震进行了确定性地震动模拟. 将模拟结果在地震动衰减规律、波形与幅值和烈度分布三个方面分别与青藏地区的地震动峰值预测方程、强震观测记录和根据强震记录自动产生的烈度图进行了对比. 结果表明, 当  $rc$  为 9.0 时, 模拟记录与实测记录和地震动峰值预测方程基本一致. 本文较好的重现了门源地震的强震动场, 在合理选取  $rc$  的情况下, GP 法可以应用于中国地区震前强地震动场的预测和估计.

**关键词** 门源  $M_s6.9$  地震; GP 断层破裂模型; 强地面运动; 上升时间系数; 宽频带地震动模拟

doi:10.6038/cjg2023Q0695

中图分类号 P315

收稿日期 2022-08-30, 2023-12-28 收修定稿

## Applicability study of the GP fault rupture model in strong ground motion simulation for the Qinghai Menyuan $M_s6.9$ earthquake

LUO Chao<sup>1,2</sup>, CAO XiaoYu<sup>2</sup>, GAO Yang<sup>3</sup>, XU Fei<sup>3</sup>, FENG HuaiPing<sup>1</sup>, WANG Hao<sup>1,2\*</sup>

1 Shijiazhuang Tiedao University, State Key Laboratory of Mechanics Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang 050043, China

2 School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China

3 School of Safety Engineering and Emergency Management, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China

**Abstract** On January 8, 2022, a  $M_s6.9$  earthquake struck Menyuan County, Qinghai Province. The vicinity of the epicenter suffered strong seismic damage. To verify the ability of the GP fault rupture model developed by Graves and Pitarka in predicting and evaluating the ground motion field in China before the earthquake, this paper performs deterministic ground motion simulations of the Mengyuan earthquake based on the GP method, considering the effects of different rise time coefficients ( $rc$ ). The simulation results were compared with the ground motion prediction equations of Qinghai-Tibet region, the strong-motion observation records and the intensity maps

**基金项目** 国家重点研发计划项目(2021YFB2600800), 国家自然科学基金面上项目(52078311), 河北省重点研发计划项目(21375407D), 河北省青年拔尖人才项目(BJ2020055), 中国国家铁路集团有限公司科技研发计划(P2022G013), 河北省地震科技星火计划项目(大跨度桥梁抗震韧性评价(DZ2023120500009))资助.

**第一作者简介** 罗超, 男, 1987 年生, 工学博士, 主要从事工程结构抗震, 地面运动方面的研究. E-mail: luochao@stdu.edu.cn

**\* 通讯作者** 王昊, 女, 1989 年生, 工学博士, 主要从事区域震害评价方面的研究. E-mail: wanghao@stdu.edu.cn

automatically generated from the strong-motion records in terms of ground motion attenuation pattern, waveform and amplitude, and intensity distribution, respectively. Comparing the waveforms of simulated records from a near-field station and strong earthquake records. The results show that when the  $rc$  is 9.0, the simulated records are in good agreement with the measured records and the ground motion prediction equation. This paper reproduces the strong motion field of the Menyuan earthquake. The GP method can be applied to the prediction and estimation of the strong ground motion field before the earthquake in China with a reasonable selection of  $rc$ .

**Keywords** Menyuan  $M_s6.9$  earthquake; GP fault rupture model; Strong ground motion; Rise time coefficient; Broadband ground motion simulation

## 0 引言

北京时间 2022 年 1 月 8 日凌晨 1 时 45 分青海省海北州门源县发生面波震级为 6.9 级的地震,震源深度约为 10 km(尹晓菲等,2022).本次地震导致的人员伤亡较少,造成海北州门源等三个县千余户受灾,9 人受伤,超过四千间房屋损坏(王祖东等,2022).本次地震引发了工程结构的显著破坏,靠近发震断层的兰新铁路硫磺沟大桥和祁连山隧道破坏严重(韩帅等,2022).震害表明,近场地震动对工程结构的破坏力巨大,当类似的地震发生在人口密集和重大工程附近时后果不堪设想.

地震发生后,许多学者和研究机构都对门源地震区域断层和震源参数开展了研究工作.李振洪等(2022)反演了本次地震的震源破裂过程,结果表明本次地震的类型为走滑型地震,子断层最大滑动量为 3.5 m,大约在地下 4 km 处.潘家伟等(2022)通过详细野外考查分析得出,本次地震以左旋走滑运动为主,最大走滑位移约为 3.7 m,形成了约 27 km 长的破裂带,震源深度较浅.尹欣欣等(2022)通过双差层析成像方法对 2009—2022 年之间的门源及周边地区地震事件进行了精确定位处理,定位本次门源地震的震源深度为 13.3 km,震中位置为(37.76°N, 101.25°E).

在震后重建强地面运动场,是确定震后受灾区域和估计未来强震影响场的重要手段.同时随着一系列地震动输入方法的提出和广泛应用(Bielak et al., 2003; Luo et al., 2019, Wang et al., 2021a),对局部场地中密集地震动的获取提出了要求.已有许多研究人员开展了强地面运动模拟方面的研究,其中随机有限断层法被广泛使用.丁阳等(2018)使用改进的有限断层法,对九寨沟  $M_s7.0$  地震进行了模拟,结果显示,部分模拟结果与强震观测记录存在

一定差异.周红等(2021)通过在随机有限断层法中考虑破裂过程,模拟了漾濞 6.4 级地震强地震动场,对地震动场的时空分布规律进行了分析.李春果等(2021)等考虑了玛多  $M_s7.4$  地震的多个震源破裂模型,基于随机有限断层法开展了强地震动模拟.通过与预测中位值对比,模拟记录的 PGA、PGV 结果较为理想,但当与远场观测记录相比时,基于模拟记录的地震烈度值整体上偏低 1~2 度.强生银等(2021)基于随机有限断层三维地震动模拟方法,给出了漾濞地震中 28 个强震动台站的三分量加速度时程模拟结果.傅磊等(2023)通过随机有限断层法模拟了 2022 年芦山  $M_s6.1$  地震,分析了地震中 9 个距离断层小于 100 km 的台站的模拟记录.结果显示,模拟记录与观测记录在加速度时程的 S 波部分符合良好,在 8 s 以下周期范围内傅里叶振幅谱和反应谱形状和幅值基本一致.综上所述,随机有限断层法虽然计算效率较高,但是只能从宏观上考虑地形和地质条件的影响,不能完全考虑速度结构、局部场地效应对地震动的影响.

近年来,随着计算能力的提高,研究人员也开展了有关确定性模拟方法的研究.常莹等(2012)在模拟汶川  $M_s8.0$  地震的强地震动场时,通过对离散断层面分级和对各级断层面破裂上升时间分解的方法,增加了震源的高频成分.结果表明,PGA 模拟结果的误差不超过 50%,傅里叶谱在 4 Hz 以上频段比观测值小.赵宏阳和陈晓非(2017)基于辽宁省海城地区地质资料和已发表的海城  $M_s7.3$  地震震源机制反演结果,模拟了 1975 年海城地震的强地震动场.计算结果表明,地震动场的分布特征受到包括震源、地形和地质条件等因素的影响.但是受到模型精度的影响,理论和实际等震线图存在一定差异.贺春晖等(2017)提出了震源-介质-坝址峡谷场地的多尺度模拟方法,基于谱元法模拟了坝址区域的空间三维地震动场.Wang 等(2021b)在宽频带地震动模拟

中,通过将震源分成多个层叠加模拟断层破裂过程实现高频信号的模拟,并以 1994 年北岭地震为例进行了验证.尹晓菲等(2022)使用曲线网格有限差分法,基于门源区域的地形、速度结构模型以及反演震源破裂过程的结果,模拟了门源地震的强地震动场.受模型精度和计算资源的制约,模拟的地震动场有效频率不超过 0.4 Hz,模拟结果的烈度较强震观测记录偏低.上述文献中,均使用了震后反演得到的断层破裂模型作为输入,来模拟设定地震的强地面运动.但是不同地震的断层破裂模型迥异,能否直接应用在其他有潜在发生地震区域的强地震动模拟中尚存疑问.

Graves 和 Pitarka 提供了另一种思路,他们提出了预测可能发生的断层破裂过程的 GP 法(Graves and Pitarka, 2004, 2010, 2015, 2016),可用于开展宽频带地面运动模拟. Pitarka 和 Graves (Pitarka et al., 2020)使用 GP 法和 GP&IM 混合法建立断层破裂模型,对日本熊本  $M_w$ 7.0 地震进行了宽频带地震动模拟; Pitarka 等(2022)使用 GP 法对美国加利福尼亚州 Ridgecrest  $M_w$ 7.1 地震进行了宽频带地震动模拟,两篇文章通过将计算结果与强震观测记录对比,展现出了 GP 法在美国和日本地区优异的适用性.但是 GP 法是否适用于中国地区的强地震动模拟,目前仅巴振宁等(2023)使用 GP 模型对漾濞地震进行了模拟,研究工作还有待进一步开展.

研究表明,中国的城市 50 年内可能发生 6 级左右直下型地震数量占城市总数的 80.4%,且有较多重要城市发生直下型地震的危险性较高(朱刚等, 2007).此外,随着我国重特大工程的建设向深地、深海和中西部地区的转移,土木工程结构不可避免的需要跨越活动断层(谢礼立等, 2021).着眼城市建设和重大工程中对抗震韧性的需求,虽然已有多种提高结构韧性的减震构件和设计方法(Wang et al., 2023; Zhao et al., 2023; Hu et al., 2023),但是从地震动输入的角度来看,如何合理地预测和模拟近/跨断层地震动,对提高土木工程结构的抗震设防能力,实现城市和基础设施的抗震韧性具有重要的意义和价值.

考虑到建设韧性城市和韧性交通系统中对潜在强震发生区域近/跨断层地震动场模拟的迫切需求,本文基于 Graves 和 Pitarka 提出的 GP 法(Graves and Pitarka, 2004, 2010, 2015, 2016; Pitarka et al., 2020, 2022),使用在震前可勘测的活动断层的走向、

倾角、滑动角以及可进行参数分析的震级、震源深度、断层破裂长度与宽度等震源参数建立断层破裂模型,然后使用“Seismic Waves, 4th order”(简称 SW4)有限差分计算程序(Petersson and Sjögreen, 2018)进行宽频带地震动模拟,重建门源区域的强地震动场.通过观察分析模拟结果的衰减规律、模拟结果的峰值(PGA、PGV)和烈度分布与实测地震动记录对比分析、不同方位台站的观测记录和模拟记录的波形对比,考察和验证在中国区域内基于 GP 法的宽频带地震动模拟在震前预测和估计地震动场的的能力,为近/跨断层工程结构的规划和设计提供参考和科学依据.

## 1 地震动模拟方法

地震的观测记录常被用来进行结构地震反应分析,但现有的地震观测记录只对地震动场的一小部分进行了采样,地面运动记录通常需要修正或按比例缩放,以此来适应目标场地的地震动特性,采用震后观测记录对地震进行预测和评估仍具有一定的局限性.

现如今,谱元法、有限差分法等方法被广泛应用于宽频带地震动模拟中,要实现宽频带地震动模拟,受到断层破裂模型的频带范围、速度结构模型的精细程度和网格尺寸的影响.本文使用 SW4 有限差分法软件和具有宽频特性的 GP 断层破裂模型,通过控制网格尺寸不超过最小波长的 1/8 来实现 0~10 Hz 的宽频带地震动模拟. SW4 是一种四阶精度的有限差分计算程序(Sjögreen and Petersson, 2012; Petersson and Sjögreen, 2017a, b),它具有模拟 3D 材料属性、各向异性、使用曲线网格近似地表地形(Petersson and Sjögreen, 2014)、沿地层深度细化网格(Wang and Petersson, 2019)、设置吸收边界条件最小化来自远场边界的人工反射波(Petersson and Sjögreen, 2015)的功能.

## 2 门源地震近场区域地震动模拟参数的确定

根据前两节的介绍,本文研究工作的开展需要确定断层破裂模型、三维地形地质结构等参数,下面逐一介绍.

### 2.1 断层破裂模型

在门源地震发生后,多家相关机构迅速发布了

这次地震的震源参数 (GFZ, 2022; CENC, 2022; USGS, 2022). 本文选用美国地质调查局 (USGS, 2022) 所提供的震源参数, 断层破裂面的走向、倾向和滑动角分别为  $104^\circ$ 、 $88^\circ$  和  $15^\circ$ , 震中位于  $(37.828^\circ\text{N}, 101.290^\circ\text{E})$ , 震源深度为 13 km. 本次地震为走滑型地震, 根据 Wells 统计的  $5.6 < M_w \leq 8.1$  时走滑地震的震源参数经验关系式 (Wells and Coppersmith, 1994), 计算地下破裂长度 (RLD) 和破裂宽度 (RW), 公式为

$$\log(\text{RLD}) = -2.57 + 0.62 \times M_w, \quad (1)$$

$$\log(\text{RW}) = -0.76 + 0.27 \times M_w. \quad (2)$$

经计算求得  $M_w6.6$  地震断层破裂的地下长度和宽度分别为 33 km 和 11 km. 考虑到断层的长宽模拟值和最大滑移量应与 USGS 发布的值尽可能相近, 本文模拟的断层地下破裂长度为 28 km, 破裂宽度为 8 km, 最大滑移量为 431 cm. 综上所述, 根据 USGS 所提供的震源数据, 作为 GP 法生成断层破裂模型的参数, 震源模型参数汇总见表 1.

表 1 门源地震震源模型参数

Table 1 The source model parameters for the Menyuan earthquake

参数名称	震中位置		震源深度 /km	破裂长度 /km	破裂宽度 /km	断层埋深 /km	震级 $M_w$	走向 / $^\circ$	倾角 / $^\circ$	滑动角 / $^\circ$
	北纬/ $^\circ$	东经/ $^\circ$								
参数值	37.83	101.29	13	28	8	9.0	6.6	104	88	15

在 GP 法中, 定义整个断层面的平均上升时间与地震矩的关系如式 (3) 所示 (Graves and Pitarka, 2016).

$$\tau = \alpha_T \cdot rc \cdot 10^{-9} \cdot M_0^{1/3}, \quad (3)$$

其中  $\tau$  为上升时间,  $\alpha_T$  是与震源机制相关的系数,  $rc$  为震源函数上升时间系数,  $M_0$  为地震矩. 在 GP 法中, 默认的  $rc$  为 1.6, 对应的上升时间为 0.72 s.

考虑到 GP 法是由美国西部地区的数据统计得出, 而中国地区的地震动加速度反应谱相比于美国西部的地震动加速度反应谱在长周期 ( $T > 1.0$  s) 内幅值小 (张齐, 2016; 张辉, 2021), 同时 USGS 提供的门源地震的震源函数上升时间也显著大于 0.72 s, 所以在进行地震动模拟时需增加断层破裂模型的上升时间. 因此, 为了研究  $rc$  对计算结果的影响, 增加上升时间为 4.2 s (USGS 提供门源地震的震源时间函数的上升时间) 时的震源模型和上升时间为 2.0 s 时的震源模型. 即本文将考虑三组上升时间, 分别为 0.72 s、2 s 和 4.2 s, 所对应的  $rc$  为 1.6、4.5 和 9.0. 断层破裂模型是使用南加州地震中心 (The Southern California Earthquake Center, SCEC) 开发的宽频带平台 (Broadband Platform, BBP) 生成 (Maechling et al., 2015), 详细的内容可以查看网站 <https://github.com/SCECcode/bbp/wiki>. 本文基于 BBP 的现有代码, 在仅改变参数  $rc$  的情况下生成断层破裂模型, 断层的具体参数设置如表 1 所示, 同时设置震源位于断层破裂面的几何中心, 子断层的大小为  $0.1 \text{ km} \times 0.1 \text{ km}$ , BBP 生成的断层破裂模型给出了每个子断层的错动速率时程, 进而可计算断层平面上滑移分布、起始破裂时间与滑移率等, 断层破裂模型文件详细的

内容和格式可以查看网站 Standard Rupture Format-SCECpedia. 在其他震源模型参数不变的情况下, 改变  $rc$  时断层滑移分布、起始破裂时间均不变, 断层滑移分布、起始破裂时间与滑移率如图 1 所示.

## 2.2 地震动模拟研究区域

本文分为区域 1、区域 2、区域 3 三个区域进行宽频带地震动模拟, 区域范围和尺寸如表 2 和图 2 所示. 受计算能力所限, 区域 1 中难以开展 ( $0 \sim 10$  Hz) 地震动模拟, 主要用于模拟速度场和估计区域尺度的烈度分布, 地震动模拟的频带范围为 ( $0 \sim 2$  Hz). 区域 2 用于模拟 PGA 和 PGV 随震中距的衰减分布规律, 地震动模拟的频带范围为 ( $0 \sim 10$  Hz). 区域 3 用于模拟近断层区域宽频带地震动场, 对比分析近场区域台站观测记录和模拟记录的波形和峰值, 地震动模拟的频带范围为 ( $0 \sim 10$  Hz). 本文使用 SW4 软件进行地震动模拟时, 需要用到输入脚本文件、地形模型、速度结构模型和断层破裂模型. 输入脚本文件内的代码在计算时会读取地形模型、速度结构模型和断层破裂模型, 同时会定义计算区域的原点位置、计算区域的总尺寸、网格尺寸、模拟的总时间、模拟网格点的输出等关键运行参数, 如表 2 所示.

## 2.3 门源地区的地形模型与速度结构模型

地壳介质的波速、密度和品质因子等特性在空间中存在显著的差异, 建立和使用合理的地壳速度结构模型是开展地震动模拟的基础. 本次门源地震发生在青海省门源县, 在本文研究区域内 ( $36.6^\circ\text{N} \sim 39.0^\circ\text{N}, 100.0^\circ\text{E} \sim 103.0^\circ\text{E}$ ), 使用美国地质调查局发布的具有 30 m 精度的全球地形数据 STRM1 (Farr

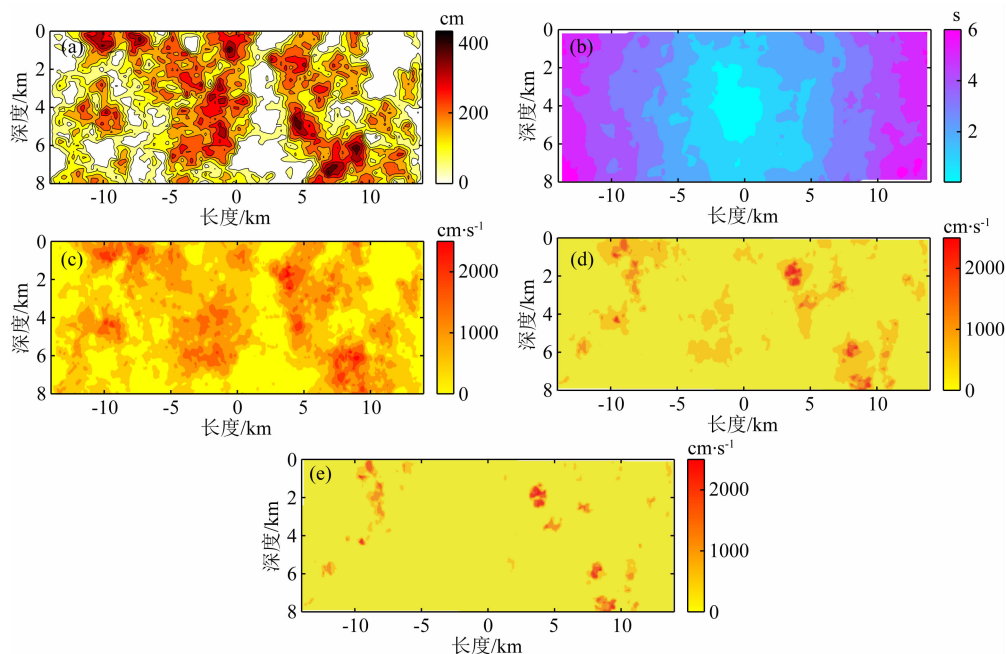


图 1 断层破裂随机滑移分布图(a); 起始破裂时间(b); 图(c)—(e)  $rc$  值依次为 1.6、4.5、9.0 时断层的峰值滑移率  
 Fig. 1 The random slip distribution diagram of fault rupture (a); initial rupture time (b); and Figure (c)—(e) show the peak slip rate of fault when  $rc$  values are successively 1.6, 4.5, and 9.0

表 2 SW4 关键运行参数

Table 2 The key operating parameter of SW4

参数名称	区域原点		区域总尺寸			网格尺寸	模拟时间	
	北纬/(°)	东经/(°)	东西向/km	南北向/km	竖向/km	/m	/s	
参数值	区域 1	36.60	100.01	258.0	259.8	21.0	200	60
	区域 2	36.70	101.04	44.2	230.0	21.0	40	60
	区域 3	37.56	101.77	37.0	37.6	21.0	40	40

et al., 2007) 建立研究区域内的地形模型。使用模型 USTClitho2.0 (Han et al., 2022) 来建立速度结构模型, 由于模型 USTClitho2.0 中没有地下岩层的密度, 使用全球地壳模型 CRUST1.0 (Laske et al., 2013) 中的地下岩层密度进行补充。P 波与 S 波的速度切片分布图如图 3 所示, P 波与 S 波竖向剖面分布图如图 4、图 5 所示。地震波的非弹性衰减采用粗粒度方法, 品质因子根据 Pitarka 和 Graves 给出的经验关系公式计算 (Pitarka and Graves, 2016):

$$Q_s = v_s \times 50, \quad (4)$$

$$Q_p = 2 \times Q_s, \quad (5)$$

其中,  $Q_s$  为 P 波品质因子,  $Q_p$  为 S 波品质因子,  $v_s$  为 S 波波速。

### 3 计算结果与讨论

根据前文介绍的模拟方法、震源参数、地形结构

模型与地壳结构模型, 按照上升时间 0.72 s、2.0 s、4.2 s, 将计算工况分为三组, 对应的  $rc$  分别为 1.6、4.5、9.0, 对目标区域的地震动场开展强地震动模拟。为了验证本文计算模型的合理性, 选取区域 2 内观测点的模拟记录的东向西、南北向的 PGA 和 PGV, 与俞言祥等 (2013) 编制建立的我国青藏地震区基岩场地水平地震动峰值预测方程进行对比, 地震动峰值预测方程的计算公式为

$$\lg Y = A + BM + Clg(R + De^{EM}) \pm \sigma, \quad (6)$$

其中  $Y$  代表地震动加速度和速度峰值,  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$  代表回归分析得到的系数,  $M$ 、 $R$  和  $\sigma$  分别代表表面波震级、震中距和标准差。预测方程与 PGA 模拟记录对比时, 预测方程的回归系数  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$  分别取值为 2.457、0.388、-1.854、0.612、0.457,  $M$  和  $\sigma$  分别取 6.9 和 0.236; 预测方程与 PGV 模拟记录对比时, 预测方程的回归系数  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$  分别取值为 0.443、0.474、-1.696、0.612、0.457,  $M$  和  $\sigma$  分

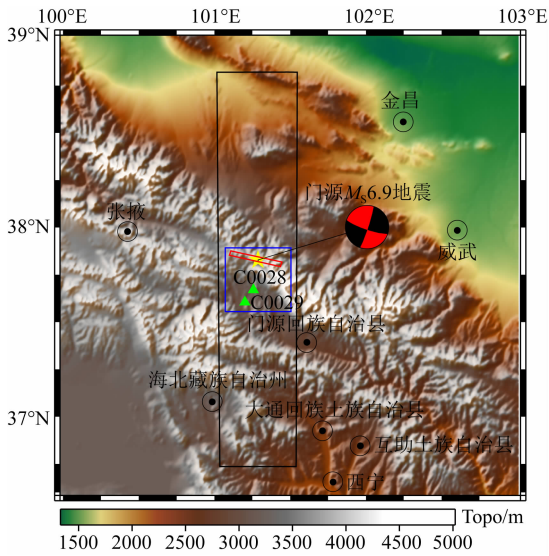


图2 门源地震震中位置、研究区域地形分布图

总体区域为区域1;黑线框选区域为区域2;蓝线框选区域为区域3;红线框选区域为断层所处位置;黄色五角星为震中位置;绿色三角形为台站C0028、C0029所处位置;红黑色的沙滩球为震源球。

Fig. 2 Map of seismic epicenter location and topographic distribution in Menyuan earthquake research area

The overall area is designated as region 1; the region enclosed by the black line is Region 2; the region enclosed by the blue line is Region 3; the region enclosed by the red line represents the location of the fault; the yellow pentagon represents the epicenter location; the green triangle represents the location of stations C0028 and C0029; the red and black beach ball represents the hypocenter.

别取6.9和0.271。图6绘制了基于不同 $rc$ 的模拟记录峰值地面加速度(PGA)和峰值地面速度(PGV)随震中距的衰减规律,其中黑色实线代表预测中位值,黑色虚线表示 $\pm 1$ 倍标准差。

由图6可知:三组不同 $rc$ 的模拟记录和预测中位值的PGA与PGV随距离的变化总体衰减速率基本一致。当 $rc$ 为1.6时,模拟结果PGA和PGV较预测中位值偏大。当 $rc$ 为4.5和9.0时,模拟结果PGA和PGV总体上与预测中位值较符合。随着 $rc$ 的增加,在相同震中距的情况下,三组模拟结果的PGA和PGV均逐渐降低。这是因为周期为1~2s的地面运动受 $rc$ 的影响显著,即 $rc$ 的值越大,上升时间越大,峰值滑移率越小,地震动速度和加速度的幅值越小。综上所述,当 $rc$ 为4.5与9.0时,模拟结果与预测中位值符合较好。

表3给出了距离震中最近的两个台站C0028、C0029的观测记录、模拟记录在10 Hz低通滤波后的PGA和PGV。从表3可以看出,当 $rc$ 为1.6时,台

表3 台站C0028、C0029观测与模拟记录的PGA、PGV  
Table 3 PGA and PGV recorded by observation and simulation at stations C0028 and C0029

台站名称	数据记录	PGA( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$ )			PGV( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )		
		EW	NS	UD	EW	NS	UD
C0028	观测记录	237.5	248.7	148.1	32.3	27.3	10.2
C0028	模拟记录 ( $rc=1.6$ )	321.9	503.3	164.2	25.2	57.8	11.5
C0028	模拟记录 ( $rc=4.5$ )	316.9	274.3	162.0	26.3	22.5	11.6
C0028	模拟记录 ( $rc=9.0$ )	298.8	260.1	153.0	19.9	23.4	10.8
C0029	观测记录	201.2	154.9	104.9	32.3	18.8	8.2
C0029	模拟记录 ( $rc=1.6$ )	340.7	184.9	161.3	42.5	15.2	12.3
C0029	模拟记录 ( $rc=4.5$ )	215.9	169.9	119.6	32.5	11.6	9.9
C0029	模拟记录 ( $rc=9.0$ )	215.7	167.1	117.7	31.8	11.2	9.1

站C0028模拟记录的PGA和PGV在南北向较观测记录偏大,东西向和竖向与观测记录较符合;台站C0029模拟记录的PGA和PGV在三个方向与观测记录较符合。当 $rc$ 为4.5和9.0时,台站C0028与台站C0029模拟记录PGA与PGV的三个方向与观测记录均较符合。综上所述,当 $rc$ 为4.5与9.0时,模拟结果与观测记录符合较好。

根据《中国地震烈度表》(国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会,2020),计算研究区域地震烈度。结合模拟所得加速度时程与速度时程,计算研究区域地震烈度。本次门源震后国家预警工程自动产出结果(王士成等,2017)见图7a, $rc$ 为1.6、4.5和9.0对应的研究区域的地震烈度空间分布分别由图7b、7c和7d表示。图8为不同 $rc$ 参数下PGA和PGV地表分布图。

从图7a中可知,断层附近区域极震区的最大烈度可达9度,本文模拟的三幅图与国家预警工程的最大烈度区相一致。对比图7a和图7d可知,图7d高烈度区(VI、VII、VIII、IX度区)分布的经纬度范围与图7a较符合,具体的经纬度范围如表4所示;图7a中高烈度区在平行和垂直于断层方向的烈度较其他方向衰减慢,与图7d中高烈度区呈垂直断层和平行断层分布特征相似;从表5所示的各烈度区面积可以看出图7d中高烈度区与图7a符合度较好。

从表5和图7中可以看出,随着 $rc$ 的增大,沿着断层走向的高烈度区面积逐渐减小,垂直于断层的高烈度区面积基本不变。当 $rc$ 为1.6时,模拟结

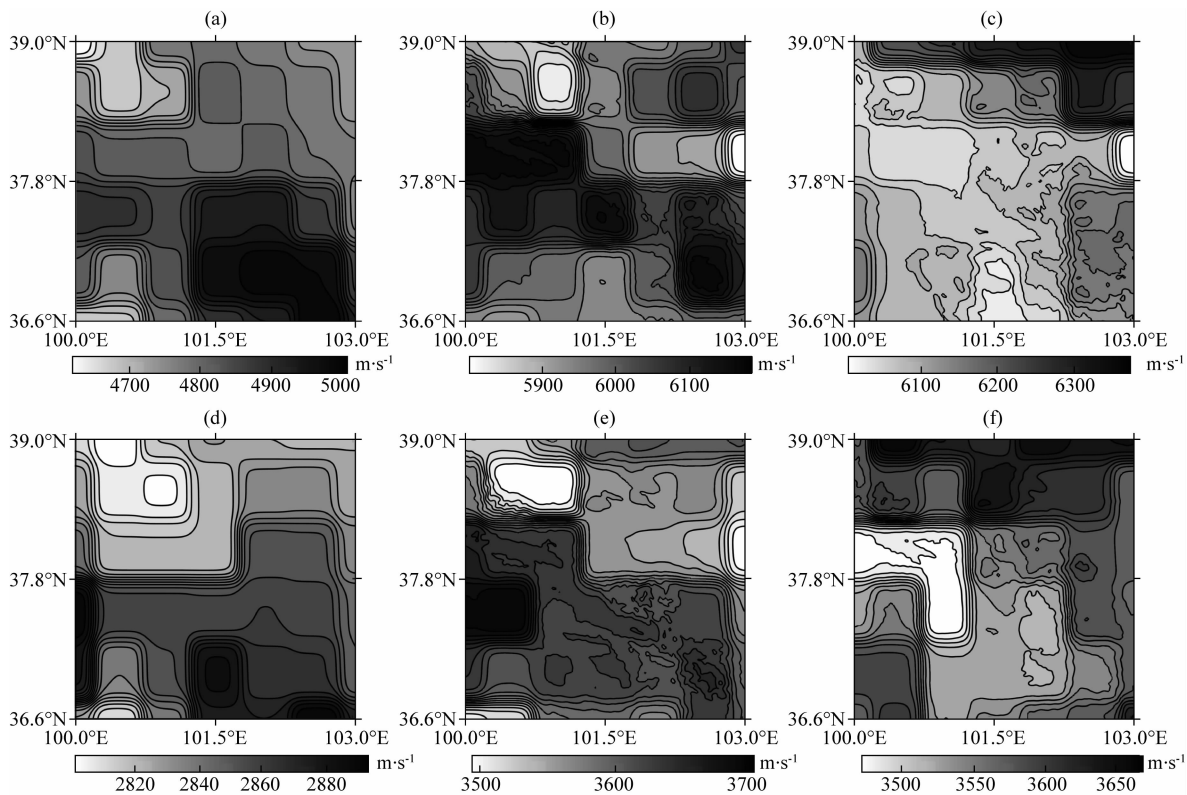


图 3 P 波与 S 波随深度变化切片分布

(a)  $v_p$   $Z=0$  km; (b)  $v_p$   $Z=10$  km; (c)  $v_p$   $Z=20$  km; (d)  $v_s$   $Z=0$  km; (e)  $v_s$   $Z=10$  km; (f)  $v_s$   $Z=20$  km.

Fig. 3 Slice distribution of P and S wave with depth

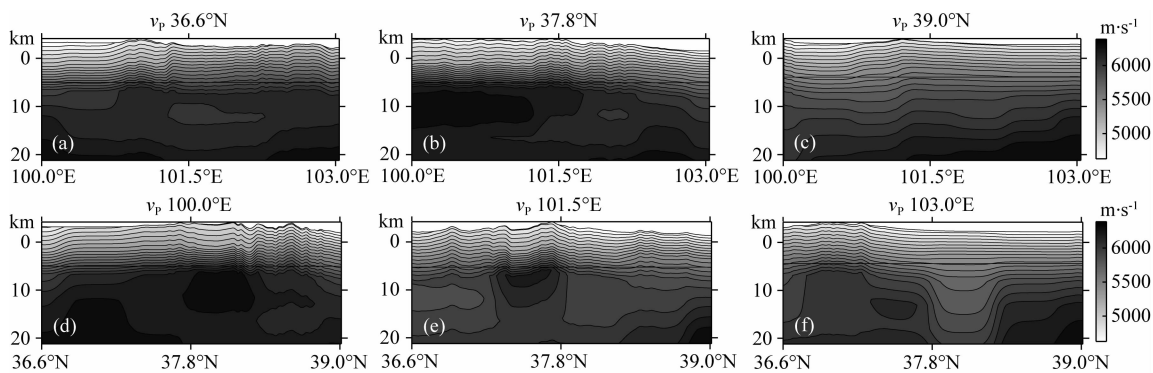


图 4 P 波在垂直方向上变化切片分布

Fig. 4 P waves vary in slice distribution in the vertical direction

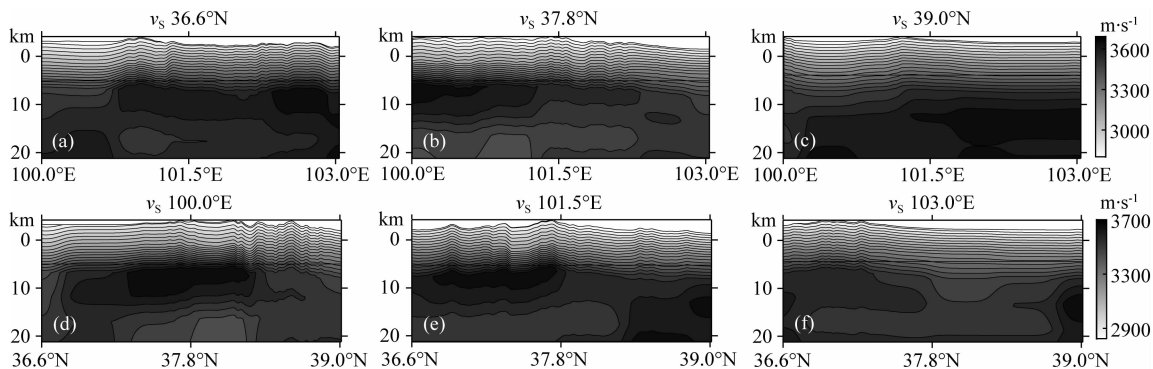
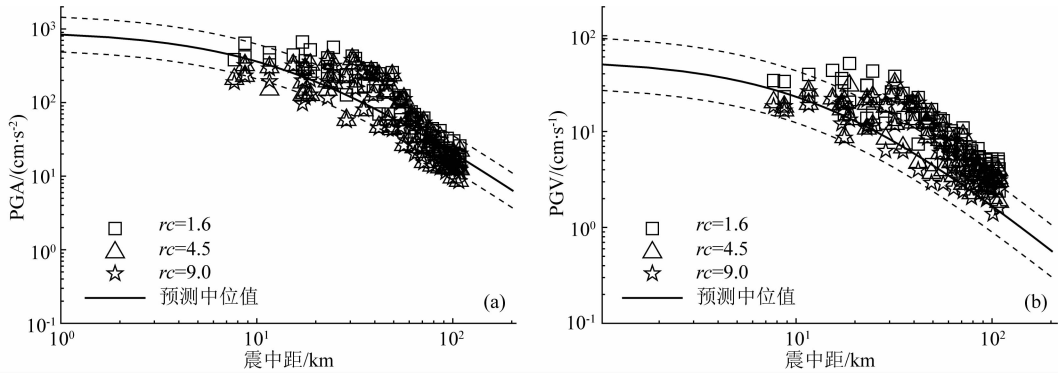


图 5 S 波在垂直方向上变化切片分布

Fig. 5 S waves vary in slice distribution in the vertical direction

图 6 基于不同  $rc$  的模拟记录 PGA 和 PGV 随距离的衰减分布Fig. 6 Attenuation distribution of PGA and PGV with distance based on simulations with different  $rc$ 

果的Ⅶ度区面积大于自动产出结果,Ⅷ、Ⅸ度区面积远大于自动产出结果;当  $rc$  为 4.5 时,模拟结果Ⅶ度区面积与自动产出结果吻合较好,Ⅷ度区面积远大于自动产出结果;当  $rc$  为 9.0 时,与自动产出结果相比,模拟结果Ⅶ、Ⅷ度区面积略偏大.综上所述,随着  $rc$  的增加,模拟的各烈度区域面积整体呈现减小趋势,这是由于  $rc$  对 1~2 s 周期地面运动的影响显著,即  $rc$  的值越小,速度幅值越大,烈度区的面积越大.

表 4 自动产出结果与地震动模拟结果Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ与Ⅸ度区范围

Table 4 Automatic generation results in the range of Ⅵ, Ⅶ, Ⅷ, and Ⅸ degrees compared to seismic motion simulation results

结果记录	纬度/(°N)	经度/(°E)
Ⅵ度区范围		
国家预警工程	37.18—38.38	100.50—102.17
本文模拟结果( $rc=1.6$ )	37.72—37.80	101.47—101.61
本文模拟结果( $rc=4.5$ )	37.81—37.87	101.22—101.61
本文模拟结果( $rc=9.0$ )	37.20—38.49	100.76—102.00
Ⅶ度区范围		
国家预警工程	37.50—38.20	100.97—101.84
本文模拟结果( $rc=1.6$ )	37.61—36.80	100.84—101.81
本文模拟结果( $rc=4.5$ )	37.66—37.95	100.91—101.54
本文模拟结果( $rc=9.0$ )	37.41—38.33	100.97—101.72
Ⅷ度区范围		
国家预警工程	37.58—37.93	101.14—101.42
本文模拟结果( $rc=1.6$ )	37.37—38.24	100.84—102.02
本文模拟结果( $rc=4.5$ )	37.43—38.30	100.84—101.88
本文模拟结果( $rc=9.0$ )	37.52—38.10	101.03—101.51
Ⅸ度区范围		
国家预警工程	37.72—37.77	101.20—101.25
本文模拟结果( $rc=1.6$ )	37.26—38.42	100.15—102.23
本文模拟结果( $rc=4.5$ )	37.31—38.42	100.70—102.02
本文模拟结果( $rc=9.0$ )	37.82—38.82	101.26—101.26

表 5 自动产出结果与地震动模拟结果Ⅶ、Ⅷ与Ⅸ度区面积

Table 5 The areas of automatically output results and ground motion simulation results for Ⅶ, Ⅷ and Ⅸ region

结果记录	Ⅶ度区面积 km <sup>2</sup>	Ⅷ度区面积 km <sup>2</sup>	Ⅸ度区面积 km <sup>2</sup>
国家预警工程	2569	723	25
本文模拟结果( $rc=1.6$ )	2958	3324	688
本文模拟结果( $rc=4.5$ )	2780	2449	1
本文模拟结果( $rc=9.0$ )	2923	1532	1

当  $rc$  为 9.0 时,模拟的各烈度区面积与国家预警工程较符合,但是Ⅶ、Ⅷ度区面积较自动产出记录仍然略有偏大.一般来说,台站多布置在地形较为平坦的区域,而地震动幅值在山地区域会有显著放大,从而导致了模拟结果的Ⅶ、Ⅷ度区面积偏大.图 9 绘制了台站 C0029 附近区域的地形图和南北方向速度分布云图.可以看出,图中北部和东北部山地区域出现了显著的地震动放大效应.考虑到模拟区域山区分布广泛,本文模拟的Ⅶ、Ⅷ度区面积较自动产出列度结果偏大.

当  $rc=9.0$  时,台站 C0028 和 C0029 在 10 Hz 低通滤波下的观测记录波形和模拟记录波形如图 10 所示.其中图 10a 为台站 C0028 观测记录和模拟记录的加速度波形对比图;图 10b 为台站 C0028 观测记录和模拟记录的速度波形对比图.图 10c 为台站 C0029 观测记录和模拟记录的加速度波形对比图;图 10d 为台站 C0029 观测记录和模拟记录的速度波形对比图.从图 10 中可以看出,除台站 C0029 在南北向模拟记录的速度峰值较小,两台站观测记录和模拟记录的加速度和速度在峰值和波形上均较为符合.

综合模拟记录峰值与青藏地区的地震动峰值预测方程、强震观测记录和震后国家预警工程自动产出烈度区分布的对比结果,同时对比分析台站 C0028 和 C0029 在 10 Hz 低通滤波下的观测记录波形和

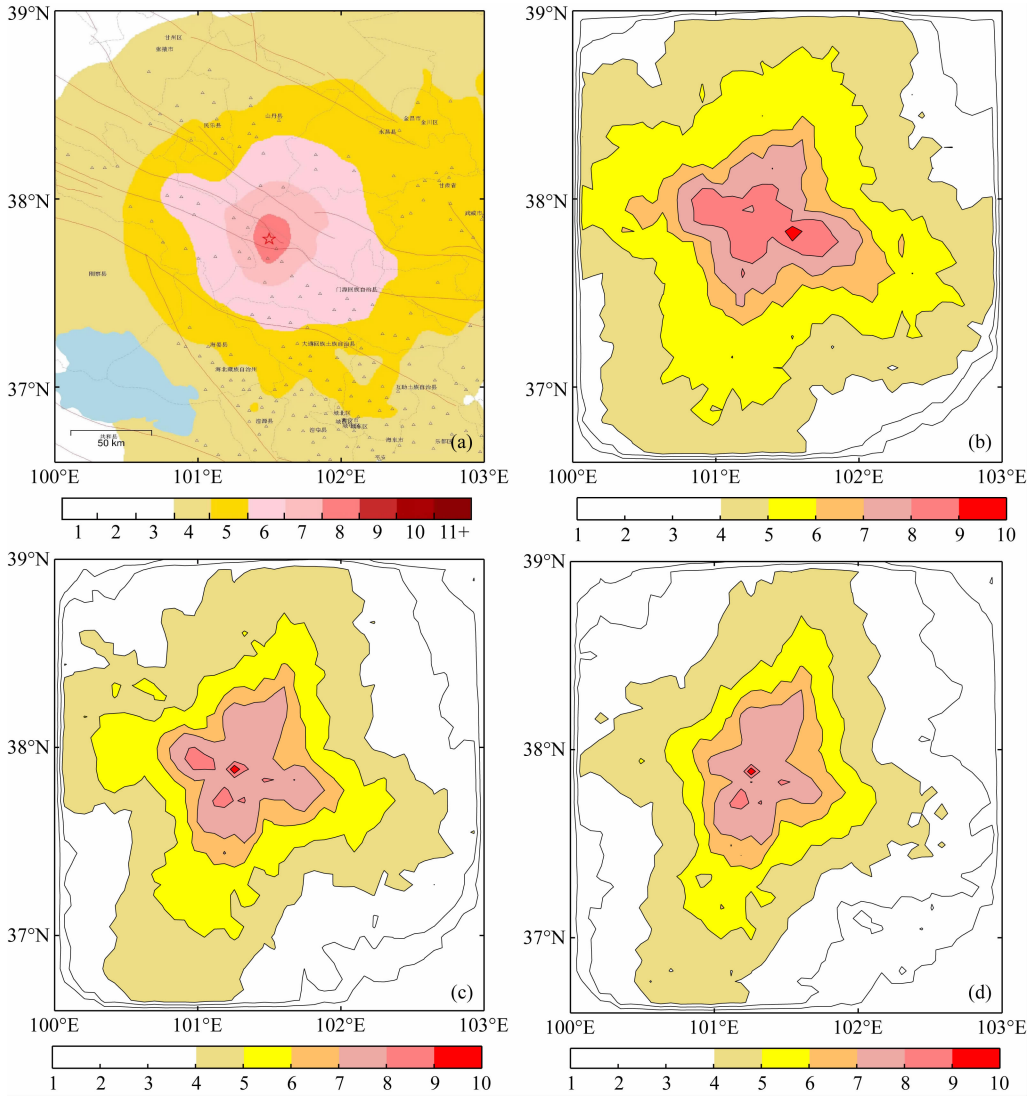


图 7 国家预警工程自动产出烈度图与地震动模拟产出烈度图

(a) 国家预警工程自动产出烈度图; (b)、(c)、(d)  $rc$  为 1.6、4.5 和 9.0 时地震动模拟产出烈度图。

Fig. 7 The intensity map of national early warning project automatic output and earthquake simulation output  
(a) The intensity map of national early warning project automatic output; (b), (c), (d) The intensity map of earthquake simulation output when the  $rc$  is 1.6, 4.5 and 9.0.

模拟记录波形. 可以看出, 当  $rc$  为 9.0 时, 地震动模拟结果与观测记录的符合度较好.

## 4 结论

本文采用 Graves 和 Pitarka 断层破裂模型 (GP 法) 和 “Seismic Waves, 4th order” (SW4) 有限差分计算程序, 对 2022 年门源  $M_s 6.9$  地震开展了强地面运动模拟, 开展了以下工作: (1) 对比了模拟记录峰值与青藏地区的地震动峰值预测中位值随震中距的衰减规律; (2) 将 C0028 和 C0029 两个台站的模拟记录与观测记录的 PGA 和 PGV 进行对比分

析; (3) 根据模拟记录给出烈度分布图, 并与国家预警工程自动产出烈度图进行对比分析; (4) 对比分析 C0028 和 C0029 两个台站的模拟记录与观测记录的波形. 可以得到如下结论:

(1) 对于三种不同上升时间系数 ( $rc$ ) 的震源模型,  $rc$  为 4.5 和 9.0 时模拟记录的峰值 (PGA、PGV) 与青藏地区的地震动预测方程的预测中位值符合程度较好.

(2) 在近断层区域宽频带地震动场的计算结果中, 对于台站 C0028 和 C0029,  $rc$  为 4.5 和 9.0 时模拟记录与强震观测记录的 PGA 和 PGV 基本吻合.

(3) 本文模拟的各烈度区面积随着  $rc$  的增大

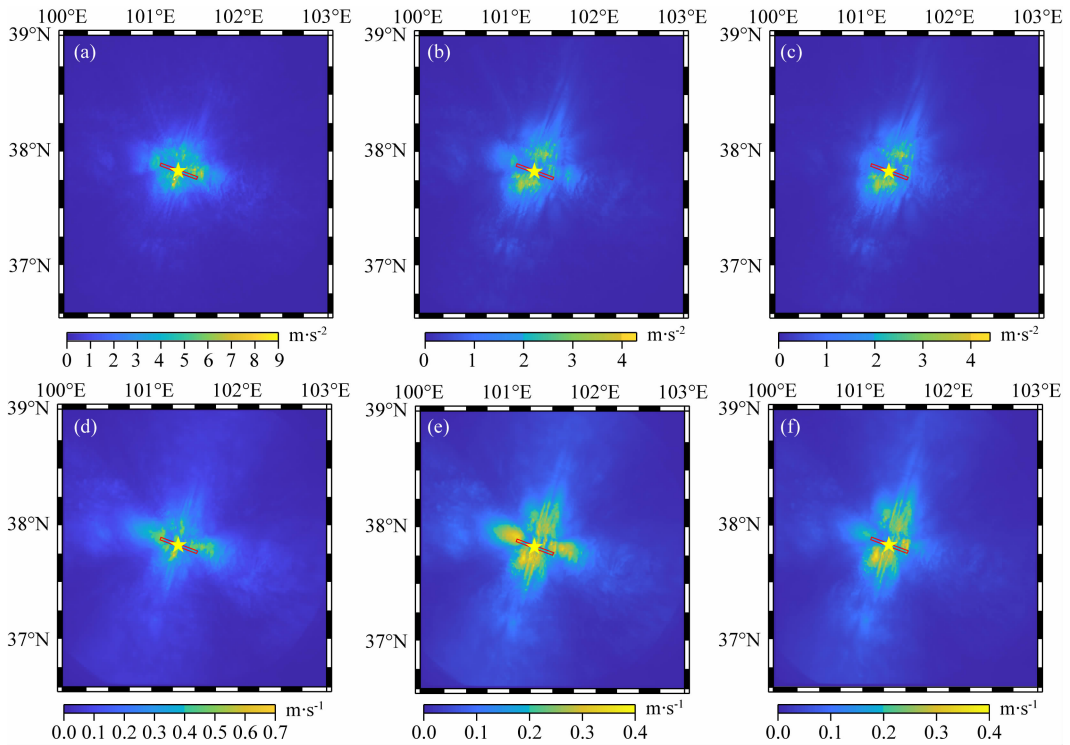


图 8 不同  $rc$  参数下 PGA 和 PGV 相应模拟量的地表分布图

(a)  $rc=1.6$  时 PGA 场; (b)  $rc=4.5$  时 PGA 场; (c)  $rc=9.0$  时 PGA 场; (d)  $rc=1.6$  时 PGV 场;  
(e)  $rc=4.5$  时 PGV 场; (f)  $rc=9.0$  时 PGV 场.

Fig. 8 Surface distribution map of PGA and PGV corresponding simulated values for different  $rc$  parameters

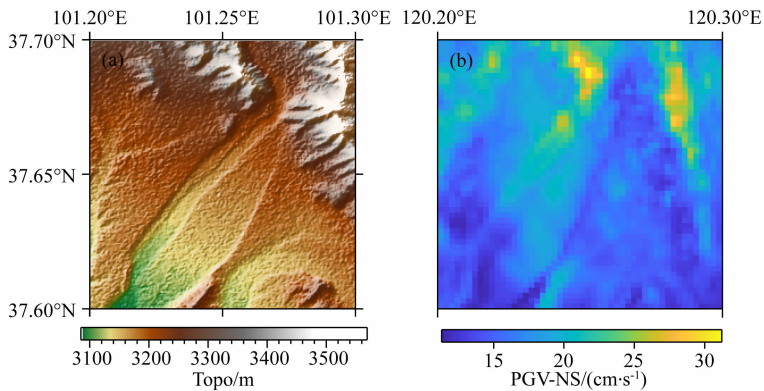


图 9 台站 C0029 周围地形图(a)与台站 C0029 附近区域南北方向 PGV(b)

Fig. 9 Topographic map around station C0029 (a) and PGV in the north-south direction of the area near station C0029 (b)

而减小. 当  $rc$  为 9.0 时烈度区走向、范围和烈度区面积与国家预警工程自动产出结果基本吻合.

(4) 当  $rc$  为 9.0 时, 台站 C0028 和 C0029 的模拟记录和观测记录的加速度和速度在峰值和波形上均较为符合.

(5) 综上所述, 本次强地震动模拟所得结果较好的重现了门源地震, 在合理选取  $rc$  参数的情况下, GP 法较好的重现了门源地震动场, 但是影响强

地震动模拟的因素还很多, 未来还需开展破裂速度、震源时间函数等参数的影响和基于中国大陆强震观测记录的震源破裂模型研究.

**致谢** 感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. 感谢审稿专家和编辑对文稿提出了宝贵的修改意见和建议. 同时感谢开源绘图软件 GMT(Wessel et al., 2019)为本文提供了方便高效的绘图平台.

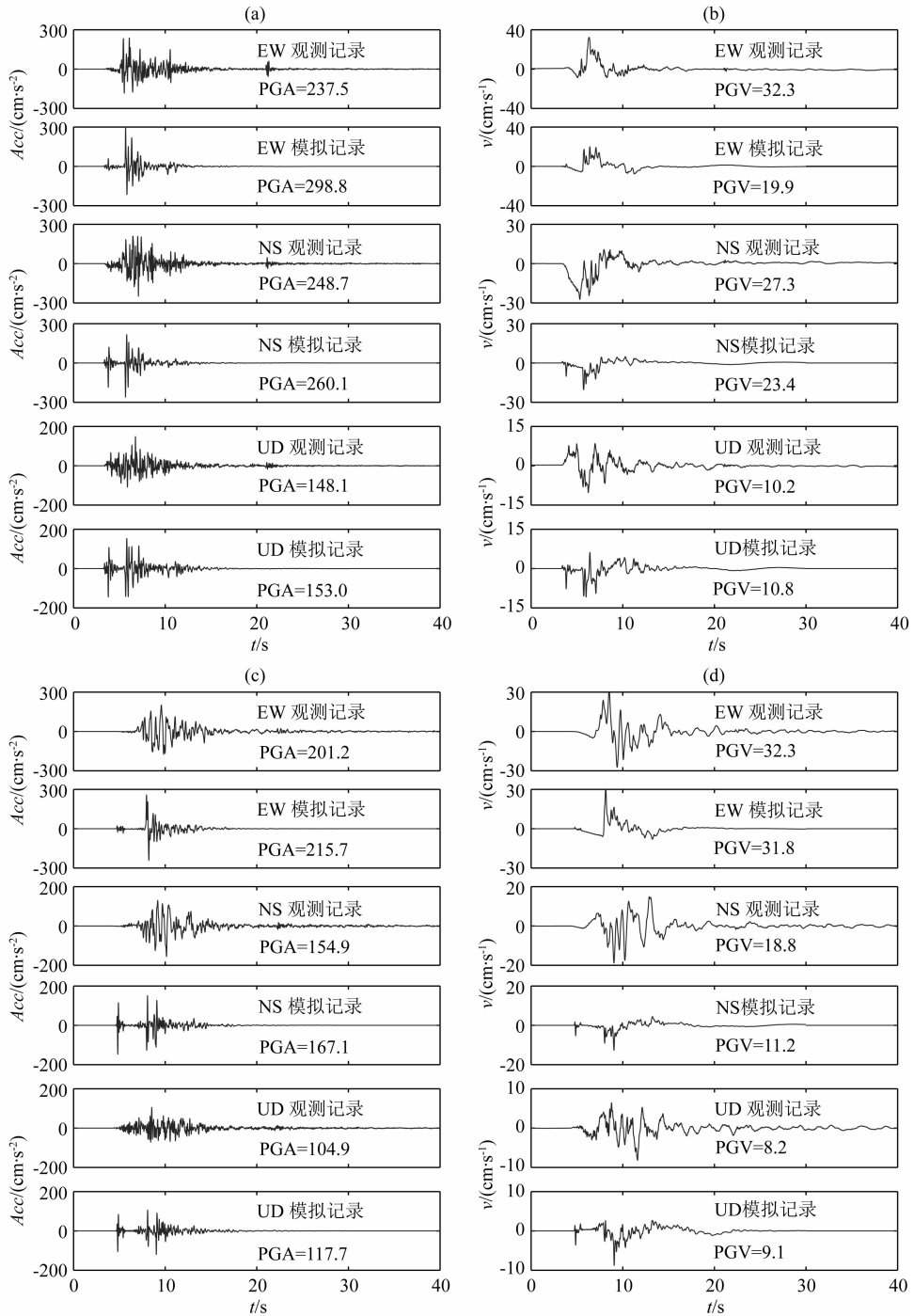


图 10 台站 C0028 和 C0029 在 10 Hz 低通滤波下的观测记录波形和模拟记录波形

台站 C0028 观测记录和模拟记录的加速度对比图(a) ;速度对比图(b);

台站 C0029 观测记录和模拟记录的加速度对比图(c);速度对比图(d).

Fig. 10 Observation and simulation waveforms of stations C0028 and C0029 under 10 Hz low-pass filtering

Comparison of acceleration for the observation and simulation records of station C0028 in Fig. (a) and velocity comparison in Fig. (b);

Comparison of acceleration and velocity for the observation and simulation records of station C0029 in Fig. (c) and Fig. (d) respectively.

## References

Ba Z N, Zhao J X, Zhang Y S, et al. 2023. Broadband ground motion spectral element simulation based on GP14.3 kinematic hybrid source model and SPECFEM 3D. *Chinese Journal of Geophysics* (in

Chinese), 66(3): 1125-1138, doi: 10.6038/cjg2022Q0181.

Bielak J, Loukakis K, Hisada Y, et al. 2003. Domain reduction method for three-dimensional earthquake modeling in localized regions, Part I: Theory. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(2): 817-824, doi: 10.1785/0120010251.

CENC. (2022-01-08). (in Chinese). A 6.9-magnitude earthquake in

- Menyuan County, Haibei Prefecture, Qinghai Province. <https://news.ceic.ac.cn/CC20220108014528.html>.
- Chang Y, Zhou H, Yu Y X. 2012. Strong ground-motion simulation of the Wenchuan earthquake. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 34(2): 224-234, doi: 10.3969/j.issn.0253-3782.2012.02.009.
- Ding Y, Wang G X, Yang F J. 2018. Simulation of strong ground motion from the 2017 Jiuzhaigou, Sichuan  $M_s7.0$  earthquake. *Technology for Earthquake Disaster Prevention* (in Chinese), 13(3): 578-587, doi: 10.11899/zzfy20180309.
- Farr T G, Rosen P A, Caro E, et al. 2007. The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2): RG2004, doi: 10.1029/2005RG000183.
- Fu L, Xie J J, Chen S, et al. 2023. Analysis of site amplification coefficient characteristics of Sichuan and its application in strong ground-motion simulation: A case study of 2022 Lushan  $M_s6.1$  earthquake. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 66(7): 2933-2950, doi: 10.6038/cjg2022Q0435.
- GFZ. (2022-01-07). GEOFON event. <http://geofon.gfz-potsdam.de/eqinfo/event.php?id=gfz2022amie>.
- Graves R, Pitarka A. 2004. Broadband time history simulation using a hybrid approach. // Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, Canada.
- Graves R, Pitarka A. 2015. Refinements to the Graves and Pitarka (2010) broadband ground-motion simulation method. *Seismological Research Letters*, 86(1): 75-80, doi: 10.1785/0220140101.
- 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, doi: 10.1785/0120160088.
- Graves R W, Pitarka A. 2010. Broadband ground-motion simulation using a hybrid approach. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(5A): 2095-2123, doi: 10.1785/0120100057.
- Han S, Wu Z H, Gao Y, et al. 2022. Surface rupture investigation of the 2022 Menyuan  $M_s6.9$  earthquake, Qinghai, China: Implications for the fault behavior of the Lenglongling fault and regional intense earthquake risk. *Journal of Geomechanics* (in Chinese), 28(2): 155-168, doi: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022013.
- Han S C, Zhang H J, Xin H L, et al. 2022. USTClitho2.0: Updated unified seismic tomography models for continental China lithosphere from joint inversion of body-wave arrival times and surface-wave dispersion data. *Seismological Research Letters*, 93(1): 201-215, doi: 10.1785/0220210122.
- He C H, Wang J T, Zhang C H, et al. 2017. Determination of seismic parameters for dam sites by numerical simulation of the rupture-canyon wave field. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 60(2): 585-592, doi: 10.6038/cjg20170213.
- Hu X Y, Zhao Z P, Zhang R F, et al. 2023. Seismic resilient design and negative stiffness-assisted nonlinear isolation system for adjacent non-coaxial buildings linked by corridors. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 175: 108227, doi: 10.1016/j.soildyn.2023.108227.
- Laske G, Masters G, Ma Z T, et al. 2013. Update on CRUST1.0-A1-degree global model of Earth's crust. // *Geophysical Research Abstracts*, 15(15): 2658. Vienna, Austria: EGU General Assembly 2013.
- Li C G, Wang H W, Wen R Z, et al. 2021. Three-component ground motion simulations based on the stochastic finite-fault method for the 2021 Maduo  $M_s7.4$  earthquake, Qinghai Province. *Seismology and Geology* (in Chinese), 43(5): 1085-1100, doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2021.05.004.
- Li Z H, Han B Q, Liu Z J, et al. 2022. Source parameters and slip distributions of the 2016 and 2022 Menyuan, Qinghai earthquakes constrained by InSAR observations. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* (in Chinese), 47(6): 887-897, doi: 10.13203/j.whugis20220037.
- Luo C, Lou M L, Gui G Q, et al. 2019. A modified domain reduction method for numerical simulation of wave propagation in localized regions. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 18(1): 35-52, doi: 10.1007/s11803-019-0488-7.
- Maechling P J, Silva F, Callaghan S, et al. 2015. SCEC broadband platform: System architecture and software implementation. *Seismological Research Letters*, 86(1): 27-38, doi: 10.1785/0220140125.
- Pan J W, Li H B, Chevalier M L, et al. 2022. Coseismic surface rupture and seismogenic structure of the 2022  $M_s6.9$  Menyuan earthquake, Qinghai Province, China. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 96(1): 215-231, doi: 10.3969/j.issn.0001-5717.2022.01.018.
- Petersson N A, Sjögreen B. 2014. Super-grid modeling of the elastic wave equation in semi-bounded domains. *Communications in Computational Physics*, 16(4): 913-955, doi: 10.4208/cicp.290113.220514a.
- Petersson N A, Sjögreen B. 2015. Wave propagation in anisotropic elastic materials and curvilinear coordinates using a summation-by-parts finite difference method. *Journal of Computational Physics*, 299: 820-841, doi: 10.1016/j.jcp.2015.07.023.
- Petersson N A, Sjögreen B. 2017a. SW4, Version 2.0. Davis, CA: Computational Infrastructure of Geodynamics, doi: 10.5281/zenodo.1045297.
- Petersson N A, Sjögreen B. 2017b. User's guide to SW4, version 2.0. Livermore, CA: Lawrence Livermore National Laboratory.
- Petersson N A, Sjögreen B. 2018. High order accurate finite difference modeling of seismo-acoustic wave propagation in a moving atmosphere and a heterogeneous earth model coupled across a realistic topography. *Journal of Scientific Computing*, 74(1): 290-323, doi: 10.1007/s10915-017-0434-7.
- Pitarka A, Graves R, Irikura K, et al. 2020. Kinematic rupture modeling of ground motion from the M7 Kumamoto, Japan Earthquake. *Pure and Applied Geophysics*, 177(5): 2199-2221, doi: 10.1007/s00024-019-02220-5.
- Pitarka A, Graves R, Irikura K, et al. 2022. Refinements to the Graves-Pitarka Kinematic rupture generator, including a dynamically consistent slip-rate function, applied to the 2019  $M_w7.1$  Ridgecrest

- earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 112 (1): 287-306, doi: 10.1785/0120210138.
- 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  $M_s6.4$  earthquake on May 21, 2021. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 64(12): 4538-4547, doi: 10.6038/cjg2021P0404.
- Sjögreen B, Petersson N A. 2012. A fourth order accurate finite difference scheme for the elastic wave equation in second order formulation. *Journal of Scientific Computing*, 52(1): 17-48, doi: 10.1007/s10915-011-9531-1.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. 2020. GB/T 17742-2020 The Chinese Seismic Intensity Scale (in Chinese). Beijing: Standards Press of China.
- USGS. (2022-01-07).  $M_6.6$ -northern Qinghai, China. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000g9zq/executive>.
- Wang H, Luo C, Wan J Z, et al. 2021a. A hybrid boundary method for seismic wave propagation problems in slopes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 147: 106773, doi: 10.1016/j.soildyn.2021.106773.
- Wang H, Mu H R, Guo X X, et al. 2023. Experimental and numerical simulation study on mechanical properties of fiber-reinforced plastic seismic isolator. *Engineering Structures*, 275: 115108, doi: 10.1016/j.engstruct.2022.115108.
- Wang S C, Jin X, Zhang H C, et al. 2017. Research on the effects of seismic network density for seismic intensity rapid report. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics* (in Chinese), 37(6): 162-168, doi: 10.13197/j.eeev.2017.06.162.wangsc.018.
- Wang S Y, Petersson N A. 2019. Fourth order finite difference methods for the wave equation with mesh refinement interfaces. *Siam Journal on Scientific Computing*, 41 (5): A3246-A3275, doi: 10.1137/18M1211465.
- Wang X C, Wang J T, Zhang L, et al. 2021b. A multidimension source model for generating broadband ground motions with deterministic 3D numerical simulations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 111(2): 989-1013, doi: 10.1785/0120200221.
- Wang Z D, Yang X P, Yin X X, et al. 2022. Discussion on the automatic processing results for the aftershock sequence of Menyuan, Qinghai  $M_s6.9$  earthquake on 8 January, 2022. *China Earthquake Engineering Journal* (in Chinese), 44(2): 408-414, doi: 10.20000/j.1000-0844.20220125002.
- 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, doi: 10.1785/BSSA0840040974.
- Wessel P, Luis J F, Uieda L, et al. 2019. The generic mapping tools version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20(11): 5556-5564, doi: 10.1029/2019GC008515.
- Xie L L, Xu L J, Tao X Y, et al. 2021. Research status of civil engineering structures across faults and the development of experimental devices for fault simulation. *Engineering Mechanics* (in Chinese), 38(4): 20-29, doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2020.06.0346.
- Yin X F, Wang P, Zhang W, et al. 2022. Strong ground motion simulation and intensity distribution estimation for the  $M_s6.9$  Menyuan, Qinghai, earthquake on 8 January 2022. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 44(2): 237-244, doi: 10.11939/jass.20220011.
- Yin X X, Qiu J T, Li M J, et al. 2022. Three-dimensional velocity structure and seismogenic mechanism of Menyuan  $M_s6.9$  earthquake in 2022. *China Earthquake Engineering Journal* (in Chinese), 44(2): 360-369, doi: 10.20000/j.1000-0844.20220210003.
- Yu Y X, Li Y S, 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, doi: 10.3969/j.issn.1673-5722.2013.01.003.
- Zhang H. 2021. Research on simulating ground-motion fields based on strong ground motion [Master's thesis] (in Chinese). Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration.
- Zhang Q. 2016. Study on regional differentiation of ground motion attenuation relationship [Ph. D. thesis] (in Chinese). Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration.
- Zhao H Y, Chen X F. 2017. Simulation of strong ground motion by the 1975 Haicheng  $M_s7.3$  earthquake. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 60(7): 2707-2715, doi: 10.6038/cjg20170717.
- Zhao Z P, Hu X Y, Chen Q J, et al. 2023. Friction pendulum-strengthened tuned liquid damper (FPTLD) for earthquake resilience of isolated structures. *International Journal of Mechanical Sciences*, 244: 108084, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2022.108084.
- Zhou H, Li Y N, Chang Y. 2021. Simulation and analysis of spatial distribution characteristics of strong ground motions by the 2021 Yangbi, Yunnan Province  $M_s6.4$  earthquake. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 64(12): 4526-4537, doi: 10.6038/cjg2021P0421.
- Zhu G, Gao M T, Ren X M. 2007. Analysis of seismic hazard in the cities of China. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 23 (2): 124-130, doi: 10.3969/j.issn.1001-4683.2007.02.002.

## 附中文参考文献

- 巴振宁, 赵靖轩, 张郁山等. 2023. 基于 GP14.3 运动学混合震源模型和 SPEC-FEM 3D 谱元法的宽频地震动模拟. *地球物理学报*, 66(3): 1125-1138, doi: 10.6038/cjg2022Q0181.
- 常莹, 周红, 俞言祥. 2012. 汶川地震强地面运动模拟. *地震学报*, 34(2): 224-234, doi: 10.3969/j.issn.0253-3782.2012.02.009.
- 丁阳, 王国新, 杨福剑. 2018. 2017 年四川九寨沟  $M_s7.0$  地震的强地面运动模拟. *震灾防御技术*, 13(3): 578-587, doi: 10.11899/zzfy20180309.
- 傅磊, 谢俊举, 陈苏等. 2023. 四川地区场地放大系数特征分析及在强地震动模拟中的应用——以 2022 年芦山  $M_s6.1$  地震为例. *地球物理学报*, 66(7): 2933-2950, doi: 10.6038/cjg2022Q0435.
- 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 2020. GB/T 17742-2020 中国地震震度表. 北京: 中国标准出版社.

- 韩帅, 吴中海, 高扬等. 2022. 2022 年 1 月 8 日青海门源  $M_s6.9$  地震地表破裂考察的初步结果及对冷龙岭断裂活动行为和区域强震危险性的启示. 地质力学学报, 28(2): 155-168, doi: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022013.
- 贺春晖, 王进廷, 张楚汉. 2017. 基于震源-河谷波场数值模拟的坝址地震动参数确定方法. 地球物理学报, 60(2): 585-592.
- 李春果, 王宏伟, 温瑞智等. 2021. 2021 年青海玛多  $M_s7.4$  地震随机有限断层三维地震动模拟. 地震地质, 43(5): 1085-1100, doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2021.05.004.
- 李振洪, 韩炳权, 刘振江等. 2022. InSAR 数据约束下 2016 年和 2022 年青海门源地震震源参数及其滑动分布. 武汉大学学报(信息科学版), 47(6): 887-897, doi: 10.13203/j.whugis20220037.
- 潘家伟, 李海兵, Chevalier M L 等. 2022. 2022 年青海门源  $M_s6.9$  地震地表破裂带及发震构造研究. 地质学报, 96(1): 215-231, doi: 10.3969/j.issn.0001-5717.2022.01.018.
- 强生银, 王宏伟, 温瑞智等. 2021. 2021 年 5 月 21 日云南漾濞  $M_s6.4$  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.
- 王士成, 金星, 张红才等. 2017. 台网密度对地震烈度速报的影响研究. 地震工程与工程振动, 37(6): 162-168, doi: 10.13197/j.eeev.2017.06.162.wangsc.018.
- 王祖东, 杨晓鹏, 尹欣欣等. 2022. 2022 年 1 月 8 日青海门源  $M_s6.9$  地震余震序列自动处理结果探讨. 地震工程学报, 44(2): 408-414, doi: 10.20000/j.1000-0844.20220125002.
- 谢礼立, 徐龙军, 陶晓燕等. 2021. 跨断层土木工程研究与实验装置研发现状. 工程力学, 38(4): 20-29, doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2020.06.0346.
- 尹晓菲, 王芃, 张伟等. 2022. 2022 年 1 月 8 日青海门源  $M_s6.9$  地震强地面运动模拟及烈度分布估计. 地震学报, 44(2): 237-244, doi: 10.11939/jass.20220011.
- 尹欣欣, 邱江涛, 李敏娟等. 2022. 2022 年门源  $M_s6.9$  地震震区三维速度与发震机制研究. 地震工程学报, 44(2): 360-369, doi: 10.20000/j.1000-0844.20220210003.
- 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, doi: 10.3969/j.issn.1673-5722.2013.01.003.
- 张辉. 2021. 基于强震动数据构建地震动时程场研究[硕士论文]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- 张齐. 2016. 地震动衰减关系的区域性差异研究[博士论文]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- 赵宏阳, 陈晓非. 2017. 1975 年海城  $M_s7.3$  地震强地面运动模拟. 地球物理学报, 60(7): 2707-2715, doi: 10.6038/cjg20170717. 中国地震台网中心. (2022-01-08). 青海海北州门源县 6.9 级地震. <https://news.ceic.ac.cn/CC20220108014528.html>.
- 周红, 李亚南, 常莹. 2021. 云南漾濞 6.4 级地震强地面运动的模拟和空间分布特征分析. 地球物理学报, 64(12): 4526-4537, doi: 10.6038/cjg2021P0421.
- 朱刚, 高孟潭, 任雪梅. 2007. 中国城市直下型地震危险性分析研究. 中国地震, 23(2): 124-130, doi: 10.3969/j.issn.1001-4683.2007.02.002.

(本文编辑 汪海英)